

염화물 및 황산염 복합환경 하에서의 열화특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Deterioration Characteristics under Combined Exposure Conditions of Chlorides and Sulfates

오 병 환^{*} 인 광 진^{**} 강 의 영^{***} 김 지 상^{****} 서 정 문^{*****}
Oh Byung-Hwan In Kwang-Jin Jiang Yi-Rong Kim Ji-Sang Seo Jeong-Moon

ABSTRACT

Test results on the deterioration process of concrete under single and combined attacks of chloride penetration have been obtained. After test period of 52 weeks, it is found that the internally penetrated chloride ion contents are less in the single attacks of chloride than the combined attacks of chloride and sulfate. Both the diffusion coefficients and surface chloride concentration derived from the chloride profiles showed a time dependence. Also the performance of fly ash-blended cements was observed to be better than plain cements in retarding chloride attack. However it should be needed that improved chloride diffusion model for the combined deterioration process.

1. 서 론

구조재료로서의 콘크리트의 중요성이 커지면서 콘크리트를 재료로 한 많은 구조물들이 건설되고 있다. 특히 지하구조물이나 해양구조물, 하수처리구조물과 같이 열악한 환경에 노출된 구조물의 건설이 증가하고 있는 실정이다. 이러한 구조물들은 물리·화학적 요인 등에 의해서 시간이 경과함에 따라 성능저하 현상이 일어나게 되어 설계수명기간 동안 시설물 본래의 안전성과 기능성이 확보되기 어렵다.

기존의 콘크리트 구조물의 설계에 있어서 설계자들은 대부분 재료의 강도특성에 주의를 기울여 왔다. 그러나 최근 들어 구조물의 수명예측을 위한 재료의 내구성에도 많은 연구가 수행되고 있으며 이러한 내구성을 고려해 설계된 콘크리트 구조물은 성능저하 현상에 대하여 저항력을 가지게 되어 내구성이 구조물 설계에 있어서 하나의 중요한 인자로 대두되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 실험을 통해 콘크리트 구조물의 대표적인 성능저하 원인인 염해 단일 및 염해와 황산염이 동시에 작용할 때의 열화특성을 규명하여 염해 단일열화 특성과 황산염 열화환경하의 복합열화특성을 고찰하는데 있다.

- * 정회원, 서울대 토목공학과 교수
- ** 정회원, 서울대 토목공학과 석사과정
- *** 정회원, 서울대 토목공학과 박사수료
- **** 정회원, 서경대 토목공학과 교수
- ***** 정회원, 한국원자력연구소 종합안전평가팀장, 공학박사

2. 실험과정 및 방법

2.1 실험변수 및 배합

본 실험에서는 고강도의 H배합만을 사용하였으며, 플라이애쉬의 염소이온 확산특성을 분석하기 위해 플라이애쉬를 0% 및 20% 혼입한 실험변수를 사용하였다. 또한, 황산염 환경하에서의 내황산염 시멘트인 5종 시멘트의 효과를 고려하기 위해 1종 및 5종 시멘트를 사용하여 각각에 대한 침지실험을 수행하였다. 표 1에는 본 실험에서 사용된 실험변수 및 상세배합이 나타나 있다.

표 1 실험변수에 따른 상세배합

실험변수	Cement Type	W/B	단위시멘트량 kg/m ³	플라이애쉬량 kg/m ³	단위수량 kg/m ³	잔골재량 kg/m ³	굵은골재량 kg/m ³
H1-FA00	Type I	0.38	450	-	171	621	1034
H5-FA00	Type V		450	-	171	621	1034
H5-FA20			360	90	171	609	1014

2.2 실험방법

본 연구에서는 염소이온 및 황산염 이온이 복합적으로 작용하는 경우의 염소이온 확산특성을 규명하기 위해 염수 단일용액과 염수와 황산염 복합용액 침지실험을 실시하였다. 표준 침지시편으로는 길이 10cm, 직경10cm의 원주형 시편을 사용하였으며, 염소 이온의 일방향 침투가 일어나도록 시편의 측면을 불투수성 에폭시로 코팅하였다. 이들 시편은 기존구조물의 견습이 반복되는 효과를 고려하여 1주일 용액침지와 1주일 기중노출을 반복하였다. 용액의 농도는 5%염화나트륨 단일용액 및 5%염화나트륨+10%황산나트륨 복합용액을 사용하였으며 침지시간 및 표면으로부터의 깊이에 따른 산가용성 염소이온 침투량을 분석하였다. 한편 본 연구에서는 채취된 시료로부터 산가용성 염화물을 추출하기 위해 ASTM C1152-97에 제시된 방법을 따랐다.

2.3 사용재료

본 실험에서는 국내 S사에서 생산된 1종 및 5종 시멘트를 사용하였으며, 굵은 골재는 안성에서 생산된 쇄석골재, 잔골재는 강사를 사용하였다. 표 2에는 사용된 시멘트 및 플라이애쉬의 화학조성이 나타나 있다.

표 2 시멘트 및 플라이애쉬의 화학조성

종류	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	F-CaO	Ig-loss	Blaine (cm ² /g)
1종 시멘트	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	0.12	0.78	2.14	1.12	1.61	3,228
5종 시멘트	22.37	3.87	4.67	62.77	2.54	0.09	0.54	1.75	0.57	1.40	3,260
플라이애쉬	61.75	23.97	4.81	3.41	0.82	0.50	1.11	0.66	-	2.97	4,250

3. 실험 결과 및 분석

3.1 염소이온 프로파일

각 실험변수의 재령별 염소이온 프로파일을 염수 단일침지 및 염수, 황산염 복합침지에 대하여 그림 1에 제시하였다. 12주, 28주, 52주에 대한 염소이온 농도를 측정하였고, 양생기간이 증가할수록 콘 크리트 속으로 침투된 염소이온의 농도가 크게 나타났고, 반면에 깊이가 증가할수록 침투된 염소이온의 농도가 적은 것으로 나타났다. 재령에 따른 염소이온 침투량의 증가정도는 염수 단일침지시 복합 침지시에 비하여 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

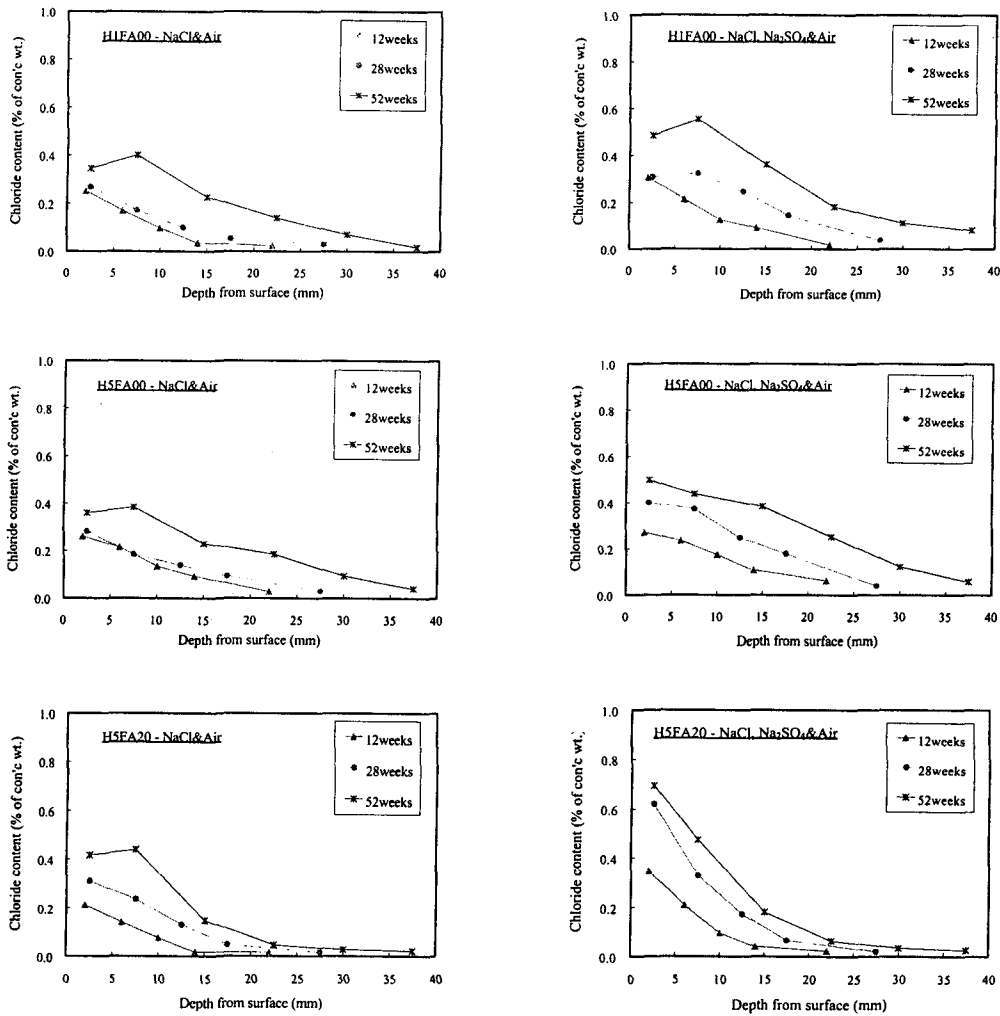


그림 1 재령별 염수단일침지 및 염수+황산염 복합침지시 염소이온 프로파일

3.2 표면염소이온농도(Cs) 및 염소이온확산계수(D)

앞에 제시된 염소이온 프로파일로부터 다음의 염소이온 확산모델식을 이용한 선형회기분석을 통하여 표면염소이온농도와 염소이온의 확산계수를 구하여 그림 2에 나타내었다.

$$C(x, t) = C_i + (C_0 - C_i) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right]$$

여기서, C_0 : 콘크리트 표면의 시간에 따른 염소이온 농도

C_i : 콘크리트 내부의 초기 염소이온농도

$C(x, t)$: 시간 t , 거리 x 에서의 염소이온농도

이 그래프를 통하여 표면염소이온의 농도는 시간에 따라 증가하고 반대로 확산계수는 시간에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 그 정도의 차이는 있는데 염수단일용액 침지의 경우에는 시간에 따른 표면염소이온의 증가 정도가 염수 및 황산염 복합용액 침지시에 비해 비교적 완만한 것으로 나타났다. 이것은 황산염이 콘크리트 수화물인 C_3A 와 반응하는 과정에서 에트린가이트와 같은 팽창성 산물을 생성하여 부피팽창에 의한 콘크리트 표면의 열화가 염소이온의 침투를 원활하게 한 것으로 보인다. 실제로 실험을 하는 과정에서 황산염 복합용액 침지의 경우 28주정도 경과하면서 표면박리가 발생하는 것이 관찰되었다.

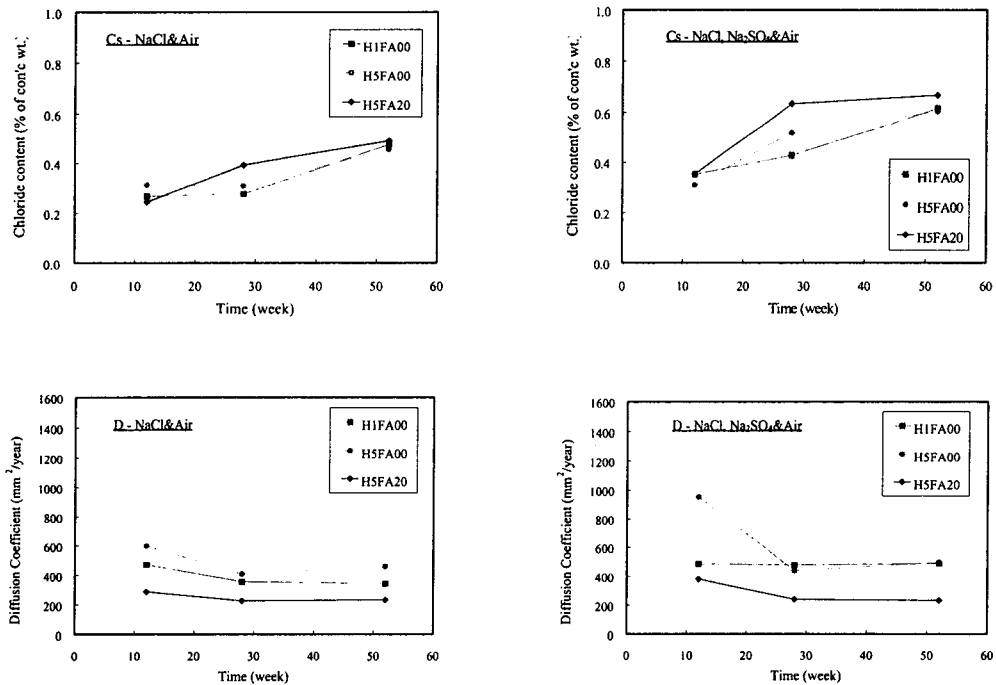


그림 2 배합별 염수단일침지 및 염수+황산염 복합침지시 표면염소이온농도와 염소이온확산계수

그러나 확산계수의 경우 염수 단일용액과 황산염 복합용액의 경우 별다른 차이점을 발견할 수가 없었으며 28주 이후에서는 확산계수의 감소가 크게 나타나지 않았다. 이것은 재령초기에는 계속적인 콘크리트 강도발현으로 인해 염소이온의 확산계수가 감소하게 되지만, 강도가 충분히 발현되는 장기재령 쪽으로 갈수록 확산계수는 감소함이 없이 일정하게 유지되는 것으로 생각된다.

3.3 염수 단일용액 침지시와 황산염 복합용액 침지시의 비교

각 배합별 시편을 염수 단일용액과 황산염 복합용액에 52주 침지한 후 침투된 염소이온의 양을 그림 3에 제시하였다.

H1FA00과 H5FA00의 경우 복합용액에 침지한 경우가 크게 나타나기는 하나 침투 경향은 비슷한 것은 앞서서도 언급했듯이 확산계수의 차이는 거의 없으나 염수 단일용액의 침지시보다 황산염과의 복합용액 침지시의 표면염소이온 농도가 더 크게 나타나는 효과에 기인한 것으로 판단된다.

또한 H5FA20은 앞의 두 배합의 경우와 다른 형상을 보이는데 이것은 플라이애쉬의 효과를 반영한다. 즉 H5FA20의 경우 콘크리트 표면에서의 염소이온 침투량은 다소 증가하지만 내부로 갈수록 침투량이 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 플라이애쉬를 사용한 콘크리트가 시간이 지남에 따라 포졸란 효과로 인해 더욱 밀실해지고 강도가 커지는 것에 기인하는 것으로 보인다. 따라서 염해를 받을 우려가 있는 콘크리트 구조물을 건립할 때 플라이애쉬의 사용은 염해에 대한 내구성 향상을 도모할 수 있는 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 여러 가지 열악한 환경에 노출되어 있는 콘크리트 구조물의 성능저하 현상 중 철근 부식과정과 관련하여 염소이온의 침투 특성을 고찰하였다. 특히, 단일 염소이온이 존재하는 경우와 함께 염소이온과 황산염 이온이 동시에 존재하는 경우에 대한 염소이온 침투 특성을 고찰하였다.

본 연구에서 수행된 침지실험에 의하면 염화나트륨과 황산나트륨 복합용액에 침지한 경우 내부로 침투되는 염소이온량은 염화나트륨 단일용액에 침지한 경우보다 다소 큰 것으로 나타났으며, 표면염소이온의 농도는 시간에 따라 증가하고 반대로 확산계수는 시간에 따라 다소 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 플라이애쉬를 혼입한 경우 내부로의 염소이온 침투량은

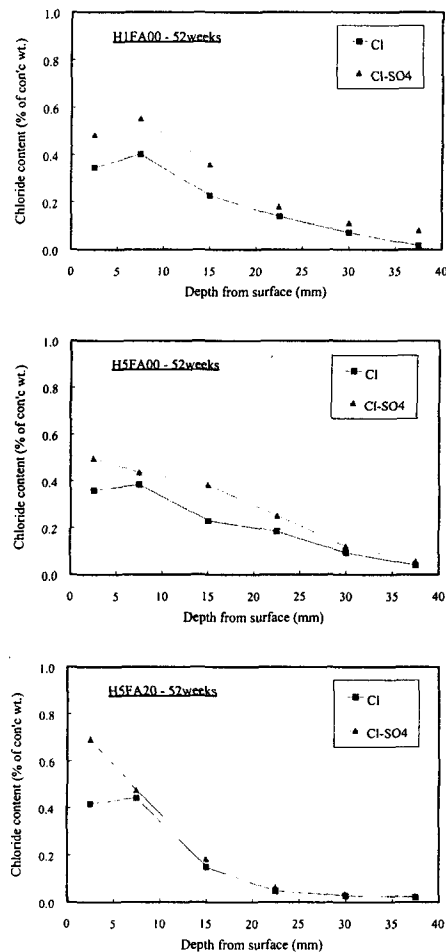


그림 3 염수단일침지 및 염수+황산염 복합침지 52주 후의 배합별 Chloride Profile 비교

감소되는 효과가 있었다.

종합적으로, 복합열화와 관련하여 더욱 많은 연구결과가 축적되면 복합된 노출환경하에서의 콘크리트 구조물 내부로의 염소이온 확산을 더욱 정확하게 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 오병환 외, 원전격납건물 구조재료의 열화실험 및 열화모델개발, 한국원자력연구소, 2001. 3
2. A. Costa and J. Appleton, "Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I : Main parameters affecting chloride penetration", *Materials and Structures*, Vol. 32, May 1999, pp252-259
3. A. Costa and J. Appleton, "Chloride penetration into concrete in marine environment - Part II : Prediction of long term chloride penetration", *Materials and Structures*, Vol. 32, June 1999, pp354-359
4. T.K.Alkadhimi, B.G.Ikzer, S.F.Altakarli, "The combined effect of chlorides and sulphates present in water and aggregates on properties of concrete", *Materials and Structures*, 1988, pp436-442
5. P.J.Tumidajski & G.W.Chan, "Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity", *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 4, 1996, pp551-556
6. Omar Saeed Baghabra Al-Amoudi, Mohammed Maslehuddin, "Role of chloride ions on expansion and strength reduction in plain and blended cements in sulfate environments", *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 1, 1995, pp. 25-33
7. James R. Clifton, Lawrence I. Knab, "Service Life of Concrete", NISTIR 89-4086, National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, 1989.