

碩士學位論文

연약한 토사터널의
보강 공법에 대한 연구



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

陸 京 洙

2 0 0 6

碩士學位論文

연약한 토사터널의
보강 공법에 대한 연구

指導教授 南正萬



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

陸京洙

2006

연약한 토사터널의 보강 공법에 대한 연구

指導教授 南 正 萬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2006年 6月



濟州大學校 産業大學院

JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

建設環境工學科 土木工學 專攻

陸京洙의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2006年 6月

委 員 長	印
委 長	印
委 長	印

A study on the reinforcement grouting method
used in soft ground tunneling

Kyung-Su Yuk

(Supervised by Professor Jung-Man Nam)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master of Engineering



2006. 6.

This thesis has been examined and approved.

Department of Construction and Environmental Engineering
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목 차	i
List of Tables	iv
List of Figures	v
Summary	vii
I. 서 론	1
I-1. 연구 배경	1
I-2. 연구 목적	3
II. 주입 이론	4
II-1. 개요	4
II-2. 그라우팅 역사 및 연구동향	6
II-3. 주입 목적	7
II-3. 주입재	7
1) 주입재에 요구되는 성질	7
2) 주입재의 분류	8
3) 주입목적에 따른 구비조건	9
II-4. 주입공법의 설계	9
1) 주입재의 주입형태	9
2) 주입 방식	11
3) 주입공의 배치	12
4) 주입량의 결정	12
5) 주입압의 결정	13
II-5. 시공 관리	14
1) 주입전의 시공관리	15
2) 주입중의 시공관리	15

3) 사후관리	21
III. 연구지반에 적용된 보강 그라우팅 공법의 종류 및 적용	22
III-1. 대표적 주입공법	22
1) L.W 공법	22
2) CEMENT MILK 공법	24
3) 강관 다단 그라우팅 공법	25
4) 강관 우레탄 공법	26
III-2. 현장 적용 및 비교 검토	28
1) 터널 보강도	28
2) 구간별 적용된 공법 및 단면도	29
3) 적용된 공법의 경제성 및 공정에 관한 비교 분석	32
IV. 수치 해석에 대한 역해석 체계	38
IV-1. 수치 해석	38
1) 개요	38
2) 해석 목적	38
3) 해석 방법	38
4) 해석 프로그램	39
IV-2. 계측	48
1) 계측을 이용한 시공 개념 및 목적	48
2) 계측의 설치와 관리 및 평가 방안	50
IV-3. 계측 결과	54
IV-4. 해석 결과 분석	55
1) 단면 해석 I 구간	55
2) 단면 해석 II 구간	56
3) 단면 해석 III구간	57
V. 결 론	59

VI. 참고 문헌 61



List of Tables

Table 2.1	General material classification of a grout	8
Table 2.2	The required condition by the grouting purpose	9
Table 3.1	The reinforcement in each section	28
Table 3.2	The unit cost comparison between steel pipe urethane method and steel pipe multi-step grouting method	33
Table 3.3	The cycle time comparison applied to reinforcement with steel pipe multi-step grouting method and steel pipe urethane method	34
Table 3.4	Estimation of total works duration	35
Table 3.5	The input cost while tunnel construct	37
Table 4.1	The analysis section	44
Table 4.2	A property of matter data of ground applied to analysis	47
Table 4.3	A property of matter data of tunnel support applied to analysis	47
Table 4.4	The standard measurement interval and frequency	51
Table 4.5	The control criterion of convergence	52
Table 4.6	The control criterion of convergence rate	52
Table 4.7	The control criterion of crown settlement	53
Table 4.8	Measurement data	54
Table 4.9	Displacement of I section	55
Table 4.10	Displacement of II section	57
Table 4.11	Displacement of III section	58

List of Figures

Fig 1.1	The condition of the collapsed site, 1	2
Fig 1.2	The condition of the collapsed site, 2	2
Fig 1.3	The condition of the collapsed site, 3	2
Fig 1.4	The condition of the collapsed site, 4	2
Fig 2.1	Permeating grout	10
Fig 2.2	Fracturing grout	11
Fig 2.3	1 shot method	12
Fig 2.4	1.5 shot method	12
Fig 2.5	2 shot method	12
Fig 2.6	Time-Pressure- Quantity(T-P-Q)curve, A type	17
Fig 2.7	Time-Pressure- Quantity(T-P-Q)curve, B type	18
Fig 2.8	Time-Pressure- Quantity(T-P-Q)curve, C type	18
Fig 2.9	Time-Pressure- Quantity(T-P-Q)curve, D type	19
Fig 2.10	Time-Pressure- Quantity(T-P-Q)curve, E type	20
Fig 2.11	Time-Pressure- Quantity(T-P-Q)curve, F type	20
Fig 3.1	L.W method	22
Fig 3.2	Cement Milk method	24
Fig 3.3	Steel pipe multi-step grouting method	25
Fig 3.4	Steel pipe urethane method	26
Fig 3.5	The cross section plan of reinforced tunnel	28
Fig 3.6	The cross sectional plan of I -1 section	29
Fig 3.7	The vertical sectional plan of I -1 section	29
Fig 3.8	The condition that grouting is completed with steel pipe multi-step grouting, 1	29
Fig 3.9	Large plant area	29
Fig 3.10	The cross sectional plan of I -2 section	30

Fig 3.11	The vertical sectional plan of I-2 section	30
Fig 3.12	The cross sectional plan of I-3 section	30
Fig 3.13	The vertical sectional plan of I-3 section	30
Fig 3.14	The condition that grouting is completed with steel pipe urethane	31
Fig 3.15	The condition that grouting is completed with L.W	31
Fig 3.16	The condition that grouting is completed with L.W, Cement milk ..	31
Fig 3.17	The cross sectional plan of II section	32
Fig 3.18	The vertical sectional plan of II section	32
Fig 3.19	Application to steel pipe urathane method	32
Fig 3.20	The total construction cost comparison between steel pipe urethane method and steel pipe multi-step grouting method	33
Fig 3.21	The cycle time comparison between steel pipe urethane method and steel pipe multi-step grouting method	36
Fig 4.1	The ground condition of I section	45
Fig 4.2	The ground condition of II section	45
Fig 4.3	The ground condition of III section	46
Fig 4.4	The analysis of section plan and Mesh in I section	55
Fig 4.5	The view after reinforcing steel supports in I section	56
Fig 4.6	The analysis of section plan and Mesh in II section	56
Fig 4.7	The analysis of section plan and Mesh in III section	57

Summary

In this study, in order to resume the passage of vehicles after covering a sector with soil, which was initially planned to have an open cut, when the sector is completely refilled (with sand, stony powder) for restoration due to the burying of construction devices such as H-pile, strut, and wale that had been already constructed for the installation of the open cut, grouting such as L, W, JSP, and CF was performed for the whole cave-ins on the road. The in-depth grouting could not be made evenly throughout the whole sector due to diverse steel materials and construction devices buried under the ground, and the grouting was not sufficiently done because of various steel materials on the upper part of the excavation part of a tunnel. Of course, there partly existed underground cavities. In particular, there were many difficulties as the ground condition of G.L-26m position where a tunnel was going to be built was very poor since soil avalanche and diverse steel materials were in a chaotic state. Also, it was difficult to proceed with construction as there was a possibility of additional ground transformation in the course of removing diverse steel materials that were exposed to the whole side of a blind end when digging through a tunnel. Accordingly, given the aforementioned problems, it is estimated that grouting performed on the ground is hard to be fully trusted when digging through a tunnel.

Therefore, it was planned to execute excavation after performing additional ground reinforcement(multiple-divided steel pipe, steel pipe urethane, cement milk, L.W). Also, it was concluded that the tunnel on this site is located on the lower part of underground water and the surrounding ground comprised soft earth and sand ground containing small cavities. Thus, it needs to focus on whether the increase of sufficient intensity can be obtained when grouting the water-stoppage efficiency for the leak of underground water and the surrounding ground for appointing an engineering method. Also, it needs to consider both construction efficiency and

economic efficiency given the circumstance of the site, and to compare and review tunnel reinforcement grouting engineering methods that have been recently introduced to the tunnel excavation site. Therefore, those engineering methods can be settled in Korea for appropriately coping with the featured ground conditions of soft ground tunnel.



I. 서론

1. 연구 배경

산업사회의 발달로 지하공간의 이용이 확대되어가는 현 상황에서의 지하철, 전력구, 통신구 등 터널시공에 있어 기술혁신은 눈부시며 여러 가지 신기술·신공법이 개발되고 있습니다. 더불어 N.A.T.M 공법에 있어서는 막장 굴착 시 굴착면의 안전 및 천단의 안정이 중요시 되는 점과, 도시터널에 있어 공사를 둘러싼 제약조건의 까다로움 등을 극복하기 위해, 선수공사를 비롯한 보조공법의 기술개발이 적극적으로 진행되고 있습니다. 특히 지하철 터널의 경우 산악터널과는 달리 지표면으로부터 깊지 않은 곳을 통과하게 되므로 터널의 상부는 토사층이나 균열의 빈도가 심한 풍화암층을 통과하게 되는 경우가 많이 발생합니다. 연구 지반은 퇴적암 지역의 풍화암 붕괴로 원설계에서 개착구간인 지역이 터널로 설계 변경된 지역으로 붕괴구간은 급히 현장을 수습하기 위하여 붕괴 후 즉시 토사(모래,석분)로 되메움 하였으며, 무너진 이전 가시설 철재, 장비(백호)등도 같이 묻혀 있는 상태로 되메움 후 도로침하방지 목적으로 상부에서 기존 H-PILE 주위에 JSP, C/F 그라우팅을 시공하였으며 시공심도를 고려하면 터널구간 보강효과는 그다지 크지 않을 것으로 판단된다. 설계변경을 수행하여 되메움 구간을 터널시공방법으로 계획되었으나 현장상황이 충분히 고려되지 않아 시공에 많은 어려움이 있고 되메움 후 터널을 기준으로 50M가량이 토사 터널 구간으로 토사 내에 혼재에 있는 각종 강재 및 공동발생으로 인한 터널 굴착 중 보조공법 보강그라우팅 공법 적용이 불가피한 상황이다.



Fig. 1.1 The condition of the collapsed site, 1



Fig. 1.2 The condition of the collapsed site, 2



Fig. 1.3 The condition of the collapsed site, 3



Fig. 1.4 The condition of the collapsed site, 4

2. 연구 목적

연구 지반에서의 Tunnel 굴진 시 예상되는 문제점은 다음과 같다.

- Tunnel 굴진 시 막장면에 매몰된 강재 또는 장비가 노출될 경우 이를 제거하는 과정에서의 추가적인 지반 변형 발생 가능
- 매몰된 강재 및 시공 장비 하부로 과도한 공동이 존재할 가능
- 지상에서 실시한 지반보강 Grouting의 불확실성

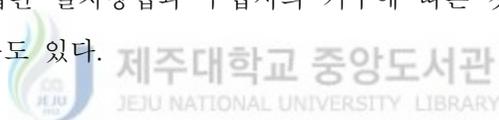
터널 보조공법 선정에 있어 본 구간은 지하수위 하부에 위치하며 또한 주변지반은 공동이 다소 포함된 연약한 토사 지반으로 구성되어 있다고 판단된다. 따라서 공법 선정 시에는 지하수 유출에 대한 지수효과 및 주변지반을 그라우팅 했을 경우 충분한 강도 증가를 기대할 수 있는가에 초점을 맞추어야 한다. 따라서 보조 보강 공법별 특징의 비교 분석으로 토사 터널 보조 공법의 시공성 및 경제성을 모두 충족할 수 있는 대안을 고찰하며, 터널 보조 공법을 적용함에 있어서 타당성 및 수치 해석, 그리고 계측 data의 역해석 체계(Feed Back System)의 검토로 보강(Grouting) 효과를 연구하는데 목적이 있다.

II. 주입 이론

1. 개요

주입이란 지반특성을 목적에 부합하게 개량하기 위해 특별한 성질을 갖는 주입재를 지반 속으로 침투시키는 것으로 정의되며 그라우팅(Grouting)이라 부르기도 한다. 이러한 주입은 사용되는 주입재의 종류에 따라 시멘트 주입, 약액 주입 등으로 구분되며, 또한 사용목적에 따라 차수 주입, 강화 주입 등으로 구별될 수 있다.

주입공법은 주입재를 지반 속으로 주입시키는 일련의 방식을 말하는 것으로서, 주입재 혼합방식, 주입 순서, 주입관 설치방법 등에 따라 구분되는데 일반적으로 공법명을 나타내는 것은 주입관 설치방법과 주입시의 기구에 따른 것이지만 특별히 개발된 주입재에 따르는 경우도 있다.



2. 그라우팅 역사 및 연구동향

그라우팅 공법이 지반을 보강할 목적으로 활용되기 시작한 것은 1800년대 초부터이며 다양한 지반조건에 만족할만한 보강방법을 결정하고 보강효과를 극대화하기 위한 연구와 노력은 현재까지도 계속되고 있다. 프랑스의 엔지니어 Charles Berigny(1802)는 자신이 고안한 퍼커션펌프 구조물 보강을 위해 주입하고 “Injection process”라고 명명하였다. 이 방법은 1800년대 초반부 프랑스에서 구조물기초 보강에 널리 사용되었으며, Knipple W.R에 의해 1856년에 영국에도 소개되었고, 1896년에는 이집트에서도 이용되었다(Karol, 1983; Robert Bowen, 1981). 한편, 영국의 Aspdin J.(1824)에 의해 포틀랜드 시멘트가 개발되고, Marc Isambard Brunel(1838)에 의해 테임즈 터널건설 주입재로 포틀랜드 시멘트가 최초로 사용되면서 주입공법은 눈부신 발전을 하는 계기가

되었다(Robert Bowen, 1981). 또한, James Greathead(1886)는 Shield Lining과 지반의 간극에 압축공기를 이용하여 시멘트를 충전하는 기계를 개발하여 콘크리트 댐의 압력 주입을 일반화시켰다(Karol, 1983). 독일의 Jezirosky(1887)는 물유리(Water-Glass, 규 산소다)에 염화칼슘(CaCl_2)을 고결제로 첨가하여 겔화시키는데 성공하여 Two-Shot방 법으로 주입하는 특허를 얻었으며 이것이 약액주입공법의 시초이다(Karol, 1983). 벨기에의 Dumont와 Lemaire(1909)는 물유리에 산을 첨가시켜 One-Shot주입공법의 특허를 얻었으며 강도가 낮아 차수목적으로만 사용하였다(Robert Bowen, 1981). 독일의 Hans Jahde교수(1952)는 물유리와 시멘트 현탁액을 지반에 주입하는 L.W공법(Labiles Wasser Glass, 불안정 물유리)으로 특허를 받아 현재까지 널리 사용되고 있다. 일본에서는 1915년에 처음으로 시멘트를 이용한 그라우팅이 적용되었다는 기록이 있으며 활성화된 것은 1950년대 이후부터이다. 1954년경에 영단 지하철건설 등에 쓰인 기록이 있다. 1964년경부터는 동경올림픽을 준비하기 위한 건설공사와 함께 유기수지계를 비롯한 우수한 약액주입공법이 대단히 많이 개발되었으며 광범위하게 활용되었다. 그러나, 1974년에 아크릴아미드계의 주입재가 우물에 침투하여 중독되는 사건이 발생하면서 주입공법의 주입재로 물유리계 이외에는 사용이 금지되는 잠정지침이 내려짐에 따라 주입공법의 일대 전환기를 맞게 되었다. 이때부터 주입방법에 대한 연구가 활발히 진행되어 스트레이너 주입공법, 이중관 더블패커 주입법, 이중관 롯데 주입법, 이중관 복합 주입법 등이 개발되었다. 또한, 下田에 의해 물유리를 산성상태인 실리카졸로 만든 후 중성화시켜 고결시키는 방법이 개발되어 환경보존 및 안정성을 인정받아 현재 까지 사용되고 있다.

국내에서는 1960년대 산악터널 및 댐 기초 보강에 시멘트밀크 그라우팅을 일부 적용하였으나 적극적으로 활용된 것은 1970년 초부터 시작된 서울지하철 1호선 건설공사이다. 1980년대에는 LW공법이 일본에서 도입되어 서울지하철2호선에 적용되었고, 1983년 초에는 서울지하철 3호선 및 4호선 공사에 SGR공법이 적용되었으며, 1983년 9월에는 서울지하철 3호선에 마이크로 시멘트가 최초로 적용되었다. 1979년에 고압분사 주입공법(JSP)이 도입되어 부평공단 쌍용 시멘트 싸이로 기초보강공사에 적용된 이후 RJP, JET Grout, SIG 등 3중관 공법이 국내에 도입되어 도심지하철 건설 및 건물건축 현장, 항만시설 건설현장 등에 많이 적용되어 왔다(천병식, 1998)

국내 최초로 주입공법에 관한 연구는 1976년 국립건설연구소에서 수행한 물유리, 염

화칼슘, 규산화소다공법 등에 대한 연구(건설부, 1976)이며, 1977년에는 규산화소다, 고화제(P.C)에 관한 연구(건설부, 1977), 그리고 1978년에는 고화제(O.C), 후지베톤(FB), 물유리, 규산화소다+염화칼슘+시멘트를 사용한 실내·외 시험시공(건설부, 1979)등이 실시되었다. 또한, 1979년 한양대학교에서 “화학약액에 대한 연약지반 고결공법의 개발 연구”가 문교부 정책 과제(진병익·천병식, 1980)의 일환으로 수행되면서 국내 주입공법에 관한 활발한 연구가 시작되었다고 할 수 있다. 1980년대에 약액주입공법이 차수목적으로 국내에 도입된 후 주입량으로 주입효과를 판정하려던 정량주입개념이 효과를 기대할 수 없게 되면서 정압주입개념이 적용되기 시작했다(천병식, 1995). 1985년부터 주입공법의 수압파쇄(Hydraulic Fracturing)문제에 관해 연구(천병식, 1986)된 바 있으며, 한국건설 연구원(1986)은 “지하 굴착 보조공법의 설계와 시공에 관한 연구”를 수행하였다. 또한, 대우건설 기술연구소(1988)는 “지반개량을 위한 그라우팅 공법에 관한 연구”에서 주입공법의 기본원리와 적용성 및 설계, 시공에 관한 지침을 제시하였다. 1990년대에는 주입공법 적용 시 침투성, 내구성, 환경영향 등을 해결하기 위한 연구가 시작되었다. 중앙대학교 건설 산업 기술연구소(1994)는 “고압분사 주입공법(SIG)에 의한 지반 개량체의 특성에 관한 연구 보고서”에서 SIG공법으로 시험시공을 실시하고 개량된 지반의 지반강도 증대 및 차수효과를 분석하여 보고하였다. 건설교통부(1996)는 “건설공사의 안전시공을 위한 지반보강 신기술 개발 및 실용화 연구”에서 마이크로시멘트 및 실리카 졸을 이용한 주입공법의 지반 효과 및 환경영향성을 분석, 평가하고 신기술로 제안하였다. NATM공법의 보조공법으로 사용되는 강관 삽입식 그라우팅 및 우레탄 지반보강공법(PU-IF)은 일본에서 1990년 초 도입되어 국내실정에 맞는 새로운 공법으로 국산화와 아울러 실용화되었다.

그러나, 주입공법은 주입재 뿐만 아니라 주입압력, 주입속도, 쉘 타임 및 대상지반의 투수계수, 공극율 등에 따라 지반 개량효과가 달라진다. 따라서 이에 대한 연구는 앞으로 계속 이어져야 할 것으로 본다.

3. 주입 목적

일반적으로 주입공법의 목적은 다음과 같다.

○ 지반강화 : 지반의 역학적 강도가 부족할 때 기초지반의 지지력 개선, 터널 굴착 시 붕괴방지, 굴착 작업 시 인접구조물 보호 및 굴착저면의 용기방지 그리고 토압의 경감 등을 도모한다. 즉 굴착에 따라 위험이 발생할 부분을 고결시킴으로서 공사를 용이하게 하며 안정성을 확보한다.

○ 지반의 지수성 증대 : 터널굴착시의 용수방지, 굴착 시 파이핑 현상방지와 지하수 위의 저하방지 등을 위해 지수영역을 형성시킨다.

○ 지반의 변형방지 : 변형방지 효과는 지반강화 혹은 지수증대에 부수적으로 얻어진 다. 따라서 지반의 변형방지를 위해서는 상기 두 가지를 동시에 목적으로 한다.

4. 주입재



1) 주입재에 요구되는 성질

일반적으로 주입재가 갖추어야 할 물리화학적 성질은 다음과 같으며, 특히 환경오염을 일으키지 않는 것이 중요하다.

• 세밀한 토립자 간극에도 침투할 것. 즉, 주입재의 초기점도 (고화 또는 겔화 전의 유통성)는 가능한 한 낮고, 물의 점도(≒1cp)에 가까울 것. 토립자 간극에 침투, 충전된 주입재는 고화 또는 겔 반응 종료와 동시에 고강도를 발휘할 것.

• 고화 또는 겔화한 주입재는 수축 등을 일으키지 않고 지반을 불투수성화 할 것.

• 장기간에 걸쳐 모든 환경 하에서 안정할 것.

• 시공에 즈음하여 주입재의 취급, 조합 등이 간단하고, 고화 또는 겔 타임을 쉽게 조절할 수 있을 것.

• 지반 내 각종 물리화학적 성질에 의해 고화 또는 겔화반응이 영향을 적게 받을 것.

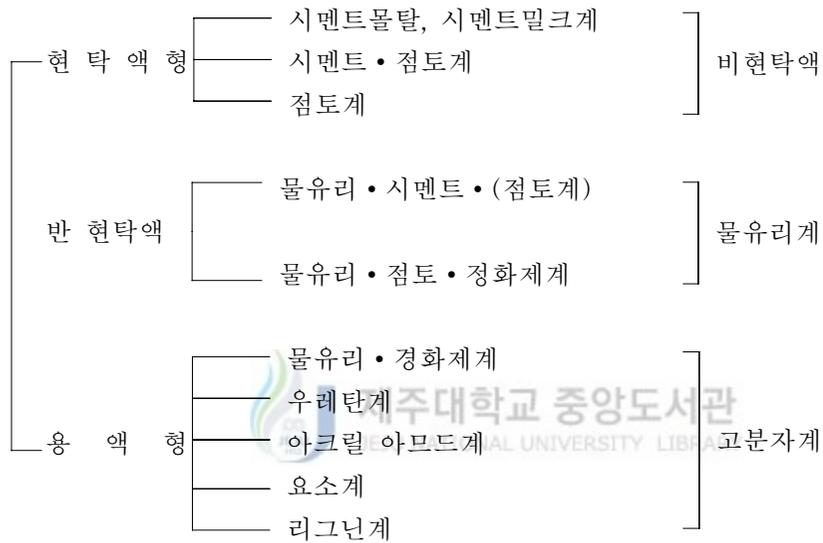
• 주입재의 성분 중에서 흙 및 지하수를 오염시키는 유해한 이온 또는 화합물을 포함하지 않을 것(무공해형 주입재).

2) 주입재의 분류

주입재는 재료, pH농도, 겔 타임, 반응형식 등에 따라 분류될 수 있으며 여기서는 널리 사용되고 있는 물유리계를 중심으로 분류하였다.

다음은 재료의 일반적인 분류를 나타내고 있다.

Table. 2.1 General material classification of a grout



3) 주입 목적에 따른 구비조건

Table. 2.2 The required condition by the grouting purpose

항 목		기 본 적 조 건	
개 량 목 적	지 수	침투성만을 고려 저점성 용액형약액 (단, 사전처리로서 현탁형 사용)	
	지 반 강 화	침 투	침투성에 뛰어난 고결토는 어느 정도 강도가 필요 저점성용액형약액
		맥 상	겔타임이 짧고 호모겔강도가 큰 현탁형약액
		침 투 맥상병용	호모겔강도가 크고 침투성이 뛰어난 약액
용 수 지 역	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 지하수에 희석되어도 겔타임이 지연되지 않는 약액 ◦ 급결성고결에 뛰어난 약액(용액 또는 현탁형) (2중관 사용)		
복 합 주 입	선행주입	겔타임이 짧고 호모겔강도가 비교적 큰 현탁형약액	
	본 주 입	선행주입재와 반응이 좋고 침투성이 뛰어난 약액	
특 수 지 반		(산성, 알칼리성 지반, 유기질 지반(peat)) 사전에 테스트를 하고 시험하여 주입재를 선정한다.	
기 타		환경보전성도 검토한다(독성, 지하수 오염, 수질오탁등)	

5. 주입공법의 설계

1) 주입재의 주입 형태

지반에 주입재를 주입하게 되면 당연히 그 주입재는 유입해가기 쉬운 부분부터 먼저 침투해 가게 된다. 따라서 지반 상황이나 주입재의 조건에 따라 각종의 주입형태가 달리 나타나게 된다. 또한 일반적으로 주입재에 압력을 가해 지반에 주입하게 되기 때문에 주입재는 토립자에 의해 교란되면서 지반 중에 침투하게 되어 그 겔 타임은 설계 시 조정된 것보다 실제로는 길어지는 경우가 많다. 주입형태에 영향을 주는 요소로는 주입재의 겔 타임, 점성, 지반의 특수성 지반 내 응력상태 및 주입압(주입속도)과 주입 공법 등이 있으며 주입형태는 기본적으로 침투주입과 맥상(활렬)주입 및 그 복합형태

로 나타난다.

(1) 침투주입

토립자의 배열을 파괴하지 않고 주입재가 입자간의 간극을 메워가는 주입형태로 지반내의 간극수나 gas 등은 밖으로 밀려나가게 된다. 투수성이 좋은 사질계 지반의 비교적 균질한 지층에 대해 저점성이고 켈 타임이 긴 주입재를 저압으로 주입할 경우 완전한 침투주입을 기대할 수 있다. 이 경우 주입시간이 주입재의 켈 타임(전술한 바와 같이 설계 켈 타임보다 일반적으로 길다)보다 짧은 경우는 후에 주입되는 주입재가 먼저 주입된 것을 외측으로 밀어냄으로써 서서히 침투 범위를 넓혀 가게 된다. 한편, 주입시간이 주입재의 켈 타임보다 길면 먼저 주입된 주입재가 켈화하므로 후에 주입되는 주입재가 그 고결부분을 맥상으로 뚫고 외측으로 나가 새로운 간극으로 침투해 가게 된다.



Fig. 2.1 Permeating grout

(2) 맥상주입

점성도와 같이 침투주입이 어려운 지반이나 켈 타임이 매우 짧은 경우 주입재가 지반을 국부적으로 전단하여 맥상 혹은 지상으로 관입되는 형태이다. 이런 경우는 주입재 자체가 Homogel의 형태로 골격을 이루어 강도를 발휘하게 되므로 침투성보다 Homogel강도가 큰 것이 바람직하다. 또한 균열이 많은 연암(연사암이나 이암)과 같이 암본체의 강도는 상당히 크지만 균열이 있어 암반 전체로서는 강도가 낮고 투수성이 큰 경우 등에는 맥상주입 만으로도 충분히 그 개량목적을 달성할 수 있다. 그러나 이

러한 경우 등도 켈 타임 조정에 의해 주입재가 필요이상의 범위로 유출되는 것을 막아야 한다.



Fig. 2.2 Fracturing grout

(3)복합주입(할렐 침투주입)

침투주입이 가능한 지반이라도 켈 타임 주입시간보다 짧거나, 지반이 균질하지 못하면 정도의 차이는 있으나 상기 1), 2)의 복합형태가 된다. 대부분의 지반이 이와 같은 주입이 되고 특히 켈 타임이 극히 짧은 급결형의 경우는 침투주입이 일어나지 않고 맥상주입이 일어난다. 이러한 특징을 살려 최근에는 간극이 큰 균열과 공극을 적당한 (켈 타임이 비교적 짧은) 주입재로 충전하여 균일화 한 다음 침투성이 좋은 용액형의 주입재를 침투주입 시킴으로써 지반 전체를 적절히 고결시키려는 주입공법과 주입장치 등이 다종 고안되어 실용되고 있다.

2)주입방식

주입방식은 주입대상지반, 사용 주입재료, 주변 지반이나 구조물에 미치는 영향을 고려하여 결정하여야 한다. 주입방식에 있어서는 다음과 같은 주입재의 혼합방법이 매우 중요한 사항이므로 신중하게 검토하여 선정하여야 한다.

(1)1 shot방식: 1개의 믹서로 충분한 혼합이 가능하고 균질한 주입재를 얻을 수 있으나, 짧은 켈 타임을 요구하는 순결형 주입재에는 적당하지 못하며 켈 타임이 긴 주입재에 적합하다.

(2) 1.5 shot 방식 : 룯드의 지상 돌출부에서 Y자 관으로 2개의 용액이 합류하여 룯드를 통하여 지반에 주입되는 방식으로 겔 타임이 비교적 짧은 주입재에 사용된다.

(3) 2 shot 방식 : 주입관의 토출부에서 주입재가 합류 혼합되어 지반에 주입되는 방식으로 겔 타임이 짧은 주입재에 주입 시 사용되며, 이 방식에서는 2중관을 사용하여 내관, 외관에 따른 A액과 B액을 보내 동시에 주입한다.

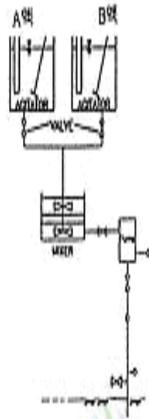


Fig. 2.3

1 shot method

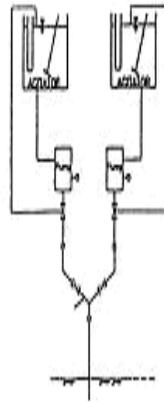


Fig. 2.4

1.5 shot method

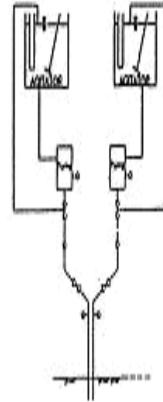


Fig. 2.5

2 shot method

3) 주입공의 배치

지반 개량범위가 결정된 후, 이 부위의 효과적인 주입개량을 위해서는 주입공을 적절히 배치하는 것이 중요하다. 주입공은 원칙적으로 주입유효범위(침투 개량범위)가 서로 겹치게 배치해야 한다. 따라서 주입 침투식에 의해 이론적으로 간격을 정하기도 하지만, 현실적으로는 관련된 요소가 너무 많아 복잡하고, 더욱 지반의 불균질성을 고려하면 수직적인 결과는 큰 의미가 없게 된다. 실제 설계에서는 이론식에 의한 값을 참고로 함과 동시에 경제적인 측면을 고려하면서 경험의 축적에 의한 판단으로 간격을 선택하고 있다.

4) 주입량의 결정

주입량이란 주입대상지반 내에 침투하는 주입재의 총량을 말하는 것으로, 설계 시 결정해야 될 사항 중에서 가장 중요한 것이다. 주입대상지반에 대한 총주입량 Q 는 일반

적으로 다음 식에 의해 산정된다.

$$\begin{aligned}
 Q &= V \cdot \lambda \\
 \lambda &= n \cdot \alpha \\
 &= n \cdot \alpha \cdot (1 + \beta) \\
 &= n \cdot \alpha' \cdot \beta' \cdot \gamma' \cdot \delta
 \end{aligned}$$

여기서, Q : 총주입량

V : 주입대상토량

λ : 주입율

n : 지반의 간극율

α : 지반간극에 대한 주입재의 충전율

β : 주입재의 손실계수

$\alpha \cdot (1 + \beta)$: 주입재의 손실을 고려한 충전율

α' : 주입유효간극율

β' : 고화물의 가압 탈수에 따른 계수(가압계수)

γ' : 주입방식에 따른 충전률

δ : 주입의 고려한 계수

위의 식에서 볼 때, 일정한 주입대상토량에 대한 총주입량 Q는 주입율 λ 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

5)주입압의 결정

주입재를 주입하기 위해서는 주변 간극수압보다 높은 주입압이 필요하지만 그 차이는 가능한 한 작게 하는 것이 바람직하다. 주입압을 너무 높게 하면 주변지반을 교란하게 되고, 지표면이나 기타 주입범위 밖으로 유출되며, 주변구조물에 나쁜 영향을 주므로 주의를 요한다.

(1)간극수압과 주입압의 관계

주입압은 일반적으로 간극수압보다 높게 하며, 또 그것의 3~5배까지 억제하는 것이 좋다.

$$P' < P < (3 \sim 5)P$$

여기서 P : 주입압

P: 간극수압

(2) 사지반, 실트질 지반에서 주입압의 경험적인 수치

주입압의 지반조건, 환경조건, 시공목적 등의 관계에서 일반적으로 결정되므로 비슷한 조건하의 시공성공사례를 참고로 결정하는 것이 좋다. 사지반에서는 2~5kg/cm² 정도이고, 실트질 지반에서는 이보다 크게 하는 것이 일반적이다. 그리고 다른 요인이 있어서 10kg/cm² 이상으로 되는 경우도 있다.

(3) 주변구조물로부터 결정되는 주입압

주입압에 의해 상재구조물이 나쁜 영향을 받는 경우가 있으므로 상재구조물의 주변에 주입을 할 때는 주의를 요한다. 즉, 상재하중을 고려하여 겔 타임을 길게 하고 적은 주입압으로 서서히 주입하는 것이 좋다.



6. 시공관리

주입공법의 주요 요소로서는, 주입목적과 주입환경에 따른 적절한 설계계획이 있으며, 또 하나는 현장에서의 기술적 관리가 있다. 이중 특히 현장에서의 기술적 관리는 설계 계획대로 충실히 시행하는 것으로 족한 것이 아니라 주입공법 특유의 많은 불확실성 때문에 설계는 어디까지나 기본이고 현장의 여건에 따라 적절히 설계의 변경 적용이 필요하다는 면에서 매우 중요하다. 이는 물론 설계서대로의 기계적 시공으로 족한 경우도 있겠지만, 현장 주변조건, 토질의 복잡성, 기타요인 등으로 인해 설계 단계에서는 파악할 수 없었던 여러 문제가 일어난다는 것은 당연한 일로 받아들여 시공관리의 중요성이 더욱 강조되는 것이다. 이런 경우 기술관리는 현장 주입기술자의 풍부한 경험이나 기기조작 능력 등에 의존하는 경향이 크지만 이는 모두 사용 주입재나 토질, 기타 주입공법에 필요한 과학적 지식을 그 기반으로 하여야 한다.

1)주입전의 시공관리

(1)주입재료의 품질확인

주입재료는 용도나 목적에 따라 그 종류가 다양하므로 품질확인에 충분한 주의를 요한다. 확인 방법으로는 육안으로 카다로그 등과 대조해서 변질 여부와 수량 등을 확인하고 그 중요도 및 상황에 따라 필요시 분석 시험에 의해 성분, pH 등을 조사한다.

(2)주입재료의 취급 및 보관상의 주의

주입재는 현장 상황에 따라 긴급히 배합 변경을 요하는 경우가 있으므로 저장고, 믹서 등은 현장부근에 배치하는 것이 바람직하다. 주입재료 중에는 인체에 유해하거나 흡수성이 커서 변질의 우려가 있는 경우가 있으므로 보관 취급에 충분한 주의를 요한다.

(3)주입재의 특성시험

주입재의 특성에 대해서는 일반적으로 제조업자에 의해 어느 특정 조건에서 각종 시험을 거쳐 그 성질, 적용성, 효과 등이 측정된 것으로 현장의 지반, 온도 등 개개의 조건에 따라 각각 그 효과가 달라지게 되므로 필요에 따라 현장의 기온, 수온 혼합용수에 의한 주입재의 특성시험을 실시주입재의 특성에 결정적으로 영향을 주게 될 경우는 사전에 이의 조정을 위한 대책을 수립해야 한다.

(4)천공기계 및 주입기계의 보수관리

천공기계 및 주입기계는 주입시공 전에 철저히 점검하여 소정의 능력을 발휘할 수 있는 상태를 유지할 수 있도록 해야 한다. 장비 점검 시 특히 유의해야 할 것은 약액의 리턴(Return)장치, 주입펌프의 토출량, 압력계, 유량계, 주입관의 joint 등이다.

2)주입중의 시공관리

주입공법에 있어서의 시공관리의 요점은 목적인 시공범위에 어떻게 확실히 주입하는가에 있다. 이를 위해서 설계시의 제수치를 지반조건 및 기타 조건 등에 따라 적절히 수정 보완하여야 하며 이러한 적절한 주입관리를 위해서는 작업일보, 주입주상도, 시공관리도 등을 작성하여 주입상황을 확실히 파악하고 있는 것이 신속한 조치를 위해서도 유리하다.

(1)주입압, 주입량의 관리

가)정압주입방법

주입 시 압력을 일정하게 유지하도록 단위시간당 주입량을 조절하면서 주입하는 방법이다.

주입 개시 시는 펌프의 압송량을 가능한 한 적게 하고 압력계를 계속 주시하면서 서서히 압송유량을 증가시킨다. 주입 압력이 급상승하기 시작하면 압송유량을 감소시켜 급상승 전의 압력(제한 압력)을 유지하도록 하면서 주입을 계속한다. 이 상태로 주입을 계속하면 유량을 점차 감소시키지 않으면 제한 압력을 유지할 수 없게 된다. 유량을 극도로 감소시켜야만 되는 시점에서 제한압력보다 약간 큰 압력(+1~2kg/cm²)으로 일시적인 유량 증가를 시켜 주입을 끝낸다. 주입 압력은 원칙적으로 주변의 악영향을 미치지 않은 범위 내에서 높은 압력을 주는 것이 효과적이다. 따라서 정압주입의 경우 제한 압력을 어떻게 결정하는가가 성패의 요점이라고 할 수 있으며 지나치게 낮으면 주입량이 적어 만족한 결과를 얻을 수 없게 된다. 일반적으로 주입압은 주입 펌프의 토출압력이고 실제 주입관을 떠나 지반내의 주입재가 갖는 압력은 상당히 손실이 있는 것으로 예상되나 그 정확한 압력의 측정은 곤란하다. 한편, 지반 중에 주입재가 포화상태가 된 경우 파스칼의 원리대로 펌프의 토출압력이 순간적으로 지반에 작용해 주변에 악영향을 미치는 경우가 종종 있으므로 주의를 요한다.

나)정량주입방법

정량 주입 방법이라는 것은 주입 시 단위 시간당 주입량을 일정하게 정하고 주입압력의 변화를 감시해 이 압력이 초기의 주입압력에서 서서히 상승하여 그 이상의 압력을 작용시키면 주변에 악영향을 미치게 되기 직전까지 주입을 계속하는 주입방식이다. 단위 시간당 주입량은 시험공사에 의해 결정하게 되는데 시공능력, 경제성에 비추어 보통 토층에 대해서는 15~30 l/min 정도로 하는 것이 적당하다. 정량 주입방식에서 단위시간당 주입량을 과대하게 설정하면 최초에 압력이 상승하고 주변에의 악영향을 미치게 되는 경우가 있으므로 주의를 요한다. 이상에 기술한 주입압과 주입량 외에 약액주입 시공 시 중요한 또 하나의 요소 즉 주입재의 켈 타임 조정이 주입의 성패를 좌우하는 큰 요소가 되다. 켈 타임이 지나치게 짧으면 약간의 주입량에도 주입압이 급격히 상승해 주입이 불가능하게 되고 또한 지나치게 길면 지반내의 연약부위를 따라 예정 범위 외로 유출되어 계획량 이상으로 주입해도 상승하지 않는 경우도 있다.

(2) 자기기록계에 의한 자료의 해석(P-Q관리)

효과적으로 높은 최종 주입압을 달성하기 위해서는 주입압의 절대치 보다는 그의 시간적 변화 쪽이 시공 관리상 유력한 판단 자료가 된다. 이를 위해 자기기록 압력 유량계는 주입 시에 있어 지반내의 주입재의 거동을 탐지하기 위한 유력한 방법이다. 이 기록계에서는 주입압력과 주입량이 시간 경과에 따라 기록지에 연속적으로 기록된다. 이 기록지에 기록된 Data는 그대로 P-Q관리도로 사용된다. 다음에 소개한 6가지의 주입패턴은 주입 시 발생할 수 있는 대표적인 경우들이다. 실제 주입 시에 나타나는 주입패턴은 이러한 주입패턴과 다소 상이할 수 있다. 이 경우에는 유사한 주입패턴에 언급된 특징들을 살펴보고 주입재의 켈 타임, 주입장비, 시공방법 등을 점검하여 주입효과가 양호하게 될 수 있도록 하여야 한다.

가)A형

주입 개시 후 적당한 시간에 압력(P)이 반응을 보여 증가경향을 나타내는 경우이다. 사질토에서의 이상적인 침투주입을 나타내며 실제로는 좀처럼 얻기 어렵다.

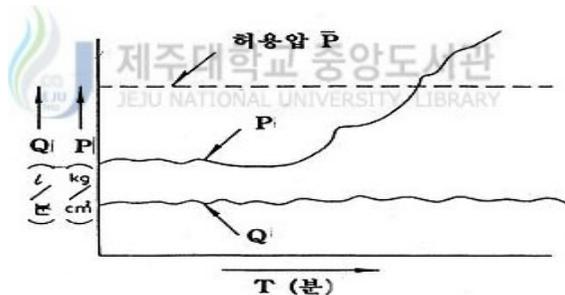


Fig. 2.6 Time-Pressure-Quantity(T-P-Q) curve, A type

나)B형

주입 압력이 서서히 증가하지만 그 구배가 비교적 완만하고 쉽게 목표 주입 압력에 도달하지 않는 경우이다.

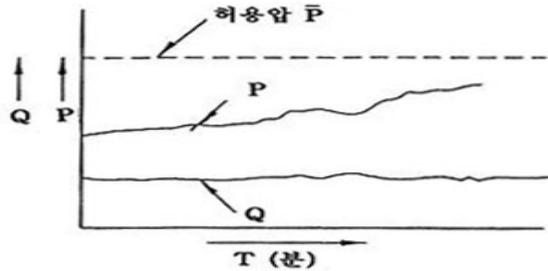


Fig. 2.7 Time-Pressure-Quantity(T-P-Q) curve, B type

실제 주입에서는 이러한 경우가 대부분이며 대상토질에 따라 여러 가지 상황판단이 가능하지만 일반적으로 다음과 같이 생각할 수 있다.

- 점성토의 맥상주입을 나타내며 양호한 주입효과가 기대된다.
- 침투주입을 목표로 한 사질토 지반에 일부 맥상주입이 나타나고 지반이 예상보다 느슨하다.
- 침투주입이 이가 루어 지고 있으나 주입재의 농도가 낮고, 켈 타임이 너무 길다.
- 약액의 일부대상지층 밖으로(상부 점성토 혹은 경계면 등) 유출되고 있다.

다)C형

압력이 전혀 증가하지 않고 오히려 감소하는 경우이다. 실제 이런 유형을 종종 볼 수 있다.

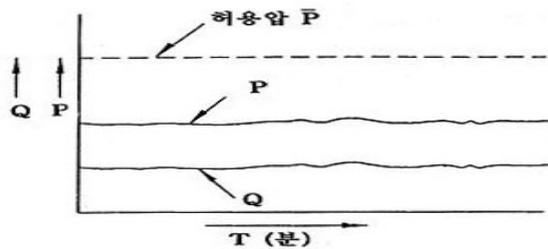


Fig. 2.8 Time-Pressure-Quantity(T-P-Q) curve, C type

- 점성토의 맥상주입의 경우로 주입재가 광범위하게 유출되고 있다.
- 주입재가 지표로 유출되고 있다. 혹은, 지표 근처의 공극이 많은 층으로 유출되고 있거나, 지하매설물 내로 유출되고 있다.
- 회석이나, 그 밖의 원인으로 주입재가 만족스럽게 겔화하지 않고 있다.

라)D형

증가하던 주입 압력이 어떤 시점에서 돌연 감소하고, 그 후 회복되지 않는 경우이다.

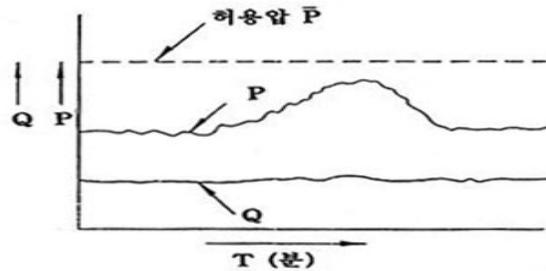


Fig. 2.9 Time-Pressure-Quantity(T-P-Q) curve, D type

- 주입관 주변의 패커(packer)가 파괴되고, 주입재가 유출하기 시작했다.
- 주입속도가 너무 빨라, 지반을 교란하면서 유출되기 시작한다.
- 주입재가 어느 순간에 지반의 공극이나 약한 부분을 따라 주입되는 맥상주입으로 바뀌었다.

마)E형

D형의 증가와 감소 패턴을 반복하면서 점차적으로 주입압력이 증가해가는 형태로서 주입시간에 비해서 겔 타임이 짧은 약액주입인 경우에서 자주 볼 수 있다. 먼저 주입되어 겔화한 주입재가 후에 주입되는 주입재에 의해 순차적으로 할렬 파괴되면서 침투되어가는 과정을 나타낸다고 볼 수 있다. 이러한 유형의 곡선에서는 적절한 주입이 이루어지고 있다고 볼 수 있다.

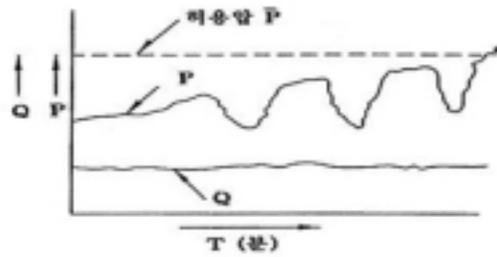


Fig. 2.10 Time-Pressure-Quantity(T-P-Q) curve, E type

바)F형

주입개시 직후부터 주입압이 빠르게 증가하여 허용 압력을 넘어 버리는 경우이다.

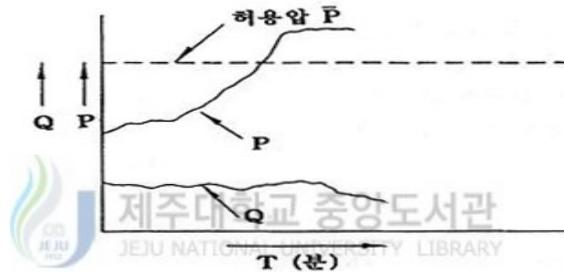


Fig. 2.11 Time-Pressure-Quantity(T-P-Q) curve, F type

- 토층이 조밀해서 주입할 수 없다.
- 쥘 타임이 너무 짧다.
- 주입관이 막히고 있다.
- 주입의 필요가 없는 지층의 경우이다.

(3) 지하매설물에 대한 영향관리

지하매설물에는 상·하수도, 가스관, 통신케이블 전력선 등이 있다. 이러한 매설물의 형태 및 기능상에 손상을 주지 않도록 해야 한다. 약액주입 공법에 의해 이들 매설물에 영향을 주는 경우는 다음의 2가지 경우를 생각할 수 있다. 첫째는 주입을 위한 보링에 의해 직접 매설물에 구멍을 뚫는 일인데 이것이 가장 위험한 경우이다. 두 번째로 보링에 의한 직접 피해는 없어도 주입재가 지중을 통해 매설물 내로 침입하거나, 주입압이나 주입된 흙의 체적증가 등에 의한 변형으로 그 기능에 손상을 주는 2차적

피해이다. 이러한 매설물에 대한 피해를 막기 위해서는 다각도에서의 신중한 검토를 통해 안전관리에 만전을 기해야 한다.

(4)사용 기재 및 기타 관리

약액주입 시공전은 물론 시공 전에도 다음과 같은 사항에 대해 수시로 안전 점검을 실시해야 한다. 보링기, 주입펌프, 혼합 믹서 등을 점검하고 특히 펌프는 주입압력이 비정상적으로 상승했을 경우에 대비하여 안전밸브 및 리턴 호스 등을 체크한다. 전기 계통 장비는 어스, 전선피복, 누전차단기, 스위치박스 등을 점검, 감전사고, 누전사고를 방지한다. 주입재료의 개량은 계량기를 이용하여 정확히 하고 주입 중에 겔 타임을 수시로 체크하여 소정의 겔 타임이 얻어지고 있는가 여부를 측정해야 한다. 또한, 용해하는 물의 온도, 주·야간 계절 간 온도차에 의한 겔 타임 변화가 민감한 약액에 대한 고려를 위해 시공 중 주변 환경에 대한 감시를 철저히 해야 한다.

3)사후관리

주입시공후의 사후관리의 주요사항에는 주입효과 확인 및 이에 따른 조치와 주입에 의한 환경 영향의 관리 등이 포함된다. 주입공사가 어떤 공사를 위한 가설적 의미로 실시된 경우는 공사 진행에 지장이 없도록 지속적인 거동 파악에 의한 확실한 효과 유지를 할 수 있도록 해야 한다.

Ⅲ. 연구지반에 적용된 보강 그라우팅 공법의 종류 및 적용

1. 대표적 주입공법

1)L.W 공법

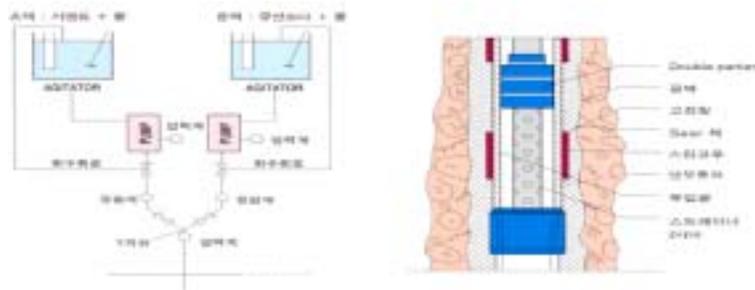


Fig. 3.1 L.W method

(1)개요

천공 후 지중에 Manchette tube를 설치하고 1차적으로 seal재를 주입한 후 Double Packer가 설치된 별도의 주입관을 삽입하고 Step별로 2차적으로 LW를 주입하여 지반 개량을 도모하는 공법.

(2)주입재

물유리, Cement

(3)적용 지반

암반층, 세사(0.6mm이하) 실트층 및 연약점토층을 제외한 지반

(4)주입 후 지반 강도

10kg/cm²내외

(5)장점

- 주입장비, 주입재가 국산품으로 타 공법에 비해 공사비가 저렴하다.
- 시공경험이 풍부하고 장비가 간편하다.
- 주입 후 필요부위에 재주입이 가능하다.

- 막장면의 임시 붕락 방지용으로 사용이 가능하다.

(5) 단점

- 주입 후 지반강도가 작다.
- 응결시간이 길어 주 공정에 영향을 미친다.
- 주입 깊이가 짧아질 경우 Cement의 양생기간을 고려하면 시공기간이 매우 길어진다.
- T/L 굴진 시 단독사용이 어려우며 강관다단 Grouting 및 강관우레탄 그라우팅 등의 보조공법이 요구 된다.



2)CEMENT MILK 공법

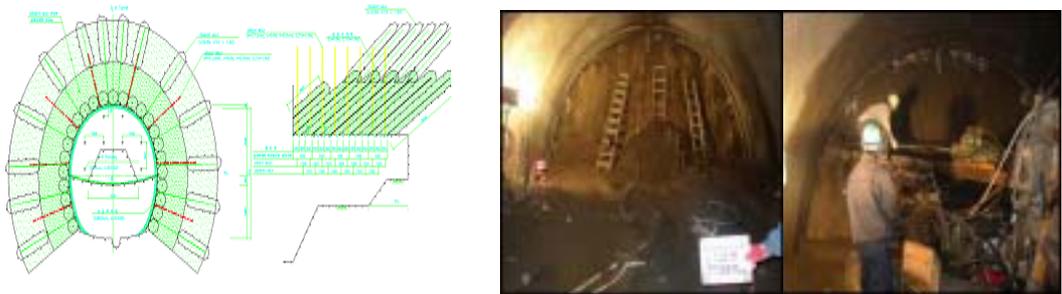


Fig. 3.2 Cement milk method

(1)개요

천공 후 주입관을 설치하여 1.0 shot 주입하고 토사층에서는 시공 효과를 높이기 위해 1.5 shot 주입을 하며, L.W 주입 시스템 적용이 효과적인 공법

(2)주입재

현탁형 시멘트 + 물



(3)적용 지반

주 대상지반은 암반(토사층은 주입효과 불확실)

(4)주입 후 지반 강도

5~15kg/cm²

(5)장점

- 암반층에서 packer의 주입에 의한 시공효과 양호
- 주입재료가 시멘트이므로 높은 강도의 주입 효과를 얻을 수 있다.

(6)단점

- 토사층에서의 주입재의 역류 현상으로 개량 범위를 균일하게 주입할 수 없다.
- 주입재의 겔 타임 조정이 불량하여 대상 지반에 큰 공극 및 공동이 있을 경우 균일 주입이 불가능하다.

3)강관 다단 그라우팅 공법

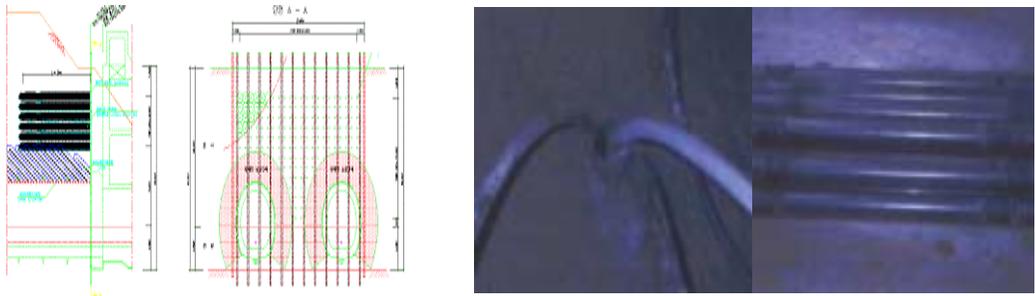


Fig. 3.3 Steel pipe multi-step grouting method

(1)개요

터널 굴착 시 막장천공 후 다공 스틸관을 밀어 넣고 삽입된 다공 스틸관을 통해 고압력의 SGR이나 LW약액을 주입함으로써 지반보강 및 차수효과를 달성하는 공법.

(2)주입재

SGR약액, LW약액



(3)적용 지반

충적층, 심한 풍화대

(4)주입 후 지반 강도

5~15kg/cm²

(5)장점

- 다공 스틸관에 의한 지반보강의 효과가 높다.
- 약액 주입에 의한 차수 효과가 높다.
- 강관과 지반의 일체화에 의한 Beam 형성의 효과가 가능하다.
- 상부 토압의 분산 효과가 있다.
- 주변 지반 변위를 저감할 수 있다.

(6)단점

- 암반파쇄대 또는 토사 T/L의 막장면 안정성 확보를 위해 Fore Piling 등의 별도의 보강 공법이 필요하다.
- 주입 길이가 짧아질 경우 시공기간 및 경제성에 지대한 영향을 미친다.

4)강관우레탄 공법

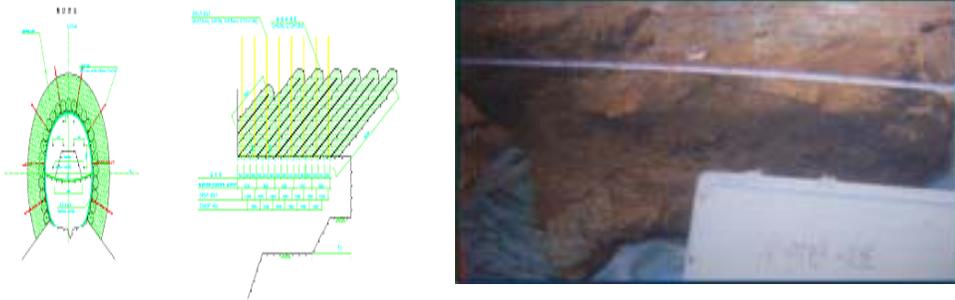


Fig. 3.4 Steel pipe urethane method

(1)개요

기존의 우레탄 주입공법을 개량한 신 공법으로서 고강도 증공볼트에 의한 2중관 구조를 채택하여 주입 시 효율적이고도 경제적인 주입관리가 가능하며 삽입된 증공관은 기존의 우레탄공법에 비해 약 2배 이상의 직경과 길이로 이루어져 지반거동 억제효과(막장 전면의 Sliding 방지) 및 시공성이 향상된 공법.

(2)주입재

고분자계 우레탄 약액

(3)적용 지반

모든 지층

(4)주입 후 지반 강도

40~50kg/cm²

(5)장점

- 차수 효과가 탁월하다.
- 지반강도 증진효과 탁월하다.(40kg/cm²이상)
- 측벽부의 측압에 대한 활동 방지 효과가 우수하다.
- 삽입된 고강도의 주입볼트를 이용하여 Rock Bolt의 효과를 발휘할 수 있다.(Fore Piling 효과)

- 시공성이 매우 양호(공당 40분소요)하여 공기 절감을 유도할 수 있다.
- 장비가 간단하고 소규모이다.
- 발포압에 의해 지반 내 공동의 충전이 가능하다.
- 제한된 범위 내에서도 시공이 가능하다.
- 연약지층, 파쇄대 및 단층대등 절리가 발달한 암반의 고결효과 탁월하다.
- 주입효과를 시공 직후 확인할 수 있다.
- 인장 저항력이 있어 내공변위를 억제할 수 있다.
- Arching 효과에 의한 터널 천단부 암반상재 하중 지지의 효과가 우수하다.

(6)단점

- 주입량이 많을 경우 공사비가 비교적 고가이다.

※ Pre-Grouting 실시로 약액 사용량 감소 기대



2. 현장 적용 및 비교 검토

1) 터널 보강도

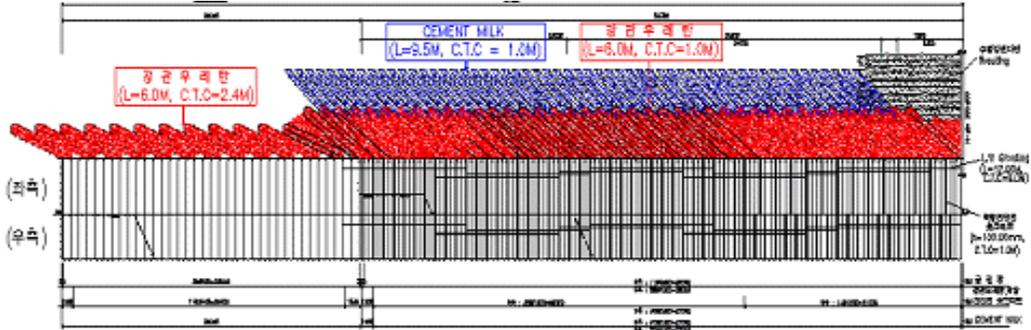


Fig. 3.5 A cross section plan of reinforced tunnel

Table. 3.1 The reinforcement in each section

구 분	I 구간			II 구간	
	I -1	I -2	I -3		
STATION	15K 252.7~ 15K 268.2	15k 230.0~ 15K 252.7	15K 210.0~ 15K 230.0	15K 181.0~ 15K 210.0	
굴진장(m)	0.5	0.5	0.5	0.8	
Shotcrete (mm)	350	350	350	200	
Steel Rib	200×200×8×12	200×200×8×12	200×200×8×12	100×100×6×8	
Rock Bolt	-	Random	Random	Random	
와이어 메쉬	φ5×100×100	φ5×100×100	φ5×100×100	φ5×100×100	
Con'c 라이닝(mm)	700	700	700	700	
굴착공법	Ring-Cut	Ring-Cut	Ring-Cut	상하분할	
보 강 공 법	강관우레탄	270°설치	270°설치	180°설치	
	L.W. Grouting	L = 6.0m	L = 6.0m	L = 6.0m	
	Cement Milk Grouting	L = 9.5m (측벽부)	L = 9.5m (천단부, 측벽부)	L = 9.5m (천단부, 측벽부)	-
	막장전단면 숏크리트	3막장(1.5m) t=10cm	3막장(1.5m) t=10cm	3막장(1.5m) t=10cm	-
	Grout Bolt	L = 5.0	L = 5.0	L = 5.0	-

2) 구간별 적용된 공법 및 단면도

(1) I-1 구간

이 구간은 퇴매움 구간으로서 터널 상단부에 매립된 토사층이 넓게 분포하고 있으며 낙반 및 여굴 방지와 갱문부 사면의 슬라이딩 방지를 위해 강관다단 그라우팅 공법을 적용하였다. 그러나 이 공법을 적용할 경우 대규모 플랜트로 인해 면적을 많이 필요로 하는 단점이 있다.

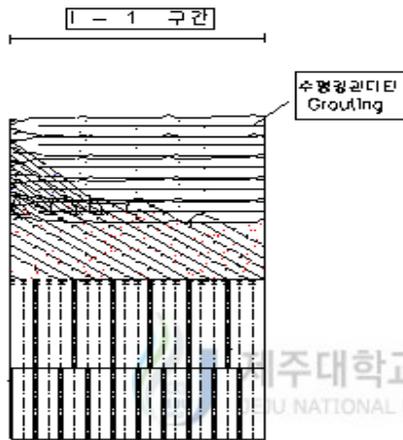


Fig. 3.6 The cross sectional plan of I-1 section

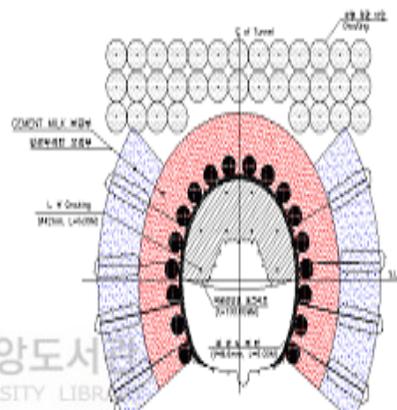


Fig. 3.7 The vertical sectional plan of I-1 section



Fig. 3.8 The condition that grouting is completed with steel pipe multi-step grouting, 1



Fig. 3.9 Large plant area

(2) I-2 , I-3 구간

이 구간은 되메움과 일반 구간이 같이 있는 구간으로서 막장의 안정성을 높이기 위해서 L.W 공법 및 CEMENT MILK 공법을 적용하였고, 터널 주변의 변형을 억제하고 충분한 지수 효과를 발휘하기 위해서 강관우레탄 공법을 적용하였다.

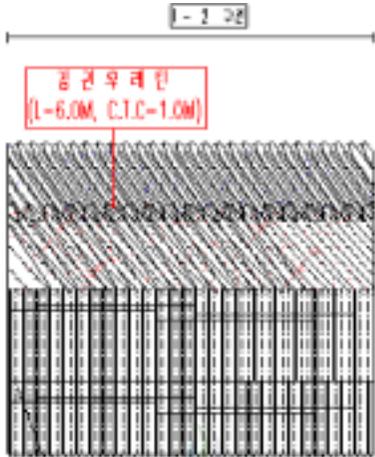


Fig. 3.10 The cross sectional plan of I-2 section

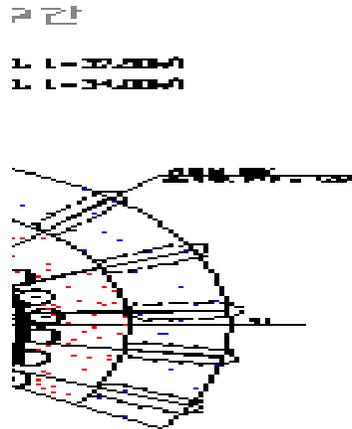


Fig. 3.11 The vertical sectional plan of I-2 section

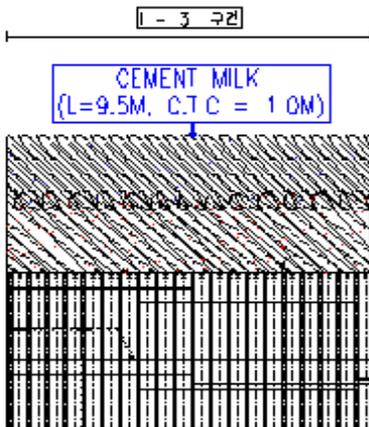


Fig. 3.12 The cross sectional plan of I-3 section

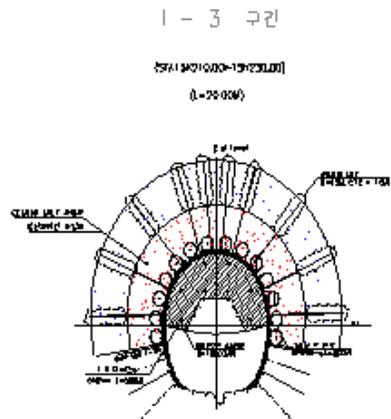


Fig. 3.13 The vertical sectional plan of I-3 section



Fig. 3.14 The condition that grouting is completed with Steel pipe urethane



Fig. 3.15 The condition that grouting is completed with L.W



Fig. 3.16 The condition that grouting is completed with L.W, Cement milk

(3) II 구간

이 구간은 일반구간으로서 터널 주변의 변형을 억제하고 충분한 지수 및 보강 효과를 발휘하기 위해서 강관우레탄 공법을 적용하였다. 이 공법을 적용할 경우 강관 다단 그라우팅 공법에 비해서 장비가 소규모이고 굴착 공정과 병행할 수 있다는 이점이 있다.

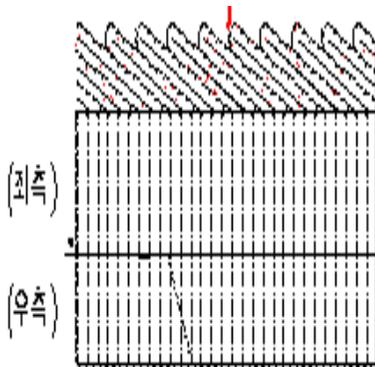


Fig. 3.17 The cross sectional plan of II section



Fig. 3.18 The vertical sectional plan of II section



Fig. 3.19 Application to steel pipe urathane method

3) 적용된 공법의 경제성 및 공정에 관한 비교 분석

각 구간에 적용된 공법 중 대표적인 공법인 강관우레탄 공법과 강관다단 그라우팅 공법의 경제성(단가) 및 공정(cycle time)에 관하여 비교, 분석함으로써 적용된 공법 중 경제성과 공정성을 고려하였을 때 가장 효과적인 공법을 알아보았다.

(1) 적용된 공법의 경제성(단가)에 관한 분석

Table. 3.2 The unit cost comparison between steel pipe urethane method and steel pipe multi-step grouting method

단위:백만원

	강관우레탄	강관 다단그라우팅
단 가	100	70
공 수	1620	1620
시공비	1620	1134

여기서, 시공비는 토사부 L=6m 공당 기준하였으며,

$$\text{공수} = L(89.35)/1.5$$

$$= 60 * (\text{상반}19 + \text{하반}8)$$

$$= 1620 \text{공}$$

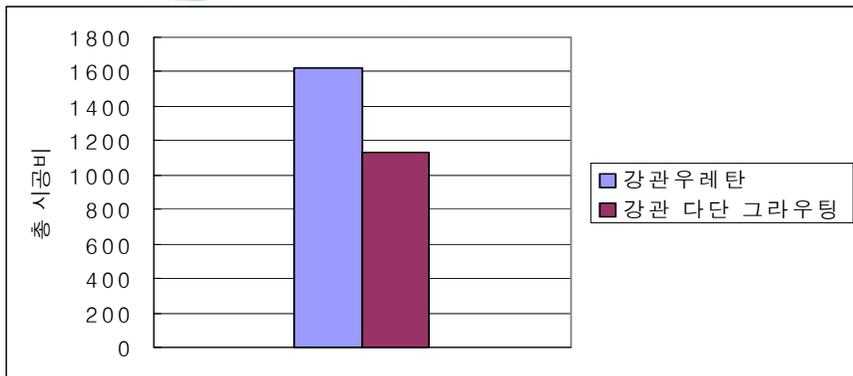


Fig. 3.20 The total construction cost comparison between steel pipe urethane method and steel pipe multi-step grouting method

위의 기준으로 경제성(단가)만을 고려하여 시공비를 산출하였을 경우 486,000,000원의 가격 차이로 강관다단 그라우팅 공법이 강관우레탄 공법 보다 더욱 효과적이라고 할 수 있다.

(2) 적용된 공법의 공정(cycle time)에 관한 분석

적용된 공법의 공정(cycle time)을 분석하기 위해 강관우레탄 공법과 강관다단 공법을 적용할 때 1 cycle time(강관우레탄 공법 : 24시간, 강관다단 공법 : 40시간)에 대한 상세한 내용을 아래 표 3.3과 같이 나타내었다. 그리고 표 3.4에서는 두 공법을 적용했을 때의 총 소요되는 공기를 산출하였다.

Table. 3.3 The cycle time comparison applied to reinforcement with steel pipe multi-step grouting method and steel pipe urethane method

순서	공종명	수량	강관다단 보강적용		강관우레탄 보강적용		비고
			소요시간	작업시간	소요시간	작업시간	
1	보강그라우팅 천공및주입	19공	40		24		6m천공 ,주입포함
2	상단상부굴진	3.6m ³	1.5	07:00~08:30	1.5	07:00~08:30	
3	1차 슛크리트	0.135m ³	0.5	08:30~09:00	0.5	08:30~09:00	
4	상단측면굴진	8m ³	2	09:00~11:00	2	09:00~11:00	굴착, 버력처리1시간
5	1차 슛크리트	0.4m ³	0.5	11:00~11:30	0.5	11:00~11:30	
6	1차 와이어메쉬	3.9m ²	1.5	11:30~13:00	1.5	11:30~13:00	검측시간포함
7	강지보공 설치						
8	2차 슛크리트	0.434m ³	1	13:00~14:00	1	13:00~14:00	
9	3차 슛크리트	0.382m ³					
10	2차 와이어메쉬	3.77m ²					
11	4차 슛크리트 타설	0.46m ³	1	14:00~15:00	1	14:00~15:00	
				0.5M굴진		0.5M굴진	
12	상단상부굴진	3.6m ³	1.5	15:00~16:30	1.5	15:00~16:30	
13	1차 슛크리트	0.135m ³	0.5	16:30~17:00	0.5	16:30~17:00	
14	상단측면굴진	8m ³	2	17:00~19:00	2	17:00~19:00	
15	1차 슛크리트	0.4m ³	0.5	19:00~19:30	0.5	19:00~19:30	
16	1차 와이어메쉬	3.9m ²	1	19:30~20:30	1	19:30~20:30	
17	강지보공 설치						
18	2차 슛크리트	0.434m ³	1.5	20:30~22:00	1.5	20:30~22:00	
19	3차 슛크리트	0.382m ³					
20	2차 와이어메쉬	3.77m ²					
21	4차 슛크리트 타설	0.46m ³	1	22:00~23:00	1	22:00~23:00	
22	상단중앙부굴진	3.178m ³	1	23:00~24:00	1	23:00~24:00	
23	가인버터 슛크리트	0.204m ³	0.5	24:00~25:30	0.5	24:00~25:30	
				1.0M굴진		1.0M굴진	
24	상단상부굴진	3.6m ³	1.5	25:30~27:00	1.5	25:30~27:00	
25	1차 슛크리트	0.135m ³	0.5	27:00~27:30	0.5	27:00~27:30	
26	상단측면굴진	8m ³	2	27:30~29:30	2	27:30~29:30	
27	1차 슛크리트	0.4m ³	0.5	29:30~30:00	0.5	29:30~30:00	
28	막장 전단면 슛크리트	2.955m ³	1	30:00~31:00	1	30:00~31:00	
29	1차 와이어메쉬	3.9m ²	1.5	31:00~32:30	1.5	31:00~32:30	
30	강지보공 설치						

Table. 3.4 Estimation of total works duration

총 소요 공기산출[강관우레탄 적용]	총 소요 공기산출[강관다단 적용]
I.구간 매몰구간 - 58.35M(굴진장0.5M)	I.구간 매몰구간 - 58.35M(굴진장0.5M)
상반굴착	상반굴착
- 102.5시간(3M굴착시 소요시간) × 58.35M(거리) ÷ 3 = 1994시간 ㉑ - 1994시간 ÷ 24시간 = 83일	- 134.5시간(3M굴착시 소요시간) × 58.35M(거리) ÷ 3 = 2616시간 - 2616시간 ÷ 24시간 = 109일
하반굴착	하반굴착
- 76.5시간(3M굴착시 소요시간) × 58.35M(거리) ÷ 3 = 1488시간 ㉒ - 1488시간 ÷ 24시간 = 51일	- 120.5시간(3M굴착시 소요시간) × 58.35M(거리) ÷ 3 = 2344시간 - 2344시간 ÷ 24시간 = 98일
II.구간 일반구간 - 29M(굴진장0.8M)	II.구간 일반구간 - 29M(굴진장0.8M)
상반굴착	상반굴착
- 72시간(2.4M굴착시 소요시간) × 29M(거리) ÷ 2.4 = 870시간 ㉓ - 870시간 ÷ 24시간 = 36일	- 72시간(2.4M굴착시 소요시간) × 29M(거리) ÷ 2.4 = 870시간 - 870시간 ÷ 24시간 = 36일
하반굴착	하반굴착
- 24시간(1.6M굴착시 소요시간) × 29M(거리) ÷ 1.6 = 435시간 ㉔ - 435시간 ÷ 24시간 = 18일	- 24시간(1.6M굴착시 소요시간) × 29M(거리) ÷ 1.6 = 435시간 - 435시간 ÷ 24시간 = 18일
㉕ - 매몰강제및 장비절단및 인양작업일수 = 30일	- 매몰강제및 장비절단및 인양작업일수 = 30일
- 총 굴진 소요일수(㉑+㉒+㉓+㉔+㉕) = 218일 × 할증(10%) = 240일 ÷ 27일 = 8개월24	- 총 굴진 소요일수(㉑+㉒+㉓+㉔+㉕) = 291일 × 할증(10%) = 321일 ÷ 27일 = 11개월24일
총 굴진 소요일수=8개월24일	총 굴진 소요일수=11개월24일

또한 위의 표 3.3과 3.4의 내용을 19공에 대해서 다음과 같이 간단하게 나타내었다.

- 강관우레탄 공법의 cycle time(19공/24시간)

천공→ 강관 삽입→ 코킹→ 주입

- 강관 다단 그라우팅 공법의 cycle time(19공/40시간)

천공→ 강관 삽입→ 코킹→ Sealing→ 양생→ 본주입→ 양생

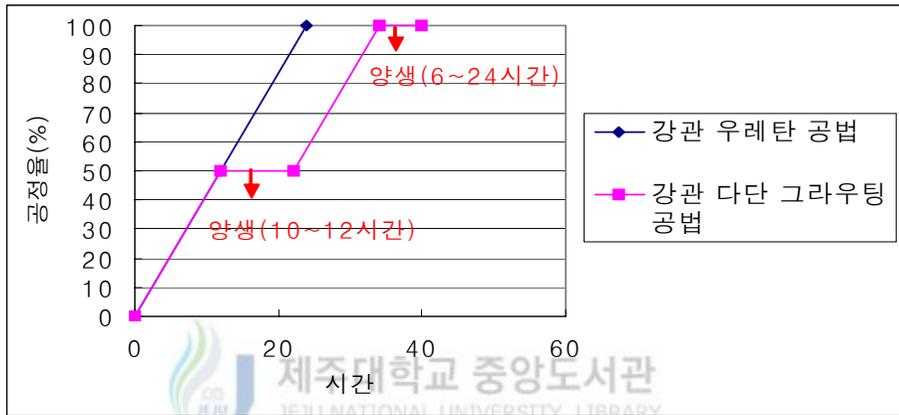


Fig. 3.21 The cycle time comparison between steel pipe urethane method and steel pipe multi-step grouting method

강관우레탄 공법과 강관다단 그라우팅 공법의 cycle time을 비교해 보면, 천공, 강관 삽입, 코킹의 과정까지는 작업 시간이 같지만 강관다단 그라우팅 공법의 경우 sealing의 작업 후 10~12 시간의 양생 시간이 필요하고 본 주입 후에 6~24 시간의 양생 시간이 필요하다. 따라서 1 cycle time을 실시할 경우 강관다단 그라우팅 공법이 강관우레탄 공법보다 최소 16~36시간이 더 걸린다. 이런 공정(cycle time)만을 고려해 볼 경우 강관우레탄 공법이 강관다단 그라우팅 공법 보다 더욱 효과적이라고 할 수 있다.

(3)경제성(단가)과 공정(cycle time)성을 고려한 공법의 비교 분석

강관우레탄 공법과 강관다단 그라우팅 공법의 cycle time을 고려해 볼 때 1620공을 시공할 경우 강관 우레탄 공법이 강관다단 그라우팅 공법 보다 90일이라는 기간을 단축할 수 있다. 아래의 표는 시공 시 투입되는 인부(일 기준)와 장비(월 기준)의 가격이다. 이 표를 고려할 경우 강관우레탄 공법의 시공비가 강관다단 그라우팅 공법의 시공비보다 534,300,000원이 더 적게 드는 것을 알 수 있다. 따라서 경제성(단가)과 공정(cycle time)을 모두 고려할 경우 강관우레탄 공법의 약액이 고가라서 단가는 많이 들지만 cycle time의 90일 단축으로 강관다단 그라우팅 공법 보다 4800만원의 총 공사비의 절감 효과를 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

Table 3.5 The input cost while tunnel construct

인부 (일기준)	공구장	1	120,000
	반장	2	200,000
	노즐	2	220,000
	아리바 터널공	2 8	180,000 800,000
	용접공	2	180,000
	배합공	1	80,000
	주입공외	12	1,190,000
	관리자	2	200,000
장비 (월기준)	천공드릴기	1	191,900,000
	페이로더	1	14,000,000
	B/H06	1	17,000,000
	아리바	1	4,500,000
	COMP	1	4,500,000
	2.5D/T	1	5,000,000
	C/R	1	9,000,000
	장비유류대등	1	20,000,000
합 계			534,300,000

IV. 수치 해석에 대한 역해석 체계

1. 수치 해석

1) 개요

터널의 수치 해석을 통한 안정성의 평가는 설계를 위해서도 실시해야 하며 안전하고 합리적인 시공관리를 위해서도 반드시 수행해야 한다. 따라서 상기 목표를 달성하기 위해서는 해석에 필요한 제반 정수를 구하는 조사와 시험에 많은 노력을 할애하여야 하며, 시공 중에는 계측을 철저히 수행하여 설계치에 대한 재검토가 이루어져야 함은 물론 조사와 시험, 계측과 해석결과가 유기적으로 결합될 수 있도록 역해석 체계(Feed Back System)가 형성되어야 한다.

2) 해석 목적

유한요소 해석은 그 적용범위가 넓어 비선형 문제에 있어서도 여러 인자의 영향을 합리적으로 반영할 수 있는 장점을 갖고 있다. 따라서 본 해석에 있어서는 2차원과 비선형 탄소성 유한요소해석(Nonlinear Elastic Plastic Finite Element Analysis)을 실시하였으며 그 결과를 비교 검토하여 터널 시공에 따른 지보공과 암반체의 구조 거동을 밝힘과 동시에, 시공단계별 변위를 예측하여 설계 시공 시 계측에 따른 추후 설계의 기본 자료를 마련하는 것을 주목적으로 한다.

3) 해석 방법

터널의 수치해석 기법은 지반의 상태에 따라 해석 모델링을 구분해서 그에 맞는 수치해석을 적용한 컴퓨터 프로그램을 사용하는 것이 합리적일 것이다. 터널굴착에 따른 지반거동의 해석을 위해 널리 이용하고 있는 수치해석법은 지반상태에 따라 지반을 연속체 모델링 등으로 구분하여 다음과 같은 수치해석법을 적용한다.

- 연속체 모델 : 경계요소법 (Boundary Element Method), 유한요소법 (Finite Element Method), 유한차분법(Finite Difference Method)
- 유한차분법(Finite Difference Method)

• 혼합 모델 : 혼합법(Hybrid Model Method)

연속체 모델에서는 지반을 연속체로 취급하여 해석의 편의상 도입된 수학적 이론이라고 할 수 있으며, 거시적인 면으로는 지반을 연속체로 가정할 수 있으나 엄밀한 의미로는 토립자의 이동, 암반의 불연속면 등이 내제되어 있어 지반의 실질적인 거동 현상을 표현하고자 할 때 연속체 역학 개념만으로 충분하지 못한 경우가 있다. 반면에 불연속체 모델에서는 지반을 불연속체로 보고, 지반거동의 지배요인이 되는 암반 불연속면의 거동, 즉 절리면의 파쇄 및 활동이나 절리면에서의 분리와 강제이동, 강제회전 등을 고려하여 해석할 수 있다. 그러나 변화요소가 많아 고려하는 항목이 많음으로써 야기되는 불확실성을 내포하고 있는 단점이 있다.

이상의 해석법 중에서 지반특성 및 설계목적에 맞는 해석법을 선택하는 것은 대단히 중요한 일이며, 해석대상 지반이 풍화토, 풍화암 및 연암으로 주종을 이루고 표토가 얇은 경우는 수치 해석 시 유한 경계 조건으로 지반특성을 탄성 또는 탄소성으로 가정하여 유한요소법이나 유한차분법으로 해석하는 것이 보편적이며, 암질이 견고한 보통암이나 경암이 주종을 이루고 표토가 비교적 두꺼울 경우 수치 해석 시 경계조건을 무한 및 반무한 경계조건으로 해석하는 것이 합리적이다.

4)해석 프로그램

(1)프로그램의 개요

최근에 Computer를 이용한 수치해석법(Numerical Method)이 터널 해석수법으로 널리 사용되고 있는데, 터널 설계에 있어서 수치해석 프로그램의 이점을 들면 다음과 같다.

- 굴착 및 지보를 포함한 각 시공단계별 상태를 모형화 할 수 있다.
- 임의의 터널 단면형상의 해석이 가능하다.
- 굴착단계에 따른 해석을 할 수 있다.
- 해석의 결과로부터 지보공의 적합여부를 판단할 수 있다.

그러나 터널 설계에 수치해석을 적용하는데 다음과 같은 문제점이 있다.

- 3차원 거동을 2차원 Model로 해석하는데 따른 문제점이 있다.
- 계산결과가 입력 자료인 원지반의 물성치(예 ; 탄성 계수 등)에 크게 좌우된다.
- 계산시간이 많이 소요된다.

따라서 실제로 시공된 터널의 시공경험을 바탕으로 하지 않은 해석결과만으로 터널 설계를 행하는 것은 시공성과 무관하게 되므로 각별히 주의해야 한다. 또한 NATM 터널에서는 시공 시 계측이 커다란 비중을 차지하므로 항상 설계 예측치와 계측결과를 비교 검토하여 필요한 경우 FEED BACK을 해야만 가장 안전하고 경제적인 공사를 수행할 수 있다.

(2) 프로그램 해석 과정(프로그램명 : Fast Lagrangian Analysis of Continua : FLAC)

“FLAC”은 요소의 각 절점에 구성된 방정식을 아주 적게 세분된 Time Step(이웃 절점에 영향을 주지 않을 정도의 Time Step으로 Program에서 자동선택)에서 이전 Time Step에서 구한 값을 초기값으로 하여 방정식의 해를 구하는 방법이며 평형상태(Equilibrium Condition)에 대한 Criteria에 도달할 때까지 반복계산(Iteration)을 수행하여 최종 해를 구하는 것이다.

(3) 해석 모델

FLAC에서 사용할 수 있는 9개의 기본적인 구성법칙(CONSTITUTIVE LAW)은 다음과 같다.

• NULL MODEL(굴착상태를 나타내는데 사용)

• ELASTIC MODEL GROUP

- ① elastic isotropic model
- ② elastic transversly isotropic model

• PLASTIC MODEL GROUP

- ① drucker-plager model
- ② mohr-coulomb model
- ③ ubiquitous joint model
- ④ strain softening/hardening model
- ⑤ double yield model
- ⑥ modified cam-clay model

본 해석에서 사용된 MOHR-COULOMB 기준은 토질역학에서 가장 널리 쓰이고 있는 MOHR-COULOMB 파괴조건과 파괴후의 거동을 나타내는 NON-ASSOCIATED FLOW RULE로 구성되어 있는데, YIELD FUNCTION은 다음과 같이 주어진다.

$$f = \sigma_1 - N\phi\sigma_2 + 2C(N\phi)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

PLASTIC POTENTIAL FUNCTION은 다음식과 같다.

$$g = \sigma_1 - N\psi\sigma_2 + 2C(N\psi)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $N\zeta = (1 + \sin \zeta)/(1 - \sin \zeta)$, ($\zeta = \phi$ or ψ)

C : 점착력

ϕ : 마찰력

Ψ : Dilation Angle

σ_1, σ_2 : 최대, 최소 주응력

변형의 증분은 탄성, 소성의 2성분으로 표시할 수 있다.

$$\Delta e_1 = \Delta e_1^e + \Delta e_1^p \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta e_2 = \Delta e_2^e + \Delta e_2^p$$

소성변형율은 Non-Associatd Flow에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$e_1^p = \frac{\lambda \cdot \partial g}{\partial \sigma} = \lambda \dots\dots\dots (4)$$

$$e_2^p = \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma} = \lambda \cdot N\psi$$

여기서, λ = 응력상태에 따라 정해지는 계수

(4)식에 Δt 를 곱하면,

$$e_1^p = \lambda \Delta t \dots\dots\dots (5)$$

$$e_2^p = -\lambda \cdot N\psi \cdot \Delta t$$

최대 최소 탄성주응력의 증분량은 다음과 같이 구해지며

$$\Delta \sigma_1 = (K + \frac{4}{3}G) \Delta e_1^e + (K - \frac{2}{3}G) \Delta e_2^e \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta \sigma_2 = (K + \frac{2}{3}G) \Delta e_1^e + (K + \frac{4}{3}G) \Delta e_2^e$$

(3), (4), (5)식을 (6)에 대입하면

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_1 &= (K + \frac{4}{3} G)(\Delta e_1 - \lambda \cdot \Delta t) + (K - \frac{2}{3} G)(\Delta e_2 + \lambda \cdot N\phi \cdot \Delta t) \dots (7) \\ \Delta \sigma_2 &= (K - \frac{2}{3} G)(\Delta e_1 - \lambda \cdot \Delta t) + (K + \frac{4}{3} G)(\Delta e_2 + \lambda \cdot N\phi \cdot \Delta t) \end{aligned}$$

그리고, 초기의 최대. 최소 탄성주응력과 수정된 소성화된 응력의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_1^I - \sigma_1 &= \Delta \sigma_1^I - \Delta \sigma_1 \dots \dots \dots (8) \\ \sigma_2^I - \sigma_1 &= \Delta \sigma_2^I - \Delta \sigma_2 \end{aligned}$$

초기 주응력의 증분량은,

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_1^I &= (K + \frac{4}{3} G)\Delta e_1 + (K - \frac{2}{3} G)\Delta e_2 \dots \dots \dots (9) \\ \Delta \sigma_2^I &= (K - \frac{2}{3} G)\Delta e_1 + (K + \frac{4}{3} G)\Delta e_2 \end{aligned}$$



(7), (9)식을 (8)식에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_1^I - \lambda \cdot \Delta t(a_1 - a_2 \cdot N\phi) \dots \dots \dots (10) \\ \sigma_2 &= \sigma_2^I - \lambda \cdot \Delta t(a_2 - a_1 \cdot N\phi) \end{aligned}$$

식(10)을 식(1)에 대입하여 f=0으로 풀면

$$\lambda \cdot \Delta t = \frac{f(\sigma_1^I, \sigma_2^I, C, N\phi)}{r} \dots \dots \dots (11)$$

여기서, $r = a_2(1 + N\phi \cdot N\psi) - a_1(N\phi \cdot N\psi)$

식(11)을 식(10)에 대입하여 수정된 주응력을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_1^I - (a_1 - a_2 N\phi) \cdot \frac{f(\sigma_1^I, \sigma_2^I, C, N\phi)}{r} \dots \dots \dots (12) \\ \sigma_2 &= \sigma_2^I - (a_2 - a_1 N\phi) \cdot \frac{f(\sigma_1^I, \sigma_2^I, C, N\phi)}{r} \end{aligned}$$

Program은 σ_{xx} , σ_{xy} 의 탄성응력을 구하여 이 값들을 주응력(Principal Stress)으로 바꾼 후 이 주응력을 식(1)에 대입하여 $f > 0$ 이면 주응력을 수정하지 않고 $f < 0$ 이면 소성화된 응력에 대한 주응력 수정이 식(12)에 의해서 수행된다.

(4)사용요소(Element)

(가)암반요소

암반요소로서는 등방성 사변형 요소가 사용되었으며 한 요소는 아래 그림과 같이 4개의 절점과 4개의 변으로 구성되어 있으며, 도함수의 사용으로 일어날 수 있는 Hourglassing 변형 Mode는 계산 시 2개의 삼각형 Zone을 사용함으로써 제거한다. 암반요소의 물성치는 Bulk Modulus, Shear Modulus, 단위중량, 점착력, 내부마찰각 등이 입력된다.

(나)슛크리트요소(SHOTCRETE ELEMENT)

본 프로그램에서 슛크리트는 보(Beam)요소로 입력되며, 단면적 및 강성이 입력되며 또 슛크리트가 시공단계에서 시간적 차이를 두고 작용함으로써 슛크리트의 시간적 변화에 따른 강성을 보정할 수 있고, 절점은 X, Y 방향의 변위와 회전을 허용할 수 있다.

(5)수치해석 위치 선정

해석을 실시하는 지점은 지질조사 결과 및 설계안을 기준으로 지반의 특성, 지보형식을 기준으로 3배 지점을 선정하였다.

(가)해석 단면 결정

Table 4.1 The analysis section

해 석 위 치	터널형식	터널천단부지층	비 고
STA. 15K 197.800	단선병렬	연암층 터널 천단우레탄 보강	· 지반조건 양호
STA. 15K 228.700	단선병렬	매몰구간 JSP 보강 터널 천단우레탄 보강	· 지반조건 불량 (JSP 보강) · 연암이 터널 S.L Line에 위치
STA. 15K 250.300	단선병렬	매몰구간 JSP 보강 터널 천단 및 측벽 우레탄 보강	· 지반조건 불량 (JSP 보강) · 연암이 터널 Invert Line에 위치

(나)단면 해석 I 구간(STA. 15K 250.300)

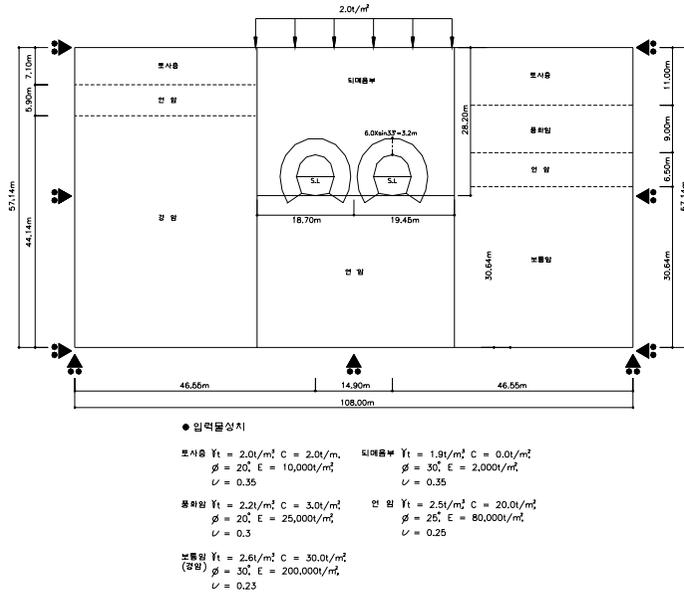


Fig. 4.1 The ground condition of I section

(다)단면 해석 II 구간(STA. 15K 228.700)

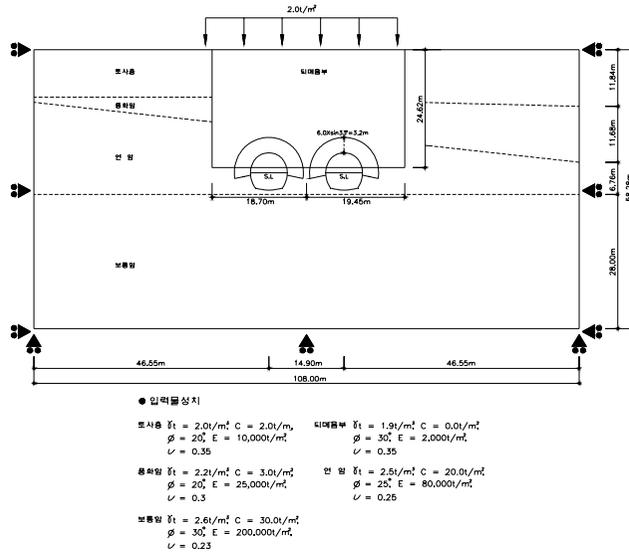


Fig. 4.2 The ground condition of II section

(라)단면 해석 III구간(STA. 15K 197.800)

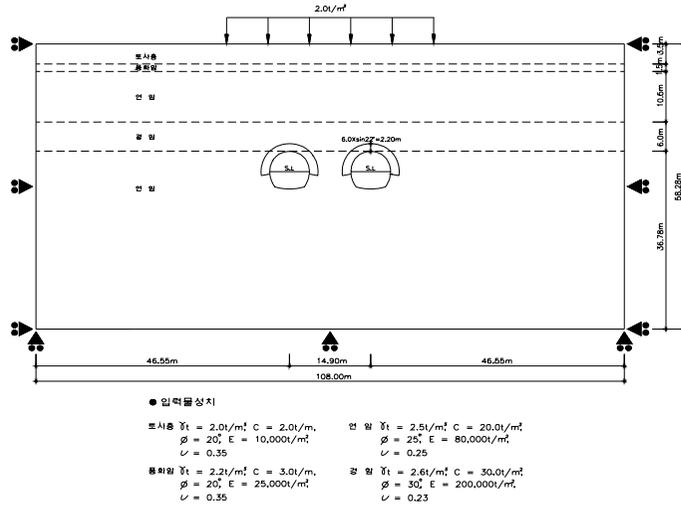


Fig. 4.3 The ground condition of III section

(6) 해석 적용 물성치

지반의 공학적 특성은 암반 자체의 강도, 풍화의 정도, 절리 빈도 및 상태 등의 여러 인자에 따라 같은 부류에 속하는 지반이라도 광범위하게 나타날 뿐만 아니라, 동일한 입력치를 사용하는 경우라도 프로그램에서 채택하고 있는 구성법칙이나 계산방법 등에 따라 결과가 달라지기 때문에 실제의 지반 거동을 최적으로 Simulation하기 위해서는 프로그램의 특성에 대한 충분한 이해와 그에 적절한 입력 물성치 결정이 중요하다. 따라서 본 연구의 경우 입력지반 물성치는 변경 설계시 실시한 각종 원위치 시험 및 실내 시험 값을 최대한 충실히 반영하되, 유사 지반에 대한 기존 자료 및 국내에 기 시공된 지하철 터널 해석에 사용된 입력 자료 등을 비교·검토해 최종적으로 선정하였다.

지보재인 슛크리트는 시간적 특성 변화를 감안하여 계산과정에서 연한 슛크리트와 강한 슛크리트 두 단계의 특성치를 적용하였다. 즉, 이중의 슛크리트로서 문제를 고려하였으며 슛크리트 요소는 최종적으로 강한 슛크리트의 특성을 갖게 된다.

상기의 기준에 의거 해석 프로그램이 요구하는 지반 및 지보재의 물성치는 다음과

같다.

Table 4.2 A property of matter data of ground applied to analysis

구 분	단위중량 (t/m ³)	탄성계수 (t/m ²)	포아송비	내부 마찰각	점착력 (t/m ²)	초기 측압계수
토사층	2.0	10,000	0.35	20	2.0	0.53
풍화암층	2.2	25,000	0.30	20	3.0	0.43
연암층	2.5	80,000	0.25	25	20	0.33
보통암(경암)	2.6	200,000	0.23	30	30	0.30
되메움부 (JSP보강)불량	1.9	2,000	0.35	30	0.0	0.53
우레탄보강	2.0	50,000	0.30	30	10	0.43

Table 4.3 A property of matter data of tunnel support applied to analysis

구 분	강 도 (kg/cm ²)	재 질	탄 성 계 수 (t/m ²)	단 위 중 량 (t/m ³)
Soft Shotcrete	σ _{ck} =210	CON'C	500,000	2.3
Hard Shorcrete	σ _{ck} =210	CON'C	1,500,000	2.3

2. 계측

1) 계측을 이용한 시공 개념 및 목적

(1) 계측을 이용한 시공 개념

구조물 설계 자료와 거동 예측자료를 현장 계측자료와 비교 검토함으로써 시공 중 안정상태를 판단하여 위험 가능성이 있을 경우에는 신속하고 적절한 보강대책을 강구할 수 있도록 정량적 수치자료를 제공하는 공사 안전관리를 위한 일련의 공정을 의미한다.

또한 설계 시에 예측하지 못했던 현장조건이 도래할 경우 시공도중에 이를 설계에 다시 반영하여 시공을 진행시킬 수 있도록 하고 아울러 과다 설계 시에는 충분한 안전을 유지할 수 있는 범위 내에서 설계조건을 변경 수정하여 반영함으로써 공사의 경제성을 높이는 목적으로도 활용할 수 있다.

(2) 계측의 목적

일반적으로 지반공학 구조물은 많은 가정사항을 포함하고 있는 경험적 및 반 경험적 방법 등을 통해 주로 설계가 이루어지고 있다.

또한 구조물의 재료적, 구조적 특성이나 현장지반의 공학적 특성에 따라 시공 시 많은 문제가 야기될 수 있을 뿐만 아니라 때에 따라서는 구조물이 파괴되는 상황도 종종 발생하게 된다.

특히 구조물 기초지반 및 터널의 경우, 비선형적 거동특성과 응력수준, 시간, 공간 및 환경 등에 따른 가변성, 지반 물성치의 결정 및 거동 특성의 Modelling에 따른 어려움, 조사 및 실험 방법상의 기술적인 한계성 등으로 인해 설계 시 현장조건을 정확히 반영한다는 것은 매우 어려운 일이며 시공 시 사고의 위험성도 따르게 된다.

또한 설계의 문제뿐만 아니라 시공단계에 있어서도 경험 혹은 기술수준의 미달로 부실시공이 되어 사고가 발생할 위험성도 배재할 수 없다.

이상과 같은 요인들로 인해 발생할 수 있는 사고를 미연에 방지하고 구조물의 장기 안정성을 보장하기 위해서는 특별한 조치가 필요한데 이러한 조치의 일환으로서 현장 계측이 필요한 것이며 현장계측의 목적은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 설계 및 시공법의 적합성에 대한 평가와 설계변경 가능성의 모색 :
설계 시 채택한 각종 계수들을 평가하고 구조물의 특성, 지반상태 등에 적합하도록 설계와 시공법을 현장 시공조건에 맞추어 변경하기 위함이다.
- 기존 이론, 설계법 등의 정확도와 적용범위에 대한 평가 및 새로운 이론 또는 보다 나은 설계법의 개발
설계에 사용된 이론과 설계법을 계측결과와 비교 평가함으로써 적절한 이론 및 설계법을 찾아내기 위함이다.
- 시공관리 및 조기경보 계통으로 사용



2) 계측의 설치와 관리 및 평가 방안

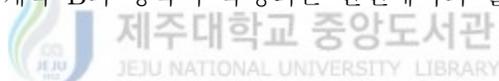
(1) 표준 계측 간격 및 빈도

1) 갱내관찰조사

막장관찰은 원칙적으로 각각의 막장에 대하여 실시하는 것으로 하고 관찰기록 양식에 1 진행 때마다 막장 상태를 기록하는 것으로 한다. 단 지질의 변화가 거의 없는 경우는 1일에 대표적인 1~2막장에 대해서만 기록한다.

2) 내공변위측정, 천단침하측정

내공변위측정 및 천단침하측정은 동일 단면에 대하여 실시하는 것을 원칙으로 한다. 내공변위측정, 천단침하측정의 계측간격은 아래 표 4.4를 기준으로 하지만 터널의 연장, 지질변화, 굴착진행, 시공실적(계측 데이터) 축적 등에 의해 적절히 변경하여야 한다. 시공 초기단계에서는 계측간격을 좁게 하여 지질, 토피 혹은 시공패턴과 변위량과의 관계를 세밀히 조사하도록 하고 지반거동의 특성이 파악되면 계측간격을 넓혀 갱내 관찰조사에 의해 얻어진 정보나 토피 등에 중점을 두어 행하도록 한다. 또한 내공변위측정 및 천단침하측정은 계측 B의 항목이 측정되는 단면에서의 결과를 평가할 수 있도록 반드시 실시한다.



3) 지표침하 측정(터널 중심선상)

토피가 얇은 터널은 통상 토사터널 혹은 연암터널이 되는 경우가 많고 큰 지표침하가 발생하는 경우가 많다. 이같은 이유로 지표침하측정은 터널 및 주변지반의 안정성을 확보하기 위해 실시되어야 한다. 침하량은 일반적으로 지질, 지하수위, 토피, 주변구조물의 유무 등이나 시공법에 의해 크게 다르게 된다. 그리고 지표 침하측정의 측정점은 내공변위측정, 천단침하측정 위치와 동일한 지점으로 하는 것이 바람직하다.

4) 샷크리트 응력, 지중변위, 락볼트 축력 등의 측정

1단면마다 3~5점을 표준으로 하지만, 그 배치는 여러 가지 터널의 실시설계 패턴에 의해 적정한 위치를 고려하여야 한다. 단 락볼트의 타설 위치와 내공변위 측정용 핀을 가능한 한 가깝게 하는 것이 계측결과 해석에 유리하다.

Table 4.4 The standard measurement interval and frequency

구 분	계측항목	계측간격	배 치	설치시기	측 정 빈 도		
					0~15일 (0~7)	15~30일 (8~14)	30일~ (15일~)
계측 A S.M.S	막장관찰	전연장	전막장	-	1~2회/일	1회/일	2회/주
	내공변위 (3차원 계측)	10~30m	수 평 2 대각선 4	막장후반 1m	1~2회/일	1회/2일	2회/주
	천단침하 (3차원 계측)	10~30m	1개소	막장후반 1m	1~2회/일	1회/2일	2회/주
	지표침하	300~600m	터널상부 3~5개소	터널전방 1~3m	1~2회/일	1회/2일	2회/주
계측 B M.M.S	숏크리트 응 력	200~500m	수평,수직 방향 3~5개씩	막장후방 1~3m	1~2회/일	1회/2일	2회/주
	지중변위	200~500m	3~5개의 다른심도	막장후방 1~3m	1~2회/일	1회/2일	2회/주
	라볼트축력	200~500m	3~5개의 다른심도	막장후방 1~3m	1~2회/일	1회/2일	2회/주
	지중수평 변위측정			터널전방 15~30m	1회/일	2회/주	2회/주
※ 빈도란중 ()은 수렴이 빨리 수렴해 버리는 경우의 빈도임. 변위속도, 막정거리, 빈도 10mm이상/일, 0-D, 1~2회/1일 10~5mm/일, 1D~2D, 1회/1일 5~1mm/일, 2D~5D, 1회/2일 1mm이하/일, 5D이상, 1회/주							

(2)관리 및 평가 방안

각 계측에 있어서 관리 및 평가는 계측항목 각각의 평가 및 관리도 중요하지만 각 계측항목을 상호 연관 시켜서 판단하는 것이 필요하다. 각 계측은 계측 자체의 중요한 부분을 포함하고 있지만 각각의 계측에 있어서 그 관리 기준치를 정하는 데에는 주위에 관련된 여러 가지 요인(지질의 종류, 설계 Pattern, 시공법, 주위의 구조물이나 토피 차이 등)에 따라 다르기 때문에 확실한 기준을 정하기는 곤란하다. 그러나 똑같은 설계 Pattern이나 비슷한 지질에서 시공되는 경우는 초기의 Data를 활용하거나 다른 공구에서의 자료를 이용할 수 있고 수치 해석결과를 이용하여 평가 가능하다.

1)내공 변위량 관리 기준

Table 4.5 The control criterion of convergence

관리종류	지표(관리기준)	관 정 등 급		
		위 험	주 의	안 전
관리기준	변 위 량	30mm 이상	20~30mm	20mm 이하

※ 일본비도건설 관리기준

2)내공 변위 속도 관리 기준

Table 4.6 The control criterion of convergence rate

주의 단계	관 리 기 준	처 리 사 항
1	<ul style="list-style-type: none"> • 내공변위의 속도가 막장에서 5mm/일 보다 크게 된다. • 숏크리트에 부분적인 크랙이 발생한다. • 지하수가 침투한다. 	책임기술자에게 보고
2	<ul style="list-style-type: none"> • 내공변위의 속도가 막장에서 10mm/일, 후방에서 5mm/일 보다 크게 된다. • 숏크리트에 상당한 크랙이 발생한다. • 지하수가 침투한다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 책임기술자에게 보고 • 지보공, 록볼트, 숏크리트를 추가 시공한다.
3	<ul style="list-style-type: none"> • 변위가 가속된다. • 크랙이나 지하수의 침투가 2단계를 넘는다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 책임기술자에게 보고하고, 굴착을 중지. • 잠정적으로 강지보공과 길이가 긴 록볼트를 시공한다. • 원인분석을 한다.

<ASCE 관리기준>

- 변위 예측 방법

- 시공 시 다음과 같은 방법으로 변위를 예측, 관리기준의 주위 및 위험단계가 예측될시는 감리자와 협의하여 즉각적인 대책방안을 강구해야 함.

- 변위속도에 의한 예측방법(내공 변위 예측)

- 요시가와(吉川) 제안

- 굴착후 8일 계측치로 최종변위 예측

$$Y=5.5+1.9X_1+3.32X_4+2.29X_5+4.81X_8(\Psi=0.827)$$

- 굴착후 3일 계측치로 최종변위 예측

$$Y=5.77+2.36X_1+1.63X_2+4.65X_3(\Psi=0.728)$$

여기서 Y : 최종침하변위, X_i : 속도변위량

3)천단 침하 관리 기준

Table 4.7 The control criterion of crown settlement

관리종류	지표(관리기준)	판정등급		
		위험	주의	안전
관리기준	침하량	30mm 이상	20~30mm	20mm 이하

※ 프랑스 공업성 관리기준(토사 기준)

- 변위 예측 방법

- 시공 시 다음과 같은 방법으로 변위를 예측, 관리기준의 주위 및 위험단계가 예측될시는 감리자와 협의하여 즉각적인 대책방안을 강구해야 함.

- 2배시 변위법에 의한 예측방법(천단침하 및 내공변위 예측)

$$A = \frac{U_i^2}{2U_i - U_k}$$

여기서 A : 수렴변위

L_i : 막장에서의 임의의 거리

U_i : 임의의 거리에서 실측치 변위

L_k : 2L_i의 위치

U_k : L_k 지점의 측정변위

3. 계측 결과

각각 I, II, III 구간의 천단부 최대 침하량과 측벽 최종변위도의 최대값을 계측한 결과 위의 표 4.5 내공 변위량 관리기준과 표 4.7 천단 침하 관리기준의 값들과 비교해 볼때 I 구간의 경우 천단부 최대 침하량이 26.1mm, 측벽 최종변위도 Y의 값이 20.9mm로 “주의”의 결과가 나왔으며, II구간과 III구간의 경우에는 모두 “안전”의 결과가 나왔다.

표 4.8 Measurement data

단위;mm

STA.OK		I 구간(250.3) 좌측	I 구간(250.3) 우측	II 구간(228.7)	III 구간(197.80)
천단부 최대침하량		26.1	22.1	13.2	5.1
측벽 최종변위도	X	14.3	12.3	7.5	4.9
	Y	20.9	18.9	8.3	2.8
판정 등급		주의	안전	안전	안전

4. 해석 결과 분석

1) 단면 해석 I 구간

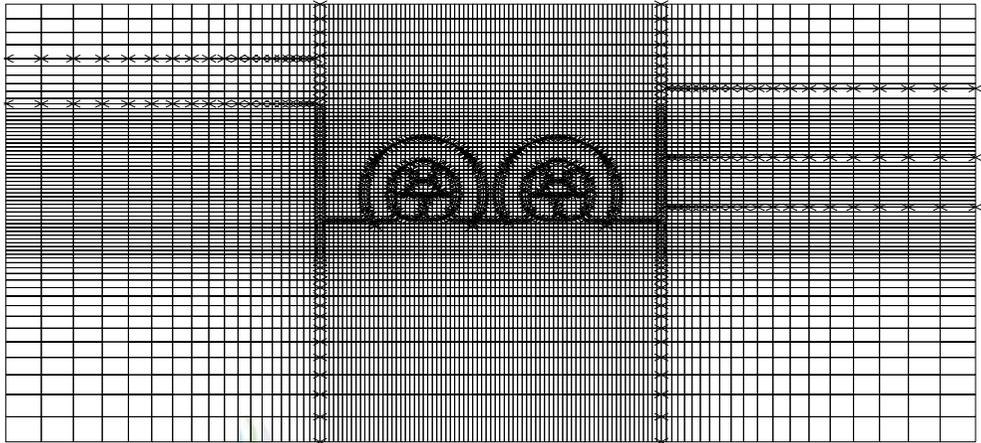


Fig. 4.4 The analysis of section plan and Mesh in I section

Table 4.9 Displacement of I section

단위;mm

STA.OK.250.3		수치 해석값(FLAC)		계측 좌터널	계측 우터널
		보강공법 미적용	보강공법 적용	DATA (최대값)	DATA (최대값)
천단부 최대침하량		52.5	23.5	26.1	22.1
측벽 최종변위도	X	31.4	13.9	14.3	12.3
	Y	41.1	20.4	20.9	18.9

I 구간의 강관다단그라우팅공법의 설계심도는 20m이나 매몰부 강재로 인한 천공및 주입이 좌터널 11m, 우터널 17m로써 수치 해석 값의 경우 천단부의 최대 침하량은 약 23.5mm가 발생하였으며, 측벽 최종 변위도가 X, Y 각각 13.9mm, 20.4mm이고, 이에대한 현장 계측 결과 좌(우)터널 천단부의 최대 침하량이 26.1(22.1)mm, 측벽 최종 변위도가 X, Y 각각 14.3(12.3)mm, 20.9(18.9)mm로 계측 기준에 비교해 볼 때 “주의(안전)”로 나타났으며 이에대한 현장 대책 방안으로 아래 사진과 같이

지보 하단을 폐합하였으며 그 결과 시간이 경과 후 계측치가 기준치 이하로 수렴되었다.



Fig. 4.5 The view after steel supports reinforce in I section

2) 단면 해석 II 구간

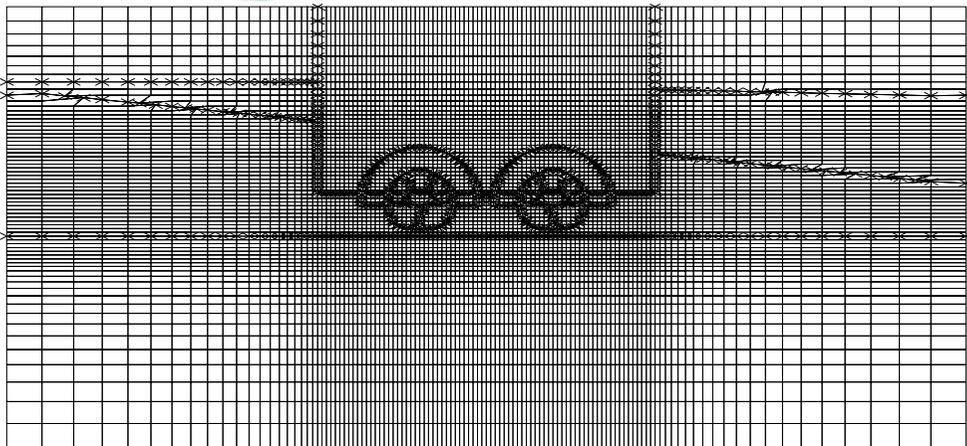


Fig. 4.6 The analysis of section plan and Mesh in II section

Table. 4.10 Displacement of II section

단위:mm

STA.OK.228.7		수치 해석값(FLAC)		계측 DATA(최대값)
천단부 최대침하량		보강공법 미적용	보강공법 적용	
		30.2	13.4	13.2
측벽 최종변위도	X	15.8	7.7	7.5
	Y	18.4	8.5	8.3

II구간의 수치 해석 값의 경우 천단부의 최대 침하량은 약 13.4mm가 발생하였으며, 측벽 최종 변위도가 X, Y 각각 7.7mm, 8.5mm이고, 이에 대비하여 현장 계측치 결과 천단부의 최대 침하량이 13.2mm, 측벽 최종 변위도가 X, Y 각각 7.5mm, 8.3mm로 계측 기준에 비교해 볼 때 “안전”으로 나타났으며 이에대한 현장 대책 방안으로 그라우트 볼트를 당초설계에서 감하였다.

3)단면해석 III구간

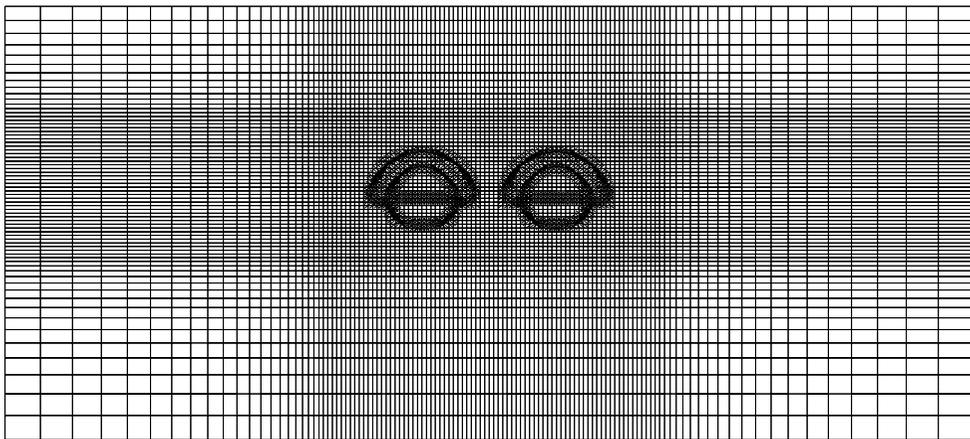


Fig. 4.7 The analysis of section plan and Mesh in IIIsection

Table. 4.11 Displacement of IIIsection

단위:mm

STA.OK.197.8		수치 해석값(FLAC)		계측 DATA(최대값)
천단부 최대침하량		보강공법 미적용	보강공법 적용	
		5.8	5.7	5.0
측벽 최종변위도	X	5.5	5.4	4.9
	Y	3.2	3.0	2.8

III구간의 수치 해석 값의 경우 천단부의 최대 침하량은 약 5.7mm가 발생하였으며, 측벽 최종 변위도가 X, Y 각각 5.4mm, 3.0mm이고, 이에 대비하여 현장 계측치 결과 천단부의 최대 침하량이 5.0mm, 측벽 최종 변위도가 X, Y 각각 4.9mm, 2.8mm로 계측 기준에 비교해 볼 때 “안전”으로 나타났으며 이에 대한 현장 대책 방안으로 그라우트 볼트를 당초설계에서 감하였다.

V. 결 론

산업 사회의 발달로 지하 공간(연약 지반)의 이용이 확대됨으로써 이에 따른 보조 보강 공법의 기술 개발이 불가피한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 각각의 보조 공법들을 경제성 및 공정성 등으로 비교 분석함으로써 보다 효과적인 보조 보강 공법을 연구하였으며 수치 해석의 검토에 의해 보조 보강 공법의 보강 효과를 고찰하였다.

1. 보강 보조 공법 중에서 강관우레탄 그라우팅 공법의 경우 지반 보강 강도 및 차수, 지수 효과가 양호하였고, 강관다단 그라우팅 공법의 경우 지반 강도가 우수하여 갯문 사면부에 HEAM ARCH 형성으로 인한 슬라이딩 방지 효과가 확인되었으나 대규모 플랜트 시설로 공간이 필요하고 지하수 용탈 현상이 노출되는 문제점이 발생하였다.



2. 토사 터널 구간에서 강관우레탄 그라우팅 공법과 강관다단 그라우팅 공법을 cycle time과 경제성의 비교 분석 결과 강관우레탄 그라우팅 공법이 강관다단 그라우팅 공법에 비해 자재(약액)가 고가로 시공비는 많으나 굴착 공정 병행이 가능하고 sealing 및 본 주입에 대한 양생 기간이 필요가 없어서 공정 단축으로 인한 총 시공비의 큰 절감 효과를 얻을 수 있다.

3. 단면해석 I-1구간의 수치 해석 값의 경우 천단부 최대 침하량이 23.5mm, 측벽 최종 변위도가 X, Y 각각 13.9mm, 20.4mm이고, 이에 대한 현장 계측 결과 좌(우)터널 천단부 최대 침하량이 26.1(22.1)mm, 측벽 최종 변위도가 X, Y 각각 14.3(12.3)mm, 20.9(18.9)mm로 계측 기준에 비교해 볼 때 “주의(안전)”로 나타난 결과가 좌측터널부 매몰부 강재를 인한 강관다단공법의 천공및 주입이 설계심도에 불과한바, 우측터널부에 반해 계측값이 초과되는 것으로 확인되어 강관다단그라우팅공법의 효과를 확인하였다.

4. 수치 해석(FLAC)에서 해석 적용 지반 물성치 중 강관우레탄의 탄성계수 값을 적용한 경우의 각각 구간에서의 천단부 최대 침하량 및 측벽 최종 변위도의 값이 적용하지 않은 경우보다 더 낮은 값을 보임으로써 토사터널의 경우 보조 보강 공법으로써 강관우레탄 그라우팅 공법이 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다.



VI. 참고 문헌

1. 한국지반공학회(1997), 터널(지반공학 시리즈),구미서관.
2. 강희준(2000), 토사 NATM터널의 막장 안정용 보조공법의 효과에 관한 연구, 부산대학교 석사학위논문.
3. 한국지반공학회(1997), 연약지반 터널굴착시의 지반보강사례연구.
4. 한국지반공학회(1993), 지반보강편람(주입공법중심), 서울특별시.
5. RUPM공법연구회(2004), RUPM공법, 성하지질공업(주), PP.7-56.
6. Health and Safety Executive(1996), Safety of New Austrian Tunelling ' Method(NATM), Tunnels-A review of sprayed Concrete lined tunnels with particular reference to London clay, HSMO,U.K.
7. 신용욱(2005), 도심지 지하 공간 개발을 위한 대형 대심도 근접 굴착 흙막이 설계 사례, 2005지반공학 공동학술발표회. pp.58-59.
8. 박광준, 이인근(1993), 도심지 지하철 터널의 붕괴유형과 원인, 한국지반공학회 1993 봄학술발표회 논문집, pp.41-48.
9. 서울시 지하철 건설 본부(1993), “지하철 터널 설계와 시공 자료집”, pp.268-703.
10. 진병익, 천병식(1984), 물유리계 주입재를 주로한 지반강도 증대, 대한토목학회 논문집, 제4권, 제2호, pp.89-99.
11. 천병식(1997), 지반주입용 폴리우레탄의 공학적 특성 및 보강효과, 대한토목학회 논문집, 제17권, 제3-4호, pp.475-483.
12. 정성교(1993), 우레탄 보강공법에 따른 토질 시험결과보고서, 동아대학교.
13. 배규진(1997), 터널 계측 및 주변지반의 거동평가, 한국지반공학회.
14. 삼성물산(주) 건설부문(2000), oo지하철 설계보고서 및 구조계산서, pp.59-305.
15. (주)지중공영(2000), 강관우레탄 지반보강공법 기술자료, pp.2-28.
16. (주)지중공영(2000), 강관다단 그라우팅공법 기술자료, pp.2-59.
17. 이준석, 방춘석, 최일윤, 엄주환(2000), 터널용 강관다단 공법의 설계기법에 관한연구, 한국토목공학회 논문집, 제20권, 제3-1호, pp.305-314.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 항상 세심한 지도와 배려로써 학문적·정신적 깊은 가르침을 베풀어주신 남정만 지도교수님께 이 글을 빌어 깊은 감사를 드립니다.

그리고 논문심사과정에서 세심한 배려와 조언을 아끼시지 않으셨던 양성기 교수님, 김남형 교수님, 이병걸 교수님, 김상진 교수님, 박상렬 교수님께도 감사를 드립니다.

본 논문이 완성되기까지 논문작업으로 바쁜 저를 대신하여 도와준 지반공학 연구실 김도형 학생께 깊은 감사를 드리고 김승범, 조성환, 김준호, 김승현 학생에게도 감사를 드립니다.

한편 학업에 전념할 수 있도록 항상 이해와 격려로 해주신 주)대저토건 남제주군 동부 광역하수종말 처리시설건설공사의 구자영 소장님, 조영렬 소장님 이하 문일성님, 김용환님, 안병훈님, 김용수님, 오병호님, 임근석님 등 여러 직원들에게 감사를 드립니다.

대학원생활 동안 힘이 되어준 산업대학원 팔구회임원 양재수님, 김홍준님, 고대호님, 강지성님, 박진영님, 김용태님, 김남식님, 오영진님, 차성님, 홍동철님, 김형철님, 홍정호님에게도 심심한 감사를 표하며 남은 학기 내 논문 완성을 기원합니다.

그리고 CIVIL E.N.G 생활동안 스승인 배동이님, 이우상님, 김종언님, 이현주님과 더불어 송준우님께 이 글을 빌어 감사의 마음을 전합니다.

힘들 때 넉넉한 웃음으로 소주잔을 기울이던 그리고 멀리 있지만 늘 제 가슴속에 있는 친구와 가족들 차돌빼모임, 옥수와건데기모임, 모듬회모임에게 감사드립니다.

10월21일 결혼하게될 사랑하는 영원한 나의 신부 장현지님 에게 이 글을 빌어 프로포즈 합니다.

또한 오늘이 있기까지 저를 키워주신 아버님과 어머님께 머리 숙여 깊은 감사를 드리며, 온 가족과 이 기쁨을 하면서 평소 아끼고, 이끌어주신 모든 분들에게 이 작은 결실을 바치고자 합니다.

2006.6

육 경 수

안개 자욱한 장맛비 내리는 제주도 6월에.....