



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

제주도 가축시설 밀집지역의 토양
및 지하수 오염특성

濟州大學校 大學院

食品工學科

玄根卓

2011年 2月

제주도 가축시설 밀집지역의 토양 및 지하수 오염특성

指導教授 高 榮 煥

玄 根 卓

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2011年 2月

玄根卓의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長	<u>하</u>	<u>진</u>	<u>환</u>	(印)
委	<u>오</u>	<u>상</u>	<u>실</u>	(印)
委	<u>임</u>	<u>상</u>	<u>빈</u>	(印)
委	<u>송</u>	<u>상</u>	<u>택</u>	(印)
委	<u>고</u>	<u>영</u>	<u>환</u>	(印)

濟州大學校 大學院

2011年 2月

Studies on the Contamination properties
of Soil and Groundwater in a Densely
populated Livestock area in Jeju Island

Geun-Tag Hyun

(Supervised by Professor Young Hwan Ko)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Doctor of Engineering

Department of Food Science and Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

FEBRUARY, 2011

목 차

List of Figures	iv
List of Tables	vi
Abbreviations	viii
Summary	1
I. 서 론	5
II. 연구사	7
1. 제주 지하수의 수질특성 연구	7
2. 오염원분포가 지하수오염에 미치는 영향	8
3. 질산성질소에 의한 지하수오염	9
4. 지하수 오염원 규명방법	10
가. 헥사 다이어그램 및 파이퍼다이어그램	11
나. 오염원과 성분비교	13
다. 질소 안정동위체비($\delta^{15}\text{N}$)	14
III. 재료 및 방법	16
1. 대상지역	16
가. 연구지역 개요	16
나. 연구지역내 환경오염원 분포	19
다. 환경오염원 질소·인 발생부하량	20

2. 토양	21
가. 조사지점	21
나. 분석항목 및 분석방법	21
3. 지하수 및 용천수	23
가. 시료채수 지점	23
나. 지하수 및 용천수의 수질성분 분석	25
다. 질소안정동위체비($\delta^{15}\text{N}$)분석	26
라. 수질특성 분석	27
마. 중금속	27
바. 미생물	27
IV. 결과 및 고찰	30
1. 오염물질 배출부하량의 산정	30
가. 질소 발생부하량 산정	30
1) 제주지역	30
2) 한림지역	35
나. 지역별 질소발생부하량	38
다. 지하수에 영향을 줄 수 있는 질소부하량	42
2. 토양오염 특성연구	44
가. 유기물(OM)	44
나. 질소·인농도	46
다. 이온성분의 거동	49
라. 나트륨흡착비(SAR)	50
3. 용천수 수질특성	53
4. 지하수 수질특성	58
가. 질산성질소 농도	58
나. 지하수 수질특성 분류	60
다. 지하수의 수리 지화학적 특성	64

라. 이온성분간 상관분석	68
마. 양이온과 중금속 거동	69
바. 질소안정동위체비($\delta^{15}\text{N}$)를 이용한 오염원추정	72
5. 가축시설 밀집지역의 미생물오염 특성	76
V. 요 약	81
인용문헌	85
부 록	95



List of Figures

- Fig. 1. Hexa diagram of the groundwater
- Fig. 2. Piper diagram of the groundwater
- Fig. 3. GIS map of the study area showing the zones of pollutant
- Fig. 4. Soil sampling locations in Hallim area
- Fig. 5. Study area showing the location of wells sampled for the groundwater analysis
- Fig. 6. Annual nitrogen load caused by animal manure and livestock construction
- Fig. 7. The amount of loaded contaminant (ALC) of total nitrogen and phosphorus in Jeju
- Fig. 8. The amount of loaded contaminant (ALC) of total nitrogen and phosphorus in Hallim area
- Fig. 9. Spatial distribution of amount of loaded contaminant depending on livestock and chemical fertilizer in Hallim area
- Fig. 10. Spatial distribution of amount of loaded contaminant depending on sewage and natural soil in Hallim area
- Fig. 11. Spatial distribution of amount of loaded contaminant in Hallim area
- Fig. 12. Spatial distribution of total kjeldahl nitrogen (TKN) in soils
- Fig. 13. Spatial distribution of P_2O_5 (mg/kg) in soils

- Fig. 14. Spatial distribution of sodium asorption ratio (SAR) in soils
- Fig. 15. Soil runoff of livestock area: (a) soil runoff flowing into stream; (b) soil runoff flowing into waterways; and (c) underground infiltration by soil runoff in 2009
- Fig. 16. Monthly variation of $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L) of springwater at each sampling site and rainfall (mm)
- Fig. 17. Piper diagrams of the springwater samples in the study area
- Fig. 18. Box diagram of nitrate ($\text{NO}_3\text{-N}$) of the groundwater depending on area (n=80)
- Fig. 19. Piper diagrams showing water types of groundwater (n=90) in Hallim area (Circle : East of Ongpo watershed, Filled delta : West of Ongpo watershed)
- Fig. 20. Spatial distribution of the water types in the groundwater
- Fig. 21. Box diagram showing major elements contents and well depth in Hallim area
- Fig. 22. Box diagram showing major contamination contents and well depth in Hallim area
- Fig. 23. Relationship between $\delta^{15}\text{N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration of groundwater samples
- Fig. 24. Heterotrophic plate count (HPC) enumerated in groundwater samples collected from monitoring wells at each Group

List of Tables

- Table 1. Boundary of Hallim area
- Table 2. Postion of persons, farmland area, and main crops by village in Hallim area
- Table 3. Status of environmental facilities in Hallim area
- Table 4. Status of livestock in Hallim area
- Table 5. Unit loading coefficients for generated contamination loadings
- Table 6. The coordinates of the study area
- Table 7. Composition of m-FC agar
- Table 8. Construction of the structural system of the environmental pollution in Jeju
- Table 9. Structural loading of nitrogen occurred in Jeju
- Table 10. Construction of the structural system of the environmental pollution in Hallim area
- Table 11. Structural loading of nitrogen occurred inn Hallim area
- Table 12. Estimation of nitrogen loading on the groundwater
- Table 13. Chemical characteristics of soils
- Table 14 Predicted contribution of each source to $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration using $\delta^{15}\text{N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ at each sampling site of the springwater

- Table 15. Statistical summary of nitrate (NO₃-N) depending on area
- Table 16. Statistical summary of nitrate (NO₃-N) depending on land use
- Table 17. The water types according to the results of hierarchical cluster analysis
- Table 18. Correlation coefficients among nitrate nitrogen and ion species
- Table 19. Technical statistics quantity of the groundwater cations in Hallim area
- Table 20. Technical statistics quantity of toxic metals of soils in Hallim area
- Table 21. Technical statistics quantity of toxic metals of the groundwater
- Table 22. Predicted contribution of each source to NO₃-N concentration using $\delta^{15}\text{N}$ and NO₃-N at each sampling site
- Table 23. Bacteria identified in groundwater sample (percent of samples with detection of specific bacteria)
- Table 24. Fecal bacteria enumerated in groundwater samples collected from monitoring well at Group 1 and 2, Summer (Concentration in colonies per 50mL)
- Table 25. Fecal bacteria enumerated in groundwater samples collected from monitoring well at Group 1 and 2, Autumn (Concentration in colonies per 50mL)

Abbreviations

ALC	amount of loaded contaminant
CEC	cation exchange capacity
SAR	sodium adsorption ratio
GIS	geographical information system
VOC	volatile organic compound
AEC	anion exchange
$\delta^{15}\text{N}$	ratio of nitrogen isotopes
DNRA	dissimilatory nitrate reduction to ammonium
DOC	dissolved organic carbon
EC	electrin conductivity
TDS	total dissolved solids
PINSTECH	pakistan institute of nuclear science
T-N	total nitrogen
T-P	total phosphorus
CFU	colony form unit
HPC	Heterotrophic plate count

Summary

Livestock excretion from the farms are publicly treated in the plant, but the surrounding soil and groundwater could be influenced by compost or liquid manure applied on the fields. Eventually, soil loading rate increased, changing the soil properties as well as groundwater quality. Therefore, this study was carried out to interpret the characteristics of soil and groundwater which could be brought from the farms in Jeju island. Hallim district has bred so densely populated livestock that the highest loading rate appeared to be evaluated. Especially, the upward green land is mainly composed of pastures on which liquid manure has periodically applied, but on the downward area of crop land, vegetables have been cultivated.

Soil were dug into 30cm deep with shovel and 2 or 3 kg of soil were taken between 20~30cm deep. Going distant from the area of liquid manure applied, 90 samples were taken and dried under the condition of shadow and natural wind. Total nitrogen(T-N), phosphate(P_2O_5), CEC(cation exchange capacity), anions and cations, and toxic heavy metals were measured. We used the values of cations(Ca, Mg, Na) to calculate the SAR (sodium adsorption ratio) in order to evaluate the salt accumulation in soil profile and analysed how the values relate to the contamination sources. In order to evaluate the effect of such soil properties on the groundwater quality, 32 groundwater samples which consist of 27 groundwater, and 8 samples of spring water. For the samples, pH, anions and cations, $\delta^{15}N$ (stable nitrogen isotope ratio), and the microbes derived from livestock source were analysed. We interpreted the soil and groundwater contamination properties in the area of densely populated livestock, by classifying the nitrogen sources with groundwater types and the microbes distribution with the nitrogen sources.

1. Loading rate of nitrogen and phosphate across the Jeju were 12,820 ton-N/yr, and 3,190 ton-P/yr, respectively, of which those of Hallim area were 2,881 ton-N/yr, and 1,101 ton-P/yr, being occupied by 22.0% and 34.5% of the Jeju total. Especially, livestock portion was 2,584 ton-N/yr, being occupied by 89.3% of the loading rate in Hallim, meaning that Hallim area appeared to be most densely populated with livestock farms. On the contrary, those of crop and domestic were 566ton-N/yr and 92ton-N/yr, amounting to 20% or less of livestock.

2. Considering no treatment rate of livestock waste of 10%, fertilizer loss rate in crop land of 40%, and loss rate on the way to the public treatment plant of 40%, nitrogen loading rate on the groundwater quality were estimated to be 258ton-N/yr, 226 ton-N/yr and 18 ton-N/yr for the livestock, crop land and domestic, respectively. The rates were similar in both livestock and crop land, but the domestic came to 10% or less of both the above, meaning that groundwater contamination in Hallim could be mainly due to livestock and chemical fertilizer.

3. The concentration distribution of T-N and P_2O_5 tended to be contrary and clearly differentiated between upward and downward. The upward area of higher T-N has been used for pasture and periodically applied with liquid manure but the downward area used for crop land and mainly applied with chemical fertilizer. This meaning that higher T-N and higher P_2O_5 was an indicator in the area of liquid manure and chemical fertilizer applied, respectively.

4. CEC ranged from 16.3 to 18.2 $cmol^+/kg$ in pasture and feeding crop land but the other areas including the horse breeding ranch ranged from 11.5 to 13.6 $cmol^+/kg$, which suggested that the pastures and feeding crop lands would be being influenced by the manure applied. On the contrary, no variation of pH values were observed among the land uses.

5. SAR values which are calculated from the concentration ratios of Ca, Mg and Na, unlike CEC, showed the highest of 0.19 in the horse breeding ranch, followed by 0.17, 0.16, 0.12 and 0.9 for the pasture, feeding crop land, orchard and crop land, respectively, which indicated that the liquid manure applied would bring the

accumulation of salt contained in the great amount of liquid manure.

6. Geochemical properties of groundwater by depths showed that alkali metal of K, and Na, alkali earth metal of Ca and Mg and halide of Cl and Br decreased as the depths went down. On the contrary, the contaminants of SO_4 and $\text{NO}_3\text{-N}$ increased as the depths were lower, meaning that the shallower groundwater the more easily influenced the groundwater.

7. The water types showed the difference, representing Ca(Mg)- HCO_3 type in the eastern part of Ongpo stream, Na- HCO_3 and Ca- SO_4 in the western part and Na-Cl type downward.

8. Nitrate-nitrogen($\text{NO}_3\text{-N}$) concentration of the groundwater ranged from 0.2 to 28.9 mg/L, of which 22.2% of the groundwaters exceeded the criteria of drinking water, 10mg/L. By the water types the distribution of $\text{NO}_3\text{-N}$ varied from 0.3 to 15.3 mg/L in the type of Ca(Mg)- HCO_3 , 13.9 to 28.9 mg/L in the type of Ca- SO_4 0.2 to 3.0mg/L in the type of Na- HCO_3 and 5.5 to 15.3 mg/L in the type of Na-Cl.

9. Na and K concentrations of the groundwater around the dense livestock facilities tended to increase after the rainy season. Before the season the concentrations of Ca, Mg, Na and K showed 8.8, 10.5, 8.4 and 4.1mg/L, on average, respectively, but after the season showed 7.7, 9.1, 15.1 and 4.8 mg/L. This tendency with Ca and Mg lowered and Na and K arisen after rainy season was estimated to be from the leaching of run-off water flown from the upward, because the Na and K are contained in the livestock waste.

10. $\delta^{15}\text{N}$ values of 44 groundwater samples showed that 10 samples of 12‰ were affected by the livestock and sewage, and 21 samples of 8‰ by the chemical fertilizer, which was consistent with the surrounding land use. In addition, 13 samples of 12~8‰ showed different values according to the sampling period. However, the groundwater contamination of HS9, HD13 and HD14 within the area of dense livestock facilities were highly contributed by 91.0%, 83.5%, 92.5%, respectively, with livestock or sewage.

11. The distribution features of microbes showed that the groundwaters of

Ca(Mg)-HCO₃ type were subject to the contamination of fecal coli form, 15 samples(39.4%) of 38, on the other hand, no microbes were observed in the type of Na-HCO₃, which means the more easily affected from the surface the more vulnerable the microbe contamination of the groundwater.

12. From the result of separation and identification for the coliform, the microbes derived from the livestock and sewage were separated with *Escherichia coli* 26.3%, *Citrobacter spp.* 15.8%, *Enterobacter spp.* 14.5% and *Klebsiella pneumoniae* 10.5%, on the other hand, from the soil with *Serratia spp.* *Aeromonas hydrophila* *Pseudomonas aeruginosa* 3.5~5.2%, This suggested that most microbes could be derived from the surrounding livestock facilities.

Conclusively, the densely populated livestock facilities could positively influence the surrounding soil by increasing the soil fertility of CEC and T-N, but bring the negative effect of salt accumulation. However, in spite that the groundwater contaminant loading rate derived from livestock facilities is more than that from chemical fertilizer, actual groundwater contamination was more influenced by the chemical fertilizer. which was interpreted that groundwaters were located near the crop land, but far away from or more upward in the livestock facilities. But the groundwaters susceptible to the influence of upward run-off water and in the catchment, even though it is downward, was subject to the influence of dense populated livestock facilities. In particular, the groundwater vulnerable to the surface contamination show an evidence of microbe contamination so that further investigation on the contamination pathway would be required.

I. 서 론

축산시설 밀집지역에서는 가축분뇨 등 폐기물이 주변 농경지 처리에 퇴비나 액비 살포 등으로 인하여 토양 및 지하수의 오염잠재성이 높을 것으로 예상되고 있다.

제주지역은 약 80%이상이 전형적인 화산회토로 구성되어 투수성이 좋은 토양 환경을 가지고 있다(1). 특히 가축시설 밀집지역이나 기업화된 농작물 재배지역인 경우는 가축분뇨나 화학비료 등에 의해 높은 환경오염 잠재성을 가지고 있어 주변 지하수오염에 영향을 줄 수 있는 토양환경을 가지고 있다.

1990년 이후 제주지역은 인위적 오염원에 의한 지하수 오염현상이 점차적으로 나타나고 있으며 지하수 오염의 주요지표는 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$)와 염소이온(Cl) 등으로서 이들 오염지표는 토양입자에 흡착하는 성질이 적어 빗물과 함께 지하수로 유입되기 때문인 것으로 보고되고 있다(1-11). 제주도 환경자원연구원에서 지하수의 수질 모니터링 조사결과에 의하면 동부지역은 해수의 혼입으로 인해 염소이온이 높고, 서북부지역은 질소원에 의한 질산성질소농도가 높은 것으로 보고되고 있다(12). 이와 관련해서 제주특별자치도(13)에서는 환경오염원을 생활계, 가축계, 농업계 등으로 오염부하량을 파악하고 지하수 수질보전을 위하여 지역특성을 고려한 환경관리 정책방안을 제시하였다. 지하수 오염원을 규명하기 위하여 Yamamoto 등(14)과 Song 등(3)은 질소안정동위원소($\delta^{15}\text{N}$)를 이용한 지하수 중 질산염오염도를 조사 연구한 결과 화학비료, 가축분뇨 및 오수, 토양으로부터 기인된다고 보고하였다. Park 등(15)은 동위원소(O, H, S, N) 기술을 이용하여 제주 동부지역 지하수의 염수화 현상을 연구하였고, 서부지역중 대정지역의 지하수와 용천수의 수질 중 질산성질소의 오염은 강우에 의한 영향이 크며 축산폐수와 같은 점오염원보다는 농사용 시비에 의한 화학비료 등 비점오염원에 의한 것으로 보고하고 있다. Thorburn 등(16)은 호주 북동부 연안의 농업지역에서 장기 지하수 모니터링 자료를 활용하여 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 변화추세를 분석한 결과 오염부하량이 증가함에도 불구하고 안정된 지하수(Steady), 증가하는 지하수(Rising), 감소하는 지하수(Falling), 강수량에 따라서 수질변동이 심한 지하수(Varying) 등 4개로 분류하였다. 이중 수질 변동이 심한 지하수는 지표의 오염영향을 쉽게 받기

때문에 지표의 오염특성이 지하수에 직접 영향을 미치는 것으로 보고하였다. Oh 등(10)은 비료 손실량 측정기(Lysimeter)를 이용하여 토양수와 지하수의 이온특성을 분석한 결과 주변 지하수의 수질변동이 심한 지역에서는 지하수의 특성이 토양층에서 채취한 토양수의 특성과 유사함을 보고하였다. Lee 등(17)은 울산지역의 토지이용도에 따른 지하수 수질 및 오염특성을 파악하여 지하수의 오염정도를 평가한 결과 지하수의 화학조성은 토지이용도에 따라 많은 영향을 받은 것으로 해석하였다.

대수층과 고토양층(Paleo soil) 및 암석에 존재하는 미생물에 대한 연구가 수행되기 전까지는 세균이 지하수 층에 존재하지 않는 것으로 인식되어져 왔으나 최근의 연구결과에 의하면 세균, 바이러스 및 원생동물이 지하 깊은 곳에서까지 다양한 종류로 존재하고 있는 것으로 밝히고 있다(18). 특히 분변성오염의 지표가 되는 지표세균에 대한 분석을 실시하였는데 지하수에 주로 존재하는 세균속은 *Acinetobacter*, *Eikenella*, *Moraxella*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Micrococcus* 속이라고 밝혀졌으며, 지하수에 일반적으로 존재하지 않는 Enterobacteriaceae 그룹과 *Staphylococcus*속, *Enterococcus*속이 조사관정에서 검출됨에 따라 이들 세균이 지하수 분변성 오염판정의 지표세균으로 사용할 수 있음을 확인되었다.

지하수 수질오염 상태를 동위원소기술과 이온성분을 이용하여 오염기원을 규명하는데 다소 어려움이 있으며 보다 세밀한 규명을 위해 지하수 내 미생물군집에 대한 연구를 통하여 토양과 지하수의 상관성을 분석할 필요성이 있다.

본 연구의 시료는 토층을 삼으로 30cm까지 파고 20~30cm 사이의 토양을 채취하였다. 주로 액비가 살포되는 지역을 중심으로 모두 90개소에서 채취하여 풍건한 후 총질소, 인산염(P_2O_5), CEC(양이온치환용량), 음·양이온 및 유해 중금속을 측정하였다. 양이온값을 이용하여 염류집적영향을 평가하기 위해 SAR(Sodium Adsorption Ratio)값을 계산하고, 이들 값이 오염원과의 관계를 분석하였다. 이러한 토양오염 특성이 지하수에 미치는 영향을 평가하기 위하여 지역 내 대표적인 27개 지하수와 5개의 용천수를 채수하여 pH, 음·양이온, $\delta^{15}N$ (질소안정동위원소비), 오염원 기원 미생물의 존재유무 등을 측정하였다. 지하수의 수질특성별로 $\delta^{15}N$ 에 의한 지하수 내 질소 오염원을 구분하고, 오염원별 미생물분포 특성을 규명함으로써 가축시설밀집지역의 지하수 오염특성을 해석하였다.

II. 연구사

1. 제주 지하수의 수질특성 연구

제주지역 지하수의 경우에는 다른 지역에 비해 토양·지질특성 및 강우량 등 환경적 조건이 지역별로 상이하기 때문에 국지적 여건을 고려하여 지하수 수질 특성을 연구할 필요가 있다.

제주지역 지하수에 대한 수질화학적 분야의 연구는 1980년대 이후부터 꾸준히 수행되어 왔으며, 제주지역 지하수의 수질 화학적분야에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 오염형태는 질산성질소와 같은 인위적 오염(1-8) 및 해수침입(9-11, 21, 22)에 대한 것이 대부분을 차지하고 있다.

Han 등(19)은 Cl와 NO₃를 제주도 지하수 수질에 가장 많이 나타나는 지표물질로 제시한 바 있다. Bu와 An(20)은 제주도 동부지역의 지하수가 다른 지역에 비해 해수 침입이 활발한 것으로 보고하였다.

또한 제주지역 지하수에 대한 수리지구 화학학적 특성에 대하여는 지하수와 강우 상호작용, 지하수의 연령과 수질과의 상관성(23), 미량원소 용존특성(24), 다변량분석을 통한 통계학적 수질해석(12), 기능성분류 분석과 산출특성(25) 등에 관한 연구가 수행된 바 있다.

Park(26)은 제주지역의 지하수의 수질유형을 Na-Mg-HCO₃ 형과 Mg-Na-HCO₃ 형이 대표적인 것으로 제시하였다. 또한 제주지역 지하수의 수질특성은 내륙지역의 화강암이나 편마암 등의 대수층에서 Ca 유형이 우세한 경우와 대비되며 이는 대수층 현무암질 암석에서 감람석(olivine), 휘석(pyroxene) 등과 같은 철고토 광물(ferromagnesian minerals)이 풍화되어 Na와 Mg성분이 용해되기 때문인 것으로 해석하였다.

Hyun 등(12)은 제주 전지역 지하수와 용천수 182개소에 대한 주성분 분석 결과를 바탕으로 지역에 따라 제1성분은 해수침입(동부지역), 육상오염원(서부 및 북부지역) 및 HCO₃를 지표로 하는 청정수질(남부지역)이고, 제2성분은 육상오염원(남부지역) 및 청정수질(동부, 서부 및 북부지역)로 제시한 바 있다.

Kang 등(27)은 제주지역에서 표선유역 지하수의 수리지구화학적 특성과 표선유역 화산회토 공극수의 수질화학과 물-토양 상호작용 연구, 시추코어를 이용한 물-광물 상호작용 해석연구를 통해서 표선유역 대수층에 분포하는 퇴적 클레이층과 스코리아층이 지하수의 수리지구화학적 특성에 영향을 미치는 주요 요소일 가능성을 제시하였다.

이와 같이 제주지역의 지하수에 대한 화학적 및 수리지구화학적 분야의 연구는 질산성 질소의 유입과 해수침입에 대한 것을 제외하면 제주 전역 지하수를 대상으로 한 광역적 연구가 대부분으로 환경오염 잠재성이 높은 지역에 대한 국지적인 오염에 대한 원인규명 및 대책 등에 관한 연구와 수리지구화학적 해석을 통한 오염연구는 찾아보기 어려웠다. 특히 지하수 오염지역에 대한 지하수내 미생물군집과 발생빈도에 대한 오염원과의 상관성 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

2.. 오염원 분포가 지하수오염에 미치는 영향

무기성 질소인 화학비료와 유기질 비료에서 추정되는 작물의 질소량을 보면 비 90 kg/ha에서 셀러리 958 kg/ha까지 10배 이상의 차이가 있었다

일반적으로 작물은 생식생장기나 영양생장기에 따라 많은 질소를 필요로 하고 있는데 셀러리나 시금치와 같은 야채는 영양 생장기에 수확하고 토마토와 같은 채소류는 영양생장·생식생장 동시 진행기에 수확을 연속적으로 행하기 때문에 질소수확 형태가 된다. 따라서 질소수확 형태의 작물은 생육기간을 통해서 토양 중에 많은 질소를 필요로 하기 때문에 시비량이 많게 되는 경향이 있다. 한편 양배추와 같은 결구야채는 생장의 후기에 수확하기 때문에 질소흡수 형태로 되며, 생식생장기에 수확을 하도록 하는 작물로 분류되어진다. 이들 형태별 작물은 수확 전에는 그다지 질소를 필요로 하지 않기 때문에 작물 흡수량에 가까운 시비량으로 충분하다(28, 29). 질소시비량이 많다는 것은 공급량에서 흡수량을 뺀 나머지가 과잉질소량이 많게 되는 경향이며, 야채를 수확한 직후에 나지기간에는 질소 용탈이 쉽게 일어난다. 또한 시비직후에 작물이 아직 초기생육일 때는 많은 강우가 내릴 경우에도 무기성질소가 용탈될 가능성이 높다. 반대로 이러한 질소의 손실을 모험적으로 감안하여 여분의 질소를 시용할 필요가 있다라고 말할 수 있지만 질산성질소의 용탈을 저감하기 위한 대책은 질소흐름을 충분하게 파악하고 과잉질소를 될 수 있는 한 적게 시비하

는 것이 좋다.

영양염 재활용의 관점에서 가축분뇨 등 유기질 자재의 농경지 환원이용이 추진되어지고 있다. 전국적인 측면에서 보면 가축분뇨 추비로서 농경지에 시용되어진 질소는 화학비료의 약 절반에 해당된다(30). 가축분뇨 추비에서 무기화되는 질소도 포장에 질소투입량을 고려하지 않으면 그 무기화 속도의 추정은 어렵다(31).

3. 질산성질소에 의한 지하수오염

지하수 오염대사를 살펴보면 동물, 식물 등의 생명체에는 유기물의 질소 (단백질, 아미노산 등을 포함한 질소화합물)가 존재하고 토양 중에서는 질화세균 등 토양미생물에 의해 짧은 기간에 암모니아성질소($\text{NH}_3\text{-N}$), 아질산성질소($\text{NO}_2\text{-N}$), 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$)로 변화한다(32).

퇴비 등 식물 유래의 유기비료는 물론 생활폐수, 축산폐기물 등 유기성 폐수가 포함된 질소성분도 이 분해과정을 거친다. 화학비료의 질소성분은 대부분 황산암모늄(암모니아성 질소), 요소의 형태로 포함되어져 있으며, 토양 중에서 같은 토양미생물의 활동으로 아질산성 질소, 질산성질소로 변화한다. 작물에서는 주로 질산성질소를 이용하며 일부의 작물인 경우 암모니아성 질소로서 흡수되어진다. 질산성질소는 물에 쉽게 녹아서 강우에 의한 용탈로 경작 토층에서 포화대로 이동하고 지하수의 농도상승과 오염을 일으킨다(32, 33).

비료성분은 토양 중에 질산성질소로 변화되는 과정에서 수소이온이 방출로 인해 토양의 산성화가 일어날 수 있으며 지하수나 부근의 저류지가 산성화되고 이로 인해 알루미늄이나 중금속류가 용출되고 농도상승을 초래한다고 알려져 있다(34).

질산성질소의 용탈은 뿌리영역 토양에 존재하는 질산성질소가 강우나 관수에 의해 유출되어 지하수로 이행하는 과정이라고 정의한다. 토양입자의 표면은 일반적으로 (-)전하를 가지고 있고 양이온인 암모니아성 질소는 경작토에 침적되기 쉽지만 음이온의 질산성 질소는 용이하게 용탈된다. 비료관리나 기상 토양조건 등은 질산성질소의 용탈을 결정하는 중요한자이며 작물의 생육을 보정하면서 질산성질소의 용탈을 저감할 수 있는 비료관리를 확립하기 위해서는 영향인자의 혼입을 적절하게 평가할 필요가 있다(33).

비료관리는 질산성질소의 용탈에 미치는 영향을 해명하기 위해 약 0.12ha의 밭포장에

속효성 비료구(400kg N/ha/yr), 완효성 비료구(400kg N/ha/yr), 돈분 퇴비구(돈분 효율을 50% 가정하여 800kg N/ha/yr), 무 비료구의 4개 처리구를 설계하여 옥수수-배추(또는 양배추)의 재배체계에서 7년간 연용관리를 실시한 결과(33) 심도 1m에서 토양용액중의 질산성질소 농도의 추이를 보았는데, 속효성비료 및 완효성 비료구에서는 약 1년 반후에 시비의 영향이 나타나기 시작하였고, 그 후는 각각 40~60 mg/L, 30~50 mg/L의 고농도로 나타났다. 다만 완효성 비료구에서는 속효성 비료구보다 수확정도가 높았기 때문에 질산성질소 농도를 저감할 수 있다고 사료된다(33, 34). 한편 퇴비구에서는 처음 3년은 무비료구와 같은 정도의 농도였지만 서서히 상승하여 시험후반에는 화학비료구와 동일한 농도로 나타났다. 이것은 토양 중에 축적되어진 퇴비유래의 유기성질소의 무기화가 증가하여졌기 때문이라고 추정된다. 이처럼 작물에 이용되지 않고 토양 중에 잔류되어진 유기성질소는 재배기간에 무기화되어 질산성질소의 용탈에 영향을 주는 것으로 사료된다(35-39).

기상과 토양등의 입지조건도 질산성질소의 용탈에 영향을 주는 것으로 사료된다. 미국 위스콘신주(40) 및 덴마크(41)에서 실시한 실험에서 강수량이 많은 경우에 용탈수 중의 질산성질소가 상승한다고 하였다. 한편 미네소타주에서 실시한 시험에서는 강수량이 많아지게 되면 농도저하가 나타난다고 하는 보고도 있다. Bergstrom과 Jonhansson(42)은 관수처리가 질산성질소의 용탈에 미치는 영향보다도 유기물함량이나 토양구조에 의한 영향 측면이 크다고 하고 있으며, 강우조건과 질산성질소 용탈과의 관련은 복잡하다.

Matumaru(43)은 라이시미터에 의한 재배시험을 실시하여 화산회토(시비량의 25~32%)와 사질토양(시비량 58~66%)에서 질소 용탈율이 크게 차이가 있는 것을 밝혔다. 또한 일본의 경지 51%를 점하고 있는 검은 흙토는 높은 음이온 교환능력(AEC)을 가지고 있기 때문에 질산성질소를 흡착할 가능성이 지적되고 있다(44).

4. 지하수 오염원 규명방법

현재 질산성질소에 의한 지하수 오염원인 규명 및 그 기여율을 추정하는 방법으로는 지하수 해석법, 질소안정동위체비법, 질소원단위법, 수치시물레이션법 등이 있다. 한가지의 방법으로는 오염원인을 규명하기 곤란할 경우는 지역의 특성을 감안하여 실시 가능한 몇 가지의 방법을 적용시키는 것이 바람직하다.

가. 헥사 다이어그램 및 파이퍼 다이어그램

수질해석법으로는 오염지하수의 수질과 배경지역의 자연상태에서의 지하수 수질을 비교하는 방법이며, 인위적 오염정도와 오염원인을 규명할 수 가 있다.

지하수 수질해석에는 헥사 다이어그램(Hexa diagram)과 파이퍼 다이어그램(Piper diagram), 농도상관관계 등을 이용하는 방법이 있다(56).

지하수질 조사결과로 헥사 다이어그램과 파이퍼 다이어그램을 작성하고 토지이용과 대수층별의 지하수 유동 등을 감안하여 그 계절적 변화와 지점별 변화에서 질산성질소 등의 공급원을 어느 정도 추정할 수 있다. 또한 질소성분과 각 공급원 관련성분과의 농도 상관관계를 작성함으로써 질소공급원을 추정할 수 있다.

헥사 다이어그램법은 지하수 중의 주요 용존이온의 당량농도를 수평축에 작성되어지고 각 점을 직선으로 연결되어 만들어진다(Fig. 1). 장점으로는 그림이 간단하여 도형에서 수질조성과 그림의 크기로 용존성분량을 알 수 있으며, 도형이 단순하여 수질비교가 용이하고 질산성질소 등의 오염원을 파악하기 쉽다.

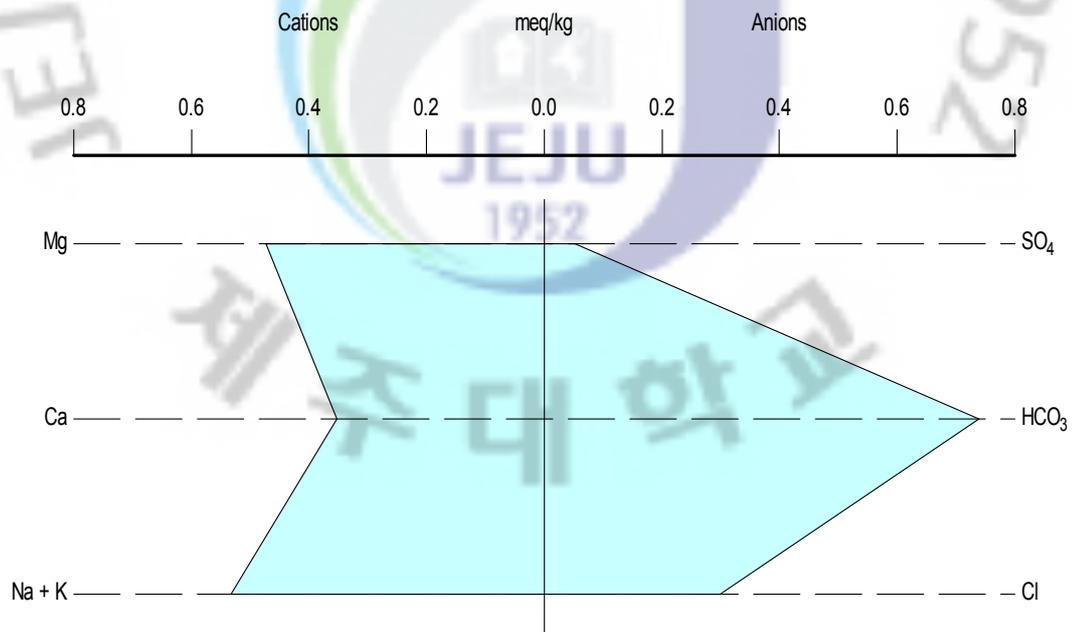


Fig. 1. Hexa diagram of the groundwater.

일반적으로 경작지에 화학비료로서 유안비료, 중화제로서 고토석회를 시용했을 경우에 자연상태의 헥사 다이아그램과 비교해서 질산이온, 황산이온, 칼슘이온 및 마그네슘이온이 증가한다. 이처럼 헥사 다이아그램에서는 지하수 수질의 특성이 그림의 크기나 형태로 표현되어지며, 이것을 지도상에 각 지점별로 배열함으로써 질소공급원의 추정치 용이하다.

파이퍼 다이아그램인 경우는 다이아몬드형의 그림으로 각 측면 축에 용존이온 당량비율로 하여 그래프를 작성하고 지하수 수질을 도식화하는 방법이다(Fig. 2). 장점으로는 도식화되어진 위치에서 수질조성을 알 수 있으며, 다른 물이 혼합된 것과 그룹간의 상호관계를 알 수 있는 특징을 가지고 있다.

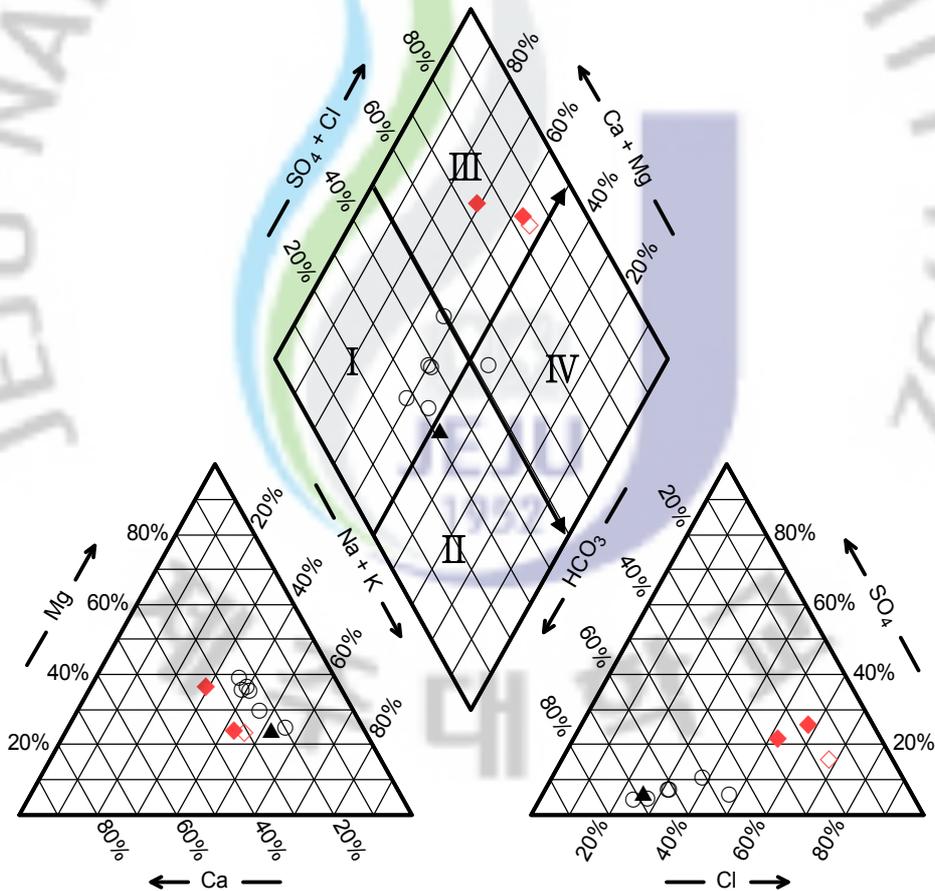


Fig. 2. Piper diagram of the groundwater.

일반적으로 지하수는 지층이 이동하는 과정에서 성분조성이 계통적으로 변화하며 인위적인 영향을 받지 않았을 경우는 I 그룹에서 II 그룹으로 이동하고 인위적인 영향을 받았을 경우는 I 그룹에서 III 그룹으로 변화하는 경우가 많다. 지하수 수질의 공간적, 시간적인 변화를 해석하는 것으로 오염원을 추정할 수 있는 것이다.

파이퍼 다이어그램에서 지하수의 수질유형은 주로 양이온 및 음이온의 상대적인 당량 농도에 따라 Ca(Mg)-HCO₃, Ca-SO₄(NO₃), Na-HCO₃, Na-Cl의 4가지로 분류할 수 있다(7, 8, 15, 26, 27).

양이온 중에서는 Ca와 Mg의 합과 Na와 K의 합을 비교하여 전자가 우세하면 Ca형, 후자가 우세하면 Na형으로 하고 음이온은 HCO₃와 CO₃합과 Cl, SO₄의 합과 비교하여 전자가 우세하면 HCO₃형, 후자가 우세하면 Cl형으로 정한다. Ca(Mg)-HCO₃유형은 암반과 반응에 의해 주로 나타나며, 심부 암지반일수록 Na-HCO₃ 유형으로 바뀌어 나타난다. 또한 해수나 인위적 오염을 받을 경우는 Na-Cl형이나 Ca-SO₄(NO₃)형으로 나타난다.

나. 오염원과 성분비교

농경지 대부분을 차지하고 있는 미국 핑크스프링분지에서는 1960년대부터 1980년대에 걸쳐 농지에 시비량을 2.5~3배 증가로 처음 3 mg/L였던 지하수의 질산성질소농도가 10 mg/L이상까지 증가되었다고 보고하였다(45). 일본에서도 농경지의 우물 중에 15%가 환경기준치를 초과하고 있다(46). 그와 반대로 논밭지대에는 지하수 수질기준을 초과하고 있는 우물은 오히려 0.05%에 불과한 것으로 밝혀졌다. 시즈오카현의 차밭에서는 1970년대에 지하수중 질산성질소가 5 mg/L였던 것이 1980년대에는 20 mg/L로 증가하였고(47), 고랭지 야채밭의 지하수 중 질산성질소 농도는 최고 90 mg/L까지 검출되었다(48). 또한 밭지대를 흐르고 있는 지하수 흐름에 따라 질산성질소 농도가 증가하는 등(49) 질소비료와 지하수오염은 높은 상관성을 가지고 있다.

농경지에 있어서 지하수 중의 질산성질소농도는 봄부터 여름까지 조금씩 높아지는 경향이 보이거나 혹은 연간 변동 폭이 작은 경우도 보고되어지고 있다(45, 46). 이것은 여름 경작시비 혹은 미생물활동이 활발하게 됨에 따라 초여름에 토양중의 질산성질소농도가 높아지는 것이 원인이라고 보고하였다. 또한 후자에 대해서는 질산성질소가 지하에 침투하는 과정과 대수층에 대해서 확산이나 분산에 의해 계절적인 변동이라고 해석하였다.

지하수 중의 질산성질소는 산화적인 상태에서는 안정되지만 환원적인 상태로 되면 탈질되어진다고 알려져 있다(55). 지하수 중의 탈질에는 용존산소(DO)농도가 낮고, 전자공여체로 되는 용존성 유기탄소(DOC) 농도가 높으며, 수온이 높고 pH가 중성인 조건이 전제될 필요가 있으며, 일반적으로 피압지하수 중의 탈질은 일어나기 어렵다.

지하수 중의 탈질에 $\delta^{15}\text{N}$ 치법을 이용한 연구가 많이 발표되어지고 있는데 화학비료를 6년간 사용한 집약 경장지(400 kg N/ha/yr)에 대해서 토양용액을 심도별로 조사한 결과를 보면 깊이 1m에서 41 mg/L였던 질산성질소농도는 깊이가 깊어짐에 따라 저하하고 3.5m의 지하수면 부근에서는 4 mg/L였다. 이때 $\delta^{15}\text{N}$ 치는 +2.2‰에서 +8.9‰로 상승하였고, 탈질이 일어났을 가능성이 지적되고 있다(33). DOC농도가 높은 환경 하에서는 질산성질소가 암모니아성 질소로 환원되어질 수 있어 이화학적 질산 환원에 의해 암모니아생성(Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium 혹은 DNRA)이라고 불리고 있다. Bulger 등(51)은 폐기물처리장을 기원으로 하는 질산성질소농도가 높은(20~25 mg/L) 지하수는 DOC농도가 높고(3.1~20 mg/L), 환원적인 상태의 지하수와 혼합한 환경 하에서는 DNRA에 의해 질산성질소는 거의 암모니아성질소로 변화한다고 보고하였다.

다. 질소 안정동위체비($\delta^{15}\text{N}$)

질소에는 ^{14}N 와 ^{15}N 2가지의 안정동위체가 존재하고 대기 중에서의 존재비는 99.635%와 0.365%로 거의 일정하게 유지된다. 질소공급원의 종류에 따라 두 가지 안정동위체의 존재비가 거의 일정한 범위가 되려는 성질을 가지고 있기 때문에 이 성질을 이용하여 지하수의 질소 공급원을 추정할 수 있는 방법이 질소 안정동위체비법이다(56).

질소안정동위체비는 $\delta^{15}\text{N}$ 로 표현되어지고 $\delta^{15}\text{N}$ 치는 대상물질의 안정동위체비를 대기기준으로 해서 천분율로 나타내는 것이고 다음 식(1)에 따라 산출되어진다.

$$\delta^{15}\text{N} (\%) = \{(R_{\text{시료}}/R_{\text{대기}}) - 1\} \times 1000 \text{-----}(1)$$

$$R = {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}, R_{\text{대기}} : 3.663 \times 10^{-3} (= 0.365\% \div 99.635\%)$$

이 $\delta^{15}\text{N}$ 치는 강수 -8~2‰, 화학비료 -7.4~6.8‰, 가축분뇨 10~22‰, 하수처리수 8~15‰ 등 값으로 보고되어지고 있고(76, 84, 85), 이것을 이용하여 지하수

오염원을 추정하고 있다.

또한 토양환경 중에는 다양한 반응과 혼합이 이루어지고 있기 때문에 지하수의 $\delta^{15}\text{N}$ 치는 변할 수가 있어 $\delta^{15}\text{N}$ 로 공급원을 추정할 경우에는 지표의 토지이용상황과 토양특성, 지하수의 흐름방향 기타 다른 수질 성분결과 등을 충분히 고려할 필요가 있다.

질소 오염원은 농업활동에 따라 생활계 폐수나 축산계 폐수의 지하침투 등으로 질산성 질소의 부하에 기여하고 있다(50). 지하수 오염대책을 세우기 위해서는 먼저 지하수의 질산성질소의 기원을 밝혀야 할 필요가 있다. 지금까지 질산성질소의 기원 추정으로 질소안정동위체 자연존재비 ($\delta^{15}\text{N}$ 치)를 이용하고 있다(48, 51). 대기 중의 질소를 고정해서 제조하는 화학비료의 $\delta^{15}\text{N}$ 치는 0에 가깝지만 많은 대사과정을 걸친 하수처리수(+8~+18%)나 유기질비료(+3~+15%)의 $\delta^{15}\text{N}$ 치는 상대적으로 높다(51).

화학비료($\delta^{15}\text{N}$: +0~+1%)를 이용한 밭포장에 대해서 깊이 1m의 토양용액 중 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 0~+2%였지만 돈분 퇴비($\delta^{15}\text{N}$ 치 : +14%)를 이용한 포장에서는 +12~+13%의 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 나타내며, 질소 안정동위체비에 시비 질소의 값을 반영한 결과였다(52). Yamamoto 등(14)는 일본 미야고섬의 지하수중의 질산성질소는 화학비료, 축산폐기물 및 생활폐수, 토양유래의 3가지를 기원으로 한 것이 포함되었다고 가정해서 질산성질소농도와 $\delta^{15}\text{N}$ 값에 대해서 연립방정식으로 오염원의 기여율을 산정하는 방법을 제안하였다.

이상과 같이 질산오염의 기원추정에 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 이용한 수법은 유용하지만 실제 지하수는 다양한 기원의 질소가 복잡하게 혼합한 것이 많고 더욱이 탈질처럼 질소가 환경 중에 방출되어진 후 동위체 효과를 고려할 필요가 있기 때문에 질소 동위체비($\delta^{15}\text{N}$)법에 과도한 기대는 바람직하지 못하다. 농업활동에서 오염되어진 지하수는 황산이온, 칼슘이온, 마그네슘이온 농도가 높은 특징을 가지고 있으며, 생활계 폐수에 의해 오염되어진 지하수는 나트륨이온과 염화물이온 농도가 높고(50), 대장균을 포함하는 것도 있다(53, 54). 기원추정의 정확도를 높이기 위해서는 이러한 토지이용에 고유의 수질특성과 원단위법 등을 조합하여 해석할 필요가 있다.

Ⅲ. 재료 및 방법

1. 대상지역

가. 연구지역 개요

오염물질 발생 및 배출부하량 산정하기 위해 연구대상 지역을 제주전지역과 가축시설 밀집지역인 제주시 한림지역으로 선정하였다.(Fig. 3).

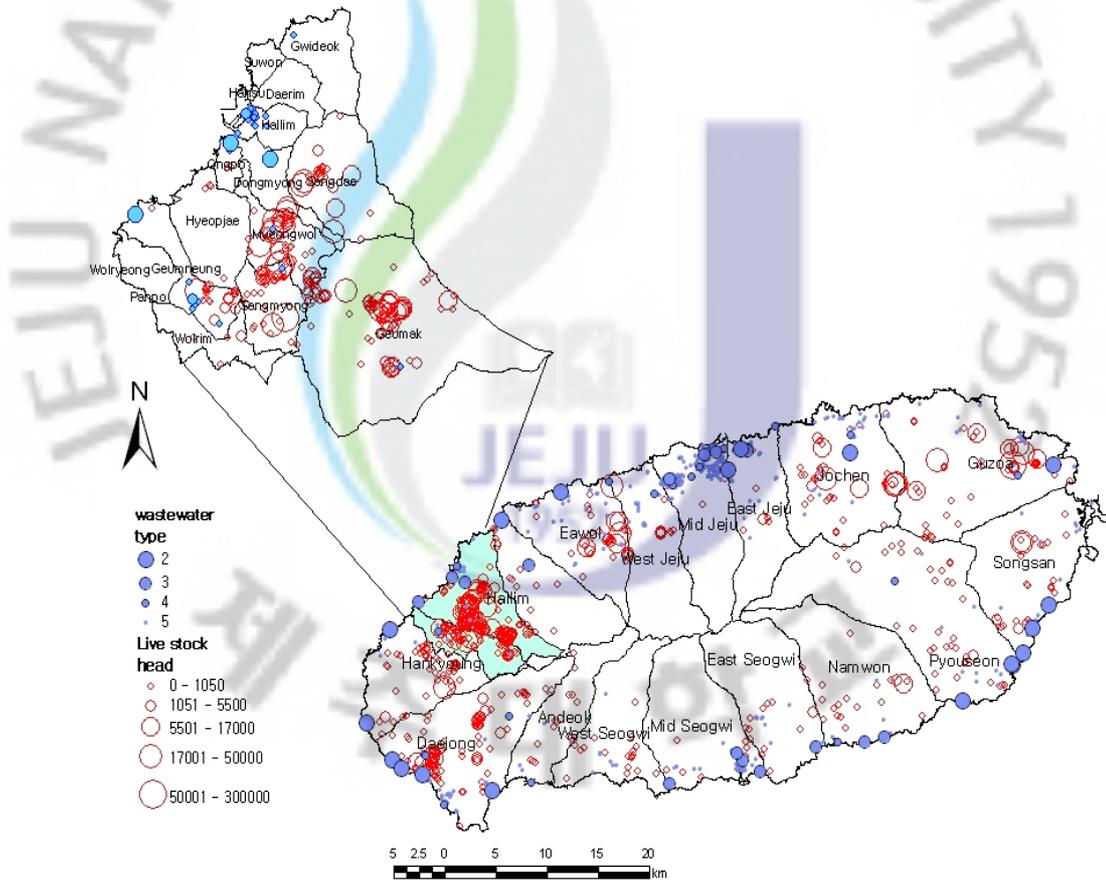


Fig. 3. GIS map of the study area showing the zones of pollutant.

Table 1. Boundary of Hallim area

Longitude			Latitude		
Limit	Name of village	Longitude	Limit	Name of village	Latitude
East	Geumak	126°57' 0"	South	Wolrim	31°18' 16"
West	Wolryeong	126°10' 19"	North	Gwideok	34°0' 28"

한림읍지역은 한라산중심으로 산북서부지역에 위치하며 동쪽으로는 애월읍, 남서쪽으로는 한경면, 남쪽에는 안덕면에 접하고 있으며 북쪽으로는 제주해협과 접해있는 제주 서북부지역의 생활권 중심지역이다(Table 1).

한림읍지역의 총 인구는 2008년 현재 19,912명으로 21개 마을로 나누어져 있으며, 총면적 91.2km²으로 제주 총면적의 4.9%를 차지하고 있는 지역이다. 해발 200m이하 지역은 대부분 양배추와 같은 야채류가 많으며, 그 위쪽은 목장지역으로 양돈과 소와 말 등이 사육이 되고 있다.

임야지역은 32.6%인 29.7km²이고 농경지는 전체의 33.5%인 30.6km²로써 주요 작물로는 야채류인 양배추, 양파 등이며, 해발 100~200m인 중산간지역인 경우는 감귤, 화훼, 특용작물이 재배되고 있다(Table. 2).

인구는 한림1·2리, 수원리, 용포리에 많이 분포되어 있으며, 1차 산업인 농업, 축산업, 어업에 대부분 종사하고 있다.

제주도의 중심부인 한라산 서측 중산간에서 발원한 용포천 유역을 집수역으로 하여 행정구역상으로는 제주시 한림읍 일대에 걸쳐 있으며 경위도 상으로는 북위 31°22' 30", 동경 126°17' 30"를 유역의 중심으로 한 하천이 있다.

용포천은 한라산 서측 금오름(EL.430m)을 기점으로 서측으로는 망오름(EL.152m)과 동측으로는 누운오름(EL.407m)에서 이어지는 완만한 구릉지가 북서측으로 향하면서 유역경계를 이룬다. 실제 하천 거리는 한림정수장 위쪽에서 바닷가까지 550m이다. 애월읍지역과 경계를 하는 금성천은 건천으로 평상시 물흐름이 없으며 한경면과 경계를 하는 월령천도 마찬가지이다.

Table 2. Postion of persons, farmland area, and main crops by village in Hallim area

Site	Person	Area		Main crops
		Total (ha)	Farmland (ha)	
Gwideok	2,148	647.5	402.3	mandarin, onion, cabbage, soybean
Suwon	1,119	67.2	48.7	onion, cabbage, floriculture
Hansu	739	12.8	6.1	cabbage
Daerim	1,484	311.2	234.1	mandarin, onion, cabbage, garlic
Hallim	5,735	203.7	122.3	onion, garlic, mandarin, cabbage
Kanggu	280	39.4	30.6	swine, mandarin, cash crops
Sangdae	287	1,037.6	505.9	mandarin, cabbage, garlic
Dongmyeong	893	362.8	252.4	mandarin, onion, cabbage, garlic
Myeongwol	755	539.9	315.4	mandarin, cabbage, garlic, swine
Sangmyeong	483	518.2	233.9	mandarin, barley, swine
Wolrim	386	430.1	204.9	mandarin, barley, swine
Geumak	1,218	2,869.2	411.4	cabbage, barley
Ongpo	1,601	121.1	66.4	onion, soybean
Hyeopjae	905	704.9	206.6	mandarin, barley, mushroom
Geumneung	1,222	527.7	187.9	-
Wolryeong	402	300.1	97.8	cactus, garlic
Biyang	155	59.2	7	cabbage

Jeju statistical year book (2007) (57)

나. 연구지역내 환경오염원 분포

제주지역의 2007년도를 기준으로 한 폐수배출시설은 크기 별로 2종 9개소, 3종 11개소, 4종 37개소, 5종 624개소이며, 한림지역내 폐수배출시설은 5종 44개소, 4종 3개소이며, 처리시설별로는 축산물가공 13개소, 수산물가공 10개소, 세차시설 5개소, 기타 19개소로 총 47개 사업장이 있는 지역이다(Table 3, Fig. 3).

Table 3. Status of environmental facilities in Hallim area

Facility name	Number of facility	Type	number
Marine products processing	10	4	1
		5	9
Livestock breeding processing	13	4	1
		5	12
Car washing	5	5	5
Others	19	4	1
		5	18
Total	47	4	3
		5	44

Table 4는 제주지역의 가축현황을 나타낸 것이며, 제주 전체의 소, 돼지는 각각 24,846두와 425,152두로 소에 비해 돼지의 사육두수가 많았고, 한림지역은 도 전체와 비교해 볼 때 소는 23.7%인 7,111두이고, 돼지는 45.2%인 192,280두수로 다른 지역보다 많이 사육되고 있다. 이는 Fig. 3의 GIS map상에서도 알 수 있듯이 다른 지역에 비해 가축시설 및 사육두수가 밀집되어 있다.

또한 그 외 환경관련 배출시설 현황은 쓰레기매립장 1개소, 분뇨처리시설 3개소, 유기질비료 제조시설 2개소, 건설폐기물시설 1개소가 있으며, 가축분뇨시설에 나오는 대부분의 배설물은 제주시와 양돈축협에서 운영하고 있는 가축분뇨공공처리시설과 공공 자원화시설에서 처리되어 가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률에 따른 가축분뇨시설방류기준 이내로 배출되고 있고, 액비로도 재활용되고 있

는 실정이다.

Table 4. Status of livestock in Hallim area.

(Unit : head)

Area	Cattle			Pig	Poultry	Horse	Goat	Deer
	Total	Cattle	Milk					
Jejudo	29,973	24,846	5,127	425,152	1,110,090	16,764	1,819	1,043
Jejushi	19,074	14,352	4,722	280,600	987,980	11,380	1,427	711
Hallim	7,111	3,423	3,688	192,280	586,200	1,455	50	23

다. 환경오염원 질소·인 발생부하량

연구대상지역에 대한 지역적 특성을 파악하기 위해서 오염원의 배출경로 및 집적경로를 파악하기 위한 도형자료 및 속성자료를 수집하여 GIS 도형도를 작성하였다.

지형도의 경우는 국토지리정보원의 수치지도를 이용하여 각각의 레이어별로 구축하였으며, 속성자료 데이터베이스는 2007년 제주도 통계(57)를 이용하여 마을별 오염원 현황 자료를 이용하였다. 또한 오염부하 원단위와 환경기초시설 등은 환경부 자료를 이용하여 구축하였다.

부하량 산정은 수질총량 기술지침(58)에 근거하여 오염원을 생활계, 축산계, 산업계로 이루는 3가지의 점오염원과 토지계로 이루어진 비점오염원으로 구분하였으며 Table 5와 같이 적용하였다.

생활계의 발생부하량은 리별로 해당지역에 거주하는 인구에 발생원단위를 곱하여 산정하였다. 인구는 시가화와 비시가화 인구로 구분하였다.

축산계 발생부하량의 경우 축종별로 분 및 노에 대해 별도로 추정된 발생원단위를 적용하여 산정하였으며, 산업계의 발생부하량은 기본적으로 개별 폐수배출 시설에서 배출되는 유량과 농도를 사용하여 산정하였다. 토지의 유출로 발생하는 비점오염원에 의한 발생량은 해당지역의 지목별 토지면적에 대해 발생원단위를 적용하여 산정하였다.

Table 5. Unit loading coefficients for generated contamination loadings

Category		T-N	T-P	Unit
Life	city	10.5	1.2	g/person · day
	non-city	13.2	1.5	g/person · day
Livestock	cattle	116.8	36.1	g/head · day
	dairy	161.8	5.6	g/head · day
	pig	27.7	12.2	g/head · day
	poultry	1.1	0.4	g/head · day
	horse	77.6	24.0	g/head · day
Farmland	upland	9.44	0.24	kg/km ² · day
	paddy	6.56	0.61	kg/km ² · day
	orchard	9.44	0.24	kg/km ² · day
	pasture	5.37	1.72	kg/km ² · day
	residential	13.69	2.1	kg/km ² · day
	forest	2.2	0.14	kg/km ² · day

2. 토 양

가. 조사지점

토양시료는 한림지역내 목장 등 각 지목별로 90개 지점에 대해 시료 채취하였다(Fig. 4)

나. 분석항목 및 분석방법

채취된 토양시료는 음지에서 자연 풍건한 후 혼합하여 2mm체를 통과시켜 분

석시료로 하였다. 토양화학분석법(59)에 의하여 유기물(OM, organic matter), 총 질소(TKN, total kjeldahl nitrogen), 유효인산(P_2O_5), 칼륨(K), 양이온치환용량(CEC, cation exchange capability), 나트륨흡착비(SAR, sodium adsorption ratio)를 측정하였다.

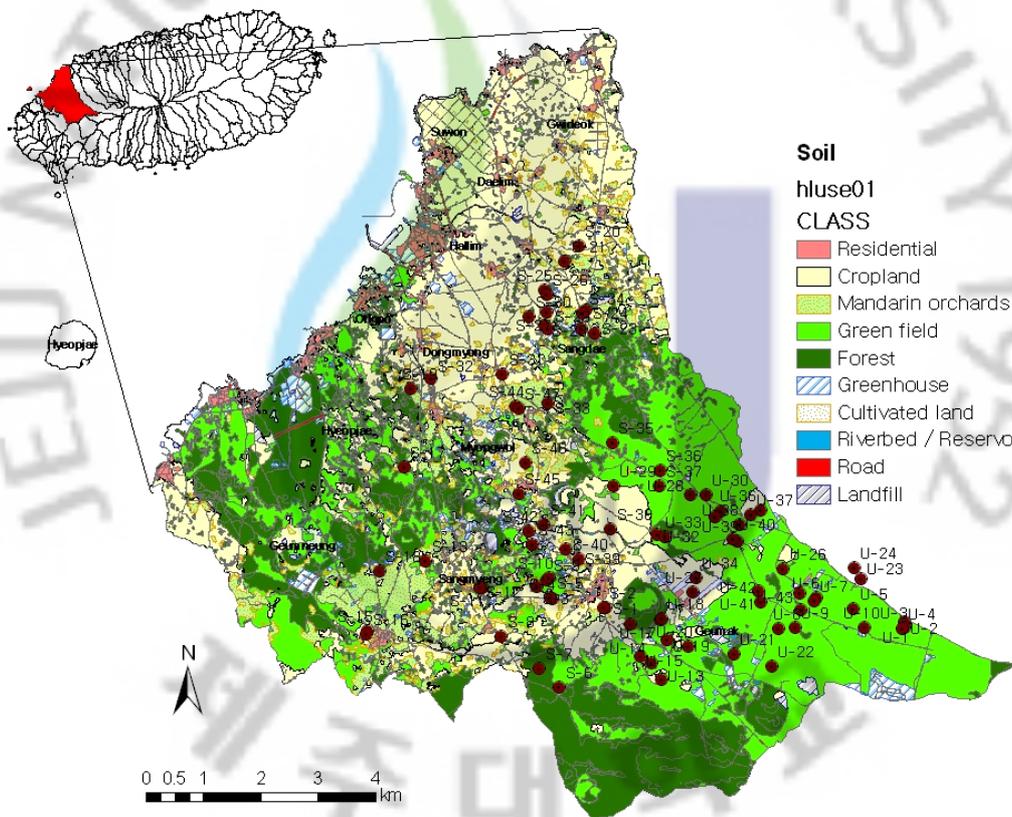


Fig. 4. Soil sampling locations in Hallim area.

pH는 액상시료로 수집된 시료 중 일부를 취하여 pH meter(Orion 520 A+, Thermo Orion, USA)로 측정하였으며, 분쇄된 시료를 이용하여 TKN (total kjeldahl nitrogen)은 풍건세토 1g을 Kjeldahl flask에 넣고 황산염 혼합물분말 1g 과 농황산 25mL을 넣은 다음 분해 및 2% 붕산용액 10mL 흡수액에 약 75mL 정도 증류액을 받은 다음 일정량을 황산표준액으로 적정하여 계산되었다. 유효인산은 Bray No. 1법으로 침출한 후 UV (Agilent 8453, Hewlett Packard, USA)로 720nm에서 측정하였으며, 양이온은 HNO₃-H₂SO₄법으로 습식분해 후 5A 여과지를 이용하여 증류수로 여과한 후 50mL 용량플라스크에 채운 다음 ICP-OES(Vista-pro, Varian)사용하여 분석하였다.

양이온 치환용량(CEC)은 1N-NH₄OAc (pH 7.0)용액으로 토양시료를 통과시켜 치환성 NH₄⁺로 포화시키고 과잉의 초산 ammonium을 80% 에탄올로 세척한 후 NH₄⁺ 포화토양을 Kjeldahl 증류장치에 의해 NH₄⁺를 직접 정량하여 CEC를 산출하였다.

또한 나트륨흡착비(SAR)는 Na, Ca 및 Mg 이온값을 이용하여 아래와 같은 계산식 (1)을 적용하여 계산하였다.

$$SAR = Na / \{(Ca + Mg)/2\}^{1/2} \text{-----}(1)$$

3. 지하수 및 용천수

가. 시료채취 지점

제주 서부지역에 위치한 한림지역의 해안가 용천수 5개소(YW1~YW5)와 옹포천 중심의 용천수 3개소(YW6~YW8)를 선정하였으며, 용천수는 7회(2008년 : 6월, 7월, 9월, 10월, 2009년 : 4월, 6월, 9월)에 거쳐 총 56건 채수하였다.

지하수 오염여부를 파악하기 위해서 한림읍 관내 27개소 지하수관정을 선정하여 지하수 수질을 3회(2008년 10월, 2009년 6월, 9월)에 거쳐 총 80건을 채수하였다 (Table 6, Fig. 5).

Table 6. The coordinates of the study area

Well ID	X code	Y code	Area	Date of Installation	Altitude (m)	Well depth(m)	Use
D-230	HG1	135820	33997	Geumak	1993/8/25	295	320 DW*
F-239	HG2	135232	36027	Geumak	2002/10/5	238	250 AW**
F-368	HG3	134449	36263	Geumak	2000/6/1	212	220 AW
F-244	HG4	133647	35187	Geumak	2000/2/28	192	228 AW
F-315	HM5	133306	35913	Myeongwol	2000/6/1	180	220 AW
D-033	HD6	133250	37741	Dongmyeong	1993/8/25	123	154 AW
F-317	HN7	131005	35226	Geumneung	2000/6/1	114	160 AW
F-028	HS8	135240	40147	Sangdae	1993/8/25	110	130 AW
F-137	HS9	133794	39178	Sangdae	2000/2/28	106	130 AW
F-135	HR10	129640	33981	Wolrim	2000/2/28	85	105 AW
GAM01	HN11	130305	34341	Geumneung	2004/1/19	81	165 DW***
F-068	HS12	134992	40792	Sangdae	1995/9/28	80	100 AW
F-246	HD13	132082	38745	Dongmyeong	2000/2/28	80	100 AW
F-314	HD14	132513	39007	Dongmyeong	2000/6/1	74	100 AW
S-004	HS15	132651	39281	Sangdae	2000/6/1	69	95 AW
F-458	HS16	133447	40059	Sangdae	2004/2/26	62	90 AW
F-128	HG17	134494	41728	Gwideok	1999/2/19	57	92 AW
F-481	HN18	129439	36025	Geumneung	2005/12/27	56	106 AW
F-046	HG19	133515	43150	Gwideok	1993/8/25	39	70 AW
CS01	HN20	128765	36789	Geumneung	1993/8/25	37	100 DW
F-059	HG21	134141	43043	Gwideok	1993/8/25	37	70 AW
F-090	HG22	133270	42991	Gwideok	1996/8/27	31	70 AW
D-128	HH23	130254	38890	Hyeopjae	1993/8/25	24	82 AW
W-022	HW24	127310	36531	Wolryeong	1993/8/25	19	34 AW
DS01	HA25	131829	41525	Daerim	1993/8/25	11	15 IW****
CH01	HL26	131432	41403	Hallim	1993/8/25	2	46 DW
JEIL01	HL27	131192	41031	Hallim	1993/8/25	1	26 LW

* Drinking water, ** Agricultural water, *** Domestic water, **** Industrial water

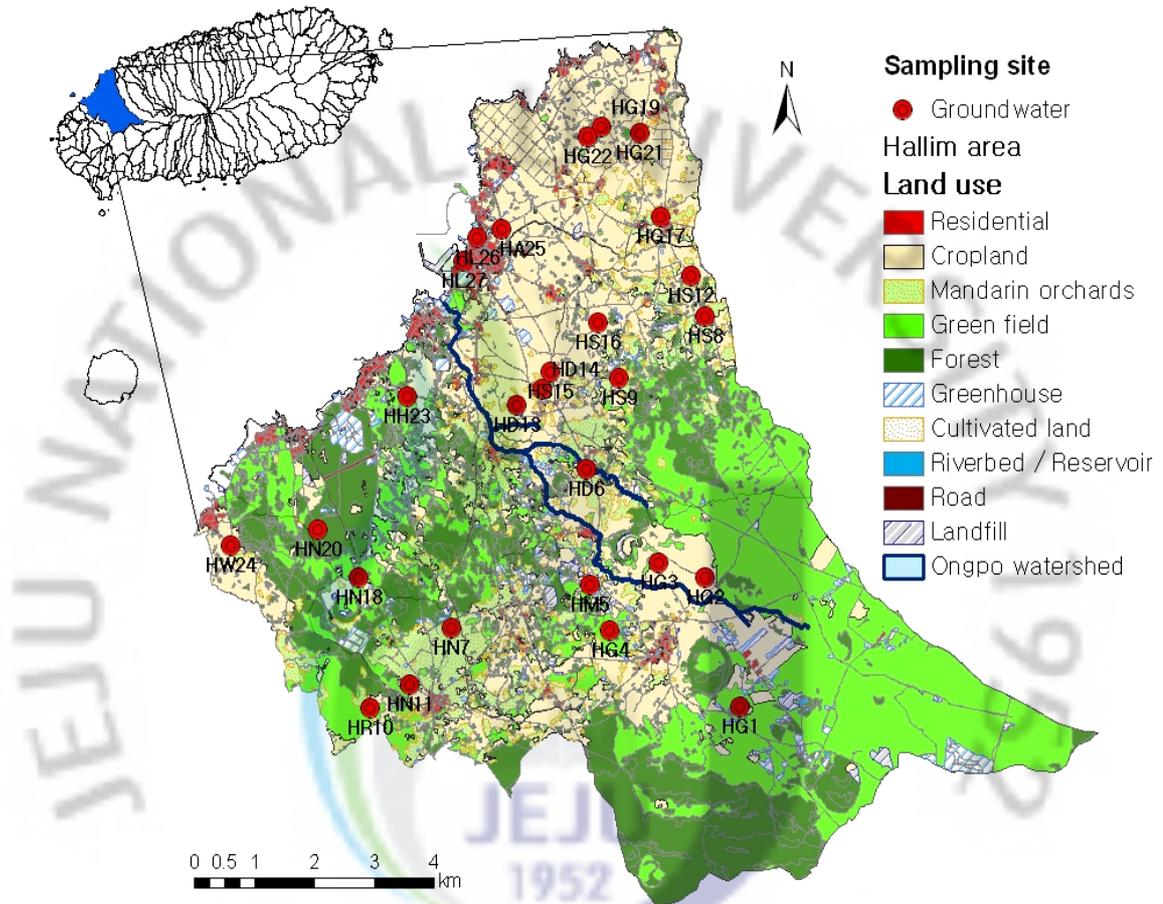


Fig. 5. Study area showing the location of wells sampled for the groundwater analysis

나 지하수 및 용천수의 수질성분 분석

대상지역에 대한 수질특성을 파악하기 위해 일반항목인 pH, 전기전도도(EC, electrical conductivity), 총용존고형물질(TDS, total dissolved solid)와 이온성 물질(K, Na, Mg, Ca, Cl, SO₄, NO₃-N, NH₃-N, Br)을 측정하였다.

분석용 물시료는 관정의 수중모터 펌프를 가동시킨 후 pH와 EC가 안정되게

한 후 채수하였으며, 다른 항목은 멸균된 polyethylene병에 채수하여 약 10°C 상태로 유지(Ice box)하여 실험실로 운반하여 냉장보관하면서 분석하였다.

pH 측정기(Accumet 1003, Fisher Scientific, USA)와 EC 측정기(Conductivity meter, Orion 120, USA)로 pH, 전기전도도(EC)를 측정하였고, HCO₃ 함량은 시료 100mL를 비색관에 취하고 페놀프탈레인용액 4~5방울을 넣어 백지상에 놓고 미홍색이 없어지고 남을 때까지 0.02N 수산화나트륨 용액으로 적정한다. 이온성분은 시료를 0.45 μ m 멤브레인필터(MFS-25, Advantec)로 여과한 후 이온크로마토그래피(Dionex ICS 3000, USA)로 분석하였으며, 음이온 컬럼(ASRS Ultra II 4mm)과 양이온 컬럼(CSRS 3000, 4mm)을 사용하여 전기전도도(Conductivity)로 검출하였다(60).

측정된 결과의 통계처리는 SPSS(2004)를 이용하여 기술통계량과 이온성분간의 상관성을 분석하였다.

다. 질소안정동위체비 (δ^{15} N)분석

질소안정동위체비 (δ^{15} N)분석은 파키스탄 핵과학연구소(PINSTECH, Pakistan Institute of Nuclear Science)에서 정밀동위원소 측정용 질량분석기(Finnigan Delta-plus)를 이용하여 분석하였으며 다음과 같은 전처리과정을 거친 다음에 분석하였다.

먼저 시료는 질산성질소의 양으로 약 1.5mg이 되도록 1L 증류플라스크에 넣고 증류수로 약 600mL가 되도록 조제한 다음 Kjeldahl법에 의하여 산화마그네슘(MgO) 약 3g을 넣고 증류하여 암모니아성 질소를 제거하고 데발다합금분말 3g을 가하여 0.1N-H₂SO₄ 10mL를 넣은 후 300mL 비이커를 수기로하여 증류속도가 5~7mL/min가 되도록 하여 약 300mL 될 때까지 증류시켰다.

발생된 질소가스는 N₂ 전처리장치에서 여러 트랩장치를 거치게 하여 정제조작을 거친 후 순수한 질소가스를 포집한 다음 질량분석계를 이용하여 질소질량의 29와 28(N¹⁵ N¹⁴/N¹⁴ N¹⁴)을 비교하여 질소안정동위체비를 측정하였다(3, 14, 39).

라. 수질 특성분석

파이퍼 다이어그램에서 지하수의 수질유형을 주로 양이온 및 음이온의 상대적인 당량 농도에 따라 Ca(Mg)-HCO₃, Ca-SO₄(NO₃), Na-HCO₃, Na-Cl의 4가지로 분류하여 분석하였다(7, 8, 15, 26, 27).

양이온 중에서는 Ca와 Mg의 합과 Na와 K의 합을 비교하여 전자가 우세하면 Ca형, 후자가 우세하면 Na형으로 하고 음이온은 HCO₃와 CO₃합과 Cl, SO₄의 합과 비교하여 전자가 우세하면 HCO₃형, 후자가 우세하면 Cl형으로 정한다. Ca(Mg)-HCO₃유형은 암반과 반응에 의해 주로 나타나며, 심부 암지반일수록 Na-HCO₃ 유형으로 바뀌어 나타난다. 또한 해수나 인위적 오염을 받을 경우는 Na-Cl형이나 Ca-SO₄(NO₃)형으로 나타난다.

일반적으로 지하수는 지층이 유동하는 과정에서 성분조성이 계통적으로 변화하며 인위적인 영향을 받지 않았을 경우는 I 그룹에서 II그룹으로 이동하고 인위적인 영향을 받았을 경우는 I 그룹에서 III그룹으로 변화하는 경우가 많다. 지하수 수질의 공간적, 시간적인 변화를 해석하는 것으로 오염원을 추정할 수 있는 것이다.

마. 중금속

지하수중의 중금속오염여부를 조사하기 위하여 2009년 7월과 10월 2회에 걸쳐 조사대상 27개 관정에 대한 시료를 채수하여 시료 100mL에 진한질산 1mL 넣고 지하수 중의 중금속농도를 측정하였다. 금속의 표준용액을 단계적으로 용량 플라스크에 넣고 0.01, 0.02, 0.04, 0.08 mg/L로 조정하여 Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn 11개 항목을 선택하여 ICP-OES(Vista-pro, Varian)를 사용하여 분석하였다(60).

바. 미생물

1) 일반세균 및 대장균군

지하수를 무균 채수병을 이용하여 채수한 후 직사광선을 피하기 위해 Ice box에 넣고 실험실로 운반하는 즉시 분석하는 것을 원칙으로 하며, 최대 24시간을

넘기기 않도록 하였다.

일반세균(중속영양평판계수)은 채수한 시료를 표준한천배지(PCA, plate count agar)에 도말 평판법으로 접종하여 35℃에서 48시간 배양 후 계수하였다. 대장균 군수는 막여과법으로 측정하였으며 지하수 시료 50mL을 여과하여 m-Endo LES 한천배지에 접종한 다음, 35℃에서 48시간 배양하여 금속성 광택을 띠는 붉은 색 집락을 계수하였다(60).

2) 분변성대장균군

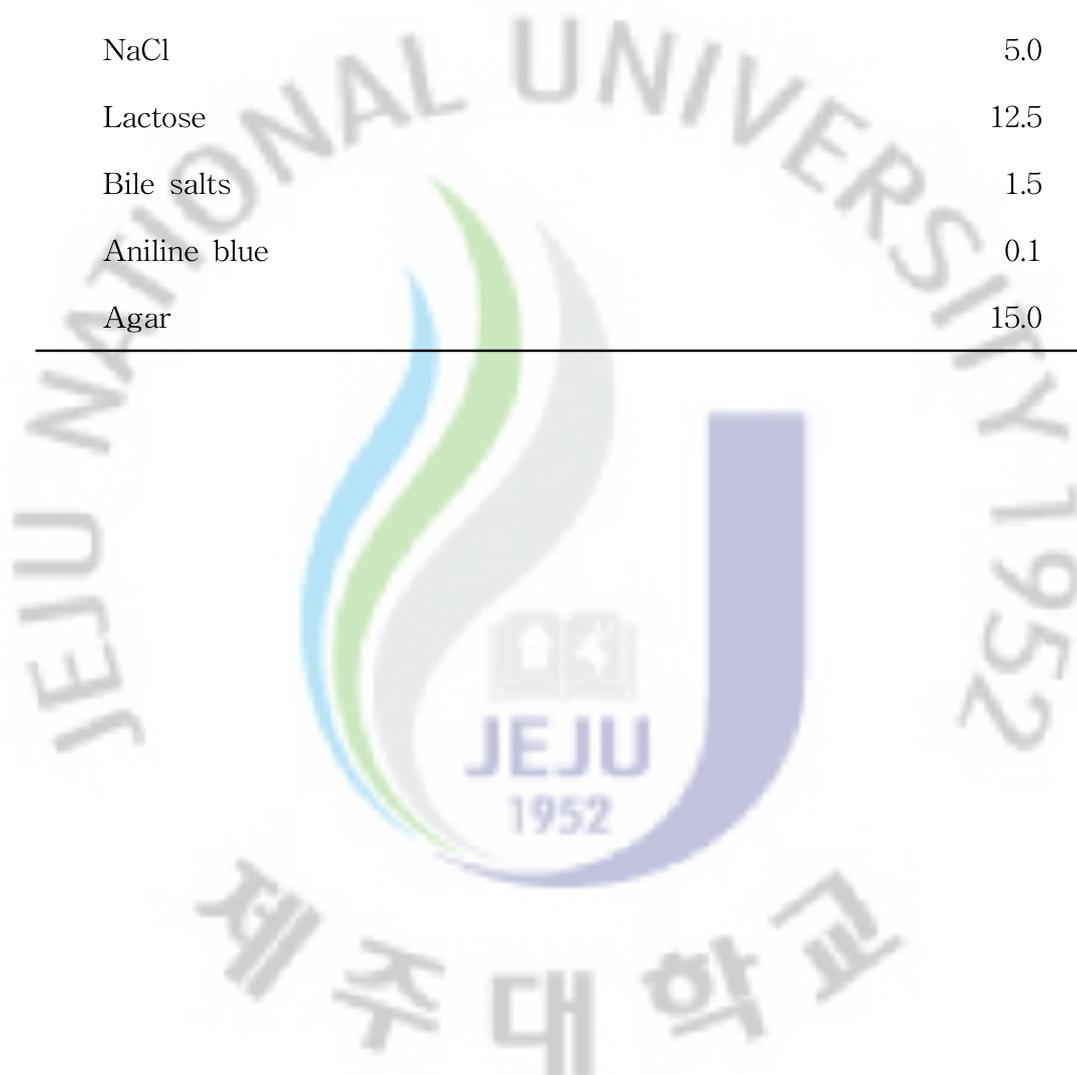
가축분뇨 등의 오염여부를 확인하기 위해서 분변성대장균군을 검사하였는데 사용된 배지는 m-FC 한천배지이고 조성은 Table 7과 같다. 멸균된 핀셋으로 여과막을 눈금이 위로 가게하여 여과장치의 지지대위에 올려놓은 후 막여과장치의 깔때기를 조심스럽게 부착하였다. 여과한 여과막을 눈금이 위로 향하게 하여 페트리접시의 배지위에 올려놓은 다음 페트리접시를 거꾸로 놓고 배양기 내부 전체가 항상 균일하게 44.5±0.2℃로 유지될 수 있는 정밀배양기에 넣어 24±2hr 배양한 후 여러 가지 색조를 띠는 파란색 집락이 20~80개 생기도록 하여 계수하였다(60).

3) 미생물동정

대장균군에 대한 추정시험에서 금속성 광택을 나타내는 모든 집락을 대상으로 1개 지점에서 최대 5개 집락까지 임의로 선정하여 EMB 한천배지에 최초 접종하였으며, 이를 동일 배지에 계대배양하여 순수분리하였다. EMB 한천배지에서 금속성 광택을 보이는 세균은 API 20E kit (bioMerieux, France)를 사용하여 동정하였으며, 동정확률(% id)이 90%이상인 균종을 선택하였고, 90% 미만일 경우 미동정한 것(unidentified)으로 간주하였다.

Table 7. Composition of m-FC agar

Component	Composition (g)
Tryptose	10.0
Proteose peptone or polypepton	5.0
Yeast extract	3.0
NaCl	5.0
Lactose	12.5
Bile salts	1.5
Aniline blue	0.1
Agar	15.0



Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 오염물질 배출부하량의 산정

가. 질소 발생부하량 산정

1) 제주지역

제주지역 각 구조계 별 질소발생부하량은 2007년 제주도통계연보(57)를 이용하여 원단위로 환산한 후 연간 톤수로 산정하였다(Table 8, 9).

Table 8. Construction of the structural system of the environmental pollution in Jeju (2007)

	Category	Value	Unit
Life	population	558,496	persons
	Cattle	24,846	head
Livestock	Milk	5,127	head
	Swine	425,152	head
	Poultry	1,110,090	head
	Horse	16,764	head
	Upland field	36,840.7	ha
Cropland	Paddy	791.4	ha
	Orchard	16,514.3	ha
	Pasture	17,068.7	ha
	Residential	5,171.6	ha
	Forest	90,407.8	ha
Industry	Sanitary landfill	776.6	m ³ /day
	Manure treatment	82,033.6	m ³ /day
	Sewage treatment	120,465.0	m ³ /day
	Sanitary treatment	762.3	m ³ /day

Table 9. Structural loading of nitrogen occurred in Jeju

Category		Amount loaded contamination (ton-N/year)
Life	Population	2,690.8
	Total	6,581.0
Livestock	Cattle	1,059.2
	Milk	302.8
	Swine	4,298.5
	Poultry	445.7
	Horse	474.8
	Total	3,176.2
	Cropland	Upland field
Paddy		18.9
Orchard		56.9
Pasture		334.6
Residential		258.4
Forest		726.0
Total		371.6
Industry	Sanitary landfill	367.8
	Manure treatment	1.4
	Sewage treatment	0.8
	Sanitary treatment	1.6
Total	12,820	

생활계의 질소 발생부하량은 제주지역 인구가 '95년 52만여명에서 '06년 54만여명으로 다소 증가한 탓에 2,502 ton-N/yr에서 7.6%증가한 2,691 ton-N/yr으로 산정되었다.

농지계는 총 질소발생부하량이 3176 ton-N/yr으로 산정되었으며 경작지인 밭에서는 1,269 ton-N/yr으로 농지계 질소 발생부하량의 40%해당되고 다음으로 임야, 목장, 과수원 순으로 부하량이 산정되었다. 인발생부하량은 245 ton-P/yr으로 목장지역이 107 ton-P/yr, 임야, 대지, 전순으로 산정되었다.

산업계인 경우 하수처리장, 가축분뇨처리장 및 매립장의 침출수의 배출량을 실측하여 부하량을 산정하였는데, 산업계의 총질소부하량이 372 ton-N/yr이고 인부하량이 2.9 ton-P/yr이었다.

따라서 제주지역 전체로 보면 질소발생부하량은 12,820 ton/year이고, 인발생부하량이 3,190 ton/year으로 산정되었으며, 이러한 결과는 Yun 등(61)에 의해 조사한 우리나라 총 유입 질소량 1,442,254 ton/year의 0.9%에 해당되는 것이다. 또한 제주특별자치도(13)에서 조사한 제주지역 질소발생부하량 13,067 ton/year보다는 다소 낮게 나타났다.

축산계에서 연도별 축종에 따른 질소발생부하량을 Fig. 6와 같이 나타냈다. 돼지인 경우 1994년도 187,527두에서 2006년도에는 2.3배 증가한 425,152두였고 소인 경우는 33,171두에서 24,846두로 오히려 감소경향을 보이고 있다. 돼지의 질소발생부하량으로 환산하면 1,896 ton-N/yr에서 4,298 ton-N/yr으로 급격히 증가하고 있으며, 소는 1,414 ton-N/yr에서 1,059ton-N/yr이 발생되는 것으로 산정되었다.

생활계에서도 생활폐수의 종류별에 따른 질소원단위를 보면 우리나라에서는 비시가지 인 경우 13.2 g/인으로 산정하고 있는 반면에 일본에서는 단독처리 정화조 5.2~6.6 g/인이며, 잡폐수는 1.10 g/인으로 원단위를 사용(58)하고 있어 우리나라쪽이 높게 원단위를 사용하고 있다. 이러한 발생원 원단위의 차이는 각 나라별 다소 차이가 있으며 특히 지역 환경여건에 따라 크게 달라질 수 있기 때문이라고 사료된다.

Fig. 7은 Table 9 자료와 Table 5의 원단위를 적용하여 산정된 방사형 그래프인데 축산계가 6,581 ton-N/yr으로 49.8%로 가장 높고, 농지계가 3,176 ton-N/yr으로 24.0%, 생활계가 2,691 ton-N/yr으로 20.4% 순으로 나타났다. 이러한 결과는 제주지역의 질소나 인의 발생부하량이 축산계 오염원에 의한 배출부하량이 농지계나 생활계의 오염원에 의한 배출부하량보다 높아 지하수에 대한 잠재적 오염원이 클 것으로 해석할 수 있다. 따라서 가축분뇨 처리시설에 대한 기준의 강화 및 가축분뇨 공공처리장의 용량을 확대하고 처리효율을 높여 축산계 오염원에 의한 배출부하량을 줄임으로써 지하수에 대한 잠재적 오염원을 낮춰야 할 것이다.

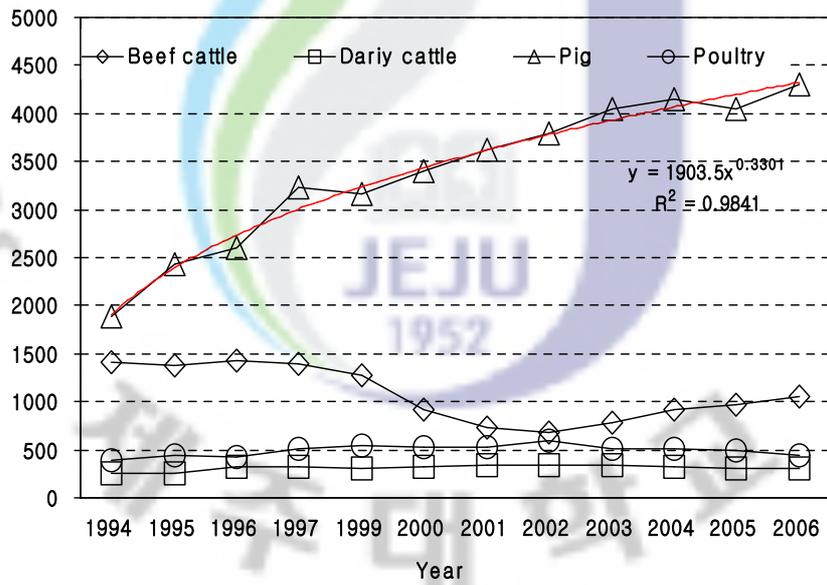
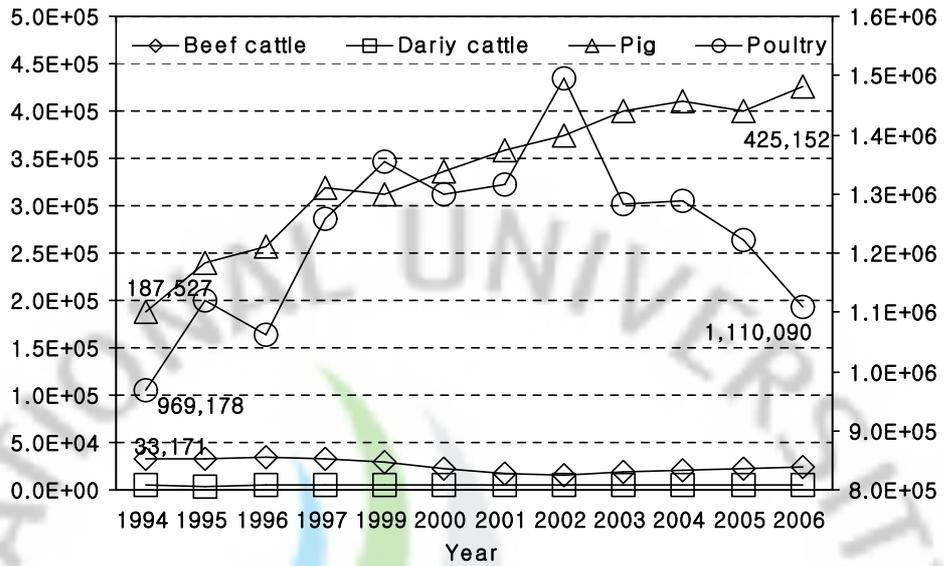


Fig. 6. Annual nitrogen load caused by animal manure and livestock construction

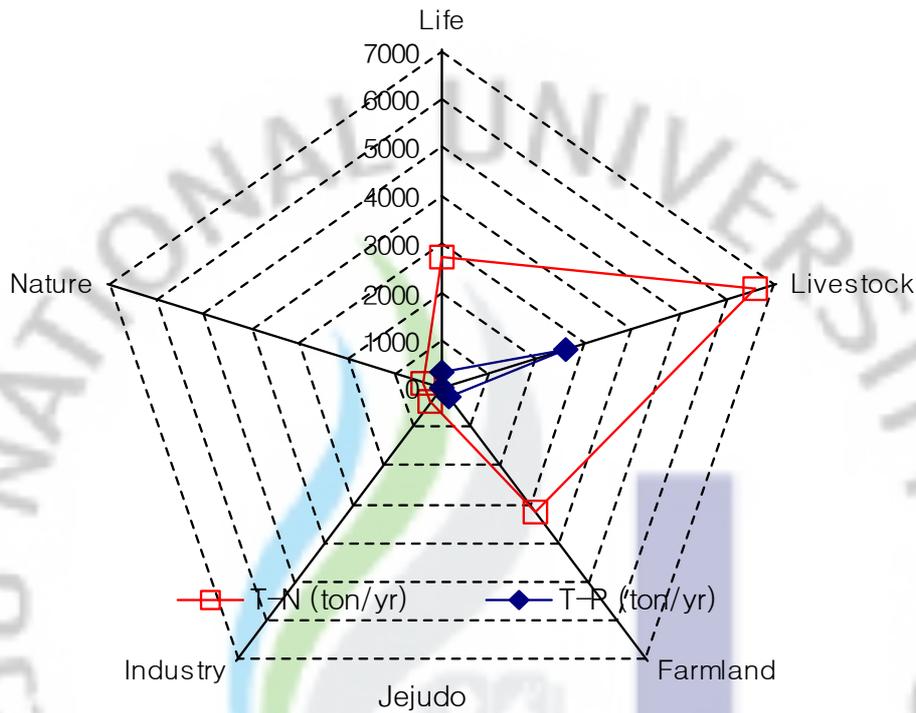


Fig. 7. The amount of loaded contaminant (ALC) of total nitrogen and total phosphorus in Jeju.

한편 오염부하량의 다소 낮은 이유는 발생원단위를 어떻게 적용하느냐에 따라 차이가 날 수 있는데, 축산계를 예로 든다면 다음과 같다. 한우는 116.8 g/두이며, 젓소는 다소 높은 161.8 g/두를 원단위로 사용하며, 돼지인 경우는 질소원단위가 27.7 g/두이며, 말인 경우는 77.6 g/두를 원단위로 사용한다(58).

일본 환경성의 지하수조사 매뉴얼(56)을 보면 소인 경우 분과뇨로 나누어 분이 47.1 g/두이고,뇨가 58.4 g/두로 분뇨 모두 합쳐 105.5 g/두로 우리나라의 원단위보다 다소 낮다. 또한 돼지인 경우를 보면 질소원단위가 분이 6.94 g/두이고,

노가 6.57 g/두로 분뇨 모두 합쳐 13.51 g/두로 우리나라보다 다소 차이가 있기 때문이다.

2). 한림지역

Table 10은 한림지역 내 인구, 가축, 토지이용 현황을 나타내었으며, 이러한 자료를 바탕으로 각 구조계별 원단위를 적용하여 질소 발생부하량을 산정한 결과 Table 11과 같다.

Table 10. Construction of the structural system of the environmental pollution in Hallim area

	Category	Value	Unit
Life	Population	19,812	persons
	Cattle	3,423	head
Livestock	Milk	3,688	head
	Swine	192,280	head
	Poultry	586,200	head
	Horse	1,455	head
Cropland	Upland field	3,058.7	ha
	Paddy	22.3	ha
	Orchard	470.0	ha
	Pasture	1,193.1	ha
	Residential	292.2	ha
	Forest	2,974.0	ha
Industry	Sanitary landfill	35.0	m ³ /day
	Manure treatment	37,727.0	m ³ /day
	Sanitary treatment plant	32,340.0	m ³ /day

전체 질소·인 발생부하량은 질소가 2,881 ton-N/yr로 도전체의 22%를 차지하고 주요 발생원은 축산계, 농지계, 생활계, 산업계이다.

Table 11. Structural loading of nitrogen occurred in Hallim area

Category		Amount loaded contamination (ton-N/year)
Life		95.5
Total		2,584.3
Livestock	Cattle	145.9
	Milk	217.8
	Swine	1,944.0
	Poultry	235.4
	Horse	41.2
Total		184.0
Cropland	Upland field	105.4
	Paddy	0.5
	Orchard	16.2
	Pasture	23.4
	Building site	14.6
Forest		23.9
Total		17.4
Industry	Sanitary landfill	16.6
	Manure treatment	0.6
	Sanitary treatment plant	0.2
Total		2,881

또한 한림지역 내 구조계별 질소 발생부하량은 Fig. 8와 같다. 구조계별 질소 발생부하량은 축산계인 경우 2,584 ton/yr인 89.3%이며, 농지계 184 ton/yr로 6.3%, 생활계 95.5 ton/yr로 3.3%, 산업계는 17.4 ton/yr인 0.4%가 발생하고 있다. 인발생부하량인 경우 축산계가 1,076 ton/yr으로 97.6%이고, 생활계와 농지계가 1% 전후이며, 산업계는 0.1% 이내였으며, 인발생부하량은 대부분 축산계에서 발생하는 것으로 나타났다.

따라서 한림읍지역은 도전체 면적의 4.9%에 불과하나 질소·인의 발생부하량은 축산계 오염원에 의한 배출부하량이 농지계나 생활계에 의한 배출부하량을 능가하여 수질오염 기여도가 크게 증가하는 것으로 확인할 수 있다.

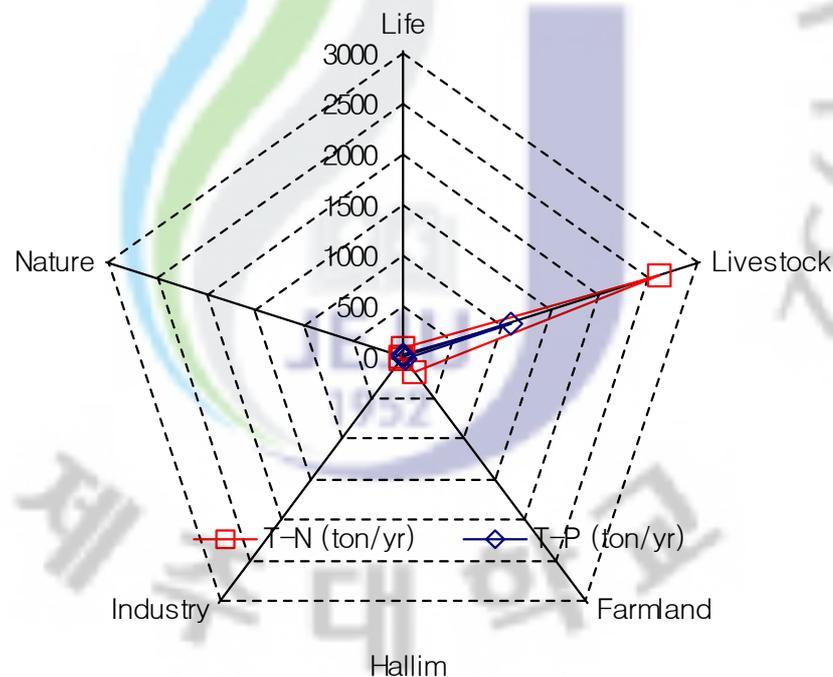


Fig. 8. The amount of loaded contaminant (ALC) of total nitrogen and total phosphorus in Hallim area.

따라서 가축분뇨 처리시설에 대한 기준의 강화 및 가축분뇨 공공처리장의 용량을 확대하고 처리효율을 높여 축산계 오염원에 의한 배출부하량을 줄임으로써 수질오염 기여도를 낮춰야 할 것이다.

제주도(13)에서 제주지역별 질소 발생부하량을 조사한 결과를 보면 서부, 동부, 북부, 남부 순으로 각각 15.5 ton/day, 9.8 ton/day, 6.3 ton/day, 4.2 ton/day이 발생하는 것으로 조사되었으며, 여기서 한림지역의 경우 절반에 해당되는 7.9ton/day이 발생하는 것으로 보고하였다. 이것을 연간 발생량으로 환산하여 보면 2,884 ton/yr으로 본 연구와 유사한 결과를 보였다.

나. 지역별 질소발생부하량

한림지역내 마을별 질소발생부하량을 가축분뇨에 의한 축산계, 화학비료사용에 의한 농지계, 생활폐수에 의한 생활계, 자연토양에 의한 토지계 별에 따라 Fig. 9, 10에서 나타내었으며 마을별 전체 질소 발생부하량을 Fig. 12로 나타내었다.

1) 축산계의 질소 발생부하량

Fig. 9에 의하면 가축분뇨에 따른 질소발생부하량은 금악 1,058 ton-N/yr로 가장 높았으며, 상명 308 ton-N/yr, 명월 342 ton-N/yr, 상대 295 ton-N/yr, 금능 16 ton-N/yr 순이다. 금악은 별드르 양돈단지과 한오름, 제일, 금악구일, 대성양돈단지 5개소가 밀집되어 있는 지역이며, 상대는 창진, 동방골양돈단지 2개소가 있으며, 상명은 서부양돈단지 1개소로 서로 밀집되어 있는 점오염원들이 잠재되어 있는 지역으로 주변 지하수 및 토양에 질소 공급원으로 작용할 수 있는 곳이라 할 수 있다.

가축분뇨에 의한 전체 질소발생량은 2,584 ton-N/yr으로 조사되어 한림지역 전 오염원 중 89%이상 차지하고 있지만 가축분뇨 공공처리시설과 액비화 공공자원화시설에서 수거에 의한 방법에 의해 대부분 처리되는 것을 감안한다면 지하수 오염에 영향을 미치는 토양으로의 공급량은 10%미만이라고 볼 수 있으며, 258 ton-N/yr이 지하수에 영향을 줄 수 있다고 추정된다.

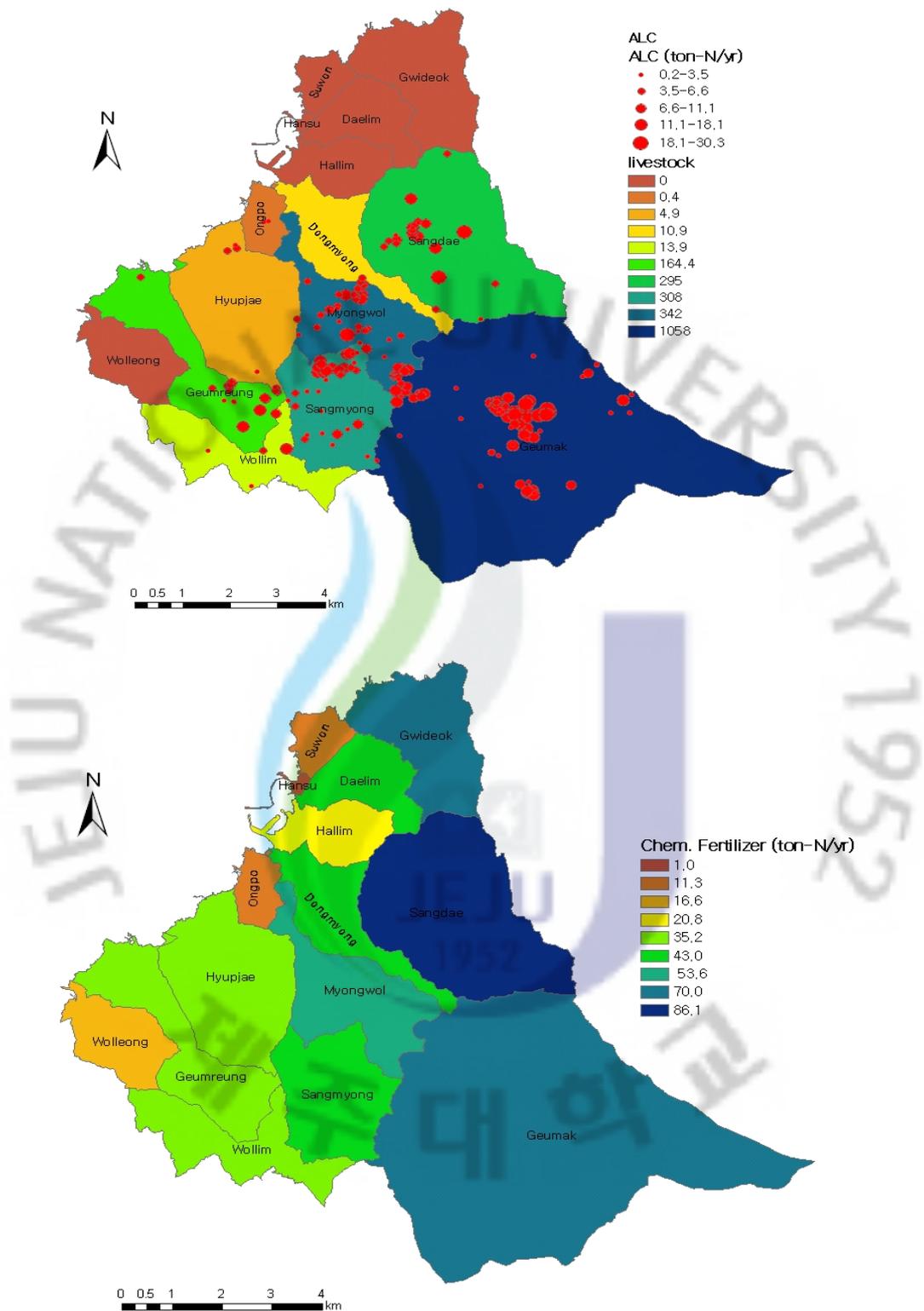


Fig. 9. Spatial distribution of amount loaded contaminant depending on livestock and chemical fertilizer in Hallim area.

2) 농지계의 질소 발생부하량

한림지역내 농산물 재배에 따른 화학비료 질소시비량을 농민들에게 청취한 결과 양배추와 브로콜리는 300~500 kg/ha을 사용하고 있었으며, 감귤나무는 40~80 kg/ha으로 사용하고 있었으나 2007년도 제주지역 평균 질소시비량인 170 kg/ha과 유사한 것으로 조사되어 원단위로 사용하였다(57).

화학비료에 의한 질소발생부하량은 Fig. 10에서 보는 바와 같이 총 질소부하량은 상대가 86 ton-N/yr으로 가장 높았으며, 금악 70 ton-N/yr, 귀덕 68 ton-N/yr, 명월 53 ton-N/yr., 금능 32 ton-N/yr 순으로 나타났다. 이들 화학비료 질소발생량이 높은 지역은 대부분 양배추와 브로콜리 등이 지속적으로 재배되고 있다.

경작지에 공급되어지는 전체 질소공급량은 566 ton-N/yr으로 조사되었지만 Yamamoto(14)에 의하면 비료 중에 질소는 시비 후에 암모니아로 휘산되어지는 그 비율을 15%로 하고 식물의 질소 이용율을 지역토양에 감안하여 45%로 보고하고 있어 토양에서 용탈되어 지하수에 영향을 미칠 수 있는 비율은 40%로 226 ton-N/yr으로 추정되었다.

3) 생활계 및 토지계의 질소 발생부하량

생활계에 의한 한림지역 총 질소발생량은 92 ton-N/yr이었으며, 도심화된 한림리 지역이 27 ton-N/yr으로 가장 높았고 귀덕 10 ton-N/yr, 대림 7 ton-N/yr, 금악 5.7 ton-N/yr 순으로 조사되었다. 대부분의 생활폐수는 하수관거를 통해 인근 판포 하수처리장으로 유입되어 처리 후 해양으로 방류되고 있어 지하수나 하천수에 영향은 없는 것으로 사료된다. 소규모의 마을 하수처리장에서 방류되는 것만이 처리된 방류수가 주변 지하로 투입되고 있고, 2008년 환경백서(62)에 의하면 질소 처리율이 60%이상이므로 전체 질소발생량 92 ton-N/yr 중 18 ton-N/yr 정도가 지하수에 영향을 미치고 있는 것으로 추정된다.

자연토양에서의 질소발생량은 14 ton-N/yr으로 총 발생량의 0.5%로 미미하여 토양을 통해 지하수오염에 미치는 영향은 극히 미미한 것으로 추정된다.

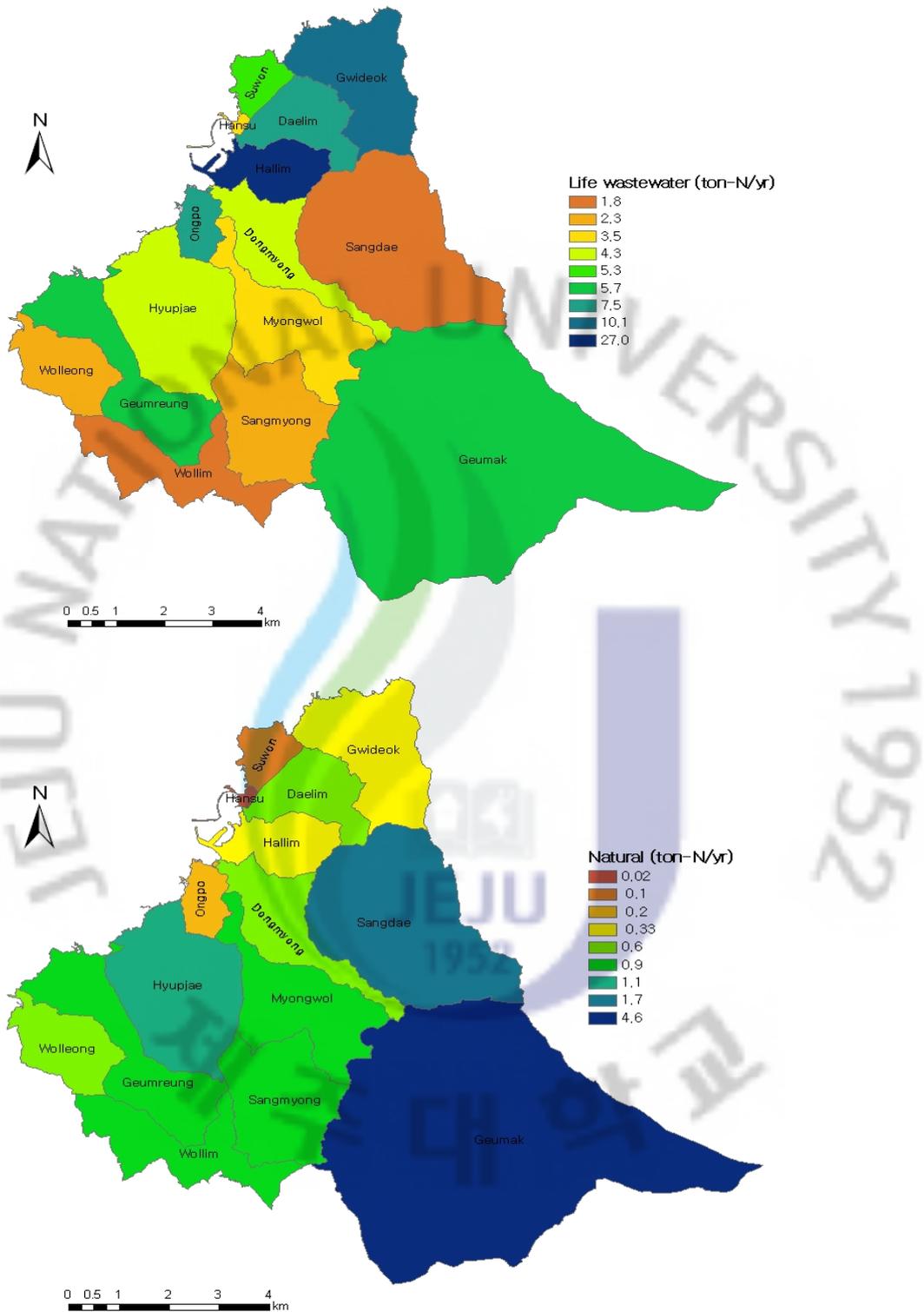


Fig. 10. Spatial distribution of amount loaded contaminant depending on sewage and natural soil in Hallim area.

4) 지하수에 영향을 줄 수 있는 질소부하량

마을별 질소발생부하량을 Fig. 11와 같이 나타냈는데 질소 발생부하량은 금악> 명월> 상대> 상명> 금능> 귀덕지역 순으로 조사되었다. 금악, 명월 및 상명은 다른 지역에 비해 가축시설이 밀집되어 있는 지역이기 때문에 질소 발생부하량이 높고 나타난 것으로 추정된다.

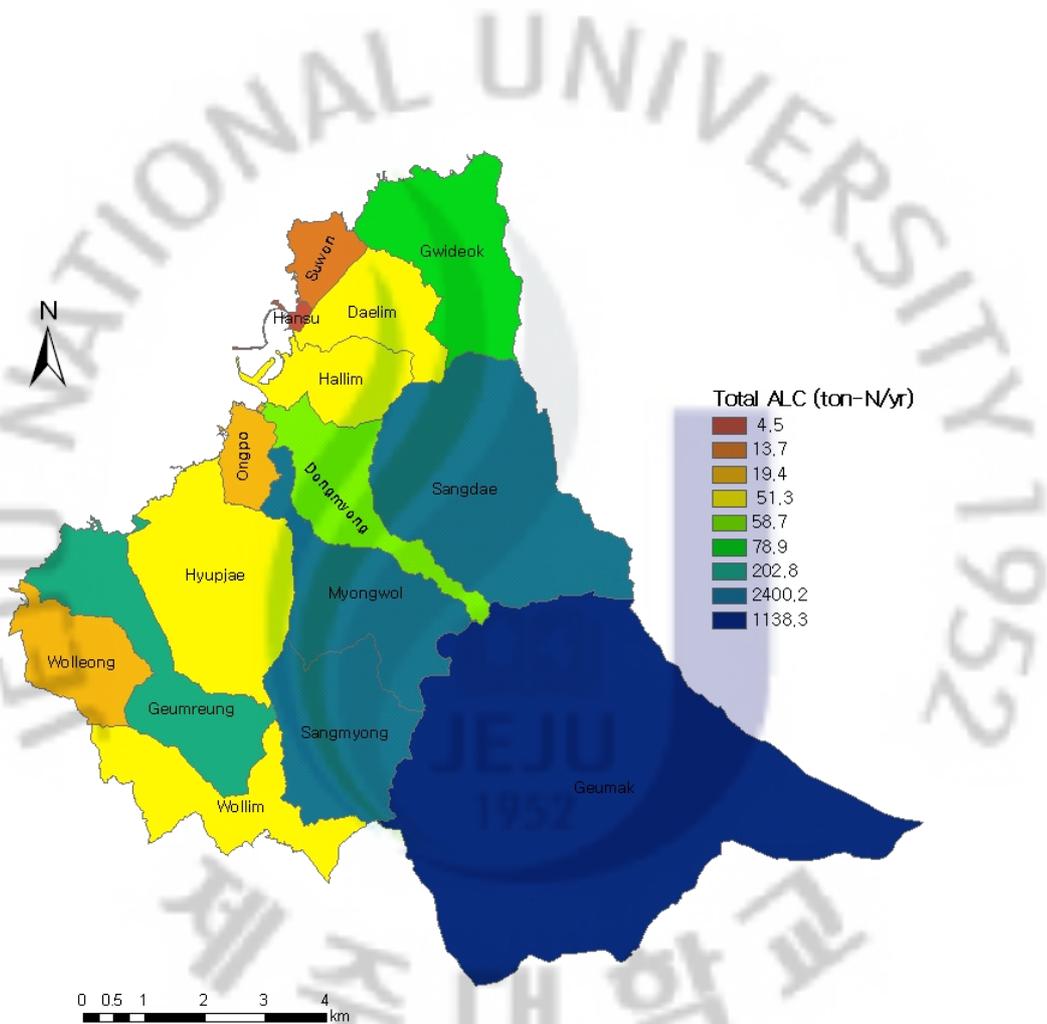


Fig. 11. Spatial distribution of amount loaded contaminant in Hallim area.

지하수에 영향을 줄 수 있는 질소 발생부하량을 Table 12와 같이 정리해보면 가축분뇨시설에 의한 축산계 2,584 ton/yr에서 부적정 처리율 10%을 적용하여 258 ton/yr이고, 화학비료에 의한 농지계는 566 ton/yr에서 시비에 의한 암모니아 휘산과 식물이용율을 감안하여 40%을 적용 226 ton/yr로 나타났다. 생활폐수에 의한 생활계는 92 ton/yr에서 질소제거율은 감안하여 40%을 적용 18 ton/yr이고, 자연토양에 의한 토지계는 15 ton/yr에서 0.5%을 적용하여 0.1 ton/yr으로 산정되었다. 지하수에 영향을 줄 수 있는 질소부하량은 총 502 ton/yr이며, 토양으로 공급된 질소량이 지하수에 영향을 미치는 것은 가축분뇨와 화학비료라고 볼 수 있을 것이다.

이처럼 GIS 기반으로한 오염물질 배출부하의 산정과 분석은 Lee 등(84)와 Heo 등(85)의 보고와 같이 급격한 도시화와 산업화가 그 원인이 되어 많은 오염물이 발생, 배출되고 있기 때문에 발생 및 배출부하량을 지리정보시스템(GIS)에서 정량적으로 구함으로써 삭감계획이나 처리방안에서 좀 더 과학적으로 고찰이 가능하다는 것을 확인하였다.

Table 12. Estimation of nitrogen loading on the groundwater

	Nitrogen loading occurs (ton/yr)	Application rate (%)	Nitrogen loading of groundwater (ton/yr)
Livestock	2,584	10	258
Chemical fertilizer	566	40	226
Sewage	92	40	18
Natural soil	14	0.5	0.1
Total	3,256	16.4	502

2. 토양오염 특성연구

조사지역내 용도지역별 토양 화학적 특성에 대한 평균 농도는 Table 13과 같다. 수소이온농도(pH)는 5.6~5.9로 용도지역 간 차는 크지 않았으며, 우리나라 논밭의 유형별 토양산도가 특이산성과 염해를 제외한 지역이 5.4~6.0이라는 보고(63)와 유사한 결과를 보였다.

토양중 양분의 흡수, 보수력의 척도라고 할 수 있는 양이온치환용량(CEC)은 도내 평균 14.1 cmol^+/kg 으로 우리나라 토양중 CEC가 7.7~10.9 cmol^+/kg 이라는 보고 보다 다소 높았으나 화산회토에서는 13.4 cmol^+/kg 라는 보고(64)와는 유사한 결과를 보였다.

가. 유기물(OM)

토양 중에 들어있는 유기물은 토양의 생성작용에 관여할 뿐 아니라 작물이 필요로 하는 다른 양분을 흡수하고 보존하였다가 이용률을 높여주는 작용도 함께 하고 있다. 그리고 한편으로는 토양의 공극을 증대시키는 작용을 하여 통기를 좋게 하며, 토양의 보수력을 높여 침강과 한해를 방지하는데도 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 조사지역 토양 중 유기물 함량에 대한 농도는 Table 13과 같다.

유기물함량은 목장, 사료작물 및 야초지가 10.5~12.8%로 타 용도지역보다 높았다. 또한 낮은 지역도 6.3~9.7%로 내륙지역 토양 2.2~2.4%정도(63)에 비해 약 3배 이상 유기물함량이 높은 것으로 나타났다. 하지만 Bergstrom과 Jonhansson(42)에 의하면 질산성질소의 용탈은 유기물함량이나 토양의 구조에 의한 영향이 크다고 보고하였으며, 환경오염적 측면으로 보면 유기물이 높다는 것은 유기성 질소분이 많다고 해석할 수 있으므로 환경적인 충격이 가해질 때는 지표유출에 의해 유기물도 함께 주변 하천 및 지하수로 이동이 되어 오염원으로 작용될 수도 있을 것이다.

Table 13. Chemical characteristics of soils

Item	pH	OM* (%)	TKN** (mg/kg)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	Cations Exchange (mg/kg)				CEC*** (cmol/kg)	SAR****
					Ca	K	Mg	Na		
Orchard	5.6	6.7	3,100	603.5	110.3	26.9	21.3	4.8	12.5	0.12
Cropland	5.9	6.3	3,100	417.2	128.7	60.0	26.0	4.0	13.2	0.09
Horse ranch	5.6	9.7	4,400	23.0	50.3	33.3	20.0	6.2	11.9	0.19
Pasture	5.7	12.8	7,300	94.9	107.9	51.4	36.1	7.6	18.2	0.17
Feed crops	5.6	10.5	5,400	140.0	106.9	53.1	35.8	6.7	16.3	0.16
Forest	5.6	8.0	3,000	7.4	120.9	15.4	37.5	6.9	12.3	0.14
Grass land	5.6	10.8	5,800	43.7	87.2	41.7	26.9	6.0	13.6	0.15
Avr.	5.7	8.4	4,300	289.3	110.9	50.3	27.7	5.3	14.1	0.13

* OM : organic matter, ** TKN : total Kjeldahl nitrogen, *** CEC : cation exchange capability,

****SAR : sodium adsorption ratio

나. 질소·인농도

한림지역 내 토지이용별로 90개 지점에 대해 토양 중에 분포되어있는 질소·인농도 분포현황을 Fig. 12, 13과 같이 나타내었다.

조사결과를 보면 총질소(T-N)가 전체 평균치 4,300 mg/kg이며 목장지에서 7,300 mg/kg로 높았고, 경작지와 과수원이 각각 3,100 mg/kg, 산림지역이 3,000 mg/kg을 낮게 조사되었고, 액비시용에 따른 총질소(T-N)가 1,980 mg/kg로 토양개선효과가 있었다는 Jeon 등(65)의 보고 보다 높게 함유되어 있었다. 총질소가 목장지에 높은 이유는 축산시설 밀집지역에서 배출되는 가축분뇨의 액비시용에 따른 것으로 추정할 수 있다.

인산염인 경우도 전체 평균 289.3 mg/kg으로 우리나라 농경지 토양 중 유효인산함량이 101.0 mg/kg이라는 Kim 등(64)의 보고나 농진청(63)이 73~123 mg/kg이라는 보고 보다 약 3배 높게 함유된 것으로 조사되었으며, 감귤원과 농경지 토양 중 평균 인산농도가 각각 603 mg/kg과 417.2 mg/kg으로 가장 높게 함유되고 있는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 인산질비료의 주기적 살포와 제주 토양 특성이 인산 고정력이 높은 알로판으로 구성되어 있어 토양 중에 높게 축적된 때문으로 사료된다. 이에 비해 비료살포가 거의 없는 산림, 말방목지나 야초지는 각각 7.4 mg/kg, 23.0 mg/kg 및 43.7 mg/kg으로 매우 낮은 농도를 보였다.

Hwang 등(66)은 질산성질소의 토양깊이별 분포 연구에서 계분 부숙 퇴비 1.5 ton/ha 상당량을 시용한 후 180일 이후에 토양깊이별 질산성질소의 함량을 조사한 결과에 따르면 화산회 발토양은 90cm 깊이에서 18 mg/kg로 측정되었으며, 비화산회 발토양은 2 mg/kg으로 점토함량이 많은 토양에서는 질산성질소가 지하로 이동하기 어렵다고 보고하였다.

이러한 결과로 볼 때 높은 지대에 위치한 목장지의 질소오염원은 강우에 의해 화산회 발토양으로 이루어진 낮은 지대로 이동하면서 서서히 지하침투에 의한 지하수에 영향을 줄 수 있을 것으로 추정된다.

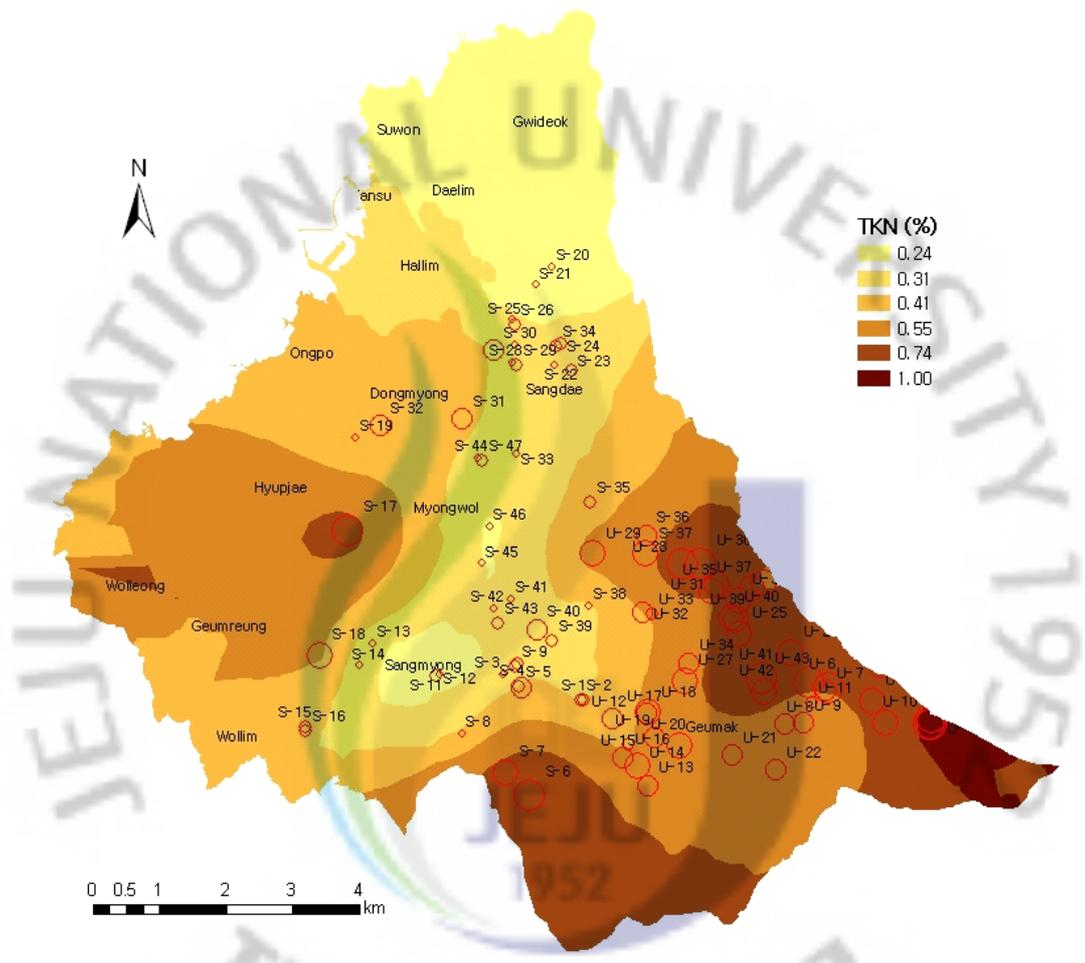


Fig. 12. Spatial distribution of total Kjeldahl nitrogen(TKN) in soils.

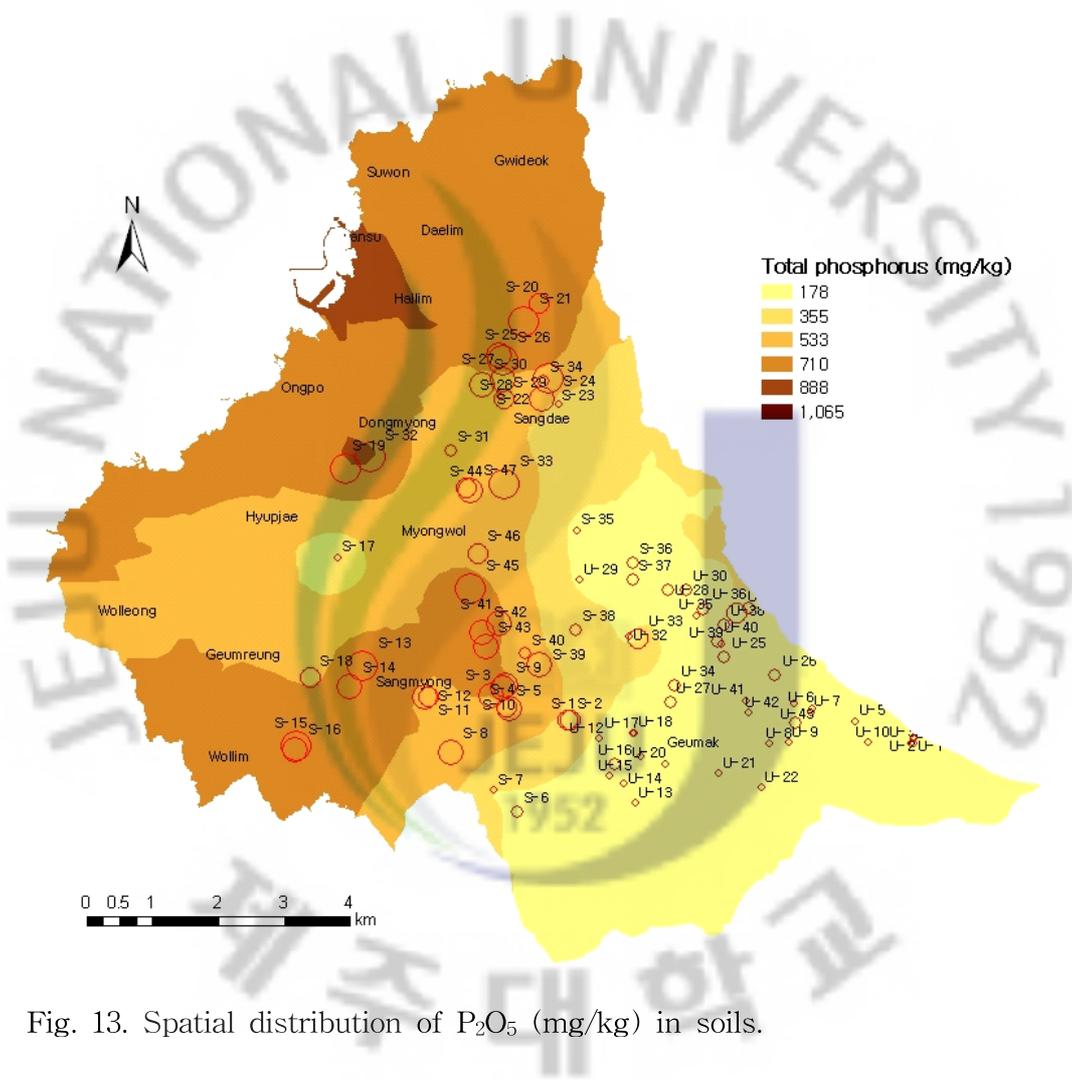


Fig. 13. Spatial distribution of P₂O₅ (mg/kg) in soils.

다. 이온성분의 거동

토양이용에 따른 토양의 화학적 성분 중에 양이온과 양이온치환용량(CEC)은 Table 13에 나타내었다.

알카리 금속(K, Na)의 평균농도는 각각 50.3 mg/kg, 5.3 mg/kg이며, K인 경우 농경지에서 60.0 mg/kg으로 가장 높았고 산림지역 5.4 mg/kg로 가장 낮았다. Na인 경우는 목장, 산림지역이 각각 7.6 5.4 mg/kg, 6.9 mg/kg로 높았고, 농경지가 4.0으로 낮았다. 목장지와 산림지역에서 Na이 높은 이유는 가축시설 밀집지역에서 배출되는 가축분뇨 액비시용이 많았기 때문으로 추정되며, 농경지에서 K이 높은 이유는 화학비료에 의한 영향으로 해석할 수 있다.

알카리 토금속(Ca, Mg)의 평균농도는 각각 110.9 mg/kg, 27.7mg/kg이며, Ca인 경우 농경지에서 128.7 mg/kg로 가장 높았고, 말방목지가 50.3 mg/kg로 낮게 나타났다. Mg인 경우는 산림지와 목장지가 각각 37.5 mg/kg, 36.1 mg/kg로 높았고 말방목지가 20.0 mg/kg으로 낮게 나타났다. 농경지에서 Ca이 높은 이유는 화학비료에 의해 영향을 받은 것으로 해석할 수 있다.

이러한 결과는 Yook (67), Lee와 Jeon (65)이 보고한 토양 Ca 74.1~84.2 mg/kg, K 23.1~27.0 mg/kg, Mg 43.2~47.5 mg/kg와 유사하였고, Hwang 등 (66)이 보고한 화산회 토양에서의 Ca 28.1 mg/kg, K 6.3 mg/kg, Mg 14.4 mg/kg와, 비화산회 토양에서의 Ca 170.3 mg/kg, K 5.9 mg/kg, Mg 132 mg/kg와 비교해보면 화산회 토양보다는 높았고 비화산회 토양보다는 K이온을 제외하고 낮게 나타났다.

제주지역의 화산회 토양은 표토의 높은 유기물 함량으로 염기치환용량이 높으나 치환성 염기의 함량은 부식 또는 알로판과 결합하여 존재하므로 염기의 흡착력이 약하고 배수상태가 양호하여 K, Ca, Mg 등의 염기가 심하게 용탈되는데 특히 칼륨성분의 용탈이 심하게 일어난다고 보고하였다(68).

양이온치환용량(CEC)인 경우는 평균 14.1 cmol⁺/kg이며, 목장이 18.2 cmol⁺/kg로 가장 높았고 말방목지가 11.9 cmol⁺/kg로 Kim 등(69)이 보고한 제주토양 12.6 cmol⁺/kg에 비해 다소 높게 나타났으며, CEC가 낮은 말방목지인 경우는 양이온(K, Ca, Mg) 흡착능이 낮아 양이온을 잡지 못하고 용탈되고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과를 볼 때 CEC가 낮은 토양인 경우는 시비나 액비살포에 의한 오

염원이 쉽게 용탈되어 지하수에 영향을 줄 수 있다고 사료된다.

라. 나트륨흡착비(SAR, sodium adsorption ratio)

나트륨흡착비(SAR)는 토양내 나트륨(Na^+), 칼슘(Ca^{++})과 마그네슘(Mg^{++})과의 비율로 농업용수에서 사용되는 수질지표이며, 토양에서는 토양질이 단단하고 굳어져 물과 공기가 잘 통하지 못해 침투성을 저해하여 표면 유기물이 쉽게 유출되는 특성이 있다. Na^+ 의 양이 Ca^{++} 과 Mg^{++} 의 양과 비교하여 과다할 때는 Na^+ 가 Ca^{++} 과 치환되어 배수가 불량한 토양이 되며, 경작이 어려운 토질로 변한다. 따라서 Na^+ 양이 적어야 질 좋은 토양이 된다는 것이다.

토양 중 염류가 집적되면 토양수중 염류에 의하여 삼투압이 증가되어 물의 흡수를 저해하고 Na^+ 염은 토양의 분산을 일으키게 하여 팽윤성도 커서 토양의 물리성을 나쁘게 하며, Ca^{++} 등의 집적은 길항작용에 의하여 타 양분의 흡수를 저해한다. 본 연구에서는 한림지역의 일부 목장, 농경지에 가축분뇨 액비가 살포되어 있어서 이로 인한 토양에 영향을 얼마나 주고 있는가를 나트륨흡착비(SAR)로 나타내었다(Table 13, Fig. 14).

연구결과에 의하면 SAR비는 말방목, 목장 및 사료작물재배지가 각각 0.19, 0.17 및 0.16으로 타 용도지역보다 높게 나타났으며, 목장지대가 많은 금악 및 동부지역이 대체로 타 지역보다 높은 SAR을 보이고 있다. 이러한 요인은 가축분뇨의 살포빈도가 타지역보다 상대적으로 많아 염분 침적되어 SAR비에 영향이 미친 것으로 추정된다.

강우시 가축밀집지역에서 흘러나오는 토양유출수가 우수로를 통하여 인근 하천으로 유입되고 하류측을 갈수록 지하로 침투되고 있는 것을 Fig. 15와 같이 나타냈다. 이것을 보면 상류 측에 있는 각종 잠재 오염원들이 강우에 의해 하천으로 유입되고, 오염된 유입수는 하천을 통해 바닷가까지 흐르지 않고 중간 지점에서 습곡과 같은 지질특성에 의해 지하 침투가 일어나는 것으로 볼 때 지하수에 영향을 미칠 수 있다는 것을 추정할 수 있는 것이다.

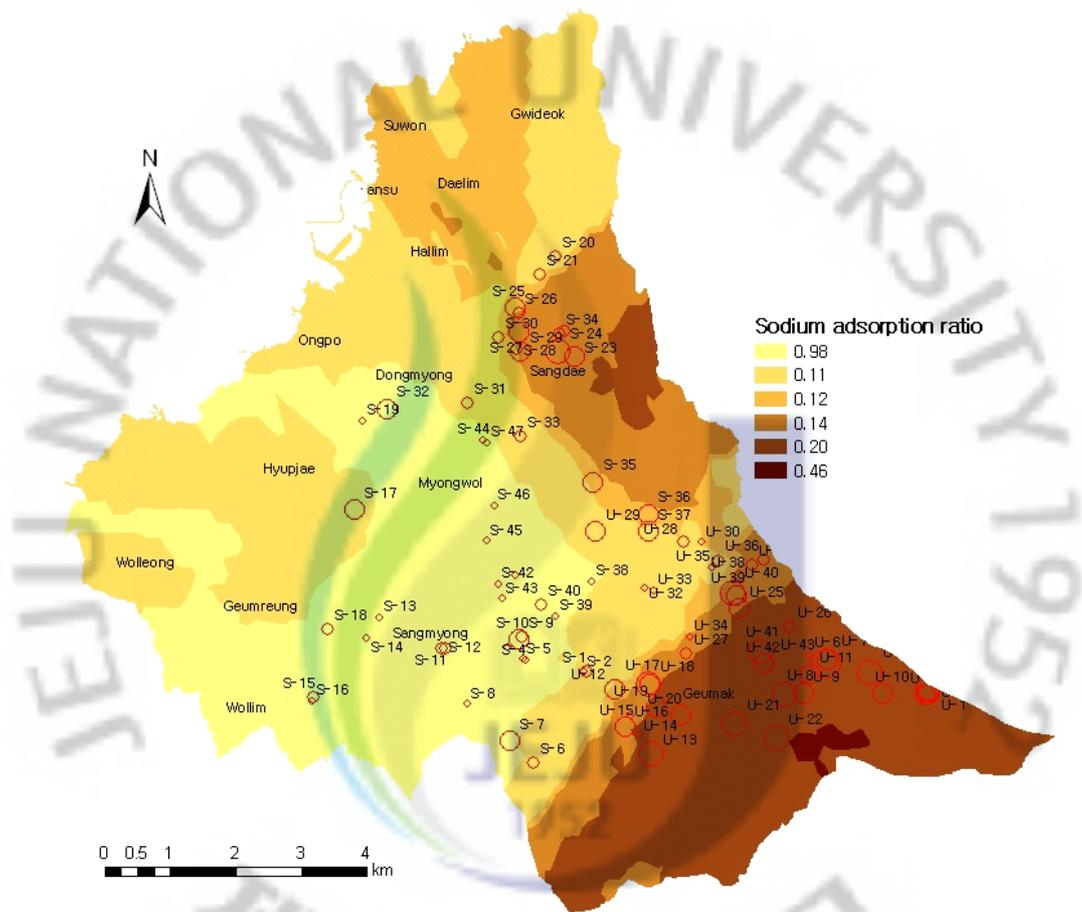


Fig. 14. Spatial distribution of sodium adsorption ratio (SAR) in soils

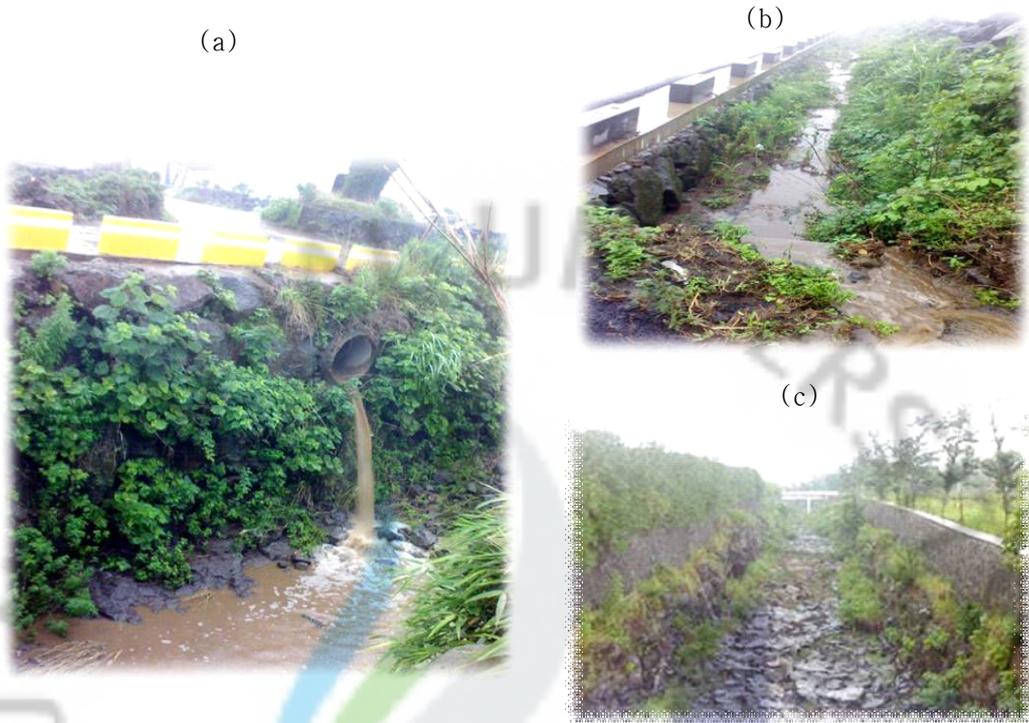


Fig. 15. Soil runoff of livestock area: (a) soil runoff flowing into stream; (b) soil runoff flowing into waterways; and (c) underground infiltration by soil runoff in 2009.

가축분뇨 액비의 과다사용은 SAR 값을 높이게 되고 결국은 토양의 투수특성을 저해 것으로 예측되었다. 따라서 액비사용의 영향으로 연구지역의 상류지역에 투수속도가 낮아지고 강우시 표면 유출을 높이므로 오염물질이 하류지역 이동에 영향을 주는 것으로 추정되었다.

3. 용천수 수질특성

한림지역 내 용천수는 90여개소로 조사(13)되고 있지만 대부분 흐르지 않고 있거나 개발로 인해 없어져 버린 경우도 있었고, 현재 흐르고 있는 용천수인 경우는 계절에 따라 수량이 많이 차이가 나며, 특히 강우기와 비강우기의 물흐름 차이가 컸다. 동명리에 있는 개명물(YW6)인 경우와 같이 평상시에는 물량이 많다가 태풍 등으로 물의 용출구가 매몰되어 완전히 말라버리는 경우도 볼 수 있었다.

Fig. 16 조사시기별 용천수 중 질산성질소 변화를 나타낸 것이다. 해안가에 접해있는 용천수(YW1, 2, 3, 4)인 경우 평균 질산성질소 농도가 7.58~8.70 mg/L이었으며, 주변지역의 토지이용을 보면 대부분 농경지였다.

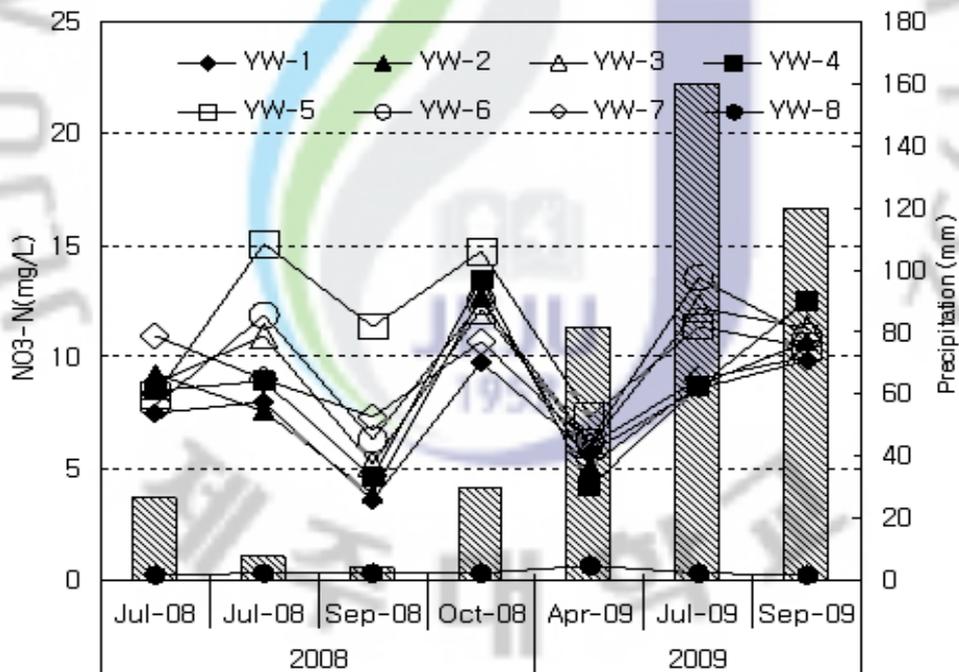


Fig. 16 Monthly variation of NO₃-N (mg/L) of spring water at each sampling site and rainfall (mm).

용포천 유역의 용천수(YW5, 6, 7)의 질산성질소농도는 9.02~11.22 mg/L로 비교적 높게 측정되었는데 주요 원인으로는 정구우물(YW5), 개명물(YW6), 문수물(YW7)이 모두 용포천 유역에 위치하고 있고 주변지역의 토지이용을 보면 농경지로 이루어져 있기 때문에 토양중의 질소용탈에 의한 것으로 추정된다. 금악지역에 있는 정물(YW8)은 0.38 mg/L로 매우 낮게 나타나 주변지역이 오염원이 없는 산림지역으로 거의 배경농도로 조사되어 다른 용천수에 비해 현저히 낮은 것으로 사료된다.

강우량과 비교하여 볼 때 용천수의 질산성질소의 변화는 '08년 9월에 측정된 결과와 '09년 4월에 측정된 것이 낮게 나타났는데 이것은 시료채수 전의 강우량에 의한 영향으로 추정된다. '08년 7월, 9월, 10월과 '09년 7월, 10월에 채수한 정구우물(YW5)인 경우는 다른 지점에 비해 먹는물 수질기준인 질산성질소농도 10 mg/L이상 초과하는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 Kim 등(70)이 제주지역 해안용출수의 수질특성에 의하면 한림지역의 용천수 3개소에서 질산성질소농도 범위가 12.8~37.6 mg/L로 측정되었으며, 4, 6월보다는 10월에 높아진다는 보고보다 농도차이는 다소 있지만 경향은 유사한 결과로 나타났다. 그리고 용포천 유역의 용천수 3개 지점은 채수 시기별로 먹는물 수질기준 10 mg/L을 초과하고 있어 주변 토지 이용형태를 감안하여 보면 농경지 등의 오염원으로부터 영향을 받고 있을 것으로 추정할 수 있다.

한림지역의 용천수 수질시료의 수리지구화학적 유형인 파이퍼 다이어그램(Piper diagram)은 Fig. 17에 나타낸 바와 같다.

파이퍼 다이어그램상에서 지하수시료는 I, II, III, IV의 4 그룹의 지하수 유형으로 대별된다. I 그룹에 속하는 Ca-HCO₃형은 일반적으로 오염의 영향을 비교적 덜 받는 천부지하수의 수질유형에 속하고, Na-HCO₃형은 심부지하수의 수질유형에 속하는 경우가 많다(71). II 그룹은 Na-HCO₃형으로서 Ca-HCO₃형이 진화되었거나 Na-사장석과 같은 Na-규산염 광물의 수화작용이 영향으로 해석되는 그룹이고 지역내 용천수는 II 그룹에 속하는 수질은 없었다.

III 그룹은 Ca(Mg)-HCO₃형으로서 YW6, YW7, YW8(개명물, 문수물, 정물)이 이에 속한다. Ca(Mg)-HCO₃형태로 주변 농경지의 토양에 영향을 받고 있음을 추정할 수 있으며 질산성질소 농도도 5 mg/L 이상으로 조사되었다. IV 그룹은

Na-Cl형에 속하며 YW1, YW2, YW3, YW4이다. 이들은 담수보다 해수의 영향을 상대적으로 더 크게 받는 지하수로서 전반적으로 해안가에 위치한다.

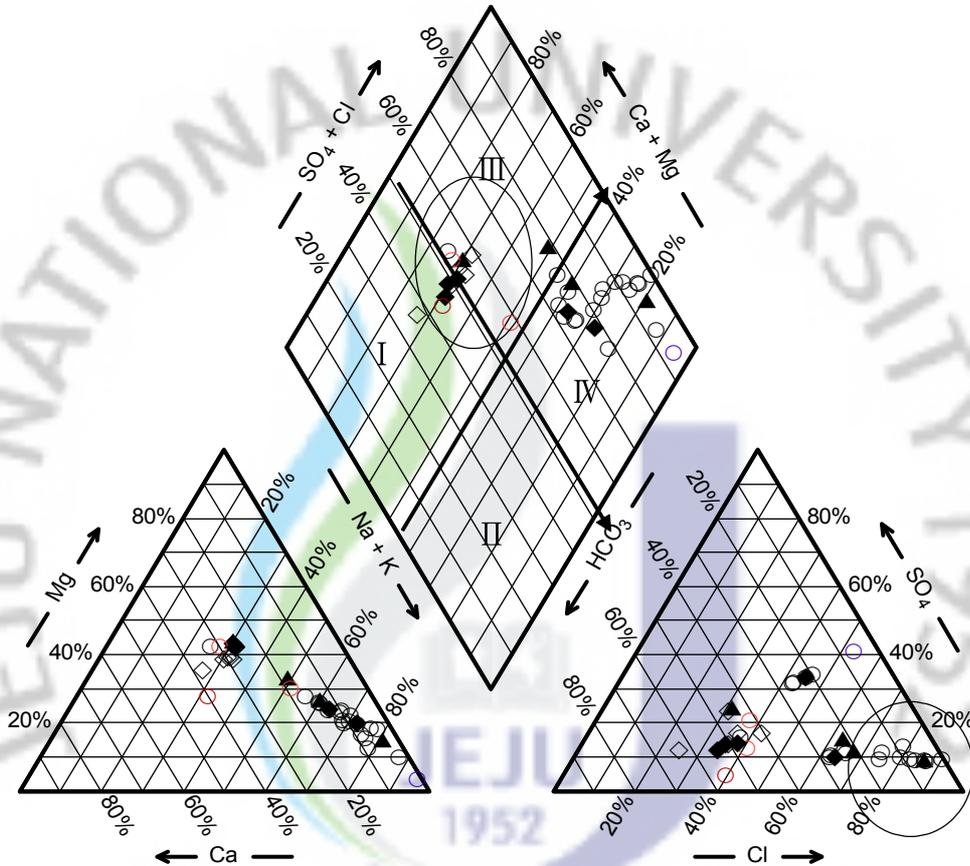


Fig. 17. Piper diagram of the spring water samples in the study area

이러한 결과는 해안가에 위치하는 용천수인 경우는 바닷물의 간만조의 차이 때문에 상시 혼합되어져 있고 시료채수에 따른 시간적 제약을 받을 수 있으므로 채수 시 주의하여야 하며, 용천수의 용출량을 보면 시기적으로 많은 차이가 있었고, 과거에 비하여 현저히 떨어졌다는 것을 주변 마을주민들에게서 들을 수 있었다.

용천수의 질소기원을 파악하기 위하여 질산성질소농도와 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 이용하여

각오염원에 대한 기여율 결과는 Table 14와 같다. 이들 오염기여율을 계산하기 위해서 Kumazawa 등(72)이 사용한 공식(1)과 (2)를 사용하여 계산하고 있다.

$$W = X + Y + Z \text{ -----(1)}$$

$$aW = bX + cY + dz \text{ -----(2)}$$

W : 지하수 중의 질산성질소(mg/L)

X : 화학비료 유래의 질산성질소(mg/L)

Y : 가축분뇨 및 생활하수 유래의 질산질산성질소(mg/L)

Z : 자연 토양질소 유래의 질산성질소(mg/L)

a, b, c, d : 각각에 대한 $\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$ 값

제주지역에서 자연토양 만으로 질소의 영향을 받고 있는 용천수의 질산성질소 농도는 Oh와 Hyun (10)에 의하여 1.8mg/L, $\delta^{15}\text{N}$ 값 1.8‰로 보고하였고, Song 등 (3)이 보고한 화학비료에 의한 $\delta^{15}\text{N}$ 값 1.8‰와 동물성 유기질비료에 의한 $\delta^{15}\text{N}$ 값 13.75‰를 사용하였다.

이러한 방법에 따라 각 오염원별 기여율을 구한 결과는 Table 14과 같으며 한림지역 내 용천수 수질에 대한 질소안정동위체비 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 6.55~11.77‰ 범위로 평균 8.38‰으로 측정되었다.

한림읍 협재리에 위치한 매치물(YW4)과 진근동에 위치한 개명물(YW6)지역의 가축분뇨 및 생활하수에 의한 기여율은 각각 75.9%, 63.2%이고, $\delta^{15}\text{N}$ 값이 11.77‰, 10.08‰로 다른 분포 비에 비해 높아 가축분뇨 및 생활하수에서 유래하는 질산성질소로 추정된다.

반면에 해안가에 위치한 YW1, YW2, YW3, YW5 지역의 화학비료에 의한 기여율은 각각 59.0%, 58.3%, 55.4%, 50.7%이고 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 6.55‰, 6.78‰, 7.14‰, 7.85‰로 나타났다. 귀덕리에 위치한 YW1, YW2 지역은 화학비료에서 유래한 질산성질소로 추정되고, 한림 도심지에 위치한 YW3과 금능리 해안가 근처인 정구우물(YW5)인 경우는 생활하수와 화학비료에서 유래하는 질산성질소로 추정되며 주변 토지이용도를 보면 인구밀집지역인 주거지와 농경지로 이루어져 있다

Table 14. Predicted contribution of each source to NO₃-N concentration using $\delta^{15}\text{N}$ and NO₃-N at each sampling site of the springwater

	NO ₃ -N (mg/L)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Chemical fertilizers(%)	Livestock wastes & domestic sewages(%)	Natural soil (%)
YW1	9.75	6.55	59.0	36.9	4.1
YW2	12.75	6.78	58.3	38.6	3.1
YW3	12.15	7.14	55.4	41.3	3.3
YW4	13.50	11.77	21.2	75.9	3.0
YW5	14.75	7.85	50.7	46.6	2.7
YW6	12.50	10.08	33.6	63.2	3.2

이러한 결과는 Song 등(3)이 질소안정동위비 이용한 지하수 중의 오염원 추정 연구보고에서 도심지 및 마을하부지역의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 5.2~9.9‰, 전담지역 3.6~5.8‰의 결과와 Kim 등(2)이 질산성질소로 오염된 지하수의 오염원에 관한연구에서 화학비료 유래로 추정되는 지역 4.15~5.89‰, 가축분뇨 유래로 추정되는 지역 7.75~9.60‰ 보다 다소 높았다.

4. 지하수 수질특성

가. 질산성질소 농도

한림지역 27개 지하수관정을 대상으로 2008년 10월부터 2009년 9월까지 3차에 걸쳐 총 80개 수질시료를 채수하여 지역 및 토지이용별 질산성질소농도 변화를 측정된 결과는 Table 15 및 16과 같다.

한림지역의 질산성질소농도는 0.17~28.95mg/L로서 평균 6.91 mg/L이고 먹는 물 수질기준(10.0 mg/L)을 초과하는 지하수관정은 총 80개 시료중 20개로 전 조사 횟수의 25%인 것으로 나타났다. 지역별로 보면 협재, 명월, 금악리가 각각 0.32 mg/L, 1.45 mg/L, 1.50 mg/L으로 매우 낮은 값을 보였고, 월령, 월림, 귀덕이 각각 23.23 mg/L, 16.67 mg/L, 10.00 mg/L로 비교적 높았다.

Table 15. Statistical summary of nitrate (NO₃-N) depending on area

Area	Mean	SD	Min.	Med.	Max.	No. of sample
Geumak	1.45	0.72	0.25	1.30	2.62	12
Sangdae	3.72	2.70	0.85	2.79	8.37	15
Myeongwol	1.50	0.44	1.21	1.30	2.00	3
Wolrim	16.67	1.66	15.18	16.37	18.45	3
Wolryeong	23.23	7.38	14.90	25.83	28.95	3
Dongmyeong	9.14	2.42	6.15	8.22	12.70	9
Hyeopjae	0.32	0.13	0.17	0.38	0.40	3
Hallim	11.73	4.80	5.55	14.15	15.72	6
Geumneung	5.63	3.53	0.65	5.65	10.47	11
Daerim	6.59	3.71	2.32	8.65	8.82	3
Gwideok	10.00	5.52	5.71	6.59	17.98	12
Total	6.91	6.16	0.17	6.04	28.95	80

Table 16. Statistical summary of nitrate (NO₃-N) depending on land use

Land use	Mean	SD	Min	Med.	Max	No. of sample
Cropland	8.27	7.29	0.25	6.13	28.85	33
Orchard	5.86	5.12	0.65	5.93	18.45	24
Residential	10.02	4.94	2.32	8.82	15.72	9
Green field	2.87	3.80	0.17	1.37	10.47	11
Forest	5.72	0.64	5.11	5.65	6.39	3
Total	6.91	6.16	0.17	6.04	28.95	80

토지이용에 따른 질산성질소의 농도 변화를 보면 주거지역, 농경지, 과수원, 산림지역이 각각 10.02 mg/L, 8.27 mg/L, 5.86 mg/L, 5.2 mg/L, 2.87 mg/L 순으로 조사되어 산림지역을 제외하고는 외부오염물질에 의한 영향으로 추정되는 NO₃-N 5.0 mg/L을 초과하고 있는 것으로 나타났다.

상자그래프인 Fig. 18을 보면 지역별 질산성질소농도 분포현황이 쉽게 알 수 있는데 주거지역인 한림과 농경지지역인 귀덕, 월령에서 변화폭이 크게 나타나고 있고, 산림지역인 금악은 변화폭이 적어 주변 토지이용 상황에 따라 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 Jeong 등(5)이 한림지역의 질산성질소농도 분포연구에서 먹는물 수질기준 10 mg/L 초과율이 8월에 32%, 11월에 27%와 비교적 낮은 고도인 150m이하의 저지대에서 주로 나타났다는 보고와 유사하였다. 또한 Kim 등(2)이 보고한 제주 서부지역의 대정읍에 대한 질산성질소농도 분포연구에서 평균 8.5 mg/L 보다는 낮았고, 먹는물 수질기준 초과율도 58%로 본 연구보다 낮게 나타나는 것으로 볼 때 제주지역 내에서도 토양이용 및 지역별로 질산성질소농도 변화폭은 클 것으로 추정되어 진다.

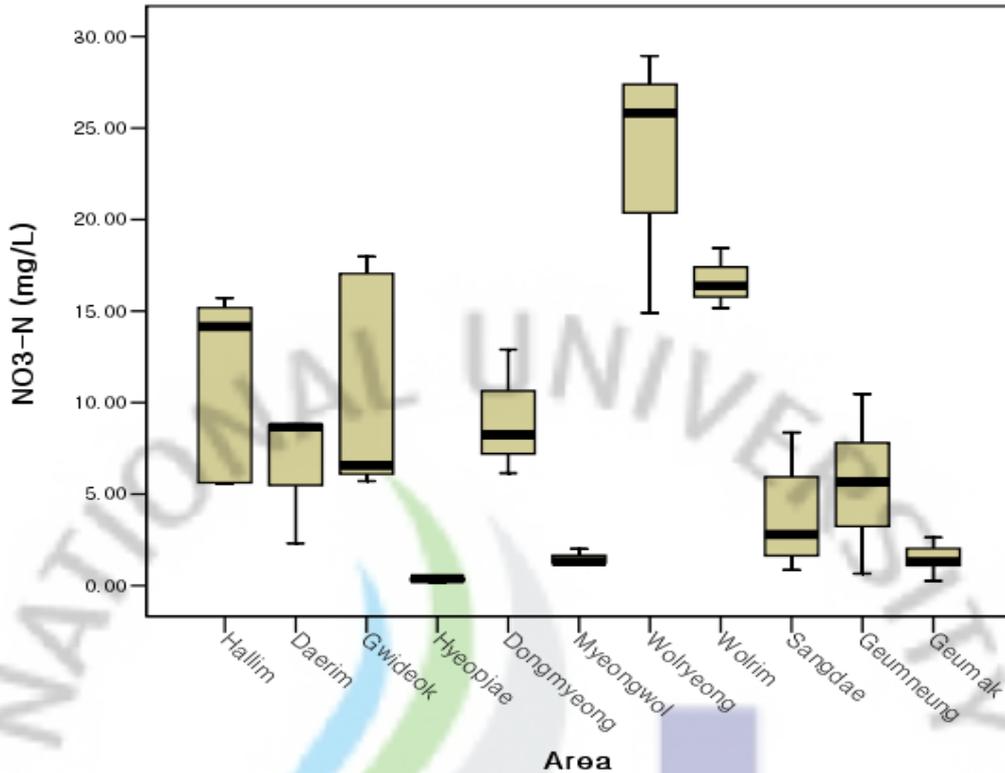


Fig. 18. Box diagram of nitrate ($\text{NO}_3\text{-N}$) of the groundwater depending on area (n=80)

나. 지하수 수질특성 분류

Fig. 19은 지하수의 수질유형 나타낸 파이퍼 다이어그램(Piper diagram)이며 수질조성을 조사하기 위한 방법의 하나로서 주요 양이온과 음이온의 조성을 특성에 따라 4군으로 분류하고 그 수질의 특성을 나타낼 수 있다.

일반적으로 I형은 보통 이온화가 진행 중인 하천수나 천부지하수에서 볼 수 있으며, II형은 이온화가 끝난 담수의 심부지하수, III형은 토양층의 영향을 받아 오염이 진행되는 지하수, IV형은 해수나 염수천으로 구분한다. 또한 지하수는 지층을 유동하는 과정에서 성분조성이 계통적으로 변화하는데 인위적 영향을 받지 않은 경우는 파이퍼 다이어그램에서 Na+K 쪽 방향으로 가고, 인위적인 오염을 받을 경우는 SO_4+Cl 쪽으로 변화하는 경향이 있어 지하수질의 공간적 시간적인 변화를 해석함으로써 오염원인을 추정할 수 있는 장점을 가지고 있다(56).

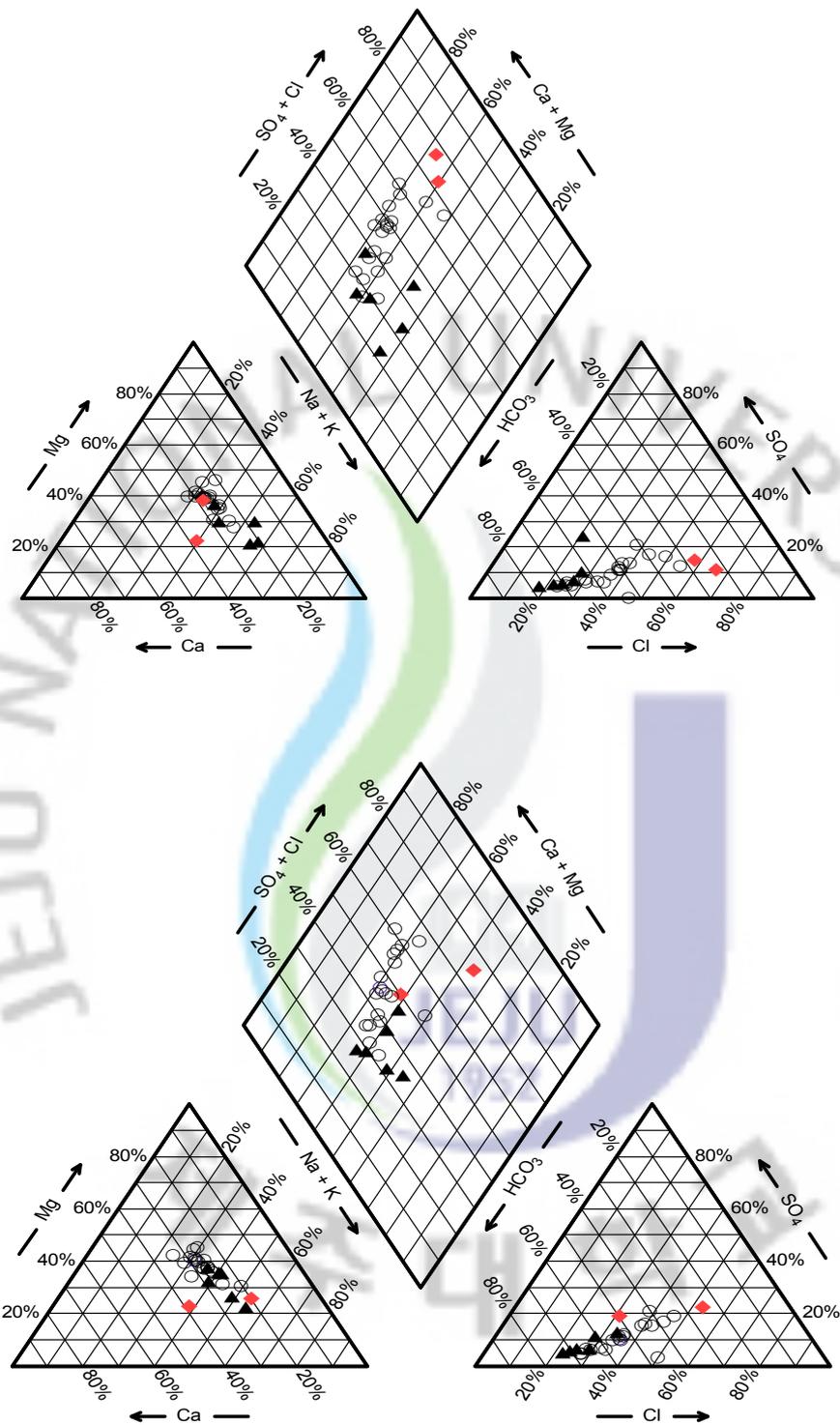


Fig. 19. Piper diagrams of the groundwater from (n=90) in Hallim area (Circle : East of Ongpo watershed, Filled delta : West of Ongpo watershed).

이러한 수질유형을 바탕으로 한림지역 27개소의 지하수관정에 대한 계층적 군집분석(Hierarchical cluster analysis, HCA)에 의해 3개의 군집으로 분류한 결과는 Table 17과 같다.

Table 17. The water types according to the results of hierarchical cluster analysis

Group	Water type	Characteristic	No. of sample
Group 1	Ca(Mg)-HCO ₃	Initial recharge	19
Group 2	Na-HCO ₃	After the evolution of groundwater recharge	6
Group 3	Ca-SO ₄ (NO ₃) Na-Cl	Mixed source (fertilizer, manure, sewage, seawater)	2

그룹 1은 Ca(Mg)-HCO₃형의 수질특성을 보이는 군집은 27개소 중 19개소 (70%)로 가축시설 밀집지역인 금악리, 상대리 명월리와 마늘, 브로콜리, 양배추를 주로 재배하는 귀덕리가 포함된다. 이 지역의 수질특성은 투수성이 좋은 토양과 지질을 통하여 최근에 함양된 이온교환작용 등이 아직 일어나지 않은 수질특성을 유지하고 있는 지하수를 나타낸다. 이러한 특성 때문에 주변에 오염원이 잠재한다면 오염잠재성이 극히 큰 지역으로 분류될 수 있다.

따라서 지하수의 오염은 주변 지하수의 오염으로 연결되기 때문에 우선 보호지역으로 보존되어야 할 지역이라고 볼 수 있는데 Fig. 20에서 나타낸 것과 같이 한림 옹포천을 중심으로 동부에 분포하고 있다.

반면에 그룹 2는 그룹 1과 같이 함양된 지하수가 대수층 내에서 양이온교환 등 수질의 진화과정을 걸친 Na-HCO₃형의 수질특성을 보이는 곳이며 안정된 심층 지하수로서 6개소(22%)가 해당된다.

이들 관정은 Fig. 20에 나타낸 바와 같이 한림지역의 옹포천을 중심으로 서부 지역에 주로 분포하고 있으며 하류지역에서는 바위가 있는 미사질양토인 구좌통,

오라통 등이 분포하고 있고, 토지이용형태를 보면 옹포천 하류지역의 서쪽은 습지지역으로 분포되어 있으며 상류 측 은 논밭으로 주로 사용되었던 지역이다. 그룹 3은 해수의 영향과 육상오염원 영향을 동시에 받는 관정으로 2개소(7%)가 해당되었으며, Na-Cl형태의 수질형태로 분류되지만 어떤 오염원이 주도적으로 작용하는지를 구별하기가 어려운 관정이다.

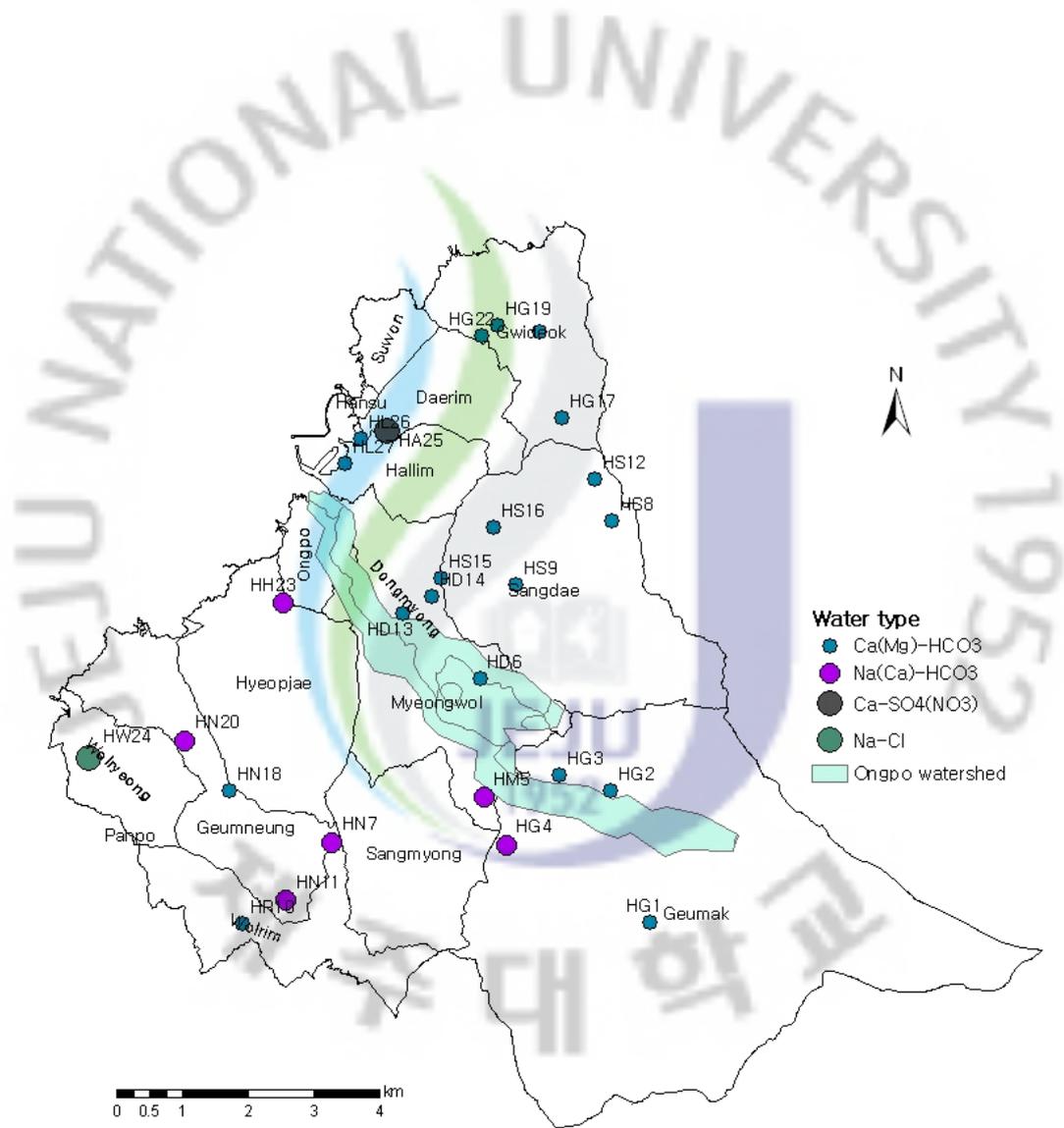


Fig. 20. Spatial distribution of water types in the groundwater

질산성질소농도는 수질유형별 Ca(Mg)-HCO₃(옹포천 동측) 지역에서는 0.3~15.3 mg/L, 서측의 Ca-SO₄(NO₃)에서는 13.9~28.9 mg/L, Na-HCO₃에서는 0.2~3.0 mg/L, 해안가 Na-Cl형 수질에서는 5.5~15.7 mg/L를 나타내었다.

이러한 결과는 한림지역의 수질은 주로 Na-HCO₃ 유형이며, 일부지점에서는 Mg-HCO₃, Ca(Mg)-HCO₃ 유형 등이 나타난다는 Jeong 등(2003)의 보고와 일치하였다. 이런 유형은 지하수의 유동 경로를 따라 서로 다른 수리지화학적 반응에 의한 것으로 지표오염물질의 유입 등이 지하수의 수질에 영향을 미치고 있음을 시사한다.

따라서 수질유형에 의해 잠재적인 오염원에 영향을 받을 수 있는 천부지하수 형태의 그룹1과 이온교환이 끝나고 안정화된 지하수인 심부지하수형태의 그룹 2로 분리하여 그룹별 수질특성에 대해 비교할 필요가 있다.

다. 지하수의 수리 지화학적 특성

지하수관정의 굴착깊이에 따른 지하수 수질 특성을 알아보기 위하여 50m이하를 천부지하수(Shallow groundwater), 50~100m를 중간지하수(Intermediate groundwater) 그리고 100m이상를 심도지하수(Deep groundwater) 3가지로 구분하여 Fig. 21과 Fig. 22에 나타냈다.

알카리 금속(K, Na)의 평균농도 95%신뢰구간의 상·하한 값을 보면 심부로 갈수록 감소하는 양상을 보인다. K의 농도범위는 심부지하수에서 3.4~4.0 mg/L, 중간지하수는 4.4~6.6 mg/L, 천부지하수는 3.4~6.7 mg/L로 보여 심부로 갈수록 K의 농도가 감소하고 있지만 천부지하수와 중간지하수의 K농도는 거의 일정한 값을 나타냈다. K의 농도가 천부지하수와 중간지하수에서 일정한 농도를 나타내는 이유는 물-광물 상호작용 단계에서 양이온 교환 등의 반응에 의해 지하수 중 K농도가 제한되고 신속하게 평형농도에 도달하기 때문으로 해석된다(89). Na의 농도범위는 심부지하수에서 11.4~14.8 mg/L, 중간지하수는 13.9~23.0 mg/L, 천부지하수는 13.7~37.2 mg/L를 보여 심부로 갈수록 Na의 농도가 감소하고 있다.

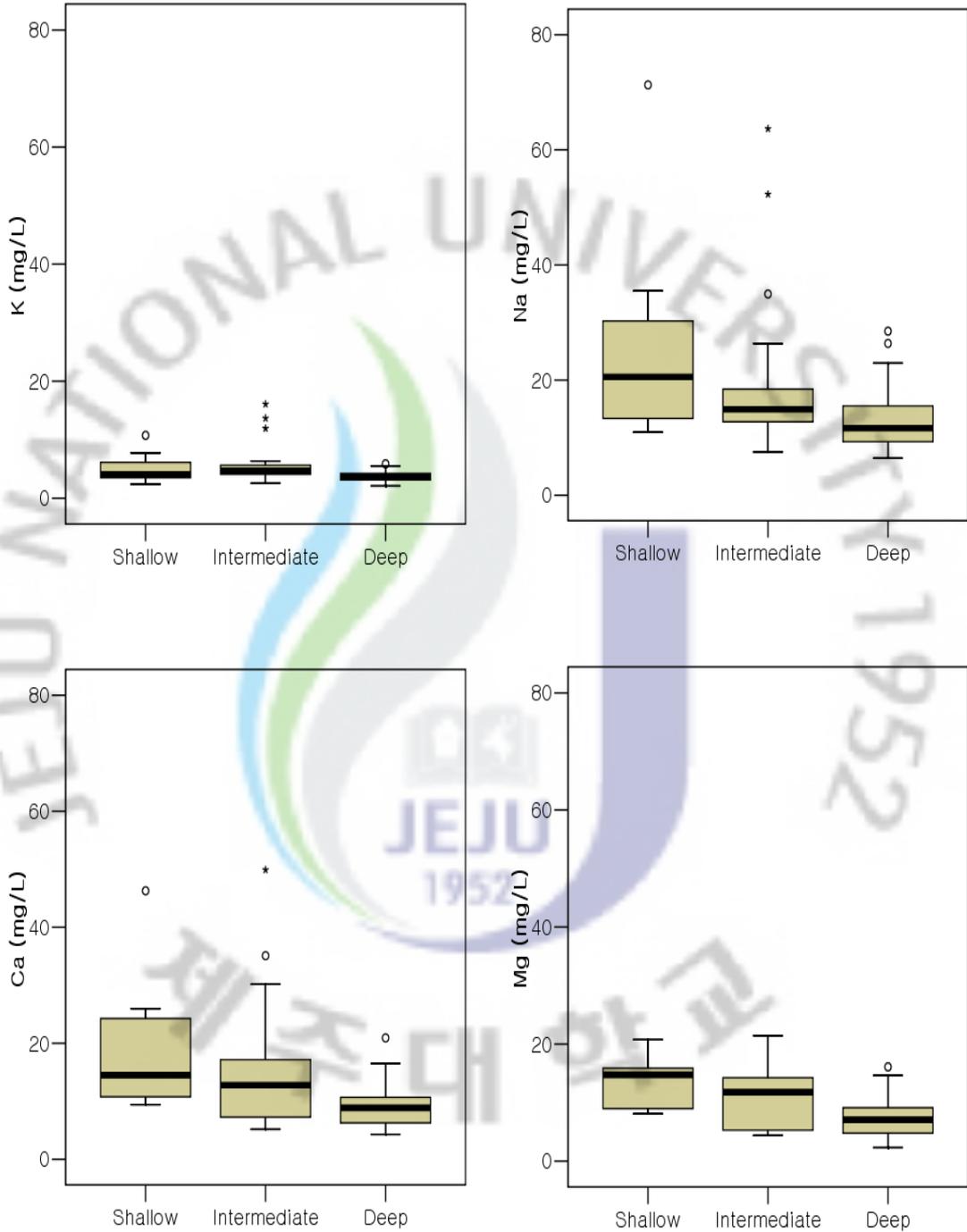


Fig. 21. Box diagram showing major elements contents and well depth in Hallim area.

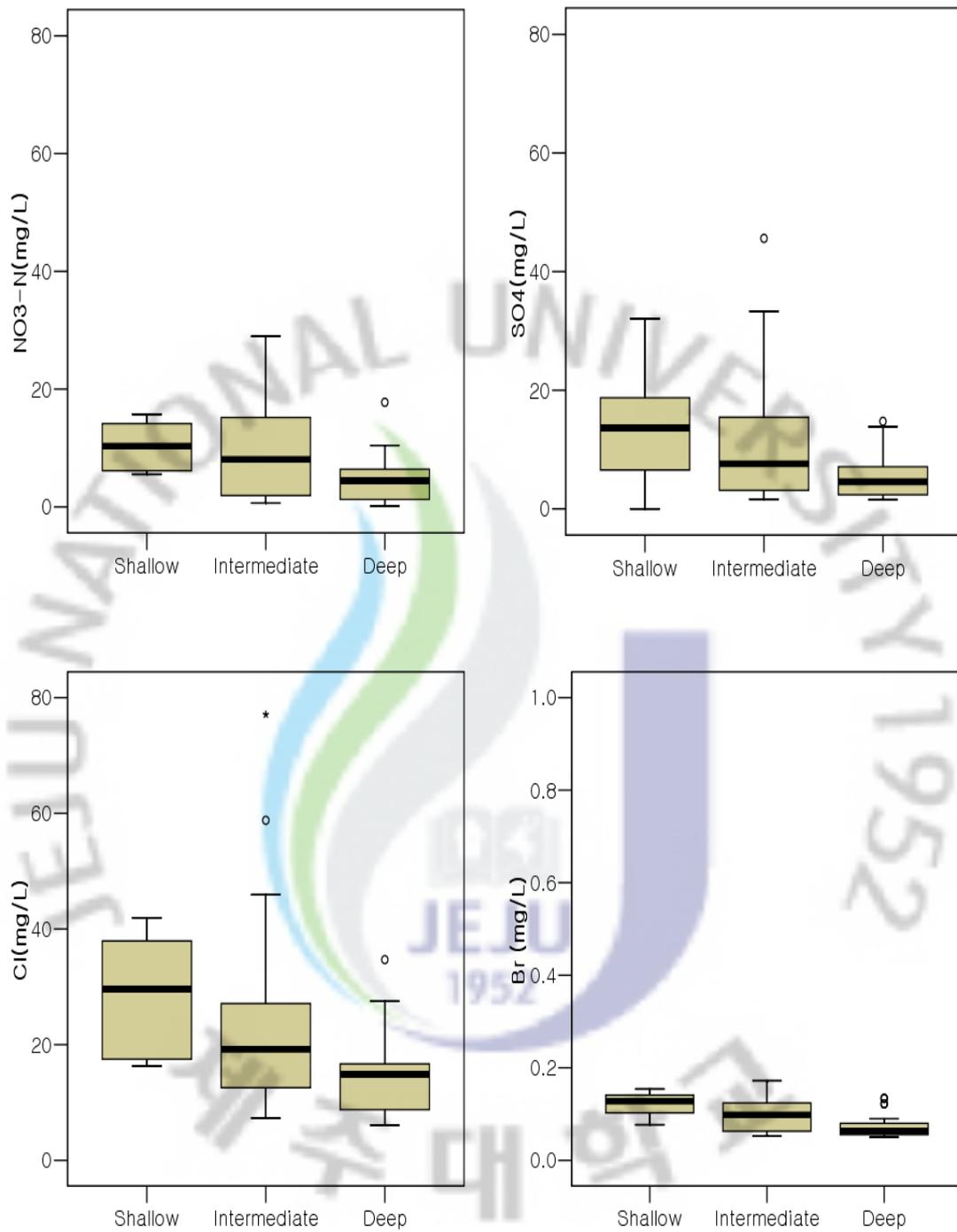


Fig. 22. Box diagram showing major contamination contents and well depth in Hallim area.

알카리 토금속(Mg, Ca)에서 평균농도 95%신뢰구간의 상·하한 값을 보면 알카리 토금속이 토양에 영향을 받아 천부로 갈수록 증가하는 양상을 보인다. Ca의 농도범위는 심부지하수에서 8.0~10.3 mg/L, 중간지하수는 10.8~18.2 mg/L, 천부지하수는 11.3~26.1 mg/L로 천부로 갈수록 Ca의 농도가 증가하고 있다.

Mg의 농도범위는 심도지하수에서 6.5~8.7 mg/L, 중간지하수 8.7~12.5 mg/L, 천부지하수는 10.1~16.0 mg/L를 보여 천부로 갈수록 Mg의 농도가 증가하고 있다.

이는 Yun 등(71)과 Kang (27)이 알카리 토금속이 천부로 갈수록 증가하는 양상이 보인다는 보고와 일치하였다.

할로젠원소(Cl, Br)는 천부로 갈수록 농도가 증가하는 양상을 보인다. 평균농도 95%의 신뢰구간 상·하한의 농도 값을 보면 Cl의 농도 범위는 심부지하수에서 12.4~16.5 mg/L, 중간지하수는 17.0~28.5 mg/L, 천부지하수는 17.6~50.7 mg/L를 보여 천부로 갈수록 Cl의 농도가 증가하고 있다. Br의 농도범위는 심부지하수에서 0.07~0.08 mg/L, 중간지하수는 0.09~0.11 mg/L, 천부지하수는 0.10~0.14 mg/L를 보여 천부로 갈수록 Br의 농도가 증가하고 있다.

SO₄의 농도 범위는 심부지하수에서 4.08~6.25 mg/L, 중간지하수는 6.8~14.3 mg/L, 천부지하수는 7.5~19.5 mg/L를 보여 천부로 갈수록 SO₄의 농도가 증가하고 있는데 심부지하수의 농도에 비해 천부지하수의 농도가 2배 이상 차이가 있는 것으로 보아 토양지표수에 의한 영향을 받는 것으로 추정된다.

한림지역 내 잠재적 오염원으로 가장 문제가 되고 있는 NO₃-N의 농도 범위를 보면 심부지하수에서 3.2~5.5 mg/L, 중간지하수는 6.2~12.1 mg/L, 천부지하수는 7.2~12.8 mg/L를 보여 천부로 갈수록 NO₃-N의 농도가 증가하고 있다. 인위적인 오염이라고 볼 수 있는 질산성질소 농도 5.0 mg/L를 기준으로 본다면 중간지하수부터 천부지하수까지 오염이 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 이는 제주도의 해안 저지대에서 농업활동에 의해 질산이온의 농도가 높아진다는 기존의 연구결과와 일치한다(3, 8).

이러한 결과는 Lee (86)가 고도에 따른 제주도 지하수의 수질특성연구에서 표고 50m이하 지역 32.15 mg/L, 표고 50~100m 지역 21.15 mg/L 그리고 표고 100m이상의 지역은 9.79 mg/L으로 고도가 낮을수록 질산이온의 농도가 높아지고 있는데 이는 오염원으로부터 거리가 멀어질수록 점진적으로 증가하는 현상을

나타내어 하류구배의 지하수에서 높은 농도의 질산이온이 검출될 수 있다는 보고와 유사한 결과를 보였다.

라. 이온성분간 상관분석

지하수 중의 각 성분들 간에 상관매트릭스를 비교하여 오염원인을 추정하는 방법(56)으로 지하수 수질 중 질산성질소 등 이온성분간 상관관계를 분석한 결과는 Table 18과 같다.

Table 18. Correlation coefficients among nitrate nitrogen and ion species

	NO ₃ -N	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	SO ₄
Na	0.549**							
K	0.268*	0.681**						
Mg	0.858**	0.680**	0.478**					
Ca	0.667**	0.867**	0.716**	0.848**				
F	0.214*	0.479**	0.352**	0.245*	0.437**			
Cl	0.643**	0.948**	0.691**	0.766**	0.910**	0.461**		
SO ₄	0.773**	0.874**	0.595**	0.841**	0.900**	0.429**	0.898**	
NH ₄	0.215*	0.100	0.194	0.258*	0.212*	0.296**	0.117	0.123

Sample n=90, * 0.05, ** 0.01

질산성질소에 높은 상관성을 갖는 성분은 Ca과 Mg이고, 그 상관계수는 각각 0.667과 0.858로 고도의 유의성(P<0.01)을 가지고 있다.

또한 Ca과 Mg은 질소비료의 주성분인 황산이온 사이의 상관성을 보면 각각

0.900, 0.841로 역시 고도의 유의성($P < 0.01$)이 있었다(SPSS 2004). 이 지역에 사용된 비료는 질소비료와 더불어 토양의 산성화를 방지할 목적으로 칼슘, 마그네슘이 주성분인 고토석회(高土石灰)가 다량으로 살포되어 질산성질소와 칼슘, 마그네슘, 황산이온 간의 높은 상관성이 있는 것으로 보아 질산성질소의 기원은 질소비료로 추정할 수 있다.

마. 양이온과 미량금속 거동

2009년 6월과 9월에 채수한 지하수 중 이온성 물질농도에 대한 항목별 기술통계량을 Table 19에 나타냈다.

양이온성분인 Ca, K, Mg, Na의 강우전 6월에는 각각 평균 8.835 mg/L, 4.110 mg/L, 10.494 mg/L, 8.359 mg/L으로 $Mg > Ca > Na > K$ 순으로 나타났으며, 강우후인 9월에는 7.708 mg/L, 4.812 mg/L, 9.108 mg/L, 15.102 mg/L로 $Na > Mg > Ca > K$ 순으로 Na이온이 6월에 비해 높게 나타났다.

Table 19. Technical statistics quantity of groundwater cations in Hallim area

Major ions	Min.	Max.	Mean	SD	
					mg/L (n=54)
June 2009					
Ca	3.78	24.62	8.83	5.20	
K	2.41	11.13	4.11	1.72	
Mg	5.46	17.81	10.49	4.22	
Na	3.65	22.02	8.36	4.48	
Sept. 2009					
Ca	4.53	9.24	7.71	1.47	
K	2.61	13.38	4.81	2.03	
Mg	4.49	14.90	9.11	3.67	
Na	7.15	37.18	15.10	6.68	

원소의 움직임에 영향을 주는 공존이온으로서는 Ca^+ , Mg^+ , HCO_3^- , Na^+ , SO_4^- 이온 등이라 볼 수 있는데 일본 지하수의 평균치를 보면 Ca^+ 17.3 mg/L, Mg^+ 4.6 mg/L, HCO_3^- 66.4 mg/L, Na^+ 12.7 mg/L, SO_4^- 16.7 mg/L 정도이고, 토양의 공극수의 이온농도는 1/10 정도의 농도에서 10배 이상의 농도까지 조성 변동폭이 심하다고 보고(77)하였으며 본 연구 결과에 비해 Ca이 높고 Na은 낮았다.

Uchida(78)에 의하면 순환성의 지하수는 지하로 침투되면서 시간, 온도, 압력 등에 의해서 수질이 변화하고 그 변화의 방향은 일정한 형태가 되는데 지표수는 유기물에서 발생하는 탄산가스에 의해 지층에 있는 칼슘이 용출되고 그다음 나트륨과의 치환에 의해 지하수가 Na- HCO_3 형으로 되며 탄산류의 증가에 따라 마그네슘과 칼슘은 치환되어지고 나트륨이 증가한다고 보고하였다.

이러한 결과로 볼 때 9월에 나트륨이온이 높게 나타나는 것은 마그네슘, 칼슘이온이 서서히 탄산에 의해 치환이 일어났거나, 가축분뇨액비가 시비된 상류지역의 토양유출수가 강우로 인해 지하로 침투되면서 나트륨이 증가한 것으로 해석할 수 있다.

토양 중에 잔류하는 미량 유해금속이 지하수에 영향을 주고 있는 가를 알아보기 위해 토양과 지하수 중의 유해금속 함량을 각각 Table 20와 21에 나타냈다.

Table 20. Technical statistics quantity of toxic metal of soil

Toxic metals	Min.	Max.	Mean	SD
Co	0.000	1.905	0.704	0.76
As	0.050	0.160	0.111	0.04
Cd	0.019	0.049	0.031	0.01
Cr	0.030	0.340	0.149	0.10
2009 Cu	0.160	2.300	0.848	0.83
Mn	5.620	171.025	49.081	55.70
Pb	0.150	1.015	0.381	0.30
Zn	1.010	13.450	5.164	4.40
Ni	0.280	3.160	1.354	0.97

Table 21. Technical statistics quantity of toxic metal of the groundwater

Toxic metals	Min.	Max.	Mean	SD	
	$\mu\text{g/L}$ (n=54)				
June 2009	Co	2.7	74.6	12.7	13.6
	As	0.0	5.8	1.5	1.6
	Cd	0.0	0.3	0.1	0.1
	Cr	0.0	5.4	3.1	0.8
	Cu	0.0	7.1	2.5	1.6
	Fe	0.0	29.1	6.5	7.7
	Mn	0.0	0.9	0.4	0.3
	Pb	0.0	3.6	1.3	0.9
	Zn	0.0	397.3	66.7	100.4
Sept. 2009	Co	0.0	1.1	0.6	0.3
	As	0.0	38.0	6.2	9.0
	Cd	0.4	0.6	0.5	0.0
	Cr	0.8	4.7	2.0	0.8
	Cu	0.0	21.5	5.9	5.1
	Fe	8.1	45.5	12.0	7.7
	Mn	0.0	3.6	0.3	0.7
	Pb	0.2	4.0	2.2	0.9
	Zn	11.4	415.3	72.6	77.0

토양과 지하수에 잔류하는 중금속을 보면 먹는물 수질기준에서 건강상 유해영향 무기물기준에 속하는 Pb, As, Cr, Cd인 경우 토양에서는 각각 0.381 mg/kg, 0.111 mg/kg, 0.149 mg/kg, 0.031 mg/kg이며, 지하수에서는 1.3 $\mu\text{g/L}$, 1.5 $\mu\text{g/L}$, 3.1 $\mu\text{g/L}$, 0.1 $\mu\text{g/L}$ 으로 분석되었다. 심미적 영향물질 기준에 속하는 Cu, Zn, Mn

인 경우 토양에서는 0.848 mg/kg, 5.164 mg/kg, 49.081 mg/kg이며, 지하수에서는 각각 2.5 $\mu\text{g/L}$, 66.7 $\mu\text{g/L}$, 0.4 $\mu\text{g/L}$ 로 조사되어 먹는물 수질기준에 비해 극미량으로 잔류하고 있어 주변 토양에 의한 오염은 없는 것으로 나타났다. 특히 제주지역의 토양 중 Ni 자연함유량을 제주도 환경백서(62)에서 보고한 전함량법에 의한 평균값이 46.2 mg/kg으로 높게 나타나 토양우려기준을 초과하고 있으며, 0.1N HCl로 추출한 경우는 1.354 mg/kg로 나타나고 있지만 지하수에서는 평균 1.4 $\mu\text{g/L}$, 최대 6.1 $\mu\text{g/L}$ 정도로 조사되어 지하 대수층에는 거의 영향을 주지 않고 있다. 이것은 토양 중에 Ni은 주변 토양층에 대부분 단단하게 흡착되어 있는 것으로 추정된다.

지하수 및 토양에 있어서 중금속원소의 거동을 보면 토양 공급수인 경우 기후 조건이나 토지이용에 따라 강산성에서 알칼리성으로 혹은 극히 용질농도가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 다양하게 변화하게 되며 지하수 수질도 마찬가지로이다(34).

바. 질소안정동위체비 ($\delta^{15}\text{N}$)를 이용한 오염원 추정

질소 안정동위체비를 이용하는 방법은 지하수에서 질산성질소 오염원을 추정하는데 있어 가장 효과적인 방법으로서 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 왔다. 질소에는 ^{14}N 와 ^{15}N 2가지의 안정동위체가 존재하고 대기중에서의 존재비는 99.635%와 0.365%로 거의 일정하게 유지된다. 질소공급원의 종류에 따라 두 가지 안정동위체의 존재비가 거의 일정한 범위가 되려는 성질을 가지고 있기 때문에 이 성질을 이용하여 지하수의 질소 공급원을 추정할 수 있는 방법이다(56).

이 $\delta^{15}\text{N}$ 치는 강수 -8~2%, 화학비료 -7.4~6.8%, 가축분뇨 10~22%, 하수처리수 8~15% 등 값으로 보고되어지고 있고(56, 79, 80), 이것을 이용하여 지하수 오염원을 추정하고 있다.

이러한 방법으로 이용하여 한림지역 내 지하수관정의 질산성 질소농도가 5.0 mg/L이상 검출된 44개소에 대해 질소안정동위체비 ($\delta^{15}\text{N}$)를 분석하고 질산성 질소농도와 상관을 Fig. 23으로 나타냈다.

2008년 6월부터 2009년 9월까지 조사한 질산성 질소농도와 질소 안정동위체비를 도시한 결과 질산성질소의 농도가 5 mg/L를 초과하여 오염이 이미 진행 중이라 판단되는 44개 지하수 시료들은 모두 -0.44~19.3%에 분포하였다.

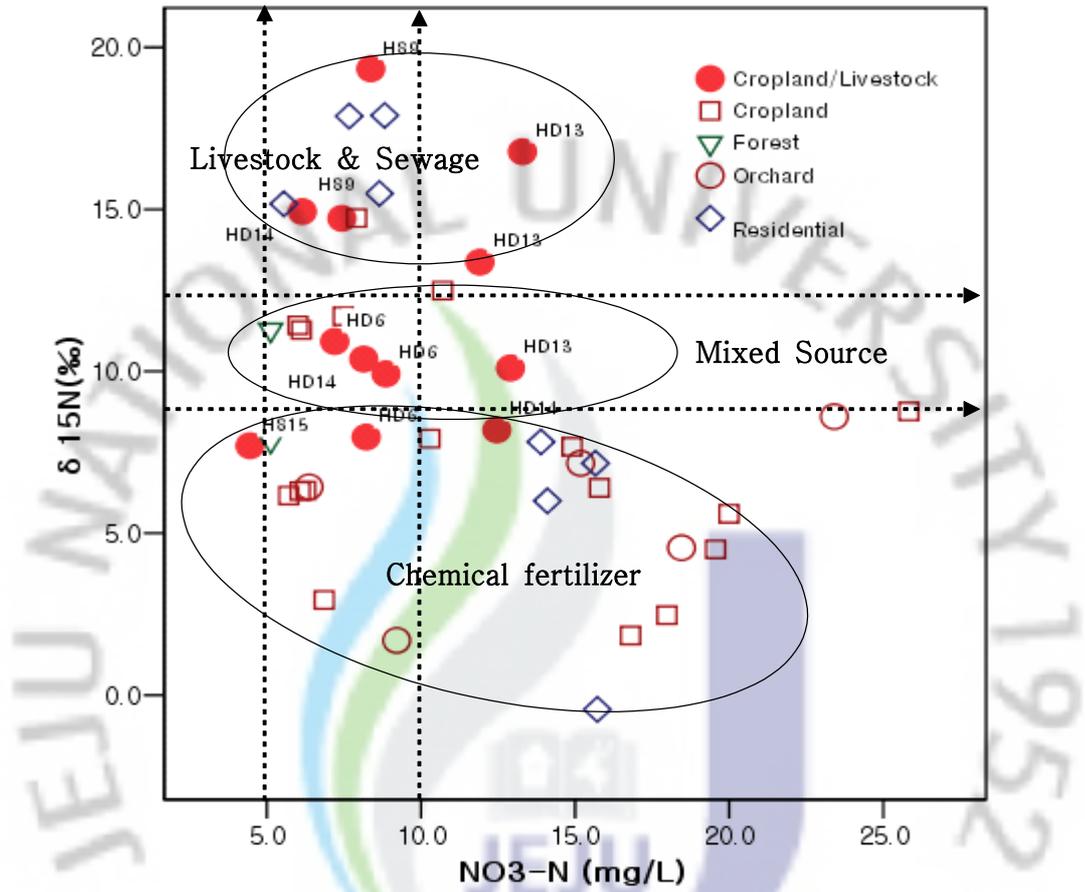


Fig. 23. Relationship between $\delta^{15}\text{N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration of groundwater samples

토지이용에 따른 질산성질소와 질소 안정동위체비의 상관성을 과수원을 포함한 농경지가 44개의 지하수 시료 중 34개(77%)로 대부분 차지하고 있으며 나머지가 산림, 주거지역이다. 가축분뇨 및 생활하수의 영향을 받는 것으로 추정되는 시료는 44개 시료 중 10개(22.7%)로 나타났는데 이들 시료 채취지점들이 대체로 가축시설 밀집지역의 농경지로 이지역의 토지 이용형태와 부합되었다. 특히 상대지역과 동명지역에 위치한 HS9, HD13, HD14의 경우는 지하수 관정의 상부쪽에

집단적인 양돈농장들이 위치하고 있다.

화학비료에 영향을 받는 것으로 추정되는 것은 25개(56.8%)로 나타났지만 이들 시료 채취지점들이 양배추나 브로콜리를 재배하는 야채재배지역으로 이 지역의 토지 이용형태와 부합되었다. 여러 복합적인 요인으로 추정하기 어려운 9개소(20.5%)는 탈질작용이 일어나면서 질산성질소는 낮아지고 질소 안정동위체비는 높아지기 때문이라고 사료된다. 이러한 결과는 Kim 등(81)과 Jeong 등(5), Yamamoto 등(14)의 연구결과와 일치하였다.

그룹 1과 3에서 질산성질소와 질소 안정동위체비를 가지고 오염원인이 화학비료, 하수 및 가축분뇨, 자연토양으로 구분하여 그 기여율을 Table 22에 나타냈다.

상대지역과 동명지역에 위치한 HS9, HD13, HD14 지하수관정은 생활하수 및 가축분뇨 기여율이 각각 91.0%, 83.5%, 92.5%로 높게 나타났다

귀덕리 지역에 위치한 지하수관정 HG17, HG19, HG21, HG22인 경우는 화학비료에 의한 기여율이 각각 95.9%, 58.5%, 59.1%, 58.4%이며, 월림지역의 HR10은 화학비료에 의한 기여율이 75.8%로 주변 토지이용 형태가 대부분 농경지로서 질소기여율이 화학비료의 오염으로 추정할 수 있다.

이는 이들 지역이 2~3모작의 작부체계가 일반적이고 회산회 토양의 영향을 받아 형성된 척박한 토양으로 인해 밭지역 및 과수원 등지에서 비료시비를 추천량보다 관행적으로 시비되는 비료량이 약 2~3배까지 초과한다는 보고(62, 82)와 일치한다. 그룹 3으로 구분된 지하수 관정 HW24, HA25인 경우 생활하수 및 가축분뇨에 의한 기여율이 각각 53.4% 93.6%로 주변 토지이용 상황을 감안 할 때 생활하수에 의한 영향으로 추정된다.

이러한 결과는 제주서부지역의 지하수에 대해 질소 안정동위체비를 분석하여 질소기여율을 산정한 결과에 의하면 질소기원이 화학비료에 영향을 받는다는 Song 등(3)과 Kim 등(2)의 결과와 일치한다.

Table 22. Predicted contribution of each source to NO₃-N concentration using $\delta^{15}\text{N}$ and NO₃-N at each sampling site

Group	Well ID	NO ₃ -N (mg/L)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Chemical fertilizers (%)	Livestock wastes & domestic sewages(%)	Natural soil (%)
	HD6	8.22	7.97	47.7	47.5	4.9
	HS9	7.43	14.72	3.6	91.0	5.4
	HR10	18.45	4.55	75.8	22.0	2.2
	HD13	12.9	12.8	13.4	83.5	3.1
	HD14	6.15	14.93	1.0	92.5	6.5
	HS15	4.45	7.7	45.6	45.4	9.0
Group1	HG17	16.8	1.84	95.9	1.8	2.4
	HN18	10.29	7.92	49.0	47.1	3.9
	HG19	6.26	6.32	58.5	35.1	6.4
	HG21	5.71	6.16	59.1	33.9	7.0
	HG22	6.08	6.3	58.4	35.0	6.6
	HL26	15.72	-0.44	97.5	0.0	2.5
	HL27	13.89	7.82	50.7	46.4	2.9
	HW24	25.83	8.76	45.0	53.4	1.5
Group3	HA25	8.82	17.9	1.8	93.6	4.5

5. 가축시설 밀집지역의 미생물오염 특성

한림읍지역에 대한 지하수를 수질유형에 따라 분류한 그룹 1 중심으로 미생물학적 오염여부를 알아보기 위해서 일반세균수, 대장균군수, 분변성대장균군수를 측정하였는데, 일반세균은 소독처리가 안된 지하수관정에서는 자주 검출되고 있지만 대장균군이나 분변성대장균군인 경우는 주변 가축분뇨나 생활하수에 의해 지하수로 혼입되었을 때 흔히 검출되고 있기 때문에 오염원추정을 위한 지표로 이용할 수 가 있다.

Table 23은 수질유형에 따라 그룹1, 2, 3으로 분류하고 그룹별 분변성 대장균군 검출율과 대장균군에서 분리동정한 미생물 검출율을 나타내었다.

Table 23. Bacteria identified in groundwater sample (Percent of samples with detection of specific bacteria)

Bacterium	Groundwater		
	Group 1 (n=38)	Group 2 (n=12)	Group 3 (n=4)
<i>Escherichia coli</i>	26.3	0	75.0
<i>Citrobacter spp.</i>	15.8	0	50.0
<i>Enterobacter spp.</i>	14.5	0	50.0
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	10.5	0	50.0
<i>Serratia spp.</i>	5.2	0	0
<i>Aeromonas hydrophila</i>	3.5	0	0
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	3.5	0	0
<i>Fecal coliform</i>	39.4	0	75.0

그룹 1에서 분변성대장균이 38개 시료에서 15개소가 검출되어 39.4%로 나타났

으며, 대장균군에서 분리 동정한 미생물을 보면 *Escherichia coli* 26.3%, *Citrobacter spp.* 15.8%, *Enterobacter spp.* 14.5%, *Klebsiella pneumoniae* 10.5%순으로 분리되었고. 토양 유래균인 *Serratia spp.*, *Aeromonas hydrophila* *Pseudomonas aeruginosa* 3.5~5.2%로 나타났다.

Krapac 등(73)은 *Escherichia coli*, *Streptococcus faecales*, *Streptococcus faecium* 은 가축분뇨 시료에서 지배적으로 검출되며 *Bacillus*, *Enterobacter*, *Proteus mirabilis*, *Providencia*, *Serratia*, *Staphylococcus*, *Klebsiella pneumoniae* 등이 종종 검출된다고 보고하였으며, 82m의 깊이의 관정에서도 *Bacillus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa* 가 검출되었고, *Serratia*, *Enterobacter*는 지하수에서 약 25% 검출된다는 보고와 유사한 결과를 나타냈다.

이러한 결과를 바탕으로 대장균(*Escherichia coli*)의 검출여부는 질산성질소의 오염원 규명에 유의한 지표로서 활용이 가능하다고 볼 수 있다.

Table 24은 6월 여름에 지하수를 채수하여 미생물을 검사한 결과인데 그룹 1에서 포함된 상대리 HS9, 동명리 HS13, HD14, 한림리 HW27 4개소에서 대장균이 검출되어 가축분뇨나 가정하수에 의한 오염으로 추정된다.

Table 24. Fecal bacteria enumerated in groundwater samples collected from monitoring wells at Group 1 and 2, Summer (Concentration in colonies per 50mL)

Bacterium	Well								
	Group 1								G. 3
	HS9	HS12	HD13	HD14	HG17	HG19	HG22	HW27	HA25
<i>Fecal coliform</i>	25	75	5	65	56	32	60	45	26
<i>Total coliform</i>	34	82	8	71	60	36	67	52	31
<i>E. coli</i>	+	-	+	+	-	-	-	+	-

반면에 Table 25은 9월 가을에 지하수를 채수하여 미생물을 검사한 결과로 그룹 1에서 포함된 상대 HS9, 한림 HW27 두개소만이 대장균이 검출되었고 그룹 2에 포함된 월령 HW24, 대림 HA25 2개소에서 대장균이 검출되어 다소 차이가 있었다.

Table 25. Fecal bacteria enumerated in groundwater samples collected from monitoring wells at Group 1 and 3, Autumn (Concentration in colonies per 50mL)

Bacterium (CFU/50mL)	Well								
	Group 1							Group 3	
	HG4	HS9	HS12	HG19	HG21	HG22	HL27	HW24	HA25
Fecal coliform	39	14	5	6	72	2	48	5	32
Total coliform	45	20	10	10	80	5	50	7	46
<i>E. coli</i>	-	+	-	-	-	-	+	+	+

6월과 9월을 합쳐 모두 7속 10종의 대장균군을 확인 할 수 있었고. 여기에서 미동정된 6월, 9월 합친 9개 집락은 API 20E kit에 동정할 수 없었으며, 동정확률이 90% 미만이어서 확인할 수 없었다.

영남지역 지하수에서 대장균군의 분포 및 분리한 세균의 특성에 관한 보고(74)에 의하면 분리한 대장균군은 *Citrobacter spp.*, *Enterobacter spp.*, *Escherichia spp.*, *Klebsiella spp.*, *Pantoea spp.*, *Rahnella spp.*, *Serratia spp.*으로서 *Enterobacter spp.*가 48% 검출되었다는 보고와 본 연구에서는 *Escherichia coli*, *Citrobacter freundii*, *Enterobacter cloacae* 순으로 분리되었고, *Escherichia coli*가 33개 집락 중에 9개로 27%를 차지하고 있어 다소 특이한 결과가 나타났다.

이러한 결과는 주변 토지의 이용환경에 의한 것으로 보다 세밀한 결과를 도출하기 위해서는 가축분뇨의 지표로 이용 할 수 있는 *Fecal Streptococcus*에 대한 미생물분리 동정이 이루어져야 하는데 본 연구에서는 미생물 분리동정을 수행하지 못한 것이 아쉬운 점으로 남는다.

한림지역내 지하수관정에 대하여 그룹별 일반세균수를 측정된 결과는 Fig. 24와 같다. 그룹 1에 대한 강우전후의 미생물 검출여부를 보면 강우전인 여름(6월)에 채수한 27개 관정 지하수인 경우 일반세균수가 평균 165 CFU/mL이며, 지하수 용도상에 따른 일반세균 기준은 없으나 먹는물 수질기준 100 CFU/mL를 적용한다면 8개관정(29.6%)이 기준을 초과하고 있다. 강우후인 가을(9월)에 채수한 27개 관정지하수인 경우 일반세균이 평균 101 CFU/mL이며, 먹는물 기준 100 CFU/mL를 초과하는 관정은 5개지점(18.5%)으로 나타났다. 일반세균수 500 CFU/mL 이상 검출되는 관정은 여름(6월)에 HS, HD14, HG17, HG22로 4개소이며, 가을(9월)에는 HG21 한 개소만 초과하고 있고 한림리 도심지에 위치하는 HL27은 여름과 가을 각각 480 CFU/mL, 490 CFU/mL으로 거의 유사하게 검출되었다.

그룹별 일반세균수의 검출빈도를 보면 대부분 그룹 1과 3에서 높았고 그룹 2에서는 여름, 가을 상관없이 아주 낮게 나타났다. 이러한 결과는 Ahn 등(74)이 보고한 전라남도 내 59개 지하관정에 대한 미생물 조사에서 종속영양세균(HPC-NA)이 1400 CFU/mL보다 낮게 나타났으며, Kazuyo와 Kazuko (76)가 보고한 Masugata 도시용천수 중의 종속영양세균 26~1600 CFU/mL와 유사한 결과를 보였다. 이들은 질산성질소에 오염된 지하수 인 경우 질소대사에 관여하는 세균존재가 예상되지만 질화세균은 검출되지 않았으며, 단백질분해세균, 탈아미노세균, 질산환원균, 탈질소세균은 종속영양세균수보다 아주 낮다고 보고하였다.

따라서 지하수 수질 내 질산성질소농도와 미생물 검출비율 간의 상관성은 있는 것으로 추정되며, 그 지하수 관정의 오염은 주변 환경과 채수 시기별에 따른 온도, 강우량, 토양성질, 지질물성, 심도변화 등에 의해 영향을 받을 수 있는 것으로 해석된다. 지하수 오염원인을 규명하기 위한 객관적인 자료를 확보하기 위해서는 해당지역의 지하수의 수질유형, 질소안정동위체비와 이온성분간 상관계수 등을 비교분석하고 오염관정에 대해서 가축분뇨나 인분에 존재하는 분변성 미생물을 분리 동정하여 오염원인을 판단하는 것이 오차를 줄일 수 있는 방법이라 사료된다.

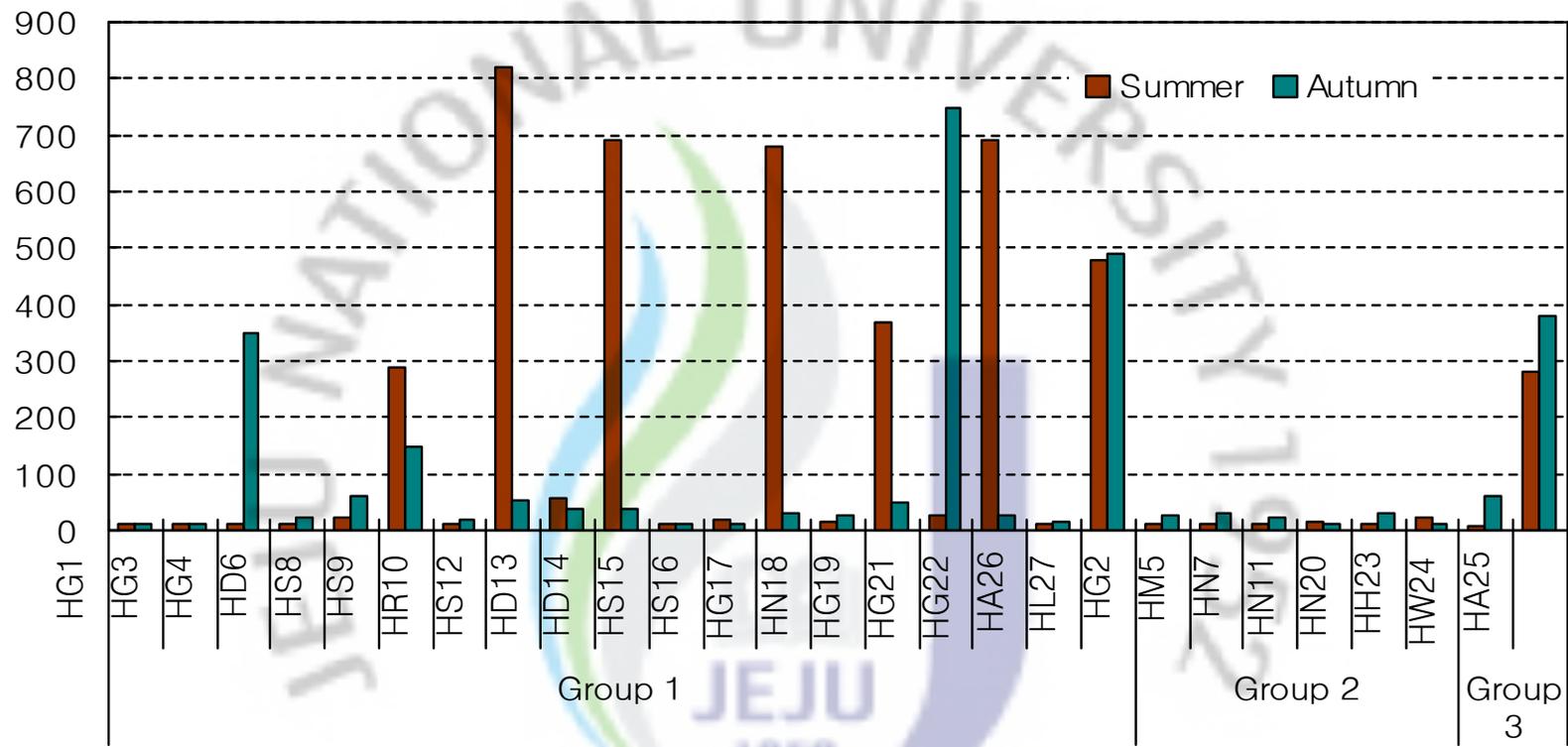


Fig. 24. Heterotrophic plate count (HPC) enumerated in groundwater samples collected from monitoring wells at each Group

V. 요약

가축시설에서 발생하는 가축분뇨는 공공처리시설에서 처리되기도 하지만 주변 임야지역에 살포됨으로써 주변 토양환경 및 지하수 수질에 영향을 줄 수 있다. 특히 가축분뇨 처리지역에서는 토양 내 오염부하량이 증가하게 되고 결국 토양특성에 영향을 줌은 물론 지하수 수질에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구는 가축시설 밀집지역에서 나타나는 토양오염과 지하수의 수질특성을 해석하고자 수행되었다. 제주도에 한림지역은 축산활동으로 인한 오염부하량이 가장 높은 지역으로 축산농가가 밀집되어 있다. 특히 상류의 임야지대는 목장지역으로 액비가 주기적으로 살포되는 반면, 하류의 농경지에서는 야채작물이 주로 재배되고 있다.

본 연구의 시료는 토층을 삼으로 30cm까지 파고 20~30cm 사이의 토양을 채취하였다. 주로 액비가 살포되는 지역을 중심으로 모두 90개소에서 채취하여 풍건한 후 총질소, 인산염(P_2O_5), CEC(양이온치환용량), 음·양이온 및 유해 중금속을 측정하였다. 양이온값을 이용하여 염류집적영향을 평가하기 위해 SAR(Sodium Adsorption Ratio)값을 계산하고, 이들 값이 오염원과의 관계를 분석하였다. 이러한 토양오염 특성이 지하수에 미치는 영향을 평가하기 위하여 지역 내 대표적인 27개 지하수와 8개의 용천수를 채수하여 pH, 음·양이온, $\delta^{15}N$ (질소안정동위원소비), 오염원 기원 미생물의 존재유무 등을 측정하였다. 지하수의 수질특성별로 $\delta^{15}N$ 에 의한 지하수 내 질소 오염원을 구분하고, 오염원별 미생물분포 특성을 규명함으로써 가축시설밀집지역의 지하수 오염특성을 해석하였다.

1. 제주지역의 질소·인 오염부하량은 각각 12,820 ton-N/yr, 3,190 ton-P/yr 반면, 한림지역의 질소·인 오염부하량은 각각 2,881 ton-N/yr, 1,101 ton-P/yr로서 도전체의 22.0%와 34.5%를 차지하였다. 특히 축산계는 2,584 ton-N/yr로서 지역 내 질소오염부하량 2,881 ton-N/yr의 89.3%를 차지하여, 한림지역은 축산시설이 가장 밀집된 지역임을 나타내었다. 반면, 농지계와 생활계는 566ton-N/yr, 92ton-N/yr로서 축산계에 비해 20%이하에 불과하였다.

2. 지하수에 영향을 미칠 수 있는 질소부하량은 축산계에서는 부적정 처리율 10%, 농지계에서는 비료손실을 40%, 생활계에서는 공공처리시설 미회수율 40% 등을 적용했을 때, 축산계, 농지계, 생활계에서 각각 258ton-N/yr, 226 ton-N/yr, 18 ton-N/yr로서 축산계와 농지계는 비슷한 반면, 생활계는 10%이하를 나타내어 지역내 지하수 오염원은 가축분뇨와 화학비료에서 기인하는 것으로 예측되었다.

3. 총질소와 인산염(P_2O_5)의 농도분포는 상이한 특성을 나타냄은 물론 상류와 하류 지역 간 큰 차이를 보였다. 총질소가 높은 상류지역은 목장지역으로서 액비가 주기적으로 살포되는 지역인 반면, 하류지역은 농경지역으로서 화학비료가 주로 살포되는 지역이다. 액비살포지역의 지표는 총질소인 반면, 화학비료 살포지역의 지표는 인산염(P_2O_5)으로 나타났다.

4. 양이온치환용량(CEC)은 목장과 사료작물 재배지에서 $16.3\sim 18.2\text{cmol}^+/\text{kg}$ 인 반면 밭 방목지역을 포함한 그 외의 지역은 $11.5\sim 13.6\text{cmol}^+/\text{kg}$ 로서 상류지역인 목장과 사료작물 재배지역이 높은 특성을 나타내어 액비살포의 영향을 받고 있었다. 반면, pH는 5.6~5.9로 토지이용 별 차가 크지 않았다.

5. Ca, Mg과 Na의 농도비에 의해서 계산된 SAR 값은 양이온치환용량과는 달리 밭 방목지역이 0.19로서 가장 높고, 다음은 목장 및 사료작물재배지가 각각 0.17, 0.16로 나타난 반면, 과수원과 농경지는 0.12와 0.9로서 가장 낮은 값을 보였다. 이는 액비 살포로 인해 액비 중에 다량으로 함유된 Na의 축적에 의한 것으로 해석되었다.

6. 심도별 지하수의 수리지구화학적 특성은 알카리 금속(K, Na)과 알카리 토금속(Mg, Ca), 할로젠원소(Cl, Br)는 심부지하수로 갈수록 감소되는 경향을 보였고, 오염물질인 SO_4 와 NO_3-N 농도는 천부지하수로 갈수록 높게 나타나 표면의 영향을 받는 것으로 보여진다.

7. 지하수 수질유형은 옹포천 유역을 중심으로 동측은 $Ca(Mg)-HCO_3$ 형태를 보인 반면, 서측은 $Na-HCO_3$, $Ca-SO_4(NO_3)$, $Na-Cl$ 형태가 분포하는 것으로 나타났다. 특히

하류지역에 위치한 용천수는 Na-Cl형으로서 해수의 영향을 받고 있음을 나타내었다.

8. 지하수의 질산성질소 농도는 0.2~28.9 mg/L로 먹는물 수질기준 10 mg/L이상 초과비율은 22.2%이며, 수질유형별 Ca(Mg)-HCO₃(옹포천 동측) 지역에서는 0.3~15.3 mg/L, 서측의 Ca-SO₄(NO₃)에서는 13.9~28.9 mg/L, Na-HCO₃에서는 0.2~3.0 mg/L, 해안가 Na-Cl형 수질에서는 5.5~15.7 mg/L를 나타내었다.

9. 가축시설지역에서의 지하수의 이온성분은 강우기 전에 비해 후에 Na, K 값이 높아지는 경향을 보였다. 즉 강우기 전 Ca, Mg, Na, K의 농도(8.8, 10.5, 8.4, 4.1mg/L)는 강우기 후에는 7.7, 9.1, 15.1, 4.8로서 Ca, Mg은 낮아진 반면, Na, K은 높아지는 특성을 보여 유출영향이 있음을 시사하였다.

10. δ¹⁵N값은 44개 지하수 시료 중 12%이상은 10개소로서 가축 및 생활하수의 영향, 8%이하의 화학비료의 영향을 받는 지하수는 21개소, 대부분이 주변지역 토지이용도와 일치하였다. 12~8%은 혼합영향으로서 13개소가 해당되었으며, 시기별로 가축분뇨와 화학비료의 영향을 달리하는 경향을 보였다. 가축시설 밀집도가 가장 높은 지역 지하수관정인 HS9, HD13, HD14의 경우는 생활하수 및 가축분뇨 기여율이 각각 91.0%, 83.5%, 92.5%로 높게 나타났다.

11. 미생물 분포 특성은 지표의 영향을 쉽게 받는 Ca(Mg)-HCO₃형 지하수 관정에서 분변성 대장균군이 38개 시료 중 15개소(39.4%)가 검출된 반면, 심부지하수인 Na-HCO₃의 수질특성 관정에서는 검출되지 않아 표층 영향에 취약한 지하수 일수록 미생물오염 가능성이 높은 것으로 나타났다.

12. 대장균군을 분리 동정한 결과 가축분뇨 및 생활하수에 기인하는 미생물은 *Escherichia coli* 26.3%, *Citrobacter spp.* 15.8%, *Enterobacter spp.* 14.5%, *Klebsiella pneumoniae* 10.5%순으로 분리된 반면, 토양에서 유래한 *Serratia spp.* *Aeromonas hydrophila* *Pseudomonas aeruginosa* 등은 3.5~5.2%로 낮았다. 이는 대부분의 미생물오염은 주변 축산시설의 영향으로 해석되었다.

결론적으로 가축시설 밀집지역은 주변 토양에 CEC의 증가, 총질소의 증가 등 토지의 비옥도를 높이는 좋은 면도 있지만 염류집적현상(SAR) 등 악영향도 미치고 있음을 시사하였다. 축산시설에 기인한 지하수 오염부하량이 농지계의 화학비료보다 큼에도 불구하고 실제 지하수의 오염증상은 화학비료의 영향이 큰 것으로 나타났다. 이는 지하수 관정시설이 농경지와는 인접해 있으나, 축산시설은 관정시설보다는 상류지역에 위치하는데 기인하는 것으로 판단되었다. 하지만 상부지역 유출영향을 받기 쉬운 하천 및 그 유역에서는 하류지역임에도 불구하고 축산시설 밀집지역의 영향을 받고 있음을 시사하였다. 특히 표층 영향을 받기 쉬운 지하수는 축산시설에 기인한 미생물오염 증상이 나타나고 있어 오염경로에 대한 구체적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

인용 문헌

1. An Jong-Seong, Seon-Jun Kim, Jang-Geol Ryu, Seong-Jun Song. Environmental isotope aidea studies on sea water contamination of eastern coastal aquifer in Cheju island. Korea Journal of Environmental agriculture. 11(1): 26-40(1992).
2. Kim K.S., S.H. Kim,, C.H. Lee, S.M. Oh, T.H. Kim, S.R. Kim, M.K. Kim and Y.G. Ko. Investigation of nitrate-nitrogen contamination sources groundwater. Report of CIHE 10: 167-182(1999).
3. Song young-cheol, Yong-gu Koh, Jang-geol Ryu. Estimation of nitrogen source by stable isotope ratio in Cheju island. Journal of KSSGE. 6. 107-110(1999).
4. Koh dong-chan, Dae-ha Lee, Ki-hwa Park. Using factor analysis and bivariate comparisons of major components in groundwater. J. of KSSGE, Symposium: 450-452(2004).
5. Jeong seong-uk. Characteristic of environmental hydrogeochemistry of ground water in Hallim of Jeju island. Yeonsei University, Master's thesis: p87(2003).
6. Koh dong-chan, Cheon-su Hyun, Park ki-hwa. Characterization of groundwater quality and recharge using periodic measurements of hydrogeochemical parameters and encironmental tracers in basaltic aquifers of Jeju island. The Journal of KSSGE. 12(4): 60-71(2007)
7. Koh, Dong-Chan, H. W. Chang, K. S. Lee, K. S. Ko, Y. J. Kim, W. B. Park. Hydrogeochemistry and environmental isotops of ground water in Jeju volcanic island, Korea: implications for nitrate contamination. Hydrological Processes. 19. 2225-2245(2005).
8. Kor D., K. Ko, Y. Kim, S. Lee, H. Chang. Effect of agricultural land use on the chemistry of groundwater from basaltic aquifers, Jeju Island,

- South Korea. Hydrology Journal. 15. 727-743(2007).
9. Tae-Gwon Oh, Sang-Sil Oh, Se-ra Kim, Seung-hwan Kim, Sang-eun Oh. Nitrate and chloride variation characteristics in the groundwater in Jeju area. Report of JIHE. 18: 181-196(2007).
 10. Sang-sil Oh, Ik-hyun Hyun, Young-chul Song, Tae-gwon Oh, Su-mee Kim and Gi-won Koh. Effects of soil water on groundwater quality in farmin area. Report of JERI 1: 299-311(2008).
 11. Han, G-H. Contamination Source assessment of groundwater nitrate on complex terrain. Korean J. Soil Sci. Fert. 42. 14-20(2009a).
 12. Ik-Hyun Hyun, Sang-Sil Oh, Tae-Gwon Oh, Young-Chul Song and Gi-Won Koh. Mutivariate statistical analysis of geochemical monitoring dataset. Report of JERI. 1. 273-286(2008).
 13. Jejudo. The policy plan report of the environment civil official due to a regional characteristics (about groundwater). Report(2007).
 14. Yamamoto Y., Kwang-lai Pak, Nakanishi Y., Nitrate concentrations and $\delta^{15}\text{N}$ values of groundwater in the Miyakojima Island. Janpanes Society of Soil Sci. and Plant Nurition. 66(1): 18-26(1995).
 15. Park Jae-U. Establishment of isotope fingerprinting techniques to investigate groundwater contamination. Jeju national University. p96(2003).
 16. Peter J. Thorburn, Jody S. Biggs, Keith L. Weier, Brian A. Keating. Nitrate in groundwaters of intensive agricultural areas in coastal northeastern Australia. Agriculture, Ecosystems and Environment 94 : 49-58(2003).
 17. Lee Byeong Dae, Uk Yun, Ig Hwan Sung. Groundwater quality and contamination characteristics associated with land use in Ulsan area. J. of KoSSGE, 12(6) : 78-91(2007).
 18. Yuki Murakami, Yuka Fugita, Takeshi Naganuma and Teruki Iwatsuki. Abundance and viablility of the groundwater microbial communities from

- a borehole in the Tono uranium deposit area, central Japan. Japanese society of Microbial Ecology 17(2) : 63-74(2002).
19. Han, G-H. Regional- scale evaluation of groundwater susceptibility to nitrate contamination based on soil survey information. Korean J. Soil Sci. Fert. 42. 37-45(2009b).
 20. Bu Seong-An, Kyu-cheol Aan. Salt water encroachment of groundwater in the eastern region of Jeju island. Jeosciences Journal. 10. 115-130(2000).
 21. Kim Ji-Yung, Yun-Geun Oh, Seong-pil Ryu. Salt water encroachment of groundwater in the eastern region of Jeju island. J. of KENSS 10: 47-58(2001).
 22. Kim kyong-ho, Shin ji-hyun, Koh eun-heui Koh gi-won, Lee kang-kun. Sea level rise around Jeju island duo to global warming and movement of groundwater / seawater interface in th eastern part fo Jeju island. J. KSSGE. 14(3): 68-79(2009).
 23. Ko kyung-seok, Kim yongie, Koh dong-chan, Lee kwang-sik, Lee seung-gu, Kand cheol-hee, Seong hyun-jeong, Pak won-bae. Hydrogeochemical characterization of groundwater in Jeju island using principal compeonent analysis and geostatistics. Economic and envirnmental geology. 38(4): 435-450(2005).
 24. Lee, S. T. Groundwater movement in the volcanic island of Cheju, Korea. PhD thesis, the Univrsity of Tsukuba. 140p(1996).
 25. Young-chul Song, Sang-sil Oh, Ik-hyun Hyun, Tae-gwon Oh, Su-mee Kim and Gi-won Koh. Geographical distribution of vital minerals in the groundwater of jeju island. Report of JERI. 1: 287-298(2008).
 26. Park gi-hwa. Geochemical studies on the groundwater occurrence in Jeju island. Mnistry of science and technology. p203(2007).
 27. Kang kyong-gu. Studies on the hydrogeochemical processes and characteristics of groundwater in the Pyosun watershed, Jeju province,

- Korea. Jeju national university thesis for a doctorate. 215p(2010).
28. Vance, C.P. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition : Plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant Physiology*. 127: 390-397(2001).
 29. Souma Satoru. Quality Map of fertilizer application for vegetable. Cultural association of agriculture and fishing village. p228(1988).
 30. Mishima, S., N. Matsumoto and K. Oda. Nitrogen flow associated with agricultural practices and environmental risk in Japan, *Soil Science and Plant Nutrition*. 45: 881-889(1999).
 31. Addiscott, T.M., A.P. Whitmore and D.S. Powlson. Farming fertilizers and the nitrate problem. CAB International, Wallingford. UK 170(1991)
 32. Nishio Mithinori. Resolution of fertilizer application on agricultural environment in Japan. *Japanese Journal of Crop Science*. 72: 513-521(2001).
 33. Maeda Morihiro. Deep-soil adsorption of nitrate in a Japanese Andisol in response to different nitrogen sources. *Soil Science Society of America Journal*. 172(3): 702-710(2008).
 34. Hirada Tademasu, Nisikawa M. Groundwater nitrogen and metals such as Al, Ni, Zn and Mn contaminations caused by nitrogen fertilizer in two Japanese tea plantations. 3rd International conference on future groundwater resources at risk: 373-380(2001).
 35. Maeda, M., B. Zhao, Y. Ozaki and T. Yoneyama. Nitrate leaching in an Andisol treated with different types of fertilizers. *Environmental Pollution*. 121: 477-487(2003).
 36. Matsumaru, Tsuneo. Evaluation of nitrate leaching in cropland - Discharge characteristics by lysimeters. *Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition*. 38: p165(1992).
 37. Angle J.S., C.M. Gross, R.L. Hill and M.S. McIntosh. Soil nitrate concentrations under corn as affected by tillage, manure, and fertilizer

- applications. *Journal of Environmental Quality*. 22: 141-147(1993).
38. Thomsen I.K., J.F. Hansen, V. Kjellerup and B.T. Christensen. Effects of cropping system and rates of nitrogen in animal slurry and mineral fertilizer on nitrate leaching from a sandy loam. *Soil Use and Management*. 9: 53~58(1993).
39. Bergstrom L.F. and H. Kirchmann. Leaching of total nitrogen from nitrogen ⁻¹⁵⁻ labeled poultry manure and inorganic nitrogen fertilizer. *Journal of Environmental Quality*. 28: 1283-1290(1999).
40. Andraski T.W. L.G. Bundy and K.R. Brye. Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrate leaching. *Journal of Environmental Quality*. 29: 1095-1103(2000).
41. Eriksen J., M. Askegaard and K. Kristesen. Nitrate leaching in an organic dairy/crop rotation as affected by organic manure type, livestock density and crop. *Soil Use and Management*. 15: 176-182(1999).
42. Bergstrom, L. and R. Johansson. Leaching of nitrate from monolith lysimeters of different types of agricultural soils. *Journal of Environmental Quality*. 20: 801-807(1991).
43. Matsumaru, tsuneo. Evaluation of nitrate leaching in ando and sandy soils by lysimeters. *Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition*. 68(4): 423-429(1997).
44. Katou H., K. Uchimura and B.E. Clothier. An unsaturated transient flow method for detemining solute adsorption by variable charge soils. *Soil Science Society of America Journal*. 65: 283-290(2001).
45. Hallberg, G.R. From hoes to herbicides. Agricultural and groundwater quality. *Journal of Soil Water Conservation*. 41: 357-364(1986).
46. Kumazawa Kikuo. Present state of nitrate pollution in groundwater (in Japanese). *Journal of the science of soil and manure, Japan*. 70(2): 207-213(1999).
47. Nagai Shigeru. Environmental geology department geological survey of

- Janpan. Journal of groundwater hydrology. 33(3): 145-154(1991).
48. Hirata Tatemasa. Research perspectives for nitrogen compounds in Journal of JSWE. 26(9): p545(2003).
 49. Ogawa Yoshio Katou Hidetaka, Minanmi Katsuyuki. Denitrification potential and nitrate removal from solution percolation through soil above a water table in Japanese. Journal of the science of soil and manure, Japan 71(4): 494-501(2000).
 50. Kondo Hiromasa, Hirata Tatemasa, Tase Norio. Nitrogen isotope ratio of nitrate of groundwater in Miyako island, Okinawa prefecture. Journal of groundwater hydrology 39(1): 1-15(1997).
 51. Tase Norio. Variations of stable isotope in water environments. Journal of society on water environment 20(5): 286-291(1997).
 52. Zhao B., M. Maeda and Y. Ozaki. Natural ^{15}N and ^{13}C abundance in Andisols influenced by long term fertilization management in Japan. Soil Science and Plant Nutrition. 48: 555-568(2002).
 53. Hirohata Masski, Matsuzaki Tatsuya. The mechanism of groundwater pollution by nitrate-nitrogen at U-town in Kumamoto prefecture. Journal of groundwater hydrology 41(4): 291-306(1999).
 54. Hiscock K.W., J.W. Lloyd and D.N. Lerner. Review of natural and artificial denitrification of groundwater. Water Research. 25: 1099-1111(1991).
 55. Bulger P.R., A.E. Kehew and R.A. Nelson. Dissimilatory nitrate reduction in a waste-water contaminated aquifer. Ground Water. 27: 664-671(1990).
 56. MOE. Survey manual nitrite and nitrate nitrogen in groundwater pollution. p25(2001).
 57. Jeju special self-governing province. Jeju statistical year book(2007).
 58. National Institute of Environmental Research. Management technical guidelines for the amount of watershed pollution, 2 step : p103(2008).

59. Kim dong-su. Chemical analysis of Soil. Sammi. Agricultural Technology Institute. p450(1988).
60. Ministry of Environment. Official method of analysis for water pollution. (2008).
61. Dong-min Yun, Sin-hyung Park, Jae-woo Park. Nitrogen budgets for South Korea in 2005. J. of KSEE 30(1): 97-105(2008).
62. Jeju special self-governing provice. Environment white book(2007).
63. Rural development Admiistration. Report of soil improvement. 395-410(1989).
64. Kim dong-am. Grassland Science. Seonjin print shop. 460(1991).
65. Jeon B.T., S.M. Lee, J.Y. Kim and I.H. Oh. Effect of cattle slurry on the soil characters and production of forage crop. J. Korean Grassl. Sci. 15(1): 52-60(1995).
66. Hwang Ki-Sung,. Qyo-Soon Ho and Bong-sik Yoo. Aspects of Nutrient transportation after animal manure application in Jeju field soil. Korean J. of Environmental Agriculture 23(3): 133-137(2004).
67. Yook W.B. Effects of types and application levels of swine manure on herbage productivity, improvement of soil fertility and environmental pollution in mixed grassland. J. Korean Grassl. Sci. 23(3): 193-202(2003).
68. Lee sang-mu, B. T. Jeon. Effect of chemical fertilizer and liquid manure application on the growth characteristics and feed value of corn for silage and NO₃ of soil. J. Korean Grassl. Science 24(3): 127-244(2004).
69. Kim moon-chul, Sang-taek Song, Kyung-jen Hwang and Han-cheol Lim. The effects of liquid pig manure application on the production of Japanese Millet (*Echinochloa cruagalli*) soil properties and the chemical characteristics of leaching water. J. Korean Grassl. Science 26(4): 257-266(2006).
70. Kim, S.H., Song, S.M., Oh K.S., Kim, T.H. Study of the charateristics of the shore line spring water in Cheju island. Report of CIHE 5 : 175~

197(1994).

71. Uk Yun, Byong-Wook Cho. Hydrogeochemical characteristics of groundwater on well depth variation in the Heunghae area, Korea. The Journal of Engineering Geology 15(4) :391-405(2005).
72. Kikuo Kumazawa, Youji Yamamoto, Kwang-Lai Park and Yukimi Tamura. $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of water in the Tamagawa river. Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., 71 : 216-224(2000).
73. I.G. Krapac, W.S. Dey, W.R. Roy, C.A. Symth, E.Stormont, S.L. Sargent, J.D. Steele. Impacts of swine manure pits on groundwater quality. Environmental Pollution 120 : 475-492(2002).
74. Ahn Yeon-jun, Byung-re Min, Yong-keel Chai. Relationship between microflora and environmental factors in groundwater. Journal of the Korean Society of Groundwater Environment 2(2): 85-92(1995).
75. Inhwan Lee, Sookyung Kim, Yunhee Choi and Jongseol Kim. Distribution and Characteristics of coliform bacteria in groundwater of Yeungnam Province. The Korean Journal of Microbiology. 42(2): 95-102(2006).
76. Kazuyo Nagaosa and Kazuko Morikawa. Fluctuations in bacterial community and environmental factors at the urban spring Masugata. Jpn. J. Limnol 60: 177-184(1999).
77. Wolt, J. Soil solution chemistry. John Wiley & Sons, New York. 345(1994).
78. Uchida Yohei. Yasuhara Masaya, Marui Atsunao. Groundwater flow system of the Kanto plain estimated from the chemical composition and stable isotopes. J. of Japanese Association of Hydrological Science. 33(3) : 125-136(2003).
79. Heaton. T.H.F. Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere. A review, Chemical Geology (Isotope Geoscience Section). 59: 87-102(1986).

80. Yoneyama, T., Nakano,H., Kuwahara,.M. Natural ¹⁵N abundance of field grown soybean grains harvested in various location in Japan and estimate of the fractional contribution of nitrogen fixation, *Soil Sci. Plant Nutr.* 32: 443-449(1986).
81. Youn-Tae Kim, Nam-Chil Woo. Nitrate contamination of shallow groundwater in an agricultural area having intensive livestock facilities. *J. of Ko.SES.* 8(1) : 57-67 (2003).
82. Hyun-Ji Kim, Se-Yeong Hamn, Nam-Hoon Kim, Jae-Yeol Cheong, Jeong-Hwan Lee and Sung Jang. Characteristics of groundwater contamination cause by seawater intrusion and agricultural activity in Sacheon and Hadong area, republic of Korea. *Econ. Environ. Geol.*, 42(6) : 575-589 (2009).
83. Jeju RETD Center. A study on non-point source pollution management of Jeju. Report (2007).
84. Choyoung Lee, Kye Hyun Kim, Hyuk Lee. GIS based automated estimation and analysis of water pollution discharge. *J. of KSEE* 29(8): 870-875(2007).
85. Sunggu Heo, Namwon Kim, Younshik Park, Jonggun Kim, Seong-joon Kim. Evaluation of effects on SWAT simulated hydrology and sediment behaviors of SWAT watershed delineation using SWAT arcview GIS extension patch. *J. of KSWQ* 24(2): 147-155(2008).
86. Yong-Doo Lee. Characteristics of groundwater quality by elevation in Cheju island. *Journal of KoSES* 5(3) : 65-75(2001).
87. Beom-Keun Cheong, Gi-tak Chae, Dong-chan Koh, Kyung-seok Ko, Min-ho Koo. A study of improvement for the prediction of groundwater pollution in rural area : Application in Keumsan, Korea. *Journal of KSSGE* 13(4): 40-53(2008).
88. Hong young-jin, Kwun soon-kuk, Hong seong-gu. Identification of the

sources of nitrate using stable isotope mass ratio in rural watersheds. Journal of KSAE 43(4): 2001.

89. C.D.A Mclay, R. Dragten, G. Sparling and N. Selvarajah. Predicting groundwater nitrate concentration in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches. Environmental Pollution 115: 191-204(2001).
90. Peter J.Thorburn, Jody S.Biggs, Keith L.Weier and Brian A.Keating. Nitrate in groundwaters of intensive agricultural areas in coastal northeastern Australia. Agriculture, Ecosystems and Environment 94: 49-58(2003).



Appendix



Appendix 1. Environment relation exhaust facility present condition inside Hallim area.

Section	Facility name	Site	Present state
Waste disposal site	Environment facility civil official	Wolrim san 2-1	- area:20,500m ² - period:2015년 - treatment :recycle
Construction waste disposal site	Construction waste disposal site	Myeong wol 251-4	- treatment plan · waste-asphalt 200t/day · waste-concrete 200t/day
Livestock excretions	Livestock recycle plant (Nonghyeop)	Sangdae 730	- capacity:100t/day (compost 30ton, liquid manure 70ton)
	Livestock treatment plant	Geumak 255-16	- capacity :100t/day
	sanitary treatment plant	Geumak 544	- capacity:40m ³ /day - treatment area : Hallim, Hangeong, Aewol
Organic substance fertilizer manufacture	marine products processing	Sangdae 1994	- capacity : 12t/day (400ton/yr)
	Samda fertilizer manufacture	Geumak 49-1	- mandarin by-product, wastewater sludge, Butchery by-product

Appendix 2. Chemical characteristics of soil in Hallim area

Sample	Coordinates	Land use	pH	OM	TKN	P ₂ O ₅	Na	K	Mg	Ca	SAR	CEC
				(g/kg)	(%)	(ppm)	mg/kg			cmol/kg		
U-1	N332059.5 E1262124.0	Pasture	5.9	138.2	0.838	63.8	10.803	31.054	54.530	135.77	0.20	21.5
U-2	N332100.1 E1262124.1	Pasture	5.6	138.8	0.828	46.6	12.687	29.500	50.950	141.47	0.23	21.3
U-3	N332056.8 E1262124.2	Pasture	5.8	141.0	0.810	33.8	7.159	19.950	29.559	79.67	0.17	18.1
U-4	N332056.5 E1262122.7	Pasture	5.7	140.7	0.837	33.7	7.304	27.310	29.203	103.11	0.16	19.0
U-5	N332107.6 E1262049.7	Pasture	5.6	136.5	0.641	68.1	9.569	24.236	22.357	79.69	0.24	16.9
U-6	N332113.9 E1262024.4	Feed crops	5.3	138.8	0.756	77.8	4.937	31.254	23.296	47.11	0.15	16.0
U-7	N332112.1 E1262023.1	Feed crops	5.8	115.8	0.409	9.0	17.811	28.132	30.442	63.61	0.46	15.2
U-8	N332056.1 E1261959.1	Pasture	6.0	100.8	0.371	4.0	5.742	21.714	13.606	14.18	0.26	11.1
U-9	N332056.8 E1262010.3	Horse ranch	5.7	93.6	0.416	18.6	5.061	28.608	15.834	32.13	0.18	12.2
U-10	N332057.1 E1262057.1	Horse ranch	5.7	113.2	0.501	14.5	4.853	21.648	20.634	24.13	0.17	11.4

Sample	Coordinates	Land use	pH	OM (g/kg)	TKN (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	Na	K	Mg	Ca	SAR	CEC cmol/kg
							mg/kg					
U-11	N332106.6 E1262014.2	Cropland	5.7	81.3	0.327	124.0	5.991	88.526	11.324	128.84	0.14	17.3
U-12	N332058.1 E1261819.20	Horse ranch	5.6	82.4	0.379	53.0	4.901	62.406	16.082	88.36	0.13	15.5
U-13	N332026.4 E1261840.5	Horse ranch	5.8	76.4	0.404	0.6	5.048	16.644	12.290	26.62	0.20	10.2
U-14	N332036.0 E1261833.6	Cropland	5.7	112.4	0.500	39.6	3.635	50.518	20.047	176.87	0.07	20.8
U-15	N332039.5 E1261825.7	Feed crops	6.0	81.3	0.401	33.0	7.644	62.336	30.331	134.10	0.15	17.8
U-16	N332045.7 E1261820.7	Cropland	6.7	47.0	0.331	245.1	3.681	70.624	28.198	191.21	0.07	12.2
U-17	N332100.9 E1261839.0	Horse ranch	5.1	98.5	0.379	1.7	5.684	27.448	7.370	29.10	0.24	10.6
U-18	N332101.3 E1261840.0	Horse ranch	5.4	97.6	0.516	55.2	4.831	52.972	16.914	76.52	0.13	12.2
U-19	N332049.4 E1261843.8	Grass land	5.1	102.5	0.480	44.0	4.236	12.038	4.116	41.64	0.17	9.6
U-20	N332045.7 E1261858.6	Feed crops	5.8	94.2	0.511	31.9	5.274	13.436	17.055	58.60	0.16	9.5

Sample	Coordinates	Land use	pH	OM (g/kg)	TKN (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	Na	K	Mg	Ca	SAR	CEC
							mg/kg					cmol/kg
U-21	N332041.2 E1261929.3	Horse ranch	5.7	103.3	0.466	32.9	9.973	39.732	43.924	58.61	0.24	12.4
U-22	N332034.3 E1261954.4	Horse ranch	5.8	109.6	0.456	7.3	9.313	16.902	26.770	67.03	0.24	11.0
U-23	N332124.9 E1262054.6	Grass land	5.6	80.7	0.495	6.5	4.441	24.114	25.358	67.58	0.12	12.9
U-24	N332130.8 E1262049.7	Cropland	4.7	126.8	0.610	136.6	5.047	48.462	15.166	32.33	0.18	14.7
U-25	N322133.9 E1261959.7	Feed crops	5.6	123.9	0.640	229.8	7.238	160.720	42.359	176.43	0.13	22.0
U-26	N332130.1 E1262002.2	Feed crops	5.3	128.7	0.651	140.4	4.529	106.092	31.457	155.07	0.09	20.1
U-27	N332216.5 E1261901.3	Pasture	5.3	110.7	0.568	139.7	4.774	60.240	23.234	73.36	0.12	14.3
U-28	N332212.3 E1261859.1	Pasture	5.0	134.3	0.843	125.3	4.150	76.148	33.186	75.65	0.10	17.2
U-29	N332216.8 E1261907.1	Cropland	4.8	116.1	0.591	78.6	5.739	56.868	20.082	42.22	0.18	13.9
U-30	N332212.0 E1261909.7	Grass land	5.3	126.5	0.726	108.1	3.217	66.008	28.870	68.75	0.08	13.7

Sample	Coordinates	Land use	pH	OM (g/kg)	TKN (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	Na	K	Mg	Ca	SAR	CEC
							mg/kg					cmol/kg
U-31	N332202.9 E1261919.5	Cropland	5.3	104.2	0.503	198.0	3.315	63.066	27.297	65.00	0.09	15.4
U-32	N332148.9 E1261836.4	Cropland	6.0	89.1	0.438	37.3	2.336	32.872	14.216	61.52	0.07	11.4
U-33	N332148.0 E1261841.8	Cropland	5.6	72.4	0.320	337.6	3.165	100.392	17.947	142.16	0.07	17.6
U-34	N332124.9 E1261903.4	Cropland	5.6	66.9	0.470	215.0	3.013	104.760	18.601	155.05	0.06	13.1
U-35	N332159.7 E1261916.1	Cropland	5.2	84.2	0.496	59.8	2.428	24.046	8.939	49.60	0.08	13.5
U-36	N332203.7 E1261946.3	Cropland	5.1	103.0	0.504	111.7	3.575	46.656	16.865	59.85	0.10	14.3
U-37	N332200.9 E1261939.7	Pasture	5.5	91.3	0.590	353.8	5.596	80.192	37.074	126.21	0.11	17.6
U-38	N332155.2 E1261932.0	Feed crops	6.1	113.0	0.568	111.1	5.951	48.952	22.782	185.89	0.11	18.1
U-39	N332145.7 E1261930.6	Grass land	5.4	120.3	0.643	37.7	5.465	63.568	18.513	42.15	0.18	13.3
U-40	N332146.9 E1261927.9	Grass land	5.6	103.0	0.568	146.4	10.827	98.866	41.604	128.09	0.21	18.6

Sample	Coordinates	Land use	pH	OM (g/kg)	TKN (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	Na	K	Mg	Ca	SAR	CEC
							mg/kg					cmol/kg
U-41	N332117.7 E1261945.6	Pasture	5.8	132.4	0.797	28.4	10.031	88.508	39.493	117.50	0.20	19.7
U-42	N332111.4 E1261947.2	Pasture	5.9	130.4	0.682	61.5	7.719	70.176	49.754	165.82	0.13	20.2
U-43	N332116.1 E1262013.3	Feed crops	6.1	130.4	0.717	29.6	4.428	25.498	132.838	159.37	0.06	24.0
S-1	N332107.3 E1261802.4	Cropland	4.7	61.0	0.272	395.5	3.105	44.498	12.165	42.59	0.11	13.8
S-2	N332107.1 E1261800.6	Cropland	6.2	37.0	0.259	305.2	4.320	72.496	32.217	161.84	0.08	14.5
S-3	N332119.2 E1261715.4	Cropland	6.1	48.2	0.240	483.5	3.528	86.628	27.434	185.23	0.06	13.6
S-4	N332112.5 E1261726.2	Cropland	7.0	79.3	0.395	672.7	2.894	85.296	40.155	185.34	0.05	14.1
S-5	N332113.1 E1261724.8	Orchard	6.2	57.5	0.261	405.0	3.458	41.334	25.912	90.85	0.08	11.2
S-6	N332021.6 E1261731.4	Grass land	5.9	136.8	0.999	180.6	6.255	87.424	49.739	182.06	0.11	20.9
S-7	N332032.2 E1261717.9	Grass land	6.2	129.8	0.641	3.3	6.521	31.430	33.683	147.20	0.13	15.6

Sample	Coordinates	Land use	pH	OM (g/kg)	TKN (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	Na	K	Mg	Ca	SAR	CEC
							mg/kg					cmol/kg
S-8	N332050.7 E1261652.1	Cropland	6.5	48.2	0.235	655.2	3.063	56.024	30.422	164.62	0.06	13.0
S-9	N332123.0 E1261722.7	Orchard	5.6	60.5	0.271	610.0	5.136	17.312	21.103	78.14	0.13	8.5
S-10	N332124.0 E1261723.8	Cropland	5.9	52.0	0.292	683.1	5.746	111.006	28.840	176.78	0.11	15.3
S-11	N332118.5 E1261638.8	Cropland	6.4	35.3	0.177	306.8	5.996	48.770	45.517	180.81	0.10	13.3
S-12	N332118.0 E1261637.0	Cropland	6.0	45.9	0.257	572.9	5.932	46.434	29.225	137.55	0.12	11.7
S-13	N332133.5 E1261600.3	Cropland	6.2	40.3	0.178	867.0	3.601	35.682	42.332	129.95	0.07	10.6
S-14	N332122.8 E1261549.2	Cropland	6.5	44.4	0.212	486.1	4.508	42.738	26.654	174.72	0.08	11.8
S-15	N332053.2 E1261521.3	Orchard	5.8	61.0	0.330	924.9	3.598	30.556	25.191	91.33	0.09	13.4
S-16	N332051.5 E1261521.1	Cropland	6.2	57.0	0.284	536.6	3.859	32.118	29.257	176.98	0.07	13.9
S-17	N332227.1 E1261545.2	Grass land	5.9	136.0	0.772	2.5	8.365	28.292	46.321	160.73	0.15	16.5

Sample	Coordinates	Land use	pH	OM (g/kg)	TKN (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	Na	K	Mg	Ca	SAR	CEC
							mg/kg					cmol/kg
S-18	N332127.3 E1261529.4	Orchard	5.8	93.9	0.506	451.1	5.934	19.714	20.134	162.56	0.12	11.3
S-19	N332321.2 E1261549.4	Cropland	6.6	25.5	0.138	771.9	2.915	40.892	32.663	135.21	0.06	10.8
S-20	N332433.7 E1261742.5	Cropland	6.1	33.5	0.174	419.3	6.337	69.732	40.392	172.33	0.11	12.1
S-21	N332424.8 E1261733.2	Cropland	5.8	36.2	0.171	1065.6	5.019	83.330	38.120	152.93	0.09	13.8
S-22	N332355.4 E1261744.4	Orchard	4.7	54.9	0.221	706.4	5.114	19.458	7.209	25.78	0.23	11.3
S-23	N332343.8 E1261753.9	Forest	5.6	79.9	0.295	7.4	6.899	15.398	37.518	120.92	0.14	12.3
S-24	N332357.0 E1261747.7	Cropland	5.9	49.4	0.269	729.7	6.308	101.812	26.365	153.17	0.12	14.9
S-25	N332408.1 E1261719.3	Cropland	5.3	52.6	0.241	500.0	5.121	38.328	19.986	55.52	0.15	10.1
S-26	N332405.8 E1261720.93	Orchard	5.5	66.9	0.278	807.0	4.251	13.224	20.926	76.69	0.11	10.9
S-27	N332355.9 E1261721.3	Feed crops	5.3	38.8	0.175	535.6	4.259	36.140	14.373	44.15	0.14	8.3

Sample	Coordinates	Land use	pH	OM (g/kg)	TKN (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	Na	K	Mg	Ca	SAR	CEC
							mg/kg					cmol/kg
S-28	N332347.9 E1261720.0	Cropland	4.9	60.5	0.236	83.2	3.966	32.688	21.945	62.45	0.11	8.3
S-29	N332346.5 E1261722.1	Orchard	5.5	77.6	0.308	305.4	5.368	14.384	12.934	100.38	0.13	11.0
S-30	N332353.4 E1261709.1	Cropland	5.3	79.9	0.367	481.1	4.883	29.406	25.952	76.87	0.12	10.1
S-31	N332320.5 E1261651.3	Cropland	5.5	84.5	0.398	178.2	4.048	35.164	17.257	92.08	0.10	11.9
S-32	N332317.4 E1261703.5	Orchard	5.5	91.1	0.432	905.2	7.351	27.088	29.204	183.01	0.13	16.2
S-33	N332304.0 E1261722.5	Cropland	5.8	49.4	0.221	759.5	4.005	38.062	16.041	71.89	0.11	9.6
S-34	N332255.3 E1261745.3	Cropland	5.8	77.0	0.318	202.1	3.652	10.762	25.849	47.57	0.11	6.1
S-35	N332241.5 E1261805.8	Grass land	5.6	65.7	0.317	1.3	4.936	9.068	16.519	41.62	0.16	8.5
S-36	N332225.7 E1261838.3	Cropland	5.7	80.4	0.375	217.7	3.087	22.074	5.245	28.19	0.14	9.1
S-37	N332217.0 E1261838.1	Feed crops	4.9	89.3	0.538	202.2	4.766	18.486	13.157	44.41	0.16	11.6

Sample	Coordinates	Land use	pH	OM (g/kg)	TKN (%)	P ₂ O ₅ (ppm)	Na	K	Mg	Ca	SAR	CEC
							mg/kg					cmol/kg
S-38	N332152.0 E1261805.4	Cropland	6.4	43.8	0.205	236.6	1.718	76.994	17.351	187.57	0.03	7.5
S-39	N332134.9 E1261743.9	Cropland	6.2	52.0	0.277	533.9	4.556	86.338	38.378	185.76	0.08	12.6
S-40	N332140.5 E1261734.0	Cropland	6.0	69.2	0.355	193.8	4.910	51.020	24.368	129.71	0.10	13.2
S-41	N332154.8 E1261720.2	Cropland	6.0	50.2	0.227	660.4	3.132	40.128	11.870	178.64	0.06	12.6
S-42	N332144.0 E1261709.9	Cropland	6.0	41.2	0.206	579.4	3.918	103.320	32.556	182.51	0.07	15.7
S-43	N332143.3 E1261712.2	Cropland	6.1	63.7	0.291	610.3	3.557	70.672	36.612	184.03	0.06	21.5
S-44	N332302.1 E1261700.2	Orchard	5.7	39.7	0.217	316.7	3.091	58.904	29.484	184.02	0.06	18.7
S-45	N332211.9 E1261702.9	Cropland	6.3	41.7	0.220	805.0	2.833	112.696	47.152	185.47	0.05	19.5
S-46	N332229.7 E1261707.3	Cropland	5.8	38.5	0.187	329.4	3.496	59.206	35.910	116.80	0.07	19.1
S-47	N332301.0 E1261702.7	Cropland	6.1	64.0	0.289	618.1	3.005	68.672	36.626	184.70	0.05	6.6

Appendix 3. Chemical composition of groundwater (September, 2009)

Unit : mg/L

Well ID	Co	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Ni	Zn
D230	0.0007	0.0031	0.0005	0.0017	0.0044	0.0084	0.0000	0.0013	0.0014	0.0511
F239	0.0002	0.0054	0.0005	0.0015	0.0215	0.0099	0.0000	0.0028	0.0003	0.0823
F368	0.0007	0.004	0.0005	0.0014	0.0036	0.0085	0.0006	0.0032	0.0000	0.0589
F244	0.0000	0.038	0.0005	0.0026	0.0037	0.0085	0.0001	0.0006	0.0007	0.092
F315	0.0002	0.0027	0.0005	0.0016	0.0077	0.0455	0.0005	0.0029	0.0005	0.1066
D033	0.0007	0.0000	0.0005	0.0026	0.0109	0.0094	0.0000	0.0031	0.0061	0.0527
F317	0.0004	0.0027	0.0005	0.0024	0.0087	0.0089	0.0000	0.002	0.0005	0.0471
F028	0.0008	0.0046	0.0005	0.0014	0.0000	0.0085	0.0000	0.0021	0.0007	0.0377
F137	0.0005	0.0045	0.0005	0.002	0.0084	0.0091	0.0006	0.0022	0.0048	0.4153
F135	0.0006	0.0000	0.0005	0.0017	0.0049	0.0089	0.0000	0.0025	0.0008	0.0599
F068	0.0007	0.0051	0.0005	0.002	0.0009	0.0086	0.0000	0.0012	0.0036	0.0288
F246	0.001	0.0023	0.0005	0.0017	0.0011	0.0086	0.0000	0.004	0.0008	0.1021
F314	0.0004	0.003	0.0005	0.0014	0.0009	0.0163	0.0000	0.0017	0.0008	0.0784
S004	0.0005	0.004	0.0005	0.0026	0.0131	0.0081	0.0000	0.0031	0.0005	0.0438
F458	0.0002	0.0057	0.0005	0.0019	0.014	0.0169	0.0036	0.003	0.0021	0.0507
F128	0.0011	0.0027	0.0006	0.0014	0.0042	0.0097	0.0000	0.0027	0.0017	0.1600
D128	0.0003	0.0038	0.0004	0.0013	0.0095	0.0114	0.0010	0.0019	0.0009	0.068
F481	0.0007	0.0046	0.0006	0.002	0.0091	0.0085	0.0005	0.0032	0.0021	0.0833
F046	0.0009	0.0036	0.0005	0.002	0.0016	0.011	0.0000	0.0018	0.0010	0.0126
F059	0.001	0.036	0.0005	0.0019	0.0028	0.009	0.0000	0.0022	0.002	0.0114
CS01	0.0008	0.0036	0.0004	0.0033	0.008	0.0106	0.0001	0.0026	0.0014	0.0133
F090	0.0004	0.0069	0.0006	0.0008	0.0000	0.0233	0.0000	0.0002	0.0017	0.1083
W022	0.001	0.0014	0.0005	0.0023	0.0073	0.0099	0.0003	0.0009	0.0019	0.0759
DS01	0.0008	0.0058	0.0005	0.0014	0.0064	0.0111	0.0000	0.0028	0.001	0.0388
CH01	0.0005	0.0053	0.0005	0.0018	0.0007	0.0196	0.0000	0.0009	0.0003	0.0131
Jeil01	0.0005	0.0036	0.0005	0.0019	0.0049	0.0081	0.0000	0.0025	0.0011	0.0509

Appendix 3. Chemical composition of groundwater (June, 2009)

Well ID	Co	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Si	Zn
F028	0.0092	0.0000	0.0001	0.0022	0.0039	0.0014	0.0003	0.0012	17.012	0.0505
F046	0.0195	0.0008	0.0000	0.0032	0.0038	0.0039	0.0000	0.0003	17.147	0.0074
F059	0.0027	0.0040	0.0001	0.0026	0.0035	0.0006	0.0004	0.0018	16.932	0.3568
F068	0.0054	0.0008	0.0002	0.003	0.0019	0.0014	0.0003	0.0016	16.574	0.0497
F090	0.0048	0.0000	0.0001	0.0024	0.0030	0.0008	0.0004	0.0014	17.31	0.025
F128	0.0035	0.0026	0.0000	0.0027	0.0026	0.0014	0.0003	0.0000	17.523	0.0341
F137	0.0036	0.0053	0.0001	0.0022	0.0020	0.0008	0.0007	0.0004	16.042	0.2123
F239	0.0121	0.0000	0.0001	0.0029	0.0023	0.0016	0.0002	0.0000	16.856	0.0491
F244	0.0169	0.0004	0.0001	0.0032	0.0025	0.0031	0.0002	0.0006	16.247	0.0184
F246	0.0076	0.0031	0.0000	0.0031	0.0018	0.0029	0.0003	0.0011	17.609	0.0227
F314	0.021	0.0019	0.0001	0.0035	0.0028	0.0078	0.0006	0.0021	16.358	0.066
F315	0.0099	0.0012	0.0002	0.0036	0.0016	0.0001	0.0001	0.0010	15.14	0.0217
F368	0.0113	0.0000	0.0001	0.0017	0.0003	0.0035	0.0003	0.0009	16.249	0.0154
F458	0.014	0.0000	0.0002	0.0034	0.0042	0.0041	0.0001	0.0024	16.819	0.0364
D033	0.0111	0.0019	0.0001	0.0036	0.0051	0.0102	0.0004	0.0008	15.369	0.0954
D230	0.0119	0.0006	0.0002	0.0026	0.0025	0.0037	0.0002	0.0007	17.2	0.0254
D280	0.0062	0.0005	0.0000	0.0025	0.0037	0.0194	0.0009	0.0000	16.603	0.0106
S004	0.0082	0.0015	0.0000	0.0045	0.0042	0.0205	0.0004	0.0026	15.75	0.3973
JEIL01	0.0089	0.0058	0.0000	0.0034	0.0000	0.0045	0.0007	0.0015	13.792	0.0603
GAM01	0.0191	0.0022	0.0002	0.0054	0.0005	0.0022	0.0000	0.0029	14.641	0.0174
DS01	0.0746	0.0016	0.0001	0.0035	0.0013	0.0291	0.0004	0.0018	12.944	0.0254
CS01	0.0067	0.0016	0.0001	0.0033	0.0014	0.0030	0.0009	0.0002	14.888	0.0268
DB01	0.0141	0.0003	0.0003	0.0025	0.0071	0.0202	0.0008	0.0015	15.623	0.0106
F135	0.0095	0.0009	0.0000	0.0036	0.0013	0.0075	0.0003	0.0018	14.551	0.0247
F317	0.0082	0.0000	0.0000	0.0039	0.0013	0.0026	0.0000	0.0014	15.345	0.0035
W022	0.0093	0.0027	0.0001	0.0026	0.0009	0.0129	0.0003	0.0036	16.815	0.0709

Appendix 4. Ion component of groundwater

Well ID	DATE	Cl	NO ₃ -N	SO ₄	NH ₄	Na	K	Mg	Ca	F
F028	2009-09-04	19.938	0.846	1.666	0.000	7.710	13.671	5.100	5.625	0.111
F046	2009-09-04	16.435	6.777	6.310	0.000	11.839	3.382	9.380	10.981	0.105
F059	2009-09-04	27.486	17.762	13.870	0.000	15.462	3.364	16.102	20.922	0.160
F068	2009-09-04	11.618	2.190	2.618	0.000	8.691	2.640	5.719	6.478	0.110
F090	2009-09-04	16.272	6.393	5.807	0.000	11.461	3.031	8.515	9.910	0.100
F128	2009-09-04	27.657	17.290	13.624	0.000	18.438	4.876	15.280	20.328	0.155
F135	2009-09-04	24.154	16.370	17.680	0.084	15.690	4.554	13.730	15.832	0.159
F137	2009-09-04	16.779	7.709	6.455	0.000	12.754	4.363	10.377	11.831	0.107
F244	2009-09-04	8.554	0.496	1.771	0.000	9.362	3.230	4.188	5.657	0.122
F239	2009-09-04	6.715	0.247	1.517	0.000	6.434	2.101	4.021	4.815	0.115
F246	2009-09-04	19.833	10.640	8.754	0.000	14.635	3.762	13.602	12.510	0.155
F314	2009-09-04	19.517	10.443	10.381	0.000	14.042	3.432	11.340	12.723	0.106
F315	2009-09-04	9.777	2.003	2.583	0.000	9.518	3.339	4.779	7.264	0.120
F317	2009-09-04	14.909	5.480	7.335	0.000	14.761	4.197	7.487	8.622	0.125
F368	2009-09-04	8.639	1.636	2.527	0.000	7.643	2.420	5.150	6.207	0.111
F458	2009-09-04	7.311	1.088	1.641	0.000	7.508	2.544	4.376	5.163	0.118
F481	2009-09-04	24.788	10.474	13.608	0.040	16.626	2.374	14.750	14.526	0.170
D033	2009-09-04	15.753	6.615	6.851	0.000	12.548	3.255	9.127	9.479	0.106
D128	2009-09-04	12.321	0.381	3.178	0.000	20.599	3.888	4.759	8.493	0.143
D230	2009-09-04	10.738	2.624	2.883	0.000	9.087	2.793	5.910	7.144	0.108
S004	2009-09-04	13.472	3.763	3.853	0.000	11.042	3.196	6.524	7.734	0.112
W022	2009-09-04	58.793	28.948	33.314	0.000	52.281	4.130	13.486	17.428	0.229
JEIL01	2009-09-04	33.753	15.182	18.630	0.000	25.905	4.616	15.330	24.264	0.193
GAM01	2009-09-04	11.521	1.371	3.415	0.000	14.633	4.254	4.726	7.735	0.135
DS01	2009-09-04	14.122	2.316	11.806	0.000	14.514	4.196	5.278	15.050	0.170

Well ID	DATE	Cl	NO ₃ -N	SO ₄	NH ₄	Na	K	Mg	Ca	F
CS01	2009-09-04	21.746	5.108	10.266	0.034	28.501	4.322	13.802	15.956	0.194
CH01	2009-09-04	16.302	5.624	6.778	0.000	13.252	3.533	8.364	9.713	0.138
F028	2009-06-10	12.200	2.191	2.620	0.072	9.679	3.274	5.643	6.271	0.109
F046	2009-06-10	17.399	6.012	0.000	0.005	10.940	3.455	8.093	9.424	0.109
F059	2009-06-10	15.333	6.859	5.746	0.038	11.640	4.033	8.885	10.281	0.104
F068	2009-06-10	16.580	7.475	6.407	0.067	11.142	3.412	8.992	11.188	0.105
F090	2009-06-10	15.605	6.121	5.892	0.001	11.698	3.534	8.572	9.831	0.107
F128	2009-06-10	27.114	17.976	14.034	0.220	17.867	5.638	15.566	20.600	0.151
F137	2009-06-10	17.374	8.366	5.658	0.220	13.929	5.542	12.782	14.474	0.158
F239	2009-06-10	6.560	1.030	1.718	0.024	6.660	2.643	4.068	4.849	0.113
F244	2009-06-10	8.686	1.162	1.993	0.005	9.669	3.929	4.242	5.675	0.121
F246	2009-06-10	19.788	11.942	8.886	0.004	14.959	4.742	14.238	12.890	0.148
F314	2009-06-10	16.675	8.144	8.001	0.000	13.367	3.763	9.549	10.983	0.115
F315	2009-06-10	8.613	1.295	2.138	0.003	9.736	4.051	4.349	6.940	0.124
F368	2009-06-10	7.973	2.213	2.498	0.000	7.479	2.895	4.798	5.740	0.113
F422	2009-06-10	13.207	4.496	3.214	0.023	9.681	3.547	7.044	7.692	0.000
F458	2009-06-10	7.469	1.356	1.812	0.003	7.938	3.196	4.576	5.312	0.118
D033	2009-06-10	15.971	7.204	6.842	0.000	12.803	3.820	9.204	9.633	0.110
D230	2009-06-10	8.826	1.847	2.269	0.011	8.104	3.151	4.820	5.914	0.111
D280	2009-06-10	11.076	3.872	3.530	0.000	9.228	3.200	6.602	7.513	0.104
S004	2009-06-10	12.888	3.034	3.379	0.000	10.713	3.697	5.949	7.264	0.114
JEIL01	2009-06-10	41.940	14.400	18.835	0.175	34.047	7.740	15.615	24.265	0.357
GAM01	2009-06-10	10.596	0.922	3.118	0.008	14.940	4.928	4.495	7.194	0.136
DS01	2009-06-10	45.913	8.650	15.440	0.075	34.957	11.915	12.425	35.095	0.387
CS01	2009-06-10	19.532	5.650	8.708	0.038	17.601	4.478	13.012	14.924	0.174
DB01	2009-06-10	35.136	5.550	10.522	0.000	26.526	5.098	9.002	13.264	0.223

Well ID	DATE	Cl	NO ₃ -N	SO ₄	NH ₄	Na	K	Mg	Ca	F
F135	2009-06-10	22.781	15.180	16.706	0.000	15.228	5.006	12.622	14.236	0.156
F135	2009-06-10	14.821	6.410	7.420	0.004	15.352	4.916	7.688	8.684	0.176
F317	2009-06-10	25.843	9.214	14.748	0.032	17.344	3.140	14.626	14.108	0.169
W022	2009-06-10	30.703	14.902	15.602	0.000	20.409	4.348	13.662	16.704	0.171
D128	2009-06-10	6.029	0.172	1.614	0.023	10.684	2.151	2.300	4.309	0.098
F317	2008-10-30	17.193	6.374	8.140	0.000	18.490	5.864	8.484	9.625	0.152
F246	2008-10-30	22.397	12.897	9.468	0.036	17.878	5.570	16.093	14.504	0.000
F481	2008-10-30	29.580	10.293	16.477	0.000	20.522	3.561	16.161	16.332	0.000
F135	2008-10-30	26.099	18.451	17.882	0.000	23.358	6.126	15.657	17.176	0.000
D128	2008-10-30	14.785	0.403	3.671	0.000	26.375	5.524	5.220	9.679	0.173
W022	2008-10-30	39.167	25.831	22.115	0.000	26.369	5.720	19.260	30.163	0.000
KG01	2008-10-30	11.722	0.652	3.003	0.086	17.028	5.616	4.720	8.152	0.163
GR01	2008-10-30	24.885	6.388	9.695	0.000	21.880	5.169	13.646	16.505	0.000
JEIL01	2008-10-30	40.719	13.890	19.515	0.063	35.496	7.152	16.843	25.990	0.191
CH01	2008-10-30	102.468	15.716	32.070	0.000	71.289	10.737	20.749	46.285	0.250
DS01	2008-10-30	77.086	8.816	45.607	0.000	63.660	16.082	21.456	49.897	0.212
D230	2008-10-30	10.560	2.361	2.512	0.000	10.000	3.761	5.728	7.053	0.000
D280	2008-10-30	13.132	4.912	4.061	0.000	15.564	3.812	8.026	9.057	0.000
D033	2008-10-30	20.695	8.220	7.558	0.000	16.704	4.687	10.875	11.261	0.000
F244	2008-10-30	9.447	1.373	2.048	0.000	11.274	4.466	4.698	6.316	0.000
F028	2008-10-30	9.721	1.187	2.137	0.000	8.983	3.346	4.749	5.325	0.000
F458	2008-10-30	11.067	1.915	2.212	0.000	10.775	4.088	5.667	6.713	0.000
F137	2008-10-30	18.682	7.429	6.021	0.122	15.212	5.743	11.034	12.604	0.000
F527	2008-10-30	10.557	2.018	2.205	0.029	10.629	4.084	5.623	6.644	0.000
F368	2008-10-30	7.548	1.188	1.760	0.000	7.751	3.047	4.588	5.415	0.000
F239	2008-10-30	7.902	1.224	1.764	0.000	8.307	3.214	4.796	5.754	0.000

Well ID	DATE	Cl	NO ₃ -N	SO ₄	NH ₄	Na	K	Mg	Ca	F
F315	2008-10-30	34.697	1.205	5.496	0.000	22.961	5.216	6.180	8.166	0.156
F314	2008-10-30	16.661	6.148	5.923	0.000	15.351	4.295	9.087	10.624	0.000
F422	2008-10-30	13.830	5.107	4.141	0.000	14.849	4.115	8.283	8.948	0.000
F068	2008-10-30	12.551	2.791	2.827	0.000	14.870	3.787	6.491	7.215	0.000
F128	2008-10-30	27.408	16.800	13.704	0.000	20.931	6.354	16.122	21.896	0.000
F453	2008-10-30	16.621	6.897	5.631	0.000	13.172	4.104	9.752	11.525	0.000
F059	2008-10-30	15.757	5.712	5.043	0.000	12.472	4.233	8.907	10.220	0.000
F046	2008-10-30	17.591	6.257	5.305	0.000	13.419	4.077	8.936	10.543	0.000
F090	2008-10-30	16.383	6.076	5.319	0.023	13.279	4.078	9.140	10.723	0.000
S004	2008-10-30	18.022	4.449	4.254	0.000	13.864	4.246	8.165	8.613	0.000
GA01	2008-10-30	7.919	0.818	1.940	0.000	7.465	3.159	4.176	5.527	0.000

감사의 글

식품공학과에 인연을 맺고 학부부터 대학원까지 직장생활을 하면서 25년이란 짧은 피를 다 받쳐 긴긴 세월을 보내면서 피가 되고 살이 되는 좋은 경험을 많이 하였고, 많은 분들이 따뜻한 관심과 애정 어린 질책 속에 또 다시 한층 성숙해 질수 있었습니다. 진정한 이 시대의 지식인으로서 소양과 자세를 일깨워주신 모든 분들께 한 분씩 찾아뵙지 못하고 이렇게 지면으로나마 감사의 인사를 드리고자 합니다.

먼저 연구와 강의로 바쁘신 가운데도 논문이 완성되기까지 자상하게 인도해 주시고 연구 방향에 대하여 넓은 안목으로 키워주시며 지도해주신 고영환 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 언제나 식품공학과를 위하여 아낌없는 헌신으로 제자들을 자상하게 인도해주시는 하진환 교수님과 임상빈 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 정년을 앞두신 가운데도 항상 자상한 웃음으로 반겨주시고 박사논문을 무사히 마칠 수 있도록 열과 성을 다하여 지도하여 주신 강영주 교수님께도 머리 숙여 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

바쁜 직장생활에도 불구하고 박사논문을 처음부터 끝까지 연구방향에 대하여 넓은 안목으로 지도해주신 제주특별자치도 환경자원연구원에 근무하시는 오상실 과장님과 송상택 과장님께 깊은 감사의 말씀을 드리며, 좌담회 원장님을 비롯한 직원여러분께도 각 분야에서 더한층 건승하시길 진심으로 기원합니다.

또한 제가 직장을 생활하면서 아무런 불평 없이 마음껏 공부할 수 있도록 아낌없이 도와 주신 부모님께 감사드립니다. 항상 자애로우시고 용기를 주신 어머니가 아니었다면 이런 일은 꿈에도 꾸지 못한 일이었습니다. 지금은 고인이 되셨지만 항상 남을 배려하라는 희생과 용기를 주셨던 아버지에게 늦게나마 이 논문을 만칠 수 있어 하염없이 기쁩니다.

그리고 노년을 즐기롭고 행복하게 잘 보내시는 장인 장모님께도 감사의 말씀을 올립니다.

끝으로 직장 생활과 대학원생활을 하면서 생활비 학비에 불평하지 않고 항상 따뜻한 사랑과 가족의 행복을 위하여 헌신하는 내 아내인 김맹애님에게 감사와 깊은 사랑을 전하고 싶고, 항상 건강하고 씩씩하게 자라주는 딸 유정과 아들 승철, 승주에게 고맙다는 말을 하고 싶습니다. 이외로 제가 미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너무 많습니다. 이 분들 한분 한분 성함을 되새기지 못함을 죄송스럽게 생각하며, 대신 제 깊은 감사의 말로 이 글을 마칠까 합니다. “모두들 감사드립니다”.