



## POFA 콘크리트의 재료특성 및 부식 저항성 평가로의 적용

이창홍<sup>1)\*</sup> · 송하원<sup>1)</sup> · 안기용<sup>1)</sup> · 모하마드 압델 이스마엘<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 사회환경시스템공학부 <sup>2)</sup>말레이시아기술공과대학 토목공학과

## Material Characteristic of POFA Concrete and Its Application to Corrosion Resistance Evaluation

Chang-Hong Lee,<sup>1)\*</sup> Ha-Won Song,<sup>1)</sup> Ki-Yong Ann,<sup>1)</sup> and Mohamed Abdel, Ismail<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Johor 81310, Malaysia

**ABSTRACT** In this study, corrosion resistance of palm oil fuel ash (POFA) concrete as a blended concrete is evaluated by using electrochemical technique. The POFA is an industrial byproduct obtained from fuel ash after extracting palm oil from palm-tree. In order to obtain basic material characteristics of the POFA concrete, tests on compressive strength, slump, weight loss, bleeding and expansion ratio were carried out the early-aged POFA concrete. On the other hand, durability characteristics, both chloride penetration and carbonation depth test, were also conducted. Finally, corrosion resistance were evaluated by applying electro-chemical artificial crack healing technique, and the tests on the impressed voltage characteristic, galvanic current and linear polarization resistance. From the experimental results, it was found that long-term strength, bleeding, lower slump ratio, expansion ratio, chloride penetration, carbonation and corrosion resistance were improved by using the POFA due to activated pozzolanic reaction. It can be also mentioned that POFA concrete has a potential to be used as a cementitious binder for green-recycling resources.

**Keywords** : POFA concrete, strength, durability, corrosion resistance, electrochemical treatment

### 1. 서 론

시멘트 대체재로서 혼화재의 사용은 고강도, 고내구성, 고시공성으로 분류되는 고성능 콘크리트의 개발과 관련하여 밀접한 관련을 가지고 있다. 그간의 혼합 콘크리트와 관련된 연구는 산업 부산물인 실리카폼, 플라이애쉬 및 고로슬래그 등의 무기질계 포졸란 재료를 기반으로 하여 연구가 활발히 진행되어져 왔으며, 이는 이러한 포졸란계 재료 자체의 마이크로 필러효과 및 시멘트 수화물과의 포졸란 반응 등으로 인해 콘크리트내 조직을 밀실화 하고 종국적으로 콘크리트의 강도 및 내구성을 개선시키는 장점을 가져다주는 것으로 보고되고 있기 때문이다.<sup>1,2)</sup>

최근에 이르러서는 이러한 인공 포졸란계 혼화재료 외에도 천연 포졸란 재료로서 황토, 왕겨, 점토, 화산재 등의 천연 포졸란 등에 관한 연구도 활발한 실정이며, 아울러 천연 포졸란 재료의 사용이, 생산에 따른 환경문제 및 재생 에너지 절약 차원에서 지속가능한 콘크리트구조물 건설에 적극적으로 추천이 되고 있다.<sup>3)</sup>

한편, 최근에는 그린 재생 자원으로서 태국 및 말레이시아 등의 동남아시아 지역에서 막대한 양이 추출되는 palm oil fuel ash(POFA)가 건설재료로서 사용 가능성에 대한 연구가 수행된 바 있다. 하지만 이와 관련된 연구는 기본 물성 분석에 근간한 연구이거나<sup>4,6)</sup> 알칼리 잠재 반응성을 평가하기 위한 팽창률 분석에 국한된 연구로서<sup>7,8)</sup> 철근콘크리트구조물의 내구성 설계, 평가 및 유지관리 모니터링 측면에서의 연구는 전무한 실정이다.

POFA는 야자수 열매로부터 야자유를 추출하고 난 산업 정제 폐기물로서, 해당 국가의 관심 산업이 야자열매의 생산 및 야자유 추출에만 맞추어져 있었으나, 최근 들어 기존 매립지의 포화상태, 환경정화 및 산업부산물로서의 활용가능성에 관심을 가지게 되면서 그간 사장되었던 야자열매의 껍질 및 섬유로부터 기름을 정제하고 난 산업폐기물을 집진하여 이를 인공 포졸란으로서 사용하기에 이르게 되었다.<sup>9,10)</sup> 현재 말레이시아 지역 내에서만 연간 3천 1백만 톤의 야자기름 정제 폐기물이 배출되고 있는 실정이며 이 가운데 5%가 POFA로 추출되는 것으로 집계되고 있어 인근 동남아 지역 전체의 POFA 배출량을 추정하여 볼 때 이는 실로 막대한 양이라 할 수 있다. 이와 관련된 연구 및 일반 건설구조물 혹은 사회기반 구조물에의 적용성에 대한 파급 효과 등을 통해

\*Corresponding author E-mail : lch1730@yonsei.ac.kr

Received December 30, 2008, Revised June 3, 2009

Accepted June 20, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

기술 고부가가치를 창출할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구에서는 콘크리트의 적극적인 사용가능성을 분석하기 위해 크게 4가지 범주로 인자를 나누어 실험연구를 수행하였다. 첫째로 기본 물성실험으로 초기재령 압축강도, 슬럼프, 중량감소율, 블리딩, 팽창비 분석 방법을 수행하였고, 둘째로 장기재령에서의 압축강도 및 휨강도 특성 분석 방법을 수행하여 강도성능에 대해 보통포틀랜드시멘트(OPC) 콘크리트와의 성능 비교분석을 수행하였다. 세 번째로 내구특성의 분석과 관련하여 POFA 콘크리트의 염해 및 탄산화 침투 깊이 저항성 특성 방법을 분석하였으며, 마지막으로 전기화학적 치유기법에 따른 가압전류 특성 분석 실험, 매크로 셀 전류 실험 및 선형 분극저항실험 등의 부식 저항성 모니터링 평가방법을 POFA 콘크리트에 적용하였다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 사용 재료

이 연구에서는 재생 자원으로서의 POFA 콘크리트의 역학 및 내구성 특성 분석 등을 통해 포졸란계 재료로서의 POFA 콘크리트의 물리적, 내구적 특성 및 부식 저항성 분석을 위한 실험을 수행하였다.

한편, 이 연구에서 혼화재로 사용한 POFA는 말레이시아 남부 Johor 지역의 야자유 정제 발전소에서 직접 배출 및 집진된 재료로 연구를 수행하였으며, 사용 POFA 및 OPC의 화학적 구성성분은 Table 1과 같다.

또한 콘크리트 제조용으로 사용되는 시멘트는 S사 보통 포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였고, 분말도는  $3,250 \pm 300 \text{ cm}^2/\text{g}$ , 내부 염소 이온량은 0.02% 이하였다. 한편, POFA 비중 2.22, 비표면적  $519 \text{ m}^2/\text{kg}$ 인 재료를 사용하였다.

### 2.2 실험 과정

#### 2.2.1 기본 물성실험 비교

##### (1) 초기재령 압축강도

콘크리트의 배합은 Table 2의 배합비를 갖는 OPC 및 POFA 콘크리트에 한해 각 3개씩을 제작하였다. 사용된 단위 시멘트량은  $350 \text{ kg/m}^3$ , 물/시멘트비는 40%, POFA 콘크리트의 결합재의 치환율은 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 및 60%의 단계를 두어 실험을 수행하였다. 한편, 잔골재의 경우는 밀도  $2,500 \text{ kg/m}^3$ , 굵은 골재의 경우는  $2,650 \text{ kg/m}^3$ 인 최대치수 13 mm의 골재를 사용하여 타설을 수행하였다. 1일간의 기건양생을 거친 시편은 탈형하

Table 2 Concrete mix proportions

Binder	W/B (%)	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Binder (kg/m <sup>3</sup> )	Fine aggregates (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregates (kg/m <sup>3</sup> )
OPC	40	140	350	744	1,116
10%POFA	40	140	315	742	1,106
			35		
20%POFA	40	140	280	740	1,096
			70		
30%POFA	40	140	245	738	1,086
			105		
40%POFA	40	140	210	736	1,076
			140		
50%POFA	40	140	175	734	1,066
			175		
60%POFA	40	140	140	732	1,056
			210		

여 27일간 수중양생을 한 후 만능 압축시험기(UTM)를 이용하여 압축강도 실험을 수행하였다.

##### (2) 슬럼프 실험

슬럼프 실험에 있어서는 POFA 콘크리트의 결합재 치환율을 최대 강도발현이 되는 30%로 고정하여 그에 따른 물/결합재비를 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60로 변화시켰고 타설 즉시의 슬럼프 값을 OPC와 비교 분석하였다.

##### (3) 중량감소율

산침식 저항에 따른 중량감소율의 측정을 위해 해당 공시체는  $50 \times 50 \times 50(\text{mm})$ 의 정사각 몰드를 이용하여 OPC 및 30% 치환율의 POFA 콘크리트의 타설을 수행하였으며 28일간의 수중양생을 거쳐 이후 80일간 5%의 염산수용액에 침지시켜 그에 따른 중량감소율을 정밀 저울을 이용하여 모니터링하였다.

##### (4) 블리딩(bleeding) 실험

POFA 콘크리트의 블리딩 실험과 관련하여서는 직경 250 mm, 높이 285 mm의 원통형 몰드를 이용하여 콘크리트 타설 후 100분간 약 10분 간격으로 콘크리트 상부 표면에 스며나온 물을 피펫을 이용하여 메스실린더로 옮긴 후 시간 경과에 따른 누적 수분량을 측정하였다. 여기에서 OPC 및 시멘트의 30%를 치환한 POFA(이하 30POFA로 약기) 콘크리트를 비교 측정하였다.

##### (5) 길이변화 측정실험

POFA 콘크리트의 알칼리 잠재반응성을 평가하기 위한

Table 1 Chemical composition of OPC and POFA

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	LOI
OPC	64.7	20.7	4.6	1.0	3.0	3.0	0.65	0.13	2.7
POFA	8.4	43.6	11.4	4.8	4.7	2.8	3.5	0.39	18.0

모르타르 봉 실험 방법을 통해 해당 시편은 25.4 × 25.4 × 254(mm)의 직육각 몰드를 사용하였으며, 모르타르 배합비는 시멘트 1, 물 0.47의 배합으로 타설을 수행하였다. 이후 해당 몰드는 습윤실에 두어 24시간 건조되지 않도록 양생하였으며, 초기 14일 재령시의 길이변화를 시작으로 하여 60주간 팽창비를 측정하였다.

## 2.2.2 장기재령에서의 압축강도 및 휨강도

### (1) 장기재령 압축강도

사용제원은 초기재령 압축강도 공시체의 배합과 동일하며, 원형 공시체 몰드를 이용하여 타설을 수행한 후 OPC 및 30POFA 콘크리트의 경우에 한해 2년간 압축강도 측정 실험을 수행한 결과를 분석하였다.

### (2) 장기재령 휨강도

사용제원은 압축강도 공시체의 배합과 동일하며, 100 × 100 × 300(mm) 규격의 직육면체 몰드를 이용하여 타설을 수행한 후 OPC 및 30POFA 콘크리트의 경우에 한해 6개월, 1년 및 2년의 재령경과에 따른 휨강도를 만능 압축 시험기를 이용한 3점 재하하중에 따른 휨강도로서 측정된 결과를 비교 분석 하였다.

## 2.2.3 장기재령에서의 염해 및 탄산화 침투 깊이 비교

### (1) 염소이온 침투 깊이 비교

염소이온 침투 깊이측정을 위한 공시체는 압축강도용 코어공시체를 이용하여 3.0%의 염화나트륨 용액에 2년간 침지시킨 후 그라인더기를 이용한 염소이온의 콘크리트 깊이에 따른 염분량을 전위차 적정기를 이용하여 측정하였다. OPC 및 30POFA 콘크리트에 한해 비교/분석 실험을 수행하였다.<sup>18)</sup>

### (2) 탄산화 침투 깊이 비교

탄산화 침투 깊이 측정을 위한 공시체는 압축강도용 코어 공시체를 이용하여 측정하였으며 지시약으로 페놀프탈레인 용액을 사용하여 95%의 에탄올 90 ml에 페놀프탈레인 분말 1g을 녹여 물에 첨가하여 실험을 수행하였다. 측정 시편은 2년간의 기중 양생된 시편에 대해 탄산화 깊이를 시약분무에 따른 5개 지점의 변색구간의 평균치로 계산하여 측정하였다. 사용시편은 OPC 및 30POFA 콘크리트에 한해 비교/분석 실험을 수행하였다.<sup>19)</sup>

## 2.2.4 전기화학적 균열치유기법에 따른 부식 저항성 모니터링

이 연구에서는 POFA 콘크리트의 부식저항성 분석을 위해 타설 후 1일 경과된 150 × 150 × 150(mm) 규격의 시편에 대해 탈형 후 100의 건조로에서 24시간 동안 건조함으로써 콘크리트 표면의 건조수축 균열을 의도적으로 야기시켰으며 이후 전기화학적 전착기법 개념을 활용한 균열치유 복원 기술로써 OPC 및 POFA 콘크리트의 가압 전압 변화 및 전해질 용액의 공급을 통한 다원 균열치유기법의 적용에 따른 부식저항성 모니터링을 수행하였다.

한편, 콘크리트 공시체 내부에는 직경 22 mm, 길이 90 mm의 원형철근을 시편 외부에 설치된 브릿지를 이용하여 정중앙에 삽입하였고, 또한 가압전류의 통전 면적을 균일하게 확보하기 위해 콘크리트 시편의 덮개 20 mm 내부에는 철근 메쉬(80 × 150 mm)를 삽입하여 전지형성을 위해 메쉬 일부가 돌출되도록 준비하였다. 또한, 갈바닉 전류 및 선형분극저항의 측정을 위해 철근의 상부에는 납땜 용접을 통한 전선 연결을 수행하였고 균일한 통전 면적의 확보를 위해 철근 상부 및 하부의 면은 에폭시를 이용하여 도막 처리를 수행하였다.

이후에 시편은 향후 균열 관찰 면이 될 1면을 제외하고는 다른 5면을 모두 에폭시로 도포하여 향후 전해질 및 가압전류의 통전에 따른 외부이온의 침투 차단을 수행하였으며 에폭시가 경화되는 12시간동안 기중에서 양생을 하였다. 여기에서, 향후 균열 관찰면 혹은 전기화학적 치유가 될 시편의 표면은 폴리에틸렌 필름막으로서 균열부를 보호하여 기중양생을 수행하였으며 특히, 균열 관찰면의 가장자리부분에 스며든 에폭시 코팅제의 마감 처리부분에 있어서도 유의하였다.

한편, 시편은 전해질의 유입 및 전기 회로도 구성에 따른 각 시편의 고유 전기 화학반응을 유도하기 위해 300 × 400 × 150(mm)로 된 4개의 플라스틱 양생조에 각각 분리하여 양생하였다. 이때 플라스틱 양생조의 각 밑면에는 갈바닉 전류의 양극대용 메쉬인 외부 티타늄 메쉬를 각각 200 × 700(mm)의 규격으로 배치하였고, 양 측면의 150 mm를 양생조의 벽면과 평행하게 하여 콘크리트 시편과의 통전 면적을 원활히 하도록 설치하였다.

또한, 균열 성능 복원 방법으로서, 균열 치유 가속화를 위해 전기화학적 전착기법의 원리를 적용함에 따라 0.1 mol의 MgCl<sub>2</sub> 용액을 전해질로 선택하여 사용하였다. 따라서, 이 연구의 실험을 통해서는 가압 전압 특성 분석 및 갈바닉 전류 모니터링, 선형 분극 저항 비교 등의 부식 모니터링이 평가되었다.

여기서 전체 시편은 가압 전류를 10 mA/m로 실험기간 내내 고정하였다. 이를 위해 전원장치의 양 극을 10 kΩ의 저항을 이용하여 전류를 일정하게 공급하였으며, 콘크리트의 비저항 및 양생에 따른 전류 손실로 인한 지속적인 전류의 고정을 위해서 가압 전압의 양을 시간이 지남에 따라 조금씩 상향 조정하였다.

한편, 갈바닉 전류의 측정과 관련하여서는 멀티미터 측정기를 이용하여 시편 모두에 대해 시편 내부의 철근 메쉬와 시편 외부의 티타늄 메쉬와의 전류, 저항, 전압 값을 시간에 따라 지속적으로 모니터링하였다.

반면에 선형 분극 저항 측정의 경우는 부식 측정기(모델명: Gamry Echem Analyst V.5.30)를 사용하여 콘크리트 시편 내부의 원형철근의 부식 전류를 모니터링하였다. 여기서 참조 전극(reference electrode)으로는 SCE전극을 사용하였고, 대극(counter electrode)으로는 탄소막대를 이용한 3면에 전극을 설치하여 치유시편의 철근부식전위 비교를 수행하였다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 기본 물성 실험 결과 비교

Fig. 1에는 28일 재령의 OPC 및 POFA 콘크리트의 압축강도 공시체 실험 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 OPC의 압축강도는 45 MPa로 나타난 반면 POFA의 치환 혼입에 따른 콘크리트의 압축강도는 치환률이 10~30% 범위까지는 치환률 증가에 따라 증가하는 것을 알 수 있었고, 이후에는 치환률의 증가에 따라 OPC에 비해 압축강도가 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 POFA 콘크리트의 포졸란 반응과 연결지어 생각할 수 있는데, OPC의 주요 수화물인 CH(calcium hydroxide) 및 CSH(calcium silicate hydroxide)가 치환률 30%에서 최적 반응으로 이루어지고 있음을 유추할 수 있다.

한편, Fig. 2에는 물/결합재비(이하 W/B로 약기)를 변수로 한 30POFA 콘크리트의 슬럼프 값 비교 결과를 도시하였다. 그림에서와 같이 POFA 콘크리트는 OPC에 비해 전체적으로 낮은 슬럼프치를 가지고 있고 이는 동일 W/B의 POFA 콘크리트가 OPC 콘크리트와 동일한 슬럼프값을 가지지 위해서는 혼화제 첨가량이 증가되어야 하므로, 작업성 측면에서는 POFA 콘크리트가 OPC에 비해 불리한 것으로 판단된다.

Fig. 3에는 OPC 및 30POFA 콘크리트의 염산 수용액 침지에 따른 중량감소율 실험 결과를 나타내었는데, 78 일간의 실험 결과에 기인하여 중량감소율 측면에서도 OPC에 비해 작은 값을 나타내는 것을 확인하였다. 특히, 수렴성이 보이는 78일의 실험 결과에서 OPC의 경우는 24%의 중량감소율로 나타난 반면, 30POFA 콘크리트의 경우는 18%의 중량감소율을 나타내어 결합재 치환 적용에 따른 미세구조의 밀실화 및 산 침식 저항성 측면에서 우수한 결과를 나타나는 것으로 확인할 수 있었다. 이는 OPC 및 30POFA 콘크리트의 화학적 구성성분으로부터 알 수 있는데, 콘크리트의 양생에 따른 수화반응에 있어 CH 및 CSH의 형성에는 CaO가 절대적 영향

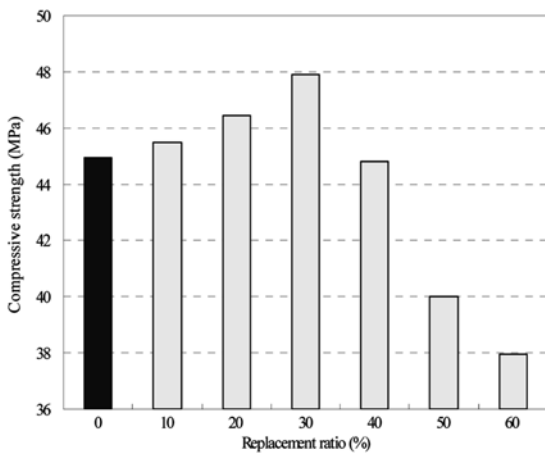


Fig. 1 Effect of replacement ratio on compressive strength of concrete

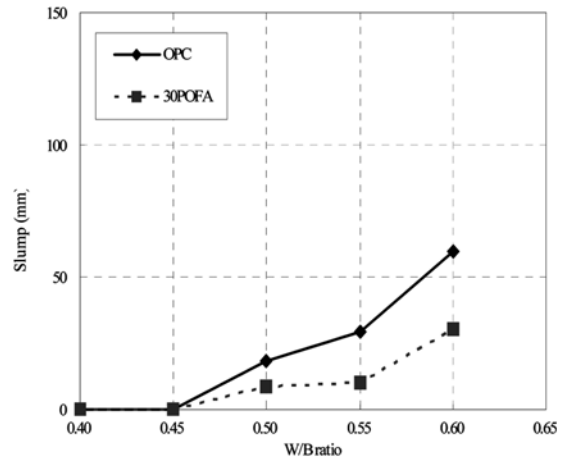


Fig. 2 Effect on slump of concrete at different W/B ratio

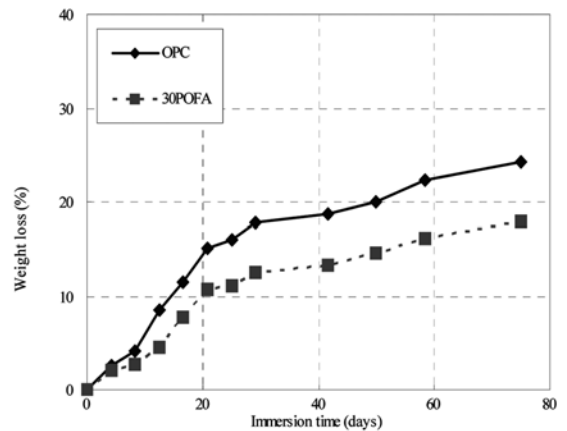


Fig. 3 Compressive weight loss of OPC and POFA concrete specimens continuously immersed in 5% hydrochloride acid solution

을 끼침은 주지의 사실이며, 한편 산침식 저항성 측면에 있어서 CaO가 상당히 취약한 성분으로 분류되므로 해당 OPC가 POFA에 비해 CaO 함량이 약 8배 이상이므로, 그에 따른 산침식 손실량도 많이 발생하여 나타나는 결과로 판단된다. 또한, 최근 결합재로 많이 사용되고 있는 플라이애쉬의 경우에는 화학적 구성성분만을 고려할 경우, 산침식측면에서는 동등한 거동이 나타날 것으로 사료되며, 슬래그의 경우보다는 훨씬 우월할 것으로 추론된다.<sup>2)</sup>

한편, Fig. 4에는 각 콘크리트 시편의 블리딩 실험 결과를 나타내었다. 해당 실험 그래프로부터 측정 경과 시간에 따른 누적 블리딩의 총량은 실험 시작과 더불어 초기 10분 이내의 범위에서 OPC가 30POFA 콘크리트에 비해 월등히 높은 블리딩량으로 나타나면서 이후 측정 최종 단계에 이르기까지 우위를 점하는 것으로 나타났다.

여기서 일종의 재료 분리현상이라 할 수 있는 콘크리트 블리딩의 경우, 블리딩 값이 커짐에 따라 콘크리트의 기능을 약화시키고 시멘트 내 매트릭스와 골재 표면 사이의 부착력을 약화시켜 강도의 불균형을 가져오므로 장기적인 내구지표라 해도 과언이 아니며, 그림에서와 같이 KS F 2414에서 권고하는 실험 결과 60 min에서의

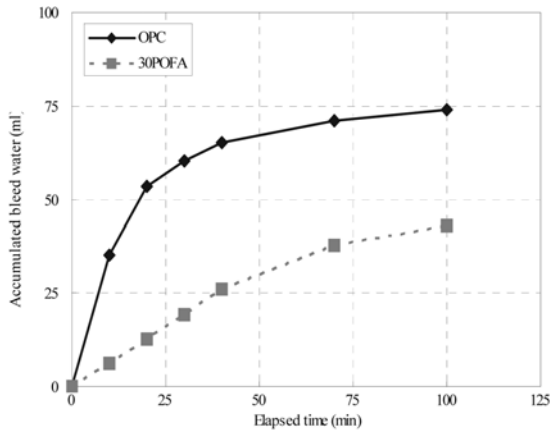


Fig. 4 Bleeding characteristics of OPC and POFA concrete

OPC 및 30POFA의 누적 블리딩 용량은 각각 73 ml 및 37 ml로 나타나 블리딩 측면에서 POFA 콘크리트가 약 두 배의 블리딩 지연 효과를 확보하고 있음을 알 수 있다.

따라서 구조안정성 측면에서의 혼합콘크리트로서의 POFA 콘크리트가 일반 OPC에 비해 소성 수축 균열 및 내부구조 변화 등의 저항성 등이 높게 나타나며, 철근콘크리트구조물로의 적용시 철근과의 부착력 강화 등의 측면에서 우수하다고 할 수 있다. 그러나, 블리딩의 영향은 사용 잔골재량, 단위수량 및 온도 등에도 민감히 반응하므로 이와 관련해서는 더욱 추가 보완적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 5에는 산성용액으로의 침지에 따른 시편 길이 팽창 실험 결과를 도시하였다. 그림에서와 같이 OPC 및 30POFA 모두 10,000 micro strain 이하의 값으로 나타나 알칼리 잠재 반응성이 없음으로 판명되지만, 30POFA의 경우는 시간 경과에도 불구하고, 팽창비가 거의 0에 가까운 거동을 보이고 있어서 주목할 만한 결과를 보였다. 이는 Table 1의 화학적 구성 성분으로부터 POFA의 실리카 성분이 OPC에 비해 두 배 이상으로 구성되어 활발한 포졸란 반응을 보일 것으로 판단이 가능하며, 그로 인한 블리딩의 감소, 수화열 감소, 수밀성 향상 등의 성

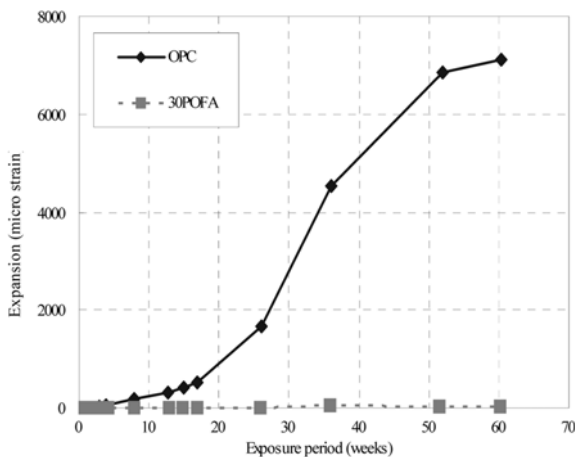


Fig. 5 Expansion of mortar bars due to exposure in sodium sulfate solution

능도 보일 것으로 예측되어진다.

### 3.2 장기재령에의 압축강도 및 휨강도 비교

Fig. 6에는 1년의 양생 기간에 따른 OPC 및 30POFA 콘크리트의 압축강도 비교 실험 결과를 도시하였다. 그림으로부터 사용 POFA 콘크리트의 경우는 전형적인 잠재수경성 반응이 동반되면서 재령 14일 이전에는 OPC에 비해 조기강도 측면에서는 못 미치는 성능을 보이고 있으나 이후 시간 경과에 따른 장기강도측면에서 OPC에 비해 우위를 점하는 것을 확인하였다.

한편, Table 3에는 100 × 100 × 300(mm) 시편의 3점 재하에 따른 휨강도 실험 결과를 정리하였다. 표에서와 같이 휨강도 역시 OPC에 비해 성능이 우위에 있으나 각 결합재별 재령증가의 경우를 보면 초기값과 장기값이 OPC와 POFA 콘크리트 모두 큰 변동이 없어서 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.

### 3.3 장기재령에의 염해 및 탄산화 침투 깊이 비교

Fig. 7에는 초기재령에서의 3.0%의 염화나트륨 수용액에 침지시킨 OPC 및 30POFA 콘크리트의 염소이온 침투 깊이 결과를 비교하였다. 그림에서도 확연히 알 수 있듯이 염소이온 침투 저항성 측면에서도 OPC에 비해 30POFA 콘크리트의 경우가 침투깊이가 적게 나타나는 것으로 확인되어 내부 공극의 밀실화에 따른 충전효과로

Table 3 Comparison of both compressive strength and flexural strength in long-term age

Tests	Exposure period	Types of concrete	
		OPC	POFA
Compressive strength (MPa)	6 month	61.89	64.91
	1 year	61.94	65.13
	2 year	62.37	67.83
Flexural strength (MPa)	6 month	6.85	7.70
	1 year	6.95	7.00
	2 year	6.90	7.50

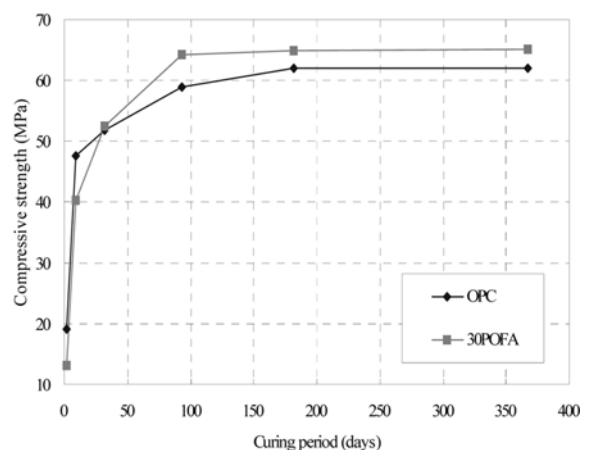


Fig. 6 Strength development of OPC and POFA concrete

인해 염소이온 침투 저항성 측면에서도 우수함을 알 수 있다. 한편, Table 4에는 말레이시아 UTM에서 제공한 데이터를 재분석한 2년간의 장기 침지에 따른 염소이온 침투깊이 및 탄산화 깊이 측정 실험 결과를 제시하였다. 분석 결과 장기 재령의 측면에서도 염소이온 침투저항성은 30POFA 콘크리트가 OPC에 비해 우위에 있음을 확인하였다. 한편 탄산화 침투의 경우에는 30POFA 콘크리트가 OPC에 비해 활발한 포졸란 반응에 따른 수화로 인해 수산화칼슘의 다량소비를 통한 알칼리도의 저하를 야기시켜 탄산화 속도 측면에서는 OPC에 비해 탄산화가 빠를 것으로 추측되었으나, 수산화칼슘의 소비효과보다는 결합재의 치환적용에 따른 콘크리트내 매트릭스에서의 충전성 및 공극구조 개선효과에 따른 탄산화속도계수 저감효과가 더욱 우위효과를 발휘하여 탄산화를 저감시키고 있음을 알 수 있었다. 이는 POFA 콘크리트의 경우, 초기 6개월 이전에는 탄산화 저항 속도가 OPC에 비해서는 떨어지나 2년 후의 장기재령 측면에서는 OPC에 비해 상향효과를 나타내는 것으로 보아 충분한 양생 및 공극구조개선에 따라 이산화탄소의 유입을 저감하는 효과를 가져다 준 것으로 판단된다.

### 3.4 전기화학적 균열치유기법에 따른 부식 저항성 모니터링

Fig. 8에는 이 연구에서 적용된 전기화학적 균열치유 기법에 따른 가압전류 모니터링 결과를 도시하였다. 그

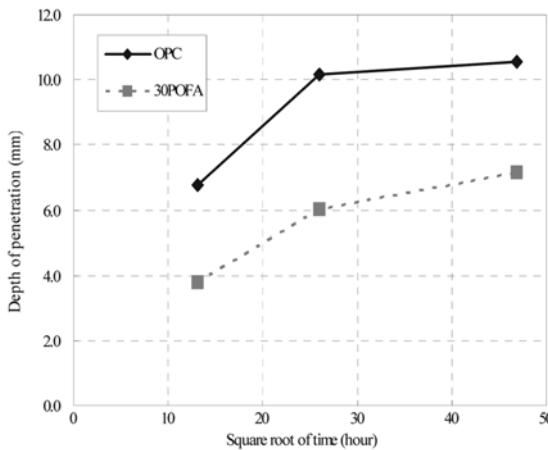


Fig. 7 Effect of POFA concrete on chloride penetration in concrete

Table 4 Comparison of both chloride penetration depth and carbonation depth in long-term age

Tests	Exposure period	Types of concrete	
		OPC	30POFA
Chloride penetration (mm)	6 month	21.0	13.5
	1 year	23.5	17.0
	2 year	28.0	20.5
Carbonation (mm)	6 month	0.0	0.5
	1 year	1.5	1.5
	2 year	2.0	1.5

림에서와 같이 OPC의 경우는 초기 가압전류 1.1 V의 범위로 통전 면적을 확보하여 출발하였고, 30POFA 콘크리트의 경우는 0.6 V의 초기 값으로 통전면적을 확보하여 전류가 공급되었다. 여기서 이 실험의 경우 0.1 mA/m의 고정 가압 전류 값을 10 kΩ의 저항을 이용하여 제공하였으므로, 도출된 결과는 해당 콘크리트의 전기적 비저항성에 따른 저항효과로 대변된다. 따라서, OPC의 경우가 통전 면적에 따른 전류의 부식 저항성 측면에서 30POFA 콘크리트의 경우보다 콘크리트의 전기 비저항성을 더욱 확보하고 있음을 알 수 있고, 이는 POFA 콘크리트가 결국, 부식저항성 측면에서 초기의 불안정한 상태에서 전지를 형성하고 있는 콘크리트에 시간 경과에 따른 통전이 행해지면서 안정화 되었고, 그 결과 동일 부피를 가지는 공시체에서 결합재 치환에 따른 재료적 특성과 전해질의 공급을 통한 전기 저항 용량의 증가하면서 부식 저항성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

한편, Fig. 9에는 콘크리트 내부의 철근과 부식회로의 외부에 설치된 티타늄 메쉬 사이의 갈바닉 전류의 비교 결과를 도시하였다. 일반적으로 부식개시의 측면에서 갈바닉 전류의 예측 정확도는 기존의 선형 분극법, 반전지 전위법, EIS 및 AC 임피던스법에 비해 높은 정확도를 가지고 있다고 할 수 있다.<sup>20)</sup> 따라서 그림에서와 같이 갈바닉 전류의 비교에 있어서 OPC와 30POFA 콘크리트의 경우 두 시편 모두  $\mu A$ 범위내에 있으므로 부식개시가 이루어진 것은 아니나, 전류의 안정성 측면에 있어서 30POFA 콘크리트의 경우가 월등한 부식 저항성을 가지고 있어 공식 등의 국부부식에 대해서도 부식개시 지연성 측면에서 향상 효과를 가져다 줄 것으로 판단된다.

한편, Fig. 10에는 OPC 및 30POFA 콘크리트의 선형 분극저항 측정에 따른 전류 vs. 전압의 비교 결과를 도시하였다. 그림에서도 확연히 보이는 바와 같이 POFA 콘크리트의 부식저항성은 OPC에 비해 절대 전류값의 범위가 안전측으로 나타나 우월한 것으로 나타났다. 여기서, 전압/전류의 비로 나타내어져 접선의 활선 교차점

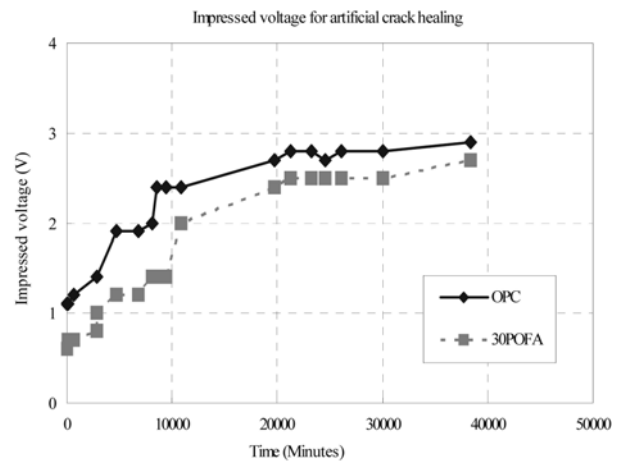


Fig. 8 Comparison of impressed voltage for artificial crack healing

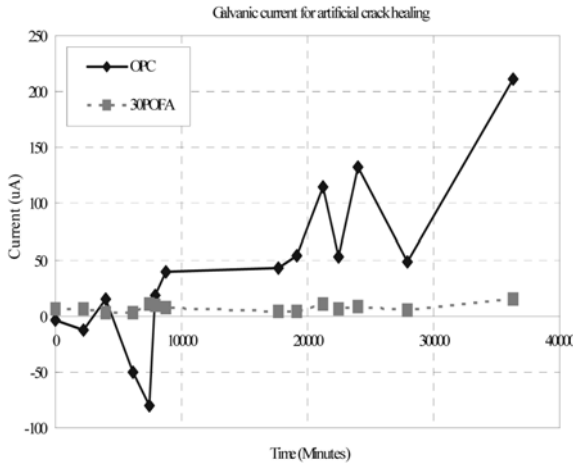


Fig. 9 Comparison of galvanic current for artificial crack healing

로 계산되어지는 분극저항 값의 비교에 있어서도 POFA 콘크리트가 우수한 부식저항성을 확보하여 향후 유지관리 및 철근부식 개시 지연효과로서 안정성을 가지고 있음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

이 연구는 POFA 콘크리트의 기본 물성 및 부식저항성 분석을 위한 연구로서 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) POFA 콘크리트의 기본 물성 실험 결과로부터, 초기 재령 압축강도 특성의 경우 최적 치환율은 30% 범위에서 결정되고 있음을 알 수 있었으며, POFA 콘

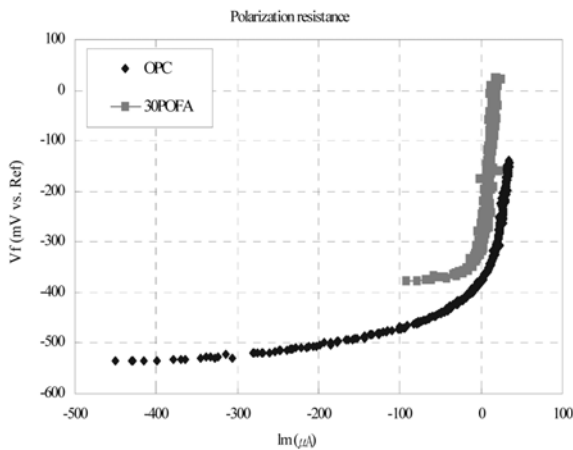


Fig. 10 Comparison of linear polarization resistance for artificial crack healing

Table 5 Polarization parameter and results for steel in OPC and 30POFA concrete

Binder	OCP (-mV) vs. SCE	Polarization resistance( $R_p$ ) (ohms/cm <sup>2</sup> )	Corrosion current ( $I_{corr}$ ) (µA/cm <sup>2</sup> )
OPC	-356.2	58.9	0.4944
30POFA	-170.5	244.4	0.0737

크리트는 불리딩 및 알칼리 잠재 반응성 측면에서도 OPC에 비해 우수한 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 한편, 동일 W/B의 경우, POFA 콘크리트의 슬럼프는 OPC 콘크리트보다 작아 전자의 작업성이 후자보다 저하되므로 POFA 콘크리트의 작업성은 OPC 콘크리트보다 저하되는 것으로 판단된다.

- 2) 염소 이온의 침투에 따른 콘크리트 침투깊이 비교 실험을 통해 POFA 콘크리트의 경우가 OPC에 비해 월등히 낮은 염분 침투확산성을 보이며, 탄산화의 경우에도 6개월 이전에는 탄산화 침투깊이가 OPC에 비해 컸으나 이후 회복하여 1년 이상의 장기재령에서는 OPC에 비해 동등 내지 우수한 탄산화 저항효과를 가지는 것으로 나타났다.
- 3) 전기화학적 치유 기법을 적용한 POFA 콘크리트의 경우, 부식저항성 측면에서 초기 가압전압이 OPC의 경우는 1.1 V, POFA의 경우는 0.6 V로 나타나 초기의 불안정 측면에서는 다른 값을 보였으나 이후 전지를 형성하고 있는 콘크리트의 시간 경과에 따라 통전이 행해지면서 POFA 콘크리트의 경우가 OPC에 비해 2.6 V로서 더욱 빨리 안정화 되었고, 그 결과 동일 부피를 가지는 공시체에서 결합재 치환에 따른 재료적 특성과 전해질의 공급을 통한 전기저항 용량의 증가로 부식 저항성을 더욱 확보하고 있음을 알 수 있었다
- 4) 전기화학적 치유기법을 적용한 POFA 콘크리트의 갈바니 전류 모니터링 및 선형 분극 저항 측정 결과, 절대 전류값의 변동범위가 POFA 콘크리트의 경우 -100~+30 µA로 나타난 반면 OPC의 경우는 -460~+50 µA로 나타나 공급전류의 안정성 측면에 있어서 시멘트량의 30%를 POFA로 치환한 경우가 우수한 부식저항성을 가지고 있고, 또한, 국부 부식에 대해서도 부식 개시 지연성 측면에서 향상 효과를 가져다 줄 것으로 분석되었다.

#### 감사의 글

이 논문은 건설교통 R&D정책 · 인프라사업 성능중심의 건설기준 표준화연구단, 콘크리트 코리아 연구단 (Concrete Core) 및 중소기업청 산학협력사업, “콘크리트 구조물의 장수명화를 위한 Multi-scale 성능평가 프로그램 개발” 과제의 재정적 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Song, H. W., Lee, C. H., and Ann, K. Y., “Factors Influencing Chloride Transport in Concrete Structures Exposed to Marine Environments,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, No. 2, 2008, pp. 113~121.
2. 송하원, 이창홍, 이근주, 김재환, 안기용, “삼성분계 혼합

- 콘크리트의 염화물 침투 저항성 및 내구성에 대한 고찰,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 4호, 2008, pp. 439~449.
3. 최희용, 김무한, 김문한, 황혜주, 최성우, “혼화재 종류 및 활성황도 대체율별 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험연구,” 콘크리트학회 논문집, 13권, 2호, 2001, pp. 123~129.
  4. Abdullah, K., Hussin, M. W., Zakaria, F., Muhamad, R., and Abdul Hamid, Z., “POFA : A Potential Partial Cement Replacement Material in Aerated Concrete,” *Proceedings of the 6th Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference (APSEC 2006)*, 5-6 September, 2006, Kuala Lumpur, Malaysia, B132-140.
  5. Anderson, J. E., Meryman, H., and Porsche, K., “Sustainable Building Materials in French Polynesia,” *International Journal for Service Learning in Engineering*, Vol. 2, No. 2, 2007, pp. 102~130.
  6. Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., and Siripanichgorn, A., “Use of Waste Ash from Palm Oil Industry in Concrete,” *Waste Magement*, Vol. 27, No. 1, 2007, pp. 81~88.
  7. Awal, A. S. M. A. and Hussin, M. W., “The Effectiveness of Palm Oil Fuel Ash in Preventing Expansion due to Alkali-silica Reaction,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, No. 4, 1997, pp. 367~372.
  8. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W., and Saeting, T., “Evaluation of the Sulfate Resistance of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash,” *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, 2007, pp. 1399~1405.
  9. Chu, K. H. and Hashim, M. A., “Adsorption Characteristics of Trivalent Chromium on Palm Oil Fuel Ash,” *Clean Techn. Environ. Policy*, Vol. 4, No. 1, 2002, pp. 8~15.
  10. Hameed, B. H., Ahmad, A. A., and Aziz, N., “Isotherms, Kinetics and Thermodynamics of Acid Dye Adsorption on Activated Palm Ash,” *Chemical Engineering Journal*, Vol. 133, No. 1, 2007, pp. 195~233.
  11. KS F 2403, “콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법,” 한국산업규격, 2008, pp. 1~8.
  12. KS F 2422, “콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도 시험 방법,” 한국산업규격, 2007, pp. 1~6.
  13. KS F 2546, “골재의 알칼리 잠재 반응 시험방법(모르타르 봉 방법),” 한국산업규격, 2002, pp. 1~6.
  14. KS F 2545, “골재의 알칼리 잠재 반응 시험방법(화학적 방법),” 한국산업규격, 2005, pp. 1~7.
  15. KS L 5109, 수경성 시멘트 페이스트 및 모르타르의 기계적 혼합 방법, 2005, pp. 1~5.
  16. KS F 2547, “콘크리트 골재용 탄산염암의 알칼리 잠재 반응 시험방법,” 한국산업규격, 1997, pp. 1~4
  17. KS F 2408, “콘크리트의 휨강도 시험방법,” 한국산업규격, 2009, pp. 1~6.
  18. KS F 2714, “모르타르 및 콘크리트의 산-가용성 염화물 분석 시험방법,” 한국산업규격, 2002, pp. 1~8.
  19. KS F 2596, “콘크리트의 탄산화 깊이 측정 방법,” 한국산업규격, 2007, pp. 1~5.
  20. Ann, K. Y. and Song, H. W., “Chloride Threshold Level for Corrosion of Steel in Concrete,” *Corrosion Science*, Vol. 49, 2007, pp. 4113~4133.
  21. Song, H. W., Lee, C. H., Jung, M. S., and Ann, K. Y., “Development of Chloride Binding Capacity in Cement Paste and the Influence of the pH of Hydration Products,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 35 2008, pp. 1427~1434.
  22. Saraswathy, V. and Song, H. W., “Corrosion Performance of Fly Ash Blended Cement Concrete: A State-of-art Review,” *Corrosion Reviews*, Vol. 24, No. 1-2, 2006, pp. 87~122.
  23. Song, H. W. and Saraswathy, V., “Studies on the Corrosion Resistance of Reinforced Steel in Concrete with Ground Granulated Blast Furnace Slag-An Overview,” *Journal of Hazardous Materials B*, 138, 2006, pp. 226~233.
  24. Vedalakshmi, R., Song, H. W., Saraswathy, V., Lee, C. H., and Palaniswamy, N., “Reliability of Galvanostatic Pulse Technique in Assessing the Corrosion Rate of Rebar in Concrete Structures: Laboratory Vs. Field Studies,” *NDT & E International*, 2009, In Revision.
  25. Saraswathy, V. and Song, H. W., “Evaluation of Corrosion Resistance of Portland Pozzolana Cement and Fly Ash Blended Cements in Pre-cracked Reinforced Concrete Slabs under Accelerated Testing Conditions,” *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 104, 2007, pp. 356~361.
  26. Song, H. W., Saraswathy, V., Muralidharan, S., Lee, C. H., and Thangavel, K., “Corrosion Performance of Steel in Composite Concrete System Admixed with Chloride and Various Alkaline Nitrites,” *Journal of Applied Electrochemistry*, 2009, in Revision.

**요약** 이 연구에서는 전기화학적 기법을 사용하여 혼합콘크리트의 일종인 palm oil fuel ash(POFA) 콘크리트의 부식저항성을 평가하였다. POFA는 야자수로부터 야자유를 정제하고 난후 야자수 재로 추출되어진 산업 재생 폐기물을 일컫는다. POFA 콘크리트의 기본 물성 특성분석을 위해서 초기재령에서의 POFA 콘크리트의 압축강도, 슬럼프, 중량감소율, 블리딩 및 팽창비 특성 분석실험을 수행하였다. 한편, 내구성 특성분석을 위해서 염소이온침투시험 및 중성화 침투시험도 수행하였다. 마지막으로 전기화학적 균열치유기법을 사용하여, 가압전압 특성분석, 갈바닉 전류특성분석 및 선형분극저항 평가 등의 부식저항성 평가를 실시하였다. 실험 결과로부터, 장기재령의 강도, 블리딩, 슬럼프 특성, 팽창비, 염소이온 확산성, 탄산화 저항성 및 부식저항성의 향상 효과가 활성화 되어진 POFA 콘크리트의 포졸란 반응에 기인하여 이루어지고 있음을 확인하였다. 따라서 POFA 콘크리트는 그린-재생 자원으로서 시멘트계 대체 결합재로서의 이용가능성이 있음을 확인할 수 있었다.

**핵심어** : POFA 콘크리트, 강도, 내구성, 부식 저항성, 전기화학적 기법