

## 원전 콘크리트 구조물에서의 플라이애시 혼합 콘크리트의 적합성 평가

### Evaluation of the Suitability for Concrete Using Fly Ash in N.P.P. Structures

조명석\*, 송영철\*, 김성욱\*\*, 고경택\*\*

\* 한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 106-16

\*\* 한국건설기술연구원, 경기도 고양시 일산구 대화동 2311

#### 요 지

원전 콘크리트 구조물에 사용되는 V종 시멘트는 황산염에 대한 저항성은 우수하나 해수의 주요 성분인 염화물에 대한 저항성은 I종 시멘트보다 취약한 것으로 보고되고 있다. 현재 국내외적으로 해수의 영향을 받는 구조물을 설계할 경우, 해수 중의 염화물에 의한 침해를 고려하기 위해 V종 시멘트 대신에 I종 시멘트에 플라이애시 등의 혼화제를 혼합한 시멘트의 사용을 권장하고 있으나, 플라이애시 혼합 콘크리트에 관한 국내의 연구는 주로 유동성 및 강도 등과 같은 콘크리트의 초기특성을 파악하는데 중점을 두고 있다.

따라서 본 연구는 원전 콘크리트구조물에 사용되는 V종 시멘트 대신에 I종 시멘트에 플라이애시를 혼합하여 사용함으로써 구조물의 안정성, 내구성 및 경제성 확보를 하기 위한 연구의 일환으로 플라이애시 혼합 콘크리트의 내구성을 종합적으로 평가하였다. 그 결과, 플라이애시 20%를 치환한 콘크리트는 V종 시멘트를 사용하는 현행 콘크리트에 비해 염해, 황산염침해, 동결융해 저항성 측면에서 우수한 성능을 나타내었다. 그리고 중성화의 경우 다소 불리한 것으로 나타났으나, 장기 내구성을 예측한 결과, 낮은 물시멘트비의 고강도 콘크리트를 사용하는 원전 구조물의 특성으로 인하여 사용수명 동안의 건전성 저하는 발생하지 않을 것으로 평가되었다.

#### Abstract

The nuclear power plant structures constructed in Korea has been generally used type V cement(sulfate-resisting Portland cement), but according to the study results reported recently, it shows that type V cement is superior the resistance of sulfate attack, but the resistance of salt damage is weaker than type I cement. It is increased the demands on the use of mineral admixtures such as fly ash, ground granulated blast-furnace slag instead of type V cement in order to improve the durability of concrete structures. But the study on concrete mixed with fly ash in Korea has been mainly performed on rheology and strength properties of the concrete.

Therefore, this study is to improve the durability of concrete structures of N.P.P. as using fly ash cement instead of type V cement. As a results, the concrete containing fly ash is improved the resistance to salt attack, sulfate attack and freezing-thawing and is deteriorated the carbonation. But if it is used the concrete with high strength or low water-powder ratio, the concrete have not problem on the durability.

# 1. 서 론

해안가에 위치하고 있는 국내 대부분의 원자력 발전소 콘크리트 구조물은 해수중의 황산염 침해방지, 알칼리 골재반응 방지 등을 목적으로 C<sub>3</sub>A의 함량을 낮춘 V종시멘트(내황산염 시멘트)를 사용하고 있다. 그러나 V종시멘트의 경우 황산염에 대한 저항성은 우수하나 해수의 주요 성분인 염화물에 대한 저항성은 오히려 I종시멘트보다 취약하다는 연구결과가 보고되고 있다. 최근의 연구결과에 따르면, 해수로부터 콘크리트 중으로 침입하는 황산염 이온의 침투는 침투깊이가 한정될 뿐만 아니라 확산속도도 염화물 이온의 경우보다 훨씬 작고 해수중의 황산염 농도도 염화물 이온의 약 1/7이기 때문에 황산염 이온의 침투량은 염화물 이온량의 수십분의 1에 불과한 작은 값을 가지고 있다. 따라서 미국, 일본 등에서는 해수의 영향을 받는 구조물의 설계 시에 황산염에 의한 침해보다는 염화물에 의한 침해를 고려하기 위해 V종시멘트 대신에 I종시멘트에 플라이애시, 고로슬래그와 같은 혼화제를 혼합한 시멘트의 사용을 적극 권장하고 있다.

한편, 국내에서 플라이애시를 혼합한 콘크리트에 관한 연구는 주로 플라이애시의 혼합에 따른 유동성, 강도 등과 같은 콘크리트의 초기특성을 플라이애시를 혼합하지 않은 콘크리트와 비교해 장단점을 파악하는 수준에 머물렀다. 실제적으로 플라이애시를 사용한 경우, 장기재령으로 갈수록 강도의 발현이 향상되고 밀실한 내부의 조직을 갖춤으로써 내구성능이 유리할 것이라는 예측에도 불구하고 이러한 기존의 연구결과로는 초기재령 특성뿐만 아니라 장기재령 특성과 내구성에 관한 특성을 제대로 파악, 입증하지 못하였기 때문에 실존 구조물에 대한 플라이애시의 사용이 적극적으로 고려되지 못하고 있다. 특히 원자력 발전소와 같이 안전성이 강조되는 콘크리트 구조물에 플라이애시 혼합 시멘트를 사용하기 위해서는 초기재령에서의 물리·역학적 성질뿐만 아니라 원전 콘크리트 구조물의 사용환경에 적합한 열화 저항성을 지닌 콘크리트의 도출을 위한 장기특성 및 내구성능에 관한 연구가 체계적으로 이루어져야 한다.

본 연구는 원전 콘크리트구조물에 사용되는 V종시멘트 대신에 I종시멘트에 플라이애시를 혼합하여 사용함으로써 구조물의 안정성, 내구성 및 경제성 확보를 하기 위한 연구의 일환으로서 플라이애시를 혼합한 콘크리트의 내구성을 종합적으로 평가하였다.

# 2. 시험 개요

시험은 플라이애시 치환율 20% 및 V종, I종시멘트를 사용한 콘크리트를 대상으로 국내 원전 콘크리트의 구조물의 주요 내구성 인자인 염해, 중성화, 황산염침해 및 동결융해에 대해 실시하였다.

## 2.1 사용재료 및 배합

본 연구에 사용한 V종시멘트와 굵은골재, 잔골재, 감수제 및 AE제는 영광 5,6호기 건설에 사용 중인 재료를, I종시멘트는 국내 S사 시멘트를 사용하였다. 플라이애시는 삼천포 화력발전소에서 생산되는 것을 사용하였으며, 표 1에 사용된 플라이애시의 품질시험 결과를 나타내었다. 사용된 플라이애시는 ASTM C 618기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

<표 1> 플라이애시 품질 검증시험 결과

항 목	화학적 성분				물리적 성능				
	S+A+F* (%)	SO <sub>3</sub> (%)	습분 (%)	강열감량 (%)	분말도 45 $\mu$ m계 잔량(%)	포출관활성도(%)		소요수량 (%)	안정도 (%)
						7일	28일		
ASTM C 618	75이상	5.0이하	3.0이하	6.0이하	34이하	75이상	75이상	105이하	0.8이하
사용 플라이애시	87.48	0.51	0.07	2.7	5.7	89	94	100	0.1

\* SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

<표 2> 콘크리트 배합표

강도 (psi)		W/C (%)	S/a	W (lb)	C (lb)	FA (lb)	S (lb)	G (lb)	WRA (ml)	AEA (ml)
5500	I종	44.4	44	285	642	0	1268	1621	474	26
	V종				642	0	1268	1621		
	20%				514	128	1257	1617		
5000	I종	39.4	43	290	736	0	1207	1590	706	24
	V종				736	0	1207	1590		
	20%				589	147	1198	1581		
4000	I종	48	46	300	625	0	1303	1505	852	16
	V종				625	0	1303	1505		
	20%				500	125	1283	1548		
3000	I종	62	45	278	448	0	1359	1657	813	31
	V종				448	0	1359	1657		
	20%				358	90	1350	1695		

콘크리트 배합은 표 2와 같이 국내 원전 콘크리트 구조물에 사용되는 대표적인 5500psi, 5000psi, 4000psi, 3000psi 4종류의 설계강도 배합을 선정하였다. 그리고 플라이애시 치환율 20%는 2001년도 추계발표에서 보고한 바와 같이 수화열, 강도발현, 경제성 및 관련코드를 고려하여 선정한 것이다.

## 2.2 시험방법

### (1) 염해시험

시험체는 100×100×150mm 몰드를 사용하여 타설 1일 후 탈형하여 23℃수중에서 28일과 91일 동안 표준양생을 실시하였다. 시험체는 일방향으로 염화물 이온의 침투를 유도하기 위해 5면은 에폭시 코팅을 하였다.

시험체는 NaCl 3.6% 수용액에 침적시켜 28일, 60일, 90일에 시험체 표면으로부터 15mm 간격으로 시료 40g을 채취한 후, 일본 콘크리트 공학협회 기준(안) “경화한 콘크리트 중의 염분량 측정 방법”에 의해 염화물을 추출한 다음 이온 전극법을 이용한 일본 K사 제품의 AG-100을 사용하여 수용성 염화물 이온량을 측정하였다. 염화물 이온량은 시험체 3개의 평균값으로 하였다.

### (2) 중성화 시험

시험체 크기는 100×100×150mm 몰드를 사용하였다. 탈형은 타설하여 1일 후 실시하였으며 그 다음 23℃ 수중에서 28일과 91일 동안 표준양생을 실시하였다. 시험체는 일방향으로 이산화탄소의 침투를 유도하기 위해 5면은 에폭시 코팅을 하였다. 중성화 촉진시험은 이산화탄소 농도 10%, 온도 20℃, 습도 60% 조건을 유지하도록 하였다. 중성화 촉진시험을 수행한 후 7일, 28일, 60일, 91일에 시험체를 이등분으로 할렬하여 그 면에 페놀프탈레인 1% 용액을 분무하여 중성화 깊이를 측정하였다.

### (3) 황산염 시험

시험체 크기는 100×100×400mm 몰드를 사용하였다. 탈형은 타설하여 1일 후 실시하였으며 그 다음 23℃ 수중에서 28일 동안 표준양생을 실시하였다. 시험은 ASTM C 1012(Test Method for Length Change of Hydraulic Mortars Exposed to Sulfate Solution)에 준하여 실시하였다. 단, ASTM C 1012에서 황산나트륨(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 5%를 사용하였지만, 본 연구에서 황산염 촉진을 시키기

위해 황산나트륨 10%를 사용하였으며, 시험 후 28일, 60일, 91일에 길이변화를 측정하였다.

#### (4) 동결융해 시험

시험체 크기는 100×100×400mm 몰드를 사용하였으며, 탈형은 타설하여 1일 후 실시하였으며 그 다음 23℃ 수중에서 28일과 91일 동안 표준양생을 실시하였다. 시험은 ASTM C 666(Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing)의 기중동결 수중융해 시험 방법으로 실시하였다. 동결융해시험의 온도범위는 -18℃~+4.5℃로 하고 1사이클의 시간은 2시간 40분으로 하여 동결융해 30사이클마다 초음파에 의한 상대동탄성계수를 300사이클까지 측정하였다.

### 3. 시험 결과 및 고찰

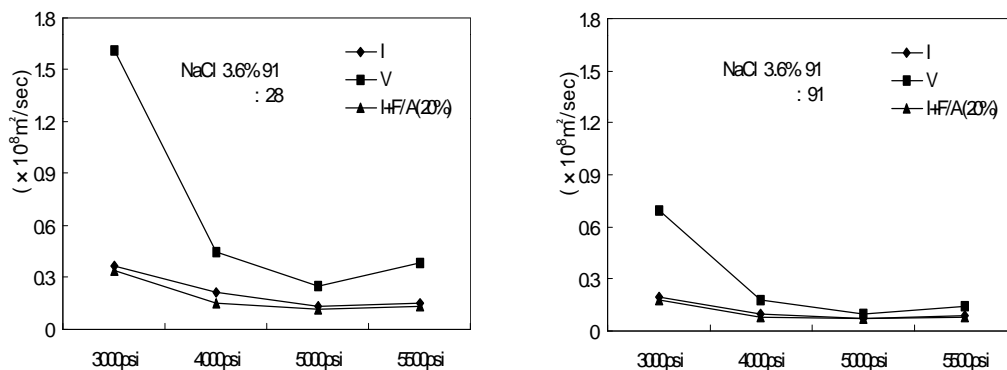
#### 3.1 염해

<그림 1>은 Fick의 확산방정식을 사용하여 염화물 확산계수를 구한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 설계기준강도에 상관없이 I종+플라이애시 20% < I종 < V종의 순으로 확산계수가 커지고 있음을 알 수 있다. 이처럼 플라이애시를 사용함으로써 내염해성이 향상되는 것은 포졸란 반응에 의한 세공구조의 밀실화, 투수성 감소 때문이다. 그리고 사용 시멘트별 내염해성을 분석해 보면, V종시멘트를 사용한 것이 가장 취약한 것으로 나타났는데, 이것은 V종시멘트의 경우 I종시멘트에 비해 프리텔서염 생성에 관련된 C<sub>3</sub>A 성분이 적기 때문인 것으로 판단된다.

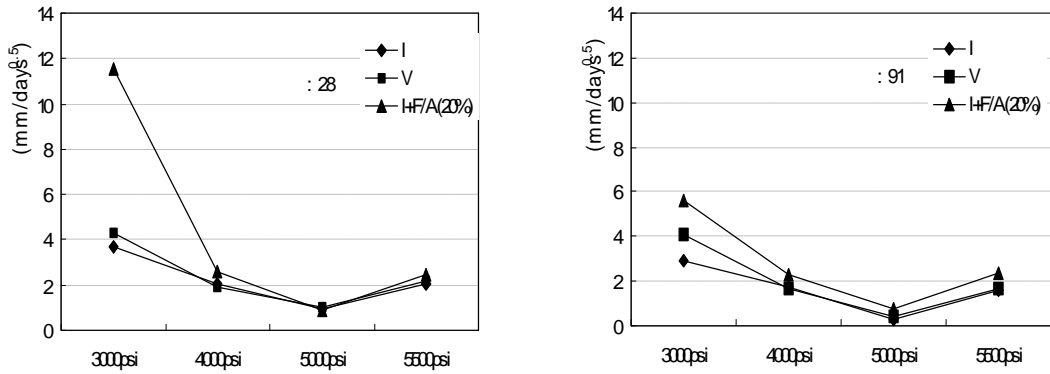
설계기준강도에 대한 영향은 플라이애시의 혼입 유무 및 시멘트 종류에 상관없이 강도가 높을수록 염화물 침입속도가 지연되는데, 이것은 강도가 높을수록 경화체 조직이 치밀해져 염소이온의 침투를 억제시키기 때문이다.

염해 시험을 시작한 재령의 영향을 보면, 재령 28일과 재령 91일과의 염화물 확산계수는 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 이것은 재령이 증가함에 따라 강도가 증가되어 콘크리트 조직이 치밀해져 염소이온의 침투가 억제되기 때문으로 판단된다.

이상의 시험 결과에서 알 수 있듯이 플라이애시를 혼합한 콘크리트는 V종시멘트를 사용하는 현행 콘크리트보다 3,000psi와 같은 저강도 콘크리트에서 1/5정도의 염화물 이온확산 속도가 억제되고, 5,000psi와 같은 고강도 콘크리트에서 1/2정도의 염화물 이온확산 속도가 억제되는 것으로 나타났다. 따라서 플라이애시를 20%를 혼입하면 내염해성 측면에서 우수한 콘크리트 제조가 가능할 것이다.



<그림 1> 콘크리트 염해시험 결과



<그림 2> 콘크리트 중성화 시험결과

### 3.2 중성화

<그림 2>는 중성화 깊이와 재령의 평방근에 대한 비율을 중성화속도 계수로 정의하여 구한 결과이다. 설계기준강도 및 시험개시 재령에 관계없이 I종 < V종 < I종+플라이애시 20%의 순서로 중성화속도가 빨리 진행되고 있으며, 설계기준강도가 작을수록 플라이애시 혼입에 의해 중성화속도가 빨라지고 있다. 이처럼 플라이애시를 혼합한 콘크리트의 중성화가 빨리 진행되는 것은 플라이애시 치환률만큼 시멘트량이 감소된 것과, 포졸란 반응에 의해 알칼리성을 가진 Ca(OH)<sub>2</sub>가 소비되어 세공용액의 pH가 저하되었기 때문이다.

그리고 설계기준강도가 높을수록 중성화 진행 속도가 지연되고 있으며, 특히 플라이애시를 사용한 콘크리트는 설계기준강도가 높을수록 중성화 진행 속도가 상당히 지연되고 있다. 또한 시험개시 재령 28일에 비해 시험개시 재령 91일에서 중성화 진행 속도가 지연되고 있으며, 특히 설계기준강도 3,000psi에 플라이애시를 사용한 콘크리트에서 시험개시 재령의 영향이 상당히 큰 것으로 나타났다. 이처럼 설계기준강도가 높을수록, 또는 수중양생기간이 길수록 중성화 진행 속도가 지연되는 것은 고강도화에 의한 경화체 조직의 밀실화로 이산화탄소의 침입이 상당히 억제되었기 때문이다.

플라이애시를 혼합한 콘크리트는 V종시멘트를 사용하는 현행 콘크리트보다 3,000psi와 같은 저강도 콘크리트에서 2.7~1.4배정도 중성화 속도가 빨리 진행되고, 5,000psi와 같은 고강도 콘크리트에서 1.1~1.3배정도 중성화 속도가 빨리 진행되는 것으로 나타났다.

이상과 같이 3,000psi 이하의 저강도에서는 플라이애시를 사용한 경우가 V종시멘트를 사용하는 현행 콘크리트보다 중성화 측면에서는 다소 불리하나, 설계기준 재령이 91일이고 4500psi 이상의 고강도 콘크리트를 주로 사용하는 원전 구조물의 특성을 고려하면, V종시멘트를 사용하는 현행 콘크리트와 비교하여 중성화 측면에서 큰 차이가 나지 않을 것으로 판단된다.

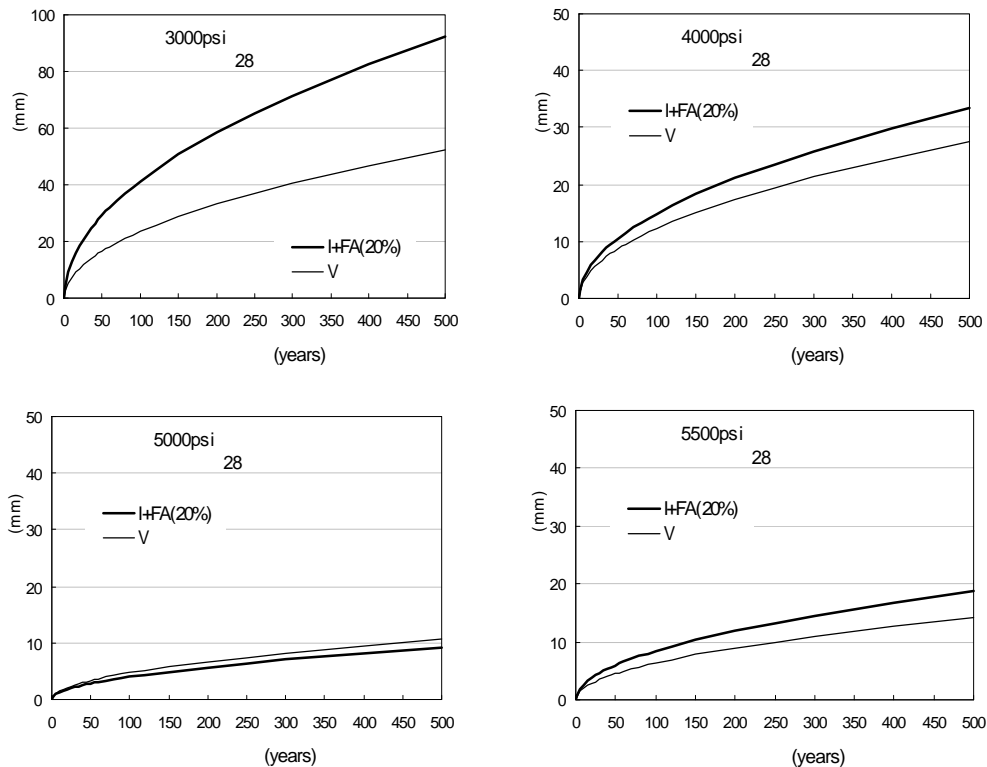
<그림 3>은 사용수명에 따른 중성화 깊이를 예측한 결과이다. 예측은 국내 원전 구조물을 대상으로 기 수행 완료한 [원전 콘크리트 구조물 잔존수명 예측에 관한 연구]로부터 도출한 예측모델(식 1)을 사용하였고, 중성화에 의한 콘크리트의 사용수명 종결은 콘크리트의 중성화가 철근에 도달하는 시점으로 정의하였다.

$$X_c = (2.823 - 0.854 \log C) \cdot \exp(8.953 - 2713/T) \times (H(100 - H)(140 - H) / 192000) \times (0.0303 \frac{W}{C+F} - 1.0187) \times \alpha \sqrt{C \cdot t} \quad (\text{식 1})$$

- 여기서, W/(C+F) : 물-결합재비(%)
- C : 이산화탄소 농도(%)
- T : 절대온도(K)
- H : 상대습도(%)

a : 시험계수  
t : 재령

예측결과에서 알 수 있듯이 중성화 진행속도가 다른 배합에 비해 상당히 빠른 설계기준강도 3000psi 콘크리트의 재령 28일인 경우에도 사용수명 동안 철근깊이까지의 중성화는 발생하지 않을 것으로 예측되었으며, 설계기준강도가 클수록 그 경향이 뚜렷하다. 즉 원천 구조물과 같이 물-시멘트비가 50% 이하인 고강도일 경우에 중성화 측면에서 다소 불리한 플라이애시를 사용하더라도 포졸란 반응에 의해 콘크리트 조직이 치밀하여 이산화탄소 및 산소 침투를 억제할 수 있으므로 중성화에 대한 사용수명 동안의 건전성 저하는 발생하지 않을 것으로 판단된다.



<그림 3> 중성화에 대한 사용수명 예측결과(설계기준재령 28일)

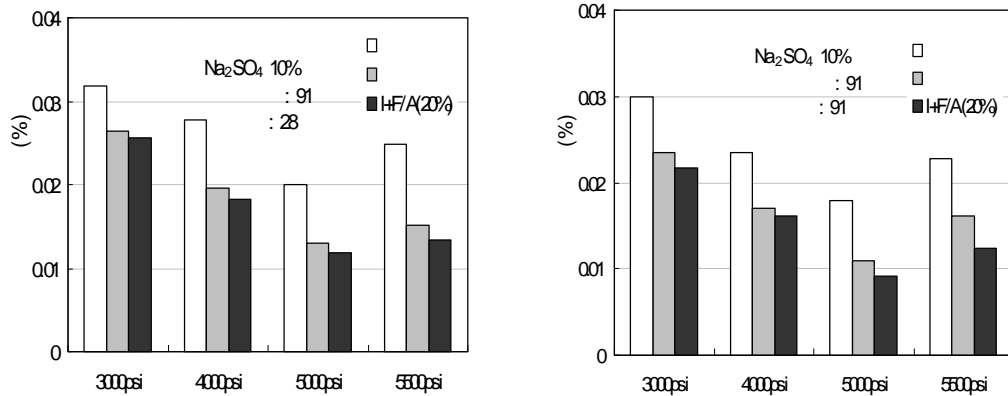
### 3.3 황산염 침해

<그림 4>는 황산염 용액 10%에 91일간 침적시킨 결과이다. 황산염 침해속도는 시험개시 재령 및 설계기준강도에 관계없이 I종+플라이애시 20% < V종 < I종 순으로 증가하고 있다. I종시멘트보다 V종시멘트가 황산염에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났는데 이는 V종시멘트의 경우 황산염과 반응하여 침상결정인 에트링가이트(enttringite)를 생성하는 C<sub>3</sub>A의 함량을 저감시켰기 때문이다. 그리고 플라이애시를 사용한 콘크리트의 황산염에 대한 저항성은 V종시멘트를 사용하는 현행 콘크리트보다도 우수한 것으로 나타났다. 이와 같이 플라이애시를 사용한 콘크리트가 황산염 침해에 대해 우수한 것은 황산염 이온에 의해 쉽게 침식되는 수산화칼슘이 포졸란 반응에 의해 감소되었기 때문이고, 또한 포졸란 반응에 의한 경화체 조직이 치밀해졌기 때문이다.

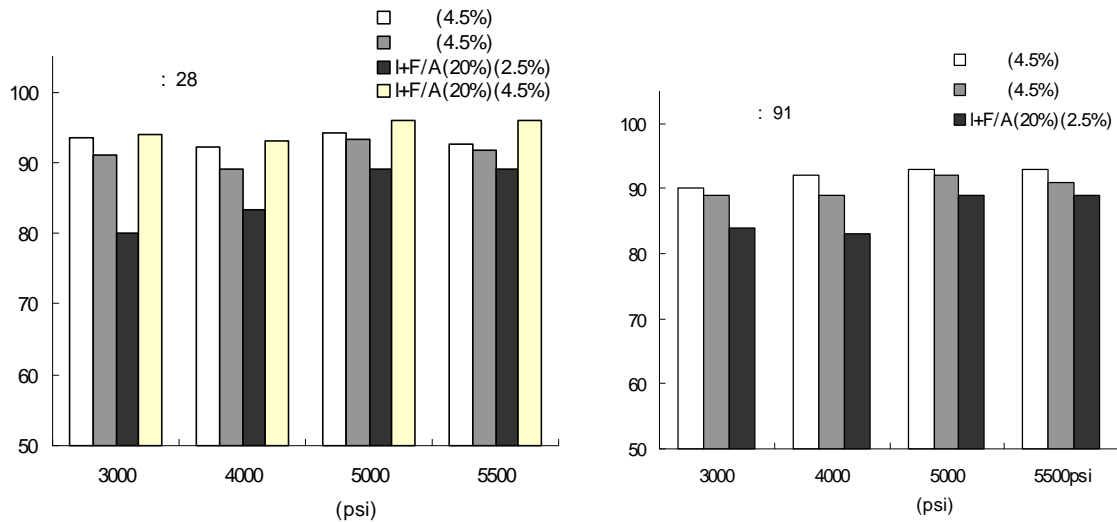
그리고 설계기준강도가 높을수록 시멘트 종류에 상관없이 황산염에 대한 저항성이 우수하고 또한 시험개시 재령 28일인 콘크리트보다 시험개시 재령 91일인 콘크리트가 황산염에 대한 저항성이 증가하고 있다. 이것은 콘크리트 강도의 증가로 인해 수밀성이 증가되고 황산염 이온이 콘크리트 내부에 침입이 억제되었기 때문이다.

이상과 황산염 침해 시험결과를 볼 때, 플라이애시를 사용하면 V종시멘트를 사용한 현재 콘크

리트보다 1.1~1.5배정도 황산염 침해에 대한 저항성이 우수한 콘크리트의 제조가 가능할 것으로 판단된다.



<그림 4> 콘크리트 황산염침해 시험결과



<그림 5> 콘크리트 동결융해 시험결과

### 3.4 동결융해

<그림 5>는 콘크리트의 동결융해 시험결과이다. AE제 양을 동일하게 사용하여 콘크리트를 제조한 결과, 플라이애시를 사용한 콘크리트는 I종시멘트와 V종시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 공기량 연행이 되지 않아 동결융해 저항성이 다소 저하되는 것으로 나타났으나, 동결융해에 대한 내구성을 판단하는 기준인 상대동탄성계수 60%이하가 되는 것은 없는 것으로 나타났다. 그리고 AE제 양을 증가시켜 동일한 공기량을 연행한 결과, 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 동결융해 저항성은 I종시멘트와 V종시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 동등이상으로 나타났다. 기존에 연구에서도 플라이애시를 사용함으로써 AE제 의한 공기 연행이 잘 되지 않고 또한 공기 기포조직이 다소 불규칙하게 되어 플라이애시를 사용한 콘크리트는 동결융해 저항성 측면에서 다소 불리하다고 알려져 있으나, AE제를 증가시켜 동일한 공기량을 연행하면 플라이애시를 사용하더라도 동결융해 저항성에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 보고되고 있다.

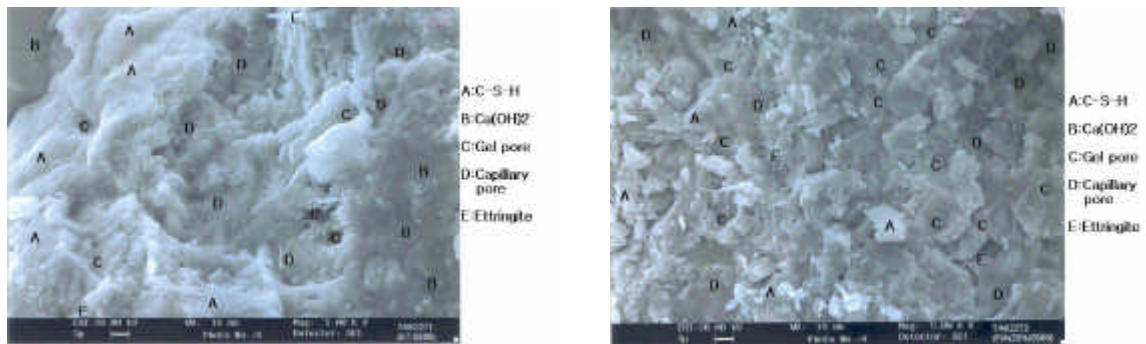
설계기준강도 및 시험개시 재령에 따른 영향을 보면, 설계기준강도가 높을수록 동결융해 저항성이 우수하고, 또한 시험개시 재령 28일보다 재령 91일의 콘크리트의 동결융해 저항성이 향상되는 것으로 나타났다. 이것은 시멘트 경화체의 강도의 증가와 동결 가능한 자유수의 감소 때문으로 판

단된다.

이상과 같이, 플라이애시를 20%를 치환한 콘크리트의 동결융해 저항성을 V종시멘트를 사용한 현행 원전 콘크리트와 I종시멘트를 사용한 콘크리트를 비교한 결과, 플라이애시를 사용한 콘크리트는 AE제를 흡착하는 경향이 있으므로 동일한 AE제를 사용한 경우에는 다소 동결융해 저항성이 저하되는 것으로 나타났으나, 소정의 공기량을 확보하면 동결융해 저항성에 별다른 영향이 없는 것으로 나타났다.

### 3.5 SEM 분석

<그림 6>은 재령 91일까지 양생한 5,500psi 콘크리트에 대해 SEM 촬영한 결과이다. 플라이애시를 20% 치환한 콘크리트는 포졸란 반응에 의해  $\text{Ca(OH)}_2$ 가 거의 보이지 않고, 그 대신에 C-S-H구조가 비교적 치밀하고 크기가 작은 공극이 주로 보이고 있으나, I종 시멘트와 V종 시멘트를 사용한 콘크리트는 플라이애시를 사용한 콘크리트에 비해  $\text{Ca(OH)}_2$  및 큰 공극이 많이 보인다.



(a) V 시멘트

(b) I+FA(20%)

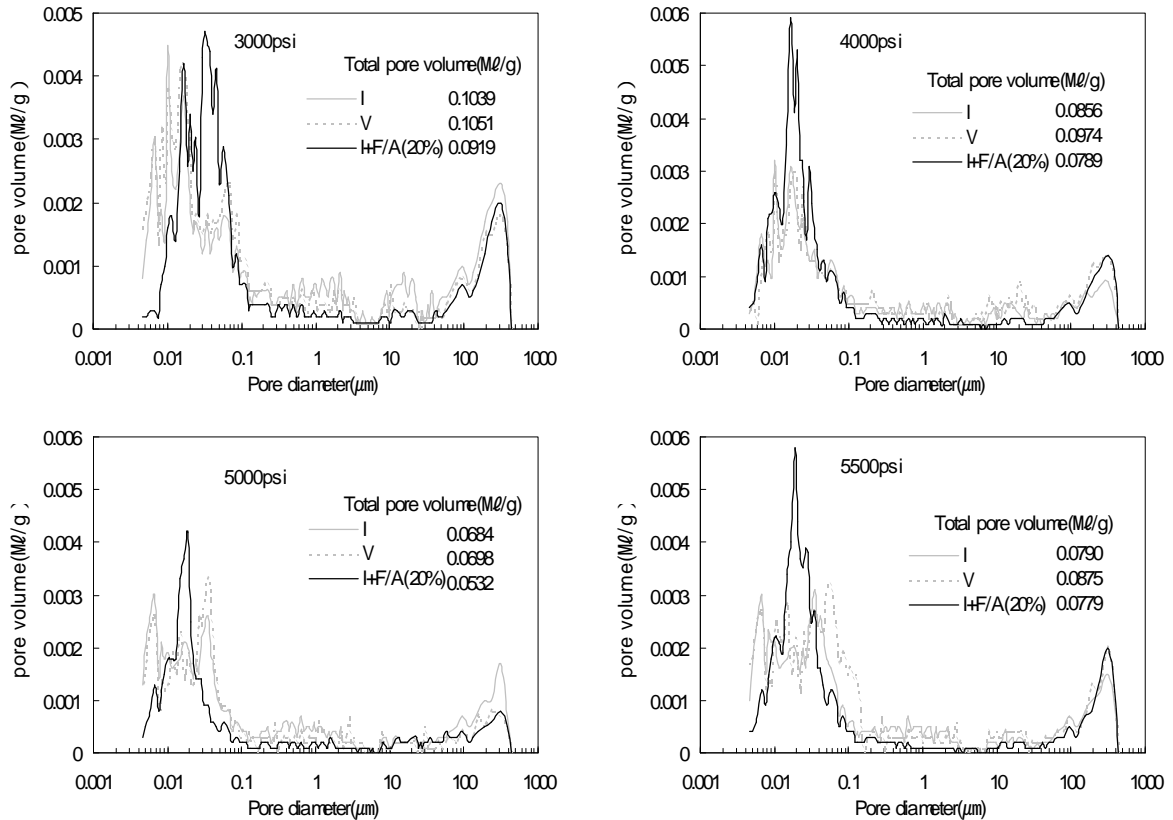
<그림 6> 콘크리트 경화체의 SEM (5500psi, 재령 91일)

### 3.6 기공률 분석

<그림 7>은 수은압입법(MIP)에 의한 콘크리트의 미세공극을 측정된 결과이다. 전체 공극량은 설계기준강도에 관계없이 플라이애시를 혼입한 콘크리트가 가장 적고, V종 시멘트보다 I종 시멘트를 사용한 콘크리트가 공극량이 적은 것으로 나타났다. 그리고 플라이애시를 혼입한 콘크리트는 I종 시멘트와 V종 시멘트를 혼입한 콘크리트에 비해  $0.1\sim 30\mu\text{m}$ 의 공극량은 적고,  $0.002\sim 0.1\mu\text{m}$ 의 공극량은 많은 것으로 나타났다. 이것은 플라이애시의 포졸란 반응에 의해 생성된 수화물이  $0.1\mu\text{m}$  이상의 공극을 메워 결과적으로  $0.1\mu\text{m}$ 이하의 공극이 생성된 것으로 판단되며, 재령 91일 이후에도 플라이애시의 포졸란 반응은 계속 발생하여  $0.1\mu\text{m}$ 이상의 공극은 감소되고  $0.1\mu\text{m}$ 이하의 공극은 더욱 증가할 것으로 판단된다.

일반적으로 콘크리트 내부에 공극이 많을수록 그리고 큰 공극이 많을수록 강도 및 내구성이 저하되는 것으로 알려져 있다. 플라이애시를 사용한 콘크리트는 I종 시멘트 및 V종 시멘트를 사용한 콘크리트보다 공극 및 큰 공극이 적은 것으로 나타났으며, 이 결과는 내구성 결과와 일치하는 것으로 나타났다.





<그림 7> 콘크리트의 미세공극 분포(재령 91일)

#### 4. 결론

플라이애시를 혼입한 콘크리트의 내구성을 평가하기 위해 플라이애시 치환율 20% 및 V종, I종 시멘트를 사용한 콘크리트를 대상으로 국내 원전 콘크리트의 구조물의 주요 내구성 인자인 염해, 중성화, 황산염침해 및 동결융해에 대해 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 플라이애시 20%를 치환한 콘크리트가 V종 시멘트를 사용하는 현행 콘크리트에 비해 염해, 황산염침해, 동결융해 저항성 측면에서 우수한 성능을 나타내었다. 그리고 중성화의 경우 다소 불리한 것으로 나타났으나, 장기 내구성을 예측한 결과, 낮은 물시멘트비의 고강도 콘크리트를 사용하는 원전 구조물의 특성으로 인하여 사용수명 동안의 건전성 저하는 발생하지 않을 것으로 평가되었다.
- (2) 플라이애시 혼합 콘크리트의 내부구조를 분석한 결과, 현행 V종 시멘트를 사용하는 콘크리트에 비해 내부 공극구조가 치밀한 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 내구성 측면의 시험 결과와 일치하는 것이다.

#### 참고 문헌

1. 한국전력공사, “콘크리트 혼화재료로서의 석탄회 이용방안 연구”, 1989.
2. ACI committee 226, “Use of Fly Ash in concrete” 2000.
3. V. M. Malhotra, “Supplementary cementing materials for concrete”, CANMET, 1987
4. K. Wesche, “Fly Ash in concrete properties and performance”, Report of technical

committee 67-FAB, RILEM, 1991

5. 일본토목학회, "플라이애시 콘크리트 심포지움 논문보고집, 1998.
6. Standards Association of Australia, "Fly Ash use in concrete", AS1129 and 1130-1971.
7. 일본토목학회, "콘크리트 표준시방서 규준편", 1999.
8. R. L. Yuan and J. E. Cook, "Study of a class C fly ash concrete", Proceedings, First International Conference on the Use of Fly ash, Silica fume, Slag and other Mineral by-products in concrete, ACI Special Publication SP-79, 1983
9. J. Virtanen, "Freeze-thaw resistance of concrete containing blast-furnace slag, fly ash or condensed silica fume", Proceedings, First International Conference on the Use of Fly ash, Silica fume, Slag and other Mineral by-products in concrete, ACI Special Publication SP-79, 1983
10. C. H. Ftikos, G. Parissakis, "The combined action of  $Mg^{2+}$  and  $Cl^-$  ions in cement pastes", Cement and Concrete Research No. 15, 1985.
11. S. Diamond : Effect of two danish flyashes on alkali contents of pore solutions of cement-flyash pastes, Cement and Concrete Research, Vo.11. 1981.
12. Nixon, Gage, "The use of flyash and granulated blastfurnace slag to reduce expansion due to alkali-aggregate reaction, proceedings of the 5th international conference on alkali-aggregate reaction in concrete, S.252/32, 1981
13. S. Nagataki, N. Otsuki, T. Yamamoto, " Influence of environmental condition on the expansion resulting from AAR, Durability of building materials and components 6, 1993.
14. P. K. Mehta, " Durability of concrete in marine environment, review, performance of concrete in marine environment, ACI SP-75, 1980.
15. R. Kovacs, "Effect of the hydration products on the properties of fly ash cements, cements and concrete research, 1975.
16. 한국전력공사 전력연구원, "원전 콘크리트 구조물 잔존수명 예측에 관한 연구(최종보고서)", 2001.
17. 일본토목학회, "콘크리트 표준시방서 내구성 조사편", 1999
18. K. Torii, K. Taniguchi and M. Kawamura, "Sulfate resistance of high fly ash content concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 4, 1995.
19. 일본토목학회, "플라이애시를 혼합한 콘크리트의 중성화와 철근 발청에 관한 장기연구(최종 보고)", 20. T. H. Wee and S. S. Tin, "Evaluation of rapid chloride permeability test(RCPT) results for concrete containing mineral admixtures", ACI Materials Journal, March-April 2000.
20. M. Pigeon and H. Hornain, "Surface microstructure and scaling resistance of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 11, 1996.
21. T. D. Larson, "Air entrainment and durability aspects of fly ash concrete", Proceedings of ASTM, Vol.64, 1964.
22. P. K. Metha, "Testing and correlation of fly ash properties with respect to pozzolanic behaviour", Electric Power Research Institute Report CS-3314, 1984.
23. R. L. Yuan and J. E. Cook, "Time-dependent deformation of high strength fly ash concrete", Proceedings, International Symposium on the Use of PFA in Concrete, University of Leeds, 1982.