

# 석탄회 종류에 따른 석탄회를 대량 사용한 콘크리트의 내구특성에 관한 연구

A Study on the Durabilities of High Volume Coal Ash Concrete  
by the Kinds of Coal Ash

최 세 진\* 김 무 한\*\*  
Choi Se-Jin Kim Moo-Han

## Abstract

Coal ash is a by-product of the combustion of pulverized coal, and much of this is dumped in landfills. The disposal of coal ash is one of the major issues for environmental problems. In this paper, the effects of the kinds and replacement ratio of coal ash on the durabilities of concrete mixtures are investigated. Fine aggregate was replaced with coal ash (fly ash and bottom ash) in five different ratios, of 0%, 10%, 20%, 35%, and 50% by volume.

Test results indicated that the compressive strength increased with the increase in fly ash percentage. The loss of compressive strength of bottom ash concrete mixes after immersion in sulphuric acid solution was less than in the control mix (BA0). In addition, the carbonation depth of fly ash concrete mixes was lower than the control mix (FA0).

키워드 : 석탄회, 플라이애시, 바텀애시, 잔골재, 압축강도, 중성화

Keywords : Coal ash, Fly ash, Bottom ash, Fine aggregate, Compressive strength, Carbonation

## 1. 서 론

석탄회는 석탄화력발전소에서 발생하는 부산물로서 발생장소에 따라 fly ash, cinder ash, bottom ash 등으로 구분되며, 전력사용량의 증가에 따라 부산물로 발생되는 석탄회의 발생량도 꾸준히 증가하여 2010년경에는 발생량이 약 600만톤에 이를 것으로 예상되고 있다. 이 중 플라이애시의 경우 건설산업분야에서 콘크리트용 혼화재료와 시멘트 부원료 등으로 활용율이 매년 증가하고 있으나, 바텀애시의 경우에는 거의 대부분이 매립·폐기되고 있어 환경훼손의 원인이 되고 있으며 이를 재활용하기 위한 연구결과가 보고되고 있으나<sup>1~3)</sup> 플라이애시에 비해 연구 및 적용실적은 미미한 실정이다.

또한, 콘크리트용 골재로서 강모래와 같은 양질의 천연골재의 고갈에 따라 최근 바다모래(해사) 및 부순모래의 사용비율이 점차 증가하고 있으나, 바다모래의 경우 환경보호를 위한 채취제한으로 수급에 어려움이 있으며, 부순모래의 경우도 신규석산의 발굴 및 채취허가가 쉽지 않아 콘크리트용 대체골재의 개발에 대한 필요성이 높아지고 있다. 선진외국의 경우 HVFAC(High Volume Fly Ash Concrete)라는 개념으로 잔골재 대체재로서

석탄회를 콘크리트에 활용하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며<sup>4~6)</sup>, 석탄회를 잔골재 대체재로 사용할 경우 바다모래 및 부순모래 세척에 따라 손실되는 미립분을 보완하여 콘크리트의 물성을 개선시킴으로서 그 활용성이 크다고 할 수 있다. 최근 국내에서도 바텀애시를 콘크리트용 골재로 사용하는 규준이 제정되어 바텀애시의 골재로서의 사용이 가능하게 되었으나<sup>7,8)</sup> 연구 및 사용실적이 미미하여 실제 건설현장에서 사용하는 경우는 많지 않은 실정이다.

본 연구는 잔골재 대체재로서 석탄회의 주요 구성성분인 플라이애시와 바텀애시의 치환율에 따른 콘크리트의 길이변화, 중성화, 화학저항성 및 내염해성 등 내구특성을 비교·검토함으로서 산업부산물인 석탄회의 활용 증대를 위한 참고자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획 및 배합

본 연구의 실험계획 및 배합은 표 1에서 보는 바와 같이 석탄회의 종류에 따른 석탄회를 대량 사용한 콘크리트의 내구특성을 비교·검토하기 위해서 석탄회의 종류를 플라이애시 및 바텀애시의 2수준으로 설정하고, 각 석탄회의 대체율을 잔골재 용적에

\* (주)삼표 기술연구소 책임연구원, 공학박사, 정회원  
\*\* 충남대학교 건축공학과 명예교수, 공학박사, 정회원

대하여 0, 10, 20, 35 및 50% 까지 대량 대체하는 수준으로 선정하였다. 또한 각 배합의 물시멘트비 및 단위수량은 일반콘크리트 수준의 60% 및 180kg/m<sup>3</sup>으로 고정하였다.

표 1. 실험 계획 및 측정 항목

Mix <sup>1)</sup>	석탄회 종류	석탄회 대체율 (%)	W/C (%)	단위 수량 (kg/m <sup>3</sup> )	S/a (%)	단위장량 (kg/m <sup>3</sup> )			측정 항목
						시멘트	석탄회	잔골재	
FA 0	Fly ash	0	60	180	41	0	750		
FA10		10				62	674		
FA20		20				125	599	1118	
FA35		35				218	487		
FA50		50				312	374		
BA 0	Bottom ash	0	60	180	41	0	750		
BA10		10				58	675		
BA20		20				116	600	1118	
BA35		35				202	488		
BA50		50				289	375		

주) 1) FA : Fly Ash, BA : Bottom Ash

## 2.2 사용재료

본 실험에 사용된 재료는 표 2에서 보는 바와 같이 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트, 잔골재는 밀도 2.56, 조립율 3.04의 세척사, 굽은골재는 밀도 2.65, 최대치수 20mm의 부순자갈, 혼화제는 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였다. 또한 바텀애시는 최대치수 5mm, 밀도 1.97의 바텀애시를 사용하였으며, 플라이애시는 밀도 2.13, 분말도 3,610cm<sup>3</sup>/g의 제품을 사용하였다. 표 3 및 그림 1은 시멘트, 플라이애시 및 바텀애시의 화학조성과 석탄회의 SEM 형상을 나타낸 것으로 플라이애시의 경우 구형의 매끄러운 입형을 띠는 반면, 바텀애시는 입형이 매우 불규칙적이고 표면이 다공성임을 알 수 있다

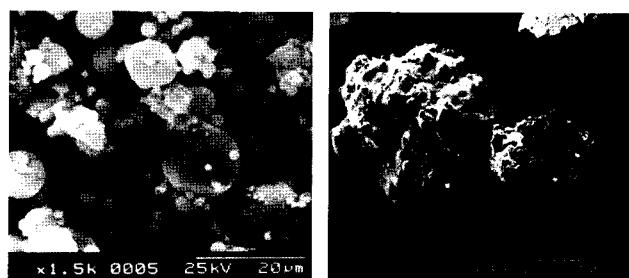
표 2. 사용재료의 물리적 특성

사용 재료	물리적 특성
시멘트	<ul style="list-style-type: none"> <li>1종 보통포틀랜드 시멘트</li> <li>밀도 : 3.15g/cm<sup>3</sup></li> <li>분말도 : 3,265cm<sup>3</sup>/g</li> </ul>
잔골재	<ul style="list-style-type: none"> <li>세척사, 최대치수 5mm</li> <li>밀도 : 2.56g/cm<sup>3</sup></li> <li>조립율 (F,M) : 3.04</li> </ul>
굵은골재	<ul style="list-style-type: none"> <li>부순자갈 Gmax 20mm</li> <li>밀도 : 2.65g/cm<sup>3</sup></li> <li>조립율 (F,M) : 6.50</li> </ul>
플라이애시	<ul style="list-style-type: none"> <li>밀도 : 2.13g/cm<sup>3</sup></li> <li>분말도 : 3,610cm<sup>3</sup>/g</li> </ul>
바텀애시	<ul style="list-style-type: none"> <li>최대치수 5mm, 밀도 : 1.98g/cm<sup>3</sup></li> <li>흡수율 : 5.8%</li> <li>조립율 (F,M) : 2.93</li> </ul>
혼화제	고성능감수제 (나프탈렌계)

표 3. 시멘트 및 석탄회의 화학조성

Kinds	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI <sup>1)</sup>
시멘트	62.7	20.5	5.9	2.5	2.1	-	1.5
플라이애시	1.2	66.1	23.3	0.8	-	4.2	2.4
바텀애시	1.9	45.5	27.8	0.9	-	5.7	20.5

주) 1) Loss on ignition



(a) 플라이애시 (b) 바텀애시

그림 1. 석탄회의 SEM 형상

## 2.3 실험방법

석탄회의 종류에 따른 콘크리트의 내구특성을 검토하기 위하여 본 연구에서는 길이변화의 경우 KS F 2424(contact gauge 방법)에 의하여 실험을 실시하였다. 중성화깊이는 100×100×400mm 콘크리트 공시체를 제작하여 28일 수중양생을 행하고 1주간 상온에서 정지한 후, 온도 20±2°C, 상대습도 60±5%, CO<sub>2</sub>농도 5±0.2%의 촉진중성화 시험기내에서 4주간 촉진시킨 후 KS F 2596에 의하여 중성화깊이를 측정하였다. 화학저항성의 경우 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 용액을 사용하여 Ø100×200mm 콘크리트 공시체를 제작하여 28일 수중양생을 실시한 후, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액에 침지시켜 침지전 및 침지후 1, 4, 8주에서의 콘크리트 압축강도, 질량변화율 등을 측정하였다. 염화물 침투깊이는 2.5% NaCl 수용액을 사용하여 Ø100×200mm 콘크리트 공시체를 28일 수중양생 시키고, NaCl 수용액에 4주간 침지시킨 후 공시체의 중심부를 할렬한 뒤, 질산은(AgNO<sub>3</sub>) 시약을 분무하여 변색부위를 베어니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하였다.

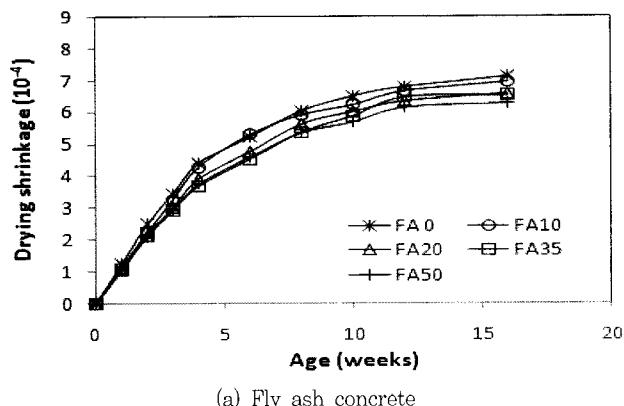
콘크리트의 비빔방법은 용량 100ℓ의 강제식 믹서를 사용하여 시멘트, 잔골재, 석탄회를 투입하여 건비빔을 30초간 행한 후, 물과 굽은골재, 고성능감수제를 투입하여 약 2분간 비빔을 실시하는 분할 투입방법을 사용하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

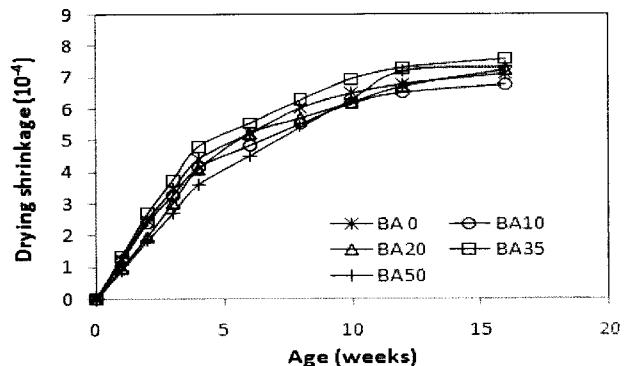
표 4는 석탄회 종류에 따른 석탄회를 대량 사용한 콘크리트의 각종 실험결과를 나타낸 것이다.

표 4. 콘크리트 실험 결과

Mix	길이변화	화학저항성										염화물침투깊이 (mm)	증성화 깊이 (mm)		
		압축강도 (MPa)				질량변화율 (%)				4 주	4 주				
		침지전	7 일	28 일	56 일	침지전	7 일	28 일	56 일						
FA 0	7.13	35.1	29.8	27.8	26.5	100.0	98.2	97.4	96.7	8.4	6.9				
FA10	6.97	40.9	38.4	36.3	35.5	100.0	98.1	97.4	96.5	7.8	6.6				
FA20	6.58	47.4	44.2	43.4	44.9	100.0	98.0	96.9	96.5	5.7	5.5				
FA35	6.51	57.8	55.8	53.9	55.6	100.0	98.0	97.0	96.4	4.3	5.3				
FA50	6.28	66.2	63.1	61.2	61.1	100.0	98.5	97.4	96.9	3.3	4.1				
BA 0	7.13	35.1	29.8	23.9	18.0	100.0	98.2	97.4	96.7	8.4	5.7				
BA10	6.75	33.2	28.5	26.6	25.0	100.0	98.1	97.1	96.5	10.1	7.0				
BA20	7.25	30.3	28.0	25.8	22.7	100.0	98.1	96.8	96.2	10.1	8.3				
BA35	7.60	34.7	29.5	27.8	24.6	100.0	98.1	97.3	96.5	9.7	9.1				
BA50	7.32	29.9	29.4	25.5	23.4	100.0	98.0	96.8	96.5	11.2	10.3				



(a) Fly ash concrete



(b) Bottom ash concrete

그림 2. 석탄회 종류에 따른 콘크리트의 길이변화

### 3.1 길이변화 특성 검토 및 분석

재령 16주까지 측정한 석탄회 종류 및 대체율에 따른 콘크리트의 길이변화를 표 4 및 그림 2에 나타내었다. 그림 2는 석탄회 종류 및 대체율에 따른 콘크리트의 길이변화를 나타낸 것으로, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 석탄회 종류 및 대체율에 따라 다소 차이를 보이고 있으며, 석탄회를 치환하지 않은 플레이인 콘크리트의 경우 재령 16주후의 길이변화는  $7.13 \times 10^{-4}$ , 플라이애시 및 바텀애시를 사용한 콘크리트의 길이변화는 각각  $6.28\text{--}6.97 \times 10^{-4}$  및

$6.75\text{--}7.60 \times 10^{-4}$  의 수준으로 나타났다. 석탄회 종류별로 살펴보면, 플라이애시를 잔골재 대체한 콘크리트의 경우 플라이애시 대체량이 증가할수록 길이변화가 다소 적게 나타나는 경향을 보이고 있는데, 이는 플라이애시를 잔골재 대체함으로써 잔골재에 비해 작은 플라이애시 입자가 콘크리트내의 공극을 충전함으로 인해 콘크리트의 수축량을 다소 줄이는 역할을 한 것으로 사료된다. 바텀애시를 잔골재 대체로 사용한 콘크리트의 경우에는, 석탄회 대체율 10%를 제외하고 동일한 석탄회 대체율에서 플라이애시 사용 콘크리트에 비해 상대적으로 길이변화가 크게 나타났으며, 바텀애시 대체율에 따른 일정한 경향을 보이지는 않고 있다.

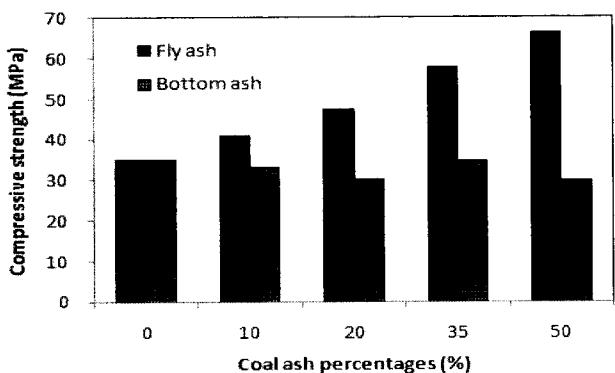
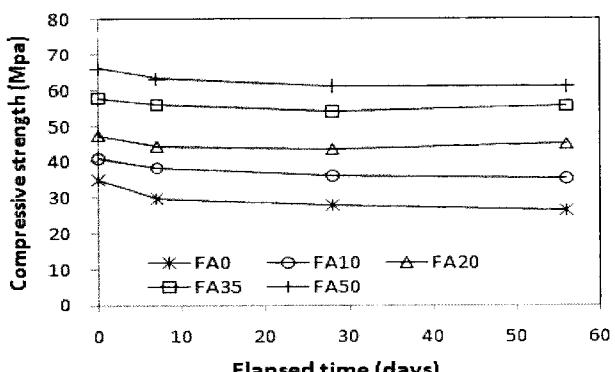
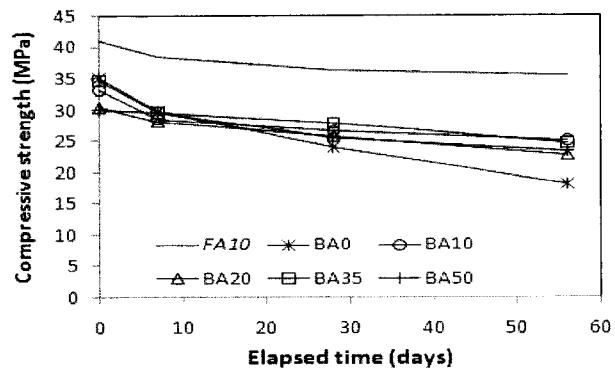


그림 3. 석탄회 종류에 따른 침지전 압축강도 (28일)



(a) Fly ash concrete



(b) Bottom ash concrete

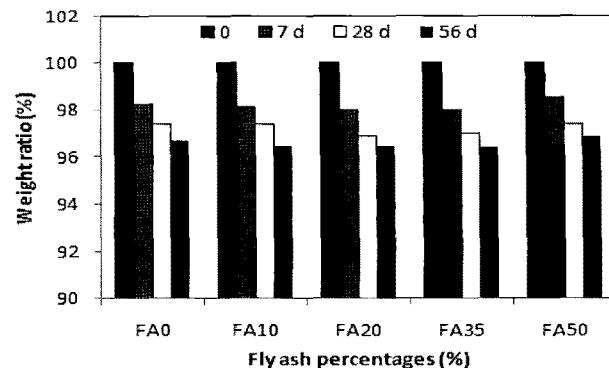
그림 4.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  용액 침지재령에 따른 압축강도의 변화

### 3.2 화학저항성 검토 및 분석

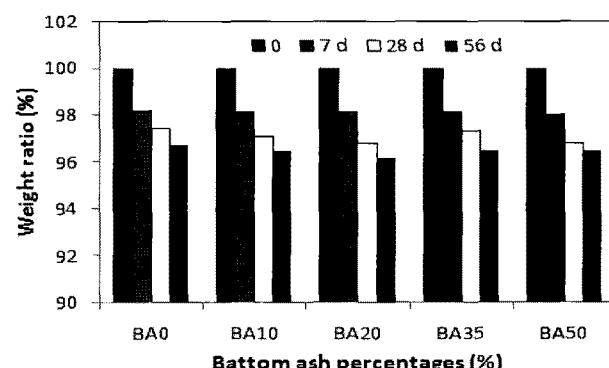
5%  $H_2SO_4$  용액에 콘크리트 공시체를 침지후 재령 56일 까지 공시체의 압축강도 변화와 질량변화를 측정하였다. 그림 3은 재령 28일에서의 석탄회 종류에 따른 콘크리트의 침지전 압축강도의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4는 5%  $H_2SO_4$  용액 침지후의 침지재령에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것이다. 또한 그림 5는 석탄회 종류에 따른 콘크리트의 침지재령에 따른 질량변화를 나타낸 것이다. 석탄회 종류 및 대체율에 따른 콘크리트의 재령 28일의 침지전 압축강도를 나타낸 표 4 및 그림 3에서 보는 바와 같이, 플라이애시를 대체한 경우 플라이애시 대체율이 증가할수록 높은 압축강도를 발현하고 있으며, 바텀애시를 대체한 경우 플레이인 콘크리트에 비해 상대적으로 다소 낮은 강도를 발현하고 있다. 이는 플라이애시를 잔골재 대체로 사용할 경우 결합재량의 증가와 함께 플라이애시 입자가 콘크리트 내에 존재하는 공극을 충전시키는 공극충전 작용 및 포줄란 반응에 의한 조직의 치밀화에 기인한 것으로 사료된다. 이에 반해 바텀애시의 경우 플라이애시와 달리 입자가 잔골재 수준으로 상대적으로 큰 바텀애시가 콘크리트내의 공극을 효과적으로 충전시켜주지 못했고, 단지 잔골재와 같은 역할을 했기 때문으로 사료된다.

침지후의 침지재령에 따른 콘크리트의 압축강도 변화를 나타낸 그림 4에서 보는 바와 같이, 모든 배합에서 침지재령이 증가함에 따라 압축강도가 저하하고 있음을 알 수 있다. 이는 황산염 침식에 의해 콘크리트 표면에서의 팽창과 균열이 발생하고 침지재령이 증가할수록 이러한 현상이 가속화되었기 때문으로 판단된다<sup>9)</sup>. 플라이애시를 대체한 콘크리트의 경우 대체로 유사한 강도 저하 기울기를 보이고 있으며, 바텀애시를 대체한 콘크리트의 경우 플라이애시를 대체한 콘크리트(FA10)에 비해 침지재령에 따른 강도저하 기울기가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급했듯이 바텀애시를 대체한 경우보다 플라이애시를 대체한 경우가 공극충전 작용으로 콘크리트 조직이 보다 치밀했기 때문으로 사료된다. 또한 바텀애시를 대체한 콘크리트의 배합이 플레이인 콘크리트(BA0)에 비해 강도저하치가 상대적으로 적은 것으로 나타났는데, 이는 침지전의 압축강도는 바텀애시를 대체한 콘크리트가 다소 낮게 발현되었으나 재령이 경과함에 따라 플라이애시와 화학조성이 유사한 바텀애시가 콘크리트내에서 플라이애시와 같이 포줄란 반응을 일으키고 이로인해 조직이 치밀해졌기 때문으로 사료된다.

그림 5는 석탄회 종류 및 대체율에 따른 콘크리트 공시체의 질량변화율을 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 침지재령이 증가함에 따라 모든 배합에서 질량이 감소하고 있음을 알 수 있는데, 이는  $H_2SO_4$  용액에 의한 콘크리트 공시체의 팽창 및 균열로 인해 공시체 표면으로부터 시료일부가 박리했기 때문으로, 석탄회 종류 및 대체율에 관계없이 대체로 유사한 수준을 보이고 있다.



(a) Fly ash concrete



(b) Bottom ash concrete

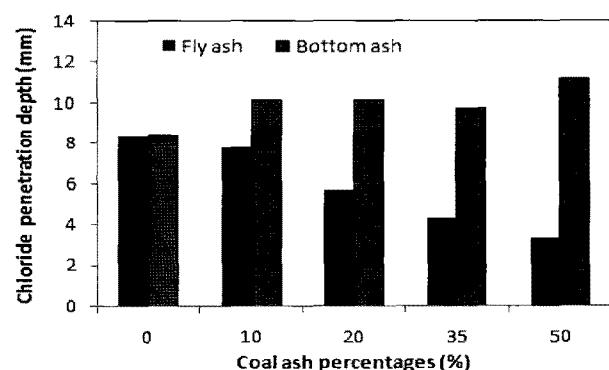
그림 5.  $H_2SO_4$  용액 침지재령에 따른 질량변화율

그림 6. 석탄회 종류에 따른 염화물 침투깊이의 변화

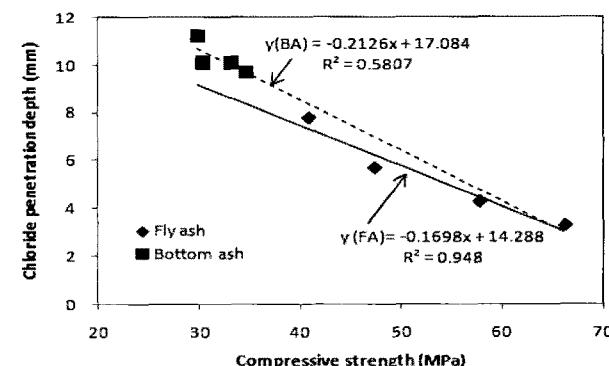


그림 7. 압축강도와 염화물 침투깊이의 관계

### 3.3 염화물 침투깊이 검토 및 분석

2.5% NaCl 수용액에 4주간 침지시킨 후 콘크리트 공시체의 염화물 침투깊이를 측정하였다. 표 4 및 그림 6은 석탄회 종류 및 대체율에 따른 염화물 침투깊이의 변화를 나타낸 것이다. 플라이애시를 대체한 경우 3.3~7.8mm 수준으로 8.4mm를 나타낸 플레이인콘크리트(FAO)에 비해 적은 값을 보이고 있으며, 플라이애시 대체율이 증가할수록 염화물 침투깊이가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 압축강도의 경향과 유사하게 플라이애시 입자의 공극충전효과와 플라이애시의 포줄란반응에 의해 조직이 치밀화 되었기 때문으로 판단된다. 바텀애시를 대체한 콘크리트의 경우, 염화물 침투깊이가 9.7~11.2mm 수준으로 바텀애시를 대체하지 않은 콘크리트(BAO)에 비해 상대적으로 큰 값을 보이고 있는데, 이는 바텀애시의 이송시스템상 해수에 의한 이송시 소량의 염분이 함유되었으며<sup>10)</sup>. 다공질인 바텀애시의 물리적특성이 본 연구에서 사용한 잔골재에 비해 상대적으로 비중이 낮고 흡수율이 높은데 기인한 것으로 사료된다.

그림 7은 석탄회 종류에 따른 압축강도와 염화물 침투깊이의 관계를 나타낸 것으로, 압축강도가 증가함에 따라 염화물침투깊이가 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 플라이애시를 대체한 콘크리트의 경우 넓은 범위에 걸쳐 압축강도와 염화물 침투깊이 사이에 높은 상관성을 나타냄으로서 염화물 침투깊이의 추정식 압축강도 값을 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 바텀애시를 대체한 콘크리트의 경우에도 압축강도가 증가함에 따라 염화물 침투깊이가 감소하고 있으나 상관성은 높지 않은 것으로 나타났다.

### 3.4 중성화깊이 검토 및 분석

촉진중성화 4주후의 중성화깊이를 측정하여 표 4 및 그림 8, 9에 나타내었다. 그림 8은 석탄회 종류 및 대체율에 따른 중성화깊이의 변화를 나타낸 것으로, 플라이애시를 대체한 콘크리트의 경우 플라이애시 대체율이 증가할수록 중성화깊이가 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로, 단위시멘트량의 일부를 플라이애시로 대체하여 콘크리트에 혼합할 경우 시멘트량의 감소와 포줄란반응시의  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 소비로 인해 중성화깊이가 증가하는 것으로 알려져 있으나, 본 배합에서는 시멘트량을 고정하고 플라이애시의 잔골재에 대한 대체로 인한 조직의 치밀화로 중성화깊이가 감소하는 것으로 나타났다. 바텀애시를 대체한 콘크리트의 경우, 바텀애시 대체율이 증가함에 따라 중성화깊이가 다소 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 바텀애시의 다공질특성에 기인한 것으로 사료된다.

그림 9는 석탄회 종류에 따른 압축강도와 중성화깊이의 관계를 나타낸 것으로, 염화물 침투깊이와 유사하게 압축강도가 증가함에 따라 중성화깊이가 감소하고 있으며, 플라이애시를 대체한 콘크리트의 경우 압축강도와 중성화깊이의 상관관계가 높은 상관성을 보이고 있다. 그러나 바텀애시를 대체한 콘크리트의 경우에는 상관

성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 플라이애시 및 바텀애시를 대체한 콘크리트 모두 압축강도와 중성화깊이의 상관성이 압축강도와 염화물 침투깊이의 상관성보다 상대적으로 낮게 나타났다.

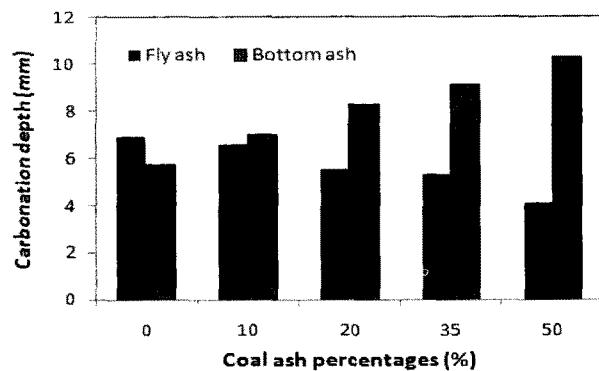


그림 8. 석탄회 종류에 따른 중성화깊이의 변화

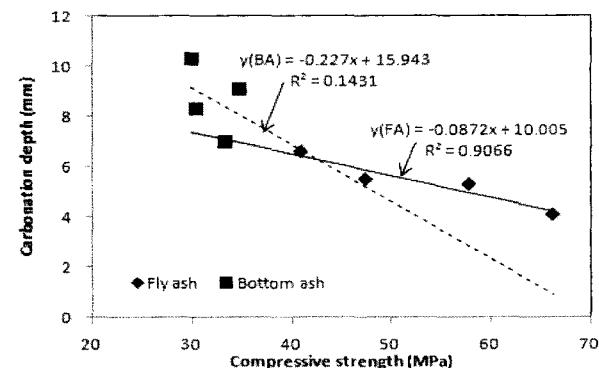


그림 9. 압축강도와 중성화깊이의 관계

## 4. 결 론

석탄회 종류에 따른 석탄회를 대량 사용한 콘크리트의 내구특성을 검토한 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 길이변화를 검토한 결과, 석탄회 종류 및 대체율에 따라 다소 차이를 보였으며, 석탄회를 치환하지 않은 플레이인 콘크리트의 경우  $7.13 \times 10^{-4}$ , 플라이애시 및 바텀애시를 사용한 콘크리트의 길이변화는 각각  $6.28\sim6.97 \times 10^{-4}$  및  $6.75\sim7.60 \times 10^{-4}$ 의 수준으로 나타났다.
- 2) 5%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  수용액에 침지전 재령 28일의 압축강도 값은 플라이애시 대체율이 증가할수록 높은 압축강도를 발현하였으며, 바텀애시를 사용할 경우 압축강도가 다소 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 화학저항성은 석탄회를 사용하지 않은 플레이인콘크리트에 비해 석탄회를 사용한 콘크리트에서 동등이상인 것으로 나타났다.

- 4) 염화물 침투깊이와 중성화깊이의 경우, 플라이애시 대체율이 증가할 수록 침투깊이와 중성화깊이는 감소하였으며, 바텀애시를 사용한 배합의 경우 플레인콘크리트에 비해 다소 증가하는 것으로 나타났다.
- 5) 염화물 침투깊이 및 중성화깊이와 압축강도의 상관관계는 플라이애시 콘크리트의 경우 높은 상관성을 보였으나 바텀 애시 콘크리트의 경우에는 상관성이 매우 낮은 것으로 나타났다.
- 6) 본 연구결과, 석탄회를 콘크리트용 잔골재로서 적절히 대체 할 경우 콘크리트의 강도향상 및 내구특성 개선효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 박종빈, 이상호, 지재성, Bottom ash를 이용한 친환경 보수성 블록 개발, 한국폐기물학회지, 제25권 제7호, pp.639~644, 2008
2. 이종호, 조봉석, 이태희, 김용로, 최세진, 김무한, 물시멘트비 및 Bottom ash 대체율에 따른 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회논문집, 제14권 제1호, pp.699~704, 2002
3. E. Berg, J.A. Neal, Concrete masonry unit mix designs using municipal solid waste bottom ash, ACI Materials Journal, Vol.95 No.4, pp.470~479, 1998
4. K.R. Hwang, T. Noguchi, F. Tomosawa, Effects of fine aggregate replacement on the rheology, compressive strength and carbonation properties of fly ash and mortar, ACI Spec. Publ. SP-178, pp.401~410, 1998
5. KS F 4570, Bottom ash aggregate for the precast concrete product, 2007
6. KS F 4569, Bottom ash aggregate for road construction, 2007
7. M. Maslehuddin, Al. Al-mana, M.Shamim, H.Saricimen, Effect of sand replacement on the early-age strength gain and long-term corrosion-resisting characteristics of fly ash concrete, ACI Materials Journal, Vol.86 No.1, pp.58~62, 1989
8. Nader Ghafoori, Yuzheng Cai, Laboratory-Made Roller Compacted Concretes Containing Dry Bottom Ash, ACI Material Journal, pp.224~251, 1998.5
9. N. Ghafoori, Y.Cai, B. Ahmadi, Use of dry bottom ash as a fine aggregate in roller compacted concrete, ACI Spec. Publ., SP-171, pp.487~507, 1997
10. P.K. Mehta and P.J. Monteiro, Concrete , microstructure, properties, and materials, 3rd ed, McGraw-Hill, 2006
11. R.K. Dhir, M.J. McCarthy and P.A.J. Tittle, Use of conditioned PFA as a fine aggregate component in concrete, Materials and structures, Vol.33, Jan-Feb, pp.38~42, 2000
12. Rafat Siddique, Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the abrasion resistance of concrete, Cement and concrete research, Vol. 33, pp.1877~1881, 2003
13. Rafat Siddique, Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete, Cement and Concrete Research, Vol.33, pp.539~547, 2003
14. V.M. Malhotra, M.-H. Zhang, P.H. Read, J. Ryell, Long-term mechanical properties and durability characteristics of high-str./high-perf. concrete incorporating supplementary cementing materials under outdoor exposure conditions, ACI Materials Journal, Vol.97 No.5, pp.518~525, 2000
15. 松藤 泰典 ほか：石炭灰のコンクリートの大量使用に関する研究, 日本建築學會學術講演梗概集, pp.437~454, 1999
16. 友澤史紀 ほか；フライアッシュを細骨材の一部として使用したコンクリートに関する研究(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.77~80, 1997
17. 黄光律 ほか；フライアッシュを内割・外割でセメントに混合したモルタル硬化体の空隙・組織構造, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20 No.2, pp.739~744, 1998
18. 友澤史紀 ほか；フライアッシュを外割混合したモルタルの中性化特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21 No.2, pp.109~114, 1999

(접수 2009. 2. 23, 심사 2009. 3. 17, 개재확정 2009. 3. 24)