



국산 매립회의 골재특성 평가 및 매립회 콘크리트의 내구 성능 평가

이봉춘¹⁾ · 정상화¹⁾ · 김주형¹⁾ · 권성준^{1)*}

¹⁾한국건설생활환경시험연구원

Evaluation for Properties of Domestic Pond Ash Aggregate and Durability Performance in Pond Ash Concrete

Bong-Chun Lee,¹⁾ Sang-Hwa Jung,¹⁾ Joo-Hyung Kim,¹⁾ and Seung-Jun Kwon^{1)*}

¹⁾Korea Conformity Laboratories, Seoul 137-707, Korea

ABSTRACT Fly ash (FA), byproduct from power plant has been actively used as mineral admixture for concrete. However, since bottom ash (BA) is usually used for land reclaim or subbase material, more active reuse plan is needed. Pond ash (PA) obtained from reclaimed land is mixed with both FA and BA. In this study, 6 PA from different domestic power plant are prepared and 5 different replacement ratios (10%, 20%, 30%, 50%, and 70%) for fine aggregate substitutes are considered to evaluate engineering properties of PA as fine aggregate and durability performance of PA concrete. Tests for fine aggregate of PA for fineness modulus, density and absorption, soundness, chloride and toxicity content, and alkali aggregate reaction are performed. For PA concrete, durability tests for compressive strength, drying shrinkage, chloride penetration/diffusion, accelerated carbonation, and freezing/thawing are performed. Also, basic tests for fresh concrete like slump and air content are performed. Although PA has lower density and higher absorption, its potential as a replacement material for fine aggregate is promising. PA concrete shows a reasonable durability performance with higher strength with higher replacement ratio. Finally, best PA among 6 samples is selected through quantitative classification, and limitation of PA concrete application is understood based on the test results. Various tests for engineering properties of PA and PA concrete are discussed in this paper to evaluate its application to concrete structure.

Keywords : pond ash, bottom ash, fly ash, engineering properties, durability performance

1. 서 론

화력발전은 우리나라 전력 산업의 근간을 이루어왔으며, 최근 들어 이산화탄소의 증가 및 환경 부하로 인해 화력발전 부산물에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 석탄회란 석탄 화력발전소에서 미분탄을 연소 후 발생하는 부산물로서, 발생 위치에 따라 플라이애쉬(fly ash), 바텀애쉬(bottom ash), EP애쉬(electrical precipitator ash), 신더애쉬(cinder ash)로 구분할 수 있다.¹⁾ 이 중 플라이애쉬는 신더애쉬와 EP애쉬를 합한 것을 의미하며, 총 발생량의 75~90%를 차지하는 것으로 알려져 있다.²⁾ 플라이애쉬의 재활용률은 2009년 67.9%로서 2005년 대비 11%가 증가하였지만 바텀애쉬의 경우는 40% 수준만이 재활용되고 있으며, 60%이상이 매립재로 활용되고 있으므로 적극적인 활용 기법이 요구되고 있다.³⁾ 매립은 매우 소극적인 처리 방법으로 추후 매립지의 부족과 토양 오염

을 야기할 수 있으므로 적극적인 혼화재로서의 활용이 필요한 시점이다. 플라이애쉬는 포졸란 반응을 가지고 있으므로, 콘크리트 혼화재로서 많이 사용되고 있으며, 수화열 저감, 장기 강도 증가 등 내구성 확보 차원에서 많이 사용되고 있다.^{4,8)} 그러나 10~25% 수준으로 발생하는 바텀애쉬의 경우, 주로 매립재로 사용되고 있으며, 추가적인 활용이 필요한 분야이다. 최근 들어 바텀애쉬의 경우 다양한 성능을 만족시키기 위하여, 기포 콘크리트에 대한 적용성 평가,⁹⁻¹¹⁾ 충전재 콘크리트에 대한 활용성 평가^{12,13)} 등이 진행되고 있으며, 인공 경량 골재로 사용되어 콘크리트에 활용하기 위한 연구가 진행중이다.¹⁴⁾

바텀애쉬는 물리적, 화학적 성능이 플라이애쉬에 비하여 뛰어나지 않으나, 해사 및 부순 모래의 세척 시 발생하는 미립분을 보완할 수 있으므로, 잔골재로서의 활용이 가능하다.^{15,16)} 바텀애쉬의 경우, 화력발전소에서 직접적인 집진이 가능하지만, 매립회(pond ash)의 경우는 매립지의 환경 요건에 따른 제한 사항이 따른다. 매립되는 석탄회는 40% 이상이 습식 매립이 되므로 재활용되기 어려우며, 해수와 인접한 매립지에서는 유해물 및 염화물에 대한 관리가 필요하게 된다. 또한 일부 플라이애쉬

*Corresponding author E-mail: jjuni98@kcl.re.kr
 Received January 4, 2011, Revised February 10, 2011,
 Accepted February 23, 2011
 ©2011 by Korea Concrete Institute

및 미연탄소 등의 이물질이 포함되어 있으므로 품질 관리에 어려움이 따른다.¹⁷⁾

이 연구에서는 콘크리트 잔골재로서의 매립회를 분석하였으며, 매립회를 사용한 콘크리트 시편의 실내 실험 그리고 실제 철근콘크리트 구조물에 대한 시공성 및 적합성 평가를 포함하고 있다. 이번 1단계에서는 골재 적합성 및 매립회 콘크리트의 강도 및 내구성 실험 결과를 중점으로 연구를 수행하였다. 국내 화력발전소 매립지에서 채취된 6종류의 매립회를 사용하였으며, 총 5가지의 치환율(10%, 20%, 30%, 50%, 70%)을 고려하여 경화 전후의 실험을 수행하였다. 골재로서의 특성과 매립회 콘크리트의 기본 물성 실험을 포함한 내구성 실험이 이 연구에서 다루어질 것이다.

2. 국내 매립회(pond ash)의 물리적 특성

2.1 매립회의 위치 및 현황

조사 지역은 서해안 3개소, 동해안 1개소, 남해안 2개소로 총 6개의 화력발전소를 선정하였으며, 시추 작업은 무수굴진 방식에 따라 NX 구경으로 수행하였다. 각 매립지당 지반 시추는 2공을 하였으며, 미립토, 플라이애쉬, 그리고 바텀애쉬가 혼합된 매립회(PA)를 대상으로 하였다.

2.2 매립회 골재 특성 평가

2.2.1 잔골재 실험 계획

이 절에서는 6개소 발전소 매립회에 대하여 입도 및 조립률, 표면 건조 밀도, 흡수율, 염화물 특성, 화학 성분 분석 등을 수행하였다. 매립회를 잔골재로 사용할 경우, 미연탄소(C) 및 염화물(Cl) 이온의 용출량이 문제가 될 수 있다. Fig. 1에서는 전처리 과정을 거치지 않은 매립회의 사진을 나타내고 있는데, 입도 및 미연탄소 함량에 따라 다양한 형태를 가지게 된다. Table 1에서는 잔골재 실험시 인용된 관련 규격을 나타낸다.

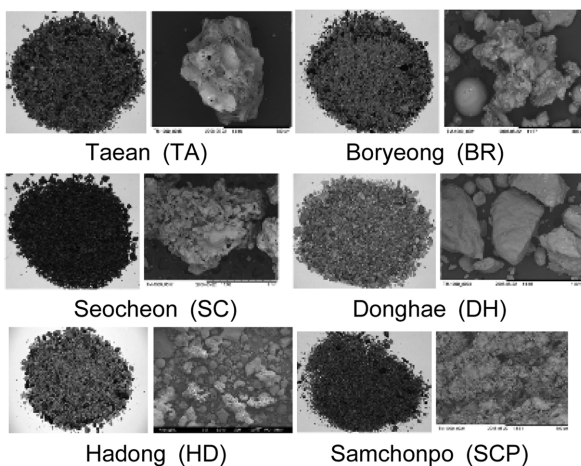


Fig. 1 Photos and SEM image for pond ash

Table 1 Tests and related standards for pond ash

Test	Referred standards
Sieve analysis	KS F 2502
Density and absorption	KS F 2504
Soundness of aggregate	KS F 2507
Chloride contents	KS F 2713
Extraction procedure toxicity test	No standard
Alkali aggregate reaction	KS F 2546

2.2.2 골재의 물리적 특성 분석

1) 골재의 체가름 시험

국내 화력발전소에서 생산된 매립회의 경우, 석탄회와 미연탄소 성분이 많이 포함되어 있으므로 세척을 하는 과정이 반드시 필요하다. 세척 후 골재의 체가름 시험을 수행한 결과, DH 매립회의 경우 콘크리트용 잔골재로서 사용가능한 입도 범위를 가장 양호하게 만족하는 것으로 나타났다. 일반적으로 잔골재의 조립률은 2.3~3.1사이가 좋다고 알려져 있다.¹⁸⁾ SC 매립회의 경우 조립률이 3.36으로 비교적 크게 평가되었으며, TA, BR, DH의 경우 사용 가능한 조립률을 가지고 있었다. HD 및 SCP 매립회의 경우는 각각 2.19 및 1.91로 낮은 수준이었다. 0.6 mm 이하의 잔입자가 많이 포함되어 있는 매립회의 경우, 잔골재의 표준입도 범위를 벗어나고 있지만, 모래에 매립회를 10~30%치환하여 사용하면 표준 입도 범위를 만족하는 것으로 평가되었다. 매립회 100%인 경우의 조립률을 Fig. 2 및 Table 2에 나타내었는데, 모래와 치환되기 전의 매립회는 일반적으로 사용되는 잔골재의 조립률보다 낮은 값을 보이고 있었다. 잔골재의 조립률이 양호한 매립회에 대해서는 Table 2에 명암으로 표기하였다.

2) 입도 및 흡수율

매립회의 골재로서의 가장 큰 단점은 낮은 건조밀도와 높은 흡수율이라고 할 수 있다. 측정 결과 밀도는 1.84~2.27 g/cm³의 낮은 수준을 나타내고 있었으며, 흡수율은 1.38~6.22%로 일반 잔골재에 비해 높은 수준으로 나타났다. 6개의 매립회 중에 DH 매립회의 밀도가 2.27 g/cm³로 가장 우수했으며, SC의 매립회가 1.38%로 가장 낮게 평가되었다. Table 3에서는 밀도 및 흡수율의 시험 결과를 나타내고 있다.

3) 골재의 안정성

골재에 황산염 성분을 포함하지 않더라도, 매립지의 지하수 또는 토양의 오염으로 인해 매립회의 안정성에 문제가 있을 수 있다. 황산나트륨에 의한 골재의 안정성 시험을 5번 반복했을 때의 손실질량 백분율(%)의 한계는 잔골재인 경우, 10% 이하 굵은골재의 경우 12% 이하로 규정되어 있다. Table 4에서는 각 매립회의 골재 안전성을 나타내고 있는데, 7.5~11.9%수준으로 상대적으로 높게 평가되었으며, TA, BR, DH에서 10% 이하의 손실률을 보이고 있었다.

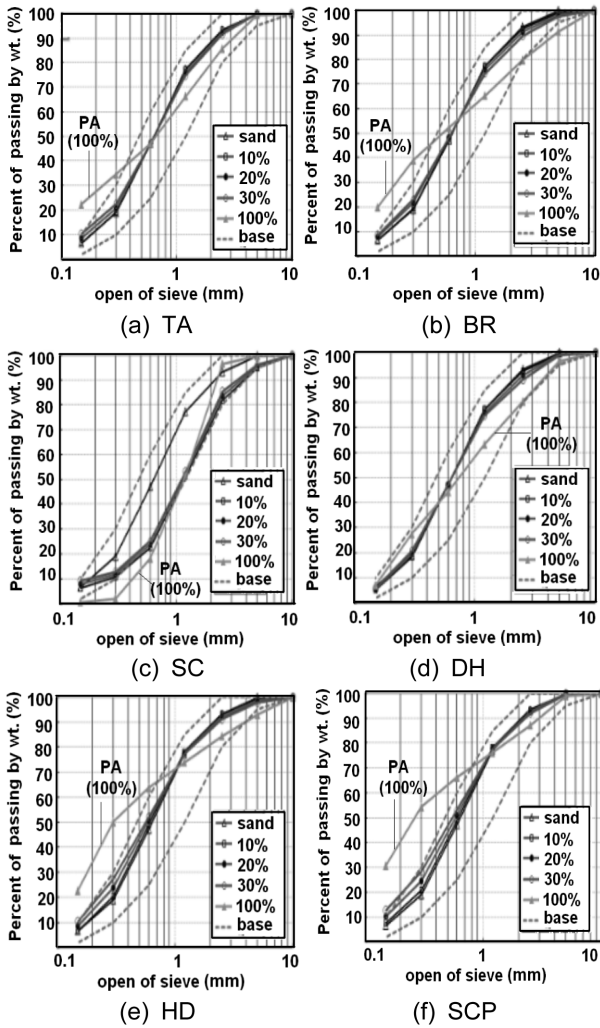


Fig. 2 Fineness modulus with different pond ash

Table 2 Fineness modulus for this test

Type	TA	BR	SC	DH	HD	SCP	Sand ⁽¹⁾
FM	2.51	2.55	3.36	2.86	2.19	1.91	2.61

Note) (1) Mixed sand for grading modification

Table 3 Density and absorption ratio of pond ash

Type	TA	BR	SC	DH	HD	SCP
Density (g/cm ³)	2.09	2.06	2.10	2.27	1.89	1.87
Absorption (%)	4.75	4.80	1.38	6.22	5.53	4.34

Table 4 Soundness test results for pond ash

Type	TA	BR	SC	DH	HD	SCP
Soundness (%)	8.5	7.5	11.2	9.6	11.9	10.6

4) 골재의 염화물 함량

골재의 매립지 노출환경에 따라 염화물에 대한 평가가 중요해진다. 일반적으로 국내 화력발전소는 해안가에 위치하고 있으며, 해수의 염화물이 매립지로 유입되어 매립회가 오염될 수 있다. Table 5에서는 세척 전과 후의 염화물 농도를 나타내고 있다. KS F 4009에서는 콘크리트 제조시의 한계값을 0.3 kg/m³로 제시하고 있는데, SC

Table 5 Chloride contents in pond ash

Soaking days	Chloride content (kg/m ³)					
	TA	BR	SC	DH	HD	SCP
0	0.061	0.185	0.474	0.012	0.099	0.364
1	0.021	0.061	0.160	0.031	0.018	0.077
2	0.019	0.024	0.130	0.018	0.015	0.018
3	0.016	0.015	0.105	0.017	0.013	0.016
4	-	-	-	0.006	-	0.016

Table 6 Toxicity results for pond ash

Type	TA	BR	SC	DH	HD	SCP
Cr (ppm)	0.082	0.060	0.023	0.034	0.038	0.059
Pb (ppm)	0.187	0.096	0.097	0.190	0.061	0.029

및 SCP의 경우 초기에 이를 초과하는 염화물 함유량을 보이고 있었다. 2일 이상 침지 후 세척 시 염화물 농도는 매우 낮은 수준으로 감소하였으므로 산지별 매립회 세척 관리가 필요함을 알 수 있다.

5) 중금속 용출 시험

각종 매립회에 대해 TCLP(toxicity characteristic leaching procedure) 기법에 의한 중금속 용출 실험을 수행한 결과, 전체적으로 폐기물 관리법 중금속 용출 기준 이하로 평가되었다. Pb 및 Cr 등의 중금속이 기준치 이상으로 평가될 경우, 잔골재 및 인공 경량 골재로의 사용이 어려우므로 이에 대한 조치가 필요하다. Table 6은 중금속 용출 시험 결과를 나타내고 있다.

6) 알칼리 골재 반응

KS F 2546에 따라 알칼리 잠재 반응성 시험을 6개월 동안 수행하였으며 그 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 시험 결과 모든 매립회의 경우 팽창량이 0.03%이하로 측정되어 알칼리 골재에 대한 영향은 무시할 수 있는 것으로 평가되었다.

3. 매립회 콘크리트의 내구 성능 평가

3.1 매립회 콘크리트 실험 계획

이 실험에서는 6가지 서로 다른 매립회에 대하여, 잔골

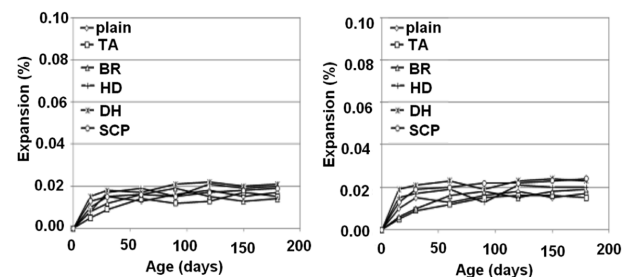


Fig. 3 Results of ASR for pond ash

재의 기초 물성 시험을 거친 뒤, 표면 건조 포화 상태의 골재를 기준으로 경화된 매립회 콘크리트의 내구 성능을 평가하도록 한다. 배합은 w/c(물-시멘트비) 55%를 기준으로 총 5가지의 잔골재 치환율을 고려하였다. 굳지 않은 콘크리트의 특성인 슬럼프 및 공기량에 실험 역시 수행하였다. Table 7에서는 실험 항목을, Table 8에서는 이 실험을 위한 배합표를 나타내고 있다.

이 실험에서는 팬타입 강제식 믹서에 골재와 시멘트를 투입하여 1분 30초간 건비빔을 수행하였고, 물과 고성능 AE제를 혼입하여 2분간 습식비빔을 수행하였다. Table 9에서는 시멘트의 물리적, 화학적 특성을 나타내었으며, Table 10에서는 각 매립회의 화학적 특성을 나타내었다.

SC와 DH는 무연탄 화력이며, 나머지는 TA, BR, HD, SCP는 유연탄 화력에서 채취한 것이다. 기존의 연구에 의하면,²¹⁾ 유연탄 화력발전소에서 발생된 플라이애쉬의 경우 미연탄소 함량이 3.2~4.85%이며 바텀애쉬의 경우 1.78~ 10.72%의 수준으로 조사되었다. 반면 무연탄 화력발전소에서 발생된 플라이애쉬와 바텀애쉬는 13.2~25.71%와 3.24~16.3%로 높게 나타났다. 무연탄을 연료로 사용하는 화력발전의 경우 높은 미연탄소 함량으로 골재 사용시 품질 저하가 발생할 수 있다. 이 연구에서는 무연탄 화력인 SC, DH이외에도 유연탄 화력인 HD 및 SCP에서도 높은 탄소 함량을 보이고 있는데, 매립회의 경우, 탄소 함량이 상대적으로 높은 플라이애쉬가 포함되어 있으므로, 탄소 함량 제어가 어렵다.

3.2 굳지 않은 콘크리트의 특성 평가

3.2.1 슬럼프 및 공기량 실험

각 발전소별 매립회를 사용하여 제조한 콘크리트의 혼입물에 따른 슬럼프 경시 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 시간 경과에 따라 슬럼프는 감소하였는데, 보통 콘크리트의 경우와 비교하여 매립회의 종류에 관계없이 매립회의 혼입률이 증가할수록 슬럼프 감소가 증가하였다. TA와 DH의 매립회가 다른 지역의 매립회에 비해 상대적으로 양호한 슬럼프 손실 방지를 보이고 있다. 특히 10~30%의 치환율을 가지는 DH 매립회 콘크리트에서는 보통 콘크리트의 슬럼프 변화와 큰 차이를 보이지 않았다. 슬럼프의 경시 변화가 보통 콘크리트에 비해 뚜렷한 이유는 매립회가 일반 잔골재에 비하여 입형이 고르지

Table 7 Tests for fresh and hardened concrete with pond ash

Type	Items and spec.
Fresh concrete	Slump (KS F 2402)
	Air content (KS F 2421)
Durability test for hardened concrete	Strength (compressive-KS F 2405)
	Drying shrinkage (no standards)
	Carbonation (KS F 2584)
	Chloride penetration (ASTM C1202) ¹⁹⁾
	Chloride diffusion (NT BUILD 492) ²⁰⁾
Freezing and thawing (KS F 2456)	

Table 8 Test for fresh and hardened concrete with pond ash

Pond ash	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					G	AE admixture (%)
			W	C	S				
					RR ⁽¹⁾	S	PA ⁽²⁾		
TA	55	45	176	320	0	780	0	972	0.3
					10%	688	76		0.3
					20%	597	149		0.3
					30%	512	219		0.5
					50%	349	349		0.6
					70%	199	465		0.8
					100%	0	615		-
BR	55	45	176	320	0	780	0	972	0.3
					10%	696	77		0.3
					20%	614	153		0.4
					30%	531	227		0.5
					50%	373	373		0.8
					70%	220	514		1.0
					100%	0	713		-
HD	55	45	176	320	0	780	0	972	0.3
					10%	685	76		0.3
					20%	592	148		0.4
					30%	505	216		0.4
					50%	341	341		0.65
					70%	192	450		0.65
					100%	0	582		-
DH	55	45	176	320	0	780	0	972	0.3
					10%	696	77		0.3
					20%	612	153		0.3
					30%	531	227		0.4
					50%	371	371		0.2
					70%	218	509		0.3
					100%	0	704		0.3
SCP	55	45	176	320	0	780	0	972	0.3
					10%	683	75		0.3
					20%	590	147		0.4
					30%	501	214		0.7
					50%	336	336		-
					70%	189	441		-
					100%	0	566		-
SC	55	45	176	320	0	780	0	972	0.3
					10%	683	75		0.3
					20%	592	148		0.4
					30%	503	215		0.6
					50%	339	339		0.9
					70%	191	445		-
					100%	0	576		-

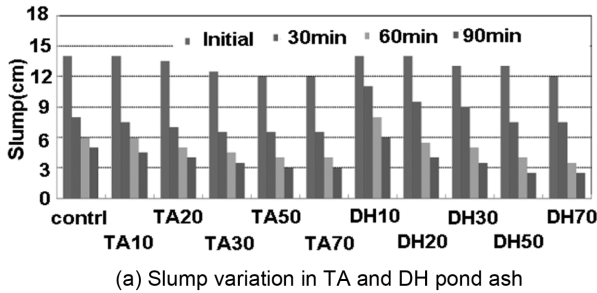
⁽¹⁾RR: replacement ratio, ⁽²⁾PA: pond ash

Table 9 Physical and chemical components in cement

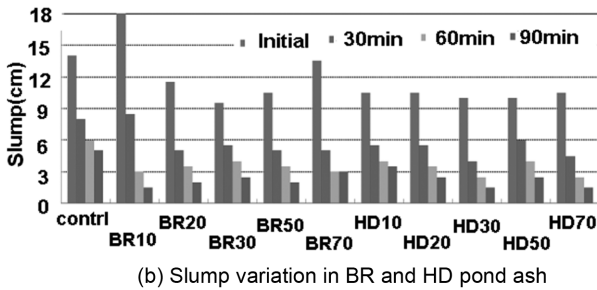
Physical		Chemical (%)							
Density (g/cm ³)	Braine (cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	Ig. loss
3.14	3,200	21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	0.21	2.2	1.3

Table 10 Chemical components in pond ash

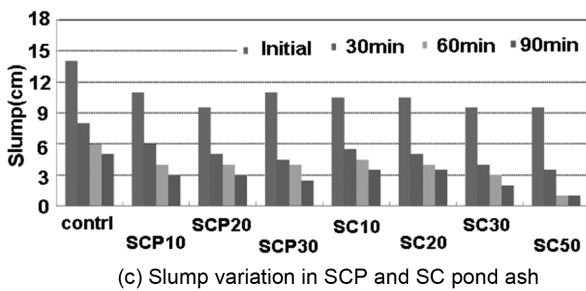
Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	ZrO ₂	P ₂ O ₅	C	LOI
TA	55.47	23.75	12.81	2.93	1.2	0.64	0.78	1.21	0.1	0.34	0.35	0.34
BR	51.08	17.58	13.54	9.00	1.39	0.49	0.83	0.82	0.13	0.34	4.66	-
SC	48.53	24.04	6.27	0.80	0.91	0.46	2.93	1.38	0.03	0.15	14.36	-
DH	53.47	28.25	3.65	1.99	0.72	0.65	2.88	1.2	0.03	0.1	6.90	0.27
HD	47.04	20.44	12.12	2.65	1.04	0.68	0.55	1.10	0.09	0.32	13.84	-
SCP	43.55	22.3	4.62	5.25	1.58	0.41	0.6	0.99	0.03	0.48	17.70	2.34



(a) Slump variation in TA and DH pond ash



(b) Slump variation in BR and HD pond ash



(c) Slump variation in SCP and SC pond ash

Fig. 4 Slump variation in different pond ash

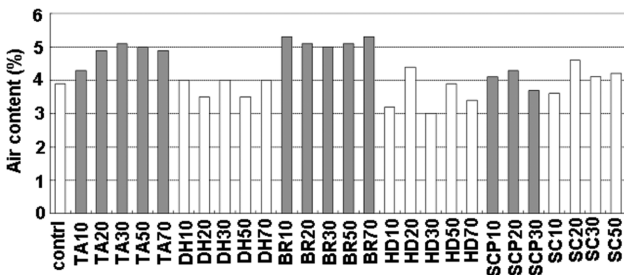


Fig. 5 Air content variation with different pond ash

않으며, 표면 건조 상태의 매립회를 사용했음에도 불구하고 다공성 재료에 의한 배합수의 흡착으로 경시 변화가 크게 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 5에서는 공기량의 변화를 나타내고 있는데, 소요의 워커빌리티를 갖는 배합에서는 목표 공기량 45 ± 15 mm의 범위에 모두 포함되는 것으로 나타났다

3.3 매립회 콘크리트의 내구 성능

3.3.1 압축강도 평가

총 6개 종류의 매립회와 10~70% 치환율을 고려하여 재령 7일, 28일, 90일의 강도 평가를 수행하였다. 실험 결과는 Table 11과 같으며, Fig. 6에 각 재령에 따른 강도 변화비를 분석하였다.

강도 증가율은 재령이 증가할수록, 그리고 치환율이 높을수록 큰 경향을 보였다. SC 매립회의 경우는 치환율 및 재령에 대해 뚜렷한 강도 개선 효과를 볼 수 없었다. 매립회에는 플라이애쉬와 바텀애쉬가 혼재되어 있으므로, 포졸란 반응에 의해 장기 강도 개선을 기대할 수 있으며, 초기 강도에서도 치환율을 조정하면 충분히 치환 효과를 확인할 수 있었다. BR 및 HD 매립회는 모든 치환율과 전 재령에 걸쳐서 기준 강도보다 높은 강도비를 보이고 있었다. 특히 TA, DH, BR, HD의 매립회는 일정한 치환율에 따른 강도 증가를 가지고 있으므로 품질 관리에 유리함을 알 수 있다. 7일 강도에서는 BR 50%의 경우가 110%를, 28일 강도에서는 SCP 30%인 경우 115%를, 그리고 90일에서는 DH 70%와 HD 70%에서 117%의 최대 강도 증가를 나타내었다.

3.3.2 건조수축 실험

다공성 재료를 콘크리트에 사용할 경우 건조 상태에서 다공성 재료가 흡수하고 있는 잉여수를 배출하여 건조수축이 저감된다고 알려져 있다. 이는 내부 수화(internal curing)기법으로 다공성 인공 경량 골재를 사용할 경우 건조수축 개선에 뚜렷한 효과 보이는데,^{22,24)} 이 연구에서는 뚜렷한 효과를 확인할 수 없었다. 기준 시편의 경우, 재령 180일에서 약 500 strain(μ)을 나타내고 있으나, 매립회 콘크리트의 경우 약 350~800 strain(μ)의 범위를 가지고 있었다. 이는 매립회의 흡수율이 인공 경량 골재(화산재)와 같이 크지 않으며, 수화에 의해 내부의 수분을 일부 소모하므로 잉여 효과가 크지 않기 때문이다. Fig. 7에서는 매립회의 혼입에 따른 건조수축의 변화를 나타내고 있다.

3.3.3 탄산화 실험

일반적으로 탄산화 저항성을 평가하는 방법은 탄산화 속도 계수(carbonation rate coefficient)를 이용하여 평가하는 것이 일반적이다.^{25,26)} 이 연구에서는 탄산화 깊이를

Table 11 Test results for compressive strength

Mix type		Compressive strength (MPa)		
		7 days	28 days	90 days
Plain		25.06	30.74	34.15
TA	10	24.88	31.02	34.52
	20	25.06	31.42	34.95
	30	25.32	31.65	35.42
	50	25.51	32.03	36.13
	70	25.69	32.76	37.21
DH	10	23.31	29.86	35.21
	20	23.41	30.71	36.67
	30	24.52	31.71	37.42
	50	24.96	33.12	39.02
	70	25.30	33.52	40.15
BR	10	25.50	31.95	36.12
	20	24.95	31.04	36.07
	30	26.50	33.42	37.12
	50	27.56	33.41	38.69
	70	27.25	33.95	39.64
HD	10	25.89	31.29	36.52
	20	26.01	32.17	35.06
	30	25.45	31.98	37.31
	50	26.89	33.32	37.33
	70	27.23	34.13	40.05
SCP	10	25.02	33.05	33.68
	20	25.16	32.20	35.45
	30	26.98	35.46	37.52
SC	10	24.86	31.49	34.65
	20	24.57	30.72	33.91
	30	25.25	32.78	35.18
	50	24.19	29.84	34.28

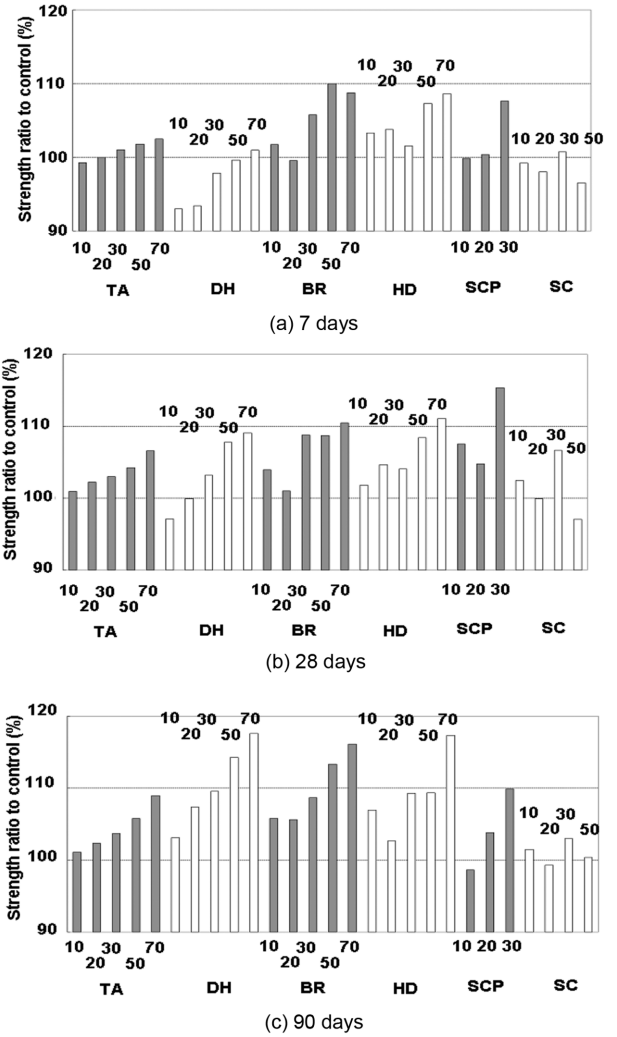


Fig. 6 Compressive strength with replacement ratio and days

시간의 제공근에 비례한다고 가정하여, 각 배합의 탄산화 저항성을 평가하였다. Fig. 8에서는 실험 결과를 나타내고 있으며, 탄산화 속도 및 결정 계수를 Table 12에 나타내었다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 매립회의 치환율에 대한 명확한 경향은 나타나지 않았으며, SC 50%를 제외하고는 보통 콘크리트보다 낮은 탄산화 속도를 보이고 있었다. 특히 TA 및 HD는 1.170과 1.218을 가지고 있었으므로 가장 낮은 탄산화 속도 계수를 보이고 있다. 탄산화 속도 저감은 바텀애쉬에 흡착된 플라이애쉬와의 포졸란 반응을 통하여, 수산화칼슘이 일부 감소하게 되지만, 표면의 공극 구조가 치밀해져서 이산화탄소 확산성이 감소되기 때문이다.²⁷⁾ 기존의 연구에서는 바텀애쉬 콘크리트에서 치환율이 증가할수록 탄산화 깊이의 증가를 보였으나,¹¹⁾

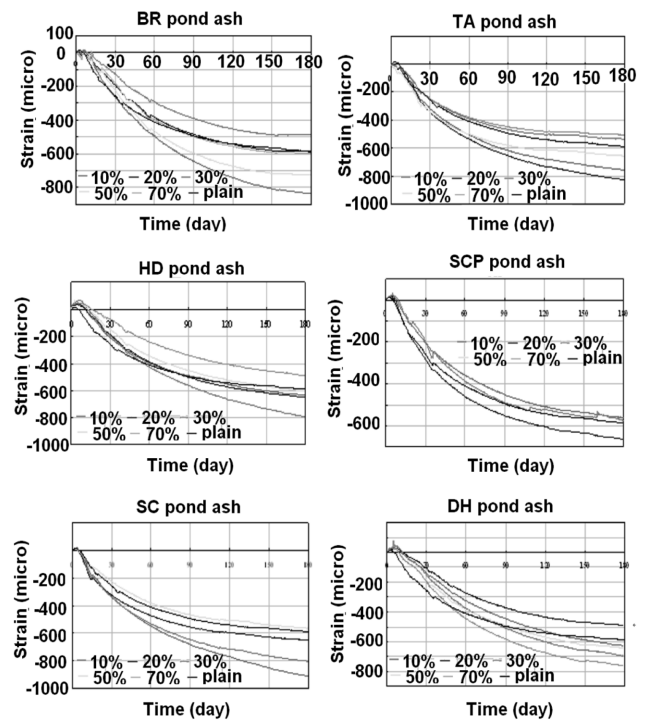


Fig. 7 Drying shrinkage with pond ash concrete

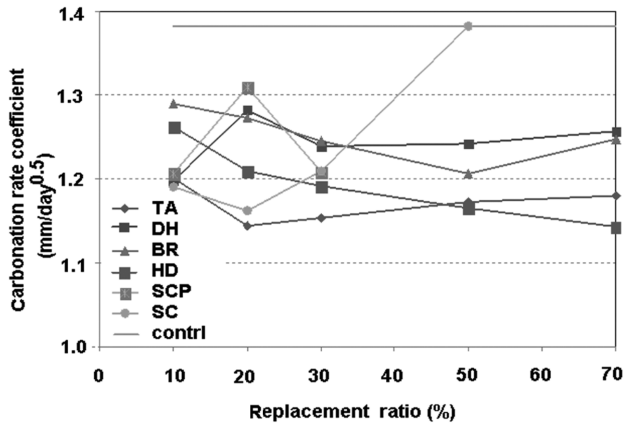


Fig. 8 Carbonation rate coefficient with replacement ratio

Table 12 Carbonation rate coefficient and ratio to control case

Mix type	Carbonation rate coefficient	R ²	Ratio to control (%)
control	1.3819	0.816	100
TA 10	1.201	0.983	87
TA 20	1.144	0.955	83
TA 30	1.154	0.955	83
TA 50	1.173	0.973	85
TA 70	1.180	0.963	85
DH 10	1.198	0.924	87
DH 20	1.283	0.933	93
DH 30	1.239	0.954	90
DH 50	1.242	0.970	90
DH 70	1.257	0.956	91
BR 10	1.290	0.991	93
BR 20	1.272	0.993	92
BR 30	1.246	0.971	90
BR 50	1.207	0.993	87
BR 70	1.248	0.997	90
HD 10	1.262	0.962	91
HD 20	1.262	0.962	91
HD 30	1.192	0.915	86
HD 50	1.165	0.925	84
HD 70	1.143	0.922	83
SCP 10	1.206	0.911	87
SCP 20	1.309	0.980	95
SCP 30	1.209	0.985	87
SC 10	1.191	0.990	86
SC 20	1.163	0.969	84
SC 30	1.210	0.967	88
SC 50	1.383	0.974	100

이 연구에서는 매립회 종류에 따라 이와는 다른 경향을 보이고 있었다. HD 매립회 경우 치환율에 따라 일정하게 감소하는 탄산화 속도를 보이고 있다.

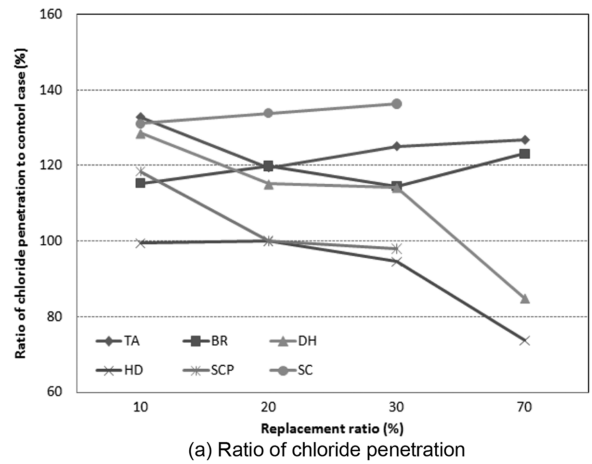
3.3.4 염소이온 투과성 및 염화물 확산 계수

ASTM C 1202¹⁹⁾와 NT BUILD 492²⁰⁾에 의해 측정된 염소이온 투과성 및 염화물 확산 계수의 실험 결과는 Table 13에 나타내었다.

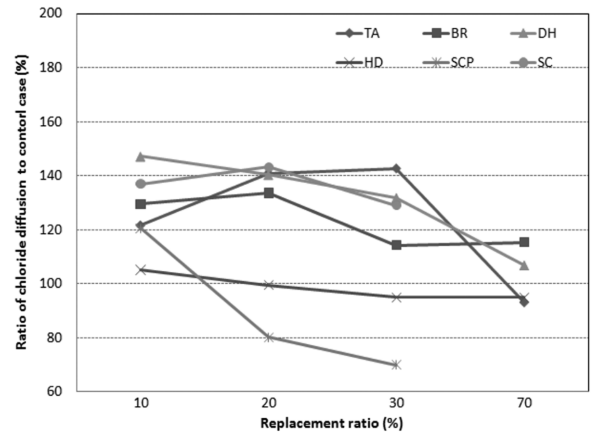
Fig. 9(a)에서는 염화물 침투비를 나타내는데, 치환율 20%까지는 모든 매립회 콘크리트에서 더 많은 염화물 침투를 허용하였으나, 70% 치환인 경우, DH 및 HD에서는 85%와 74% 수준으로 보통 콘크리트보다 염화물 침투 저항성이 개선됨을 알 수 있다. Fig. 9(b)에 도시되어 있는 염화물 확산 계수에서는 SCP와 HD에서 보통 콘크리트 이상의 확산 저감성을 보여주고 있다. SCP 30% 치환의 경우, 70% 수준으로 감소하였으며, HD 30% 및

Table 13 Resistance to chloride and diffusion coefficient

	Coulomb				Diffusion coefficient (10 ⁻¹¹ m ² /s)			
	10	20	30	70	10	20	30	70
Plain	2187				1.76			
TA	2905	2611	2735	2772	2.14	2.48	2.51	1.64
BR	2522	2621	2505	2692	2.28	2.35	2.01	2.03
DH	2811	2517	2497	1855	2.59	2.47	2.32	1.88
HD	2174	2186	2067	1611	1.85	1.75	1.67	1.67
SCP	2589	2188	2143	-	2.12	1.41	1.23	-
SC	2866	2927	2981	-	2.41	2.52	2.27	-



(a) Ratio of chloride penetration



(b) Ratio of chloride diffusion

Fig. 9 Resistance to chloride penetration with replacement ratio

70% 치환에서는 기준 콘크리트 대비 95% 수준의 값을 보이고 있다.

3.3.5 동결융해 저항성

콘크리트내의 매립회는 흡수율이 큰 다공성 재료로서 콘크리트가 동결융해를 받는 경우 자유수의 팽창압에 의한 미세균열로 콘크리트의 품질 저하를 발생시킬 수 있다. 보통 콘크리트의 경우 200 cycle 경과후 상대 동탄성 계수(relative dynamic modulus of elasticity, RDME)의 값은 71.83%인데 비해, 매립지별(TA, DH, HD, SCP, SC) 상대 동탄성 계수는 71.5~82.1%, 69.5~86.0%, 65.2~72.6%, 68.0~75.4%, 72.2~80.5%로 모든 배합에서 기준 콘크리트와 비슷한 상대 동탄성 계수 수준을 나타내었다. 대체적으로 매립회 잔골재의 혼입량이 많아질수록 동결융해 저항 성능이 작아지는 것으로 평가되었다. Table 14에서는 200 cycle 경과시, 각 배합에 따른 상대 동탄성 계수를 나타내고 있으며, 보통 콘크리트와의 동탄성 계수비를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이, 보통 콘크리트에 비하여 매립회 콘크리트는 흡수율이 높으므로, 이에 따라 상대 동탄성 비는 대체적으로 불리하게 평가되었다. 그러나 DH 매립회의 경우 20% 치환율까지 105%의 상대 동탄성 계수비를 가지고 있으므로 다른 매립회 콘크리트에 비하여 우수한 성능을 가지고 있었다.

3.4 산지별 매립회 콘크리트의 내구 특성

3.4.1 최적 매립회의 선정

3장에서 수행된 골재 특성 및 내구 특성 실험 결과에

Table 14 Test results for relative dynamic modulus of elasticity

Mix		RDME	Mix		RDME
		200 cycle			200 cycle
Control		81.33	Control		81.33
TA	10	76.64	HD	10	69.57
	20	75.23		20	69.85
	30	71.54		30	69.52
	50	82.12		50	72.62
	70	72.09		70	65.22
BR	10	78.52	HD	10	69.57
	20	77.58		20	69.85
	30	72.45		30	69.52
	50	80.11		50	72.62
	70	76.27		70	65.22
DH	10	86.00	SCP	10	70.84
	20	85.30		20	75.38
	30	80.28		30	70.40
	50	76.40	SC	10	68.00
	70	79.67		20	77.32
			30	72.24	
			50	74.00	

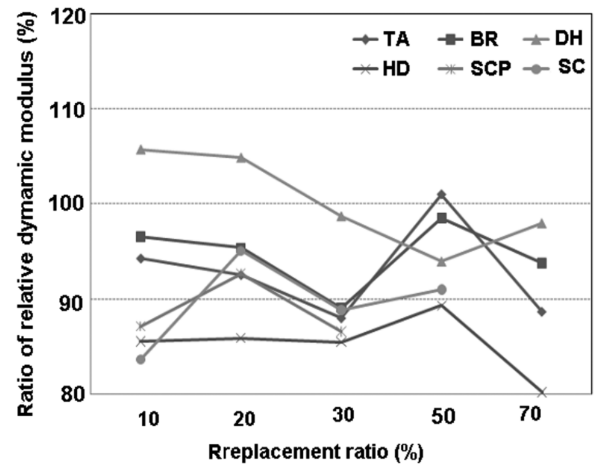


Fig. 10 Ratio of dynamic relative modulus of elasticity to normal concrete

대하여 Table 15와 같이 정리하였다. 콘크리트용 골재로 접합한 경우는 +2, 그렇지 못한 경우는 -2로 분류하였으며, 정량적으로 판단하기 어려운 부분은 상, 중, 하로 구분하여 각각 +2, 0, -2로 점수를 부여하였다.

Table 15에서 알 수 있듯이 DH 매립회가 가장 우수한 성능을 보이고 있었으며, 치환율이 증가할수록 내구 성능의 개선을 확인할 수 있었다.

3.4.2 매립회 콘크리트 적용의 제한 사항

매립회 콘크리트는 강도, 탄산화 등에서는 일반 콘크리트에 비하여 개선된 효과를 보이고 있지만, 건조수축, 염해 확산성, 동결 융해에 대해서는 뚜렷한 개선 효과를 확인할 수 없으며 일반 콘크리트 수준을 보이고 있다. 그러나 모래와 같은 천연 잔골재를 산업 부산물인 매립회로 대체할 수 있는 가능성을 보여준 것은 친환경 건설 또는 지속가능성(sustainability)에 발맞추어 큰 의의가 있다고 할 수 있다. 적극적인 잔골재 활용을 위해서는 매립회의 품질 관리 및 세척에 따른 경제성 등이 고려되어야 한다.

높은 미연탄소 함량 또는 미립분 제거에 대해서는 2일 이상의 침지 일수와 2회 세척 등이 요구되지만, 이는 산지별 특성에 맞추어 판단하는 것이 바람직하다. 매립지 샘플을 데이터베이스화 하여 유해물 함량을 주기적으로 측정 후 세척 일수 및 침지 기간을 설정하여야 한다. 이 연구는 매립회의 적용성 평가와 산지별 특성에 중점을 두어, 경제적인 세척 방안 및 품질 관리 방안이 구체적으로 제시되지 못하였다. 추후 연구를 통하여 경제적인 품질 관리 방안이 제시된다면 잔골재의 대체재로서 적극적인 활용이 기대된다. 한편, 매립회 콘크리트는 지중 구조물 또는 해수 침지 및 동결 융해의 영향이 없는 곳에 사용하는 것이 바람직하다. 매립지의 환경 조사를 통하여 매립회가 염화물 또는 유해 이온에 오염되었는지를 검토하여야 하고 보통 콘크리트에 비하여 슬럼프 손실이 시간에 따라 약간 증가하므로, 시공시 이점이 반드시 고려되어야 한다.

Table 15 Summary of test results and quantification

Mix type	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	total
TA	2	0	0	2	2	-2	-2	2	2	-2	0	0	2	-2	-2	0	2
DH	2	2	2	2	2	2	-2	2	2	0	2	-2	0	0	0	2	16
BR	2	0	0	2	0	-2	0	2	0	-2	2	0	0	0	0	2	6
HD	-2	-2	-2	-2	0	0	2	2	-2	0	0	2	2	2	2	-2	0
SCP	-2	-2	2	-2	-2	0	2	2	-2	2	-2	2	-2	2	2	-2	-2
SC	-2	2	2	-2	-2	2	0	2	0	2	-2	-2	-2	-2	-2	0	-6

A-sieve test, B-density, C-absorption, D-soundness, E-chloride content, F-toxicity (Cr), G-toxicity (Pb), H-alkali aggregate reaction, I-slump, J-air content, K-strength, L-shrinkage, M-carbonation, N-chloride penetration, O-diffusion P-RDM

4. 결 론

연구 결과는 다음과 같다.

- 매립회 폐기물 시편에서는 전반적으로 일반 모래에 비하여 조립률이 낮은 값이 평가되었는데, 이는 일반 잔골재에 대해 10~30%의 치환을 통하여 개선할 수 있었다. 매립회는 큰 흡수율을 가지고 있으므로, 재료의 배합과 시공에 이를 고려해야 한다. 한편 시간이 경과함에 따라 기준 콘크리트보다 약간 큰 슬럼프 손실이 평가되었으며, 공기량은 큰 차이를 보이지 않았다.
- 매립회 콘크리트는 치환율이 클수록 장기 강도 확보가 유리하게 평가되었으며, 28일 강도에서는 SCP 30%인 경우 115%를, 그리고 90일에서는 DH 70%와 HD 70%에서 117%의 최대 강도 증가를 나타내었다.
- 매립회 콘크리트는 탄산화에 대하여 모두 유리하게 평가되었으며, HD 70%에서 기준 콘크리트의 83% 수준으로 탄산화 속도가 감소되었다. 한편 치환율 20%까지는 모든 매립회 콘크리트에서 더 많은 염화물 침투를 허용하였으나, 70% 치환인 경우, DH와 HD에서는 각각 85%, 74% 수준으로 보통 콘크리트보다 염화물 침투 저항성이 개선됨을 알 수 있다.
- 골재 시험 및 매립회 콘크리트의 강도 및 내구성 시험 결과를 기준으로 각 산지별 매립회를 등급화한 결과, DH 매립회가 골재로서 가장 우수하게 평가되었으며, 실험 결과를 기준으로 매립회 적용 콘크리트의 제한 사항과 추가 연구 사항이 도출되었다.

감사의 글

이 연구는 건설 생산성 향상을 위한 건설 자재 표준화 연구(과제번호: 05기반구축A02)의 일환으로 이루어졌으며, 저자는 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 천병식, 고용일, 오민열, 권형석, “산업 폐기물로 발생되

- 는 석탄회의 토질 역학적 특성에 관한 연구,” 대한토목학회 논문집, 10권, 1호, 1990, pp. 115~124.
- 오성원, “석탄회 처리 현황과 대책,” 석탄회 활용 국제 워크숍, 1996, pp. 3~126.
- 한국콘크리트학회, 콘크리트와 환경, KCI-R-10-004, 2010, pp. 81~97.
- 송하원, 권성준, 변근주, 박찬규, “혼화재를 사용한 고성능 콘크리트의 배합특성을 고려한 염화물 확산 해석기법에 관한 연구,” 대한토목학회 논문집, 25권, 1A호, 2005, pp. 213~223.
- 권성준, 송하원, 변근주, 박찬규, “신경망 이론과 마이크로 모델링을 통한 혼화재를 사용한 콘크리트의 염화물 침투 해석,” 대한토목학회 논문집, 27권, 1A호, 2007, pp. 117~129.
- Sahmaran, M., Lachemi, M., Hossain, K. M. A., and Li, V. C., “Internal Curing of Engineered Cementitious Composites for Prevention of Early Age Autogeneous Shrinkage Cracking,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, 2009, pp. 893~901.
- Bentur, A., Igarashi, S. I., and Kovler, K., “Prevention of Autogeneous Shrinkage in High Strength Concrete by Internal Curing Using Wet Lightweight Aggregate,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 1857~1591.
- CEB, Durable Concrete Structures-Design Guide, 2nd Edition, Thomas Telford, London, 1992, pp. 11~21.
- 김진만, 곽은구, 조성현, 강철, “통계적 방법에 의한 바텀애쉬를 사용한 경량 기포 콘크리트의 최적 배합 결정,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 1호, 2009, pp. 3~11.
- 김상철, 안상구, “Bottom Ash를 사용한 기포 콘크리트의 배합설계 및 압축강도 특성,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 3호, 2009, pp. 283~290.
- 최세진, 정용, 오복진, 김무한, “물-시멘트비 및 바텀애쉬 대체율에 따른 콘크리트 공학적 특성에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 15권, 6호, 2003, pp. 880~847.
- 원종필, 이용수, “Bottom Ash를 혼합한 저강도 고유동 충전재의 특성,” 콘크리트학회 논문집, 13권, 3호, 2001, pp. 294~300.
- 원종필, 이용수, 이준자, “Bottom Ash를 재활용한 저강도, 고유동 재료의 내구성 및 환경영향평가,” 콘크리트학회 논문집, 14권, 2호, 2002, pp. 223~230.
- 조병완, 박승국, 권병윤, “알칼리 활성화 석탄회(Fly Ash, Bottom Ash) 인공 경량 골재 및 콘크리트 적용,” 콘크리트학회 논문집, 16권, 6호, 2004, pp. 751~757.

15. 김성수, 김동현, 박광필 “무연탄 Bottom-Ash를 적용한 고 유동 충전재의 성능 평가,” 한국콘크리트학회 가을 학술대회, 13권, 1호, 2001, pp. 263~268.
16. 김무한, “플라이애쉬의 치환 방법 및 치환율에 따른 플라이애쉬를 대량 사용한 콘크리트의 특성에 관한 연구,” 대한건축학회 논문집, 18권, 2호, 2002, pp. 123~130.
17. 이봉춘, 채성태, 우영제, 김진성, 김주형, 류화성, “잔골재로서 매립회를 혼입한 콘크리트의 특성에 관한 기초 연구,” 한국콘크리트학회 봄 학술대회, 20권, 1호, 2008, pp. 477~480.
18. 김성수, 토목재료학, 구미서관, 3rd Ed., 2004. pp. 22~58.
19. ASTM C1201, Cement Standard and Concrete Standard, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2010, pp. 1~18.
20. NT BUILD 492, Concrete Migration Coefficient from Non-Steady State Migration Experiments, 1999, pp. 5~12.
21. 산업자원부, 석탄회를 이용한 환경친화 건자재의 개발, 최종보고서, 2002, pp. 18~29.
22. Bentz, D. P. and Snyder, K. A., “Protected Paste Volume in Concrete Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate,” *Cement and concrete Research*, *Communication*, Vol. 29, 1999, pp. 1863~1867.
23. Lura, P., Bentz, D. P., Lange, D. A., Kovler, K., and Bentur, A., “Pumice Aggregates for Internal Water Curing,” *Pro36: Proceedings, International Symposium on Concrete Science and Engineering*, RILEM Pub., 2004, pp. 137~151.
24. Bentz, D. P., Lura, P., and Roberts, J. W., “Mixture Proportioning for Internal Curing,” *Concrete International*, 2005, pp. 35~40.
25. 권성준, 송하원, 변근주, “인공신경망을 통한 확산계수 도출과 공극 구조 변화를 고려한 콘크리트 탄산화 해석,” 대한토목학회 논문집, 27권, 1A호, 2007, pp. 107~116.
26. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N., “Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 8, No. 2, 1991, pp. 186~196.
27. Ishida, T., Soltani, M., and Maekawa, K., “Influential Parameters on the Theoretical Prediction of Concrete Carbonation Process,” *Proceedings 4th International Conference on Concrete Under Severe Conditions*, Seoul, Korea, 2004, pp. 205~212.

요 약 화력발전 부산물 중 플라이애쉬는 포졸란 반응을 활용하여, 콘크리트 혼화재로 적극적으로 사용되고 있으나, 바텀애쉬는 주로 매립되어 재활용이 많이 요구되는 실정이다. 매립회에는 바텀애쉬와 플라이애쉬가 혼재되어 있는데, 이 연구에서는 국내 6개 발전소 매립회를 수집하고 5가지 치환율(10%, 20%, 30%, 50%, 70%)을 고려하여 매립회의 공학적 특성과 매립회 콘크리트의 역학적/내구 성능이 평가되었다. 골재 실험으로는 조립률, 밀도 및 흡수율, 안전성, 염화물 함유량, 유해이온 함유량, 알칼리 골재 반응 등이 수행되었으며, 매립회 콘크리트에 대해서는 경화 전 특성으로 슬럼프, 공기량 시험을, 경화된 콘크리트에 대해서는 압축강도, 건조수축, 염해 저항성 및 확산계수, 촉진 탄산화 실험, 동결 융해 실험 등이 수행되었다. 매립회는 일반 잔골재보다 큰 흡수율과 작은 밀도를 가지고 있었으나, 콘크리트 골재로 사용 가능하며, 매립회 콘크리트 역시 일반 콘크리트에 해당하는 적절한 성능을 확보하고 있었다. 특히 치환율이 증가함에 따라 강도는 증가하였으며, 우수한 탄산화 저항성을 확인하였다. 최종적으로 실험 결과를 정량적으로 등급화 하여 가장 우수한 매립회 및 매립회 콘크리트의 적용 제한 사항을 도출하였다. 이 연구는 매립회 및 매립회 콘크리트의 공학적 특성을 중심으로 다루고 있으며, 실제 구조물에 대한 모형 실험을 통한 적용성 평가가 추가로 진행될 것이다.

핵심어 : 매립회, 바텀애쉬, 플라이애쉬, 공학적 특성, 내구 성능