

# 폐석분을 사용한 시멘트 2차 제품의 물리적 특성에 관한 연구

## A Study on the Variation of Physical Properties on the Secondary Product of Cement by Using Crushed Stone Powder

(Received November 29, 2011 / Revised December 20, 2011 / Accepted December 26, 2011)

박지선<sup>1)\*</sup>, 이세현<sup>1)</sup>, 송 훈<sup>2)</sup>

한국건설기술연구원 미래건축연구실<sup>1)</sup>, 한국세라믹기술원 그린세라믹본부<sup>2)</sup>

Ji-Sun Park<sup>1)</sup>, Sea-Hyun Lee<sup>1)</sup>, Hun Song<sup>2)</sup>

Korea Institute of Construction Technology, Goyang, 411-712, Korea<sup>1)</sup>

Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Seoul, 153-801, Korea<sup>2)</sup>

### Abstract

One of the basic physical properties of the hardened cement paste, the rigidity, is deteriorated during concrete matrix forming, depending on the replacement rate of the crushed stone powder, and due to drying shrinkage. Therefore, the concrete containing crushed stone powder has been limitedly used as non-structural construction material.

To improve these disadvantages, a hydrothermal reaction employing method can be considered. High-temperature and high-pressure water is involved in the hydrothermal reaction in the mixing with specific materials. The rigidity improving mechanism is related to the synthesis of calcium silicate. The calcium silicate is produced through reaction between calcium compounds and the silicic acid. Various kinds of calcium silicate can be produced depending on the CaO/SiO<sub>2</sub> mole ratio, the temperature of the hydrothermal synthesis, the pressure, and the reaction time. The product of the synthesis mechanism, tobermorite crystal, plays a pivotal role for the rigidity reinforcement.

The crushed stone powder, analyzed in this study, contains 50 to 60% of SiO<sub>2</sub> and 10 to 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The composite rate is appropriate to create the tobermorite crystal through formation of hardened cement matrix under the hydrothermal synthetic conditions and with the CaO in the cement. Moreover, further reinforcement was promoted using the property of material under the identical density through promoting the formation of tobermorite crystal.

**키워드** : 폐석분, 시멘트, 경화시멘트 구조, 수열합성

**Keywords** : *crushed stone powder, cement, hardened cement matrix, hydro thermal reaction*

## 1. 서론

시멘트 2차 제품 제조 방식은 제품에 따라 사용되는 원료가 다르지만, 50 MPa 이상의 압축강도를 가지는 제품의 경우 대부분 고온고압 증기양생을 통한 제품의 제조를 실시한다. 콘크리트 파일, 시멘트 압출성형 패널 등이 대표적인 제품이라 할 수 있다. 고온고압 증기양생의 특성을

고려하여 시멘트에 포함되어 있는 CaO 성분과 반응을 충분하게 일으킬 수 있는 적정량의 SiO<sub>2</sub>를 공급하여 단시간에 고강도를 얻는 방식에 의하여 제품을 성형한다.

SiO<sub>2</sub> 공급원으로 가장 활발하게 사용하는 원료는 규석분이다. 규석분의 일반적인 SiO<sub>2</sub> 함량은 90%를 상회하는 수준의 것을 사용한다. 우리나라의 경우 대부분 금평산 규석분을 사용하고 있으며 사용하는 입도는 시멘트의 분말도와 비슷한 수준의 것을 사용한다.

본 연구는 이러한 시멘트 2차 제품 제조공정에 사용하는 규석분을 석산공장에서 발생하는 폐석분으로 치환하여

\* Corresponding author  
E-mail: batsun@kict.re.kr

생산하고자 하는 것이다. 규석분의 경우 환경파괴를 전제로 하기 때문에 친환경적인 제품 생산을 위하여 폐석분을 일정부분 치환하여 물리적 특성 검토를 실시하고자 하였다. 국내에서 발생하는 폐석분의 석산, 돌가공 공장, 골재 파쇄업장 등 매우 다양한 공정에서 배출되고 있다. 폐석분은 Fig.1에서와 같이 많은 양이 발생되고 있으나 재활용은 매우 저조한 상태이다. 이러한 폐석분은 규석분과 달리 성분이 불균질한 특성을 가지고 있어 현장 적용시 관리에 많은 어려움이 따른다.

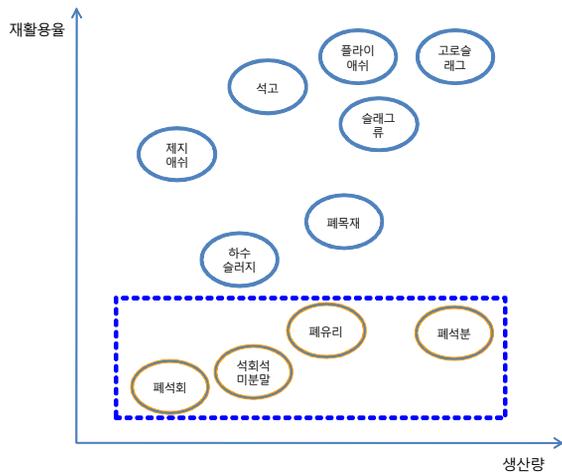


Fig.1 Occurrences of by-product and waste on the construction projects

본 연구는 압출성형 패널제조 공정에서 규석분을 일정부분 치환하여 폐석분으로 활용하고 이에 대한 물리적 특성을 비교하고자 하였다. 폐석분의 치환을 규석분의 25%, 50%를 실시하였으며, 치환시 시멘트와의 수화활성을 위하여 C/S mole ratio(이하, C/S 몰비)를 조정하여 적용하였다. Fig.2 및 Fig.3은 폐석분 생산 공정의 필터프레스에서 발생되는 과정 및 폐석분을 나타낸다.



Fig.2 Occurrence process of crushed stone Powder



Fig.3 Quarry

## 2. 재료특성

### 2.1. 폐석분의 전처리

실험에 사용된 폐석분은 쇄석 채취과정에서 발생된 폐기물을 건조하여 제조한 것이다. 석산에서 발생하는 미분을 포집하는 방법은 건식공정에 의한 방법과 습식 공정에 의한 방법 2가지가 있다. 건식공정의 경우 집진방식에 의하여 미분을 포집하는 방법이고 습식 방법의 경우 슬러리 상태의 폐수를 필터프레스 과정을 거쳐 일정 함수를 유지하는 방식으로 처리를 실시한다. 이를 위하여 화성 석산에서 채취한 폐석분을 건조 파쇄 한 후 이를 규석분 사용량의 최대 50%까지 치환하여 압출실험을 진행하였다.

폐석분은 Fig.4에서와 같이 SiO<sub>2</sub>를 주성분으로 하고 있으며 이외에 CaO 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등이 미세하게 포함되어 있다.

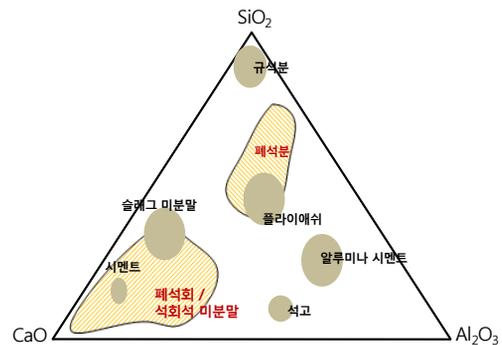


Fig.4 Components of base material

수분이 30% 이상 함유되어 있기 때문에 원료 혼합을 위하여 건조를 실시하여야 한다. 일반적인 건조를 실시할 경우 건조 과정에서 비용의 소요가 과다하게 발생하여 경제성을 상실할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 30% 정도의 함수율을 가진 폐석분을 펠렛 상태로 제조 한 후 자연 건조를 실시하고 이를 분쇄하여 전처리를 실시하였다.

### 2.2. 치환재료의 물리적 성질

본 연구에서는 경기도 양주지역의 석산공장에서 발생하는 폐석분 슬러지를 필터프레스에 의하여 수분을 일정량 제거하고 고형화한 폐석분을 채취하여 실험에 사용하였다. 폐석분의 물리적 성질을 파악하기 위하여 아래와 같은 분석을 실시하였다.

### 2.2.1 입도

일반적으로 시멘트 압출성형 패널 제작시 사용되는 시멘트와 결합하는 규석분을 폐석분으로 치환시 물성변화 예측을 위하여 입도분석을 Fig.5와 같이 실시하였으며 폐석분과 규석분의 입도범위를 Table 1과 같이 비교하였다.

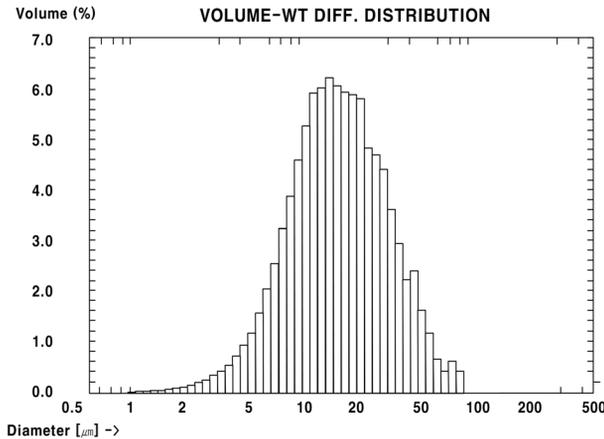


Fig.5 Particle size analysis of crushed stone powder

Table 1. Particle size value comparison between crushed stone powder and silica powder

Material	Mean	Standard deviation	Median
Cushed stone powder	19.13 μm	13.72 μm(71.7%)	14.98 μm
Slica powder	20.82 μm	14.77 μm(70.9%)	16.69 μm

### 2.2.2 흡수율

규석분, 폐석분을 KS F 2504 ‘잔골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법’으로 측정하여 Table 2와 같이 나타내었다.

Table 2. Absorption value comparison between crushed stone powder and silica powder

Material	Crushed stone powder	Silica powder
Absorption(%)	5.23	3.54

### 2.2.3 밀도

시멘트경화체의 배합계획을 위한 사용재료의 밀도값 측정은 KS L 5110 ‘시멘트의 밀도 시험 방법’을 기준으로 실시하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Density of the materials used in the experiment

Material	Cement	Crushed stone powder	Silica powder	Sand	Silica fume
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.15	2.71	3.09	2.65	2.27

### 2.2.4 현미경에 의한 입형분석

폐석분과 규석분의 입형분석을 위하여 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, 이하 SEM)을 이용하여 Fig.6, Fig.7과 같이 2,000배의 배율로 분석하였다. 이를 위하여 분말형태의 시료를 분석을 하기위해 SEM에서 관찰할 수 있는 스테이지에서 도전율을 높여주는 카본 테이프를 이용하여 부착하고 표면은 전도율이 낮은 상태에서 발생할 수 있는 charge-up 현상을 방지하기 위하여 Ion sputter법으로 Au 코팅 전처리를 실시하였다. Fig.6, Fig.7은 유동성에 주로 관여하는 평균값 이하의 작은 입자에 대한 입형을 분석한 것으로서 폐석분은 주로 5~7 μm 크기의 입자에서는 대체로 일정하게 분포하고 형상이 각진 형태로서 비교적 규칙적인 것으로 나타났다. 또한 규석분의 4~15 μm 크기의 입자형태의 경우 비교적 입자가 불규칙적인 것으로 나타났다. 입형은 폐석분에 비하여 절단면이 둥근형태로 보여지는데 이는 폐석분의 경우 각진 입형에 따라 배합시 유동성 저하에 대한 고려가 필요한 것으로 분석되었다.

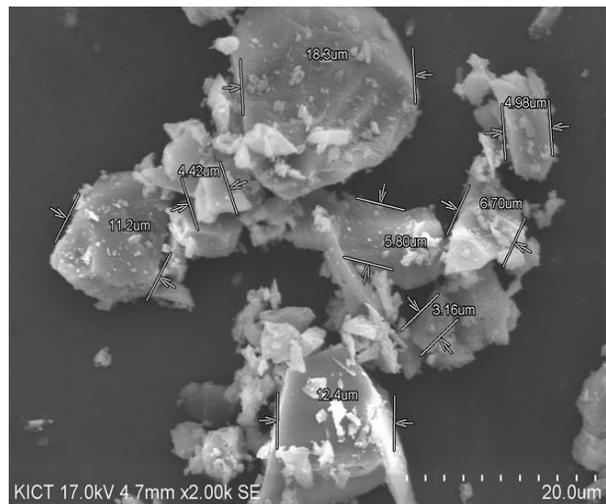


Fig.6 Particle shape analysis of silica powder

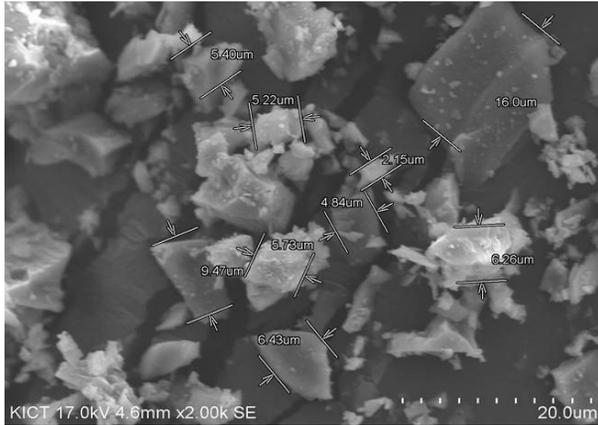


Fig.7 Particle shape analysis of crushed stone powder

### 2.3 치환재료의 성분분석

X선 형광분석을 통하여 폐석분과 규석분의 화학조성 분석을 Table 4와 같이 실시하였다. 폐석분의 경우 SiO<sub>2</sub>의 비율이 55.5%로서 규석분의 90.47% 보다 다소 낮은 비율을 차지하고 CaO 성분에 있어서 각각 6.08, 0.8의 비율을 나타내어 배합설계시 화학적 결합량으로 인한 편차를 최소화 하기 위한 C/S 몰비를 고려해야 할 것으로 분석되었다. SiO<sub>2</sub>를 제외한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분은 규석분 보다 높은 비율을 나타내었다.

Table 4. Main chemical compositions of crushed stone powder(weight, %)

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Crushed stone Powder	55.5	14.5	9.84	6.08	10.1
Silica Powder	90.47	2.87	1.49	0.8	2.88

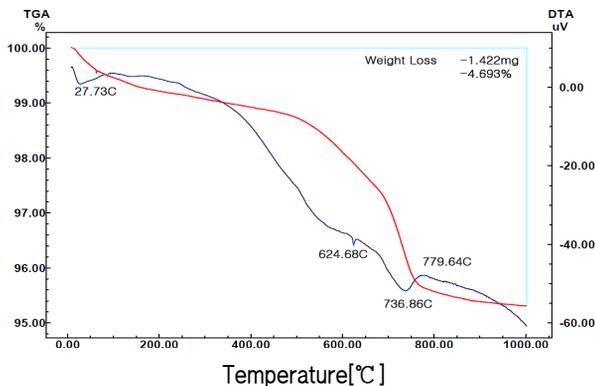


Fig.8 TG-DTA graph of crushed stone powder

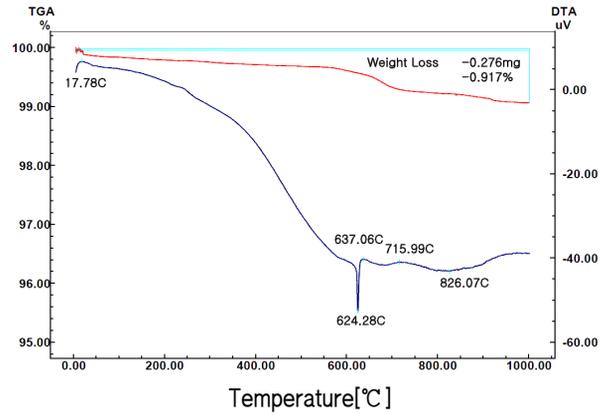


Fig.9 TG-DTA graphs of silica powder

시차열중량분석은 1,000℃까지 10℃/min의 승온상승 패턴으로 Fig.8, Fig.9와 같이 실시하였다. 질량감소율은 폐석분과 규석분이 각각 -4.6%, -0.8%로 크지 않게 나타났다. 100~200℃ 범위에서 발생하는 자유수와 에트린자이트의 탈수는 나타나지 않았으며 620℃ 부근에서 흡열반응이 관찰되었고 폐석분은 730℃ 부근에서 흡열반응이 추가로 관찰되었다.

## 3. 실험방법

### 3.1 제조

일반적인 압출성형방식은 투입재료가 소성상태에 있을 때 금형(die)을 통해서 압출성형하는 방식이다. 이 방법은 보통 내화벽돌, 하수관, 중공타일, 기능세라믹 및 전기절연체 등을 생산하며, 건축재료로는 박판 흡음재, 문틀, 각종 새시류 등의 선형부재를 연속적으로 생산할 때 이용된다.

압출성형 공정에서 가장 많이 이용되는 방법은 모터에 의해 구동되는 오거(motor-driven auger)에 의해 배합된 시멘트재료를 경질의 강이나 합금금형을 통해 압출하는 진공오거압출이다(Fig.10 참조). 그러나 특수한 경우 가공 오차의 범위를 줄이기 위해 고압 하에서 피스톤압출에 의해 생산되기도 한다. 이러한 공정을 거친 시멘트 압출성형 제품의 밀도는 1.8~2.0 g/cm<sup>3</sup>의 범위를 형성한다.

일반적으로 압출성형 공정은 두께 60 mm 이내, 생산 폭 600mm 이내의 판재를 생산하며, 여기에는 시멘트, 규석분과 같은 분상의 재료 이외에 휘강성을 높이기 위한 섬유, 그리고 초기 보형성 유지를 위한 증점제 등이 사용된다.

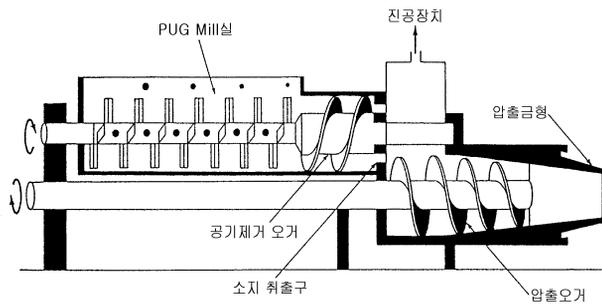


Fig.10 Vacuum extruding machine

이러한 압출성형 제품은 진공펌프에 의하여 공기를 탈기함으로써 이론적으로 소재내의 공기를 “0”으로 하여 제품을 성형함으로써 강도가 우수하고 내수성이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 반면에 섬유를 사용하지 않을 경우 건조 수축에 의한 크랙 등이 유발될 수 있으며 취성이 좋지 않은 특성이 있다.

경화체 제조를 위한 양생단계는 전양생, 1차 상압증기양생, 2차 고온고압 증기양생 공정으로 하였다. 양생온도는 Fig.11에서와 같이 전양생은 실험실 온도조건인 25℃에서 실시하였으며 1차 양생 최고온도는 65℃ 2차 양생 최고온도는 10기압 180℃에서 실시하였고, 각각의 최고온도 유지시간은 Fig.11에서와 같이 실시하였다. 양생공정에서 온도의 상승 시간도 수화에 중요한 변수중의 하나로 구분할 수 있으나 본 실험에서는 1차 최고온도 상승 시간은 1.5시간, 2차 양생 최고온도 도달 시간은 2시간으로 고정하여 진행하였다.

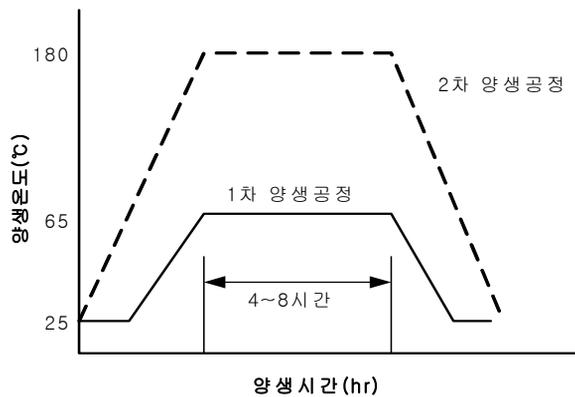


Fig.11 1st and 2nd curing temperature and time

일반적으로 2차 양생은 재령 7일 강도를 24시간안에 발현하게 하여 제품 생산 효율성을 높이기 위하여 실시한다. 본 실험을 수행하기 전 사전 연구단계에서 시멘트 및 규석분만을 사용하여 양생 조건에 따른 예비 시험을 실시한

결과 2차 양생 실시에 따라 밀도는 약 7%가 상승하는 것으로 나타났으며, 압축강도 기준으로 강도를 평가할 경우 85%가 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 2차 양생 조건은 180℃의 조건에서 양생을 실시하는 경우에 한정된다. Fig.12에 2차 양생에 따른 시편의 물성변화를 정리하여 나타내었다.

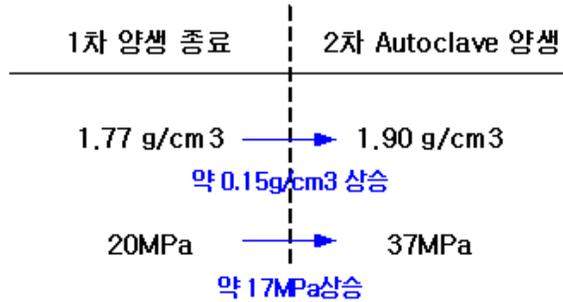


Fig.12 Physical variation according to curing (Density and compressive strength)

### 3.2 시험체 제작 및 배합

시험체의 제작은 50∅ 크기의 배출 직경을 갖는 일본 I社의 파일럿 진공압출성형기를 사용하였다. 이를 이용하여 실험체의 단면이 두께 12 mm, 폭 110 mm로 배출될 수 있도록 하여 휨강도 측정과 경도측정을 수행할 수 있도록 5 kg의 용량으로 배합당 2회씩 압출시험을 실시하였다. 파일럿 압출성형기의 냉각수 온도는 20℃로 하였으며 오거 속력은 3 m/s, 압력은 2.2 kgf/cm<sup>2</sup>로 유지하였다.

Fig.13과 Fig.14는 각각 시편을 제작한 파일럿 진공 압출성형장비와 이를 활용하여 제작한 시편의 형상을 나타낸다.



Fig.13 Pilot vacuum extruding machine

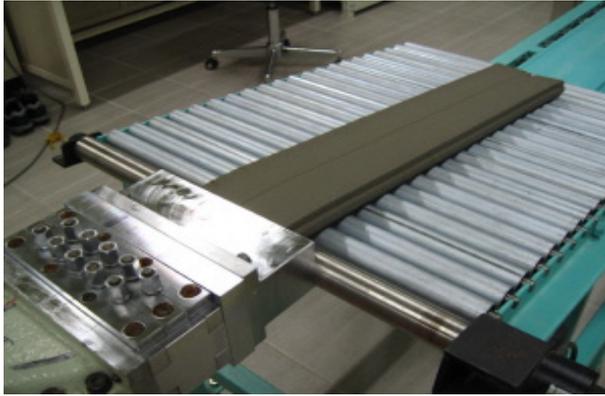


Fig.14 Extruding specimen

배합은 보강섬유로 사용된 펄프 및 PP섬유를 먼저 믹서에 투입 후 3분간 사전 배합 실시한 후 계량된 시멘트, 규석분, 폐석분, 규회석, MC(증점제)를 투입하여 3분간 배합하였다. 또한 재료간의 사전배합 후 교반믹서에 투입 후 배합수를 투입하며 배합을 완료하였다. 실험에 사용된 배합계획표는 Table 4와 같다. 전체 배합은 실험체 생산 배합인 5 kg를 기준으로 하였으며 C/S 몰비를 기준으로 설계를 실시하였다.

Table 4. Mix formulation

ID*	C/S mole ratio	5kg weight mix(unit: g)							
		cement	silica powder	crushed stone powder	wollastonite	pulp	PP	mixing water	MC
P	0.89	2 469	2 126	0					
S-89	0.89	2 164	1 659	762					
S-87	0.87	2 131	1 682	773	250	150	15	27%	1%
C-89	0.89	2 166	1 265	1 158					
C-87	0.87	2 133	1 283	1 174					

\*P: Plain mixing, S: Silica powder 25% substitution, C: Crushed stone powder 50% substitution

시험체 배출 후 표면경도 측정을 실시하고 양생을 실시하였다. 전양생은 25±3°C, 상대습도 60±5% 조건의 항온항습실에서 양생을 실시하였으며 상압증기양생은 65°C 조건의 워터바스(Water Bath)에서 6시간 실시하였다. 고온고압 증기양생(Autoclave)은 180°C, 10기압 조건에서 승온 시간을 제외하고 6시간 동안 실시하였다. 이러한 축진양생이 종료된 후 7일간(축진양생 및 전양생 기간 포함)을 거친 후에 완성된 시험체로서 KS F 4735 ‘압출성형 콘크리트 패널의 휨강도 시험방법’에 따라 측정을 실시하였다.

시험편의 휨강성을 확보하기 위하여 섬유를 사용하는데 본 실험에서는 펄프와 폴리프로필렌 섬유를 각각 1.5%, 0.15% 혼입하여 적용하였다. 일반적으로 시멘트 압출성형 제품은 두께 50 mm 내외의 패널형 부재로 사용됨에 따라 휨강성이 요구되는 부분이 많이 있다. 이에 따라 KS F 2543(압출성형 콘크리트 패널)에서도 휨강도를 14 MPa 이상으로 규정하고 있다. 보강 철근을 사용하지 않은 콘크리트 제품 등의 휨강도가 5 MPa 이하를 나타내는 것을 고려할 경우 매우 높은 휨강도를 발현하는 것을 알 수 있다. 이전에는 석면 등을 사용하였으나 인체의 유해성으로 인하여 최근에는 펄프, PP 등의 섬유를 사용한다. 압출성형 공정에서 보강섬유의 특성은 2차 고온고압 증기양생을 고려하여 내열성을 확보 하여야 하는 것이다. Fig.11에서와 같이 2차 양생온도가 180°C까지 상승함에 따라 고품의 섬유가 가스로 날아가 버리는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 내열성이 개선된 PP 섬유를 사용하여 실험을 진행하였다.

압출성형 공정의 또 하나의 특징은 분체의 원료들이 스크류의 힘에 의하여 지속적으로 혼합이 되면서 성형을 이룬다. 이에 따라 원료와 원료간의 마찰, 원료와 압출기 내부와의 마찰로 인하여 소재의온도가 상승하고 압출에 악영향을 미치는 요소로 작용할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 30 000~70 000 cps 점도를 가지는 증점제를 사용한다. 일반적으로 사용하는 증점제는 메칠셀룰로오스계를 사용하며 사용량은 전체 중량대비 1%를 적용하였다.

#### 4.1 수화물 분석

고온고압 증기양생을 종료한 시험편의 현미경 분석 결과 규석분만을 사용한 시험편은 Fig.15와 같이 전체적으로 토버모라이트 생성물이 광범위하게 생성되었으나 25%를 치환한 시험편은 상대적으로 액하게 발생된 것을 알 수 있다. 그러나 폐석분을 50% 치환한 시험편의 토버모라이트 생성물은 부분적으로 미세하게 이루어져 폐석분이 규석분과 같이 수화활성에 긍정적인 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 폐석분의 SiO<sub>2</sub> 함유량은 이미 활성이 종료되어 CaO 성분과 반응하여 토버모라이트 생성에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

#### 4.2 압출성 평가

앞서 기술한바와 같이 압출성형 제품의 특징은 스크류의 일정한 힘에 의하여 재료가 전진하면서 혼합되고 마지

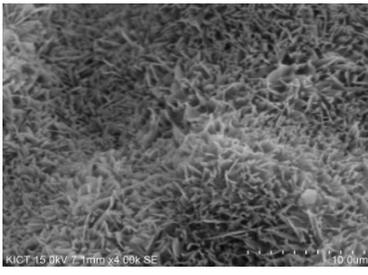
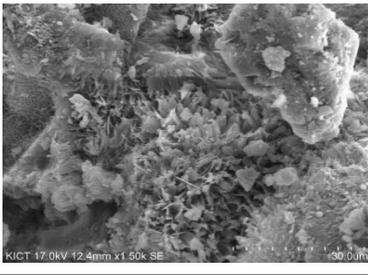
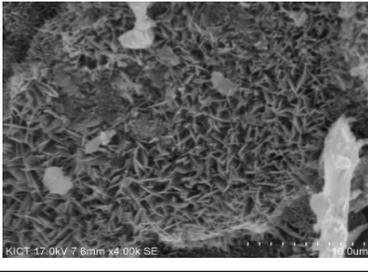
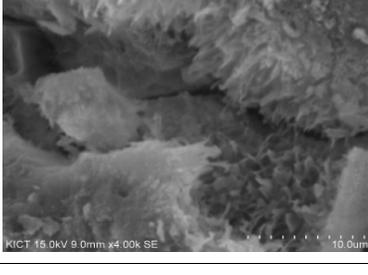
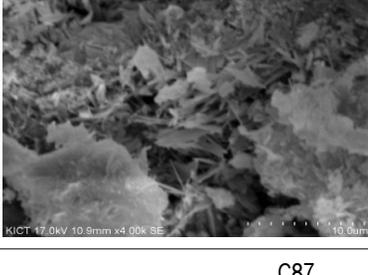
	전반적으로 Tobermolite 물성이 활발하게 생성
P	
	판상형 Tobermolite 부분적 생성
S89	
	부분적으로 Tobermolite 생성되었으나 전체적으로 활발하지 않음
S87	
	Tobermolite 생성 초기단계로 2차 양생 효과가 높지않음
C89	
	Tobermolite 생성 초기단계로 2차 양생 효과가 높지않음
C87	

Fig.15 SEM Figure of specimen according to 1st. and 2nd. curing condition

막으로 일정한 금형을 통하여 제품이 성형된다. 이 과정에서 제품의 밀실도를 높이기 위하여 소재 내의 공기를 탈기하는 진공과정이 있어 이론적으로는 소재 내의 공기를 완전히 제거하도록 규정되어 있다. 만일 공기를 제거하지 못할 경우 소재의 밀실도가 낮아지고 제품 성형과정에서 직선도가 유지되지 못할 수 있다. 이에 따라 성형 직후 제품의 경도를 측정하여 압출 정도를 파악하고자 하였다

압출성형 후 표면경도 측정은 Fig.16과 같이 실시하였으며 시험체당 5회 측정된 값을 평균으로 하여 나타냈으며 측정결과는 Fig.17과 같다.

표면경도 측정결과 P(plain)배합이 가장 높은 수치를 나타냈으며 S-89, S-87은 각각 28.8 N, 29.8 N을 나타냈다. 또한 C-89, C-87은 각각 26.0 N과 24.1 N의 수치를 보여 폐석분 치환율에 따라 굳지 않은 상태에서 차이를 나타내었다.

이와 같이 폐석분의 함량이 25%를 초과할 경우 표면경도가 낮아지는 원인은 압출과정에서 일정한 성능을 확보하기 위하여 혼수량을 1.5% 정도 증량하였기 때문으로 판단된다. 즉, 혼합과정에서 압출성을 고려하여 제품내에 Plain 배합보다 약 1.5%의 가수(加水)가 진행되어 표면경도가 낮아지는 것으로 판단된다. 특히 압출전에는 물의 양이 부족하다 할지라도 압출과정에서 스크류에서 계속되는 압력과 진공펌프에 의한 공기의 탈기 등으로 인하여 내부에 있던 수분이 외부로 배출되면서 제품이 전체적으로 경도가 낮아지는 특성을 보이는 것으로 판단된다.



Fig.16 Test of surface hardness

#### 4.3 밀도 및 흡수율

시멘트 2차 제품중 골재를 사용하지 않은 압출성형 제품의 밀도는 일반적으로  $1.8 \text{ g/cm}^3$ 을 가진다. 본 실험에서 실시한 plain 배합의 밀도는  $1.7 \text{ g/cm}^3$ 에 못미치는 것으로 나타났으며 25% 치환한 S-89, S-87 제품의 경우에는 동일

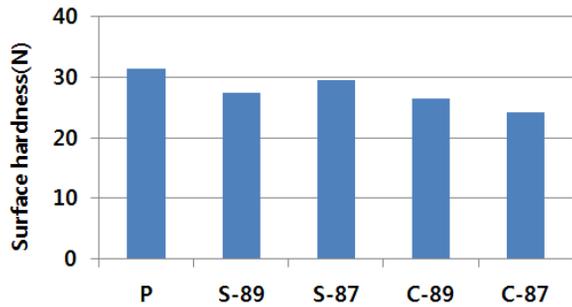


Fig.17 Test results of surface hardness

한 수준으로 나타났다. 그러나 C-89 및 C-87 제품은 1.66 g/cm<sup>3</sup>으로 나타나 plain 배합에 비하여 약 2~3%정도 낮아졌다. 이러한 원인은 앞서 압축성의 표면 경도 측정에서와 같이 원활한 압축을 위하여 1.5% 정도 혼수량이 증가하였기 때문에 소재내의 공극이 증가하였기 때문으로 판단된다. 또 규석분의 밀도가 3.09 g/cm<sup>3</sup>로서 폐석분 2.71 g/cm<sup>3</sup>보다 높은 재료이고, 원료의 흡수율도 폐석분이 5.23%를 흡수하는 반면 규석분의 흡수율은 3.54%임에 따라 전체적으로 폐석분을 사용한 시험체의 흡수율이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig.18과 Fig.19에 이에 대한 시험결과를 정리하여 나타내었다.

압축성형 제품에서의 밀도 및 흡수율은 휨강도에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 사용하는 혼수량을 최소화하여 공극을 밀실하게 구성하여 물리적 안정성을 높이는게 압축성형 제품의 품질을 결정짓는 중요한 요소이다.

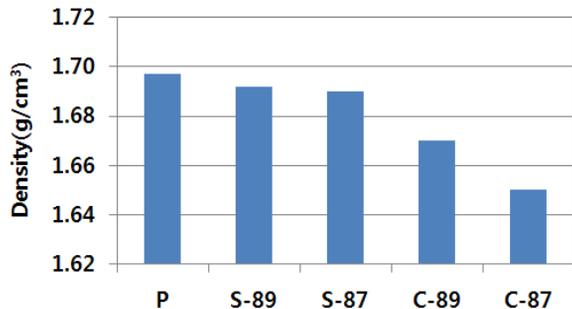


Fig.18 Test results of density

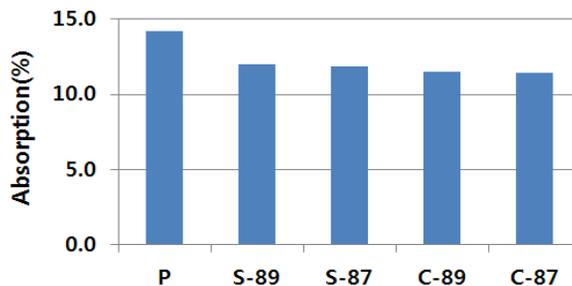


Fig.19 Test results of absorption

#### 4.4 휨강도

시험체를 KS F 2543에서 규정한 중앙점 하중법에 의한 휨강도 측정을 실시한 결과 plain 배합은 15 MPa를 발현하였다(Fig.10 참조). 폐석분을 25% 치환한 S-89 및 S-87 시험체의 경우 14 MPa 정도의 강도를 발현하였으며, 밀도 및 흡수율이 상대적으로 낮은 폐석분 50% 치환 제품의 경우도 14 MPa 정도의 강도를 발현하여 폐석분의 사용이 휨강도의 영향에 미치는 요소는 미비한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 결과는 밀도와 흡수율이 강도에 많은 영향을 미칠 수 있다는 내용과 상치되는 것이다.

휨강도에 영향을 미치는 요소는 원료와 함께 양생조건이 매우 중요하다. 본 실험에서는 동일한 조건하에서 양생을 실시하였으며, 폐석분의 사용에 따른 수화활성의 정도가 전자현미경 관찰결과 다르게 나타난 것에 비추어 폐석분의 다량 사용은 전반적인 물리적 특성의 저해 요인 작용으로 이어질 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 이를 보완하기 위해서는 초기 시멘트량의 조정, 촉진제의 투입 그리고 양생조건 변경 등을 고려하여 배합설계가 이루어져야 한다.

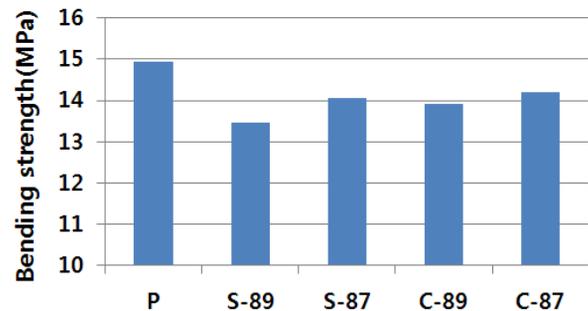


Fig.20 Test results of bending strength

## 5. 결론

압축성형 시멘트 복합체에 폐석분을 사용하여 물리적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 부순골재 생산과정에서 발생한 폐석분 슬러지를 건조한 결과 폐석분의 평균입경은 19.13 μm로 나타났으며 이는 현재 사용하고 있는 규석분의 평균 입경과 유사한 특성을 나타낸 것이다. 성분 중 SiO<sub>2</sub>의 함량이 55% 정도로 나타나 90% 상회하는 규석분에 비하여 낮은 특성을 가지

고 있는 것으로 나타났다.

2) 규석분을 50% 단순 치환하여 제조한 시험편의 압축 강도를 측정된 결과 전양생 및 1차 양생, 2차 양생 조건에 따라 강도의 차이는 발생하였으나 전체적으로 규석분 시험편에 비하여 낮은 강도 특성을 발현하였다.

3) 폐석분의 흡수율이 높고 밀도가 낮음에 따라 폐석분의 사용량 증가에 따라 압축을 위한 수분의 첨가량이 증가하고 이에 따라 표면 경도가 낮아지는 특성을 발현하였으며 밀도 및 흡수율의 경우도 이러한 영향으로 plain 배합에 비하여 좋지 않게 변화하는 것으로 나타났다.

4) 폐석분 증가에 따른 휨강도의 하락은 밀도 및 흡수율과 동일한 경향으로 나타났다. 따라서 폐석분의 증가에 따라 수화활성을 위한 첨가제의 활용이 필요할 것으로 판단된다. 특히 압축성형 공정의 경우 2차 고온고압 증기양생을 실시함에 따라 이를 고려한 첨가제의 활용이 고려되어야 한다.

5. 환경부 : 환경친화성 무석면 건축자재 실용화 기술개발 한국건설기술연구원. 1998.
6. 채용석. 민인기, 송갑용 : 석재 가공시 발생한 석분이 혼합된 콘크리트의 압축강도 성상에 관한 연구, 한국자원순환학회지 논문집, Vol. 18, No. 6, 46-53, 2009

## 참고문헌

1. 장복기 외 공역, 시멘트 재료과학, 전남대학교 출판부. 1998.
2. Taylor. H. F W, Hydration of Portland Cement, Cement Chemistry, 1964.
3. James S. Reed, Principles of Ceramics Processing, John Wiley & Sons, INS. 1996
4. 김진만 외. 폐콘크리트 미분말을 사용한 오토클레이브 양생 경량기표콘크리트의 특성, 한국폐기물자원순환학회지, pp. 191~198, 2011

### 폐석분을 사용한 시멘트 2차 제품의 물리적 특성에 관한 연구

압축강도 50 MPa이상의 압축성형 시멘트 패널은 고온고압 증기양생으로 생산된다. 고온고압 증기양생에서 요구 강도를 얻기 위해서는 시멘트에 포함되어 있는 CaO와의 반응에 필요한 적정량의 SiO<sub>2</sub>를 공급하는 것이 관건이다. SiO<sub>2</sub>의 공급원으로 가장 널리 사용되는 원료는 규석분인데, 이는 환경파괴를 전제로 하기 때문에 친환경적인 제품 생산을 위하여 본 연구에서는 규석분을 대신하여 폐석분을 활용한 시멘트 2차 제품을 생산하고 이에 대한 압축성과 물리적인 특성비교를 실시하였다. 이를 위하여 화성 석산에서 채취한 폐석분을 건조·파쇄한 후 이를 규석분 사용량의 최대 50%까지 치환하여 압축성 및 물리적 특성 실험을 수행하였다.

실험결과 평균 입경은 폐석분과 규석분의 크기가 유사하였으나 물리적 특성은 규석분을 폐석분으로 단순 치환하였을 경우, 대부분 낮게 발현되었다. 따라서 폐석분을 활용할 경우 수화활성을 위한 첨가제 등의 활용이 필요할 것으로 판단된다.