



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](#)



碩士學位論文

다공성 세라믹의 발포에 관한 연구

濟州大學校 大學院

機械工學科

金 炫 寬

2012年 2月



다공성 세라믹의 발포에 관한 연구

指導教授 金 貴 植

金 炫 寬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2012年 2月

金炫寬의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (印)
委 員 _____ (印)
委 員 _____ (印)

濟州大學校 大學院

2012年 2月



A Study on Bloating of Porous Ceramic

Hyeon-Gwan Kim

(Supervised by professor Gui-Shik Kim)

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

2012. 2.

Department of Mechanical Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

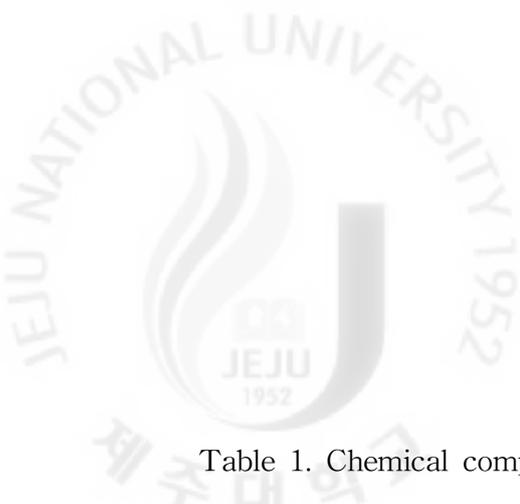


목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
SUMMARY	vi
I. 서 론	1
II. 석재산업 및 폐기물	3
2.1 석재 및 경량골재의 정의	3
2.2 제주도에서의 현무암 가공	4
2.3 폐석 및 석분슬러지의 발생과 영향	7
III. 실험재료 및 실험방법	10
3.1 실험재료	10
3.2 발포기구	15
3.3 실험방법	18
3.3.1 재료의 분쇄 및 혼합	18
3.3.2 시험편의 성형 및 소성	20
3.4 물리적 특성조사	27
3.4.1 비중 측정	27
3.4.2 흡수율 측정	27
IV. 결과 및 고찰	28
4.1 소지재료의 소성특성	28
4.2 점토 첨가에 따른 발포특성	32
4.3 유리분말 첨가에 따른 발포특성	36



4.4 탄산칼슘(CaCO_3)의 첨가에 따른 발포특성	40
V. 결 론	42
참고문헌	44



List of Tables

Table 1. Chemical component of materials	11
Table 2. Mixing rate of the materials for forming specimen	19
Table 3. Characteristics of ceramic specimens	31



List of Figures

Fig. 1 Location of stone processing plant and rocky mountain	5
Fig. 2 Flow chart of stone processing	5
Fig. 3 Stone product stocked in the open area	6
Fig. 4 Typical stone cutting machine	6
Fig. 5 Process of the occurrence of waste stone and stone powder sludge	8
Fig. 6 Waste stone	9
Fig. 7 Stone powder sludge	9
Fig. 8 Classification of volcanic rocks	11
Fig. 9 XRD pattern of powdered basalt sludge	13
Fig. 10 XRD peak list of powdered basalt sludge	13
Fig. 11 XRD pattern of clay	14
Fig. 12 XRD peak list of clay	14
Fig. 13 Bloating range of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Flux}$	17
Fig. 14 Ball mill	19
Fig. 15 Schematic diagram of waste stone powder molding machine	21
Fig. 16 Blueprint of waste stone powder molding machine	21
Fig. 17 Waste stone powder molding machine	22
Fig. 18 Metallic pattern ($\Phi 60 \times 60\text{T}$)	22
Fig. 19 Electric kiln	23
Fig. 20 Outside of electric furnace	25
Fig. 21 Inside of electric furnace	25
Fig. 22 Experimental method	26
Fig. 23 XRD pattern of B-1150 specimen	29
Fig. 24 XRD peak list of B-1150 specimen	29
Fig. 25 Ceramic and compressive strength specimen	30

Fig. 26 Specimen of 100wt% clay (1,150°C)	33
Fig. 27 Specimen of 100wt% clay (1,200°C)	33
Fig. 28 Characteristics about clay content	34
Fig. 29 Specimens about clay content	35
Fig. 30 Characteristics about glass powder 50wt%	37
Fig. 31 Characteristics about glass powder 100wt%	37
Fig. 32 Specimens about glass powder content (glass powder 50%)	38
Fig. 33 Specimens about glass powder content (glass powder 100%)	39
Fig. 34 Characteristics about CaCO ₃ content	40
Fig. 35 Specimens about CaCO ₃ content	41



SUMMARY

The study on bloating of porous ceramic was proceeded. The porous ceramic is made by using powdered basalt sludge and the characteristics on bloating caused by addition of clay, glass powder and CaCO_3 are investigated.

The clay helps to combine powdered basalt sludge, added from 0wt% to 20wt% and the soda glass helps bloating of specimen by forming glass phase on the surface of specimen, added 0wt%, 50wt% and 100wt%. The blowing agent CaCO_3 is a component forming molten phase, added 0wt%, 5wt%, and 10wt%.

The specimens were rapidly heated in furnace at 1,100, 1,150, and 1,200°C for 15min, respectively, to sinter porous ceramic.

Clay belongs to bloating range of Riley can not discover forming glass phase on surface of specimen at 1,200°C. But the specimen made up of 100wt% clay was rapidly heated, as a result, the black core was discovered within the specimen.

Powdered basalt sludge does not belong to bloating range of Riley. But glass phase of high viscosity on surface of specimen formed owing to addition of glass powder.

As a result, porous ceramic is made by blocking emission of gas generated within the specimen.

The chemical composition of materials were determined, and characteristics were analyzed, including specific gravity, water absorption.

The porous ceramic which is heated at 1,200°C has specific gravity of 0.53g/cm³, water absorption of 3.08%, and this value is satisfied with KS L 8551 standard.

I. 서 론

세계적으로 급속한 산업발전과 생산 활동의 다양화로 인하여 각종 환경오염물질의 종류가 계속 증가하고 있으며, 발생량 또한 급증하고 있다. 우리나라에서도 환경오염 문제에 대한 관심이 고조되면서 폐기물의 처리, 처분문제가 심각하게 대두되고 있다. [1, 2]

이러한 폐기물 중 석재산업으로 인하여 발생하는 폐석과 석분슬러지가 있다. 우리나라의 경우 비교적 풍부한 석재자원을 바탕으로 질적, 양적인 면에서 많은 발전을 거듭하여 왔다. 하지만 석재산업이 발전할수록 원석의 소모량은 증가하므로 유한한 자원인 광물 자원이 심각하게 소모되고 있다. 또한 원석의 채굴 및 제품 가공과정에서 발생하는 고품 폐기물과 원석의 절단 및 연마 시 발생하는 석분슬러지로 인하여 자연환경이 훼손되어 지고 있다.

특히, 석재 가공과정에서 발생하는 슬러지의 양은 해당 원석의 30~40% 정도로 추정되며, 석재 가공과정 중 발생하는 폐석의 일부만이 도로포장용 쇄석골재로 재활용되고 있을 뿐 대부분은 방치되거나 적치되어 주위환경을 훼손 및 오염시키고 있다. 각 사업장에서는 이들 폐기물을 자체적으로 처리하기 위한 매립용 부지의 확보 및 처리시설의 설치에 노력을 기울이고 있지만 마땅한 해결책을 제시하지는 못하고 있으며, 폐기물 처리업체에 위탁, 처리한다고 하여도 대부분 매립하고 있는 실정이다. [3-7]

현재, 사회적인 환경보호와 폐자원의 재활용에 대한 커다란 관심에 힘입어 석분슬러지 및 폐석의 재활용 공정에 대한 연구를 진행하고 있다. 석분슬러지는 유해물질이 함유되어 있지 않고 원석과 동일한 재질이므로, 석분슬러지의 유효적절한 재활용은 환경오염방지, 매립지의 감소 및 매립비용의 절감은 물론 폐자원의 재활용에 의한 새로운 부가가치 창출도 가능하다고 할 수 있으며, 유한한 자원인 원석의 사용량 저감에도 큰 기여를 할 수 있다. [7, 8]

이를 해결하기 위한 방법 중 하나로 석분슬러지를 이용하여 다공성 세라믹을 제조함으로써 경량골재로 이용하는 방법을 들 수 있다.

최근, 구조물의 대형화와 단열, 방음 및 에너지절약 등의 추세에 따라 구조물의 경량화와 기능성을 부여하기 위한 방법으로 인공경량골재 및 경량건축자재를 위한 다공성 세라믹이 사용되고 있으며, 품질관리 및 매장량 등의 문제점으로 종래의 천연산 건축자재는 새로운 인공건축자재로 대체되고 있다. 이러한 인공경량골재 및 경량건축자재 등은 1917년 세일을 가열, 팽창시켜 경량골재를 제조한 최초의 특허를 시작으로 1930년경부터는 미국과 유럽 등지에서 팽창성 점토, 세일, 석탄회 및 광재 등을 이용한 제품 등이 본격적으로 상품화되기 시작하였다.

가장 널리 사용되는 소재인 콘크리트의 경우 선진국에서는 구조물의 경량화 또는 효과적인 단열을 위하여 인공경량골재를 이용한 경량콘크리트 사용이 크게 증가하는 추세이며, 주로 점토 또는 fly ash를 원료로 하여 제조되고 있다.

국내의 경우 천연골재자원이 비교적 풍부하였으므로 인공경량골재에 대한 필요성을 크게 느끼지 않았으나, 1960년경부터 제주도 화산재, 연탄재, 혈암, 점토 등을 대상으로 인공경량골재 제조에 관한 연구가 진행되었으며, 최근에는 원료구입이 가장 용이한 점토를 이용한 연구가 시도되고 있다. [9, 10]

일반적으로 인공경량골재는 다공성 구조로 보통 골재보다 높고 빠른 흡수력을 가지고 있는 것으로 알려져 있는데, 이러한 특성은 재료의 내구성과도 연관되므로 현장에서 콘크리트용 골재로 응용하는데 있어 문제점으로 작용하게 된다. 하지만, 원료의 변화 및 골재의 피복 처리에 의해 흡수율 저하가 가능하다고 알려져 있으며, 제품의 특성상 흡수율이 높은 경우도 필요하므로 다양한 분야에 사용되어질 수 있다. [8, 11]

따라서, 본 연구에서는 석재산업의 폐기물인 석분슬러지를 원료로 첨가물 및 열처리 조건 등을 달리하여 다공성 세라믹을 제작하고 각 각의 물리적 특성을 비교하고자 하였다.



II. 석재산업 및 폐기물

2.1 석재 및 경량골재의 정의

석재라 함은 통상적으로 토목용, 건축용 판재, 공예품용 등으로 활용되는 암석을 말하는 것으로 한국산업규격 KS F 2530(석재)에서는 주로 토목, 건축에 사용되는 천연산 석재를 말하며, 천연 슬레이트, 쇠석, 궤도용 부서 및 도로용 석재는 제외한다. 많이 이용되는 석재로는 화강암, 대리석, 석회석, 사암, 현무암, 안산암, 점판암, 오석류 등 그 수가 많으나 한국에서 주로 사용되는 석재는 대리석과 화강암으로 대리석의 경우 건축내장재와 공예품용으로 활용되고 있다. [7, 12, 13]

골재는 콘크리트, 모르타르 등과 같이 결합재에 의하여 뭉쳐서 한 덩어리를 이룰 수 있는 건설용 광물질 재료로서 천연골재와 인공골재로 나눌 수 있다.

천연골재는 강이나 산, 바다에서 채취하는 자갈, 모래 등으로 이들이 가지는 성분은 콘크리트 속의 철근 등을 부식시키므로 잘 씻어서 사용하거나 중화시켜서 사용해야 한다. 천연산 경량골재는 화산력, 부서, 화산사 등으로 경량블록 등에 사용되며 쇠석은 천연암석을 적당한 크기로 부수어 만든 골재이다.

인공골재에는 공업부산물과 인공경량골재가 있는데, 공업부산물은 석탄찌꺼기, 팽창슬래그 등이며 개량하거나 그대로 쓴다. 인공경량골재는 팽창점토, fly ash, 팽창혈암 등을 소성하여 만든 것으로 최근에는 보다 강력한 구조용 인공경량골재도 제조되고 있는데 가볍고 단단한 종류의 골재를 이용하는 분야가 더욱 넓어지고 있다. 한국산업규격 KS F 2534(구조용 경량 골재)에서는 경석, 화산암, 응회암과 같은 천연재료를 가공한 골재를 천연경량골재, 고로슬래그, 점토, 구조토암, 석탄회, 점판암과 같은 것을 팽창, 소성, 소피하여 생산한 것을 인공경량골재로 규정하고 있다. [10, 12, 14]

2.2 제주도에서의 현무암 가공

제주도는 우리나라에서 화산암이 가장 넓게 분포하고 있는 지역이며, 제주도에 분포하고 있는 화산암류는 대체로 현무암류(솔레아이트(tholeiite), 알칼리 현무암, 조면 현무암, 현무암질 조면 안산암, 현무암질 안산암)와 조면암류(조면질 안산암, 조면암)로 구분할 수 있다. 현무암류는 SiO_2 함유량이 47~52% 범위이며, 크고 작은 기공을 포함하는 다공질의 특성을 나타낸다. 육안으로 관찰되는 광물의 종류는 감람석, 휘석, 사장석이나 이들 광물의 형태와 함량은 암석의 화학조성에 따라 차이를 나타낸다. 감람석과 보통휘석은 현무암에서 가장 흔한 큰 결정을 갖는 반정광물이며 사장석 반정도 매우 흔하다.

제주도 동부와 서부지역에 넓게 분포하는 현무암류(솔레아이트(tholeiite), 현무암질 안산암)는 침상의 사장석 반정과 미립질의 감람석 반정을 함유하는 반면, 제주와 서귀포 지역에 분포하는 현무암류(조면 현무암, 현무암질 조면 안산암)는 반상의 사장석과 휘석 반정이 다량 함유되어 있다. 제주도내에 채석을 위한 석산은 12개정도가 있으며, 지역별로 북동쪽에 6개, 북서쪽 1개, 남서쪽 4개, 남동쪽 1개가 분포하고 있다.

석재 제품의 생산과정을 살펴보면 다음과 같다. 우선, 석산으로부터 채석된 원석을 가공공장 부지내로 운반한 후 지게차 등의 운반기를 통해 공장내부로 운반한다. 그 후 다이아몬드 톱이 장착된 절단기를 이용하여 두 차례에 걸쳐 제품 크기에 맞도록 원석을 절단하게 된다. 또한 중간톱과 작은톱, 연삭기 등을 이용하여 가공하는 3차 재단과정을 거친 후 형태가 완성되면, 연마작업 및 모따기 과정을 거쳐 석제품이 완성된다. Fig. 1은 석재가공공장 및 석산의 분포를, Fig. 2는 가공과정의 흐름도를 나타낸다. 그리고 Fig. 3은 최종 가공과정을 거쳐 완성된 제품이며, Fig 4는 가공과정에서 사용되는 석재절단기를 나타낸다. [7]

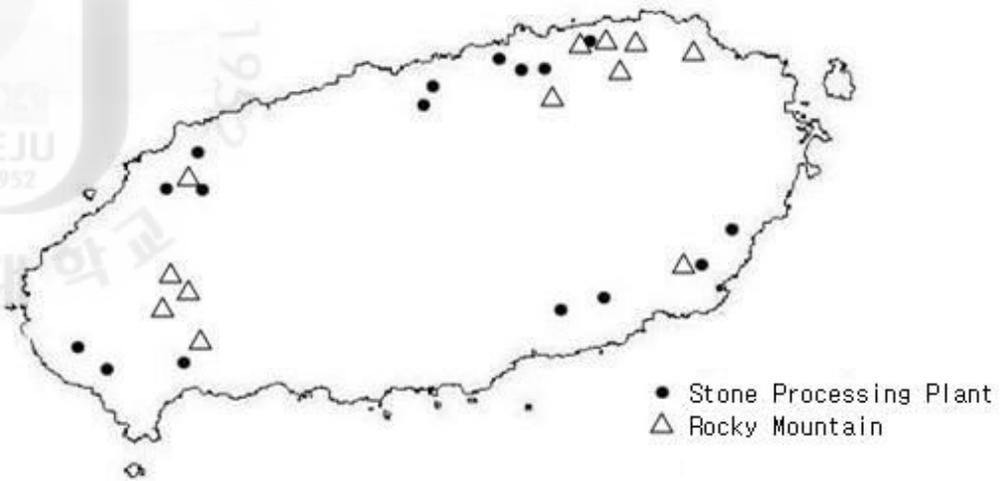


Fig. 1 Location of stone processing plant and rocky mountain

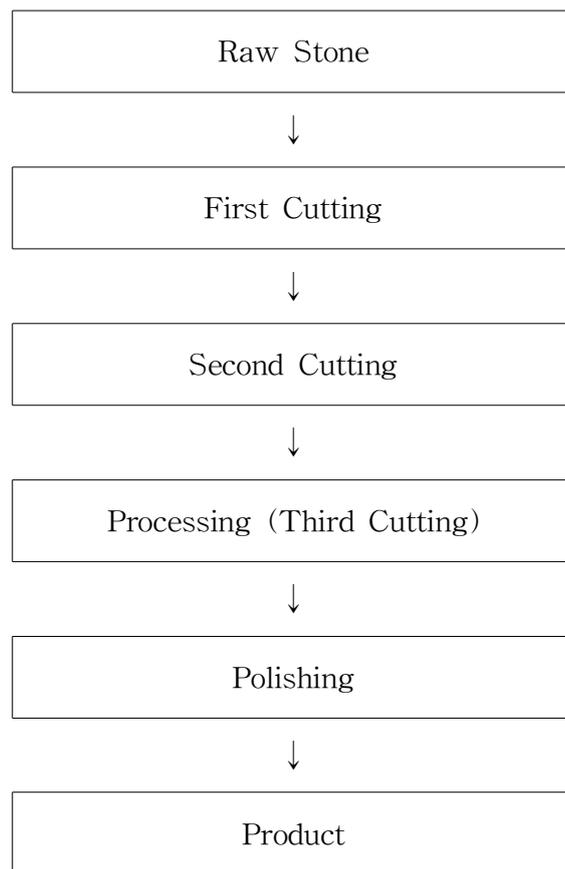


Fig. 2 Flow chart of stone processing



Fig. 3 Stone product stocked in the open area



Fig. 4 Typical stone cutting machine

2.3 폐석 및 석분슬러지의 발생과 영향

원석을 채굴하거나 가공하는 과정에서 석·골재의 30~60%정도가 폐석이나 석분슬러지로 발생하고 있고, 이 중 폐석과 석분의 일부만이 인조대리석 제조 및 도로포장용 쇄석골재 등으로 재활용 되고 있을 뿐, 대부분은 적치되거나 무계획적으로 매립되어 주변 환경을 훼손 및 오염시키고 있다. [5]

석재 가공과정에서 석재 재단기의 냉각수로 사용되는 물과 절삭 및 연마 시 발생하는 석분이 혼합되어 현탁액으로 분출되는데 원폐수인 현탁액이 기계하부의 수로와 공장내부에서 외부로 보내지는 수로를 통해 이동하여 1차, 2차 및 3차 침전지와 저수조 중화 및 응집조, 농축 및 침전조를 거친 후 탈수과정 이후 석분슬러지가 발생하며, 이들 석분슬러지는 미세한 입자로 탈수, 건조하면 분진상태로 되기 때문에 적절한 처리가 요망된다. [7]

이와 같이 석재 가공과정에서 필연적으로 발생하는 부산물인 석분슬러지는 다음과 같은 두 가지 측면에서 환경오염에 영향을 미친다. 첫째는 매립으로 인한 오염으로, 매립지 확보를 위한 경제적 부담뿐만 아니라 미세한 분진으로 인한 대기, 토양 및 수질오염 등의 환경문제를 유발시킨다. 또한 지반의 연약화 등 2차 문제가 야기된다. 둘째는, 야적으로 인한 피해이다. 국내의 인공 쇄석사 제조과정에서 발생하는 200Mesh 이하의 석분은 연간 100만^{m³} 이상으로, 대부분 석산에 야적되어 현재 폐기물로 지정되어 있다. 이처럼 대규모의 재활용 방법이 부족한 현실에서 연간 발생 되는 석분슬러지는 그 양에 비해 국토가 좁고 폐기물을 매립할 수 있는 매립장도 포화된 상태여서, 불법적인 토지이용 및 매립 등으로 인한 행정적인 처벌을 감수하면서까지 불법 처리해야 하는 악순환이 계속되고 있다. [5, 15]

전국적으로 석재 가공과정에서 발생하는 석분슬러지의 발생량은 2003년 기준 약 787,800톤으로 120억원 정도의 연간처리비용이 소요되고 있으며, 제주도에서 발생하는 폐석과 석분슬러지의 배출량에 대하여 보고된 바는 없으나, 폐기물처리 업체에 입고되는 석분슬러지의 양으로 추정하여 년 평균 약 18,000톤 이상이 발생하는 것으로 사료된다.

또한 2010년 제주도내에서 14개의 석재 가공업체가 가동 중에 있으며, 업체별로 규모의 차이는 있으나 1개의 업체에서 배출되는 폐석의 양은 20~30ton/day, 석분슬러지는 5~7ton/day로, 제주도에서 발생하는 폐석은 년 평균 84,000~126,000톤, 석분슬러지는 년 평균 21,000~29,400톤 정도로 추정된다. [5, 7]

Fig. 5는 석재 가공과정에서 발생하는 폐석 및 석분슬러지의 발생과정을 나타낸 것으로 이 과정에서 원석의 약 60%가 폐석 및 석분슬러지로 발생한다. [16]

또한 Fig. 6과 Fig. 7은 각 각 폐석 및 석분슬러지를 나타낸다.

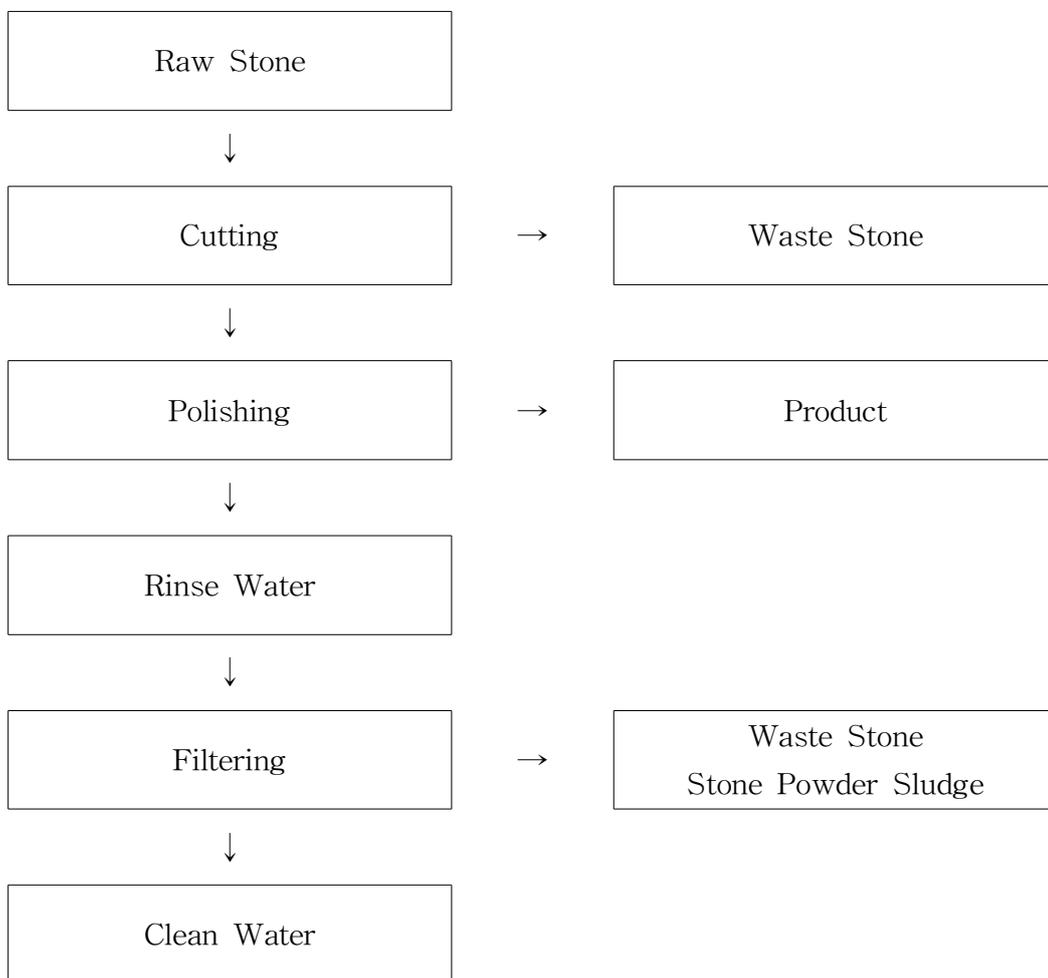


Fig. 5 Process of the occurrence of waste stone and stone powder sludge



Fig. 6 Waste stone



Fig. 7 Stone powder sludge

Ⅲ. 실험재료 및 실험방법

3.1 실험재료

본 연구에서는 석분슬러지와 첨가물인 점토, 소다유리, 그리고 발포제인 CaCO_3 를 다공성 세라믹의 주원료로 사용하였다. 첨가물인 점토는 석분슬러지의 부족한 성형성을 보조하기 위한 용도와 점토가 일정온도 이상에서 발포하는 성질을 이용, 다공성 세라믹의 제조를 보조하기 위하여 부가적으로 사용하였다. 소다유리는 시험편의 표면에 유리상층을 형성하여 시험편의 발포를 돕기 위한 것으로, 내부에서 생성된 가스가 외부로 배출되지 못하도록 하는 기능을 한다.

Table 1에 석분슬러지와 점토의 화학성분을 나타내었다. 각 시료의 분석은 SHIMADZU(Japan), XRF-1700을 사용하였으며, 가속전압전류(40kV, 70mA)의 조건으로 3회 측정 후 평균값을 계산하였다. 화학성분에서 확인할 수 있듯이 석분슬러지는 SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 - CaO - MgO 계로 구성된다.

Fig. 8에 나타낸 실리카(SiO_2)에 대한 총 알칼리($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)의 도표로 화산암의 종류를 분류할 수 있는데, 본 연구에 사용된 석분슬러지는 SiO_2 50.61%, Na_2O 2.77%, K_2O 0.71%로 현무암에 속함을 확인할 수 있었다. [17]

점토의 경우 주성분은 SiO_2 와 Al_2O_3 이며, 강열감량(loss ignition)이 9.33%로 나타났다. 강열감량이란 분석시료를 달구었을 때의 질량 감소율로 일반적으로 시료를 1,000~1,200℃에서 항량이 될 때까지 가열했을 때의 감량을 원시료에 대한 백분율로 나타낸 것이다. 이 때 물, 이산화탄소 등의 성분을 잃어버리는데, 이들 성분은 발포과정에 도움이 되는 것들이다.

Table 1. Chemical component of materials

Chemical Component	Powdered Basalt Sludge	Clay
SiO ₂	50.61	62.26
Al ₂ O ₃	14.35	15.55
TiO ₂	2.07	1.21
Fe ₂ O ₃	11.91	6.88
MnO	0.15	0.08
MgO	7.59	0.97
CaO	8.78	0.51
Na ₂ O	2.77	0.91
K ₂ O	0.71	1.87
P ₂ O ₅	0.28	0.08
LOI	0.56	9.33

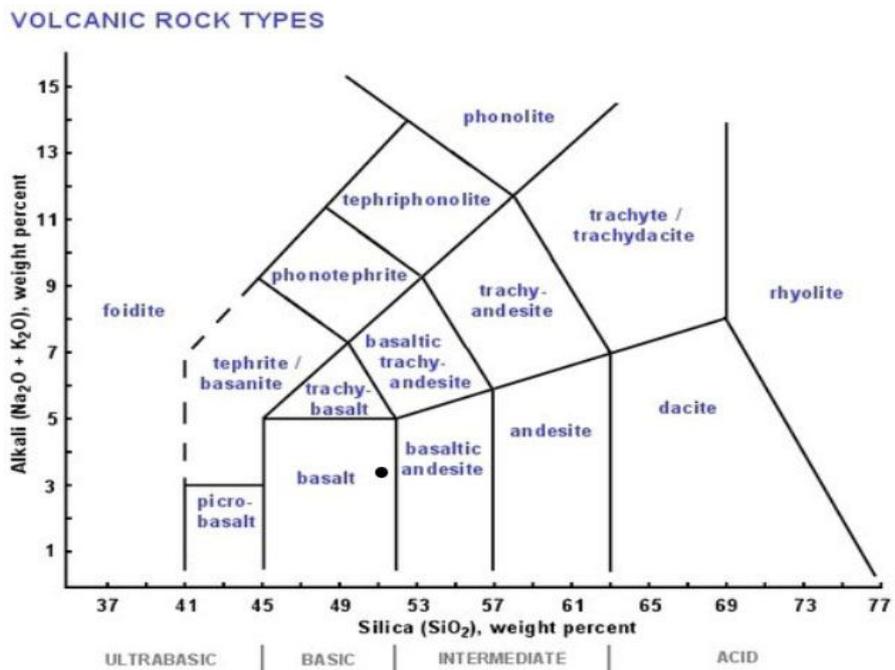


Fig. 8 Classification of volcanic rocks

또한 현무암 석분슬러지와 점토에 대한 XRD분석을 실시하였다. X선 회절분석이란, 측정하고자 하는 시료에 X선을 쬐어 나타나는 회절패턴을 가지고 시료의 광물성분을 알아내는 것이다. 모든 광물은 각각의 고유한 회절패턴을 가지고 있는데, 이들 자료를 근거로 하여 시료의 XRD 회절패턴과 서로 비교함으로써 그 시료가 가지고 있는 광물성분을 파악할 수 있게 된다. 시료의 분석은 PHILIPS(Netherlands), X'Pert-MPD System을 사용하였으며, Cu K α 방사선으로 5.01~79.99Theta까지 측정을 하였다. 이 때 출력은 30mA, 40kV였다.

Fig. 9와 10은 현무암 석분슬러지의 XRD 분석결과로서, Fig. 9는 시료에 X선을 쬐어 나타나는 회절패턴을 그래프 형식으로 나타낸 것이며, Fig. 10은 Fig. 9의 회절패턴을 토대로 각 광물의 회절패턴과 비교한 결과, 일치하는 광물성분을 나타낸 것이다. 현무암 석분슬러지의 X선 회절분석 결과 투휘석(Diopside)과 회장석(Anorthite)의 광물성분을 확인할 수 있었다.

또한, 점토의 XRD 분석결과는 Fig. 11과 12에 나타내었다. 점토는 석영(Quartz), 조장석(Albite), 백운모(Muscovite)의 광물성분이 나타났으며, 이중 석영은 고온에서 유리상을 생성하는 성분으로 알려져 있다.

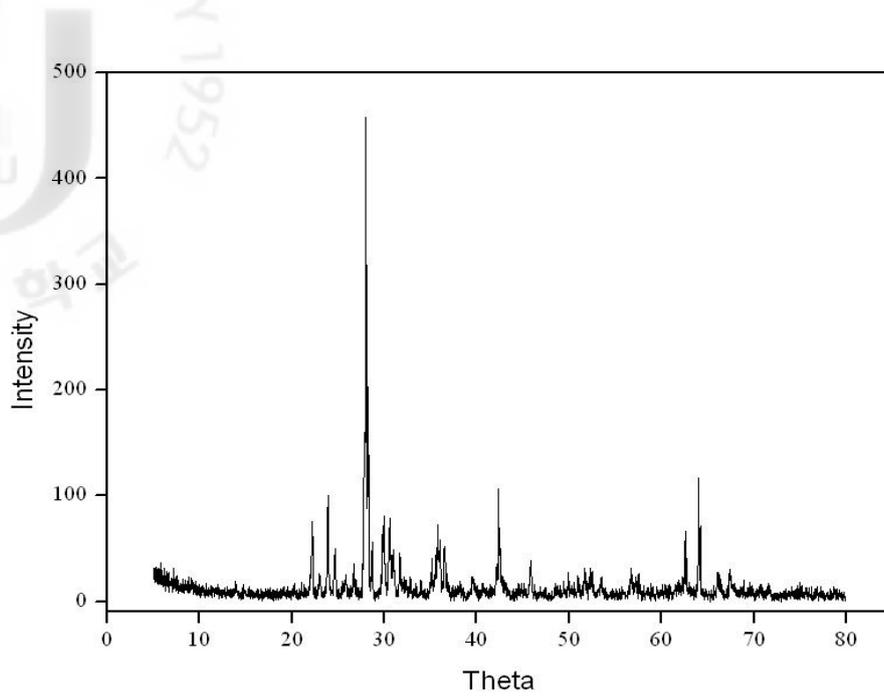


Fig. 9 XRD pattern of powdered basalt sludge

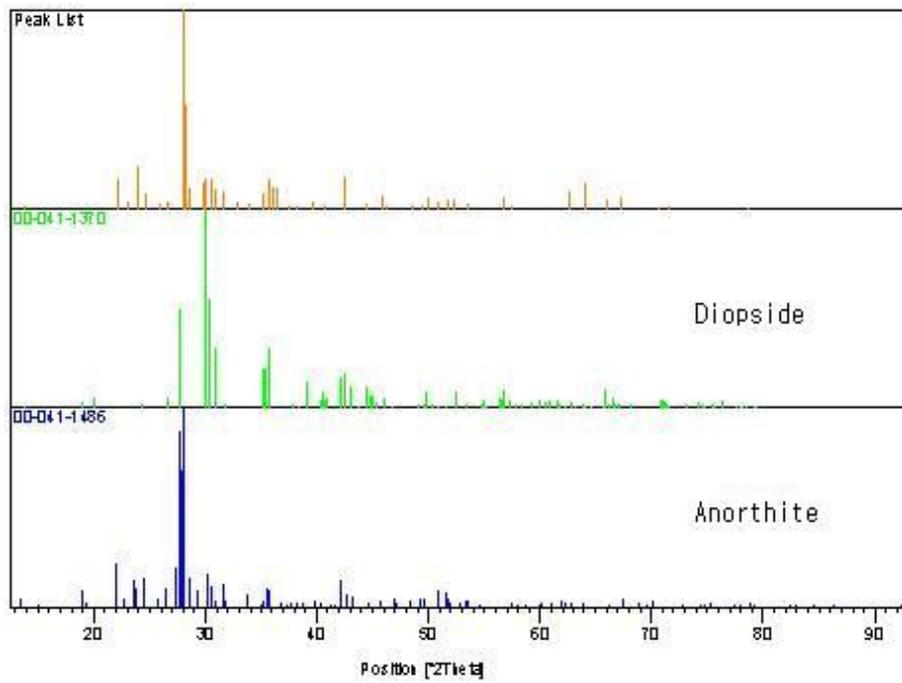


Fig. 10 XRD peak list of powdered basalt sludge

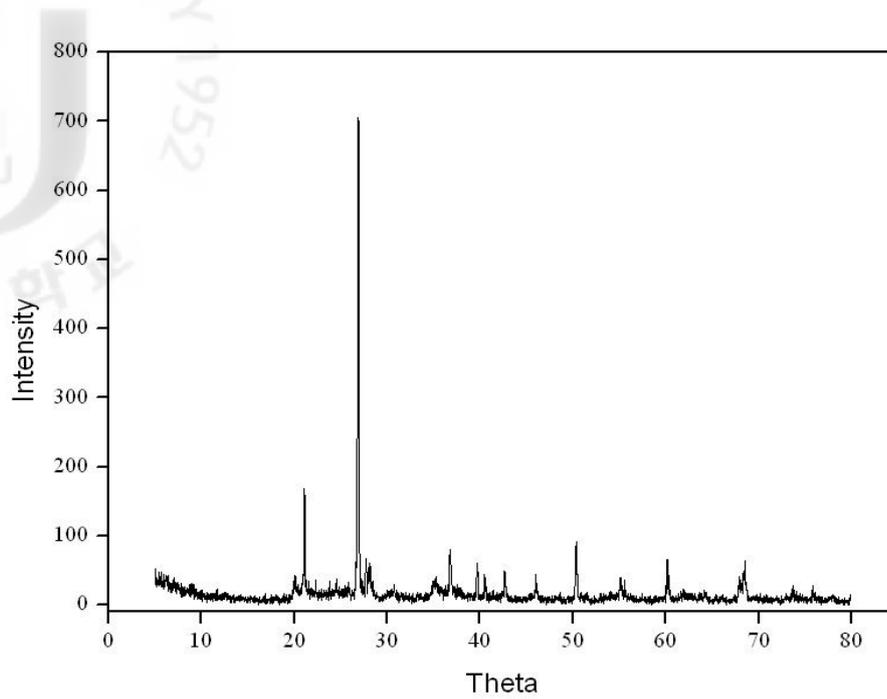


Fig. 11 XRD pattern of clay

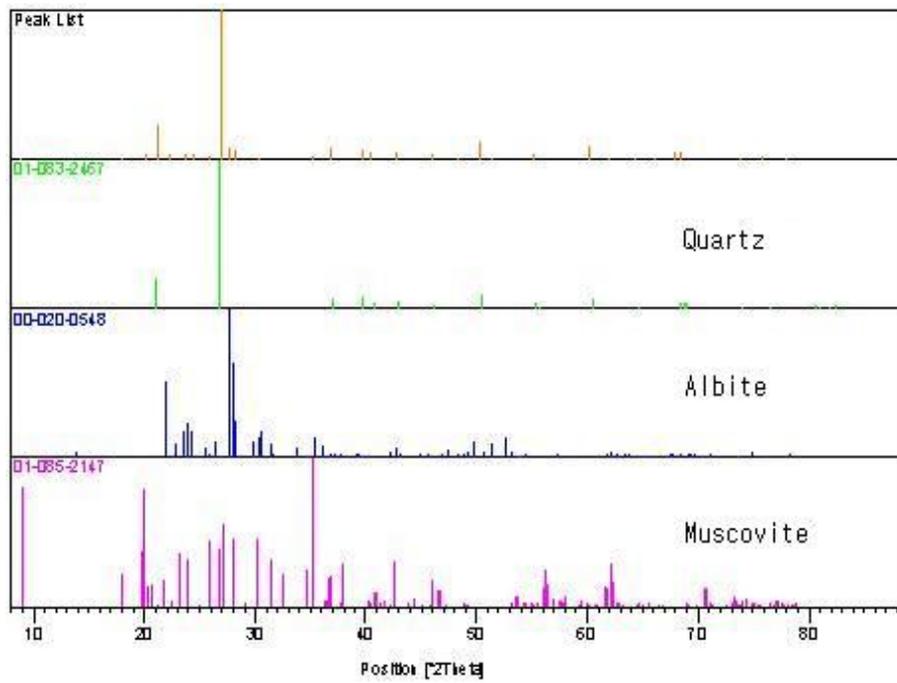


Fig. 12 XRD peak list of clay

3.2 발포기구

발포에 영향을 미치는 인자에는 화학조성, 가스발생, 플럭스성분, 소성조건이 있다. 화학조성은 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Flux}$ 의 3성분계 좌표로 표시되는 Riley의 발포범위가 일반적으로 적용되며, 가스발생은 탄소, Fe_2O_3 , 탄산염, 점토광물, 유기물 등의 분해에 의한 것이다. 플럭스성분은 용융액의 표면장력과 점성에 영향을 미치며, 기포의 발생과 성장속도를 조절하는 철과 알칼리를 포함하는 광물이 이에 속한다. 그리고 소성조건은 소성온도, 승온속도 등이 있다.

인공경량골재를 제조하는데 응용되고 있는 bloating 현상은 시험편 내부에서 분해, 생성되는 가스가 시험편 표면에 생성되는 고점성의 유리상층을 빠져나가지 못하고 시험편 내부에 갇히게 되면서 일어나는 현상으로, 가스의 발생에 따른 압력으로 인하여 소결체는 다공성이면서 체적이 큰 상태를 갖게 된다.

따라서 다공성 세라믹을 제작하기 위해서는 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

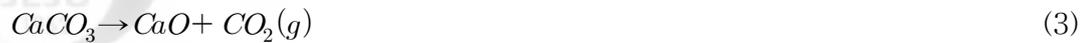
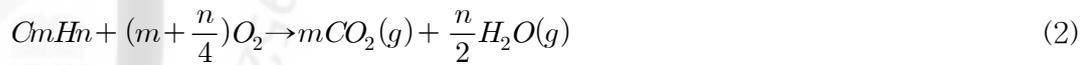
첫째, 높은 온도에서 시험편의 표면에 용융반응이 일어나 고점성의 유리상층을 형성함으로써 시험편 내부에서 발생한 가스를 가두어야 한다.

둘째, 시험편 표면에 유리상층이 형성됨과 동시에 내부에서는 다양한 화학분해 반응에 의하여 가스를 발생해야 한다.

또한 이러한 조건이 충족됨과 동시에 다공성 세라믹을 제작하기 위해서는 급소소성이 행해져야 한다. 이는 가열반응의 각 단계가 급속소성에 의하여 동시에 진행되므로 유리상층이 형성됨과 동시에 원료에 함유되어 있던 수분이나 유기물이 분해되어 H_2O 및 CO_2 등의 가스를 발생시켜 고점성의 유리질 피막을 팽창, 발포하기 때문이다. [9, 10, 18-20]

이 외에도 다공성 세라믹을 제조하는 방법으로, 소성온도를 조절하여 구성입자 사이의 간극을 이용하는 방법과 세라믹 슬러리를 발포하여 포말 중의 기포를 이용하는 방법, 발포제나 유기물을 세라믹에 혼합하여 이들이 차지하고 있는 공간을 이용하는 방법을 들 수 있다. [9]

이러한 현상으로 인하여 발생되어지는 발포가스에는 다음과 같은 것들이 있다.



식 (1)은 증기수, 결정수의 증발에 의해 일어나는 반응으로 펄라이트나 팽창혈암의 발포에 이용된다. 식 (2)는 유기물의 산화이며 폐유리의 발포가 여기에 포함된다. 식 (3)은 석회석의 하소반응으로 발포유리의 대표적 발포기구이며, 식 (4)는 1000℃ 이상의 고온에서 일어나는 환원반응으로 인공경량골재의 발포기구이다. [21]

이 외에도 황화물질의 경우 산화로 인하여 SO₂가 생성되며, MgCO₃는 MgO와 CO₂로 분해가 되고, 돌로마이트는 CaO와 MgO, CO₂로 분해가 되는 등 탄소산화물로 인하여 CO₂가 발생함을 알 수 있다. 또한 점토, 세일, 슬레이트 같은 원료는 다양한 온도에서 가스가 생성된다고 알려져 있다. 이것은 발포기구가 작동온도와 원료의 요소 변화에 민감하다는 것을 나타낸다. [10, 22]

이러한 발포가스의 생성 반응은 발포가스를 포집할 수 있는 시험편 표면의 거동과 밀접한 관계를 가지는데 이는 점성거동과 표면치밀화로 정의될 수 있다. 점성거동은 유리와 같은 저융점 화합물에서 일어나는 현상으로 연화점 이상의 온도에서 시험편의 표면이 점성거동을 함으로써 발포가 진행되어 경량골재 제조가 가능하다. 하지만 시험편 표면이 고점성의 액상으로 되기 때문에 시험편들 간의 용착을 방지하기가 쉽지 않아 주로 패널 형태나 타일 형태로 제조된다.

표면치밀화는 시험편 표면의 치밀화로 인하여 시험편 내부에서 생성된 가스가 시험편 외부로 배출되는 속도가 지연됨으로써 내부에 포집되어 발포가 진행되는 것이다. 이러한 표면치밀화 현상은 시험편 내부에 포획할 수 있는 가스의 양이 적기 때문에 초경량골재 제조에는 적합하지 않으나 부피비중 1.5 정도의 인공경량골재 제조에는 용착현상이 발생하지 않으므로 많이 이용되고 있다. [21]

발포반응에서 중요한 화학조성은 Al₂O₃에 대한 SiO₂의 상대적인 조성비율과

용제(flux)로 작용하는 성분의 종류와 함량이다. Riley[24]는 경량골재의 소성온도 범위인 1,000~1,300℃에서 발포하기 쉬운 원료의 화학조성을 Fig. 13과 같이 나타냈으며 SiO₂ 48~70%, Al₂O₃ 8~25%, Fe₂O₃+FeO 3~12%, CaO+MgO 1~12%, Na₂O+K₂O 0.5~7%의 범위가 이에 해당한다.

반면, 화학조성이 발포조성범위에 들지 않더라도 Al₂O₃에 대한 SiO₂의 상대적인 비율이 높으면 열처리시 생성되는 용융액의 양이 증가하므로 시험편 내부에서 발생하는 가스가 외부로 방출되는 것을 막아 발포가 진행되게 한다. 일반적으로 Al₂O₃에 대한 SiO₂의 상대적인 함량이 증가하면 형성되는 용융액의 양이 증가하고 용점이 낮아진다. 또한 용융액 중에 Al₂O₃의 양이 다량이면 점성이 낮아지고, 특히 MgO와 CaO는 점성감소의 효과가 크기 때문에 과량으로 함유되면 개기공의 형성과 기공의 파괴로 발포성에 악영향을 미친다. [9, 20, 23, 24]

Fig. 13에 현무암 석분슬러지와 점토의 위치를 나타내었다. 현무암 석분슬러지는 Riley의 발포범위에 해당하지 않으며, Al₂O₃에 대한 SiO₂의 상대적인 비율 또한 열처리시 충분한 용융액이 형성될 조건이 아니므로 현무암 석분슬러지만을 가지고 다공성 세라믹을 제조하기에는 어려움이 따른다.

반면, 점토의 경우 Riley의 발포범위에 해당될 뿐 아니라 Al₂O₃에 대한 SiO₂의 상대적인 비율도 조건을 만족시킨다.

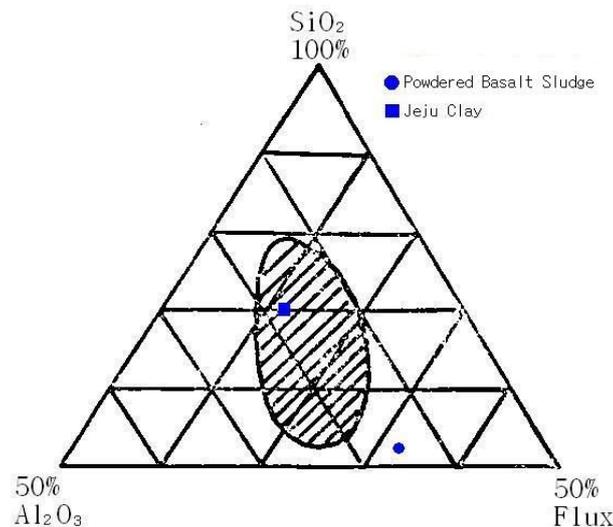


Fig. 13 Bloating range of SiO₂-Al₂O₃-Flux

3.3 실험방법

3.3.1 재료의 분쇄 및 혼합

각각의 재료는 저마다의 입자분포를 보인다. 본 연구에서 사용된 현무암 석분슬러지는 대부분이 $300\mu\text{m}$ 이하인 미세한 입자로 별도의 분쇄과정 없이 사용이 가능하지만, 점토와 소다유리의 경우 미세한 입자가 아니므로 분쇄과정을 수행하였다. 이러한 재료의 분쇄과정은 각 재료간의 배합을 원활하게 하기 위한 것으로, 분쇄 후 $300\mu\text{m}$ 이하의 체를 이용하여 일정크기 이하로 분리한 재료를 사용하였다. 점토의 경우 상온에서 일정 시간이 지나면 건조되어 굳어지게 되는데, 분쇄를 원활하게 진행하기 위해서는 클레이 커터를 이용, 점토를 일정 크기로 절단한 후 납작하게 만들어 건조한 후 분쇄를 실시해야 한다.

소다유리와 건조된 점토는 Fig. 14의 볼밀장치를 통하여 분쇄되었다. 볼밀에 분쇄할 재료와 알루미나 볼을 함께 넣고 회전시키면, 알루미나 볼의 회전력에 의하여 재료가 분쇄되는 것이다. 또한, 각 재료의 혼합에도 볼밀장치가 이용되었다.

Table 2에 각 재료간의 배합비를 나타내었다. 시험편의 이름은 B100~BC82로, B100 시험편은 현무암 석분슬러지 100wt%를 말하며, BC91은 현무암 석분슬러지 90wt%와 점토 10wt%가 혼합된 시험편임을 나타낸다. 현무암 석분슬러지와 점토의 혼합물을 100wt%로 정한 후 이를 기준으로 유리분말과 CaCO_3 를 첨가하였다. Table 2에 나타낸 배합비는 다공성 세라믹을 제조하기 위한 기준 배합비로, 실험을 통하여 현무암 석분슬러지와 점토의 비를 결정하고, 유리분말 및 CaCO_3 의 첨가량을 바꾸어가며 실험을 수행하였다.

Table 2. Mixing rate of the materials for forming specimen

Specimen	Powdered Basalt Sludge	Clay	Glass Powder	CaCO ₃
B100	100%	0%	100%	5%
BC91	90%	10%	100%	5%
BC82	80%	20%	100%	5%

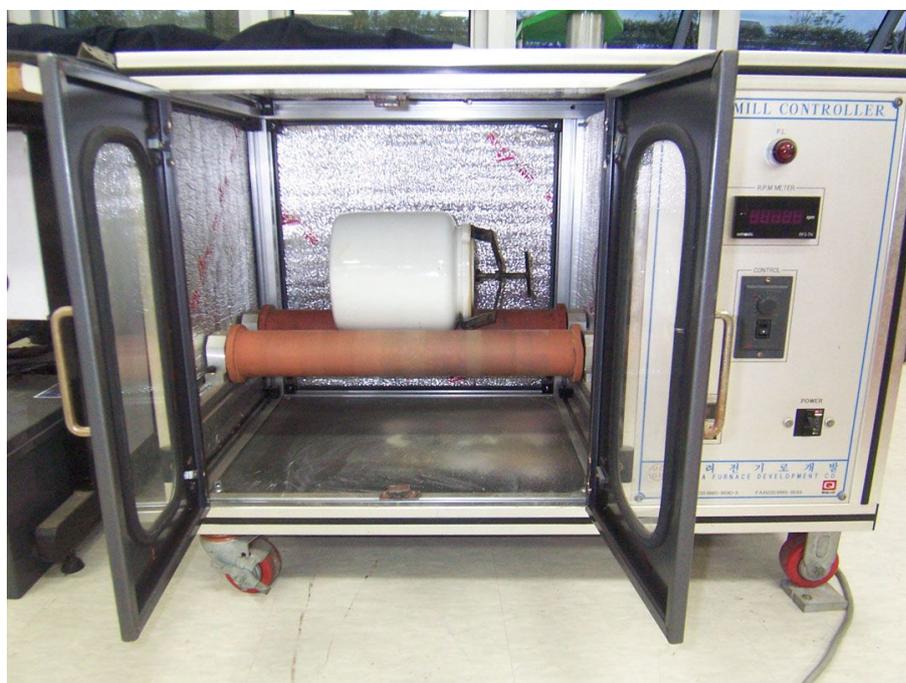


Fig. 14 Ball mill

3.3.2 시험편의 성형 및 소성

건식으로 혼합된 각각의 재료는 그 자체만으로 가압을 한다 하여 성형이 되지 않기 때문에 일정량의 함수율을 갖도록 물을 첨가한 후 가압하여 시험편을 성형하였다. 물 이외에 물유리를 이용하여 성형을 해보았지만, 성형성이 떨어져서 물을 사용하게 되었다. 함수율은 혼합된 재료의 총중량을 기준으로 하여 10wt%가 되도록 조정하였다. 10wt%의 함수율은 재료를 손으로 쥐었을 때 재료의 형상이 유지되는 정도로써, 함수율이 15wt%를 넘어갈 경우 가압과정에서 문제가 생기고, 10wt% 밑에서는 재료간의 결합이 제대로 이루어지지 않았다.

시험편의 성형은 핸드프레스와 폐석분 성형기를 이용하여 수행되었다. 우선, 핸드프레스로 성형을 하였을 경우 건조과정 후에 시험편을 집어 올리는 과정에서 시험편이 파괴되었는데, 이는 충분하지 못한 가압력으로 인해 재료간의 결합이 제대로 이루어지지 않아서 발생되었다고 판단된다. 따라서 폐석분 성형기를 제작하게 되었다.

Fig. 15와 16은 폐석분 성형기의 구성도 및 설계도를 나타낸다. 상·하로 이송하는 메인 실린더에 의하여 재료의 가압이 수행되므로, 가압과정에서 재료가 빠져나가지 못하도록 성형틀의 윗부분을 좌·우 이송이 가능한 덮개로 차단한다. 가압과정이 끝난 후 덮개를 원상태로 복귀시키고, 메인 실린더를 구동하여 성형된 시험편이 위로 배출되도록 하였다. 폐석분 성형기는 유압식으로 작동하며, 최대 가압력은 20MPa이다. 성형틀은 190×150×10T, 150×100×10T, Φ60×60T로 3가지 타입의 성형물을 만들 수 있도록 하였다.

Fig. 17에 폐석분 성형기를 나타내었다. 폐석분 성형기는 좌측 상단의 레버를 조작하여 소형 실린더와 메인 실린더의 구동이 되도록 하였다.

Fig. 18에 사용된 성형틀을 나타내었다. Φ60×60T 크기의 성형틀을 사용하여 실험을 실시하였는데, 이는 고온에서 전기로 내부에 시험편을 집어넣음에 있어서 적당한 크기이어야 하고, 시험편에 열을 골고루 가하기 위하여 내화벽돌과 맞는 면적이 적은 것을 택한 것이다.



Fig. 17 Waste stone powder molding machine

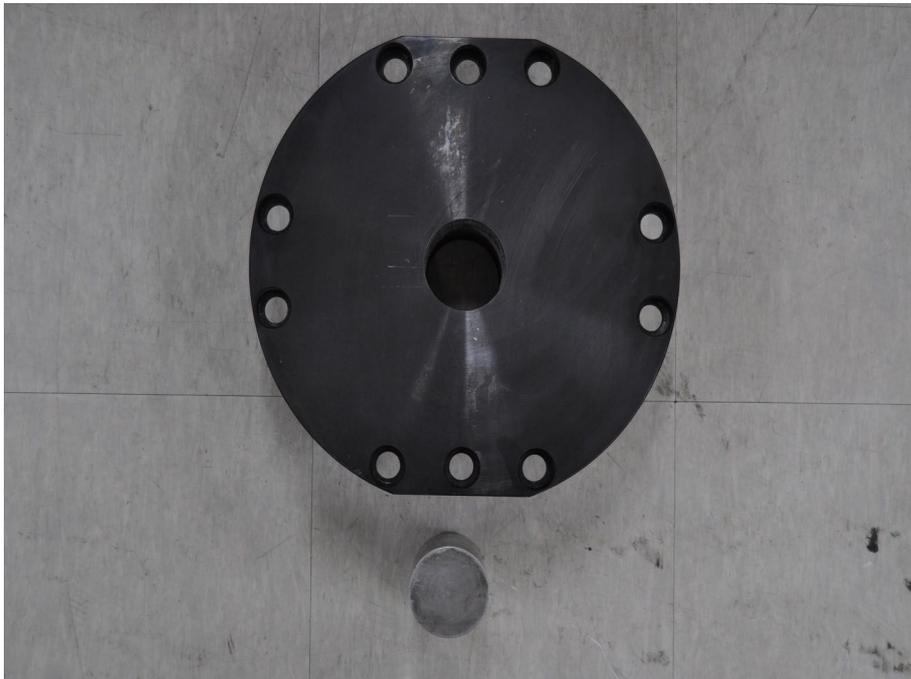


Fig. 18 Metallic pattern ($\Phi 60 \times 60T$)

폐석분 성형기로 제작된 시험편은 일정 온도에서 건조과정을 거치게 된다. 이는 시험편 내부의 수분을 제거하기 위한 것으로, 건조과정 없이 고온에서 급속소성을 할 경우 시험편이 파괴되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 시험편 표면에 형성되어지는 유리상층보다 물의 기화로 인한 시험편 내부의 부피 팽창력이 더 크므로 시험편이 파괴된다고 판단되어 충분한 시간 동안 건조과정을 거친 후 급속소성을 실시하였다. [2]

Fig. 19에 전기가마를 나타내었다. 20°C/min의 승온속도로 100°C까지 온도를 상승시킨 후 12시간 동안 시험편을 건조하였다.



Fig. 19 Electric kiln

건조된 시험편을 전기로를 이용하여 급속소성 하였다. 급속소성을 하는 이유는 앞에서 언급하였듯이 가열반응의 각 단계가 급속가열에 의하여 동시에 진행되어 시험편 표면에 유리상층이 형성됨과 동시에 시험편 내부에서는 다양한 화학분해 반응이 일어나 가스가 발생하기 때문이다. 즉, 시험편의 표면이 용융되어 고점도의 유리질 점막이 형성됨과 동시에 시험편에 함유되어 있던 수분이나 유기물이 분해되어 가스를 발생시킴으로써 유리질 점막을 팽창, 발포시키는 것이다. [9]

시험편의 소성은 해당온도에서 전기로의 문을 개방하고 시험편을 투입하여, 일정시간 동안 유지한 후 로냉하였다. 이 때, 승온속도는 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 이었고, 유지시간은 15분으로 고정하여 실험을 진행하였다. 소성온도는 $1,100\sim 1,200^{\circ}\text{C}$ 의 범위로, 50°C 의 간격으로 실험을 진행하였고, 이를 토대로 각각의 온도에 따른 시험편의 특성을 비교하고자 하였다. Fig. 20과 21에 전기로의 외부와 내부 모습을 나타내었다.

또한 시험편의 소성은 고온에서 수행되기 때문에 슬럼프가 발생하여 시험편이 내려앉을 우려가 있다. 슬럼프를 조정하는 방법으로, 열처리 조건을 조정하는 방법도 있지만, 첨가물인 유리분말의 양을 조절함으로써 이러한 현상을 조정할 수 있다. Fig. 22는 슬럼프가 발생할 경우, 시험편이 옆으로 퍼지는 것을 막기 위해 내화벽돌로 주변을 차단한 것으로써 내화벽돌과 시험편 사이에 어느 정도의 공간을 두어 열이 전달될 수 있도록 하였고, 일정 크기 이하로 시험편이 내려앉는 것을 방지하고자 하였다.



Fig. 20 Outside of electric furnace

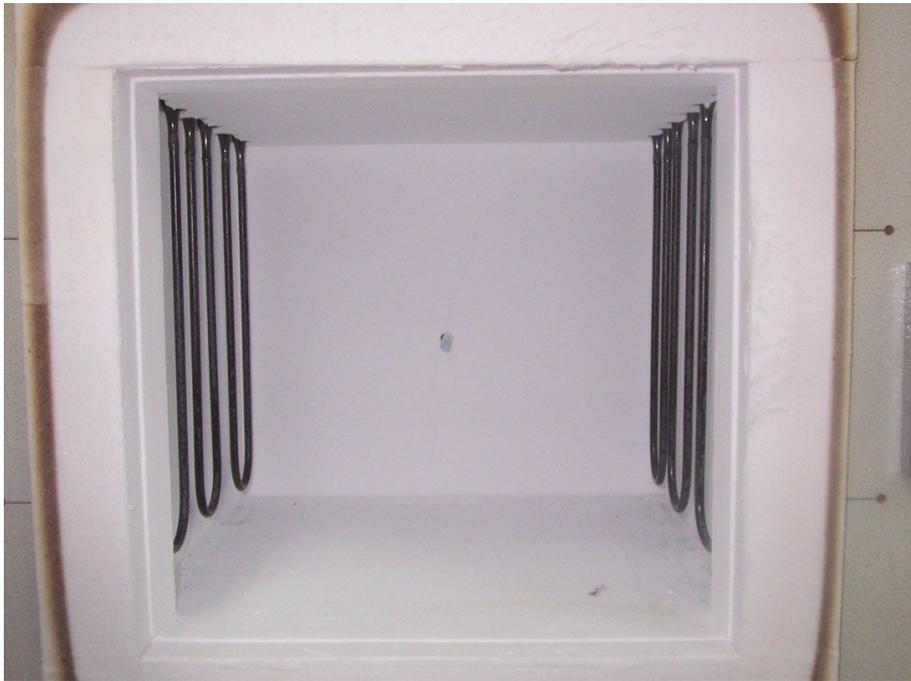


Fig. 21 Inside of electric furnace

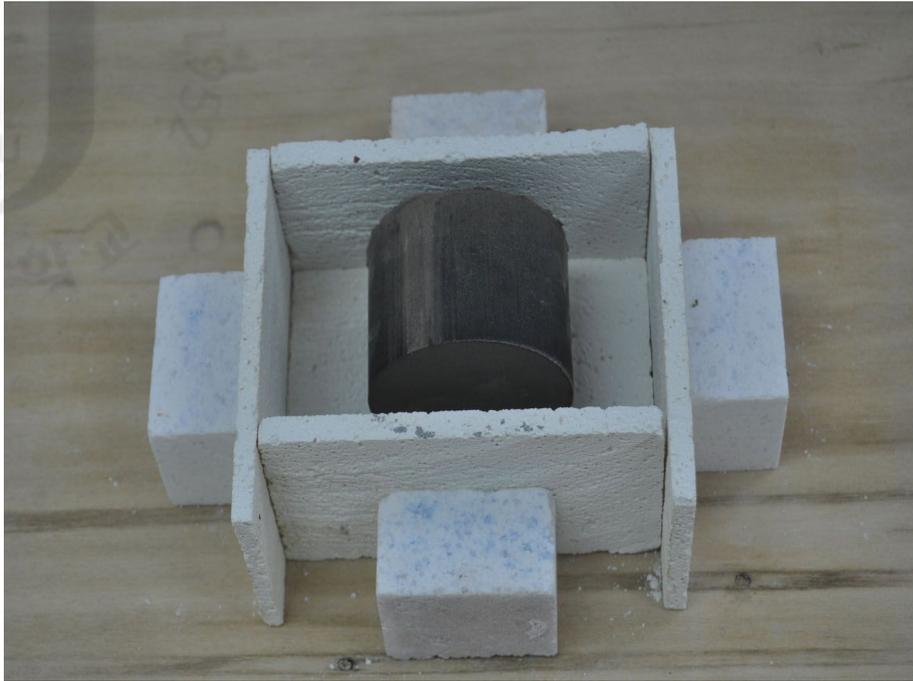


Fig. 22 Experimental method

3.4 물리적 특성조사

3.4.1 비중 측정

발포의 정도를 파악하기 위하여 비중을 측정하였다. 공시체는 육면체로 절단된 시험편을 사용하였고, KS L 8551(경량 발포 세라믹 블록)의 시험법에 따라 측정을 하였으며, 아래의 식 (5)에 따라 비중이 측정되었다. [25]

$$S = \frac{W}{V} \quad (5)$$

여기에서, S : 비중(g/cm^3)

W : 무게(g)

V : 부피(cm^3)

3.4.2 흡수율 측정

흡수율은 제조된 시험편이 포화시까지 흡수되는 물의 양을 나타내며 흡수율이 적은 것이 내구성과 강도가 좋다. KS L 8551(경량 발포 세라믹 블록)의 시험법에 따라 측정을 하였으며, 아래의 식 (6)에 따라 흡수율이 측정되었다. [25]

$$a = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (6)$$

여기에서, a : 흡수율(%)

m_1 : 시료의 포화 무게(g)

m_2 : 시료의 건조 무게(g)

IV. 결과 및 고찰

4.1 소지재료의 소성특성

다공성 세라믹을 제조하기에 앞서 현무암 석분슬러지를 고온에서 소성할 경우의 형상을 파악하고자 일반적인 소성실험을 행하였다.

유리분말과 CaCO_3 의 첨가 없이 현무암 석분슬러지와 점토를 기본 배합으로 하여 세라믹을 제조하였는데, 우선 현무암 석분슬러지만을 가지고 실험을 수행하였다. 열처리는 급속소성이 아닌 일반소성 방법을 선택하였으며, 소성온도 1,050~1,150°C의 범위에서 50°C 간격으로 실험을 수행하였다. 이 때, 승온속도는 20°C/hr로 해당온도에서 1시간 동안 유지한 후 로냉하였다. 시험편은 핸드프레스를 이용하여 $\Phi 40 \times 5\text{mm}$ 의 크기로 성형하였으며, 1,150°C에서 소성한 시험편의 형상을 Fig. 25(a)에 나타내었다. 시험편 표면의 색상은 1,150°C에서 진한 갈색이고, 소결온도가 낮아질수록 얼어짐을 알 수 있었다. 또한, 표면의 모습은 1,150°C의 경우 약간의 슬럼프가 발생하여 표면에 반질반질한 유리질이 형성되며, 1,100°C 이하의 소성온도에서는 유리질이 나타나지 않음을 알 수 있었다. 이를 통하여 현무암 석분슬러지는 1,150°C 이상의 온도에서 시험편의 표면에 용융상이 형성됨을 알 수 있었다. 1,150°C에서 소성한 시험편의 XRD 분석결과 및 XRD Peak List를 Fig. 23과 24에 나타내었으며, 적철석(Hematite), 회장석(Anorthite), 투휘석(Diopside)의 광물성분이 나타났다.

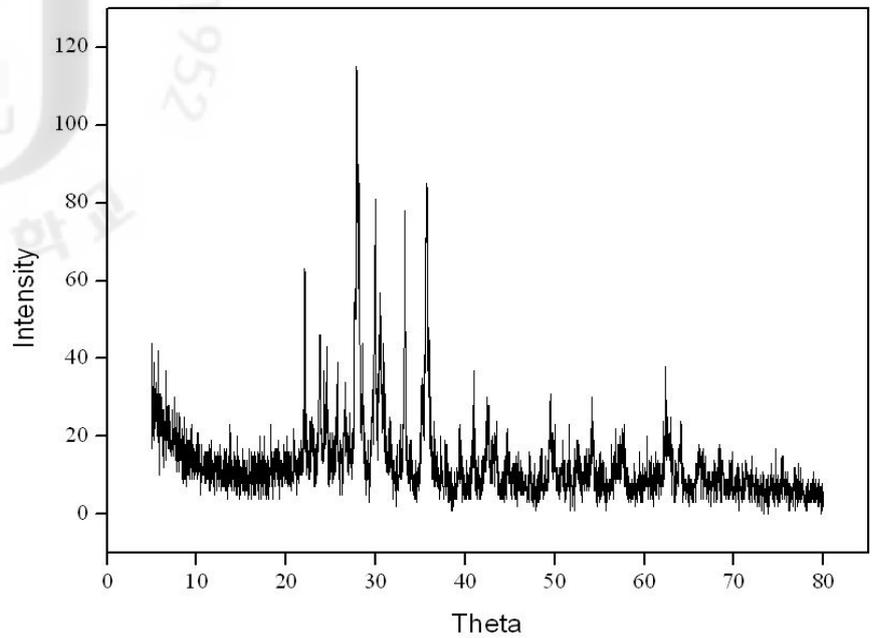


Fig. 23 XRD pattern of B-1150 specimen

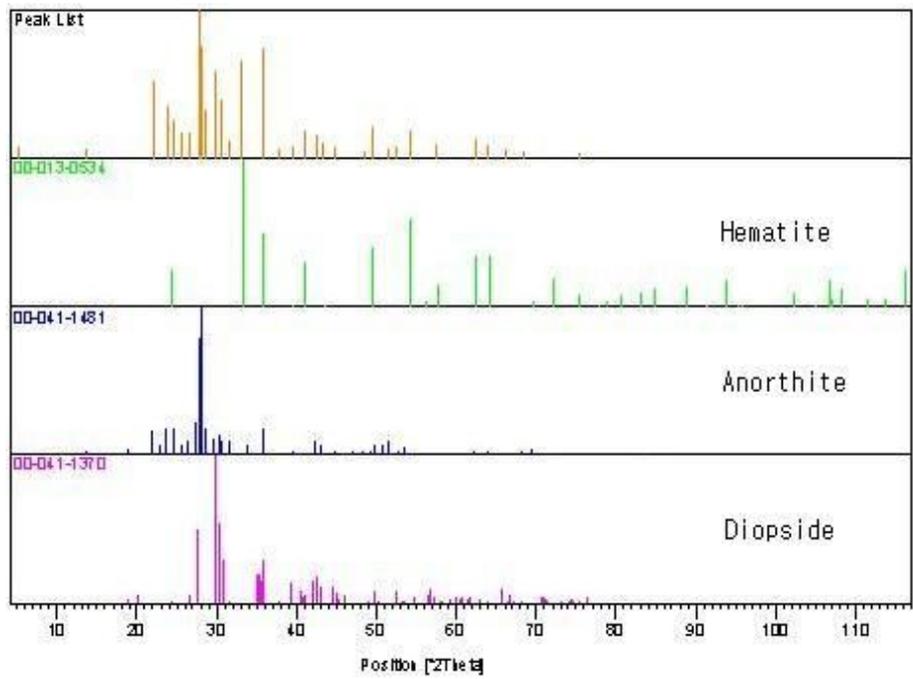


Fig. 24 XRD peak list of B-1150 specimen



(a) Ceramic specimen (1,150°C)

(b) Compressive strength specimen

Fig. 25 Ceramic and compressive strength specimen

압축강도, 흡수율 및 비중을 조사하기 위하여 Fig. 25(b)와 같이 $\Phi 55 \times 60\text{mm}$ 의 크기로 시험편을 제작하였다. 현무암 석분슬러지와 점토의 배합을 각각 80~100wt%, 0~20wt%로 조정하여 합이 100wt%가 되도록 하였으며, 이 외의 재료는 첨가되지 않았다.

표면에 균열이 없는 시험편을 제작하기 위하여 혼합된 재료를 핸드프레스로 가압성형한 후 100°C에서 5시간 동안 건조하였으며, 1,050°C에서 7시간 동안 유지한 후 로냉하여 시험편을 제작하였다. 이 때 승온속도는 80°C/hr로, 시험편을 도자기를 굽는 방식과 비슷하게 천천히 소성함으로써 시험편 표면에 균열이 발생하는 현상을 없애고자 하였다. Table 3에 각 시험편에 대한 물리적 특성을 나타내었다.

세라믹 시험편의 압축강도는 KS F 4004 콘크리트벽돌에서 규정하고 있는 압축강도 8MPa이상의 범위와 유사하게 나타나지만, 점토의 첨가에 따라 압축강도가 낮아짐을 확인할 수 있었다. 또한 각 시험편의 흡수율은 28%이상으로 문제점을 보였다. 이러한 압축강도의 저하 및 높은 흡수율은 현무암 석분슬러지와 점토간의 결합이 제대로 이루어지지 않았음을 나타내는 것이다.

소성온도가 각기 다른 두 재료간의 결합을 확인할 수 있는 표면적인 방법으로 용융상의 형성을 들 수 있는데, 현무암 석분슬러지의 경우 1,150°C에서 표면에 용융상이 관찰되며, 점토는 일반적으로 1,200°C 이상에서 소성한다. 소성온도를 높이는 방법 외에도 유리분말과 같은 별도의 첨가물을 혼합함으로써 용융상을 형

성할 수 있다. 용융상의 형성으로 인하여 흡수율은 낮아지게 되며, 압축강도는 증가할 것으로 판단된다.

Table 3. Characteristics of ceramic specimens

Characteristics	B100	BC91	BC82
Compressive strength(MPa)	9.34	8.84	6.31
Specific gravity(g/cm ³)	1.51	1.49	1.51
Water absorption(%)	29.07	29.65	28.64

4.2 점토 첨가에 따른 발포특성

점토의 화학성분은 SiO₂ 62.26%, Al₂O₃ 15.55%, Fe₂O₃ 6.88%, CaO+MgO 1.48%, Na₂O+K₂O 2.78%로 Riley의 발포범위에 해당한다. 따라서 점토만을 사용하여 발포실험을 수행하였다.

점토를 100wt%로 하여 1,150~1,200℃의 소성온도에서 실험을 수행하였다. 열처리 방식은 급속소성을 하였으며, 5℃/min의 승온속도로 해당온도에서 15분간 유지한 후 로냉하였다.

Fig. 26과 27에 각 온도에서 소성된 시험편의 형상을 나타내었다. 점토의 광물 성분에는 석영이 포함되어 있는데, 석영은 고온에서 용융하여 유리상을 형성한다. 하지만, 시험편의 표면에서는 유리상이 형성된 흔적을 발견할 수 없었다. 시험편 외부에 유리상의 형성 흔적을 발견할 수 없었지만, 시험편 내부에서 Black Core 현상을 확인할 수 있었다. 이는 1,150℃와 1,200℃에서 모두 발견되었는데, 1,150℃의 경우는 부분적으로 미세하게 발견되었다. 이러한 현상과 관련되는 발포기구인 시험편의 표면을 감싸는 유리질의 점막이 충분하지 않아 표면거동이 점성거동이 아닌 표면치밀화로 되면서 시험편 내부에서 발포가 이루어진 것이다. 이 때, 내부에서 일어난 화학반응식은 다음 식 (7)과 같으며 이는 환원반응으로 인공경량골재의 대표적인 발포기구이다. [9, 21]





(a) Inside



(b) Outside

Fig. 26 Specimen of 100wt% clay (1,150°C)



(a) Inside



(b) Outside

Fig. 27 Specimen of 100wt% clay (1,200°C)

또한 점토의 첨가에 따른 특성을 조사하기 위하여 현무암 석분슬러지와 점토를 80wt%~100wt% : 0wt%~20wt%로 조정하여 합이 100wt%가 되도록 하였고, 유리분말과 CaCO_3 를 각각 100wt%와 5wt%로 고정하여 실험을 진행하였다. 실험시 소성온도는 1,150°C였으며, 15분간 급속소성을 한 후 로냉하였다.

Fig. 28에 각 시험편의 비중 및 흡수율을 나타내었다. 모든 배합비에서 물에 뜨는 경량골재를 제조할 수 있었지만 BC91 시험편의 경우가 가장 우수하였다. 현무암 석분슬러지 100wt%인 B100 시험편의 경우 BC91 시험편보다 비중이 높았고, 반대로 BC82 시험편보다 낮았다. 이는 Fig. 29에 나타난 시험편의 단면을 통해서도 알 수 있다. 기공의 크기를 비교하였을 때, BC91 시험편의 경우 다른 시험편에 비하여 기공의 크기가 더 큼을 알 수 있고, B100, BC82 순으로 기공의

크기가 줄어들음을 확인할 수 있다.

또한 점토의 강열감량은 9.33%로 현무암 석분슬러지의 강열감량인 0.56%보다 16배가량 차이가 난다. 이 때 잃어버리는 성분은 물, 이산화탄소 등으로, 이러한 성분으로 인하여 점토의 첨가가 발포에 도움이 되리라 판단된다.

하지만 BC82 시험편의 경우 비중이 커짐을 알 수 있는데, 이것은 점토의 첨가로 가스 발생 등 발포에 도움은 되지만 점토 자체가 소성되기 때문에 비중이 커지며, 이 과정에서 치밀화 되어 흡수율은 낮아졌으리라 여겨진다. 따라서 적절한 열처리 조건 및 배합비를 갖출 경우 경량골재를 제조함에 도움이 되리라 판단된다.

본 연구에서는 BC91 시험편의 경우를 기준으로 하여 유리분말의 첨가와 CaCO_3 의 첨가에 따른 특성을 비교하였다.

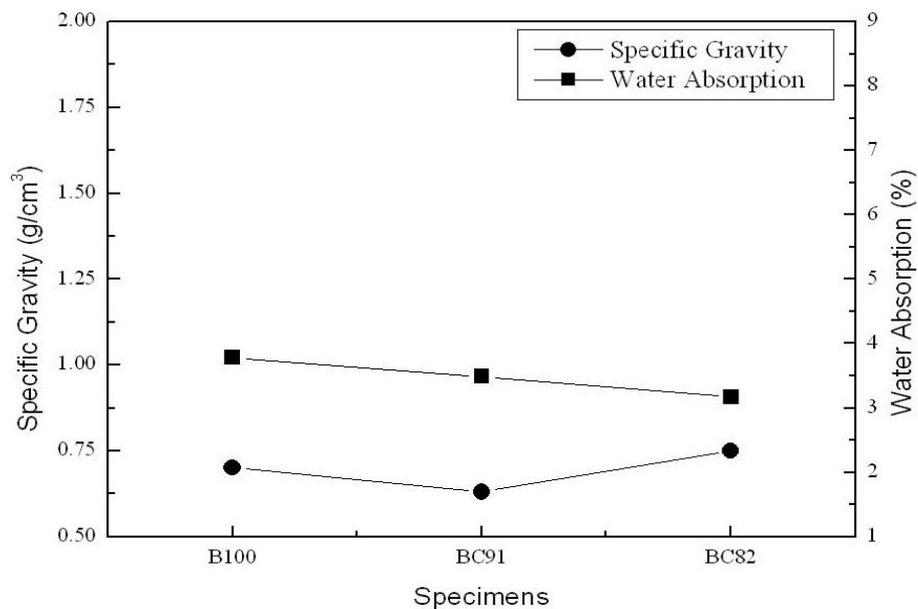


Fig. 28 Characteristics about clay content



(a) B100



(b) BC91



(c) BC82

Fig. 29 Specimens about clay content

4.3 유리분말 첨가에 따른 발포특성

유리분말의 첨가에 따른 특성을 조사하기 위하여 현무암 석분슬리지 90wt%, 점토 10wt%, CaCO₃ 5wt%로 고정하고, 유리분말의 양을 배합물의 50%와 100%로 각각 조정 후 시험편을 제작하였다. 이 때, 열처리 조건은 5°C/min의 승온 속도로 1,100~1,200°C의 범위에서 50°C의 간격으로 실험을 수행하였으며, 해당온도에서 15분간 급속소성을 한 뒤 로냉하였다.

Fig. 30과 31에 소성온도에 따라서 유리분말의 첨가량에 따른 비중 및 흡수율을 나타내었다. KS L 8551(경량 발포 세라믹 블록)의 시험법에서는 비중 0.45초과~0.55미만, 흡수율 5.0%이하로 규정하고 있는데, 본 연구에서는 유리분말 100wt%를 첨가하여 1,200°C에서 급속소성을 행한 시험편의 경우 이 규정을 만족하였다. 또한 본 연구를 통하여 경량골재를 제조하기 위한 조건을 만족시키는 실험조건은 유리분말 100wt%에 소성온도 1,150°C 이상임을 알 수 있었다. 유리분말을 첨가하지 않은 시험편은 비중 1.53g/cm³, 흡수율 18.02%로 나타났으며, 내부에 발포가 진행된 흔적을 발견할 수 없었다. 이는 단지 해당온도에서 소성이 진행되었음을 보여주는 것이다.

각 소성온도에 따른 유리분말 첨가량에 대한 비중 및 흡수율의 관계를 파악하여 보면, 비중이 높을수록 낮은 흡수율을 보임을 알 수 있다. 이는 유리분말의 첨가에 따른 시험편 내부의 기공형성 및 시험편 표면의 용융층 형성과 관련된 것으로 판단된다. Fig. 32와 33은 시험편의 형상 및 단면을 나타낸 것으로, 같은 소성온도일지라도 유리분말의 첨가량이 많음에 따라 시험편의 표면에 더 많은 용융상이 형성되어짐을 알 수 있다.

본 연구에서 사용된 유리분말은 시험편의 표면에 유리상을 형성하여 시험편 내부에서 발생하는 발포가스가 외부로 배출되는 것을 막아 경량골재를 제조하는데 도움은 주지만, 내부 기공의 형성으로 인하여 흡수율은 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 Riley의 발포범위에 속하지 않는 재료도 유리분말의 첨가로 인해 시험편 외부에 유리상이 형성되는 점성거동을 함으로써 시험편 내부에서 발생하는 발포가스를 막아 경량골재 제작이 가능하리라 판단된다.

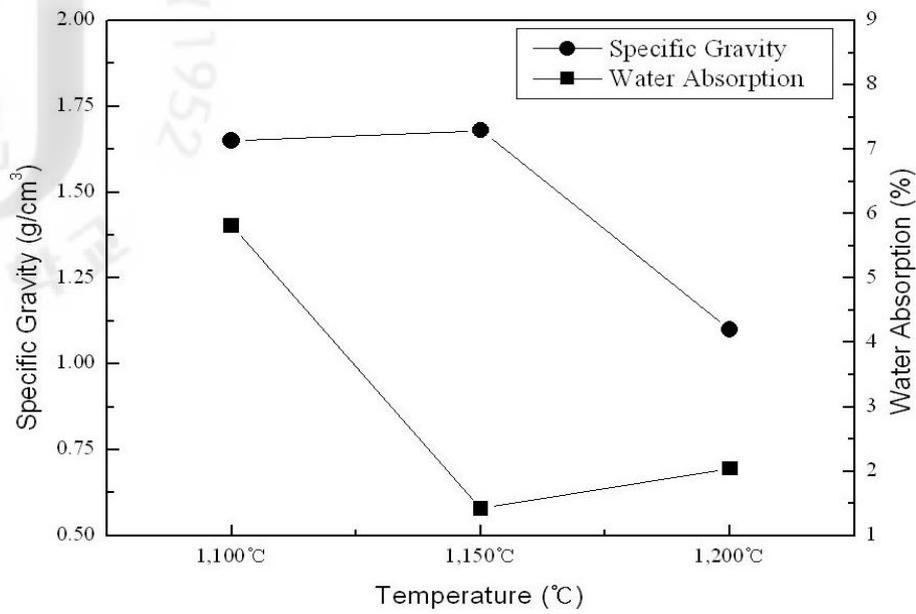


Fig. 30 Characteristics about glass powder 50wt%

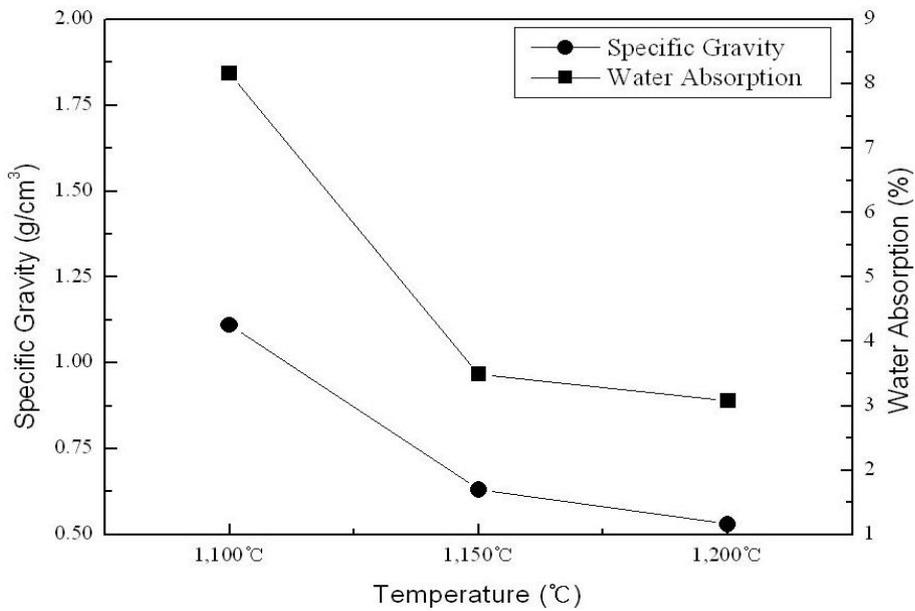


Fig. 31 Characteristics about glass powder 100wt%



(a) 1,100°C



(b) 1,150°C



(c) 1,200°C

Fig. 32 Specimens about glass powder content (glass powder 50%)



(a) 1,100°C



(b) 1,150°C



(c) 1,200°C

Fig. 33 Specimens about glass powder content (glass powder 100%)

4.4 탄산칼슘(CaCO₃)의 첨가에 따른 발포특성

CaCO₃의 첨가에 따른 특성을 조사하기 위하여 현무암 석분슬러지 90wt%, 점토 10wt%, 유리분말 100wt%로 각각 고정하고 CaCO₃의 양을 0wt%~10wt%로 변화시키며 실험을 수행하였다.

열처리는 5°C/min의 승온속도로 1,150°C에서 급속소성을 하였으며, 해당온도에서 15분간 유지한 후 로냉하였다.

Fig. 34에 CaCO₃의 첨가에 따른 비중 및 흡수율을, Fig. 35에 CaCO₃의 첨가량에 따른 시험편의 단면을 나타내었다.

Fig. 35에서 나타나듯이 CaCO₃의 함유량이 증가함에 따라 시험편의 표면에 과량의 용융상이 형성됨을 확인할 수 있었다. CaCO₃는 발포기구에서 용융상을 형성하는 성분으로, 과다한 용융상의 형성은 소성수축력을 증가시키므로 시험편의 경량화에 도움이 되지 않으며, 이에 따른 치밀화로 인하여 흡수율은 감소하게 된다. 또한 소성수축력의 증가로 인하여 강도도 증가될 것이라 판단되어진다. [2]

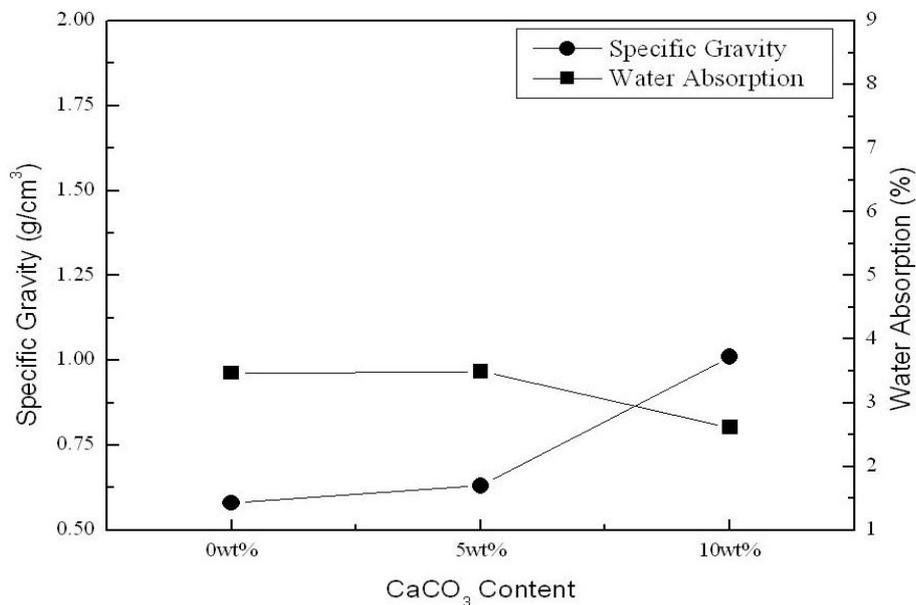


Fig. 34 Characteristics about CaCO₃ content



(a) 0%



(b) 5%



(c) 10%

Fig. 35 Specimens about CaCO_3 content

V. 결 론

석재산업의 부산물인 현무암 석분슬러지를 활용하고자, 첨가물인 점토와 소다 유리, 발포제인 CaCO_3 를 첨가하여 다공성 세라믹을 제조하였다. 다공성 세라믹을 제조하기 위한 이론, 제조된 시험편의 형상 및 각각의 첨가량에 따른 특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 첨가물인 유리분말은 점성거동과 관련되어 시험편의 표면에 유리상을 형성하여, 시험편의 내부에서 발생한 가스가 시험편 외부로 배출되는 것을 막아 발포가 진행되도록 한다. 또한 표면치밀화에 따른 거동은 시험편의 외부 기공이 치밀화됨에 따라 시험편 내부에서 발생한 가스가 외부로 배출되어지는 속도가 느려짐으로써 시험편 내부에 가스가 포집되어 발포가 진행된다.
2. Riley의 발포 조성범위에 속하는 점토는 $1,200^\circ\text{C}$ 의 소성온도에서 시험편의 표면에 유리상이 형성된 흔적을 발견할 수 없었지만, 시험편 내부에서 Black Core가 생성된 것으로 보아 점성거동이 아닌 표면치밀화로 인해 시험편의 발포가 진행되었음을 확인할 수 있었다.
3. 현무암 석분슬러지는 자체적으로 Riley의 발포 조성범위에 속하지는 않지만 유리분말 등의 첨가로 인해 일정온도 이상에서 시험편 표면에 고점도의 유리상을 형성함으로써 시험편 내부에서 발생한 가스의 배출을 막아 발포되어 다공성 세라믹을 제조할 수 있었다.
4. 유리분말이 100wt%와 CaCO_3 5wt%가 첨가된 BC91시험편의 경우, $1,150^\circ\text{C}$ 이상에서 다공성 세라믹을 제조할 수 있었으며 $1,200^\circ\text{C}$ 에서 소성한 시험편의 경우 비중 $0.53\text{g}/\text{cm}^3$, 흡수율 3.08%로 KS L 8551(경량 발포 세라믹 블록)을 만족함을 확인할 수 있었다.

5. 유리분말을 첨가하지 않은 시험편의 경우 비중 $1.53\text{g}/\text{cm}^3$, 흡수율 18.02%로 흡수율이 다소 높게 나타났으며, 발포가 진행된 흔적을 발견할 수 없었다.

6. 각 온도에 따른 유리분말 첨가량에 대한 비중 및 흡수율의 관계를 파악하여 보면 비중이 높을수록 낮은 흡수율을 보임을 알 수 있었는데, 이는 유리분말의 첨가에 따른 시험편 내부의 기공형성 및 시험편 표면의 용융층 형성으로 인한 치밀화와 관련된 것으로 판단된다.

7. 현무암 석분슬러지를 활용하여 경량골재를 제조할 시에는 유리상을 형성할 수 있는 물질이 필수적으로 첨가되어야 하며, 재료의 배합 및 열처리 온도에 따라 다양한 특성을 갖는 다공성 세라믹을 제조할 수 있다.

참고문헌

- [1] Xingrun Wang, Yiyang Jin, Zhiyu Wang, Yongfeng Nie, Qifei Huang, Qi Wang, 2009, "Development of lightweight aggregate from dry sewage sludge and coal ash", Waste Management 29, pp. 1330~1335.
- [2] 권용준, 김유택, 이기강, 김영진, 강승구, 김정환, 박명식, 2001, "점토/소각재/첨가제계 인공 경량골재의 발포기구", J. Kor. Ceram. Soc., Vol. 38, No. 9, pp. 811~816.
- [3] Nuno Almeida, Fernando Branco, Jose Roberto Santos, 2007, "Recycling of stone slurry in industrial activities : Application to concrete mixtures", Building and Environment 42, pp. 810~819.
- [4] Nuno Almeida, Fernando Branco, Jorge de Brito, Jose Roberto Santos, 2007, "High-performance concrete with recycled stone slurry", Cement and Concrete Research 37, pp. 210~220.
- [5] 정진섭, 이종천, 양극영, 소광호, 2008, "석재 가공시 발생한 석분슬러지의 콘크리트 혼화재료로의 활용", J. Korean Inst. Building construction., Vol. 8, No. 6, pp. 83~89.
- [6] 김치권 · 손정수 · 김병규 · 손용운, 1997, "석분 슬러지 재활용 방안 연구", 한국자원연구소 연구보고서
- [7] 김기영, 2006, "현무암 석분슬러지의 공학적 특성 및 활용 방안 연구", 제주대학교 대학원 박사논문
- [8] 추용식, 이종규, 심광보, 2005, "유리연마슬러지를 사용한 경량골재 제조 및 골재의 내부기공이 물성에 미치는 영향에 관한 연구", J. Kor. Ceram. Soc., Vol. 42, No. 1, pp. 37~42.
- [9] 한상목, 신대용, 강상규, 1998, "저급점토를 이용한 다공성 세라믹스 제조", J. Kor. Ceram. Soc., Vol. 35, No. 6, pp. 575~582.
- [10] 채영배, 1990, "경량골재의 원료광물", J. Miner. Soc. Korea., Vol. 3, No. 1, pp. 24~30.
- [11] 추용식, 이종규, 김원기, 심광보, 2003, "유리연마슬러지를 사용한 단열골재

- 제조에 관한 연구”, J. Kor. Soc. of Waste Mana., Vol. 20, No. 8, pp. 765~772.
- [12] 한국석재산업총람, 2010, 한국석재신문사
- [13] 한국산업규격, KS F 2530 (석재)
- [14] 한국산업규격, KS F 2534 (구조용 경량 골재)
- [15] 정진섭, 송갑용, 안정현, 김태형, 2007, “석재가공에서 발생한 석분슬러지의 아스팔트 콘크리트 채움재료의 활용”, J. Kor. Soc. Civil Engineers., Vol. 27, No. 4D, pp. 457~464.
- [16] 손정수 · 김병규 · 김치권, 1995, “폐석 및 석분슬러지를 활용한 인조석판재의 제조”, J. Korean Inst. Resources recycling, Vol. 4, No. 1, pp. 4~11.
- [17] J. Ma. Rincon · J. Caceres · C. J. Gonzalez-Oliver · D. O. Russo · A. Petkova · H. Hristov, 1999, “Thermal and Sintering Behaviour of Basalt Glasses and Natural Basalt Powders”, J. of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 56 pp. 931~938.
- [18] 오준성, 장복기, 임용무, 1998, “Red Mud를 원료로한 경량골재의 제조”, J. Kor. Solid Wastes Eng. Soc., Vol. 15, No. 1, pp. 16~23.
- [19] Suad Al-Bahar · V.T.L. Bogahawatta, 2006, “Development of Lightweight Aggregates in KUWAIT”, The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 31, No. 1C, pp. 231~239.
- [20] Ing-Jia Chiou, Kuen-Sheng Wang, Ching-Ho Chen, Ya-Ting Lin, 2006, “Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash”, Waste Management, 26, pp. 1453~1461.
- [21] 강신휴·이기강, 2010, “폐유리를 재활용한 인공경량골재의 발포기구”, J. Kor. Ceram. Soc., Vol. 47, No. 5, pp. 445~449.
- [22] Chen-Chiu Tsai, Kuen-Sheng Wang, Ing-Jia Chiou, 2006, “Effect of SiO₂-Al₂O₃-flux ratio change on the bloating characteristics of lightweight aggregate material produced from recycled sewage sludge”, J. Hazard. Mater. B134, pp. 87~93.
- [23] 최상훈 · 한상목 · 서일영, 1972, “송도 점토를 사용한 인공 경량골재 제조에 관한 연구”, J. Kor. Ceram. Soc., Vol. 9, No. 2, pp. 49~55.
- [24] Riley, C.M., 1950, “Relation of chemical process to the bloating clay”, J. Am. Ceram. Soc. Vol. 34, No. 4, pp. 121~128.
- [25] 한국산업규격, KS L 8551 (경량 발포 세라믹 블록)

감사의 글

뚜렷한 목표 없이 멋모르고 대학원에 들어온 것이 엇그제 같은데 벌써 2년이라는 시간이 흘러 졸업논문을 제출하게 되니 감회가 새롭습니다. 연구과제를 하며 힘든 일도 많았지만, 이제 와서 생각해보니 제가 접해보지 못한 분야에 대해 배울 수 있는 유익한 시간이었습니다.

우선, 미숙한 저를 지난 2년 동안 많은 조언과 격려로 이끌어주신 김귀식 교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 실험이나 과제를 진행할 때 저의 부족한 부분을 일깨워주시고, 많은 도움을 주셔서 대학원 생활을 잘 해낼 수 있었습니다. 또한, 좀 더 나은 논문을 만들 수 있도록 많은 관심을 가지고 살펴주신 정동원 교수님과 박윤철 교수님께 진심으로 감사드립니다.

학부생활과 대학원 생활동안 많은 것을 가르쳐주신 권기린 교수님, 허종철 교수님, 현명택 교수님께도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

많은 관심과 조언을 주신, 연구실 선배 경조형, 세웅이형, 정근이형, 명근이형, 제석이형, 실험을 하며 많은 도움을 준 후배 동찬이, 동호, 윤호, 용우, 바쁘지만 많은 도움을 주려고 노력해 준 동기 충욱이 모두 감사합니다.

그리고 정신적으로 힘들거나 포기하고 싶을 때, 많은 조언과 도움을 준 승건이형, 연구 분야는 다르지만 많은 의지가 된 용석이형, 종우, 정윤이에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 더불어 같이 졸업하는 승건이형과 종우, 충욱이에게 다시 한번 고생 많았고 축하한다고 전하고 싶습니다.

마지막으로 제가 지금까지 대학원 생활을 무사히 마칠 수 있도록 저를 믿고 묵묵히 지켜봐 주신 할아버지, 아버지, 어머니, 동생에게 감사의 마음을 전합니다.

2012년 2월 김현관