

원전 콘크리트 구조물 사용
플라이애쉬의 적정 치환율 검토

Investigation of Suitable Replacement of Fly Ash
for Concrete Structures of N.P.P.

조명석*, 송영철*, 김성욱**, 류금성**, 고경택**

* 한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 106-16

** 한국건설기술연구원, 경기도 고양시 일산구 대화동 2311

요 지

원전 콘크리트 구조물에 지금까지 V종 시멘트를 사용하여 왔으나 내구성 및 경제성 향상을 위해 I종 시멘트에 플라이애쉬를 혼입한 혼합 시멘트의 사용을 목표로 콘크리트의 기본 물성과 내구성 시험을 수행하였다. 이를 위해 본 연구에서는 플라이애쉬 적정 치환율을 수화열, 강도발현성 및 경제성 측면에서 검토하였으며 또한 도출된 플라이애쉬 적정 치환율로 제조된 모르타의 내구성을 평가하여, 그 결과 20%를 적정 치환율로 결정하였다.

Abstract

It shows that type V cement using concrete structures of N.P.P. is superior the resistance of sulfate attack, but the resistance of salt damage is weaker than type I cement. 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. The experiment is performed to investigate suitable replacement of fly ash in view of the hydration heat, strength development and economic. Also, we conduct to durability test of mortars made as deduced suitable of fly ash.

1. 서 론

해안가에 위치하고 있는 국내 원자력 발전소 콘크리트 구조물은 해수중의 황산염 침해방지, 알칼리 골재반응 방지 등을 목적으로 C₃A의 함량을 낮춘 V종 시멘트(내황산염 시멘트)를 사용하고 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 V종 시멘트 대신에 I종 시멘트에 플라이애쉬, 고로슬래그와 같은 혼화재를 혼합한 시멘트의 사용을 적극 권장하고 있다.

한편, 국내에서 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트에 관한 연구는 주로 플라이애쉬의 혼합에 따른 유동성, 강도 등과 같은 콘크리트의 초기특성을 플라이애쉬를 혼합하지 않은 콘크리트와 비교해 장단점을 파악하는 수준에 머물렀다. 실제적으로 플라이애쉬를 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 실제 구조물에 대한 플라이애쉬의 사용이 적극적으로 고려되지 못하고 있다. 특히 원자력 발전소와 같이 안전성이 강조되는 콘크리트 구조물에 플라이애쉬 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 하며 플라이애쉬 치환율을 고려한 최적 배합설계 지침을 마련하여야 한다.

본 연구는 원전 콘크리트 구조물 사용 시멘트 변경을 통하여 구조물의 안정성, 내구성 및 경제성 확보를 위하여 플라이애쉬의 적정 치환율을 도출하기 위한 것으로서 수화열과 강도발현성 및 경제성을 고려하여 적정 치환율을 도출하였다. 또한 도출된 치환율로 제조된 모르타르에 대해 중성화, 염해, 황산염 시험을 실시하여 내구성을 평가하였다.

2. 시험 개요

본 연구에서는 플라이애쉬 적정 치환율을 도출하기 위해 수화열, 강도발현 및 내구성 시험을 실시하였다. 여기서 강도발현과 내구성 시험은 시험의 간편화와 효율화를 도모하기 위하여 콘크리트의 배합에서 굵은골재를 제외한 모르타르의 배합을 대상으로 하였다. V종 시멘트와 잔골재는 영광 5,6호기 건설에 사용 중인 재료를, I종 시멘트는 국내 S사 시멘트를 사용하였다. 플라이애쉬는 삼천포 화력발전소에서 생산되는 것을 사용하였으며, 표 1에 사용된 플라이애쉬의 품질시험 결과를 나타내었다. 사용된 플라이애쉬는 ASTM C 618기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

표 1 플라이애쉬 품질 검증시험 결과

항 목	화학적 성분				물리적 성능				
	S+A+F* (%)	SO ₃ (%)	습분 (%)	강열감량 (%)	분말도 45 μ m 체 잔량(%)	포졸란활성도(%)		소요수량 (%)	안정도 (%)
						7일	28일		
ASTM C 618	50이상	5.0이하	3.0이하	6.0이하	34이하	75이상	75이상	105이하	0.8이하
사용 플라이애쉬	87.48	0.51	0.07	2.7	5.7	89	94	100	0.1

* SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃

2.1 수화열 시험

현재 원전의 경우 콘크리트에 사용되는 시멘트의 수화열을 7일에 70cal/g이하로 제한하고 있다. 따라서 플라이애쉬 치환율에 따른 혼합 시멘트의 수화열이 이 기준을 만족하는가의 여부가 치환율 결정의 중요한 요소이다. 시멘트의 수화열을 검토하기 위해 I종 시멘트, V종 시멘트, I종 시멘트에 플라이애쉬를 10, 20, 25, 30%를 치환한 시멘트에 대해 수화열을 분석하였다.

2.2 강도발현 시험

적정 플라이애쉬 치환율을 도출하기 위해 I종 시멘트에 0, 10, 15, 20, 30%로 치환하여 모르타르의 강도발현 시험을 실시하였다. 그리고 시험결과와의 비교 검토를 위해 I종 시멘트와 V종 시멘트에 대해서도 동일한 시험을 실시하였다. 배합은 국내 원전 콘크리트 구조물에 사용되는 대표적인 5500psi, 4000psi, 3000psi, 2000psi 4종의 설계강도 배합을 선정하였다. 시험체는 50mm cubic 몰드를 사용하여 타설 1일 후 탈형하고 23℃ 수중에서 소정의 기간동안 표준양생을 실시하였다.

표 2 강도발현 시험 모르터 배합

배합명		W/(C+FA) %	S/a (%)	단위량(lb)				배합근거
				W	C	FA	S	
2000psi	I종	70	47.7	289	414	0	1463	영광 5,6호기
	V종				414	0	1463	
	10%				373	41	1437	
	15%				352	62	1434	
	20%				331	83	1431	
	30%				297	124	1418	
3000psi	I종	62	45	278	448	0	1359	월성2,3,4호기
	V종				448	0	1359	
	10%				403	45	1356	
	15%				381	67	1353	
	20%				358	90	1350	
	30%				314	134	1344	
4000psi	I종	48	46	300	625	0	1303	영광 3,4호기
	V종				625	0	1303	
	10%				563	62	1291	
	15%				531	94	1287	
	20%				500	125	1283	
	30%				437	188	1275	
5500psi	I종	44.4	44	285	642	0	1268	영광 5,6호기
	V종				642	0	1268	
	10%				578	64	1265	
	15%				546	96	1261	
	20%				514	128	1257	
	30%				449	193	1249	

모르터의 강도시험은 7일, 28일, 91일에서 ASTM C 109 [Test method for compressive strength of hydraulic cement mortars]에 준하여 실시하였으며 시험체 3개의 평균강도를 측정하였다.

2.3 내구성 평가 시험

도출된 플라이애쉬의 치환율 20%로 제조된 모르터의 내구성을 검증하기 위해 염해, 황산염, 중성화 시험을 실시하였다. 또한 비교 분석을 위해 I종 및 V종 시멘트만을 사용한 시험체에 대해서도 동일한 시험을 실시하였다. 배합은 2.2 강도발현 시험과 동일한 5500psi, 4000psi, 3000psi, 2000psi 4종의 설계강도 배합을 사용하였다.

(1) 염해시험

시험체는 100×100×100mm 몰드를 사용하여 타설 1일 후 탈형한 후 23℃ 수중에서 28일 동안 표준양생을 실시하였으며, 일방향으로 염화물 이온의 침투를 유도하기 위해 5면은 에폭시 코팅을 하였다. 해수에 포함된 염화물의 농도는 해양과 해역에 따라 약간씩 차이가 있으나 일반적으로 3~4% 정도이며, 염화물에 의한 부식은 염화물 농도 약 3.6%에서 가장 빠르게 일어난다고 알려져 있다. 따라서 본 실험에서 NaCl 3.6% 농도의 염화물 용액을 제조하여 사용하였다. 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 측정방법”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 100×100×100mm 몰드를 사용하였다. 탈형은 타설하여 1일 후 실시하였으며 그 다음 23℃ 수중에서 28일 동안 표준양생을 실시하였다. 시험체는 일방향으로 이산화탄소의 침투를 유도하기 위해 5면은 에폭시 코팅을 하였다.

콘크리트의 중성화는 이산화탄소 농도가 높을수록 진행속도가 빨라지며, 대기중의 이산화탄소 농도는 일반적으로 실내에서 0.07% 전후, 실외에서 0.035%전후이다. 그러나 자연조건에서의 중성화 진행은 상당히 느리기 때문에 중성화 촉진시험에서는 이산화탄소 농도는 5~10%의 범위로 조정하는 것이 일반적이므로 본 연구에서 중성화 촉진조건으로서 이산화탄소 농도를 10%으로 하였다. 온도가 중성화 속도에 미치는 영향은 온도 60℃ 이하의 범위에서 일반적으로 온도가 높을수록 빨리 진행되며, 본 시험에서는 30℃로 설정하였다. 중성화 진행속도에 미치는 습도의 영향은 상대습도가 0% 또는 100%일 때 중성화는 진행하지 않으며 상대습도가 40~60%의 범위에서 중성화 진행속도가 최대가 되므로 상대습도 50%를 촉진시험 조건으로 설정하였다.

이상과 같은 조건으로 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 40×40×160mm 모르타 바를 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_2SO_4) 5%를 사용하였지만, 본 연구에서 황산염 촉진을 시키기 위해 황산나트륨 10%를 사용하였으며, 시험 후 28일, 60일, 91일에 길이변화를 측정하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 사용 시멘트 종류별 수화열 평가

V종 시멘트와 I종 시멘트에 플라이애쉬를 치환한 시멘트의 경우, 원전 구조물 사용 시멘트의 수화열 기준인 70cal/g(7일)을 모두 만족하고 있다. 또한 플라이애쉬의 치환율이 높을수록 수화열은 작아지고 있으며, V종 시멘트와 플라이애쉬의 치환율 20%가 7일에서의 수화열이 거의 비슷하다. 그리고 발열속도를 보면, 초기 발열속도는 플라이애쉬를 치환한 시멘트가 V종 시멘트보다 작고 치환율이 높을수록 더욱 작아지고 있다.

시멘트가 수화할 때 열의 발생은 일반적으로 3개의 단계로 분류하는데 단계 1에서 주로 에트링가이트(ettringite)의 생성에 따른 발열피크를 보이고, 단계 2에서 C_3S (Alite)의 수화가 활발하게 발생하고 또한 에트링가이트가 모노설페이트(monosulfate)수화물로 전환하며, 단계 3에서 황산지배로 수화가 서서히 진행된다. 플라이애쉬를 시멘트 일부로 치환한 경우에는 시멘트량의 감소로 단계 2에서의 C_3S 의 수화를 지연시켜 단계 3 이후에 수화 피크가 발생한다. 또한 플라이애쉬 중의 SiO_2 와 Al_2O_3 는 시멘트의 수화 생성물인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 포졸란 반응을 하여 안정된 규산칼슘 수화물(C-S-H)을 생성하므로 플라이애쉬를 사용한 경우 수화발열속도의 피크는 보통시멘트에 비해 지연되는 것이다. 외국 자료 중에서 플라이애쉬를 20% 정도 치환하여 사용하면 II종 시멘트(중용열 시멘트)를 사용한 콘크리트와 거의 동등하게 수화열을 억제할 수 있는 것으로 알려져 있다.

이상의 수화열 분석결과를 종합해보면, I종 시멘트에 플라이애쉬 치환율 20% 이상 사용하면, 현행 원전 구조물에 사용되는 V종 시멘트의 동등이상 수화열을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

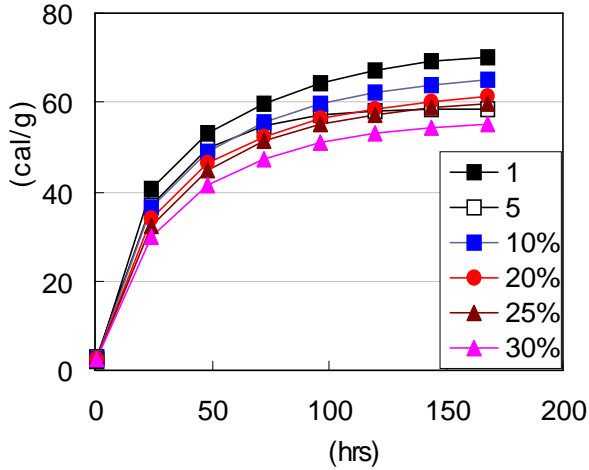


그림 1 시멘트 종류별 수화열

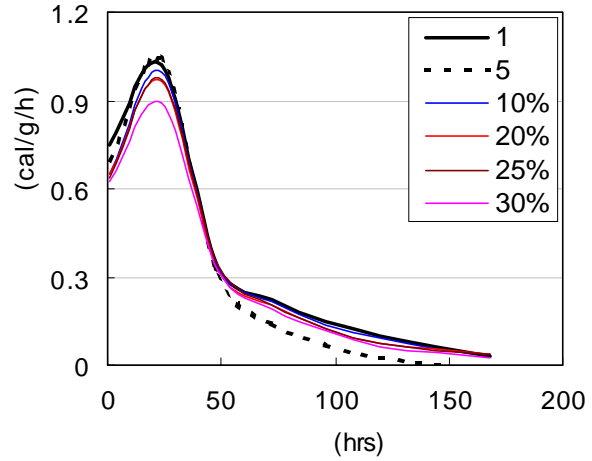
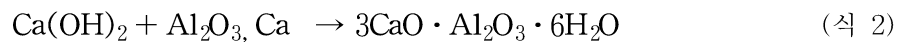
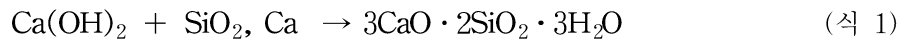


그림 2 시멘트 종류별 발열속도

3.2 강도발현 분석

그림 3~그림 4에 설계기준강도 별 모르타르의 강도발현을 나타내었다. 시험결과 V종 시멘트의 강도가 I종 시멘트의 강도보다 작고 특히 초기강도가 작게 나타났는데, 이는 V종 시멘트의 경우 초기강도에 영향을 주는 C₃A의 양을 감소시켰기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 시멘트 성분별 수화하는데 소요되는 시간은 C₃S가 7일, C₂S가 5.5개월, C₃A가 1일 정도로 알려져 있다.

I종 시멘트에 플라이애쉬를 치환한 경우에는 설계기준강도에 상관없이 재령 7, 28일에서는 치환율 10%가 가장 양호한 강도발현을 나타내고 있으나, 재령이 증가함에 따라 치환율에 관계없이 강도발현이 좋아지고 있으며 재령 91일에서는 치환율 20%까지 V종 시멘트의 강도를 상회하는 것으로 나타났다. 이처럼 재령이 증가함에 따라 플라이애쉬를 혼합한 모르타르의 강도가 증진하는 것은 플라이애쉬의 SiO₂와 Al₂O₃과 시멘트 수화반응에 생성된 수산화칼슘과 아래와 같이 포졸란 반응을 일으키기 때문으로 판단된다.



포졸란 반응은 시멘트의 수화에 의해 생성된 Ca(OH)₂가 플라이애쉬 입자의 표면에 급착되어 상당히 초기부터 진행되나, Ca(OH)₂의 피막 내측에 물이 포함된 공극상의 경계층이 존재하여 포졸란 반응 생성물이 어느 정도 침전되기까지는 강도증진에 거의 기여하지 않는다. 플라이애쉬 입자의 주변부가 포졸란 반응 생성물로 채워짐에 따라 플라이애쉬와 시멘트 페이스트 경화체는 강하게 결합하게 되어 강도가 증진된다.

3.3 적정 플라이애쉬 치환율 결정

플라이애쉬 치환율 선정 기준으로 수화열, 강도발현성 및 경제성을 고려하였다. 표 3에 적정 플라이애쉬의 치환율 선정기준을 나타내었다. 수화열의 경우 현재 원전 구조물에 사용되는 V종 정도의 수화열을 가진 치환율로서 시험결과 20%, 25%, 30%가 만족하는 것으로 나타났다. 강도발현성은 V종 시멘트 이상의 강도를 가진 치환율로서 시험결과 10%, 15%, 20%가 만족하는 것으로 나타났으며, 경제성은 수화열과 강도발현성을 만족하는 치환율 중에서 가장 높은 치환율로 선정하였는바, 이것은 가능한 한 플라이애쉬를 대량으로 사용할 수 있도록 하기 위함이다. 따라서, 상기 조건들을 모두 만족시키는 치환율인 20%를 적정 플라이애쉬 치환율로 선정하였다.

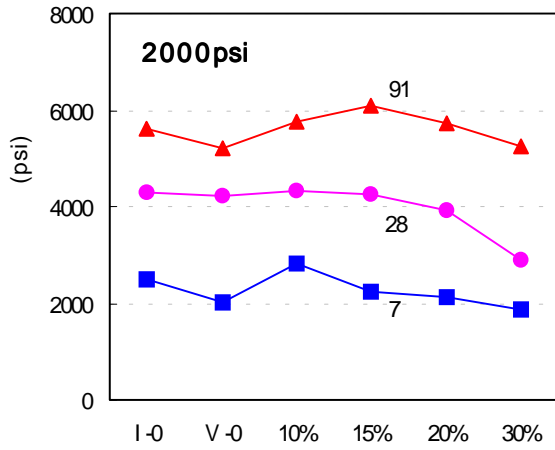


그림 3 2000psi 강도발현 결과

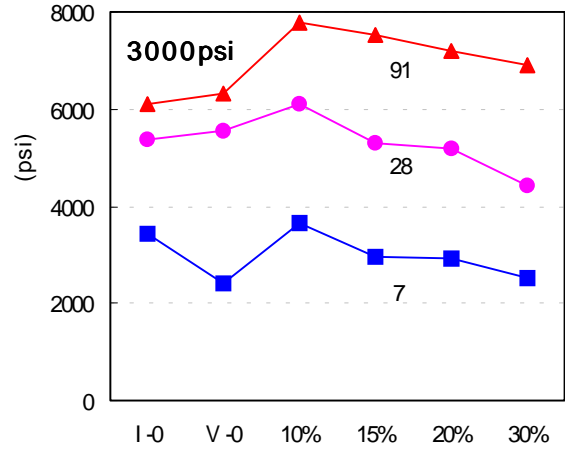


그림 4 3000psi 강도발현 결과

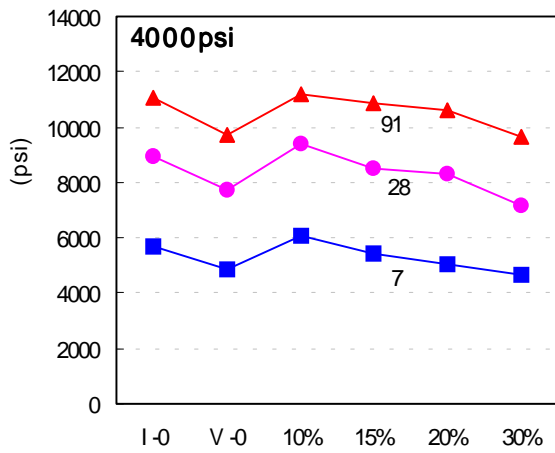


그림 5 4000psi 강도발현 결과

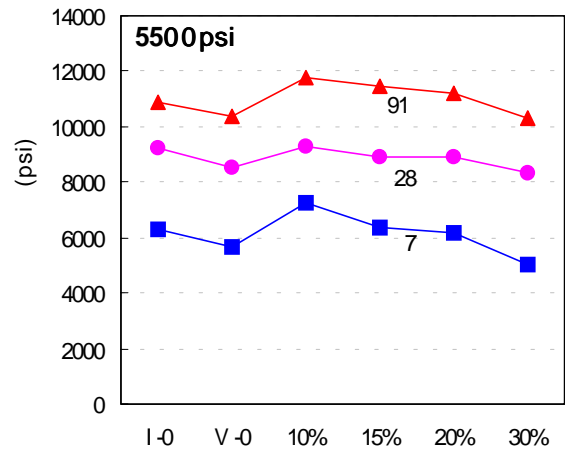


그림 6 5500psi 강도발현 결과

표3 적정 플라이애쉬 치환율 선정 기준

기준항목	판단기준	만족하는 치환율
수화열	V종 시멘트 정도	20%, 25%, 30%
강도발현성	V종 시멘트 이상	10%, 15%, 20%
경제성	가능한 대량 사용	20%
적정 치환율		20%

3.4 플라이애쉬 치환에 따른 내구성 평가

3.3에서 선정된 적정 플라이애쉬 치환율 20%를 사용한 콘크리트의 내구성을 검증하기 위한 기초단계로서 모르타 시험체를 대상으로 실시한 중성화, 염해, 황산염 시험결과는 다음과 같다.

(1) 염해 시험결과

그림 7은 염화나트륨 3.6% 수용액에 28일, 60일, 90일 동안 침적시킨 배합별 모르타의 염해 시험결과이다. 여기서 염해 시험결과는 모르타 표면으로부터 30mm 깊이까지의 염화물 농도를 평균한 값으로서, 설계기준강도에 상관없이 I종+플라이애쉬 20% < I종 < V종의 순으로 염화물 농도가 커지고 있음을 알 수 있으며 그 차이는 시험 재령이 증가함에 따라 더욱 커지는 경향을 나타내고 있다. 이것은 플라이애쉬를 사용함으로써 염해에 대한 저항성이 커지며, 재령이 증가함에 따라 더욱 내염해성이 향상된다는 것을 의미하는 것이다. 이처럼 플라이애쉬를 사용함으로써 내염해성이 향상되는 것은 포졸란 반응에 의한 세공구조의 밀실화, 투수성 감소 때문이다. 그리고 사용 시멘트별 내염해성을 분석해보면, V종 시멘트를 사용한 것이 가장 취약한 것으로 나타났는데, 이것은 V종 시멘트의 경우 I종 시멘트에 비해 프리텔씨염 생성에 관련된 C₃A 성분이 적기 때문인 것으로 판단된다.

설계기준강도에 대한 영향은 플라이애쉬의 혼입 유무 및 시멘트 종류에 상관없이 강도가 높을수록 염화물 침입속도가 지연되는데, 이것은 강도가 높을수록 경화체 조직이 치밀해져 염소이온의 침투를 억제시키기 때문이다. 또한 설계기준강도가 높을수록 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트가 V종, I종 시멘트에 비해 염화물 침입속도에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났는데, 강도가 높을수록 시멘트의 수화가 빨리 진행되어 Ca(OH)₂를 빨리 생성하고 그 만큼 포졸란 반응이 빨리 발생하여 경화체 조직이 밀실해졌기 때문인 것으로 추정된다.

이상의 시험 결과에서 알 수 있듯이 플라이애쉬를 사용하면, 현재 V종 시멘트를 사용하는 콘크리트보다 내염해성 측면에서 우수한 콘크리트 제조가 가능하고, 그 효과는 설계기준강도가 큰 배합일수록 커질 것으로 판단된다.

(2) 중성화 시험결과

그림 8은 배합 종류별 중성화속도 계수이다. 설계기준강도에 관계없이 I종 < V종 < I종+플라이애쉬 20%의 순서로 중성화속도가 빨리 진행되고 있으나, 이러한 경향은 시험재령 초기에서 뚜렷하고 재령이 증가할 수록 둔화되고 있다. 플라이애쉬를 혼입한 모르타의 중성화가 빨리 진행되는

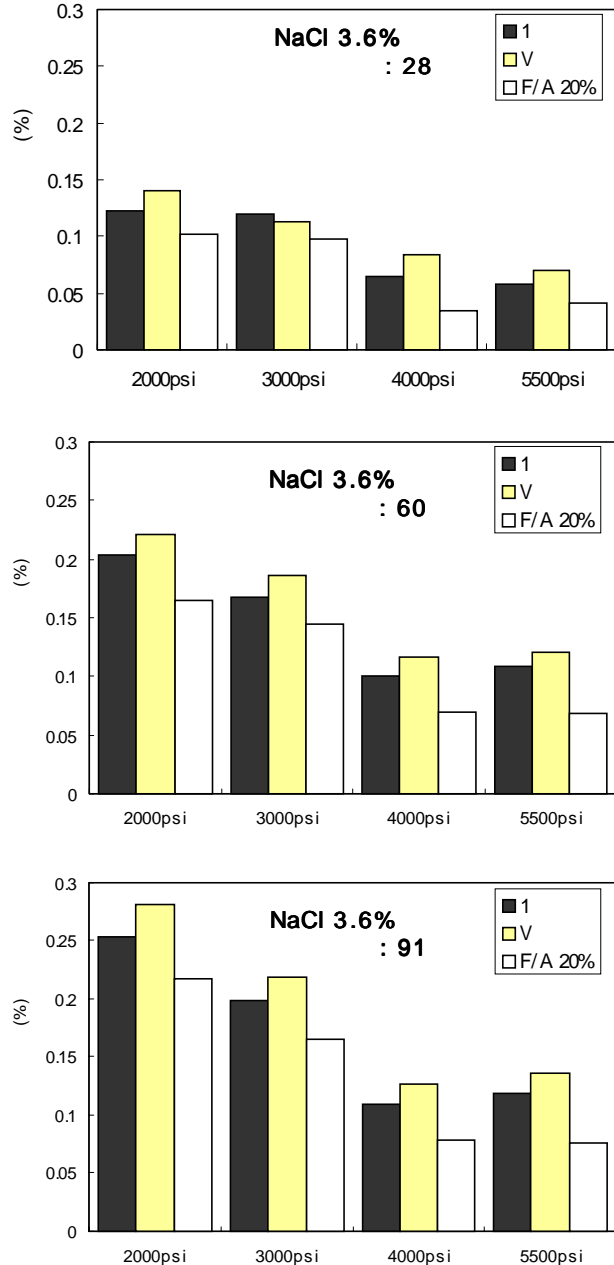


그림 7 염해 시험결과

것은 플라이애쉬 치환률만큼 시멘트량이 감소된 것과, 포졸란 반응에 의해 알칼리성을 가진 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 소비되어 세공용액의 pH가 저하되었기 때문이다. 그림 9는 시멘트량과 중성화속도계수의 관계를 나타낸 것으로서 시멘트량이 감소함에 따라 중성화속도가 빨라지고 있음을 알 수 있다.

설계기준강도별 중성화 진행속도를 보면 설계기준강도가 높을수록 중성화 진행 속도가 지연되고 있다. 즉, 3000psi 이하의 강도에서는 플라이애쉬를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 비교 시 중성화 속도 측면에서 큰 차이를 보이고 있으나, 원전 주요 구조물에 주로 사용되는 4000psi 이상의 강도에서는 그 차이가 현저히 감소하고 있으며 설계기준재령인 91일에서는 거의 비슷한 정도의 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 고강도화에 의한 경화체 조직의 밀실화로 이산화탄소의 침입이 상당히 억제되었기 때문으로, 높은 강도(즉, 낮은 물시멘트)가 유효한 중성화 억제 대책의 일환임을 보여주는 것이다. 그림 10은 중성화 촉진시험을 시작할 때(재령 28일)의 압축강도와 중성화속도계수와의 관계를 나타낸 것으로서 강도가 증가됨에 따라서 중성화속도가 지연되는 경향을 보이고 있다. 이처럼 플라이애쉬를 사용함으로써 중성화속도가 빨라지나, 고강도화될수록 중성화속도 차이는 그리 크지 않음을 알 수 있는데 이것은 수산화칼슘보다 경화체조직의 치밀화가 중성화진행 속도에 대한 지배 요인임을 나타내는 결과라고 사료된다.

이상의 결과를 종합해 보면, 플라이애쉬를 사용한 경우가 V종 시멘트를 사용하는 현행 콘크리트보다 중성화 측면에서는 다소 불리하나, 낮은 물-시멘트비의 고강도 콘크리트를 주로 사용하는 원전 구조물의 특성 및 내구성 설계 개념 도입으로 사용수명 동안의 건전성을 입증하는 등 현재 진행되고 있는 내구적 플라이애쉬 혼합 콘크리트 개발 분야에서 해결방안을 제시할 예정이다.

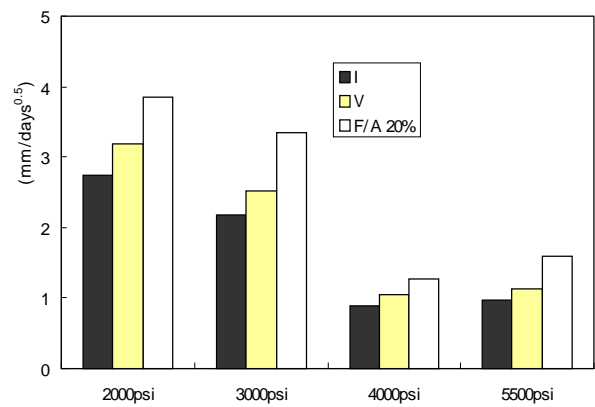


그림 8 배합 종류별 중성화속도 계수

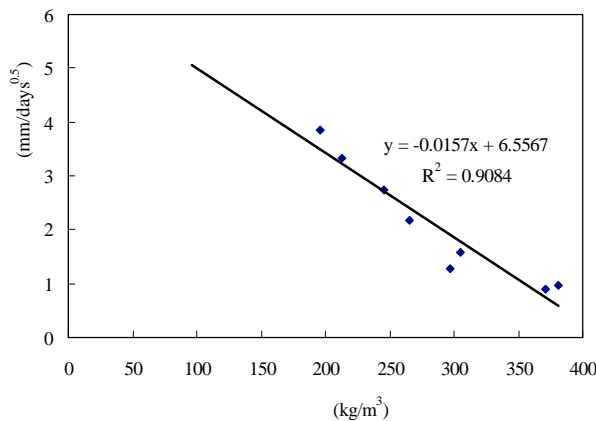


그림 9 시멘트량과 중성화속도 계수와의 관계

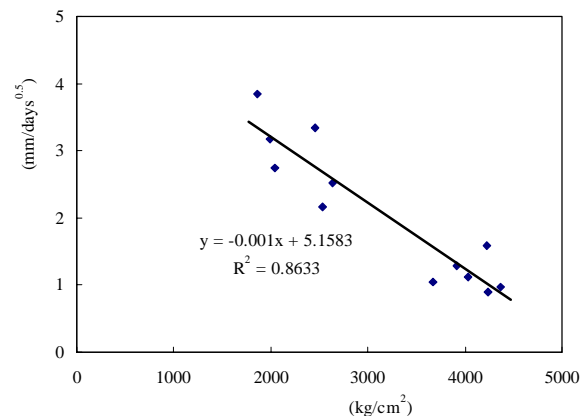


그림 10 압축강도와 중성화속도 계수와의 관계

(3) 황산염 침해

그림 11은 황산나트륨 10% 수용액에 28일, 60일, 90일 동안 침적시킨 배합별 모르타의 황산염 침해 시험결과이다. 황산염 침해속도는 I종+플라이애쉬 20% < V종 < I종 순으로 증가함을 알 수 있다. I종 시멘트보다 V종 시멘트가 황산염에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났는데 이는 V종 시멘트의 경우 황산염과 반응하여 침상결정인 에트링가이트를 생성하는 C_3A 의 함량을 저감시켰기 때문이다. 그리고 플라이애쉬를 사용한 경우의 황산염에 대한 저항성은 V종 시멘트의 동등 이상

으로 나타났다. 또한, 설계기준강도가 높을수록 시멘트 종류에 상관없이 황산염에 대한 저항성이 증가함을 알 수 있다. 이처럼 플라이애쉬를 사용함으로써 황산염에 대한 저항성은 우수한 것은 포졸란반응에 의해 황산염에 대해 쉽게 침식되는 수산화칼슘이 소비되어 석고와 에트링가이트의 생성이 억제되고 또한 포졸란반응의 생성물로 인해 경화체 조직이 치밀화되어 SO_4^{2-} 가 경화체 내부로의 침투를 억제시키기 때문으로 사료된다.

이상의 시험결과로 볼때, 플라이애쉬를 사용하면 V종 시멘트를 사용한 현재 콘크리트의 동등이상으로 황산염에 저항성을 가진 콘크리트의 제조가 가능할 것으로 판단된다.

(4) 내구성 시험 결과의 종합적 검토

이상과 같이 I종, V종, I종+플라이애쉬 20%으로 제조된 모르타에 대해 내구성을 검토한 결과, 플라이애쉬를 사용함으로써 염해와 황산염 침해에 대한 저항성은 우수하나, 중성화에 대해 다소 불리한 것으로 나타났다. 이처럼 내구성에서 상반되는 결과를 얻은 것은 플라이애쉬의 포졸란 반응으로 조직이 치밀화와 수산화칼슘의 소비가 염해, 황산염 및 중성화에 다르게 작용하기 때문이다. 즉 포졸란 반응에 의해 조직이 치밀화되며 염소이온과 황산염이온이 경화체 내부로의 침투가 억제된다. 또한 수산화칼슘의 소비에 의해 알칼리도가 저하되기 때문에 중성화속도가 빨리 진행되어 중성화 측면에서 불리하나 수산화칼슘이 소비되면 석고와 에트링가이트의 생성이 억제되므로 황산염 측면에서 유리하게 작용한다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서 얻어진 주요 결과 및 향후과제를 정리하면 다음과 같다

(1) 적정 플라이애쉬 치환율 결정

원전 콘크리트 구조물에 적합한 플라이애쉬 치환율에 대해 수화열, 강도발현 및 경제성 측면에서 검토한 결과, 20%를 적정 플라이애쉬 치환율로 결정하였다.

(2) 플라이애쉬 혼합 시멘트 모르타의 내구성 평가

도출된 플라이애쉬 적정 치환율 20%와 I종 및 V종 시멘트에 대해 설계기준강도별 모르타의 내구성 시험을 실시한 결과, 플라이애쉬 20%를 사용함으로써 V종 시멘트를 사용하는 현재 콘크리트보다 염해, 황산염 측면에서 우수한 내구 특성을 가진 콘크리트의 제조가 가능할 것으로 판단되며, 설계기준강도가 높은 배합일수록 플라이애쉬 혼입 효과를 더욱 크게 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 플라이애쉬를 사용함으로써 중성화 측면에서 다소 불리한 결과를 나타냈으나, 낮은 물-시멘트비의 고강도 콘크리트를 주로 사용하는 원전 구조물의 특성을 고려시 내구성 설계

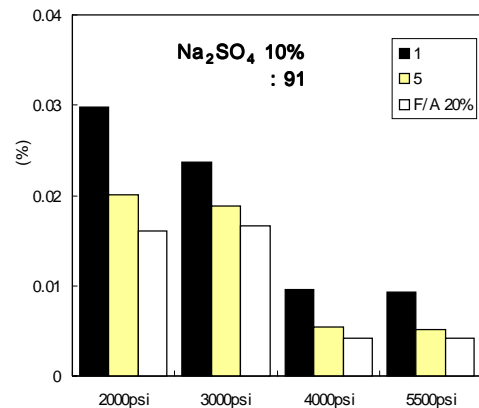
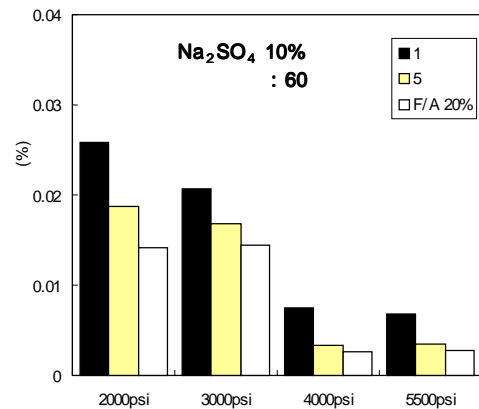
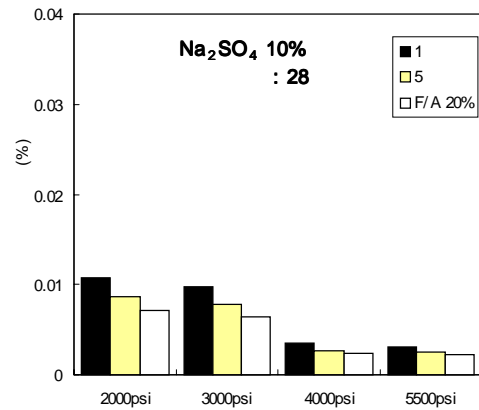


그림 11 재령별 황산염 침해 시험결과

개념의 검토를 통하여 사용기간 동안의 건전성 확보에는 지장이 없을 것으로 판단된다.

(3) 향후과제

실제 원전 구조물에 사용되는 배합을 고려한 콘크리트 공시체에 대해 수화열, 장기거동 특성 및 종합적 내구성 평가 시험을 실시하고, 그 결과의 분석 및 내구성 설계 개념을 도입하여 플라이애쉬 혼합 콘크리트의 우수성 입증 및 원전 사용 설계기준강도별 최적배합을 도출하고 현장 실무자를 위한 배합설계지침서를 제시할 예정이다.

참 고 문 헌

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, “플라이애쉬 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. 일본토목학회, “플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 중성화와 철근 발청에 관한 장기연구(최종 보고)”, 1987
19. K. Torii, K. Taniguchi and M. Kawamura, “Sulfate resistance of high fly ash content

- concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 4, 1995.
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.
 21. M. Pigeon and H. Hornain, "Surface microstructure and scaling resistance of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 11, 1996.
 22. T. D. Larson, "Air entrainment and durability aspects of fly ash concrete", *Proceedings of ASTM*, Vol.64, 1964.
 23. P. K. Metha, "Testing and correlation of fly ash properties with respect to pozzolanic behaviour", *Electric Power Research Institute Report CS-3314*, 1984.
 24. 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.