

알칼리활성 플라이 애쉬 시멘트-콘크리트의 산저항성 및 내구성

강화영* · 박상숙[†] · 한상호

*한영대학 토목환경과 · 순천대학교 토목 · 환경공학부

(2007년 10월 5일 접수, 2008년 1월 2일 채택)

Acid Corrosion Resistance and Durability of Alkali-Activated Fly Ash Cement-Concrete

Hwa-Young Kang* · Sang-Sook Park[†] · Sang-Ho Han

**Department of Civil and Environment, Hanyeong College*

Division of Civil and Environmental Engineering, Sunchon National University

ABSTRACT : A new cementitious material has been developed, called alkali-activated fly ash cement(AAFC), which is used to produce AAFC-concrete for construction. The effect of acid attack, sodium chloride solution, carbonation, freeze-thaw cycling, and SEM, XRD analysis of the AAFC-concrete prepared using alkali-activated fly ash cement and OPC-concrete were experimentally investigated. It was found that the acid resistance of AAFC-concrete(35 MPa) prepared from alkali-activated fly ash at 85°C for 24 hrs is far better than OPC-concrete(35 MPa). Also, the AAFC-concrete(35 MPa) had a similar resistance of OPC-concrete(35 MPa) to attack, such as sodium chloride solution, carbonation and freeze-thaw cycling.

Key Words : Alkali Activated, Acid Resistance, Durability, Freeze-thaw Cycling

요약 : 알칼리활성 플라이 애쉬 시멘트(AAFC)라 불리는 새로운 시멘트 물질을 이용하여 AAFC-콘크리트를 제조하였다. 알칼리활성 플라이 애쉬 시멘트를 사용하여 제조한 AAFC-콘크리트와 OPC-콘크리트에 대하여 산 침투, 염분, 탄산화, 동결·융해에 대한 영향과 SEM, XRD 분석을 수행하였다. 플라이 애쉬를 85°C에서 24시간 동안 알칼리 활성화하여 제조한 AAFC-콘크리트(35 MPa)의 산 저항성은 OPC-콘크리트(35 MPa)보다 훨씬 뛰어난 것으로 나타났다. 또한 AAFC-콘크리트(35 MPa)는 염분용액, 탄산화 그리고 동결-융해와 같은 공격에 OPC-콘크리트(35 MPa)와 비슷한 저항성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

주제어 : 알칼리 활성, 산 저항성, 내구성, 동결·융해

1. 서론

국내 석탄화력발전소에서 배출되고 있는 석탄회 발생량은 2001년 491만톤에서 매년 증가하는 추세에 있으며 2010년에는 약 600만톤에 이를 것으로 예상되고 있다. 1999년 기준 발생하는 석탄회 중 약 42% 정도를 시멘트 제조용(점토대체) 및 콘크리트 혼화재 등으로 재활용하고 있다.¹⁾

플라이 애쉬를 콘크리트 혼화재로 사용시 작업성의 향상, 수화열의 감소, 장기강도의 증진, 내구성 증대 등 콘크리트 품질향상에 도움이 되고 균열의 발생을 줄일 수 있기 때문에 댐과 같은 대형 구조물 건설에 적합한 것으로 알려져 있다.²⁾ 그러나 플라이 애쉬를 시멘트 대신에 사용하면 플라이 애쉬의 저활성도에 의해 조기강도 저하, 미연탄소분에 의한 AE제 흡착 등 콘크리트 내구성 저하, 중성화 속도 증가 등의 문제점도 있다.³⁾

최근에는 다량의 플라이 애쉬를 유용한 자원으로 재활용하기 위하여 플라이 애쉬를 포틀랜드시멘트 없이 시멘트의 특성을 지닌 물질로 변환하는 것에 관심이 크게 높아지고 있으며, Ca 함량이 낮은 F급 플라이 애쉬를 시멘트성 물질로 전환하는 연구도 수행하고 있다.⁴⁾ 특히 플라이 애쉬의 알칼리활성 반응을 통해 알루미늄규산염을 수화반응시켜 좀더 강하고 내구성이 뛰어난 건설재료를 만들기 위한 노력이 진행 중이다.⁵⁻⁷⁾

이러한 연구의 일환으로 우리는 이전의 연구에서 F급 플라이 애쉬를 알칼리 활성화하여 플라이 애쉬 시멘트 페이스트를 제조하였으며, 제조한 페이스트의 압축강도 및 미세구조 특성 분석을 통해 포틀랜드 시멘트를 전혀 사용하지 않고도 플라이 애쉬를 시멘트성 물질로 전환할 수 있음을 확인하였다.⁸⁾ 또한 이러한 알칼리활성 플라이 애쉬 시멘트(Alkali-Activated Fly ash Cement; AAFC)를 이용하여 35 MPa의 압축강도를 발현하는 AAFC-콘크리트를 제조할 수 있었다.⁹⁾

한편 최근에는 콘크리트에 작용하는 유해한 환경으로 인

[†] Corresponding author

E-mail: ssp@sunchon.ac.kr

Tel: 061-750-3812

Fax: 061-750-3812

한 구조물의 성능저하와 내구성이 크게 문제되고 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 콘크리트 하수관의 부식과 도시폐수처리장 콘크리트의 부식으로 인해 산 저항성에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다.¹⁰⁾ 콘크리트의 화학적 부식인자로는 산, 황산염, 염화물, 중탄산염 등이 있으며, 특히 하수처리시설에서의 황화수소가스, 미생물에 의해 생성된 황산, 황산염에서 발생한 탄산가스 등은 콘크리트 구조물의 성능을 저하시킨다. 일부 연구자들은 실리카 흙, 플라이 애쉬, 고로슬래그를 첨가한 콘크리트와 이러한 물질을 전혀 첨가하지 않은 포틀랜드 시멘트 페이스트/콘크리트의 화학적 저항성에 관한 연구를 수행하였다.^{11,12)} 또한 겨울철의 경우 동결·융해 작용과 함께 용빙제의 사용은 콘크리트 구조물의 손상을 급격히 진행시키는 원인이 되고 있으므로 콘크리트의 동결·융해 저항성도 매우 중요하다.¹³⁾

따라서 본 연구에서는 포틀랜드 시멘트를 전혀 사용하지 않은 알칼리활성 플라이 애쉬 시멘트로 제조한 AAFC-콘크리트와 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement: OPC)로 제조한 OPC-콘크리트의 산 저항성, 탄산화, 염분 침투 그리고 동결·융해에 대한 저항성의 비교분석을 통하여 AAFC-콘크리트의 산 저항성 및 내구성을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

2.1.1. 플라이 애쉬

본 연구에 사용된 플라이 애쉬의 물리·화학적 조성은 Table 1과 2에 나타내었다. 플라이 애쉬는 ASTM C 618 규정에 따라 F급 플라이 애쉬로 분류되었다.

2.1.2. 물유리/수산화나트륨

플라이 애쉬의 알칼리 활성 반응을 위한 알칼리 용액 제조를 위해 공업용 수산화나트륨과 물유리를 사용하였으며, 물유리의 화학적 조성은 Table 3에 나타내었다. 본 실험에 사용된 물유리의 모듈(SiO₂와 Na₂O 사이의 질량 비율)은 2.26으로서 SiO₂와 Na₂O를 각각 30.5%와 13.5% 함유하고 있다.

2.1.3. 포틀랜드시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 규정된 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 4와 같다.

2.1.4. 골재

본 연구에 사용된 잔골재 및 굵은 골재의 물리적 성질은 Table 5와 같다.

2.2. 시험체 제조

2.2.1. AAFC-콘크리트 제조

Table 6은 AAFC-콘크리트 제조를 위한 배합비를 나타낸 것이다. AAFC-콘크리트의 강도특성에 관한 이전의 연구⁹⁾에서 밝혀진 적정 배합조건, 즉 플라이 애쉬 : 물유리 : 물 : NaOH : 잔골재 : 굵은골재 = 10.73 : 4.0 : 2.5 : 1.0 : 18.18 : 27.27로 혼합한 후 12°C, 50°C 그리고 85°C에서 24시간 양생하여 산저항성 및 내구성 실험을 위한 AAFC-콘크리트를 제조하였으며, 제조한 AAFC-콘크리트는 각각 6, 16 그리고 35 MPa의 압축강도를 발현하였다.

Table 1. Chemical composition of fly ash(wt %)

Element	Content(%)	Element	Content(%)
SiO ₂	49.58	K ₂ O	0.88
Al ₂ O ₃	31.90	TiO ₂	1.73
Fe ₂ O ₃	5.93	P ₂ O ₅	0.79
CaO	2.98	MnO	0.05
MgO	0.95	Ig. loss	4.30
Na ₂ O	0.42		

Table 2. Physical properties of fly ash

Specific weight	Ig. loss(%)	Moisture(%)	Blaine's(cm ² /g)
2.15	4.30	0.19	4,550

Table 3. Specification of water glass

Na ₂ O(%)	SiO ₂ (%)	SiO ₂ /Na ₂ O	Specific gravity
13.5	30.5	2.26	≥ 1.498

Table 4. Chemical composition and physical properties of ordinary portland cement

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	Gravity
21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2	1.3	3.15

Table 5. Physical properties of fine and coarse aggregate

Items	Fine aggregate	Coarse aggregate
Size(mm)	-	<25
Specific gravity	2.50	2.60
Absorption(%)	0.90	0.80
Fineness modulus	2.30	7.30

Table 6. Mixture proportion for preparation of AAFC-concrete

Activator(wt %)			Act/FA (wt %)	Fly ash (wt %)	Fine agg. (wt %)	Coarse agg. (wt %)	Curing time (hrs)	Curing temp. (°C)	Compressive strength(MPa)
Water glass	NaOH	Water							
4.0	1.0	2.5	0.7	10.73	18.18	27.27	24	12	6
								50	16
								85	35

Table 7. Mixture proportion for preparation of OPC-concrete

MPa	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)				AE (g)
						Water	Cement	Sand	Gravel	
35	25	15± 1.5	45± 1.5	50	30.5	184	368	499	1182	2.2

S/a : Sand percent of total aggregate by solid volume, AE: air-entraining agents.

시험체 제조는 굵은골재, 잔골재, 플라이 애쉬 순으로 투입하여 약 30초 동안 건비빔한 후 물에 녹인 수산화나트륨을 투입하고 충분히 혼합하였다. 그리고 물유리는 반응속도가 빠르기 때문에 마지막에 투입하여 빠른 시간 내에 혼합하였다. 공시체는 $\phi 10 \times 20$ cm 원주형 몰드를 사용하였으며, 1회의 혼합량은 공시체 6개를 원칙으로 하였다.

2.2.2. OPC-콘크리트 제조

AAFC-콘크리트와 비교 실험을 하기 위하여 슬럼프 15 ± 1.5, 공기량 4.5 ± 1.5의 조건을 만족하는 35 MPa의 콘크리트를 제작하였으며 사용된 배합은 Table 7과 같다. 굵은골재, 잔골재, 시멘트 순으로 투입하여 30초간 건비빔 한 후에 물에 고성능 감수제를 섞어 투입하고 2분간 혼합하였다. 공시체는 AAFC-콘크리트 공시체와 동일한 $\phi 10 \times 20$ cm 원주형 몰드를 사용하였으며, 1회 혼합량은 공시체 12개를 원칙으로 하였다.

2.3. 분석방법

2.3.1. 내산성 시험

내산성 시험은 ASTM C 267 및 579에 준하여 실시하였다. 85°C에서 24시간 양생하여 제조한 AAFC-콘크리트와 OPC-콘크리트를 각각 5%와 20%의 염산 및 황산 용액에 최대 90일간 침지 한 후 침식기간에 따른 압축강도 감소율을 측정하여 산 저항성을 평가하였다. 콘크리트에 대한 압축강도 측정은 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 준하였으며, 공시체는 재령 일별로 각각 3개씩 측정하여 평균값을 사용하였다.

2.3.2. SEM/XRD 분석

주사전자현미경(SEM) 관찰은 philips XL30 ESEM을 이용하였으며, X-선 회절 분석(XRD)은 Rigaku D/MAX-III B를 이용하여 실시하였다. XRD 측정은 CuK(Ni Filter): 30 kV, 20 mA, Scanning Speed: 6°/min, Full scale: 700 cps, 2 θ : 5~40°에서 실시하였다.

2.3.3. 탄산화

탄산화의 촉진시험을 위하여 제작된 콘크리트를 한쪽 방향에서만 CO₂가스가 침투하도록 침투 방향을 제외한 나머지 부분은 표면도장을 실시하여 탄산화 촉진시험기 내에서 온도 25°C, 습도 60%, CO₂ 농도 5%로 28일간 촉진탄산화시험을 실시하였다. 탄산화 촉진시험 후 28일에 시험체를 KS F 2423에 의해 콘크리트 할렬 인장 후에 할렬

면에 KS M 0015에 의한 1% 페놀프탈레인 용액을 분무해서 탄산화 깊이를 측정하였다.

2.3.4. 염분침투 확산

염화물이온의 확산시험은 ASTM C1202의 규정에 의거 실시하였다. 확산셀(용량: 785 mL, 셀 I측: 0.5 mol의 NaCl 용액, 셀 II측: 포화상태의 Ca(OH)₂ 용액)에 콘크리트 시험체($\phi 10 \times 5$ cm)를 설치하고, 60 V의 인가전압을 걸어 염화물이온 촉진시험을 수행하였다. 전압을 인가한 후 매 30분마다 전류량을 측정하였으며, 8시간 후 시험을 종료하였다. 수집된 데이터는 적산에 의해 전하량(Coulombs)을 산정하고 ASTM C1202 규정에 의하여 염화물 이온의 투과성을 평가하였다.

2.3.5. 동결·융해 시험

콘크리트의 동결·융해 반복 시험은 ASTM C 666의 기중동결 수중융해 방법으로 시험을 실시하였다. -18°C에서 4°C까지를 1 Cycle로 하여 시험을 실시하였고 매 30 Cycle씩 동탄성계수를 측정하였으며, 300 Cycle을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. AAFC/OPC-콘크리트의 산 저항성

Fig. 1과 2는 35 MPa의 압축강도를 발현하는 AAFC-콘크리트와 OPC-콘크리트를 각각 5% H₂SO₄, 5% HCl, 20% H₂SO₄, 20% HCl 용액에 7, 28, 56, 그리고 90일간 침지한 후 콘크리트의 압축강도 변화를 나타낸 것이다. AAFC-콘크리트는 5%의 H₂SO₄ 용액에서 재령 0일 대비 재령 90일에서 압축강도가 15.4% 감소하였으며, 20%의 H₂SO₄ 용액에서는 압축강도가 36.1% 감소하였다. 그리고 5% HCl 용액에서는 재령 0일 대비 재령 90일에서 압축강도가 18.3% 감소하였으며, 20%의 HCl 용액에서는 압축강도가 25.8% 감소한 것으로 나타났다. OPC-콘크리트의 경우는 5%의 H₂SO₄ 용액에서 재령 0일 대비 81.7%, 20%의 H₂SO₄에서 93.8%의 높은 압축강도 감소율을 나타냈으며, 또한 5%의 HCl 용액에서는 재령 0일 대비 재령 90일에서 84.3%, 20%의 HCl 용액에서는 91.7%의 압축강도 감소율을 나타냈다.

실험결과 AAFC-콘크리트는 OPC-콘크리트에 비해 산에 대한 저항성이 우수하다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 AAFC-콘크리트의 경우 포틀랜드시멘트(CaO 함량 60% 이상) 대신 상대적으로 CaO 함량이 적은(CaO 함량 2.98%) 알칼리활성 플라이 애쉬 시멘트를 사용함으로써 시멘트 내부에서 원래의 형태를 붕괴시키거나 용출시키는 시멘트 수화물 즉 Ca(OH)₂의 형성이 포틀랜드시멘트에 비해 매우 적어 부식성이 매우 작기 때문으로 판단된다.⁴⁾ 또한 석회질은 낮은 pH에서 산의 공격에 대한 저항성이 없기 때문에 CaO 함량이 높은 포틀랜드시멘트는 산에 취약한 반면, 본 연구에서 사용한 플라이 애쉬는 상대적으로 CaO 함량이 적기 때문에 이를 이용하여 제조한 AAFC-콘크리트의 경우 산에 대한 저항성이 극적으로 개선되었음을 보여주고 있다.

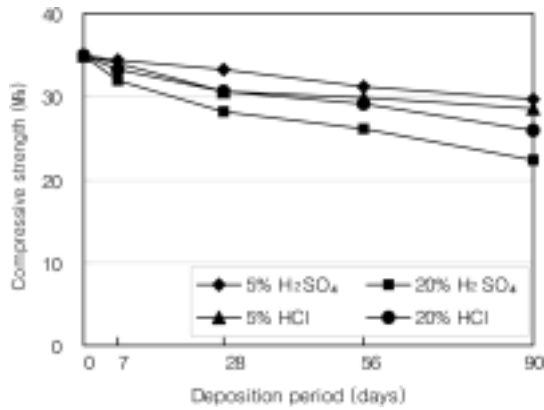


Fig. 1. Compressive strength loss from acid immersion on AAFC-concrete.

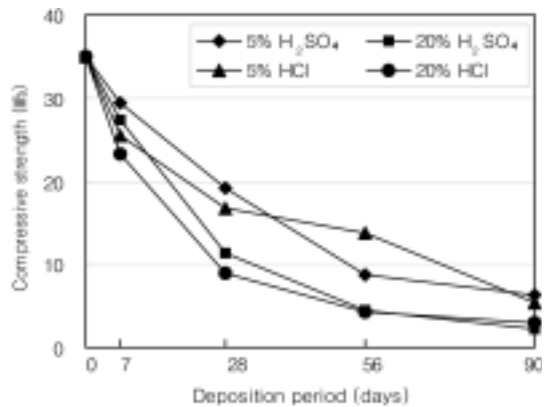
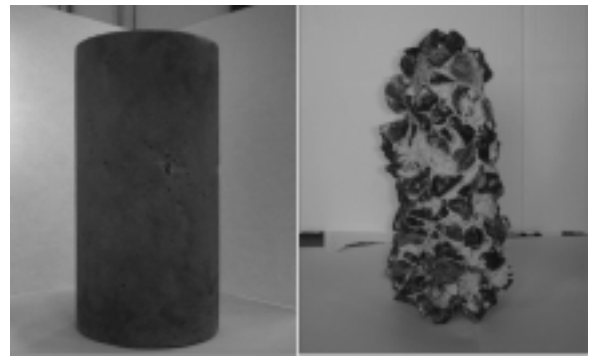


Fig. 2. Compressive strength loss from acid immersion on OPC-concrete.



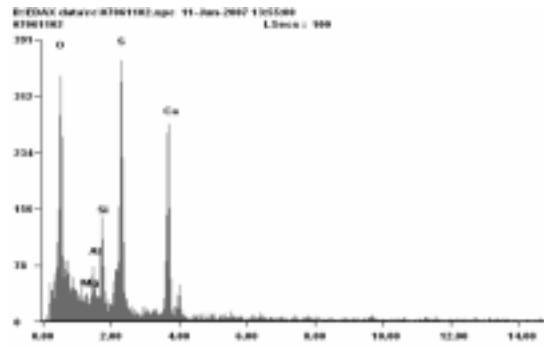
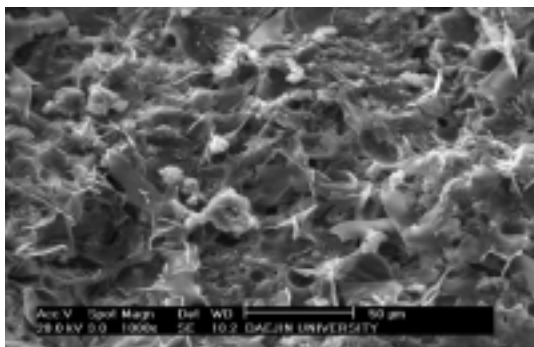
(a) AAFC-Concrete (b) OPC-Concrete

Fig. 3. Picture of AAFC-concrete and OPC-concrete immersed for 90 days on 20% H₂SO₄.

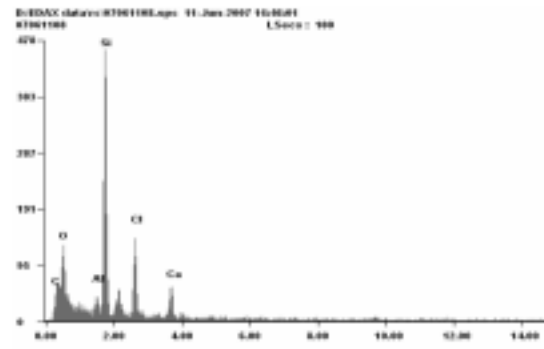
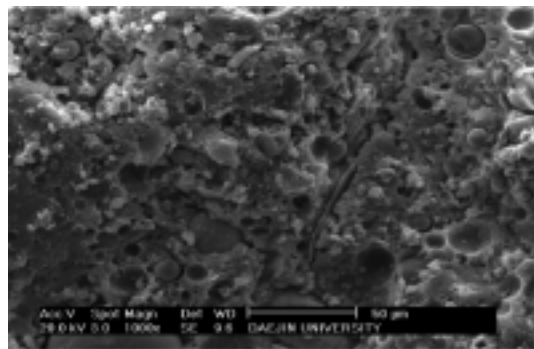
Fig. 3은 20% H₂SO₄ 용액에 90일 동안 침지한 후 부식 정도를 보여주고 있다. OPC-콘크리트는 산에 의해 심각한 피해를 나타내고 있는 반면, AAFC-콘크리트는 침지시간 90일 후에도 어떤 파괴의 징후도 보이지 않을 정도로 이들 산에 대해 강한 저항성을 나타냈다. 따라서 AAFC-콘크리트는 하수관이나 부패조와 같이 화학적 저항성을 갖추어야 하는 곳에 사용될 경우 매우 효과적인 것이다.

3.2. 산침식을 받은 콘크리트의 미세구조 분석

20% H₂SO₄과 20% HCl 용액에 90일간 침지된 AAFC-콘크리트와 OPC-콘크리트의 산 침식에 의한 손상 정도를 알아보기 위하여 전자주사현미경(SEM)과 EDAX분석을 실시하여 미세 구조 변화를 관찰하였으며, Fig. 4와 5는 그



(a) H₂SO₄ 20%



(b) HCl 20%

Fig. 4. SEM and EDAX analysis of AAFC-concrete immersed for 90 days on 20% H₂SO₄ and HCl.

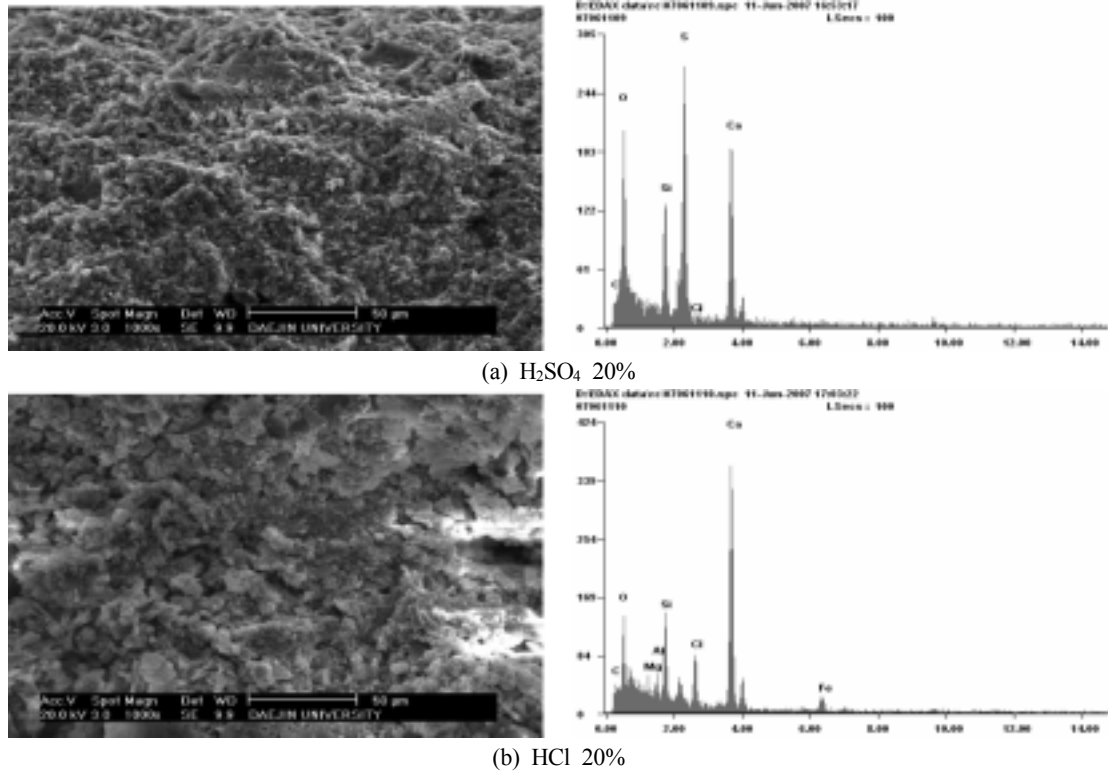


Fig. 5. SEM and EDAX analysis of OPC-concrete immersed for 90 days on 20% H₂SO₄ and HCl.

결과를 보여주고 있다.

Fig. 4에서 플라이 애쉬를 알칼리 활성화하여 제조한 AAFC-콘크리트(35 MPa)는 20% H₂SO₄과 HCl 용액에 90일간 침지 시킨 후에도 여전히 밀실한 구조를 나타내고 있는 것을 보여주고 있다. 이러한 결과는 알칼리 활성 플라이 애쉬 시멘트를 사용하여 제조한 AAFC-콘크리트의 경우 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 OPC-콘크리트와 달리 산에 취약한 수화물, 즉 Ca(OH)₂를 생산하지 않고, 결정화 정도가 낮은 제올라이트 겔 화합물과 같은 무정형의 알칼리성 알루미늄규산염이 형성되었기 때문에 판단된다. 그리고 이들 물질은 물유리와 함께 골재를 강하게 결합하고 응축하여 치밀한 조직 구조를 가진 연속적인 모체를 형성하여 강도를 증진시키게 됨으로서 AAFC-콘크리트는 산에 의한 침식의 영향 정도도 미미한 것으로 나타났다. AAFC-콘크리트 표면의 EDAX 분석 결과 플라이 애쉬에 함유된 Si와 Al이 나타나는 것을 알 수 있었으며, 알칼리 활성화제로 사용된 물유리와 NaOH성분의 원소도 나타났다. 또한, H₂SO₄와 HCl에 침지시킨 결과 Cl과 S가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 5는 20% H₂SO₄와 HCl 용액에 90일간 침지 시킨 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 OPC-콘크리트의 SEM 및 EDAX분석 결과이다. SEM 결과 표면이 많이 녹아내려 밀실하지 못한 구조를 나타내는 것을 확인 할 수 있었으며, EDAX결과 Ca, S, Si성분이 나타나는 것으로 보아 도오마사이트가 생성되었음을 알 수 있었다. 또한 산에 침지된 보통포틀랜드 시멘트의 경우 많이 연화되고 수산화칼

슘 등이 녹아내려 콘크리트의 강도가 급격히 저하되었음을 확인 할 수 있었다.

Fig. 6~9는 AAFC-콘크리트와 OPC-콘크리트를 각각 20% H₂SO₄과 HCl 용액에 90일 동안 침지 후, 반응 생성물을 확인하기 위하여 XRD 분석을 실시한 결과이다. Fig. 6은 20% H₂SO₄에 90일 동안 침지한 OPC-콘크리트의 XRD 분석결과로서 EDAX의 분석 결과에서 볼 수 있었던 것과 같이 OPC-콘크리트는 황산으로부터 침식을 받아 콘크리트를 열화시키는 도오마사이트와 에트린자이트, 석고와 같은 물질이 나타나 표면과 내부가 열화 되었음을 알 수 있

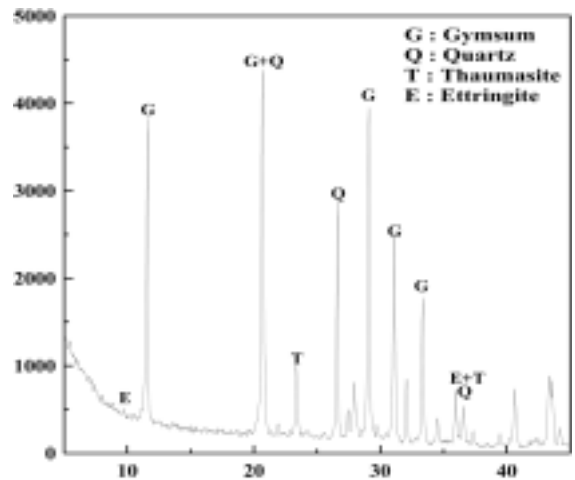


Fig. 6. XRD analysis of OPC-concrete immersed for 90 days on 20% H₂SO₄.

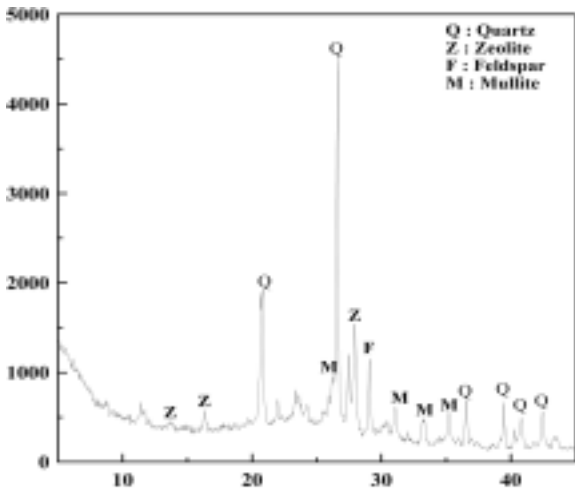


Fig. 7. XRD analysis of AAFC-concrete immersed for 90 days on 20% H₂SO₄.

었다. Fig. 7은 알칼리활성 플라이 애쉬 시멘트를 사용하여 제조한 AAFC-콘크리트를 20% H₂SO₄에 90일 동안 침지한 후, 시편의 반응생성물 분석결과를 보여주고 있는 것으로 열화물질인 도오마사이트와 에트린자이트, 석고와 같은 물질은 나타나지 않고 제올라이트, 장석, 멀라이트 등이 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. OPC-콘크리트의 경우 콘크리트의 특성상 내부의 C-S-H겔이 황산이온과 반응하여 팽창 또는 연화되어 콘크리트의 성능을 열화 시키지만 플라이 애쉬 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우는 이러한 화학반응을 일으키는 물질이 없어 산으로 부터 영향을 많이 받지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 8과 9는 OPC-콘크리트와 AAFC-콘크리트를 각각 20% HCl 용액에 침지한 시험체의 XRD 분석결과를 보여주고 있는 것으로, 화학적 반응에 의한 열화 보다는 표면의 연화로 인하여 시멘트중의 반응 생성물이 녹아 없어지는 현상들이 주로 열화 원인으로 나타나게 된 것으로 판단된다. 따라서 OPC-콘크리트의 경우 황산염에 의한 열

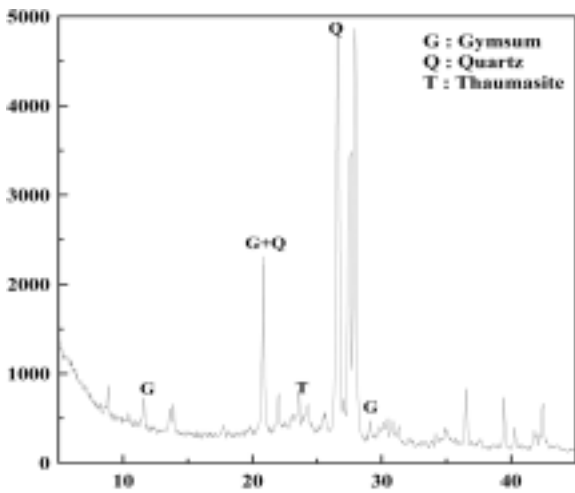


Fig. 8. XRD analysis of OPC-concrete immersed for 90 days on 20% HCl.

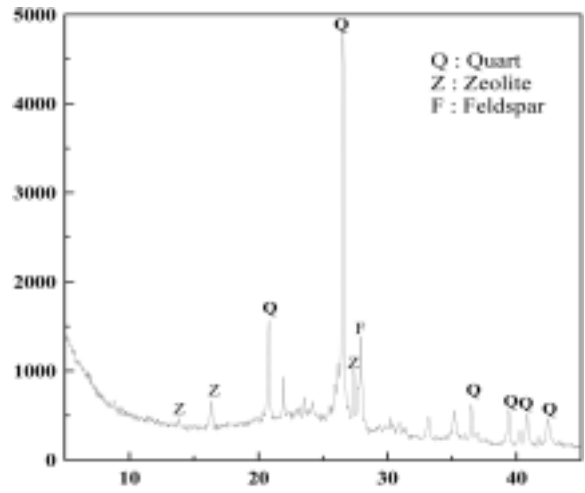


Fig. 9. XRD analysis of AAFC-concrete immersed for 90 days on 20% HCl.

화와 같이 반응생성물의 팽창과 같은 화학적 반응이 아닌 반응생성물의 연화로 인하여 골재의 피크 값이 상대적으로 다른 반응 생성물에 비해 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. AAFC-콘크리트의 경우도 산에 의한 표면의 열화로 인하여 골재의 피크 값이 상대적으로 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 염산의 경우는 OPC/AAFC-콘크리트 모두 XRD분석결과 비슷한 피크 값을 보인 것은 화학적인 반응에 의한 열화 보다는 표면의 연화에 의한 열화가 두드러지게 나타났기 때문으로 판단된다.

3.3. AAFC/OPC-콘크리트의 탄산화 저항성

콘크리트의 탄산화는 탄산화 자체만으로는 많은 콘크리트의 손상을 가져오지 않는다. 그러나 콘크리트는 pH 13.5의 강알칼리성분으로 철근의 부식을 방지하는 부동태 피막을 형성하고 있는데 이러한 부동태피막은 pH가 11이하로 떨어질 경우에 피막이 손상되어 철근의 부식을 동반하여 구조물의 치명적인 손상을 일으키게 된다. 따라서 콘크리트의 탄산화는 콘크리트의 수명을 결정하는데 중요하다 하겠다.

Fig. 10은 AAFC-콘크리트와 OPC-콘크리트의 탄산화 촉진실험을 실시한 결과이다. Fig. 10에서 보는 것과 같이 AAFC-콘크리트와 OPC-콘크리트 모두 재령의 증가에 따라 침투 깊이가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 AAFC-콘크리트의 경우는 양생 온도에 따라 서로 상이한 결과를 나타내는 것을 보였다. 12℃에서 양생한 AAFC-콘크리트의 경우는 촉진 시험 7일에서 이미 20 mm를 상회하는 탄산화 깊이를 나타냈고 50℃에서 양생한 AAFC-콘크리트의 경우는 14일까지는 10 mm 정도의 값을 나타냈으나, 21일 이후에 급속히 증가하는 것을 보였다. 그러나 85℃에서 양생한 AAFC-콘크리트(35 MPa)와 OPC-콘크리트(35 MPa)의 탄산화는 28일에서 약 10 mm 정도로 탄산화 침투 깊이가 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 이는 85℃로 양생한 AAFC-콘크리트의 경우 플라이 애쉬의 알칼리

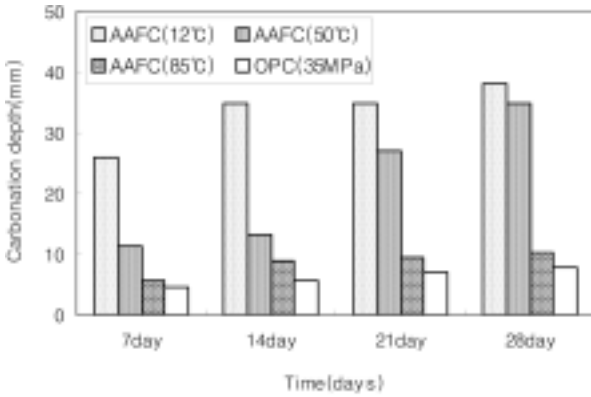


Fig. 10. Result of accelerated carbonation test on AAFC-concrete and OPC-concrete.

활성반응이 촉진되어 알루미늄 규산염 겔의 생성을 촉진하고,^{14,15)} 이들 겔 형태의 알루미늄 규산염은 알칼리 활성화 용액에 함유된 용해성 실리케이트 성분과 함께 AAFC-콘크리트 내부에 치밀한 조직구조를 형성하여¹⁶⁾ 이산화탄소의 침투를 지연시키기 때문에 판단된다. 그러나 12°C와 50°C에서 양생한 AAFC-콘크리트(각각 6 MPa와 16 MPa)의 경우 플라이 애쉬의 알칼리 활성 반응이 촉진되지 않아 콘크리트 내부의 공극이 밀실하게 되지 못하고, 그로 인해 제조한 콘크리트가 낮은 압축강도를 나타냄과 동시에 이산화탄소의 침투에 대한 저항성을 키우지 못한 것으로 판단된다.

3.4. AAFC/OPC-콘크리트의 염분침투 확산에 대한 저항성

콘크리트속의 염분 침투는 콘크리트만을 손상시키는 것이 아니라 콘크리트 내부에 있는 철근을 부식 시키게 되므로 구조물에 치명적인 손상을 입히게 된다. Fig. 11은 AAFC-콘크리트와 OPC-콘크리트의 염분침투 시험 결과를 보여주고 있는 것으로, 양생 온도가 비교적 낮은 12°C에서 양생한 AAFC-콘크리트는 ASTM C 1202의 판단 기준에 따라 2,000~4,000 coulomb로 보통으로 나타났다. 그러나 양생온도가 50°C와 85°C로 상대적으로 높은 온도에서 양

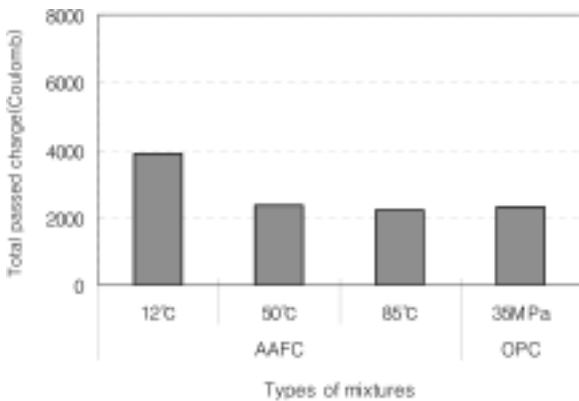


Fig. 11. Total passed charge and chloride ions diffusion coefficient of AAFC-concrete and OPC-concrete.

생하여 제조된 AAFC-콘크리트의 경우는 염분 침투가 억제되었는데, 이러한 결과는 플라이 애쉬에 함유된 Al₂O₃, Fe₂O₃ 그리고 SiO₂와 같은 산성 화합물의 알칼리 활성반응이 촉진되어 반응 생성물과 용해성 실리카 겔이 콘크리트 내부 공극을 밀실하게 하여 외부로부터 염분 침투가 억제 된 것으로 판단된다. 50°C와 85°C에서 양생하여 제조한 AAFC-콘크리트는 35 MPa의 강도를 가진 OPC-콘크리트의 확산 시험결과와 같이 총통과 전하량이 약 2,000 coulomb 정도로 낮게 나타났다.

3.5. AAFC/OPC-콘크리트의 동결·융해 저항성

콘크리트는 내부에 수분을 가지고 있어 동결시 수분의 팽창으로 인하여 발생하는 체적 변화에서 나타나는 팽창압으로 콘크리트의 내부에 균열이 발생하고 이로 인하여 수분의 침투가 많아지고 반복적으로 진행될 경우 콘크리트 표면에 탈락되어 구조물에 치명적인 손상을 주게 된다.

Fig. 12는 AAFC-콘크리트와 OPC-콘크리트의 동결·융해 저항성 시험을 실시한 결과이다. Fig. 12에서 나타난 것과 같이 AAFC-콘크리트의 경우는 양생 온도에 따라서 많은 차이를 나타내었다. 12°C에서 양생한 AAFC-콘크리트의 경우는 초기에서부터 많은 감소를 보여 240 cycle이 되는 시점에서 상대동탄성계수 값이 60% 이하로 떨어져 실험을 종료할 정도로 동결·융해에 대한 저항성이 낮게 측정 되었다. 그러나 85°C에서 양생한 AAFC-콘크리트(35 MPa)의 경우는 공기량을 4.5±1.5%를 확보한 35 MPa의 OPC-콘크리트와 같이 상대동탄성계수 90%의 좋은 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 85°C에서 양생한 AAFC-콘크리트의 경우 플라이 애쉬의 알칼리 활성반응이 촉진되어 알루미늄 규산염 겔의 생성을 촉진하고,^{14,15)} 이들 겔 형태의 알루미늄 규산염은 알칼리 활성화 용액에 함유된 용해성 실리케이트 성분과 함께 콘크리트 내부의 치밀한 조직구조를 형성하여 콘크리트 내부의 경화도가 높아 졌기 때문으로 판단된다.¹⁶⁾

한편 50°C에서 양생하여 제조한 AAFC-콘크리트는 300 cycle까지 시험을 완료 하였지만 85°C에서 양생한 AAFC-

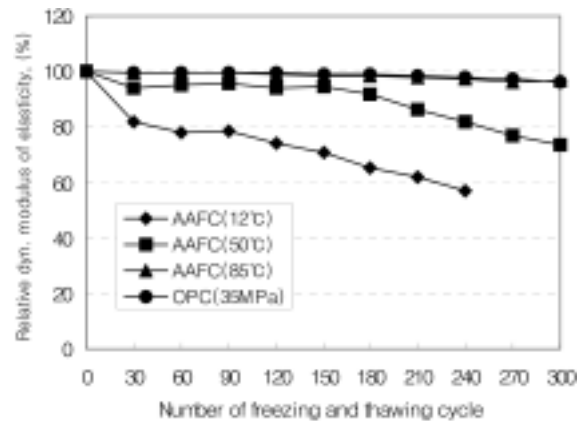


Fig. 12. Relative dynamic modulus of AAFC-concrete and OPC-concrete on elasticity to freezing and thawing.

콘크리트에 비해 15% 정도 떨어지는 성능을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 12°C에서 양생한 콘크리트보다는 알칼리 활성화반응이 촉진되어 강도가 증가한 반면, 85°C에서 양생한 콘크리트보다는 압축강도가 낮게 나타난 결과와도 잘 일치하고 있다.

4. 결론

플라이 애쉬의 알칼리 활성화반응을 이용하여 제조한 AAFC-콘크리트와 보통포틀랜드 시멘트로 제조한 OPC-콘크리트의 내구성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) AAFC-콘크리트는 OPC-콘크리트와 비교하여 황산과 염산과 같은 화학적 공격에 대해 월등히 우수한 저항성을 나타냈다. 이들 산 침식을 받은 시험체에 대한 미세구조 분석결과 AAFC-콘크리트는 황산과 염산 용액에 대해 열화되지 않았지만, OPC-콘크리트의 경우 반응생성물인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 과 C-S-H겔이 산 용액과 반응하여 팽창 또는 분해되어 콘크리트의 성능 손상이 일어난 것으로 나타났다.

2) 탄산화에 대한 저항성을 평가하기 위하여 촉진 시험을 실시한 결과 85°C에서 양생하여 제조한 AAFC-콘크리트의 경우 OPC-콘크리트와 비슷한 탄산화 저항성을 나타냈다. 또한 철근부식에 대한 영향과 염해에 대한 피해정도를 평가하기 위한 염분 침투 실험에서도 85°C에서 제조한 AAFC-콘크리트와 OPC-콘크리트는 2,000 coulomb 정도의 낮은 총통과전하량을 나타냈다.

3) 겨울철 동결·융해 작용에 대한 저항성 평가 결과 85°C에서 24시간 양생하여 제조한 AAFC-콘크리트의 경우는 공기량을 $4.5 \pm 1.5\%$ 를 확보한 35 MPa의 OPC-콘크리트와 같이 상대동탄성계수 90%의 좋은 결과를 나타내고 있어, 동결·융해에 대한 저항성도 우수한 것으로 나타났다.

4) 이상의 결과를 종합해 보면, 플라이 애쉬의 알칼리 활성화반응을 이용하여 제조한 AAFC-콘크리트는 OPC-콘크리트와 비교하여 산 저항성이 월등히 뛰어나고 탄산화에 대한 저항성 및 염분침투 확산에 대한 저항성 그리고 동결·융해 저항성이 OPC-콘크리트와 비슷한 내구성을 가지고 있음을 확인하였다. 따라서 AAFC-콘크리트는 프리캐스트 방식의 콘크리트 구조물에 적용이 가능하며, 특히 하수관이나 부패조와 같이 산 저항성이 요구되는 곳에 사용될 경우 매우 효과적일 것이다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(No. R01-2004-000-10480-0)지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국전력공사, "1999년 석탄회 발생 및 재활용실적 보고서,"(2000).

- Cochrane, J. W. and Boyd, T. J., "Benification of Fly Ash by Carbon Burnout," in *Proc. 10th Ash Use Symp.*, Jan. (1993).
- 백민수, 정상진, "플라이 애쉬를 다량 치환한 콘크리트의 초기특성에 관한 실험적 연구," 대한건축학회논문집 구조계, **18**(11), 91~97(2002).
- Hossein, R. and William, B., "Alkali Ash Material: A Novel Fly Ash-Based Cement," *Environ. Sci. Technol.*, **37**(15), 3454~3457(2003).
- Arjunan, P., Silsbee, M. R., and Roy, D. M., "Chemical Activation of Low Calcium Fly Ash: Part I: identification of the Most Appropriate Activators and Their Dosage," *Proceedings of the Intl. Ash Utilization Symposium, Kentucky*(2001).
- Puertas, F. and Fernández-Jiménez, A., "Mineralogical and Microstructural Characterisation of Alkali-activated Fly Ash/Slag Pastes," *Cem. Concr. Res.*, **25**, 287~292(2003).
- Williams, P. J., Biernacki, J. J., Walker, L. R., Meyer, H. M., Rawn, C. J., and Bai, J., "Microanalysis of Alkali-activated Fly Ash-CH Pastes," *Cem. Concr. Res.*, **32**, 963~972(2002).
- 박상숙, 강화영, 한상호, 임요섭, 김동국, "알칼리-활성 플라이 애쉬 페이스트의 압축강도에 대한 배합조건 및 물유리 모듈의 영향," 한국폐기물학회지, **23**(7), 591~599(2006).
- 한상호, 박상숙, 강화영, "플라이 애쉬를 활용한 알칼리 활성화시멘트 콘크리트의 압축강도와 최적혼합비," 한국구조물진단학회지, **11**(4), 152~158(2007).
- Synder, R., Esfandi, E., Surapaneni, S., "Control concrete sewer corrosion via the crown spray process," *Water Environ Res.*, **68**, 338~347(1996).
- Mehta, P. K., "Studies on chemical resistance of low water/cement ratio concrete," *Cem. Concr. Res.*, **15**, 969~978(1985).
- Roy, D.M., Arjunan, P., Silsbee, M.R., "Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete," *Cem. Concr. Res.*, **31**, 1809~1813(2001).
- Vesa Penttala and Fahim Al-Neshawy, "Stress and strain stste of concrete during freezing and thawing cycles," *Cem. Concr. Res.*, **32**, 1407~1420(2002).
- Li, D., Chen, Y., Shen, J., Su, J. and Wu, X., "The influence of alkalinity on activation and microstructure of fly ash," *Cem. Concr. Res.*, **30**, 881~886(2000).
- Palomo, A., Alonso, S., Fernández-Jiménez, A., Sobrados, I., sanz, J., "Alkaline activation of fly ashes. A 29Si NMR study of the reaction products," *J. Am. Ceram. Soc.*, **87**(6), 1141~1145(2004).
- Zhaohui Xie and Yunping Xi, "Hardening mechanism of an alkaline-activated class F fly ash," *Cem. Concr. Res.*, **31**, 1245~1249(2001).