

매립회를 사용한 시멘트 모르타르의 재료 물성 평가에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Evaluation of Material Properties in Cement Mortar with Pond Ash

정 상 화¹⁾ 김 주 형²⁾ 권 성 준^{3)*}
Jung, Sang Hwa Kim, Joo Hyung Kwon, Seung Jun

Abstract

Among the byproducts from thermal power plant using coal combustion, fly ash as mineral admixture is widely utilized in concrete manufacturing for its engineering merits. However residuals including bottom ash are usually reclaimed. This study presents an evaluation of engineering properties in cement mortar with pond ash (PA).

For this work, two types of pond ash (anthracite and bituminous coal) are selected from two reclamation sites. Cement mortar specimens considering two w/c (0.385 and 0.485) ratios and three replacement ratio of sand (0%, 30%, and 60%) are prepared and their workability, mechanical, and durability performance are evaluated. Anthracite pond ash has high absorption and smooth surface so that it shows reasonable workability, strength development, and durability performance since it has dense pore structure due to smooth surface and sufficient mixing water inside. Reuse of PA is expected to be feasible since PA cement mortar has reasonable engineering performance compared with normal cement mortar.

Keywords : Pond ash, Coal combustion, Cement mortar, Durability, Workability

1. 서 론

화력발전은 국내 발전산업 중 가장 큰 전력생산원이며, 다른 발전시설에 비하여 비교적 저렴한 시공과 안정성 있는 재료공급으로 인해 꾸준히 사용되고 있다 (Lee et al., 2010). 그러나 추가적으로 생산되는 화석연료로 인한 대기오염문제와 발생하는 부산물로 인한 피해도 많이 보고되고 있다. 석탄 미분탄은 연소한 뒤, 발생 위치에 따라 플라이 애쉬, 바텀 애쉬, EP (Electrical Precipitator) 애쉬, C (Cinder) 애쉬 등으로 분류할 수 있다 (KCL, 2010). 일반적으로 총 발생량의 75~90%를 차지하는 플라이 애쉬는 EP 애쉬, C 애쉬를 포함하기도 한다. 플라이 애쉬는 콘크리트 혼화재로 적극적으로 사용되고 있는데, 많은 문헌에서 불베어링 효과에 의한 워커빌리티 증가, 장기장도의 증가, 수화열 저감, 내구성 증가 등 혼화재료로 사용시 많은 장점이 있다 (Song et al., 2005; KCI, 2010; Thomas and Bamforth, 1999). 대략 플라이 애

쉬의 재활용률은 70% 수준에 이르므로, 자원의 선순환에 좋은 예라고 할 수 있다. 그러나 바텀 애쉬의 경우는 40% 수준만이 재활용되고 있으므로 이에 대한 자원재활용에 대한 연구가 시급하다 (KCI, 2010). 10~25% 수준으로 발생하는 바텀 애쉬는 최근 일부 콘크리트에 골재로 적용하는 연구가 진행되었으나 (Kim and Ahn, 2009; Won et al., 2002), 현장에서 적용되기는 아직도 무리가 있다. 재활용되지 못하는 바텀 애쉬는 소각로 바닥에서 다른 부산물들과 함께 집진되어 근처의 매립지로 운송된다. 매립되는 석탄재는 40% 이상이 습식매립이 되므로 재활용하기 어려운 상황이며, 해안가에 위치할 경우 많은 염화물 이온을 포함하게 된다 (KCL, 2010). 그러나 점차로 매립 면적이 부족해지고 비용이 증가함에 따라 매립된 석탄재의 활용이 필요하다.

본 연구는 이렇게 매립된 재료를 매립회 (Pond Ash)라고 정의하고 이에 대한 건설재료 활용성을 검토하기로 한다. 기존의 연구에서도 바텀 애쉬가 아닌 매립회를 잔골재로 활용

1) 정희원, 한국건설생활환경 시험연구원
2) 정희원, 한국건설생활환경 시험연구원
3) 정희원, 한남대학교 건설시스템공학과, 교신저자

* Corresponding author : jjuni98@hannam.ac.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2013년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2013년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

한 연구가 있으며 콘크리트로 제조하여 적용성을 평가한 연구를 확인할 수 있다 (Lee et al., 2011a; 2011b).

매립회는 바텀 애쉬가 주를 이루지만, 일부 플라이 애쉬, 미연탄소, 토양 미립분 등이 포함되어 있다. 특히 해수와 인접한 매립지에서는 염화물 이온이 포함되어 있기도 하다 (KCL, 2010). 본 연구에서는 국내 화력발전소 매립지 중 두 곳을 선택하여 매립회를 채취하였으며, 이 매립회를 이용하여 시멘트 모르타르를 제조하였다. 매립회 시멘트 모르타르의 워커빌리티, 역학적 성능 및 내구성능이 평가되었으며, 이를 통하여 건설재료로서의 활용 가능성을 평가하였다. Fig. 1에서는 매립회 채취에 대한 사진을 수록하였으며, Fig. 2에서는 일반적인 플라이 애쉬 및 바텀 애쉬의 수집과정을 나타내고 있다 (Ramme and Taraniyil, 2004).



Fig. 1 Sampling of PA from reclamation site

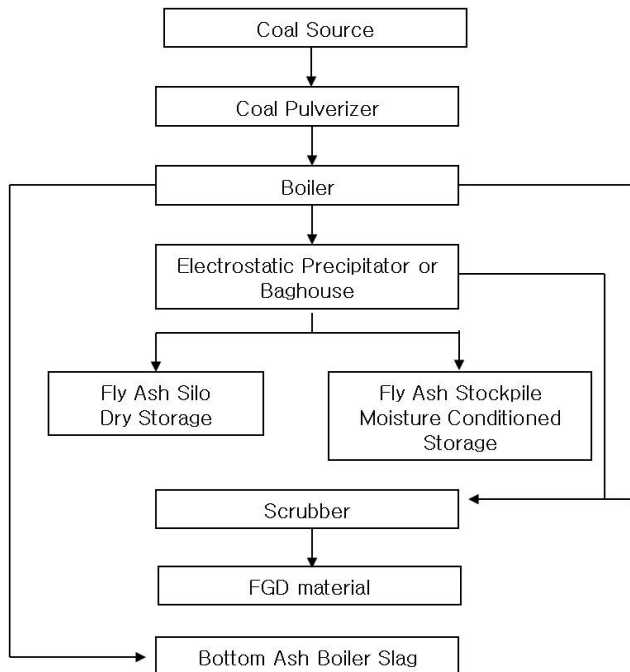


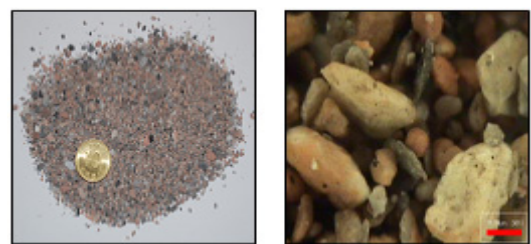
Fig. 2 Conventional acquisition process for FA and BA (Ramme and Taraniyil, 2004)

2. 실험계획

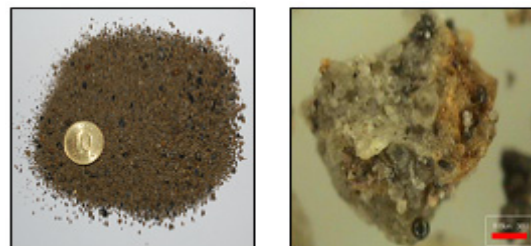
2.1 사용재료

국내화력발전소에서는 수입된 무연탄과 국내에서 생산된 유연탄이 사용되고 있다. 국내 유연탄 (Bituminous Coal)은 국내에 풍부하게 있으며, 연소 후 원료의 40~50%에 해당하는 많은 재 (ash)를 남기게 된다. 또한 열량도 4,000Kcal/kg으로 비교적 낮은 편이다. 반면 미국 및 캐나다에서 수입되는 무연탄 (Anthracite)의 경우 15% 정도의 재만 남긴다. 무연탄의 경우 50% 정도가 철강제품 생산에 사용되고 30%정도는 화력발전소에 사용되는 것으로 알려져 있다 (KCL, 2010). 10개의 채취 가능한 화력발전소에서 2개의 매립지가 선정되었으며 (T site, D site), 각 매립지당 2개의 채취장소를 만들어 매립회를 입수하였다. 전술한대로 매립회는 플라이 애쉬, 바텀 애쉬, 토양 미립분들을 포함하고 있는 상태이다. 많은 혼입물들이 매립회에 있으므로 세척을 통하여 불순물을 제거한 뒤 실험을 수행하였다. 50배로 확대한 매립회 사진을 Fig. 3에 나타내었는데, D site에서 채취한 매립회는 무연탄으로, T site에서 채취한 매립회는 유연탄으로 조사되었다.

XRF (X-ray Fluorescence Spectrometry)를 이용한 화학 조성분석결과와 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다. 또한 체가름 실험을 통하여 입경 0.15mm~5mm에 해당하는 매립회를 잔골재로 사용하였다. 시멘트는 1종 보통 시멘트 (OPC: Ordinary Portland Cement)를 사용하였으며, 그 화학적 조성



(a) PA (Anthracitic) from D site



(b) PA (Bituminous) from T site

Fig. 3 Image for different PA (unit length: 20 μ m)

Table 1 Chemical and physical composition of PA

Chemical	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	ZrO ₂	P ₂ O ₅	C	LOI	Sum
DH	53.47	28.25	3.65	1.99	0.72	0.65	2.88	1.2	0.03	0.1	6.90	0.27	99.84
TA	55.47	23.75	12.81	2.93	1.2	0.64	0.78	1.21	0.1	0.34	0.35	0.34	99.93
Physical	DS ¹⁾ (kg/m ³)		DD ²⁾ (kg/m ³)		Unit weight (kg/m ³)		Absorption (%)		Solid Vol.(%)		F.M.		
D site	2,270		2,120		1,315		6.32		59.4		2.88		
T site	2,090		1,900		1,032		3.32		51.2		2.74		

¹⁾ DS: Density in Saturated condition

²⁾ DD: Density in Dried condition

Table 2 Properties of OPC

Physical properties		Chemical component (%)								
Density (kg/m ³)	Blaine (m ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	Ig. loss	
3,140	320	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	0.21	2.2	1.3	

Table 3 Properties of HWRA

Item	Color and condition	Mass Contents (%)	Density (kg/m ³)	pH
High-range Water Reducing Agent (HWRA)	Dark brown liquid	41~45	1.15	7~9

Table 4 Properties of normal sand

Item	Density (kg/m ³)	Absorption (%)	Unit weight (kg/m ³)	F.M.
Sand	2,580	0.72	2,640	2.57

은 Table 2에 나타내었다. 목표 플로우를 얻기 위하여 고성능 감수제 (HWRA: High Water Reducing Agent)를 사용하였으며, 그 성분 Table 3에 나타내었다. 또한 기준조건에 사용될 일반 잔골재의 물리적 성질은 Table 4에 나타내었다.

Table 1에서는 D site의 매립회에 Fe₂O₃ 성분이 적으며 탄소의 함량이 높은 것을 알 수 있다. 시멘트 모르타르 제조시의 미연탄소는 소수성 표면을 가지고 있으며, 고성능 감수제와 같은 화학혼화제를 흡수한다 (Neville, 1996). 이로 인해 동일한 감수제량을 사용할 경우 슬럼프 손실이 발생하여 작업성이 안 좋아질 수 있다. 두가지 PA 매립회 모두 일반 잔골재보다 높은 흡수율을 가지고 있었는데, DH의 무연탄 매립회는 6.32%의 높은 흡수율을 가지고 있었다. 일반적으로 흡수율이 높은 다공성골재는 표면건조 포화상태로 배합을 할 경우 내부양생 (internal curing)을 촉진시키는 것으로 알려져 있다 (Du and Folliard, 2005).

2.2 세척에 따른 염화물량의 변화

매립 장소는 주로 해안가에 있으므로 세척을 통하여 염화물

Table 5 Chloride contents with washing and submerging period

Submerging days and washing times	Chloride contents (kg/m ³)	
	T site	D site
0 Day	0.061	0.012
1 Day	0.021	0.031
2 Day	0.019	0.018
3 Day	0.016	0.017
4 Day	-	0.006

량 및 이물질의 제거가 필요하다. 매립회 지반을 대상으로 시추를 통해 지하수의 염화물 함유량을 조사하였다. T지역에서는 0.095~0.577kg/m³이 조사되었으며, D지역에서는 0.216~0.387kg/m³으로 조사되었다. 침지일수에 따라 각각 염화물량이 다르게 평가되었지만, 4일 침지 및 세척을 통하여 염화물량은 거의 없는 것으로 조사되었다. Table 5에서는 D 및 T 지역의 매립회에 대하여 세척 및 침지일수에 따른 염화물량의 변화를 나타내고 있다.

2.3 배합 및 실험사양

2.3.1 배합

매립회를 사용한 시멘트 모르타르를 제조하기 위하여 2가지 조건의 w/c (0.385, 0.485)가 사용되었으며 잔골재 치환

Table 6 Mix proportions for PA cement mortar

Mix No.	w/c (%)	PA content (%)	Unit weight (kg/m ³)				HWRA (C×wt.%)		Target Flow (mm)
			W	C	S	PA	D	T	
I-1	38.5	0	196.3	510	1249	0	-	105±5	
I-2		30			247	510			
I-3		60			499	749			
I-4	48.5	0	247.3	510	1249	0	-	180±5	
I-5		30			874	374			
I-6		60			499	749			
II-1	38.5	0	196.3	510	1249	0	-	105±5	
II-2		30			247	510	0.1		0.75
II-3		60			499	749	0.2		1.6
II-4	48.5	0	247.3	510	1249	0	-	180±5	
II-5		30			874	374	0.1		0.8
II-6		60			499	749	0.1		1.7

률은 3가지 (1%, 30%, 60%)가 고려되었다. 목표 플로우는 w/c 0.385인 경우는 105±5mm, 0.485인 경우는 180±5mm로 설정하였다. 일반적으로 고유동성 콘크리트에 대한 슬럼프 및 강도를 참고하여, 목표 플로우는 설정하였는데, 이를 만족하기 위한 고유동화제의 첨가량 변화를 분석하도록 한다 (KCL, 2010). 또한 배합전에 일반잔골재 및 매립회는 표면조건 포화상태 (surface saturated)를 유지하였다. Table 6에서는 본 시험을 위한 배합표를 나타내고 있는데, 고성능 감수제를 혼입한 경우와 혼입하지 않은 경우를 고려하여 유동특성을 파악하였다. 배합시 입도에 대한 평가는 중요한데, 동일 지역 매립회의 입도분석은 기존의 연구 (Lee et al., 2011a)에 조사되어 있다. 1.91~3.36의 변동성이 큰 조립률을 가지고 있었는데, 일반 표준사를 10~30%를 치환하여 사용할 경우 입도분포를 만족한다고 보고되고 있다.

2.3.2 워커빌리티, 강도 및 내구성 실험

1) 워커빌리티 및 강도평가

시멘트 모르타르의 워커빌리티는 플로우 시험으로 평가하였다. 매립회의 잔골재 치환률을 세가지로 분류하여 플로우 시험이 수행되었으며, 목표 플로우는 위한 고성능 감수제의 사용량이 분석되었다. 또한 응결시간 (setting time)은 잔존하는 탄소량 및 흡수된 배합수량에 영향을 받으므로 이를 고려하기 위해 응결시간이 측정되었다. 압축강도 평가를 위해 직육면체몰드 (50×50×50mm)가 사용되었으며, 재령 3일, 7일, 28일, 90일에 해당하는 강도가 평가되었다.

Table 7 Test items and related standards

Test items	Referred method	Measuring period or interval
Workability and strength	Flow	KS L 5105
	Setting time	KS F 2436
	Compressive strength	KS L 5105
Durability	Porosity evaluation	Mercury intrusion porosimetry
	Freezing and thawing Resistance	KS F 2456
	Penetration Resistance of Chlorine Ion	NT Build 492
	Accelerated Carbonation	KS F 2584

2) 내구성 평가

시멘트 경화체 내부의 공극은 유해이온의 이동에 직접적으로 연관되므로 내구성평가의 기본이 된다. 공극률 평가를 위하여 MIP (Mercury Intrusion Porosimetry- 수은압입법)이 수행되었다. 또한 염해 및 탄산화 저항성을 상대적으로 평가하기 위해 전기영동실험 (NT BIULD 492)에 따른 촉진 염화물 확산계수 실험과 촉진탄산화실험이 수행되었다. 또한 흡수율이 큰 PA 골재를 사용하므로, 동결융해 실험을 수행하여 건전성을 평가하였다. 특히 동결융해시험에서는 -18℃~+4℃의 1 cycle을 300회 실시한 후 압축강도변화를 재령에 따라 측정하였다. 이상의 실험에 대한 항목과 관련규격을 Table 7에 정리하였다.

3. 매립회 시멘트 모르타르의 공학적 성능평가

3.1 플로우 평가

기존의 연구에 의하면 바텀 애쉬를 혼입한 콘크리트에서 모세관을 통한 흡수 증가는 바텀 애쉬 미분말에 의한 영향보다는 바텀애쉬 자체의 공극특성에 기인한다고 알려져 있다 (Andrade et al., 2007). 이는 다공성 골재를 혼입한 콘크리트에서 발생하는 내부양생 (Internal Curing)과 관련이 있다. 표면이 포화된 다공성 골재는 내부의 수화도를 높일 수 있는 유일한 방법이므로 건조상태의 다공성 골재를 사용한 콘크리트에 비해 높은 강도 및 내구성을 가지고 있다 (Bentz et al., 2005; Nisnevich et al., 2001). 고성능 감수제를 사용한 매립회 모르타르의 플로우 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

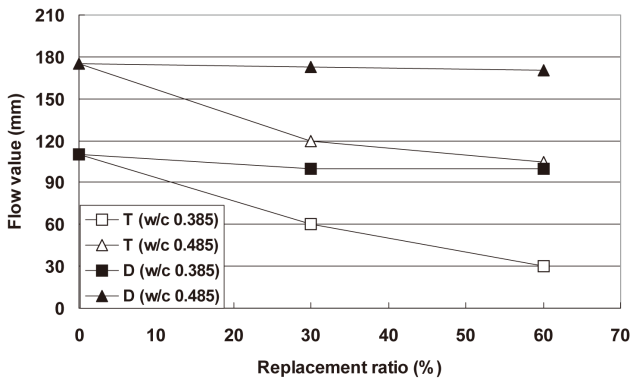


Fig. 4 Flow test with different replacement ratio of PA

Fig. 4에서 알 수 있듯이 무연탄 매립회인 D의 경우 플로우 손실이 거의 없음을 알 수 있으나 유연탄 매립회인 T의 경우 플로우 손실이 크게 발생하였다. 이는 흡수율이 6.32%로 매우 높은 D 매립회의 경우 충분한 표면건조 포화상태를 가지므로 이로 인해 유동성이 커짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 3에서 알 수 있듯이 D 매립회의 경우 깨끗하고 매끈한 표면을 가지고 있으므로 플라이 애쉬와 같은 ball bearing 효과를 가지며 (Neville, 1996), 이로 인해 치환률의 변화에 관계없이 플로우 손실이 작게 평가되었다. Fig. 5에서는 목표 플로우를 맞추기 위한 고성능 감수제의 사용량을 나타내었다. D 매립회의 경우 높은 탄소함량에도 불구하고 이미 충분한 플로우를 보이고 있으므로 낮은 고성능 감수제 사용량을 나타낸다. D site의 매립회에 비하여 T 30% 치환률에서는 7.5~8배 정도 감수제가 더 필요하였으며, T 60% 치환률에서는 8~13배의 감수제가 필요하였다.

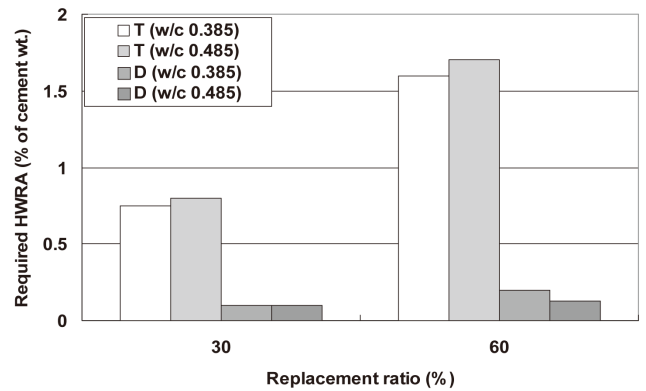


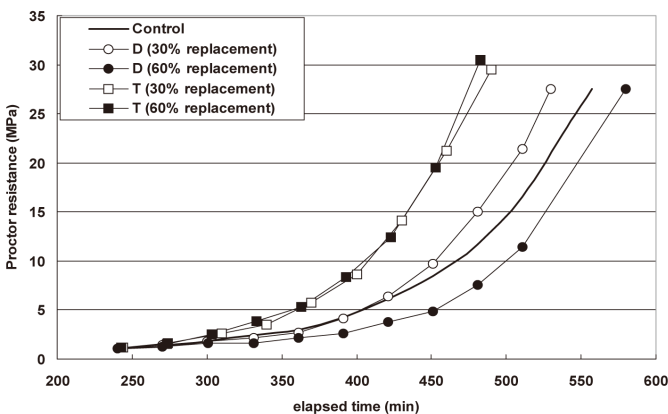
Fig. 5 Required HWRA amount for target flow

3.2 응결시간 평가

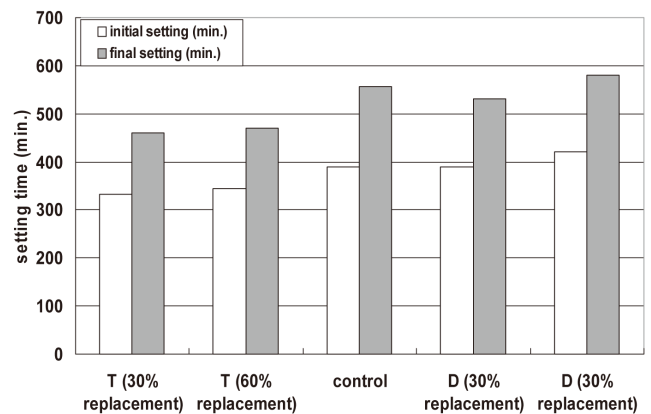
Fig. 6에서는 각 매립회 모르타르의 프록터 관입저항치와 응결시간을 나타내었다. T 매립회의 경우는 치환률에 상관없이 초결 및 종결시간이 단축되었으며, D 매립회의 경우는 (60% 치환), 일반 모르타르에 비하여 약간 증가함을 알 수 있다. 주된 원인은 T 매립회의 낮은 내부 배합수와 많은 미립분을 들 수 있다. 0.075mm 체의 통과율은 D 매립회의 경우 1.2~1.8%, 일반 잔골재의 경우 6.4~6.9%, T 매립회의 경우 14.7~17.9%로 조사되었다. 또한 D 매립회에 플라이 애쉬 성분이 좀 더 많이 함유되었을 것으로 추측된다. 플라이 애쉬의 SO_4^{2-} 는 응결시간을 지연시키기 때문이다 (Neville, 1996).

3.3 압축강도 평가

Table 6에서 알 수 있듯이 이 연구의 배합은 단위 시멘트

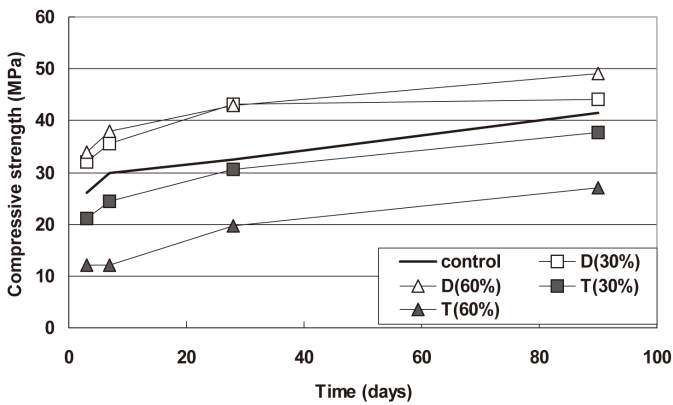


(a) Proctor resistance

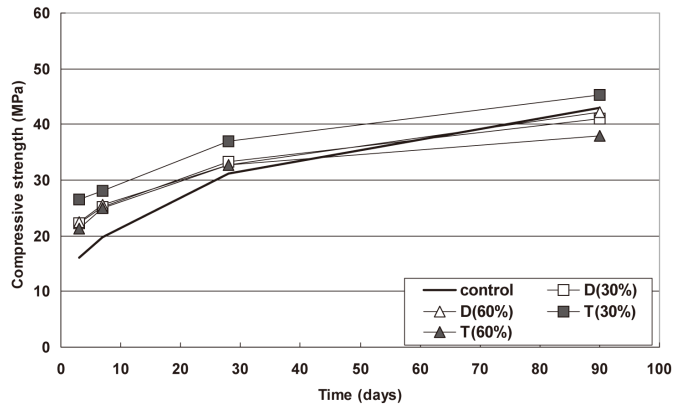


(b) Initial and final setting time

Fig. 6 Setting behavior in different PA mortar



(a) Compressive strength in w/c 0.385 (w/o HWRA)



(b) Compressive strength in w/c 0.485 (w/o HWRA)

Fig. 7 Compressive strength with different mixing condition

량이 일정하고 단위수량을 변화시켜 w/c 비를 조정하는 것이다. 그러므로 시멘트 수화를 촉진시킬 충분한 내부 배합수가 많을수록 압축강도가 증가하게 된다. Fig. 7에서는 고성능 감수제를 사용하지 않은 T 매립회 모르타르와 D 매립회 모르타르의 재령별 압축강도를 나타내고 있다.

Fig. 7(a)에서, T 모르타르의 경우 (w/c 0.385), 치환률이 증가할수록 강도저하가 두드러짐을 알 수 있다. 그러나 단위수량이 많아진 배합 (b, w/c 0.485)에서는 강도가 향상되었다. T 매립회는 표면이 매끈하지 않으므로 오히려 수분 흡착면이 넓어지게 되어 표면건조 포화상태인 매립회와 충분한 내부의 배합수가 필요함을 알 수 있다. D 매립회를 사용한 모르타르의 경우, w/c 0.385에서는 일반잔골재를 사용한 모르타르보다 우수한 강도성능을 나타내었으며, w/c 0.485에서는 거의 비슷한 수준의 강도를 나타내었다. D 매립회의 경우, 고성능 감수제를 혼입하지 않아도, 높은 흡수율에 따른 내부 배합수의 공급으로 인해 내부수화 (internal curing)가 강화되었던 것으로 여겨진다. T 매립회의 경우 단위수량이 높은 배합에서는 30% 치환률에서 강도가 개선되었으나, 60% 치환에서는 낮은 강도증가를 나타내었다. 이는 T 매립회의 증가에 따라 분체량이 많아진 배합이 되어 수화에 필요한 수분이 부족하고, 골재의 물리적 성능이 D 매립회보다 불량한 것으로 평가된다.

Fig. 7(b)에서는 D 매립회의 경우 배합수가 많은 w/c 0.485의 경우 강도가 약간 감소하였는데, 이는 너무 많은 배합수로 인한 공극의 증가와 일반 잔골재에 비하여 어려운 품질관리로 인해 실험상의 오차가 발생한 것으로 사료된다.

3.4 공극구조 (MIP) 평가

공극률은 시멘트계 건설재료의 매우 중요한 인자로, 강도, 내구성 등 모든 공학적 성질과 밀접한 관련이 있다 (Lee and Kwon, 2012). 수은압입법에 의한 공극률 평가결과는 Fig. 8에 나타내었으며, SEM 분석을 통한 산지별 매립회의 사진을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8 및 Fig. 9에서는 고성능 감수제를 사용하지 않은 T 및 D 매립회 모르타르를 대상으로 하였다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 D 모르타르의 경우 치환률과 관계없이 보통 모르타르보다 낮은 공극률을 가지고 있으나, T 모르타르의 치환률이 증가할수록 공극률이 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 T 매립재의 경우 고성능 감수제를 사용하지 않으면 부족한 배합수로 인해 공극률이 크게 증가함을 알 수 있다. D 모르타르의 경우, 큰 흡수율을 가지는 포화된 골재에서 배합수가 밖으로 나오면서 수화에 필요한 자유수를 공급하므로 적절한 수화가 이루어졌으며, 이로 인해 공극률이

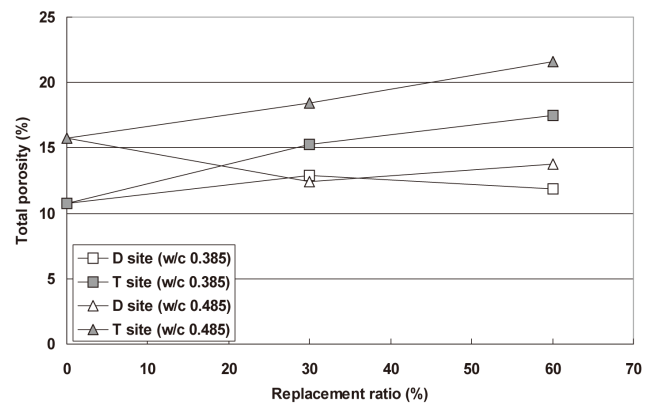
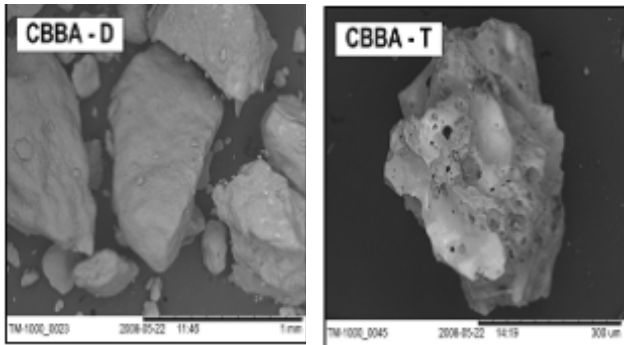


Fig. 8 Porosity in PA cement mortar without HWRA



(a) PA form D site (b) PA from T site

Fig. 9 SEM image of PA

감소하였다. T 모르타르의 경우, w/c 0.385 시편에서는 42.2~63.1%의 공극률 증가를, w/c 0.485 시편에서는 16.9~39.6%의 증가를 나타내었다.

공극률은 압축강도와 밀접한 관련이 있는데, 전술한대로 충분한 내부 배합수가 있는 경우, 포화된 다공성 골재를 사용하면 시멘트의 수화가 적절하게 이루어지며 시멘트 겔의 팽창에 따라 조직이 치밀해진다. 이에 따라 공극률의 감소와 압축강도의 증가를 확인할 수 있다.

3.5 동결융해 저항성 평가

본 실험에서는 동결융해 300cycle 이후의 압축강도를 평가하여 동결융해 저항성을 평가하였다. 고성능 감수제를 사용한 재령 28일 매립회 모르타르가 사용되었으며, Fig. 10에서는 동결융해시험이후 압축강도의 변화를 나타내었다.

시멘트 모르타르 내의 공극수가 얼게 되면 팽창압으로 인해 미세 균열이 공극주위로 발생하게 되며, 이로 인해 시멘트

트 바인더의 강도저하가 발생한다. 모든 경우에 있어 D 매립회가 우수한 동결융해 저항성을 나타내고 있다. 이 역시 이전의 실험결과와 비슷한 경향을 보이는데, 자유수의 공급으로 인해 내부수화가 충분히 이루어진 D 모르타르의 경우 일반 시멘트 모르타르 및 T 모르타르보다 우수한 동결융해 저항성을 나타내었다. 고성능 감수제를 넣은 경우이므로 TA 모르타르도 강도저하가 크게 평가되지 않았다.

3.6 촉진염화물 확산 평가

촉진염화물 확산계수를 NT BUILD 492에 따라 고성능 감수제를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우로 나누어 평가하였으며, 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

고성능 감수제를 사용한 D 매립회 모르타르에서는 $8.71 \times 10^{-12} \sim 1.69 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$ 의 수준으로 평가되었는데, 이는 기준 시멘트 모르타르 범위인 $1.06 \times 10^{-11} \sim 2.06 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$ 에 비하여 약간 우수한 확산 저항성을 가지고 있다. 그러나 T 매립회 모르타르의 경우 고성능 감수제를 사용하지 않으면, w/c가 낮은 0.385의 경우 $4.56 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$ (30% 치환), $1.02 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{sec}$ (60% 치환)로 큰 값이 평가되었다. 이 실험결과 역시 단위수량이 작은 배합에서 압축강도 저하 및 공극률의 증가와 같은 공학적 성능이 감소하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11(b)의 경우는 T 모르타르가 여전히 D 모르타르에 비해 높은 확산계수를 가지고 있으나, 그 차이가 비교적 작게 평가되었다.

3.7 촉진 탄산화 평가

고성능감수제를 혼입하지 않은 매립회 모르타르에 대한 8

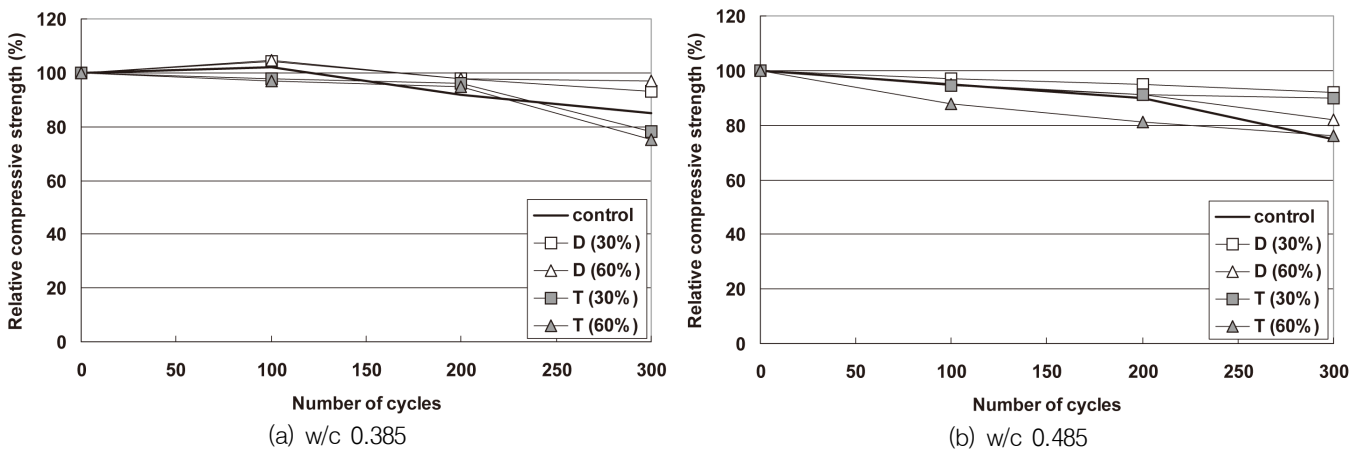


Fig. 10 Relative strength ratio after F/T cycles (with HWRA)

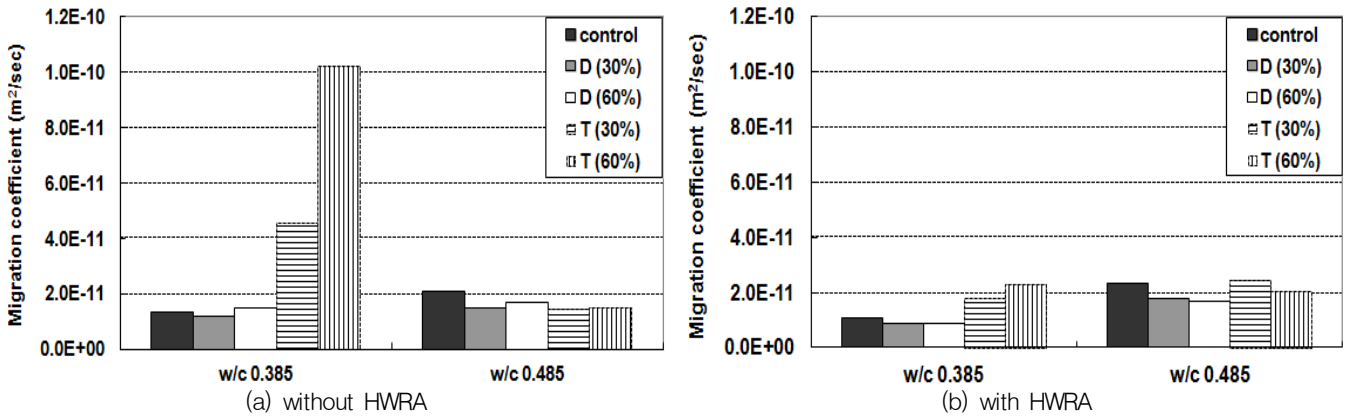


Fig. 11 Chloride migration coefficient in PA mortar

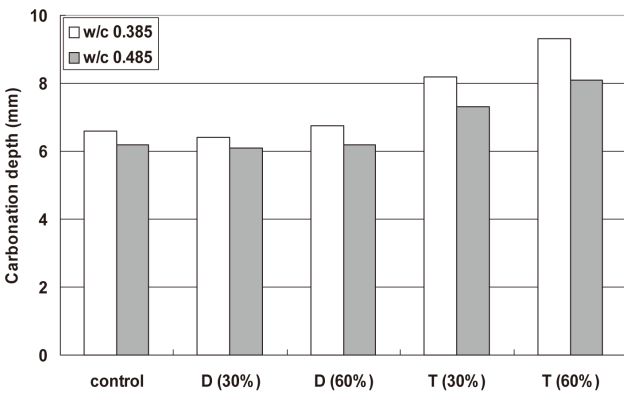


Fig. 12 Carbonation depth after 8 weeks (w/o HWRA)

주간의 촉진 탄산화 실험결과를 Fig. 12에 나타내었다. w/c 0.385인 T 모르타르에서 가장 큰 탄산화 깊이가 평가되었는데, 이 결과는 이전의 실험들과 같은 이유라고 할 수 있다. 모두 같은 단위 시멘트량을 가지고 있으므로 생성되는 수산화칼슘량은 비슷하겠으나 조밀하지 못한 구조를 가진 배합(w/c 0.385, TA 60% 치환)에서는 이산화탄소의 확산성이 가장 크므로 가장 높은 탄산화 깊이가 평가되었다. D 모르타르의 경우 w/c 및 치환률에 상관없이 기준 시멘트 모르타르와 비슷한 탄산화 저항성을 나타내었다.

4. 결론

국산 매립회를 이용한 시멘트 모르타르의 역학적 성능 평가를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) T site (유연탄) 매립회 모르타르는 목표 플로우를 맞추기 위해 D site (무연탄)보다 7~13.5배의 고성능 감

수제를 필요로 하였다. 이는 T 매립회의 경우 미립분이 많고 표면이 거칠어서 작업성이 좋지 않기 때문이다. 반면 D 매립회는 높은 흡수율과 매끈한 표면을 가지고 있었으므로, 표면건조 포화상태로 배합할 경우 보통 잔골재의 성능을 확보하였다.

- (2) 강도 및 내구성 실험에서, 고성능 감수제가 없는 T 매립회 모르타르는 w/c 0.385의 경우 내부에 양생을 촉진할 수 있는 배합수가 부족하여 강도 및 내구성이 부족하게 평가되었다. 그러나 D 매립회 모르타르의 경우, 높은 흡수율을 기반으로 건조시 내부수화 (internal curing)를 위한 자유수를 충분히 제공함으로써 강도, 동결융해, 염화물 확산계수, 탄산화 저항성 등에 대해 기존 시멘트 모르타르와 동등 이상의 성능을 나타내었다.
- (3) D 매립회의 경우, T 매립회보다 우수한 공학적 특성을 나타내고 있었는데, 매끈한 표면과 높은 흡수율이 주된 원인이라고 할 수 있다. 단위수량이 큰 배합이나 고성능 감수제가 혼입된 배합에서는 큰 차이가 나타나지 않았으나, 단위수량이 작고 감수제가 없는 배합에서는 D 매립재와 T 매립회의 역학적, 내구적 성능에서 큰 차이를 나타내었다.
- (4) 본 연구는 매립회를 사용한 시멘트 모르타르의 활용성에 대한 연구이다. 무연탄계 매립회는 높은 흡수율을 가지고 있으나, 표면건조 포화상태로 적용할 경우 내부수화를 촉진하여 우수한 공학적 성능을 나타내었다. 자원의 재활용중요성과 매립지의 한계 등을 고려할 때, 매립회를 이용한 건설자재의 생산이 가능할 것으로 판단되며 입도 및 흡수율에 대한 철저한 관리가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20111010100030).

References

1. Andrade, L. B., Rocha, J. C., Cheriaf, M., "Aspects of moisture kinetics of coal bottom ash in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 37, No. 2, pp.231-241.
2. Bentz, D. P., Lura, P., Roberts, J. W., "Mixture proportioning for internal curing," *Concrete International*, vol. 27, No. 2, 2005, pp.35-40.
3. Du, L., Folliard, K. J., "Mechanisms of air entrainment in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 35, No. 8, 2005, pp.1463-1471.
4. KCI - Korea Concrete Institute, *Concrete and Environment*, KCI-R 10-004, 1st Edition, 2010, pp.28-151. (in Korean)
5. KCL - Korea Conformity Laboratories, *Standardization Technology for The Environmental-Friendly Utilization of Pond Ash*, Technical Report, R-2007-2-151, 2010, pp.151-246. (in Korean)
6. Kim, S. C., Ahn, S. K., "Mix design and characteristics of compressive strengths for Bottom foam concrete associated with the application of bottom ash", *Journal of Korea Concrete Institute*, vol. 21, No. 3, 2009, pp.283-290. (in Korean)
7. KIS - Korea Industrial Standards, KS F 2436: *Testing Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance*, 2007, pp.1-8. (in Korean)
8. KIS - Korea Industrial Standards, KS F 2456: *Testing Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*, 2008, pp.1-10. (in Korean)
9. KIS - Korea Industrial Standards, KS F 2584: *Standard Test Method for Accelerated Carbonation of Concrete*, 2010, pp.1-7. (in Korean)
10. KIS - Korea Industrial Standards, KS L 5105: *Testing Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*, 2007, pp.1-8. (in Korean)
11. Lee B. C., Jung, S. H., Kim, J. H., Kwon, S.-J., "Evaluation for properties of domestic pond ash aggregate and durability performance in pond ash concrete", vol. 23, No. 3, 2011a, pp.311-320. (in Korean)
12. Lee, B. C., Jung, S. H., Chae, S. T., Kwon, S.-J., "Evaluation for applicability of reinforced concrete structure with domestic pond ash", *Journal of Korea Concrete Institute*, vol. 23, No. 5, 2011b, pp.541-550. (in Korean)
13. Lee, H. K., Kim, H. K., Hwang, E. A., "Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber-reinforced cellular concrete", *Waste Management*, vol. 30, No. 2, 2010, pp.274-284.
14. Lee, H. S., Kwon, S.-J., "Modeling on compressive strength in high performance concrete", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, vol. 16, No. 6, 2012, pp.124-133.
15. Neville, A. M., *Properties of Concrete - Chapter 13*, 4th Edition, Longman, 1996, pp.269-311.
16. Nisnevich, M., Sirotnin, G., Dvoskin, L., Ecshel, Y., "Effect of moisture cement of highly porous bottom ash on properties of concrete mixture and hardened concrete", *Magazine of Concrete Research*, vol. 53, No. 4, 2001, pp.283-288.
17. NORDTEST, *Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments*, NT BUILD 492, 1999, pp.1-12.
18. Ramme, A. W., Taraniyil, M. P., *Coal Combustion Products Utilization Handbook*, 2nd edition, WE Energies Publication, 2004, pp.24-158.
19. Song, H.-W., Kwon, S.-J., Byun, K. J., Park, C. K., "A study on analytical technique of chloride diffusion considering characteristics of mixture design for high performance concrete using mineral admixture", *Journal of Korea Society of Civil Engineering*, vol. 25, No. 1-A, 2005, pp.213-223. (in Korean)
20. Thomas, M. D. A., Bamforth, P. B., "Modeling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag", *Cement and Concrete Research*, vol. 29, No. 4, 1999, pp.487-495.
21. Won, J. P., Lee, Y. S., Lee, J. J., *Durability characteristics and environmental assessment of controlled low-strength materials using bottom ash*, *Journal of Korea Concrete Institute*, vol. 14, No. 2, 2002, pp.223-230. (in Korean)

Received : 02/14/2013

Revised : 03/22/2013

Accepted : 03/29/2013

요 지

석탄화력 발전의 부산물 중에서 플라이애쉬는 콘크리트 혼화재료로서 많은 공학적 장점을 가지고 있으므로 다양하게 활용되고 있다. 그러나 버팀 애쉬를 포함한 나머지 부산물 등은 주로 매립되어 공학적 활용성이 떨어진다. 본 연구에서는 매립된 부산물인 매립회 (PA: Pond Ash)를 이용하여 시멘트 모르타르를 제조하였으며, 매립회 시멘트 모르타르의 공학적 특성을 평가하였다.

이를 위해 두 매립지로부터 유연탄 및 무연탄 매립회를 채취하였으며, 2가지 물-시멘트 비 (0.385, 0.485)와 3가지 잔골재 치환률 (0%, 30%, 60%)을 고려하여 시공성, 역학성능, 내구성능을 평가하였다. 흡수율이 높은 무연탄 매립회의 경우, 적절한 시공성, 우수한 강도발현과 내구성능을 확보하였는데, 매끈한 표면과 내부의 풍부한 자유수로 인해 조직구조가 치밀한 시멘트 모르타르가 제조되었기 때문이다. 매립회 중에서도 우수한 성능을 가진 무연탄 매립회의 경우 일반 잔골재의 성능을 확보하고 있으므로, 자원의 재활용이 가능하리라 판단된다.

핵심 용어 : 매립회, 석탄연소, 시멘트 모르타르, 내구성, 워커빌리티
