

石材 加工시 발생한 石粉이 혼합된 콘크리트의 壓縮強度 特性에 관한 연구[†]

蔡英錫* · [†]閔仁基** · 宋甲鏞***

*又松大學校, **又松情報大學, *** (株)韓國建設品質試驗所

A Study on the Concrete Compressive Strength Characteristics mixing Stone Dust Produced by Stone Block Manufacturing[†]

Young Suk Chae*, [†]In Ki Min** and Gab Young Song***

*Woosong University, **Woosong Information College, ***Korea Construction Quality Center

요 약

석재 가공 시 발생하는 석분은 산업폐기물로 되어있다. 현재 이 석분은 지하에 매립하거나 지상에 야적되어 방치되고 있어 폐기물로 처리하는 데 많은 비용이 요구되고 있고, 토질과 지하수 등의 환경오염의 원인이 되고 있다. 또한 콘크리트의 주재료인 골재의 공급이 부족한 현실을 고려하여 본 연구에서는 폐석분을 콘크리트 혼화재료로 재활용할 수 있는 가능성을 연구하고자 한다. 석분함유량에 대한 시멘트비를 조정한 결과, 20~30 N/mm²의 콘크리트의 압축강도가 나타났고 이는 석분의 함유에 따라 압축강도가 감소되지 않음을 알 수 있었다. 석재 가공 시 발생하는 석분을 콘크리트 혼화재료로 재순환하여 사용하여도 콘크리트의 압축강도에 는 전혀 문제가 없음을 알 수 있었다.

주제어 : 석재가공, 석분, 콘크리트, 압축강도, 리사이클링

Abstract

The stone dusts produced during the manufacturing process of stone blocks are considered as one of industrial waste materials. This stone dusts are managed to either burying under the ground or stacking in the yard, but this disposal process is required an extra costs. The stone dust disposal like burying or stacking also cause environmental pollution such as ground pollution and subterranean water pollution. Thus, this study was conducted to explore the possibility of recycling stone dusts as a concrete mixing material in order to extend recycling methods. Based on the experiment results on various ratios of cement to stone dust content, the compressive strengths of concrete were recorded in the range of 20~30 N/mm². The results did not show any decrease in compressive strength due to the stone dust content. It can be concluded that the stone dusts produced by stone block manufacturing can be sufficiently recycled as one of concrete mixing materials in the aspect of compressive strength.

Key words : Stone block, Stone Dust, Concrete, Compressive Strength, recycling

1. 서 론

국내 건설 산업의 급속한 발전에 따라 기초자재의 수요가 급격히 증대되고 있는 상황이며, 이미 하천골재는 고갈 상태에 이르렀다. 또한 골재의 품질도 악화 되고 있는 실정이다. 한편, 석산 및 석재 가공업체에서 원석

을 채굴하거나 가공하는 과정에서 석·골재의 30~60% 정도가 폐석이나 석분 및 슬러지로 손실되고 있고, 이러한 폐기물 중 폐석과 석분의 일부만이 인조 대리석 제조나 경량기포 콘크리트 제조용, 도로포장용 및 객토 용으로 재활용 되고 있을 뿐, 대부분은 적치되거나 무 계획적으로 매립되고 있는 실정이다.^{1,2)} 이와 같이 석재 생산과정에서 필연적으로 발생하는 부산물인 석분도는 첫째, 매립에 따른 매립지 확보를 위한 경제적 부담뿐만 아니라 건조시 발생분진과 이들에 함유된 중금속 이

[†] 2009년 8월 7일 접수, 2009년 9월 28일 1차수정

2009년 11월 15일 2차수정, 2009년 11월 23일 수리

[†]E-mail: ikmin@wst.ac.kr

온의 용출에 의한 대기, 토양 및 수질 등의 위해한 환경 공해를 유발 시키는 문제점을 동시에 안고 있다.³⁾ 또한 지반의 연약화등 2차 환경오염 문제가 야기된다.⁴⁾ 둘째, 국내 인공 쇄석사 제조과정에서 발생하는 200 Mesh 이하의 석분토는 연간 100만m³이상이 발생하고 있으며, 대부분 석산에 야적되어 있는 상황으로 현재 폐기물로 지정되어 있다.⁵⁾

콘크리트 생산과정에서 자갈 또는 암석을 분쇄한 미세 돌가루가 골재들의 공극을 채워줌으로서 오히려 콘크리트를 안정시키며 강도를 증가시켜준다. 그러나 이런 돌가루 생산을 위해서 많은 양의 자갈 또는 암석이 필요하며 분쇄공정을 거쳐야 하는데 여기에 비용이 수반되며 생산단가를 증가시키는 요인이 된다. 이러한 추가적인 공정을 거치지 않고, 대리석이나 화강암을 가공하는 석재 관련 산업에서 원석을 가공하는 과정 중에 발생하고 폐기물인 석분을 활용한다면 콘크리트의 생산단가 폐자원 재활용 측면에서 매우 의미 있는 기술이 될 것이다.

이에 본 연구에서는 콘크리트의 혼화재로서 효과 여부를 파악하고, 석분으로 골재를 대신하기 위해 석분 함유량에 따른 콘크리트의 압축강도를 측정하고 적합성 여부를 판단하고자 한다.

2. 석분의 특성

2.1. 석분의 물리적 성질

본 연구에서는 익산시 황등에 있는 석재 가공공장에서 채취한 석분을 사용하였다.

석분의 물리적 성질을 알기 위해 물성실험을 수행한 결과 Table 1에 나타낸 것과 같이 석분의 최대 건조단위중량은 1.53 g/cm³이고 최적함수비는 22%이다. 석분의 입자분포는 80%이상이 0.05~0.06 mm 사이에 분포하고 있다.

Fig. 1과 Fig. 2는 본 논문에서 사용한 석분의 다짐 곡선 및 입도 분포곡선을 나타낸 것이다. Fig. 2와

Table 2에서 보여 지듯이 본 연구에 사용한 석분은 입경이 매우 균등하고 미세하여 200번체 통과량이 98.7%로 일반적인 석분보다 많다. 이는 콘크리트 배합에 있어 워커빌리티 향상이 기대되는데 이에 대한 연구는 추후에 필요할 것으로 예상된다.

2.2. 석분의 광물 구성

본 논문에서 사용한 익산시 황등 석분의 성분 분포를 살펴보면, Table 2와 같으며 SiO₂가 55.68%, Al₂O₃ 19.63%, FeO가 2.38% 이며, 기타 미량의 광물질로 구성되어 있다.

규소와 알루미늄이 주성분인 석분은 석분의 가용성 성분 SiO₂, Al₂O₃가 칼슘실리케이트 수화반응시 생성되는 Ca(OH)₂와의 포졸란 활성반응으로 강도증진에 기여하는 불용성 수화물(C-S-H)의 생성을 촉진시켜 채령 증가와 함께 지속적으로 강도가 증가할 것으로 예상된다.³⁾ 이는 추후 연구가 필요할 것이다.

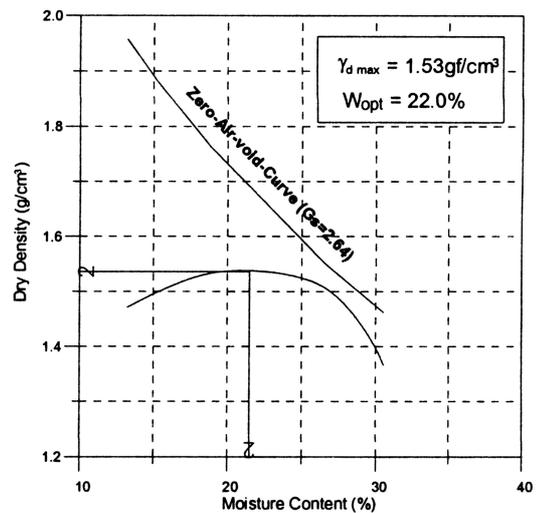


Fig. 1. Compaction / moisture-density curve (Hwang Deung, IkSan City).

Table 1. Physical property of stone dust used in the research (Hwang Deung, IkSan city)

Sample	Specific Gravity G _s	Compaction		Percent Finer No.200 (%)	Atterberg Limit			USCS
		γ _d max (g/cm ³)	OMC(%)		LL	PI	PL	
Hwang Deung Stone dust	2.64	1.53	22	98.7	NP			ML

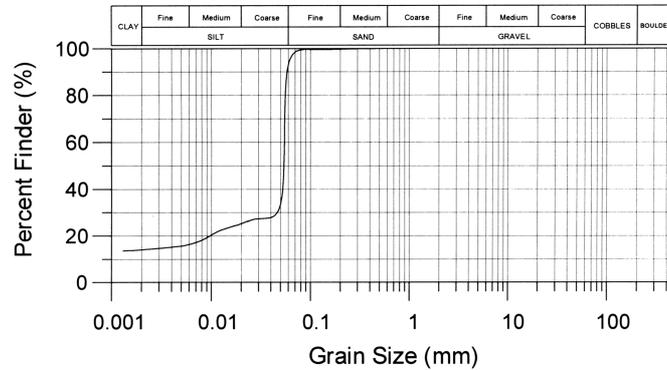


Fig. 2. Grain size distribution (Hwang Deung, IkSan City).

Table 2. Chemical components of stone dust (Hwang Deung)

Chemical Components(%)			
SiO ₂	55.68	K ₂ O	0.90
Al ₂ O ₃	19.63	Na ₂ O	0.58
Fe ₂ O ₃	2.64	TiO ₂	N.D.
CaO	0.59	MnO	0.033
MgO	1.08	FeO	2.38
P ₂ O ₅	0.23	N.D.= not detect	

3. 석분 함유량에 따른 콘크리트 압축강도 특성 실험

3.1. 실험계획

석재 가공 시 발생하는 석분을 콘크리트의 혼화재료

로 혼입하여 얻을 수 있는 강도효과를 고찰하기 위하여 실험을 통한 연구를 수행하였다. 또한 7일 압축강도는 AASHTO에서 추천하는 상대계수 추정에 필요한 물성치에 해당하므로 참고자료로 활용할 가치가 있을 것으로 판단된다.

Table 3과 같이 W/C 는 57.4%(초기: 53.9%)로, 잔골재를 S/A는 48.5%, 슬럼프는 약 12cm로 동일하게 하고 시멘트 양을 각각 330 kg, 315 kg, 300 kg, 285 kg 270 kg에 대하여 각각 혼화재료량을 달리 하여 수행하였다.

Table 4는 시멘트 330 kg에 대한 입도와 표면수를 고려한 현장 배합표이다. W는 단위수량을, C는 시멘트량, S는 잔골재, G는 굵은 골재를 나타낸다.

3.2. 실험 결과

Table 5는 위의 Table 3의 조건에 따른 압축강도를

Table 3. Experimental program

Cement(kg)	Stone Dust(kg)	Stone Dust /Cement(%)	W/C(%)	S/A(%)	Slump(cm)
330	0	0.0	53.9	48.5	12.0
	15	4.5	57.4	48.5	10.0
	30	9.1	57.4	48.5	11.5
	45	13.6	57.4	48.5	12.5
	60	18.2	57.4	48.5	12.0
315	15	4.8	57.4	48.5	12.5
	30	9.5	57.4	48.5	12.5
	45	14.3	57.4	48.5	12.0
	60	19.0	57.4	48.5	12.5
	75	23.8	57.4	48.5	13.0

Table 3. Continued.

Cement(kg)	Stone Dust(kg)	Stone Dust /Cement(%)	W/C(%)	S/A(%)	Slump(cm)
300	30	10.0	57.4	48.5	13.5
	45	15.0	57.4	48.5	12.5
	60	20.0	57.4	48.5	13.0
	75	25.0	57.4	48.5	12.0
	90	30.0	57.4	48.5	12.0
285	45	15.8	57.4	48.5	13.0
	60	21.1	57.4	48.5	13.5
	75	26.3	57.4	48.5	13.0
	90	31.6	57.4	48.5	11.0
	105	36.8	57.4	48.5	13.0
270	60	22.2	57.4	48.5	11.0
	75	27.8	57.4	48.5	12.5
	90	33.3	57.4	48.5	12.0
	105	38.9	57.4	48.5	12.5
	120	44.4	57.4	48.5	12.5

Table 4. Example of mixing ratio for cement 330 kg

Nominal strength N/mm ²	Slump (cm)	Air Content (%)	W/C	S/A	Unit Weight (kg/m ³)					Admixture (kg)	Total Weight (kg/m ³)
					W	C	S ₁	S ₂	G		
21	12	4.5	53.9	48.5	133	330	466	466	898	1.65	2295

시험한 결과이며 다음과 같다.

3.2.1. 석분 함유량의 비율에 의한 강도 변화

(1) 시멘트 함량이 330kg 일 경우

강도는 석분 함유량이 증가함에 따라 석분을 포함하지 않는 경우의 평균 압축력보다 각 단계별로 0.93~1.20배로 나타난다. Fig. 3의 a)에서와 같이 혼합재료의 양이 증가 할수록 강도는 대체로 증가하는 경향을 보인다. 즉 330 kg일 경우 석분으로 인한 강도 저하는 없고 오히려 강도가 증가하는 경향을 보인다. 다만 혼합재료양이 15 kg인 경우 압축강도가 다소 적게 나타나는데 이는 실험상의 오차로 판단된다.

(2) 시멘트 함량이 315 kg 일 경우

시멘트 중량에 대한 혼합재료, 즉 석분의 비율은 4.8~23.8%정도이며 석분 함유량이 증가함에 따라 초기 석분 15 kg을 포함한 경우의 압축 강도보다 각 단계별로 1.12~1.08배 정도 이며 그림 Fig. 3의 b)와 같고 석

분으로 인한 강도 저하는 거의 없는 것으로 판단되며, 석분 비율 20%까지는 대체로 강도의 증가하는 경향을 볼 수 있다.

(3) 시멘트 함량이 300 kg 일 경우

석분의 비율은 10~30%정도이며 석분 함유량 변화에 따라 초기 석분 30 kg을 포함한 경우의 압축강도보다 각 단계별로 1.17~1.18배 정도이다. Fig. 3의 c)에서 혼합재료 60 kg을 제외하고 대체로 강도 저하는 없는 것으로 판단되며, 60 kg의 경우도 P₀에 비해 0.03% 작은 것으로 실험상의 오차로 판단된다.

(4) 시멘트 함량이 285 kg 일 경우

시멘트 중량에 대한 혼합재료, 즉 석분의 비율은 15~36%정도이며 석분 함유량이 증가함에 따라 초기 석분 45 kg을 포함한 경우의 압축강도보다 각 단계별로 1.03~1.19배 정도이며 Fig. 3의 d)와 같다. 석분 함유량에 따른 강도 저하는 없는 것으로 판단되며 석분/시멘트 비율이 26.3%일 경우 최적의 강도를 나타냄을 보인다.

Table 5. Test results

Cement (kg)	Stone Dust (kg)	Stone Dust /Cement(%)	Air Content (%)	Compressive Strength (N/mm ²)		P _n /P ₀	
				(7day)	(28 day)		
330	0	0.0	6.4	15.7	26.1	P ₀ /P ₀	1.00
	15	4.5	6.6	17.2	24.2	P ₁ /P ₀	0.93
	30	9.1	5.8	20.3	28.1	P ₂ /P ₀	1.08
	45	13.6	4.5	19.4	28.0	P ₃ /P ₀	1.07
	60	18.2	3.8	21.8	31.2	P ₄ /P ₀	1.20
315	15	4.8	6.5	16.7	23.8	P ₀ /P ₀	1.00
	30	9.5	5.5	19.4	26.7	P ₁ /P ₀	1.12
	45	14.3	5.1	19.1	26.4	P ₂ /P ₀	1.11
	60	19.0	3.7	21.0	29.7	P ₃ /P ₀	1.25
	75	23.8	3.6	19.1	25.7	P ₄ /P ₀	1.08
300	30	10.0	6.3	14.4	21.3	P ₀ /P ₀	1.00
	45	15.0	6.1	19.3	25.0	P ₁ /P ₀	1.17
	60	20.0	5.5	14.9	20.7	P ₂ /P ₀	0.97
	75	25.0	5.3	19.7	26.0	P ₃ /P ₀	1.22
	90	30.0	5.0	20.2	25.1	P ₄ /P ₀	1.18
285	45	15.8	4.5	14.9	21.3	P ₀ /P ₀	1.00
	60	21.1	4.3	17.6	21.8	P ₁ /P ₀	1.03
	75	26.3	4.1	20.8	27.2	P ₂ /P ₀	1.28
	90	31.6	4.0	19.4	26.5	P ₃ /P ₀	1.24
	105	36.8	3.8	18.4	25.3	P ₄ /P ₀	1.19
270	60	22.2	5.0	17.2	23.0	P ₀ /P ₀	1.00
	75	27.8	4.5	14.5	22.9	P ₁ /P ₀	1.00
	90	33.3	4.5	17.7	24.5	P ₂ /P ₀	1.07
	105	38.9	4.0	17.0	23.4	P ₃ /P ₀	1.02
	120	44.4	3.7	15.0	21.3	P ₄ /P ₀	0.93

(5) 시멘트 함량이 270 kg 일 경우

시멘트 중량에 대한 혼합재료, 즉 석분의 비율은 22~44% 정도이다. 초기 석분 60 kg을 포함한 경우의 압축강도보다 석분 함유량이 증가함에 따라 압축강도는 각 단계별로 1.00~0.93배 정도이다. 석분 함유량에 따른 강도 차이는 역시 없으나 Fig. 3의 e)에서 보듯이 전체적인 추세가 하강 경향을 보이므로 더 이상의 혼합재료의 첨가는 과도한 석분으로 인한 콘크리트의 응집력이 부족하게 될 것으로 예상된다.

3.2.2. 시멘트량 비율에 따른 강도

Fig. 4는 석분 함유량이 30 kg, 45 kg, 로 일정한 경우 시멘트 양에 따른 강도변화이다. 시멘트량이 증가함

에 따라 강도는 증가 추세를 보인다. 콘크리트에서는 소량의 강도를 얻기 위해서 상당한 양의 시멘트가 필요할 뿐만 아니라 철근이 부식되는 것을 방지하고 콘크리트와 철근과의 부착이 충분이 되도록 하기 위해서는 적당한 물-시멘트비의 시멘트풀로 철근을 완전히 둘러싸고 콘크리트가 충분히 수밀해야 하는데, 이를 위한 일반적인 단위 시멘트량은 300 kg 이상으로 하는 것이 좋다⁷⁾ Fig. 4에서도 시멘트 량이 300 kg 이상일 경우 강도 측면에서 보다 높은 것을 알 수 있다.

본 실험 데이터는 석분함유량에 따른 압축강도는 석분/시멘트 비율에서 전체적인 콘크리트 압축강도는 20~30N/mm² 정도로 일본의 지방의 콘크리트의 품질 등급을 만족하는 것으로 판단된다.⁸⁻⁹⁾

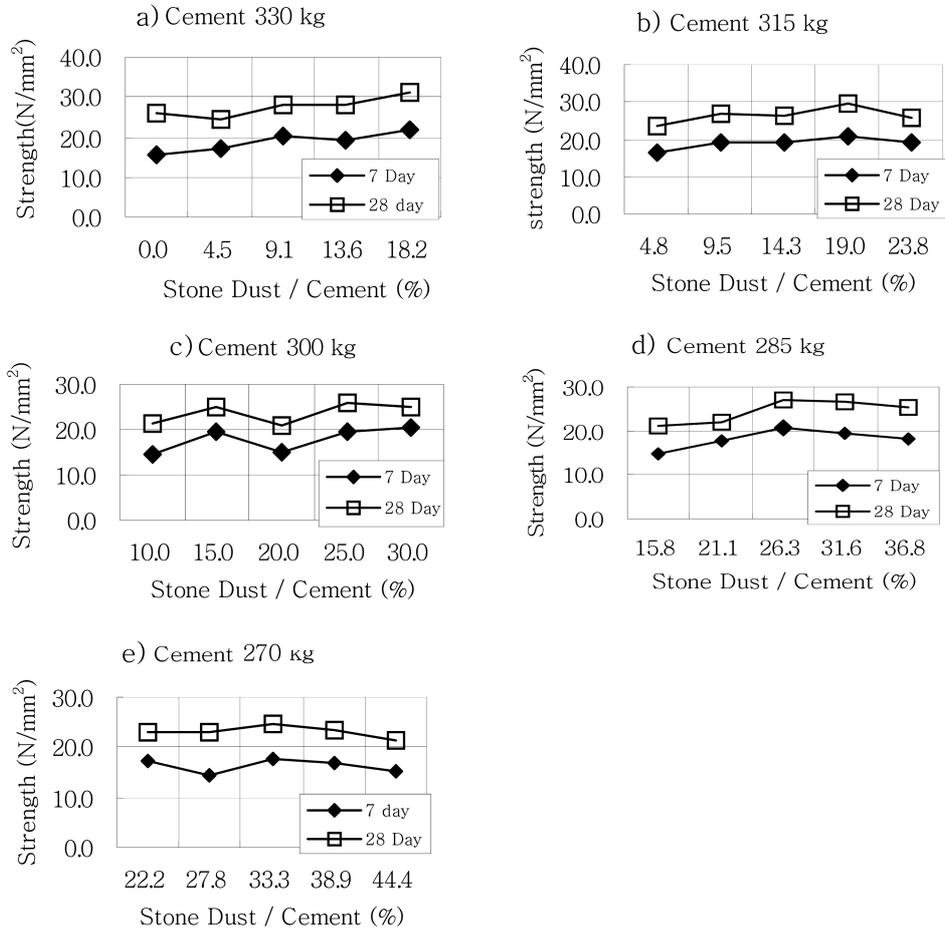


Fig. 3. Variation of Compressive Strength to Stone Dust / Cement Ratio.

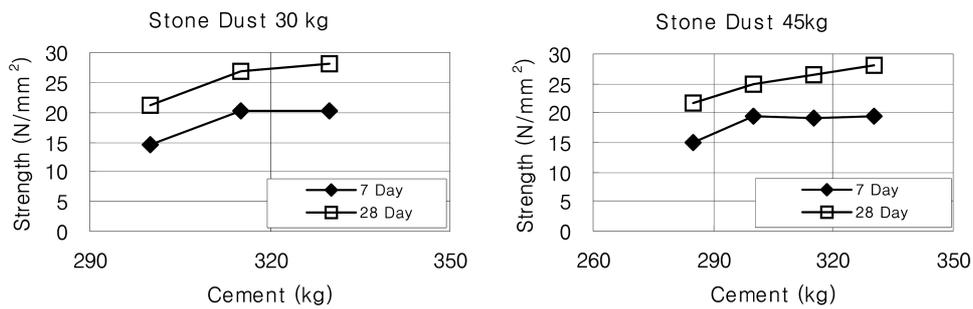


Fig. 4. Variation of Strength to Cement Content.

Fig. 5는 각 시멘트량에 따른 강도로 레디믹스 콘크리트의 호칭강도 16~30 N/mm²(KS F4009) 사이에 포함되므로 강도 면에서는 문제점이 없는 것으로 판단된

다. 이는 적정량의 미분말 혼입은 콘크리트의 공극을 충전시켜 조직을 치밀하게 만들기 때문일 것으로 판단된다. 본 실험에서 사용한 익산시 황등 석분과 유사한 형태

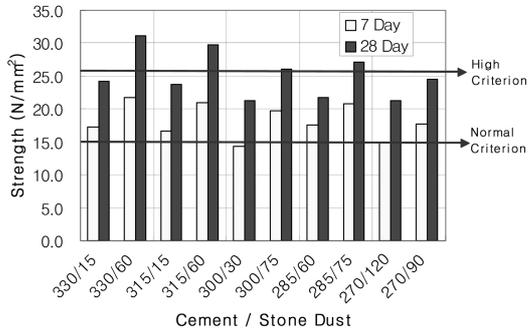


Fig. 5. Compressive strength of concrete containing stone dust.

의 혼합재로서 콘크리트 압축강도에 관한 연구 결과와 비교하면 다음과 같다.

인공골재 생산과정에서 발생한 석분⁶⁾, 레미콘 슬러지¹⁰⁻¹²⁾, 용융 슬래그¹³⁾의 경우에는 혼입량이 증가함에 따라 압축강도가 저하하는 경향을 나타내고 있으나, 화성균 비봉면의 화강암 석산에서 생산되는 석분⁵⁾의 경우에는 조직이 치밀해져 압축강도가 증가함을 나타내고 있다. 또한 석분은 콘크리트 강도, 슬럼프 등 재료적인 측면에서 긍정적인 효과가 기대되고 시멘트량, 골재량을 줄이는 경제적인 효과도 기대된다. 또한 석분과 같은 산업 폐기물인 폐분진의 10%를 재활용 한다면, 연간 약 3500억원의 경제적 효과를 얻을 수 있을 것이다.¹⁵⁾

4. 석재가공 석분의 폐기물공정 시험

석재가공 부산물인 석분을 콘크리트 혼합재료로 사용하기 위해서는 우선 석분 자체로부터 용출되는 물질에 의해 토양이나 지하수 혹은 콘크리트 주변 환경을 오염시킬 가능성이 없어야 하며, 이에 대한 평가가 필요하다. 이는 최근 아토피 피부병이나, 새집증후군 등 환경에 대한 관심이 증가함에 있어 반드시 필요한 절차라고 여겨진다. 폐기물공정시험에 의해 석분의 용출시험을 실시한 결과가 Table 6과 같다. 즉, 석분에 대한 용출시험 결과 납과 구리 및 카드뮴만이 지정폐기물 기준치 이하로 미량이 용출되어 콘크리트 환화제로 사용될 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 굳은 콘크리트의 인체에 미치는 유해성분분석은 추후 연구되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

건설 산업의 팽창으로 인한 잔골재 수급의 어려움을 극복하고 석재산업에서의 폐기물로 인식되는 석분을 콘크리트의 혼합재료로서의 활용을 도모하기 위해 석분의 화학성분, 물리적 성질, 압축강도 실험, 유해성에 대한 분석 등을 수행하였다. 이상의 연구를 바탕으로 한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 물리적 시험결과 석재 가공시 발생한 석분은 최대 건조단위중량 1.53 g/cm³, 최적함수비 22%이고, 입자분

Table 6. Results of Leaching Test for Stone Dust Used in the Research

Sort of Analysis	Designated Standard of Extrusion	Result of Analysis	Reference
pH	-	8.2	Korean Standard Leaching Procedure (KOEP)
Pb	More than 3 mg/l	More than 0.62 mg/l	
Cu	More than 3 mg/l	More than 1.2 mg/l	
As	More than 1.5 mg/l	N.D.	
Hg	More than 0.005 mg/l	N.D.	
Cd	More than 0.3 mg/l	More than 0.09 mg/l	
Cr+6	More than 1.5 mg/l	N.D.	
CN	More than 1 mg/l	N.D.	
Organic Phosphate	More than 1 mg/l	N.D.	
PCE	More than 0.1 mg/l	N.D.	
TCE	More than 0.3 mg/l	N.D.	
Oil Ingredient	More than 5%	N.D.	
Mineralized Organic Matter	-	1.2%	

포는 80% 이상이 0.05~0.06 mm 사이에 분포하고 있어 입경이 매우 균등하고 미세하며, 200번체 통과량이 98.7% 이고, 소성이 낮은 ML로 분류된다.

2) 광물성분 구성에서 가용성 성분 SiO₂, AL₂O₃가 칼슘실리케이트 수화반응시 생성되는 Ca(OH)₂와의 포졸란 활성반응으로 불용성 수화물의 생성을 촉진시켜 재령 증가와 함께 강도가 증가할 것으로 예상된다.

3) 시멘트 함량 270~330 kg와 석분 함유율 0~약 45% 비율에서 실험을 수행한 결과 콘크리트의 압축강도가 20~30 N/mm² 정도로 나타났고, 적절한 석분함유량의 배합에서는 강도가 오히려 증가함을 알 수 있었다.

4) 폐기물 공정 시험(KOLP)에 의해 석분의 용출 시험을 실시한 결과, 납, 구리, 카드뮴이 검출되었는데 기준치 이하로 미량 용출되었을 뿐 다른 기타 유해물질은 나타나지 않았다.

이상의 결론을 바탕으로 석가공시 발생한 석분은 콘크리트의 혼합재료로서 활용 가능성이 충분하다. 이는 시멘트량이나 골재량을 줄이는 효과를 가질 것으로 판단되며 경제적인 측면과 폐자원의 활용이라는 환경적인 측면에서 기대효과가 클 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 남정만, 윤중만, 김기영, 2005: 현무암 석분슬러지를 이용한 고화체의 강도 및 치수특성, 한국폐기물학회, 춘계학술연구회발표논문집 2005권, pp. 149-152.
2. 남정만, 윤중만, 김기영 등, 2005: 현무암 석분슬러지를 이용한 치수재의 적합성에 관한 연구, 한국폐기물학회지, 22권, 5호, pp. 464-471.

3. 김도수, 이범재, 노재성, 1998: 산업부산물을 재활용한 고강도 분말혼화체의 제조 및 콘크리트 적용 특성, 한국폐기물학회지, 15권, 3호, pp. 196-202.
4. 노재성, 조현영, 최정봉, 1995: 열처리한 시멘트 슬러지 및 ALC 파쇄분과 석분 슬러지를 재활용한 시멘트 몰탈의 특성, 한국폐기물학회지, 12권, 2호, pp. 207-213.
5. 마상준, 김동민, 안상철 등, 2005: 실내실험을 통한 지하공동 충전재 개발에 관한 연구 -석분토를 주재료로 활용한 실험-, 한국폐기물학회지, 22권, 1호, pp. 67-78.
6. 구해식 1997: 석분 함유량의 변화에 따른 콘크리트 압축강도에 관한 연구, Theses collection Vol. 14. No2. pp. 387-396.
7. 김성수, 1996: 토목재료학, 구미서관 pp. 144-179.
8. 조규진, 2004: 알기쉽게 배우는 NEW 콘크리트 II, 대한전문건설협회 철근콘크리트공사협회회 pp. 24.
9. 日本建築學會, 2000: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鐵筋concrete工事.
10. 반명수, 임남웅, 2000: 레미콘 슬러지가 시멘트 모르타 압축강도에 미치는 영향, 한국폐기물학회, 추계학술연구회 발표논문집 2000권, pp. 146-149.
11. 장원호, 임남웅, 1999: Cement Sludge 폐기물의 재활용 방안, 대한환경공학회 추계학술연구발표회, pp. 149-150.
12. 백운화, 임남웅, 1997: 포졸란을 이용한 피혁 중금속 슬러지의 고정화에 관한 연구(I), 한국폐기물학회지, 제 14권, 6호, pp. 514-524.
13. 김범석, 유영석, 신현철 등, 2003: 용융슬래그의 콘크리트용 잔골재로의 활용가능성에 대한 연구, 한국폐기물학회, 추계학술연구회발표논문집 2003권, pp. 203-206.
14. 최취경, 1997: 석분 혼화체를 사용한 콘크리트의 강도특성에 관한 연구, 論文集, Vol. 19 No. 1 pp. 111-121.
15. 마상준, 2004: 석분토를 혼화재료로서 재활용하는데 있어서 소성조건에 따른 포졸란성 연구, 한국폐기물학회지, 21권, 6호, pp. 545-551.

蔡 英 錫

- 한양대학교 토목공학과 학사
- 한양대학교 토목공학과 석사
- 대전대학교 토목공학과 박사
- 현재 우송대학교 건축공학과 교수

閔 仁 基

- 한양대학교 토목공학과 학사
- 한양대학교 토목공학과 석사
- 대전대학교 토목공학과 박사
- 현재 우송정보대학 철도토목과 교수

宋 甲 鏞

- 충주대학교 산업공학과 학사
- 원광대학교 토목환경공학과 석사
- 원광대학교 토목환경공학과 박사
- 현재 (주)한국건설품질시험소 대표이사