



국산 매립회 골재를 사용한 콘크리트 구조물의 적용성 평가

이봉춘¹⁾ · 정상화¹⁾ · 채성태¹⁾ · 권성준^{2)*}

¹⁾한국건설생활환경시험연구원 ²⁾한남대학교 건설시스템공학과

Evaluation for Applicability of Reinforced Concrete Structure with Domestic Pond Ash

Bong-Chun Lee,¹⁾ Sang Hwa Jung,¹⁾ Sung-Tae Chae,¹⁾ and Seung-Jun Kwon^{2)*}

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

²⁾Dept. of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

ABSTRACT Many researches have been performed on concrete with fly ash and bottom ash. However researches on concrete with pond ash (PA) and its application to RC (Reinforced Concrete) structure are limitedly carried out. This paper presents an applicability of PA concrete in construction of real size structure. Referring to the previous study, 2 domestic PA samples with normal performance are selected and 2 replacement ratios (25% and 50%) to fine aggregate are considered for 5 PA concrete structures consisting of column, slab, and wall. In order to evaluate the property of fresh concrete, several tests including air content, slump, and setting time are performed. Using cored out samples from hardened PA concrete structure, tests for strength, resistance to carbonation and chloride penetration are carried out and compared with control samples. Additionally, tests for rebound hardness, drying shrinkage, and hydration heat are performed for PA concrete structure. The test results showed that PA concrete has reasonable strength and durability performances compared to those of normal concrete. Therefore, its potential application to RC structure is promising. The PA aggregate can be more actively used for RC structures with better quality control for content of fly ash, bottom ash, and unburned carbon.

Keywords : pond ash, fine aggregate, evaluation of applicability, PA concrete structure, fly ash

1. 서 론

화력발전소 주위의 매립지에 주로 적용되는 매립회(pond ash, PA)는 내부에 플라이애쉬 및 바텀애쉬, 그리고 탄소 미립분과 미세토 들을 포함하게 된다. 많은 연구에서 강조되었듯이 플라이애쉬는 포졸란 반응을 통하여 구체의 수밀성을 확보하고 시공시에도 워커빌리티 확보 등의 장점이 있으므로 혼화 재료로서 많이 사용되고 있다.¹⁻⁷⁾ 한편 최근에는 내부 수화 기법 등을 통하여 대규모로 플라이애쉬를 사용하기 위한 연구가 수행되고 있다.⁸⁻¹⁰⁾ 바텀애쉬는 플라이애쉬에 비하여 그 재사용률은 적지만,²⁾ 지반 성토 재료 일부 사용되고 있으며, 상당량이 매립토로 사용되는 실정이다. 바텀애쉬를 콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 연구가 최근 들어 활성화되고 있는데, 주로 실내 실험 위주로 적용성을 평가하였다. 이러한 연구는 바텀애쉬를 골재로 사용한 콘크리트에 대하여 경량 기

포 콘크리트의 적용성 평가,^{12,13)} 고유동 충전재 콘크리트 로에 대한 활용성 연구,¹⁴⁻¹⁶⁾ 잔골재 치환에 따른 콘크리트 의 공학적 특성에 대한 연구^{17,18)} 등으로 진행하고 있다.

연구진은 선행 연구에서¹⁹⁾ 매립토에서 채취된 매립회의 골재로서의 공학적 특성과 경화된 후의 PA 콘크리트의 내구적 특성에 대하여 분석하였다. 실내 실험 및 골재 특성에서는 콘크리트 사용에 큰 무리가 없었으나, 실제 구조물 크기의 대형 시편에 대한 적용성은 평가하지 못하였다. 한편 바텀애쉬 콘크리트 역시, 실제 RC(reinforced concrete) 구조물에 대한 적용은 없는 상태이며, PA 콘크리트에 대한 적용성 연구는 매우 제한적이다.

이 연구에서는 매립지에서 채취한 매립회를 1회 세척한 후 잔골재로 사용하여 실제 구조물 크기의 슬래브, 벽체 및 기둥 체원을 가진 RC 구조물을 제작하였다. 슬럼프, 공기량 등의 경화 전 시공에 관한 성능과 타설된 재료의 경화 후 거동, 그리고 PA 콘크리트 구조물을 대상으로 수화열 변화, 반발도 검사, 건조수축 평가 등을 수행하였다. 이 연구에서는 실내 실험의 결과를 기초로 하여, 실제 구조물에 PA 콘크리트를 적용한 후 발생하는 공학적 특성에 대하여 논의하였다.

*Corresponding author E-mail: jjuni98@hnu.kr

Received January 4, 2011, Revised February 11, 2011,

Accepted February 24, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

2. 매립회 콘크리트를 사용한 콘크리트 구조물

2.1 1단계 연구의 피드백과 이에 따른 mockup test

이 절에서는 화력발전소 매립회 잔골재의 레디믹스트 콘크리트의 적용성을 검토하기 위하여, 선행 연구 결과를 인용하였다.¹⁹⁾ 기존의 연구에서는 TA, BR, SC, DH, HD, SCP 등 6개 국내산 매립회를 채취하여 제조된 콘크리트의 역학적, 내구적 특성을 분석하였다. 상, 중, 하로 분류된 점수에서 DH 매립회 콘크리트는 16점, BR 매립회 콘크리트는 6점으로 평가되었다. 실내 실험에서 소규모로 제조된 시편은 레미콘을 이용하여 구조물 제작 후 채취되는 코어 시편보다 훨씬 양호한 조건을 가지고 있다. 이 연구는 일반적인 레미콘 기술을 이용하여, 타설 이후 구조물을 제작하였을 때 일반 콘크리트에 비하여 그 성능이 어느 정도 확보되는 지에 중점을 두었다.

기존의 연구에서는¹⁹⁾ 실 구조물에 적용한 TA 및 SCP 매립회 콘크리트는 2점으로 보통 수준을 나타내고 있었는데, TA 매립회 콘크리트는 강도면에서, SCP 콘크리트는 염화물 확산 측면에서 양호하게 평가되었다. 보통 수준이었던 2개의 매립회(TA 및 SCP)를 선정하고 실제 구조물을 제조하여 그 특성을 평가하도록 하였다. 독자의 이해를 위하여, TA와 SCP 매립회 콘크리트의 실내 실험 결과를 요약하면 Table 1과 같다.

탄산화 저항성을 제외한 모든 실험 항목에서 SCP 콘크리트가 유리하게 평가되었으나 치환율에 따라 이러한 성능이 변화하였다. 보통 콘크리트보다 뛰어난 성능을 나타내지는 못하였으나, 매립회 콘크리트는 일반 콘크리트와 비슷한 수준의 성능을 나타내고 있었다.

전체 시편 중에서 TA 및 SCP 매립회 콘크리트는 중간 정도의 성능을 가지고 있었으며, 보통 콘크리트와 비슷한 역학적, 내구적 특성을 보이고 있었으므로 실구조물 적용성 평가에서 이 두가지 매립회를 선정하였다.

2.2 실험 계획

매립회 잔골재를 레디믹스트 콘크리트로의 적용성을 평가하기 위한 mock-up 시험의 시편 제작 및 방법을 정리하여 Table 1과 같이 나타내었다. PA 콘크리트의 호칭

Table 1 Summary of the previous test for TA and SCP concrete

Item	Relative ratio to control case	
	TA concrete (%)	SCP concrete (%)
Compressive strength (28 days)	102~108	105~115
Drying shrinkage	83~135	92~113
Carbonation depth	83~36	87~95
Chloride permeability	126~133	98~118
Chloride diffusion	93~143	80~121
Freeze and thawing	88~101	87~93

강도는 일반 강도인 24 MPa에 대하여 목표 슬럼프 및 목표 공기량은 120 ± 25 mm, $4.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하도록 배합 설계를 하였다. 1단계 연구에서 TA 및 SCP 매립회는 중간 정도의 성능을 가지는 종류였는데, 이 매립회에 대하여 2가지 치환율(25%, 50%)을 고려하였다. 평가 항목으로는 굳지 않은 콘크리트에 대하여 슬럼프, 공기량, 응결 시간을 측정하였다. 경화 콘크리트에서는 표준 양생과 구조체 관리용 공시체(대기 양생)로 구분하여 계획된 재령에 따라 압축강도, 탄산화, 염소이온 투과성 등을 평가하였다. 한편 구조물에 대한 비파괴 실험(슈미트 해머), 건조수축, 그리고 타설 후 수화열 거동을 측정하였다. Table 2에서는 실험 항목과 참고한 관련 규격을 나타내었다.

Tables 3과 4에서는 이 실험을 위해 사용된 배합과 혼화제의 물리적 특성을 나타내었다. 플라이애쉬를 사용한 콘크리트에서는 AE제 및 유동화제의 양을 동일한 워커빌리티를 만족하기 위해 증가시켜야 한다. 이는 플라이애쉬 내의 탄소와 유동화제 성분의 흡착이 발생하여 유동성에 문제가 생기기 때문인데,²⁷⁾ 이 연구에서는 이를 고려하여 유동화제 및 AE제의 사용량을 기존 콘크리트에 비해 증가시켰다. 기존의 연구에서는¹⁹⁾ 10~70%까지 잔골

Table 2 Mix proportions and test procedures

Mix parameter	Norminal strength (MPa)	24
	Slump (mm)	120 ± 25
	Air content (%)	4.5 ± 1.5
Test items		
Fresh concrete	Slump -KS F 2402 ²⁰⁾	
	Air content - KS F 2421 ²¹⁾	
	Setting time - KS F 2436 ²²⁾	
Hardened concrete	Compressive strength - KS F 2405 ²³⁾ (3, 7, 14, 28, 56 days) Core strength (28, 90 days)	
	Chloride penetration and diffusion coefficient - ASTM 1202 ²⁴⁾ - NT BUILD492 ²⁵⁾	
	Accelerated carbonation test - KS F2584 ²⁶⁾	
	Hydration heat - embedded gauge	
Test for structure	Drying shrinkage - contact gauge	
	NDT (Schmidt hammer)	

Table 3 Mix proportions for PA (pond ash) concrete

Mix	W/C (%)	S/a (%)	RR ⁽¹⁾ (%)	Unit content (kg/m ³)					SP ⁽²⁾ (%)	AE (%)
				W	C	S	PA	G		
Plain			-	171	342	829	-	965	0.3	0.02
TA25			25	171	342	585	195	965	0.4	0.03
TA50	55	45	50	171	342	366	366	965	0.5	0.04
SCP25			25	171	342	576	192	965	0.4	0.03
SCP50			50	171	342	353	353	965	0.5	0.04

Note) ⁽¹⁾RR : replacement ratio by weight, ⁽²⁾SP : superplasticizer

Table 4 Properties of chemical admixture

Type	Color	Solid wt. (%)	Density (g/cm ³)	pH
Superplasticizer	Dark brown	20	1.18 ± 0.1	7
AE	Brown	38	1.05 ± 0.1	7

재 치환율을 고려하였는데, 이 연구에서는 매립회의 치환율을 25%, 50%로 고려하여 적용하였다. 25%는 매립회의 품질이 불리할 경우를 고려한 것이고, 50%는 매립회 잔골재의 품질이 양호할 경우의 대량 치환을 고려한 것이다.

3. PA 콘크리트의 구조체 적용 평가를 위한 실험

3.1 대상 구조물 제작

Mock-up 실험을 위한 부재는 실제 구조체의 슬래브, 벽체 및 기둥으로 구성된 라멘형 RC 구조물을 제작하였다. 폭 4 m 길이 17 m의 크기로 콘크리트 바닥판을 제작하였으며, 그 위에 총 5개의 라멘형 콘크리트 구조물을 시공하였다. 5개의 구조물은 동일한 제원을 가지고 있는데, 왼쪽 벽체는 지하 구조물 외벽과 비슷한 수준인 두께 0.4 m로, 높이 1.4 m의 벽체로 제작하였다. 우측 벽체는 기둥부를 가정하여 두께를 증가시켰으며, 두께 1.0 m, 높이 1.4 m로 제작하였다. 상부 슬래브는 두께 0.3 m, 폭 2.0 m, 길이 4 m의 크기로 제작하였는데, 철근, 배근 간격 및 피복 두께는 지하철 2호선의 고가교 구간의 RC 구조물의 제원을 참조하여 구조물을 제작하였다.

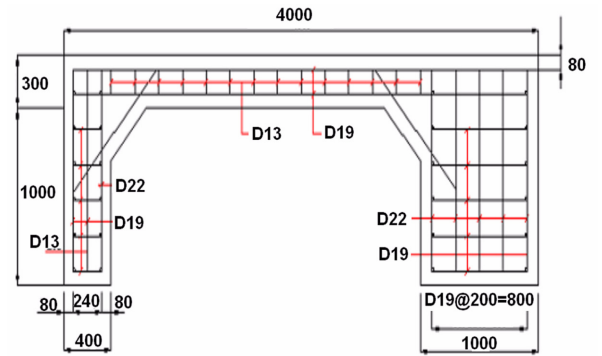
PA 잔골재를 혼합하지 않은 기준 콘크리트(control), TA를 25%와 50% 치환한 콘크리트 부재(TA25, TA50), 그리고 SCP를 25%와 50% 치환한 콘크리트 부재(SCP25, SCP50) 등 총 5개의 구조물을 콘크리트 바닥판 위에 제작하였다. Fig. 1(a)에서는 정면의 철근 배근도를 나타내고 있으며, Fig. 1(b)에서는 슬래브의 배근도를 나타내고 있다. Fig. 1(b)에서 좌측의 O부분은 이후 코어를 채취하기 위한 위치를 나타낸다. Fig. 2에서는 mock-up test의 시공 사진을 나타내었다.

3.2 굳지 않은 PA 콘크리트 실험 및 결과

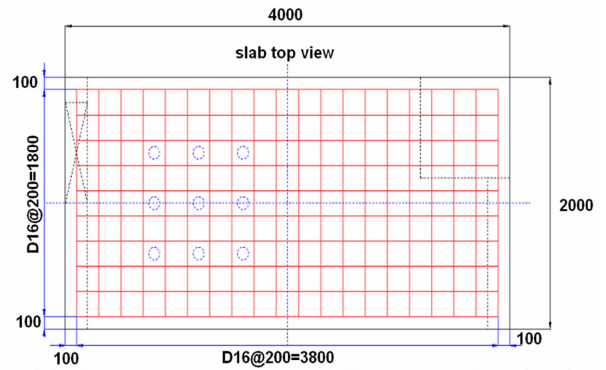
3.2.1 슬럼프 및 공기량

슬럼프 및 공기량 실험을 관련 기준에 따라^{20,21)} 수행하였다. 공기량은 압력법인 워싱턴형 공기량 측정기를 사용하였는데, 시험 결과는 Table 5 및 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이, 치환율이 25%에서 50%로 증가할수록 슬럼프 손실이 5~10 mm 정도 발생하였으나, 모두 25 mm의 오차 범위 내에 있었다. 공기량은 일정한 경향은 보이지 않았으나, ±1.5% 내에 있음을 확인하였다. 슬럼프의 감소는 크게 두 가지로 판단할 수 있다. 이는 미립분이 많은 바텀애쉬^{19,27)}와 미연탄소와 유동화제 흡착으로 인한 유동성 저하가 그 원인이다.



(a) Plan view and steel detailing - side view (mm)



(b) Plan view and steel detailing - top view (mm)

Fig. 1 Dimension and plan view of structure



(a) Steel caging and forming



(b) PA concrete placing

Fig. 2 Photos for mock up test

Table 5 Results for slump and air content

Type	Control	TA25	TA50	SCP25	SCP50
Slump (mm)	145	140	135	130	120
Air content (%)	4.3	4.1	4.7	4.0	3.9

3.2.2 응결 시간

일반적으로 플라이애쉬를 콘크리트에 혼합한 콘크리트에서는 응결 시간이 1~2시간 정도 지연되는 것으로 알려져 있다.^{27,28)} 이는 플라이애쉬에서 발생하는 SO₄²⁻이온

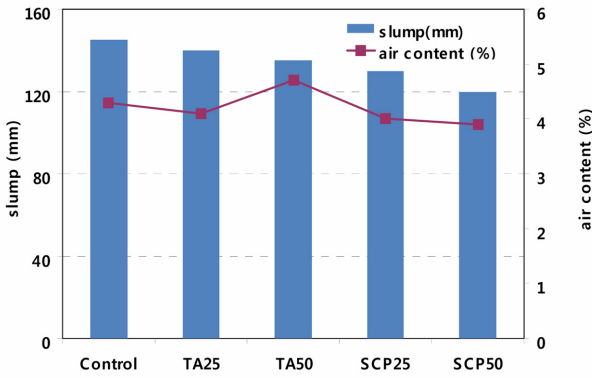


Fig. 3 Variation of slump and air content (%)

이 지연 효과를 나타내기 때문인데,²⁸⁾ 매립회를 사용한 콘크리트에서도 이와 유사한 경향을 나타내고 있었다.^{17,29)} 또 하나의 원인은 흡수율이 큰 PA 골재에서 수화 과정에 따라 여분의 수분을 제공하므로 단위 수량이 내부에서 증가하게 된다. 치환율이 증가할수록 응결 시간이 지연되는 또 다른 원인이라고 판단된다. 실험 결과 TA 골재의 경우, 흡수율은 3.17%였으며, DH 골재의 경우 7.11%로 일반 잔골재에 비하여 매우 큰 흡수율을 가지고 있었다.

Fig. 4에서는 콘크리트의 관입 저항치 값을 나타낸 것으로서 매립회의 종류에 따라 초결 도달 시간은 약 6~7.5 시간, 종결 도달 시간은 약 9~10.5 시간으로 기준 콘크리트의 응결 시간과 비교하여 지연은 되었으나 현재 콘크리트용 혼화제의 품질 규정에서 규정하고 있는 기준에는 만족하였다.

3.3 경화된 PA 콘크리트 실험 및 결과

3.3.1 압축강도 특성

이 절에서는 동일 배합의 레미콘에서 입수된 100 × 200 mm 원주형 시편을 이용하여 압축강도 시험을 수행하였다. 구조물과 같은 조건으로 기중 양생한 시편과 수중 양생한 시편에 대해 각각 압축강도 특성을 분석하였

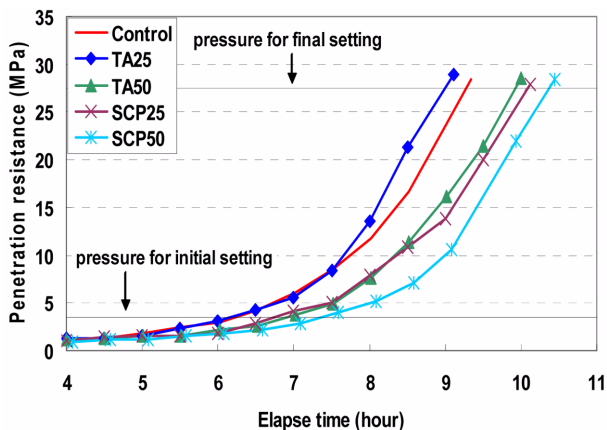


Fig. 4 Variation of setting time in PA concrete

으며 슬래브 및 벽체에 대해서도 동일한 크기의 코어를 채취하여 강도를 평가하였다. 시험 결과 PA 잔골재의 종류에 관계없이 재령이 증가할수록 압축강도는 점차 증가하는 경향을 나타내었고, 양생 조건에 따라서는 수중 양생이 기중 양생보다 양호한 강도 발현을 나타내었다. 기중 양생 공시체의 경우, PA 잔골재를 사용한 경우에 기준 콘크리트보다 5~8% 정도 강도가 감소하는 경향을 보였다. SCP 50 콘크리트에서 강도 발현이 가장 낮으나 기준 콘크리트 대비 10% 이내의 강도 감소를 보였으므로 적용성에 큰 문제는 없으리라고 판단된다. Table 6에서 압축강도 시험 결과를 나타내었다.

1단계 연구에서는¹⁹⁾ 치환율이 증가할수록 재령 28일에 TA 및 SCP 골재의 경우 모두 기준 콘크리트 보다 뚜렷하게 높은 강도비를 가지고 있었으나, 이 실험에서는 그러한 경향을 확인할 수 없었다. 이는 PA 골재의 품질 변동성이 매립지 조건에 따라 달라질 수 있으며, 적극적으로 활용되기 위해서는 PA 골재의 품질관리가 요구된다. 잔골재 치환율을 50% 이상 높이는 것에서는 더 많은 연구가 필요함을 알 수 있다.

Table 7은 PA 콘크리트로 제작된 구조물의 슬래브와 벽체에서 채취한 코어의 압축강도 결과를 나타내고 있다. 재령 28일의 경우 부재의 종류에 관계없이 기준 콘크리트에 비하여 8% 이내의 작은 값은 보이고 있으나, 90일

Table 6 Test for compressive strength with different curing condition

Type		Compressive strength (MPa)					
		3	7	14	28	56	90
Control	Submerged curing	11.7	17.6	21.7	25.6	27.6	29.1
	Air curing	-	15.8	20.5	24.7	27.8	28.6
TA25	Submerged curing	11.2	17.1	22.0	26.2	28.5	30.5
	Air curing	-	16.2	20.0	23.8	27.0	29.2
TA50	Submerged curing	10.4	16.8	21.4	24.1	26.0	28.1
	Air curing	-	14.5	18.2	24.6	26.5	27.9
SCP25	Submerged curing	9.8	16.7	21.1	25.2	27.1	29.6
	Air curing	-	14.8	19.1	24.8	27.4	28.5
SCP50	Submerged curing	9.7	17.4	20.6	24.5	26.5	28.6
	Air curing	-	14.2	18.2	23.5	25.7	27.4

Table 7 Compressive strength in core from structure

Type	Compressive strength in core (MPa)			
	Wall		Slab	
	28 days	90 days	28 days	90 days
Control	26.5	26.8	27.4	27.8
TA25	26.1	27.4	27.0	27.6
TA50	25.3	28.6	24.8	28.1
SCP25	26.5	27.6	25.0	28.6
SCP50	25.9	26.5	26.5	27.5

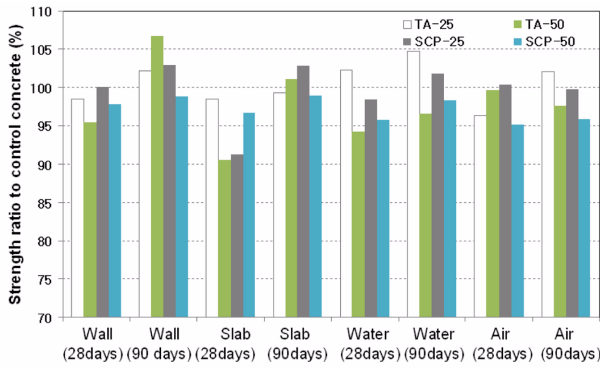


Fig. 5 Strength ratio to control concrete with different conditions

장기 강도에 대해서는 동등 이상의 값을 보이고 있다. 이러한 경향은 수중 양생 및 표준 양생한 공시체의 경향에서도 확인할 수 있다. 플라이애쉬의 가장 큰 특성이 장기 강도 개선이 매립회에서도 일부 적용됨을 알 수 있다. Fig. 5에서는 수중 양생, 기건 양생, 코어 강도에 대하여 기준 콘크리트에 대한 강도 증가비를 재령 28일 및 90일에 대하여 나타내었다. 계산 결과 91~107%의 강도 변화비를 나타내고 있었다.

3.3.2 염화물 침투 저항성 및 확산 계수

이 절에서는 수중 양생 시편과 구조물에서 채취한 코어에 대하여 확산 계수 및 총 전하량 투과에 대한 실험을 수행하였다. 대상 시편은 모두 재령 28일 경과 후의 것으로 코어 역시 28일 경과 후 채취된 시편을 대상으로 하였다. 염화물 확산 저항성은 염해에 노출된 구조물의 염화물 거동 평가와 내구 수명 산정에 매우 중요한 평가 항목이며,^{29,30)} 각각 NT BUILD 492와 ASTM C 1202를 참조하여 수행하였다.

28일 재령 원주형 시편(100 × 50 mm)을 이용하여, Table 6과 같은 조건으로 실험을 수행하였다. 일정 경과 시간 후 시편은 할렬 후에 0.1 N의 질산은용액(AgNO₃)을 분무하여 침투 깊이를 측정하는데, 확산계수 도출은 식 (1) 및 (2)와 같이 제시되어 있다. Table 8은 실험 조건을, Fig. 6은 실험 개요도를 나타내고 있다. 한편 Table 9에서는 실험 결과를 나타내었으며, Fig. 7에서는 염화물 침투 및 확산 실험에 따른 변화 비율을 나타내었다.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

Table 8 Diffusion coefficient based on NT BUILD 492

Item	Note
Catholyted	10% NaCl
Anolyte	0.3 N NaOH
Temperature	20 ~ 25°C
Applied potential	30 V
Initial current	40 ~ 60 mA
Duration time	24 hours

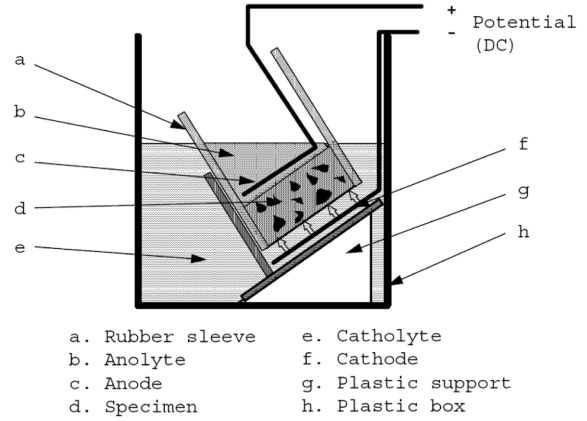


Fig. 6 Schematic diagram for NTBUILD 492

Table 9 Test results for chloride resistance

Type	Diffusion coefficient (10 ⁻¹¹ m ² /s)		Permeability (coulombs)	
	Submerged	Core	Submerged	Core
Control	2.44	2.58	3,136	3,524
TA25	2.58	2.71	3,563	3,537
TA50	2.69	2.87	3,836	3,645
SCP25	2.50	2.61	3,252	3,595
SCP50	2.59	2.77	4,176	3,879

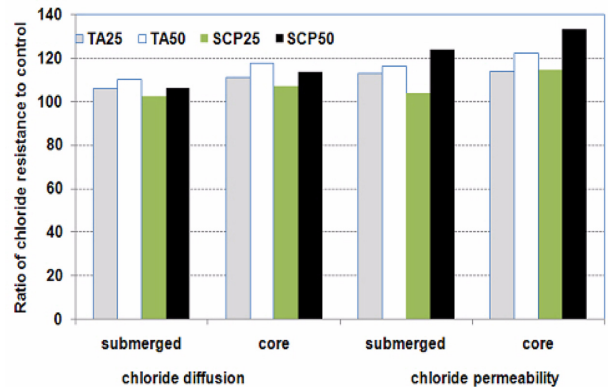


Fig. 7 Ratio to chloride resistance to control concrete

$$E = \frac{U-2}{L}, \quad \alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left[1 - \frac{2C_d}{C_o} \right] \quad (2)$$

여기서, D_{nssm} 는 비정상 상태에서 구한 전위차 측진 염소 이온 확산 계수(m²/sec), R 은 기체 상수(8.314 J/mol·K), T 는 절대온도(K), L 은 시편 두께(m), z 는 이온전자가, F 는 패러데이 상수(96,500 J/V·mol), U 는 전위차(V), x_d 는 비색법에 의한 평균 침투 깊이(m), t 는 전위차의 적용 시간(sec), C_o 는 음극셀의 염소이온 농도(mol/l), C_d 는 비색법에 의한 반응 농도(≒0.07 N), α 는 실험 상수($T=295$ K, $U=30$ V, $L=0.05$ m이면, $\alpha=23,800$ m⁻¹), erf⁻¹는 오차 함수의 역함수를 나타낸다.

확산 계수에 대해서는 수중 양생 시편이 코어 시편에 비해 매립회의 종류에 관계없이 전체적으로 염소이온 투

과성이 양호한 것으로 나타났다. 치환율이 증가하면서 6% 정도 확산 계수가 증가함을 알 수 있었다. 수중 양생된 시편의 경우 코어 채취 후의 실험 결과보다 우수한 성능을 보이고 있는데, 이는 충분한 온도와 수분의 공급에 따라 충분한 수화물이 형성되었기 때문이다.^{28,31)} 통과 전하량에서는 기준 콘크리트가 3,136~3,524 coulombs의 범위를 보이는데, TA 콘크리트에서는 3,537~3,645 coulombs의 범위를, SCP 콘크리트에서는 3,595~3,879 coulombs의 범위를 나타내었다. 수중 양생된 보통 콘크리트에 비해, TA 콘크리트는 105~117%의 확산 계수 증가와 112~122%의 염화물 투수성의 증가를 보이고 있었으며, SCP 콘크리트는 각각 102~113% 및 103~133%의 증가를 보이고 있었다. 치환율이 50%인 경우에는 염화물 침투가 커지므로 이보다 낮은 치환율의 적용이 필요함을 알 수 있으며 압축강도 평가에서 50% 치환율의 경우 강도 증가를 확인할 수 없었다.

3.3.3 탄산화 저항성 평가

Table 10에서는 재령 28일에서 현장 타설시 수중 양생 공시체와 PA 콘크리트 구조체에서 코어를 채취한 시편에 대해 탄산화 깊이를 측정된 결과이다. 전체적으로 기준 콘크리트에 비하여 동등 이상의 탄산화 저항성을 보이고 있으며, 이는 기존의 선행 연구 결과와도 일치하고 있다.¹⁹⁾ 전반적으로 코어의 탄산화 깊이는 수중 양생된 시편에 비하여 크게 평가되었는데, 이는 염화물 저항에서와 마찬가지로 충분한 수화 반응에 기인한다.^{28,31)} 탄산화 속도 계수 비는 탄산화 저항성을 평가하는데 쉽게 사용되는데,^{26,32,33)} Fig. 8에서는 탄산화 속도 계수(mm/day^{0.5})를 도출하여 비교하였다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이, 잔골재 치환에 따른 특별한 경향은 나타나지는 않았으나, 전체적으로 기준 콘크리트보다 우수한 탄산화 저항성을 나타내고 있다.

3.4 경화된 PA 콘크리트 구조물에 대한 평가

이 절에서는 3.1절에서 설명한 것과 같이 PA 콘크리트

Table 10 Carbonation depth in PA concrete with time

Type		Carbonation depth (mm)				
		7	14	28	42	56
Control	Submerged	4.66	7.27	7.92	8.36	9.84
	Core	5.17	7.06	7.61	7.96	9.83
TA25	Submerged	4.51	7.11	7.36	7.88	9.78
	Core	4.72	6.58	7.75	7.90	9.77
TA50	Submerged	4.73	7.2	7.3	7.94	9.81
	Core	4.64	6.33	7.6	7.96	9.81
SCP25	Submerged	4.47	7.16	7.44	7.81	9.52
	Core	4.81	5.41	7.54	7.65	9.97
SCP50	Submerged	4.41	6.85	7.05	7.70	9.45
	Core	5.05	5.46	7.52	7.88	9.61

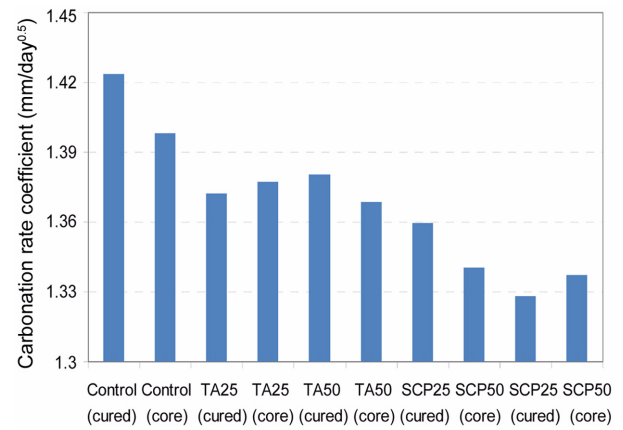


Fig. 8 Comparison of carbonation velocity for different PA concrete

를 이용하여 구조체를 제작한 후 구조체 성능을 평가하도록 한다. 강도에 대해서는 일반적인 비파괴 강도 측정법인 반발 경도법을 적용하였으며, N형 슈미트해머를 사용하여 측정하였다. 건조수축에 대해서는 접착 게이지(contact gauge)를 사용하여 180일간의 길이 변화를 측정하였다. KS F 2424에 의거 하여 계획된 재령에서 다음 식 (3)에 의하여 도출하였는데, 게이지를 수직 및 수평 교차 설치한 후 수행하였다.

$$\Delta l(\%) = \frac{X_i - X_0}{L_0} \times 100\% \quad (3)$$

여기서, L_0 는 기준 길이, X_i 는 계획 재령 시점 I에서의 측정치, X_0 는 기준 시점에서의 측정치를 나타낸다.

마지막으로 매립된 온도 센서를 이용하여 타설 후 각 배합에 따른 온도 거동을 평가하였다. Fig. 9(a)는 슈미트해머의 타격 모습을, Fig. 9(b) 및 (c)는 접착 게이지 측정 모습을 나타내고 있으며, Fig. 9(d)에서는 설치된 매립 게이지(온도)를 나타내고 있다.

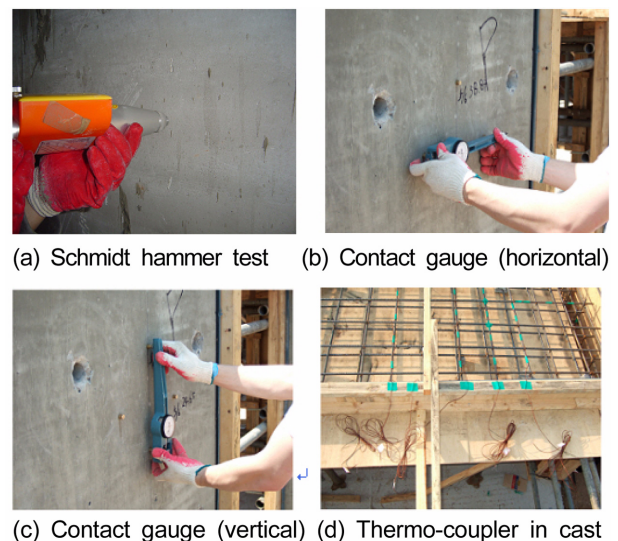


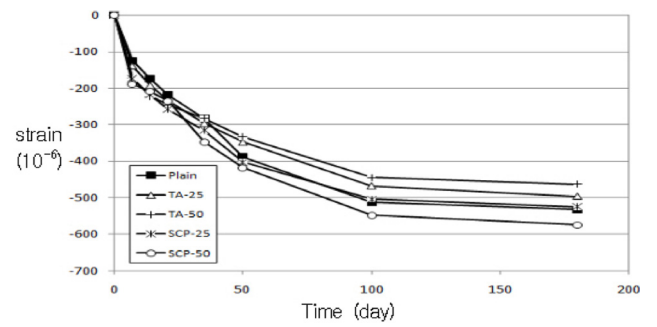
Fig. 9 Photos for field test

3.4.1 슈미트해머의 반발도

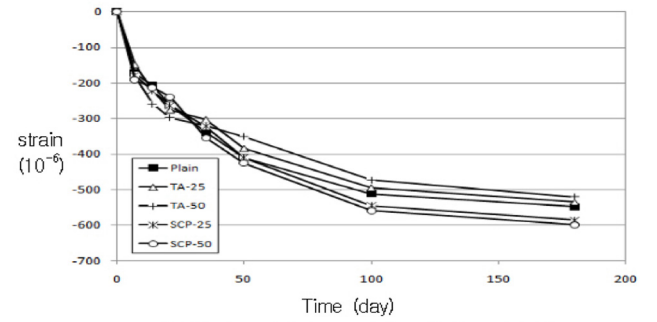
Fig. 10(a)에서는 PA 잔골재를 혼입한 RC 구조물의 기둥, 벽체 및 슬래브에 대한 N형 슈미트해머의 14일 경과후의 반발도 시험 결과이다. 부재의 위치에 따른 반발도는 기둥, 벽체, 슬래브 순으로 높게 나타났는데 수평면인 슬래브 보다 수직면인 기둥 및 벽을 타격한 경우가 약 10~20% 정도 높게 나타났다. 이러한 경향은 수평면 타격과 수직면 타격시의 작동 원리의 차이와 마감면을 거푸집으로 한 기둥 및 벽체가 인위적인 마감면을 가진 슬래브보다 편평하기 때문이다. 또한 벽체와 슬래브의 반발도 경향은 기준 콘크리트가 PA 콘크리트보다 1.2~3.5% 큰 값을 전 재령에서 보여주고 있으며, 매립회 종류 및 치환율에 따른 차이는 뚜렷하지 않았다. Fig. 10(b)에서는 반발도와 수중 양생된 시편과의 압축강도 상관성을 나타내고 있는데, 반발도가 커질수록 두 값 사이의 상관성이 증가함을 확인 할 수 있었다. 이는 재령이 증가할수록 반발도에 대한 신뢰도가 증가되는 것을 나타낸다. TA 콘크리트는 기준 콘크리트 대비 94~98% 수준이었으며, SCP 콘크리트는 96~102%의 강도 변화비를 보이고 있었다.

3.4.2 건조수축 길이 변화

Fig. 11(a) 및 (b)에서는 PA 콘크리트 구조물의 기둥 및 슬래브의 건조수축 길이 변화를 재령 경과에 따라 나타낸 것이다. 기둥의 경우 기준 콘크리트는 재령 180일에서 532.4×10^{-6} 의 길이 변화율을 나타낸 반면, TA 콘크리트의 경우는 $462.5 \times 10^{-6} \sim 496.3 \times 10^{-6}$ 범위를, SCP 콘크리트의 경우는 $524.3 \times 10^{-6} \sim 574.2 \times 10^{-6}$ 의 범위를 가졌다. 180일 후 변형률 비는 TA 콘크리트는 85~95% 수준으로 건조수축이 감소되었으며, SCP에서는 109.5% 수준으로 증가하였다.



(a) Drying shrinkage stain with time (column)



(b) Drying shrinkage stain with time (slab)

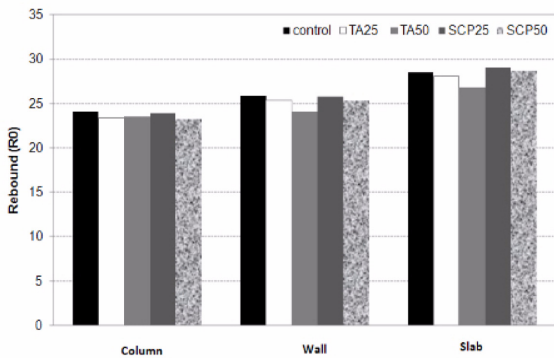
Fig. 11 Drying shrinkage in different member

슬래브의 경우도 기둥보다 약간 큰 건조수축량을 가지고 있었는데, 매립회 콘크리트의 건조수축은 $519.7 \times 10^{-6} \sim 598.6 \times 10^{-6}$ 으로 기둥의 경우와 유사한 건조수축량을 나타내었다. 슬래브 부재에서 역시, TA 콘크리트가 SCP 콘크리트보다 건조수축에서 유리하게 평가되었다. 전반적으로 부재의 폭 및 두께가 작을수록 건조수축이 크게 발생하였는데, 이는 부재의 폭 및 두께가 작을수록 비표면적이 커져서 내부 수분 증발이 빠르게 진행되었기 때문이다.³⁴⁾

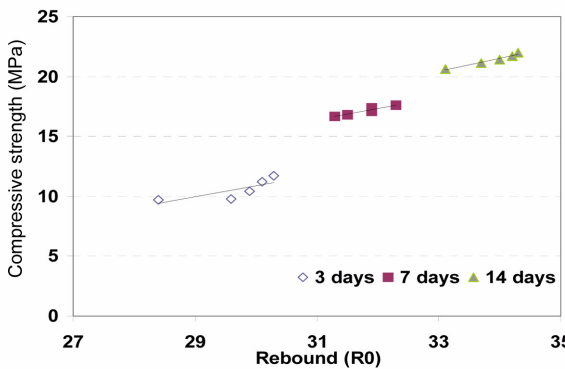
실험 결과 건조수축량은 PA 콘크리트 사용시 일반 콘크리트와 비슷한 수축량을 보이고 있었으며 치환율에 따른 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다. 실내 실험에서도,¹⁹⁾ PA의 종류별, 치환율별 건조수축에 대한 경향은 뚜렷하게 나타나지 않았다.

3.4.3 수화열 이력

기준 콘크리트와 PA 콘크리트(TA25, TA50, SCP25, SCP50) 부재에서 측정된 시간별 온도 이력 결과는 Fig. 12에 나타내었다. 재령 초기 물-결합제에 의한 빠른 수화반응이 일어나 온도가 급격하게 상승한 후 약 18시간 이후 최고 온도를 나타내었으며, 약 110시간 이후 외기 온도와 비슷한 온도를 나타내었다. 최고 온도는 기둥 중앙, 벽체 중앙, 슬래브 중앙 순서로 나타났으며, 기준 콘크리트의 경우, 24.1°C, 16.5°C, 8.9°C로 평가되었다. 기둥 중앙부의 온도를 벽체나 슬래브 중앙의 온도보다 약 5~10°C

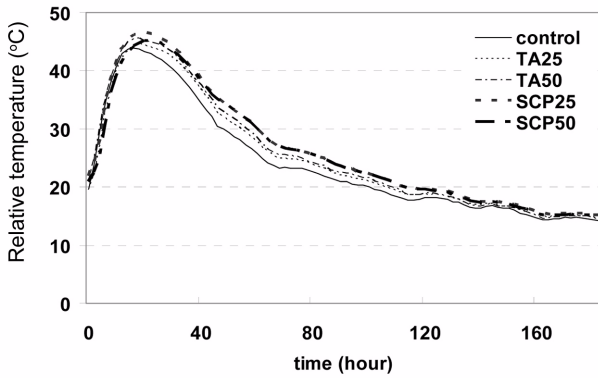


(a) Comparison of rebound (NDT)

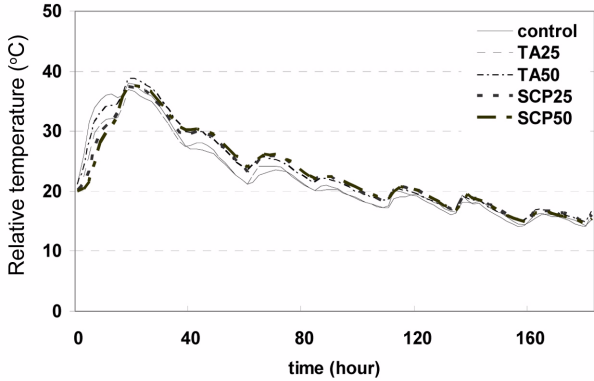


(b) Comparison with rebound and compressive strength

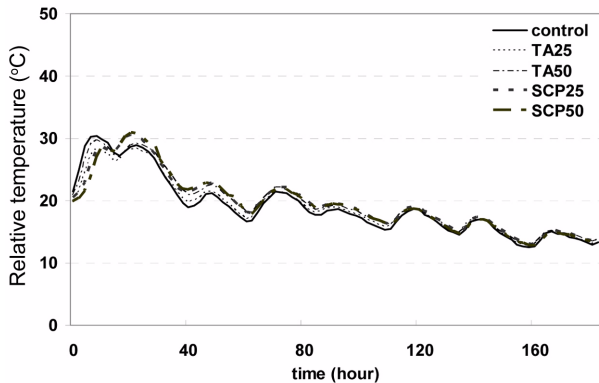
Fig. 10 Results of rebound for PA concrete structure



(a) Temperature in column



(b) Temperature in wall



(c) Temperature in slab

Fig. 12 Hydration heat variation in PA concrete member

낮게 나타내었는데 이는 기둥 부재가 벽체나 슬래브에 비해 두께가 큰 부재로서 수화열의 영향에 기인한 것이다. Fig. 11은 수화열 온도 변화를 나타내고 있다.

모든 부재에서 초기에는 보통 콘크리트의 수화열이 가장 높게 나타났으나, 18시간 정도 이후, PA 콘크리트를 사용한 부재에서 수화열이 증가함을 알 수 있다. 세 가지 모두 동일한 단위 시멘트량을 가지고 있으므로 초기 수화열은 일정하였지만, 잔골재 일부를 PA로 치환하므로 추가적인 수화열이 일부 존재하는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 골재의 품질이 일정하지 않으므로 치환율에 따른 수화열의 변화는 뚜렷하지 않았다. 시간에 따른 온도의 누계는 Fig. 13에 나타내었는데, 모든 경우에서 PA 콘크리트에서 수화열 누계가 증가하였음을 알 수 있다.

이상의 연구에서 PA 콘크리트를 사용한 콘크리트 구

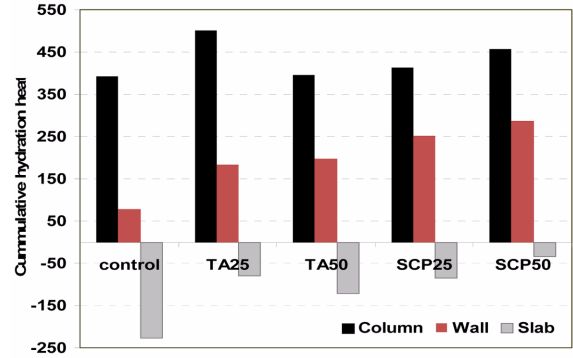


Fig. 13 Cumulative hydration heat with different PA concrete

조체의 거동을 평가하였다. 일반적으로 PA는 매립지에서 채취하므로 플라이애쉬와 바텀애쉬, 그리고 미연탄소의 흡착 제어가 어려운 현실이다. 1단계의 연구에서도¹⁹⁾ PA의 치환율 증가에 따라 내구 특성의 일정한 경향을 판단하기가 어려웠다. 그러나 그 성능이 기준 콘크리트에 비하여 크게 저하되지 않으며, 일반적으로 요구되는 콘크리트의 성능 기준을 만족하고 있음을 확인하였다. PA 콘크리트를 적극적으로 활용하기 위해서는 매립지 골재의 품질 관리를 통하여 미연 탄소 등이 제거되어야 한다. 또한 구조체에 대한 처짐 또는 탄성 계수와 설계 정수 등을 위한 실험이 추가적으로 진행되어야 한다. 노출 환경과 흡수성이 큰 골재 특성을 고려하여, 동결 용해의 침해를 받는 환경 또는 염해가 심한 환경에서는 제한적으로 사용하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

이 연구에서는 1단계 연구에서 중간 정도의 품질을 가지는 2가지 TA와 SCP의 매립회를 이용하여 실제 크기의 구조물을 제작한 뒤, 경화 전/후 그리고 구조체 적용 실험을 수행하였다. 이 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 레미콘에서 입수된 PA 콘크리트에 대하여, 슬럼프, 공기량, 응결 시간을 평가하였다. 치환율의 증가에 따라 일부 슬럼프 소실이 있었으나, 기준 범위 안에 있었으며, 공기량에서도 큰 영향은 없는 것으로 평가되었다. 응결 시간에서는 PA 콘크리트가 지연된 응결 시간을 나타내었는데, 이는 세척 후에도 존재하는 플라이애쉬의 영향과 다공성 잔골재인 PA의 내부 수화 영향으로 판단된다. 흡수율은 TA 골재의 경우, 3.17%, DH 골재의 경우, 7.12%로서 흡수율이 큰 잔골재를 사용하는 경우 응결 시간이 지연됨을 알 수 있다.
- 2) 코어에 대한 압축강도 시험 결과, 재령 28일의 경우 슬래브 및 벽체에서 채취한 코어 강도는 8% 정도 기준 콘크리트에 비하여 감소한 값을 보이고 있었다. 그러나 90일 장기강도에 대해서는 동등 이상의 강도를 확인하였다. 이러한 경향은 수중 양생 및

기건 양생한 공시체의 경향에서도 확인할 수 있었다.

- 3) 강도 및 염화물 실험 결과 치환율이 50%인 경우, 뚜렷한 개선 효과를 확인할 수 없었으므로 사용시 그 이하의 치환율을 사용하는 것이 바람직하다. 한편 탄산화 저항성에는 모든 PA 콘크리트가 기준 콘크리트에 비해 저항성이 증가하므로, 지하 구조물 등에 사용할 경우 유리할 것으로 판단된다. 한편 염해가 예상되는 지역 그리고 흡수성이 큰 골재 특성을 고려하여 동결융해 예상 지역에서는 사용을 제한하도록 한다.
- 4) 잔골재로서 PA를 사용하기 위해서는 그 안에 존재하는 유해물(탄소함유량)의 세척과 골재 품질관리가 매우 중요하다. 이는 일반적으로 매립지에 어느 정도의 플라이애쉬와 바텀애쉬가 혼재하는지 알 수 없으며, 세척 후에도 흡착되는 플라이애쉬의 정량적인 평가 또는 탄소미립분의 평가가 어렵기 때문이다. 그러나 PA 콘크리트는 재료 측면이나 구조물 측면에서 기준 콘크리트의 성능과 큰 차이가 없음을 실험을 통하여 구명하였으며 추가적인 연구를 통하여 그 적용성이 확대되기를 기대한다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 오성원, “석탄회처리 현황과 대책,” 석탄회 활용 국제 워크숍, 1996, pp. 3~126.
2. 한국콘크리트학회, 콘크리트와 환경, KCI-R-10-004, 2010, pp. 81~97.
3. 송하원, 권성준, 변근주, 박찬규, “혼화제를 사용한 고성능 콘크리트의 배합 특성을 고려한 염화물 확산 해석 기법에 관한 연구,” 대한토목학회 논문집, 25권, 1A호, 2005, pp. 213~223.
4. 권성준, 송하원, 변근주, 박찬규, “신경망 이론과 마이크로 모델링을 통한 혼화제를 사용한 콘크리트의 염화물 침투 해석,” 대한토목학회 논문집, 27권, 1A호, 2007, pp. 117~129.
5. 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.
6. 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.
7. CEB, *Durable Concrete Structures-Design Guide*, 2nd Edition, Thomas Telford, London, 1992, pp. 12~24.
8. 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.
9. 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.
10. Bentz, D. P., Lura, P., and Roberts, J. W., “Mixture Proportioning for Internal Curing,” *Concrete International*, Vol. 27, No. 2, 2005, pp. 35~40.
11. 천병식, 고용일, 오민열, 권형석, “산업폐기물로 발생하는 석탄회의 토질 역학적 특성에 관한 연구,” 대한토목학회 논문집, 10권, 1호, 1990, pp. 115~124.
12. 김진만, 박은구, 조성현, 강철, “통계적 방법에 의한 바텀애쉬를 사용한 경량 기포 콘크리트의 최적 배합 결정,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 1호, 2009, pp. 3~11.
13. 김상철, 안상구, “Bottom Ash를 사용한 기포 콘크리트의 배합 설계 및 압축강도 특성,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 3호, 2009, pp. 283~290.
14. 원종필, 이용수, “Bottom Ash를 혼합한 저강도 고유동 충전재의 특성,” 콘크리트학회 논문집, 13권, 3호, 2001, pp. 294~300.
15. 원종필, 이용수, 이준자, “Bottom Ash를 재활용한 저강도, 고유동 재료의 내구성 및 환경 영향 평가,” 콘크리트학회 논문집, 14권, 2호, 2002, pp. 223~230.
16. 김성수, 김동현, 박광필, “무연탄 Bottom-Ash를 적용한 고유동 충전재의 성능 평가,” 한국콘크리트학회 가을 학술대회논문집, 13권, 2호, 2001, pp. 263~268.
17. 최세진, 정용, 오복진, 김무한, “물-시멘트비 및 바텀애쉬 대체율에 따른 콘크리트 공학적 특성에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 15권, 6호, 2003, pp. 880~847.
18. 조병완, 박승국, 권병윤, “알칼리 활성화 석탄회(Fly Ash, Bottom Ash) 인공경량골재 및 콘크리트 적용,” 콘크리트학회 논문집, 16권, 6호, 2004, pp. 751~757.
19. 이봉춘, 정상화, 문재흠, 권성준, “국산 매립회의 골재 특성 평가 및 매립회 콘크리트의 내구성 성능 평가,” 콘크리트학회 논문집, 23권, 3호, 2011, pp. 311~320.
20. 기술표준원, KS F 2402, 콘크리트의 슬럼프 시험 방법, 2007, pp. 1~12.
21. 기술표준원, KS F 2421, 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험 방법, 2006, pp. 1~8.
22. 기술표준원, KS F 2436, 관입 저항침에 의한 콘크리트의 응결 시험 방법, 2007, pp. 1~8.
23. 기술표준원, KS F 2405, 콘크리트 압축강도 시험 방법, 2010, pp. 1~15.
24. ASTM C1201, Cement Standard and Concrete Standard, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2010, pp. 5~23.
25. NT BUILD 492, Concrete Migration Coefficient from Non-Steady State Migration Experiments, 1999, pp. 1~7.
26. 기술표준원, KS F 2584, 콘크리트의 촉진 탄산화 시험 방법, 2010, pp. 1~10.
27. 김무한, “플라이애쉬의 치환 방법 및 치환율에 따른 플라이애쉬를 대량 사용한 콘크리트의 특성에 관한 연구,” 대한건축학회 논문집, 18권, 2호, 2002, pp. 123~130.
28. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Longman, 4th Ed., 1999, pp. 269~311.
29. 이봉춘, 채성태, 우영제, 김진성, 김주형, 류화성, “잔골

- 재로서 매립회를 혼입한 콘크리트의 특성에 관한 기초 연구,” 한국콘크리트학회 봄 학술대회논문집, 20권, 1호, 2008, pp. 477~480.
29. Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., and Jung, S. H., “Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-Aged Crack : Probabilistic Approach for Chloride Diffusion,” *Structural Safety*, Vol. 31, 2009, pp. 75~83.
 30. Song, H. W. and Kwon, S. J., “Evaluation of Chloride Penetration in High Performance Concrete Using Neural Network Algorithm and Micro Pore Structure,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, ISSUE 1, pp. 814~824.
 31. Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T., *Modeling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport*, Routledge, London, 1999, pp. 31~57.
 32. 권성준, 송하원, 변근주, “인공신경망을 통한 확산계수 도출과 공극구조 변화를 고려한 콘크리트 탄산화 해석,” 대한토목학회 논문집, 27권, 1A호, 2007, pp. 107~116.
 33. 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.
 34. Shimomura, T. and Maekawa, K., “Analysis of the Drying Shrinkage Behavior of Concrete Using a Micromechanical Model Based on the Micro Pore Structure of Concrete,” *Magazine of Concrete Research*, Vol. 49, 1997, pp. 303~322.

요 약 많은 연구에서 플라이애쉬 및 바텀애쉬를 사용한 콘크리트에 대한 연구가 진행되고 있지만, 매립회를 사용한 콘크리트 및 실제 크기의 구조물에 대한 성능 평가 연구는 매우 제한적이다. 이 연구는 매립회를 잔골재와 치환하여 실제 크기의 구조물을 제작하고 이에 대한 성능을 평가하는 것을 주안점으로 한다. 1단계 연구 결과에서, 중간 정도의 성능을 가지는 두 가지 종류의 매립회(태안, 삼천포)를 선정하고 두가지 치환율(25%, 50%)을 고려하여 총 5개의 기둥, 슬래브, 벽체를 가진 콘크리트 구조물을 시공하였다. 경화전의 매립회 콘크리트 특성에서 공기량, 슬럼프, 응결 시간이 측정되었으며, 경화된 구조체에서 코어를 채취하여 강도, 염화물 저항성 및 탄산화 실험을 수행하였다. 코어에서 평가된 강도 및 내구 특성은 동일 배합의 공시체 시편에 대한 실험 결과와 비교하였다. 한편 구조물을 대상으로 반발경도, 건조수축, 수화열 특성이 평가되었으며, 기준 콘크리트와의 비교를 수행하였다. 실험 결과 매립회 콘크리트는 기준 콘크리트에 비해 적절한 강도 특성, 내구 특성을 가지고 있었으며, 구조물로 충분히 적용할 수 있음이 검증되었다. 국내 매립지에 따라 플라이애쉬, 바텀애쉬, 미탄소 탄소 등의 함량 제어를 통한 매립회 잔골재의 품질 제어가 수행된다면, 이에 대한 활용이 더욱 증가될 것이다.

핵심용어 : 매립회, 잔골재, 적용성 평가, 매립회 콘크리트 구조물, 플라이애쉬