

화력발전소 매립석탄회를 이용한 성토용 인공골재 개발 연구

A study on development of artificial aggregates for embankment using reclaimed coal ash from thermoelectric power station

윤명석¹⁾, Myung-Seok Yoon, 안동욱¹⁾, Dong-Wook Ahn, 장남주²⁾, Nam-Ju Jang, 한상재³⁾, Sang-Jae Han, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾한양대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

²⁾한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

³⁾ (주)지구환경전문가그룹 연구소장, Research Director, Expert Group for Earth & Environment Co. LTD

⁴⁾한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : The use of the coal ash for surcharge material, in a view of the environmental aspect, can decrease amount of th reclamation through recycling waste materials as well as prevent a destruction of the ecosystem attributed to sand picking. In addition, it can reduce both unit cost of material and construction expenses.

In this study, new construction material as alternative surcharge material using coal ash, which is by-product from thermoelectric power plant, were developed. Mixing ratios of fly ash and bottom ash derived from the coal ash in Samchunpo thermoelectric power plants were determined. Furthermore, mixing conditions depending on the ratios of the cement and gypsum used for chemical additive were determined too. Uniaxial compression strength tests were conducted at different mixing conditions and Design graph of optimum mixing ratio at each required strength for economic efficiency is indicated in this paper.

Key words : Fly ash, Bottom ash, Mixing ratio, Chemical additive, Uniaxial compression strength, Design graph of optimum mixing ratio

1. 서론

국내 석탄회 발생량은 전기사용량의 증가에 기인하여 2006년에 연간 580만톤으로 조사되었으며, 향후 2010년에는 약 800만톤 이상의 석탄회가 발생할 것으로 추정되고 있다(전력경제신문, 2007. 7). 이는 상당규모의 회(灰)처리장의 건설을 요구하고 있으며, 이에 따른 투자비용의 증가, 환경오염 및 민원의 발생 등 다양한 문제점을 야기하고 있다(한국전자재시험연구원, 2006). 최근에는 이러한 문제점을 해결하기 위한 노력으로 석탄회의 재활용에 관한 연구 및 그 사례가 늘고 있으나, 현재 국내에서 재활용되는 석탄회는 대부분 정제된 플라이애쉬(Fly Ash)와 소량의 버텀애쉬(Bottom Ash)만이 운동장 배수 처리 등을 위한 조골재로서 쓰이고, 그 활용도 역시 선진국에 비해 크게 저조한 실정이다.

본 연구에서는 토목공사용 성토재료인 모래의 대체 재료로서 화력발전소 부산물인 석탄회의 이용 가능성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 석탄회의 대부분을 차지하는 플라이애쉬와 버텀애쉬의 배합비와 첨가제로 사용된 시멘트의 사용량에 따른 재료의 강도특성을 파악하고, 경제성을 고려하여 최적의 배합비를 제시하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 석탄회의 종류 및 특성

석탄회란 석탄화력발전소에서 미분탄(微粉炭)을 연소 후 부산물로 발생하는 회(재)를 말하며 석탄회의 발생위치에 따라 플라이애쉬, 버텀애쉬, 신더애쉬(Cinder Ash)로 구분할 수 있다. 그러나 절단기나 공기 예열기 아래에 있는 Hopper에 모이는 입경분 0.3~1.0mm 정도의 회 성분인 신더애쉬는 그 발생량은 매우 미미하여 분류가 어렵기 때문에 재활용 재료로 사용하기에 어렵다.

플라이애쉬는 석탄 화력 발전소에서 석탄 연소 후 발생하는 발전소 부산물로 집진기에서 포집되는 미분말 형태로서 그 화학적/물리적 특성상 알루미늄 실리카 계열의 구형 입자 형태로 포졸란(Pozzolan) 특성을 지니고 있을 뿐만 아니라 여러 측면에서 시멘트 대체재로 우수한 특성을 지니고 있다. SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃가 플라이애쉬 구성 성분의 전체 80~90%를 차지한다.

버텀애쉬는 석탄이 화력발전소 보일러 내에서 연소될 때 보일러 하부로 낙하하는 입자들 중 입경이 큰 회 성분을 말하며, 전체 석탄회 발생량 중 약 10~12% 정도를 차지한다. 버텀애쉬에는 SiO₂와 Al₂O₃가 전체 성분의 70%이상 차지하는 인공 포졸란 물질로서 자경성에 의해 강도가 장기적으로 증가하는 석탄회의 일종이다. 표 1에 플라이애쉬와 버텀애쉬의 시료 특성을 제시하였다.

표 1. 플라이애쉬와 버텀애쉬의 시료 특성

	발생량	입자크기	비중	분말도	주요성분
플라이애쉬	75~80%	1~150 μ m	1.9~2.3	4500cm ² /g	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃
버텀애쉬	10~12%	1mm 50% 1mm 이하 50%	2.0~2.4	1,300~2,400cm ² /g	SiO ₂ , Al ₂ O ₃

2.2 강도증가 메카니즘

2.2.1 시멘트 수화반응

① C₃S(2CaO·SiO₂), C₂S(2CaO·SiO₂)의 수화

C₃S가 물과 반응하면 Ca-O 결합이 끊어져 Ca²⁺가 용해되고 과포화 농도에 도달하면 Ca(OH)₂가 석출된다. 남아있는 SiO₄⁴⁻는 물과 반응하여 일단 [Si(OH)₆]₂와 같은 형태의 수소규산 이온으로 용해되고 곧 바로 축합하여 C₃S 미수화 입자 주위에 수화 실리카겔(hydraulic silica gel)상을 형성한다. 이 겔은 곧 이어 용출되는 Ca²⁺와 결합하여 규산칼슘수화물(C-S-H) 결정핵의 생성과 성장을 유발한다(이승헌, 2003).

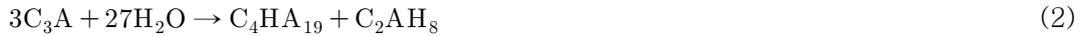


② C₃A(3CaO·Al₂O₃)의 수화

알루미늄산 칼슘광물은 C₃A, CA, C₁₂A₇, C₁₁A₇·CaF₂등인데 포틀랜드 시멘트에서는 C₃A로 존재하며 CA는 알루미나 시멘트에서, C₁₂A₇과 C₁₁A₇·CaF₂는 급경시멘트에서 존재한다. C₃A는 다른 시멘트 화합물에

비하여 수화열이 대단히 크다.

C₃A를 단독으로 물과 반응시키면 급격한 수화발열을 일으키며 수 μm 크기의 calcium aluminate 수화물(C-A-H)을 다량으로 석출한다.

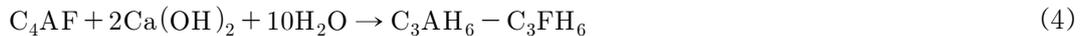


이러한 초기 C-A-H 수화물은 준안정상으로 이후 1~2μm 크기의 안정한 수화물로 변한다.



③ C₄AF(4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃)의 수화

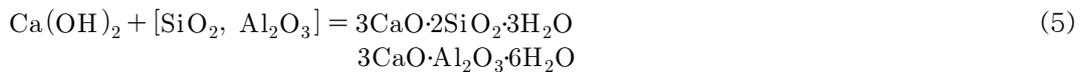
C₄AF는 겔상 수화물층이 생성되고 이 층은 점차 미세한 육각판상 결정의 응집체로 변한다. Fe₂O₃ 성분보다 Al₂O₃ 성분쪽의 용해가 빠르기 때문에 반응후의 C₄AF에는 Fe(OH)₃나 α-Fe₂O₃로 생각되는 암흑색의 겔이 남아있다. C₄AF 페이스트에서 최초로 나오는 육각판상 결정은 육방정에 속하는 C₃AH_x (x=10~12) 이후 입방정에 속하는 C₃AH₆로 변화하고 C₃AH_x상에 Fe₂O₃가 일부 치환고용하여 C₂AH₆-C₃FH₆ 고용체로 변화한다.



석고가 공존하면 C₄AF는 C₃A와 같은 방식으로 반응하여 에트링자이트를 생성하고 이어서 monosulfate로 변화하는 성질이 있는데 C₃A와 같은 신속한 반응성은 나타나지 않는다.

2.2.2 포졸란 반응

포졸란(Pozzolan)이란 그 자신만으로는 수경성을 갖지 않지만, 물에 용해되어 있는 수산화칼슘과 상온에서 서서히 반응하여 물에 녹지 않는 화합물을 만들 수 있는 미분 상태의 물질을 일컫는다. 포졸란 반응의 메카니즘은 포졸란 물질에서 용출된 가용성분(SiO₂, Al₂O₃)이 시멘트 구성 화합물인 C₃S, C₂S 등이 수화할 때 생성된 Ca(OH)₂와 서서히 반응하여 불용성 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H 겔)이나 칼슘알루미늄에이트 수화물(C-A-H 겔)을 형성하여 그 조직을 더욱 치밀하게 만드는 것이다.



3. 실험

3.1 재료

3.1.1 석탄회

본 연구에서는 삼천포 화력발전소의 회처리장에서 채취한 석탄회로 실험을 실시하였다. 삼천포 화력발전소 회처리장에서의 석탄회는 플라이애쉬와 버팀애쉬가 8:2의 비율로 비교적 균등하게 혼합된 상태로 매립되었으므로 주변 5개 지점에서 무작위로 시료를 채취하였다. 삼천포 화력발전소에서 발생된 석탄회의 화학 구성은 일반적으로 표 2와 같다(천병식 외, 1996). 삼천포 화력발전소 석탄회는 포졸란 반

응에 사용되는 가용성분인 SiO₂와 Al₂O₃가 75% 이상을 차지하고 있는 것으로 나타났다.

표 2. 삼천포 화력발전소 석탄회의 화학성분(천병식 외, 1996)

구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	BiO	SO ₂	Carbon
플라이애쉬	59.54	16.50	0.98	0.43	12.96	3.22	1.23	0.45	0.44	0.14	0.02	2.90
버텀애쉬	56.97	21.36	0.84	0.36	4.83	2.04	0.56	0.14	0.65	0.16	0.04	11.10

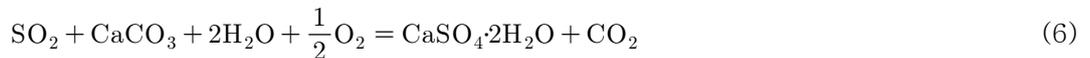
3.1.2 첨가제

본 연구에서는 플라이애쉬와 버텀애쉬의 비율에 따른 강도특성 뿐만 아니라 시멘트와 석고의 첨가량에 따른 강도의 변화 또한 파악하고자 하였다. 실험에 사용된 시멘트는 국내에서 생산되는 가장 일반적인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 보통 포틀랜드 시멘트는 알라이트라고 불리는 3CaO·SiO₂(C₃S)계 화합물, 벨라이트라 불리는 2CaO·SiO₂(C₂S)계 화합물, 3CaO·Al₂O₃(C₃A)계 화합물, 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃(C₄AF)계 화합물 및 석고 (CaSO₄·2H₂O)의 5종류의 광물을 기본 조성으로 하며, 일반적으로 각각 51%, 25%, 9%, 9%, 4% 정도의 비율로 구성되어 있다. 보통 포틀랜드 시멘트의 화학성분은 표 3과 같다.

표 3. 보통 포틀랜드 시멘트의 화학조성

구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
보통 포틀랜드 시멘트	22.1	5.0	3.0	63.8	1.6	2.0	0.35	0.54	0.30	0.11	0.13

석고는 삼천포 화력발전소에서 채취한 탈황석고를 사용하였다. 탈황석고란, 발전소 탈황시설에서 발생되는 부산물로서, 발전소에서 연료의 연소시에 발생하는 아황산가스(SO_x)를 제거하기 위하여 석회석과 반응시킬 경우 발생된다.



3.1.3 배합설계실험 조건

본 실험에서는 플라이애쉬와 버텀애쉬의 배합비에 따라 시료를 두 종류(A 시료, B 시료)로 분류하였다. A 시료는 삼천포 화력발전소에서 채취한 석탄회로서 #200번체(0.075mm)로 채가름한 비정제 플라이애쉬 100% 시료이며, B 시료는 #200번체로 채가름한 비정제 플라이애쉬와 나머지 버텀애쉬 시료를 8:2의 일정 중량비로 균등 혼합한 시료이다. 본 연구에 앞서 A, B 시료의 물리·역학적 특성을 파악하고자 표 4와 같이 실내 실험을 실시하였다.

본 연구에서는 각각의 시료에 1m³당 시멘트와 석고의 첨가량을 변화시키며 총 5 Case의 실험을 수행하였다. 즉, 실험은 Case A-1~B-5 까지 총 10Case가 수행되었으며, 각 Case 별로 7일, 14일, 28일 양생된 공시체에 대하여 일축압축강도 실험을 각 3회씩 실시하여 평균값으로 일축압축강도를 결정하였다.

공시체를 최적함수비 상태로 조성하기 위하여 실내 다짐시험을 선행하였다. 다짐시험을 통해 최적함수비를 파악한 후 A, B 시료의 최적함수비로 시료를 혼합하여 공시체를 제작하였다. 본 연구의 배합설계 시험조건을 표 5에 나타내었다.

표 4. A, B 시료의 물리·역학적 특성 실험 및 결과

실험종류	규격	실험 결과		
		A	B	
입도분포	KS F 2302	표준입도분포 곡선에서 벗어남		
Atterberg 시험	KS F 2303	N.P	N.P	
실내 CBR 시험	혼합직후 혼합 28일 후	KS F 2320	28.5%	30%
			42%	42.5%
다짐시험	γ_d O.M.C	KS F 2312	1.117g/cm ³	1.25g/cm ³
			29.11%	29.6%
비중시험	KS F 2308	2.21	2.23	
투수시험	혼합직후 혼합 28일 후	KS F 2322	2.56×10 ⁻⁴ cm/s	4.98×10 ⁻⁴ cm/s
			7.65×10 ⁻⁸ cm/s	1.03×10 ⁻⁸ cm/s
잔골재의 흡수율 시험 방법	KS F 2504	8.46%	6.0%	
직접 전단	c ϕ	KS F 2344	0.07kgf/cm ²	0.07kgf/cm ²
			28.0°	32.9°

표 5. 배합설계 시험조건

Case	삼천포 하력발전소	
	A (100% 플라이애쉬)	B (플라이애쉬:버텀애쉬 = 8:2)
1	50 + 0	40 + 0
2	70 + 0	60 + 0
3	90 + 0	80 + 0
4	50 + 50	40 + 50
5	70 + 100	60 + 100
비고	비정제 플라이애쉬	비정제 플라이애쉬

1m³당 시멘트(kg)+ 석고(kg)

4. 실험결과 및 분석

4.1 일축압축강도에 의한 배합실험 결과

A, B 시료의 첨가제 함량에 따른 재령 7일, 14일, 28일 일축압축강도를 표 6에 나타내었다.

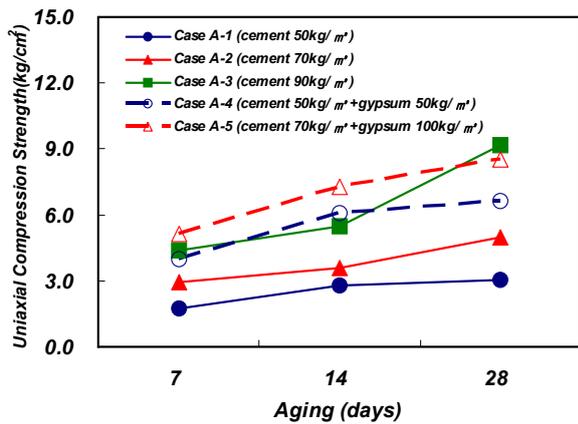
표 6. A, B 시료의 배합설계 결과

Case	원료배합비(%)		첨가제(kg/m ³)		일축압축강도(kg/cm ²)		
	플라이애쉬	버텀애쉬	시멘트	석고	재령 7일	재령 14일	재령 28일
A-1	100	-	50	-	1.72	2.77	3.06
A-2	100	-	70	-	2.92	3.10	5.00
A-3	100	-	90	-	4.37	3.90	10.10
A-4	100	-	50	50	3.97	6.08	6.06
A-5	100	-	70	100	5.12	7.27	8.50
B-1	80	20	40	-	2.09	3.22	3.37
B-2	80	20	60	-	2.57	3.23	3.51
B-3	80	20	80	-	2.63	4.23	4.74
B-4	80	20	40	50	5.25	6.04	8.14
B-5	80	20	60	100	5.79	7.50	8.83

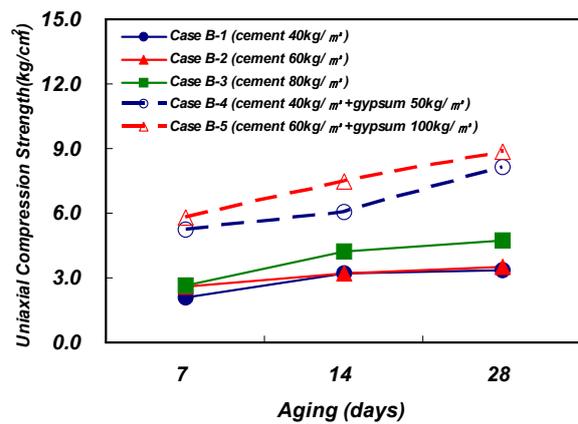
그림 1.(a)는 A-1~A-5의 재령기간에 따른 일축압축강도를 나타낸 그림이다. A-1, A-2, A-3를 비교하여 A 시료에 첨가된 시멘트의 양에 따른 영향을 파악할 수 있다. 재령 7일과 재령 28일의 일축압축강도를 비교한 결과, A-1은 78%, A-2는 72% 증가하였고, A-3의 경우 약 110%로 A-1과 A-2에 비해 비교적 큰 강도증가를 나타냈다. 시멘트 첨가량에 따른 일축압축강도의 증가는 50kg/m^3 에서 90kg/m^3 으로 시멘트 첨가량이 증가함에 따라 재령 7일에 153%, 재령 28일에 200% 증가하였다. 이는 시멘트의 첨가량의 증가로 인해 추가적인 포졸란 반응이 유발되었기 때문인 것으로 판단된다.

A-1과 A-4, A-2와 A-5를 비교하여 시료에 첨가된 시멘트 양이 동일한 경우, 석고의 첨가에 따른 일축압축강도의 변화를 파악할 수 있다. 일축압축강도는 50kg/m^3 의 석고를 첨가한 경우 평균 2.85kg/cm^2 증가하였으며, 석고의 첨가량이 100kg/m^3 인 경우 평균 3.29kg/cm^2 증가한 것으로 나타났다. 이는 석고의 첨가로 인하여 시멘트의 구성성분인 C_3S 의 수화가 촉진되었기 때문이다(이의학 외, 2001).

그림 1.(b)는 Case B-1~B-5의 재령기간에 따른 일축압축강도를 나타낸 그림이다. 첨가된 시멘트의 양에 따른 재령 7일과 재령 28일의 일축압축강도를 비교한 결과, B-1은 61%, B-2는 36%, B-3은 80% 증가하였다. 시멘트 첨가량이 40kg/m^3 에서 80kg/m^3 으로 증가함에 따라 일축압축강도는 재령 7일에 26% 증가하였으며, 재령 28일에는 증가하였다. A 시료의 경우 시멘트 첨가량에 따라 재령 7일에 153%, 재령 28일에 200%로 증가한 것과 비교하면 B 시료의 경우 시멘트 첨가량에 따른 일축압축강도의 증가량은 매우 작은 것으로 나타났다. 첨가된 시멘트 양이 동일한 경우, 석고의 첨가에 따른 일축압축강도는 50kg/m^3 의 석고를 첨가한 경우 평균 3.59kg/cm^2 증가하였으며, 석고의 첨가량이 100kg/m^3 인 경우 평균 4.27kg/cm^2 증가하여 B 시료가 A 시료에 비해 석고 첨가량에 따른 일축압축강도의 증가량은 큰 것으로 나타났다.



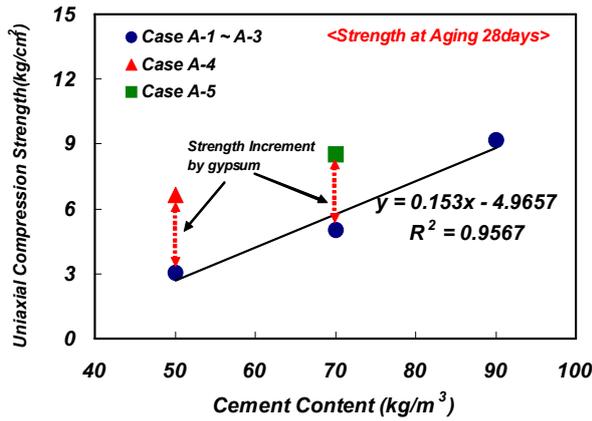
(a) A 시료



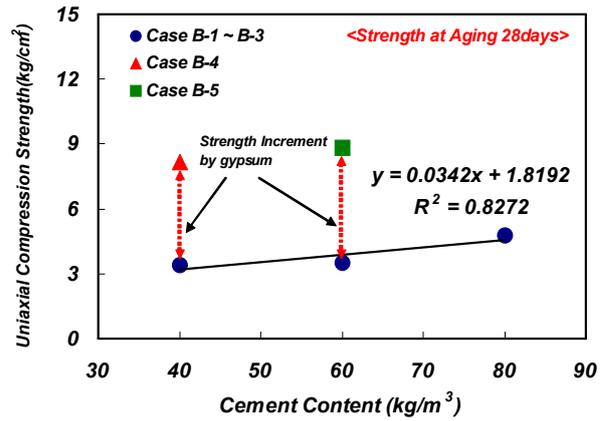
(b) B 시료

그림 1. 재령기간에 따른 일축압축강도

그림 2는 시멘트와 석고의 첨가량에 따른 A 시료와 B 시료의 재령 28일 일축압축강도 변화를 나타낸 그래프이다. 양생 기간이 동일한 경우 일축압축강도는 시멘트 첨가량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 추세를 나타냈다. 또한 시멘트만 첨가한 경우보다 석고를 추가적으로 첨가한 경우 일축압축강도는 더욱 증가하는 경향을 나타냈다. A 시료와 B 시료에 석고를 50kg/m^3 첨가한 경우 재령 28일 일축압축강도는 각각 3.00kg/m^3 과 4.77kg/m^3 증가하였고, 석고의 첨가량이 100kg/m^3 인 경우에는 각각 3.50kg/m^3 과 5.32kg/m^3 로 증가하였다. 석고 첨가에 대한 일축압축강도 증가 경향을 파악해 보면, 석고를 50kg/m^3 에서 100kg/m^3 로 첨가량을 증가시켰지만, 그 석고의 첨가로 인한 증가량은 거의 동일하게 나타났다. 이를 통해 석고의 첨가가 일축압축강도의 증가의 영향인자라는 것을 파악할 수는 있었지만, 석고의 첨가량과 일축압축강도 증가량이 비례하지 않는다는 것을 알 수 있었다.



(a) A 시료



(b) B 시료

그림 2. 시멘트와 석고의 첨가량에 따른 재령 28일 일축압축강도 변화

4.2 최종배합비 결정

4.2.1 시료배합에 따른 단가 산정

A-1 ~ B-5의 배합비에 따라 산정된 단가를 표 7에 나타내었다. 단가는 1m³당 첨가된 시멘트의 양을 기준으로 산정되었고, 시멘트 1포(40kg)의 단가는 3370원으로 계산하였다(한국물가정보, 2007). 석고는 발전소 탈황시설에서 발생하는 부산물인 탈황석고를 사용하였기 때문에 단가 산정에서 제외하였다.

표 7. 시료배합에 따른 일축압축시험 결과 및 단가산정

	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
단가(원/m³)	4,212.5	5,897.5	7,582.5	4,212.5	5,897.5	3,370	5,055	6,740	3,370	5,055

현장 인공골재의 일축압축 강도를 최소 2.5kg/cm² 정도라고 가정했을 경우, 안전율 2를 고려하면 최종 실내 압축강도는 5kg/cm² 이상이다. 본 연구에서 제시한 실험조건 중에서 일축압축강도가 기준치 이하인 배합을 제외한 결과를 표 8에 나타냈고, 그림 3은 A 시료와 B 시료의 재령 28일 일축압축강도를 제작단가에 의해 나타냈다. 배합설계 실험 조건표 중에서 기준치 강도를 초과하면서 경제적인 배합을 선별한 결과 A 시료의 경우 A-4, B 시료의 경우 B-4가 선정되었다.

표 8. 기준치(5kg/cm²) 이상 일축압축시험의 시료배합

Case	원료배합비(%)		첨가제(kg/m³)		일축압축강도(kg/cm²)			단가(원/m³)
	플라이애쉬	버텀애쉬	시멘트	석고	재령 7일	재령 14일	재령 28일	
A-2	100	-	70	-	2.92	3.10	5.00	5897.5
A-3	100	-	90	-	4.37	3.90	10.10	7582.5
A-4	100	-	50	50	3.97	6.08	6.06	4212.5
A-5	100	-	70	100	5.12	7.27	8.50	5897.5
B-4	80	20	40	50	5.25	6.04	8.14	3370
B-5	80	20	60	100	5.79	7.50	8.83	5055

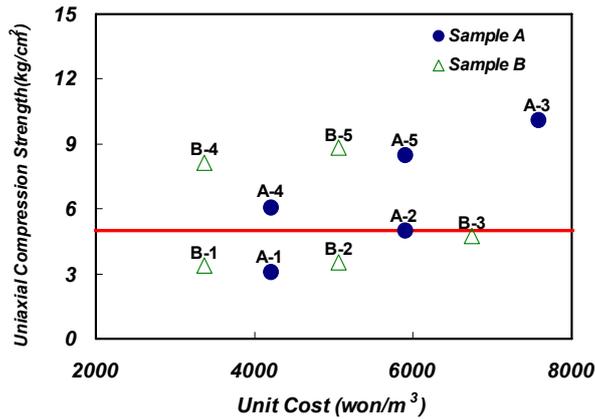


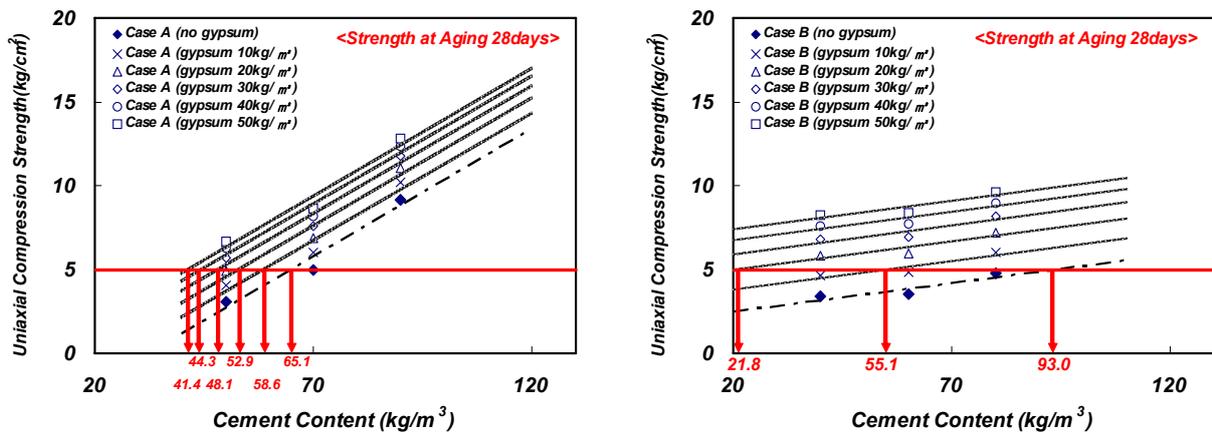
그림 3. A 시료와 B 시료의 제작단가에 따른 재령 28일 일축압축강도

4.2.2 최적 배합비 산정 분석

일축압축시험 결과 시멘트와 석고의 혼합에 따라 강도의 증가는 분명하나 인공골재의 소성화 등을 고려할 때 시멘트와 석고의 적정혼합 및 이에 따른 경제성을 고려하여 기준강도를 만족하면서 최소의 시멘트 함량과 소량의 석고 배합을 검토하였다. 본 연구에서 수행한 일축압축시험의 결과를 종합하여 재령 28일 강도가 최소 요구 강도 5kg/cm^2 를 만족하는 최적 배합비를 산정하기 위한 도표를 제시하였다.

그림 4.(a)는 최소 요구 강도인 5kg/cm^2 를 만족시키기 위하여 A 시료의 배합비를 결정하는 그래프이다. 20kg/m^3 의 석고가 첨가된 경우 최소 요구 강도인 5kg/cm^2 를 만족하는 최적의 시멘트 첨가량은 52.9kg/m^3 로 나타났으며, 10kg/m^3 의 석고가 첨가된 경우 최적의 시멘트 첨가량은 58.6kg/m^3 로 나타났다. 석고를 전혀 사용하지 않을 경우에는 최소 요구 강도를 만족하기 위하여 65.1kg/m^3 의 시멘트가 필요한 것으로 나타났다. 그 외의 석고 첨가량에 따라 산정된 시멘트 요구량 또한 그림 4.(a)를 통해 파악할 수 있다.

그림 4.(b)는 최소 요구 강도인 5kg/cm^2 를 만족시키기 위하여 B 시료의 배합비를 결정하는 그래프이다. 10kg/m^3 의 석고가 첨가된 경우 최적의 시멘트 첨가량은 55.1kg/m^3 로 나타났으나, 석고를 첨가하지 않은 경우에 최적의 시멘트 첨가량은 93.0kg/m^3 로 매우 크게 나타났다. 그 외의 석고 첨가량에 따라 산정된 시멘트 요구량을 그림 4.(b)에 나타내었다.



(a) A 시료

(b) B 시료

그림 4. 최소 요구 강도인 5kg/cm^2 를 만족시키기 위한 배합비

위의 결과를 바탕으로 각 시료별 최소 요구 강도 5kg/m^2 를 만족하는 시멘트와 석고의 배합설계 예를 표 9에 제시하였다. 이때, 시멘트의 사용은 최소 20kg/m^3 이상으로 하였다.

표 9. 시료 종류별 일축압축강도 5kg/m^2 를 만족하는 최적 배합비

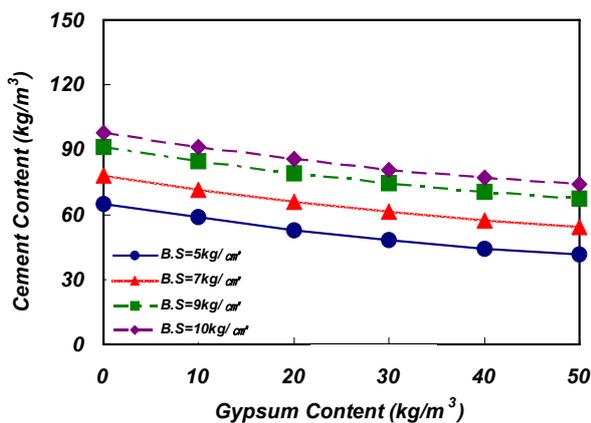
시료	최적 배합비				비고
	원료배합비(%)		첨가제(kg/m^3)		
	플라이애쉬	버텀애쉬	시멘트	석고	
A	100	-	65.1	0	
A	100	-	58.6	10	
<u>A</u>	100	-	52.9	20	최적
A	100	-	48.1	30	
A	100	-	44.3	40	
A	100	-	41.4	50	
B	80	20	93.0	0	
<u>B</u>	80	20	55.1	10	최적
B	80	20	21.8	20	

표 9에서 제조 단가를 줄이기 위해 시멘트의 양을 최소화하고 소성화의 우려가 없는 석고의 양을 추천하면 그 배합설계는 다음과 같다.

- (7) A 시료(플라이애쉬:버텀애쉬 =100:0, 삼천포) - 55(시멘트):20(석고) [단가:4633.8원/ m^3]
 B 시료(플라이애쉬:버텀애쉬 =80:20, 삼천포) - 55(시멘트):10(석고) [단가:4212.5원/ m^3]

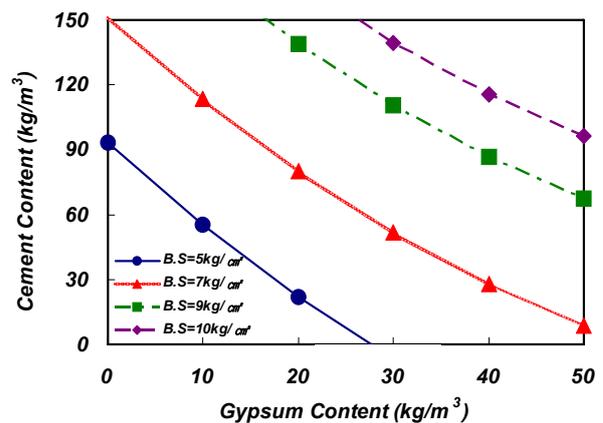
재료의 소성화가 우려되는 석고의 양이 얼마인가 하는 문제는 아직 국내 시료에 대하여 자료가 미흡하지만, 20-30%까지는 문제가 없다고 판단된다. 따라서 석고의 양에 따라 시멘트의 필요량이 달라질 수 있고, 기준 강도에 따라 시멘트와 석고의 배합은 다양한 경우가 나올 수 있다.

그림 4의 결과를 바탕으로, 각 시료별로 최소 요구 강도를 $5\sim 10\text{kg/cm}^2$ 으로 변화시킬 경우의 최적 배합비를 산정하기 위한 도표를 그림 5에 제시하였다. 이를 통해 각 시료별로 동일한 최소 요구강도를 만족시키기 위한 다양한 최적 배합비를 산정할 수 있다.



* B.S : Basic Strength

(a) A 시료



* B.S : Basic Strength

(b) B 시료

그림 5. 최소 요구 강도의 변화에 따른 최적 배합비를 산정

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 삼천포 화력발전소에서 발생된 석탄회를 이용하여 배합비에 따른 일축압축강도 시험을 통해 최적 배합비 산정 기법을 개발하고자 하였으며, 각 실험을 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. A 시료와 B 시료 모두 시멘트 첨가량이 증가함에 따라 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 시멘트의 첨가로 인하여 추가적인 포졸란 반응이 유발되었기 때문이라고 판단된다.
2. 석고의 첨가는 시멘트의 구성성분인 C_3S 의 수화를 촉진시켜 일축압축강도를 증가시키지만, 석고의 첨가량과 일축압축강도의 증가가 비례하여 발생하지 않는다는 것을 파악하였다.
3. 본 연구에서 수행한 일축압축시험의 결과를 종합하여 재령 28일 강도가 최소 요구 강도 5kg/cm^2 를 만족하는 최적 배합비를 산정하기 위한 도표를 작성하였다. 최적 배합비 산정 도표를 분석한 결과 제조 단가를 줄이고 소성화의 우려를 최소화할 수 있는 배합비를 선정하였다.

- A 시료(플라이애쉬:버텀애쉬=100:0, 삼천포) - 55(시멘트):20(석고) [단가:4633.8원/ m^3]

- B 시료(플라이애쉬:버텀애쉬=80:20, 삼천포) - 55(시멘트):10(석고) [단가:4212.5원/ m^3]

참고문헌

1. 이의학, 전준영, 김진욱, 유창진(2001), “석고 형태 및 첨가량이 시멘트 경화체의 품질에 미치는 영향성 검토”, 한국요업공업협회 연구자료
2. 천병식, 오민영 외 2인(1996), “석탄회의 토공재로서의 활용에 관한 연구”, 한국지반공학회, 제 12권, 제1호.
3. 한국건자재시험연구원(2006), “석탄회 바닥재(버텀애쉬)의 환경친화적 재활용 표준화 연구”, 산업자원부 기술표준원
4. 한국남동발전 삼천포 화력본부(2005), “매립석탄회 재활용 기술 개발”, 최종연구보고서
5. 한국물가정보(2007)