

# 콘크리트내의 염소이온 침투특성에 미치는 복합 열화작용의 영향

## Effects of Combined Attacks on Chloride Diffusivity in Concrete

오 병 환 <sup>*</sup>	강 의 영 <sup>**</sup>	정 상 화 <sup>**</sup>
Oh, Byung Hwan	Jiang, Yi Rong	Jung, Sang Hwa
장 승 엽 <sup>**</sup>	인 광 진 <sup>***</sup>	서 정 문 <sup>****</sup>
Jang, Seung Yup	In, Kwang-Jin	Seo, Jeong Moon

### ABSTRACT

The studies on chloride diffusion of concrete have been done so far by many researchers. However, there are few studies that present the effects of other attacks on chloride diffusion properties. Therefore, in this study the experiments are carried out to show the effects of combined attacks, such as carbonation, sulfate attacks, on chloride diffusivity in concrete. The specimens are made by varying cement type and replacement ratio of fly ash. The results show that cement type and replacement of fly ash do not affect greatly chloride diffusion properties. And concrete treated by combined attacks show a little higher chloride content than those treated by chloride solution only. Therefore, the effects of these factors should be taken into account in predicting the penetration of chloride ion in concrete.

### 1. 서 론

교량 및 해변에 위치한 철근 콘크리트 구조물은 제설제 살포 및 해수작용 등에 따라 염화물이 콘크리트 내부에 침투되고, 염소이온의 화학 작용에 의해 철근 표면의 부동태막이 파괴되어 철근의 부식을 일으키며 구조물의 내구성에 큰 영향을 미치게 된다.

따라서, 이와 관련하여 국내외 많은 연구자들이 염해환경 하에서의 콘크리트 구조물 염소이온 확산 특성의 규명, 열화모델의 제시, 구조물 내구연한의 예측 등 다양한 분야에서 연구를 수행하였다. 그러나 철근 콘크리트 구조물은 단일 염해작용만을 받는 것이 아니라, 황산염해, 중성화 혹은 동결융해 등의 작용을 복합적으로 받을 수 있어 이러한 복합열화조건 하에서의 콘크리트 열화특성에 대한 연구도 중요할 것으로 판단된다.

- \* 정회원, 서울대 토목공학과, 교수
- \*\* 정회원, 서울대 토목공학과, 박사과정
- \*\*\* 정회원, 서울대 토목공학과, 석사과정
- \*\*\*\* 정회원, 한국원자력연구소 종합안전평가팀, 공학박사

그러므로 본 연구에서는 염해, 황산염해 및 중성화 작용 등 복합열화작용이 콘크리트의 염소이온 침투특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획 및 배합사항은 표 1과 같다. 먼저 콘크리트 배합은 시멘트 종류 및 플라이애쉬 치환 여부를 변수로 하여, 목표슬럼프( $15 \pm 2.5\text{cm}$ )와 목표공기량( $4.5 \pm 1.5\%$ )을 만족하도록 예비시험에 의해 정한다. 제작한 시편은 28일간 표준양생을 실시한 후 표 중에서 제시한바와 같이 세가지 방법에 의해 처리하며, 실험항목은 수중양생 28일의 경우, 112일(28일+12주)의 경우 그리고, 수중양생 28일 후 12주간 염수, 황산염 및 중성화 3중 복합열화작용을 받은 경우 각각에 대하여 콘크리트의 압축강도와 동탄성계수를 측정하고 또한, 침지직전, 침지후 12주 및 28주에서의 시편 깊이별 염소이온 침투량을 측정한다.

표 1. 실험계획 및 배합사항

구분	기호	시멘트 종류	플라이애쉬 치환율(%)	W/B	단위시멘트량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	플라이애쉬량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	단위수량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	잔골재량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	굵은골재량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
실험변수 및 배합사항	I-00	1종	0	0.38	450	-	171	621	1034
	V-00	5종	0		450	-	171	621	1034
	V-20		20		360	90	171	609	1014
시편처리	- 1주 5% 염화나트륨 단일용액침지와 1주 기중방치 반복 - 1주 5% 염화나트륨, 10% 황산나트륨 복합용액침지와 1주 기중방치 반복 - 1주 5% 염화나트륨, 10% 황산나트륨 복합용액침지와 1주 10% CO <sub>2</sub> 촉진중성화 반복								
실험항목	- 강도 (28일, 112일[28일+12주]) - 동탄성계수 (28일, 112일[28일+12주]) - 염소이온침투량 (측정시기 : 침지직전, 침지후 12주, 28주; 깊이 : 5개 깊이)								

### 2.2 사용재료 및 실험방법

본 연구에서 시멘트는 국내 S사에서 생산된 1종 및 5종 시멘트(비중 : 3.15)를 사용하고, 플라이애쉬는 보령화력산(비중 : 2.1), 굵은골재는 안성산 쇄석(비중 : 2.6, 조립율 : 6.7), 잔골재는 강사(비중 : 2.55, 조립율 : 2.6)를 사용한다. 시멘트 및 플라이애쉬의 화학조성은 표 2와 같다.

실험방법으로서 압축강도 시험은 KS F 2405, 동탄성계수는 KS F 2450의 규정에 따라 실시한다. 침지시편은 직경과 높이가 10cm의 원주형 시편을 제작하고, 염화물 침투 및 중성화 진행 등이 1방향으로 발생하도록 주변을 에폭시 수지로 코팅한다. 침지용액은 5% 염화나트륨 단일용액과 이에 10% 황산나트륨을 혼합한 복합용액을 사용하고, 촉진 중성화 시험은 CO<sub>2</sub> 농도 10%, 온도 30°C, 상대습도 60%의 조건에서 실시한다. 염화물량의 측정방법은 ASTM C 1152-97 및 ASTM C 1218-97의 규정에 따라 실시하고, 시료의 채취는 로터리식 임팩트 드릴을 사용한다.

표 2. 시멘트 및 플라이애쉬의 화학조성

구분	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	F-CaO	Ig-loss	Blaine (cm <sup>2</sup> /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 압축강도와 동탄성계수 특성

그림 1과 2는 수중양생 28일의 경우, 112일의 경우 그리고, 수중양생 28일 후 12주간 3중 복합 열화작용을 받은 경우 각각에 대한 콘크리트 압축강도와 동탄성계수비를 나타낸 것이다. 먼저, 압축강도는 28일간 표준양생 후 시멘트 종류, 플라이 애쉬 치환여부 등에 따라 별 차이 없는 것으로 나타났고, 그 후 12주간 계속적으로 수중양생한 시편은 12주간 5% 염화나트륨, 10% 황산나트륨 복합용액과 10% CO<sub>2</sub> 촉진중성화에 의한 3중 복합 열화작용을 받은 것보다 약간 높은 강도를 보이고 있지만 주목할만한 차이는 없었다. 기존의 연구결과에서는 실 구조물의 경우 중성화 작용에 의해 콘크리트 압축강도는 저하되는데, 실험실에서 촉진중성화 시험을 실시한 경우는 강도가 오히려 높아지는 경향이 있다고 보고되고 있다. 따라서, 본 연구에서 3중복합 열화작용에 의해 압축강도에 큰 변화가 없는 것은 이와 같은 촉진중성화에 의한 강도향상효과와 황산염 침지에 의한 강도저하효과가 복합적으로 작용한 결과로 분석된다. 한편, 28일간 표준양생 시편에 대한 동탄성계수비도 압축강도와 유사한 경향을 보이고 있다.

#### 3.2 염소이온 침투특성

##### 3.2.1 초기 염소이온 함유량

그림 3은 콘크리트 종류별로 초기(침지직전) 염소이온량을 나타낸 것이다. 재료 자체에 함유하고 있는 염소이온량으로서 산가용성 시험결과와 수용성 시험결과 공히 I-00, V-00, V-20의 순으로 약간 큰 것으로 나타났는데, 침지 후의 염소이온 침투량에 비해 그 차이는 매우 미미하므로 거의 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 단, 실무에서는 특수 시멘트, 혹은 기타 혼화재료를 혼합할 때 이러한 재료의 염소이온 함유량 그리고 철근방청에 대한 영향 등을 사전에 검증할 필요가 있을 것으로 사료된다.

##### 3.2.2 콘크리트 배합에 따른 염소이온 침투특성

그림 4는 단일열화조건(1M : 1주 5% 염화나트륨

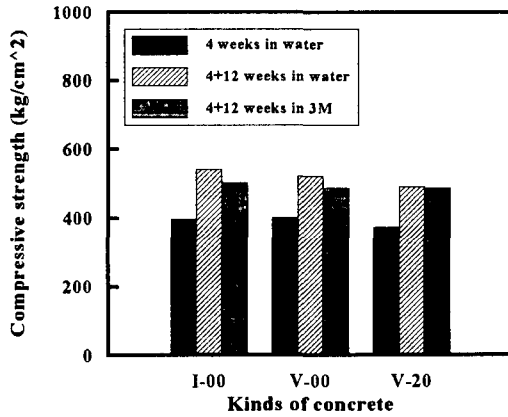


그림 1. 열화작용에 따른 콘크리트 압축강도변화

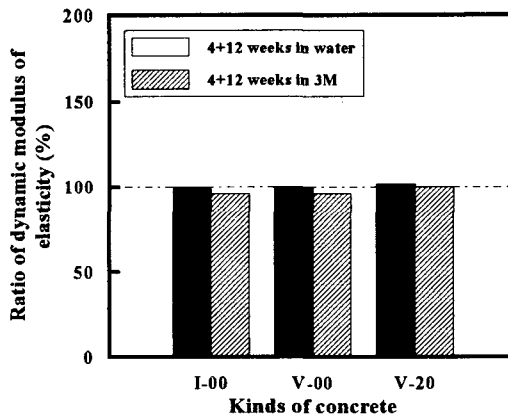


그림 2. 열화작용에 따른 콘크리트 동탄성계수비

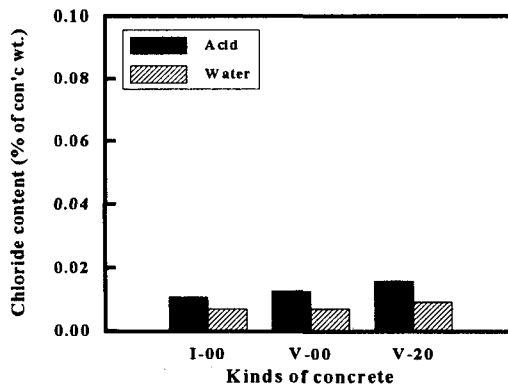


그림 3. 콘크리트 종류별 초기 염소이온함유량

를 단일용액침지, 1주 기중방치 반복)하에서 콘크리트 배합에 따른 염소이온 침투특성을 나타낸 것이다. 시멘트 종류, 플라이애쉬 치환여부에 따라 야간의 차이는 있지만, 뚜렷한 경향을 발견하기는 어려웠다.

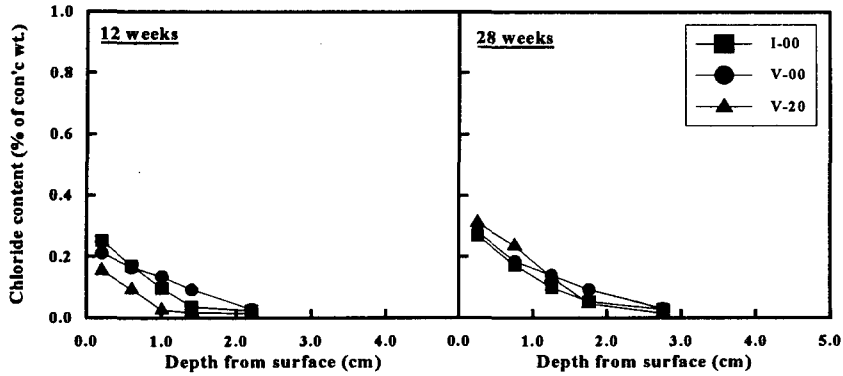


그림 4. 콘크리트 배합에 따른 염소이온 침투특성 (1M : 1주 5% 염화나트륨 단일용액침지, 1주 기중방치 반복)

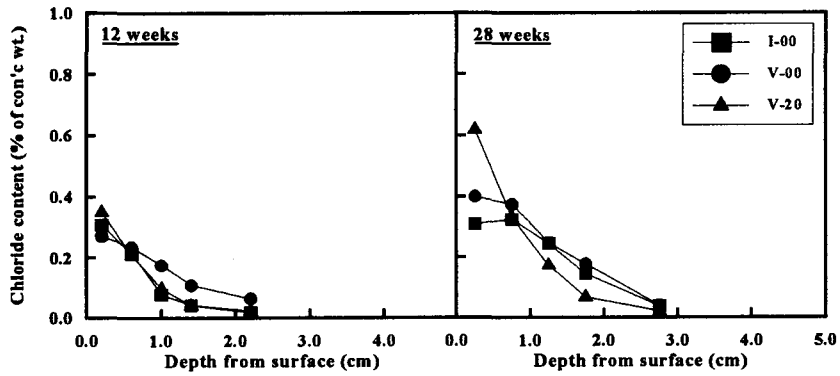


그림 5. 콘크리트 배합에 따른 염소이온 침투특성 (2M : 1주 5% 염화나트륨 & 10% 황산나트륨 복합용액침지, 1주 기중방치 반복)

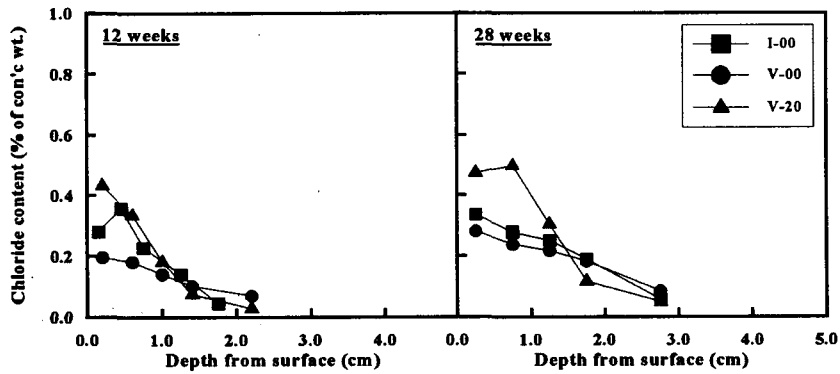


그림 6. 콘크리트 배합에 따른 염소이온 침투특성 (3M : 1주 5% 염화나트륨 & 10% 황산나트륨 복합용액침지, 1주 10% CO<sub>2</sub> 촉진중성화 반복)

한편, 그림 5와 6은 그림 4와 같은 요령으로 2중복합열화(2M : 1주 5% 염화나트륨 & 10% 황산나트륨 복합용액침지, 1주 기중방치 반복)와 3중복합열화(3M : 1주 5% 염화나트륨 & 10% 황산나트륨 복합용액침지, 1주 10% CO<sub>2</sub> 촉진중성화 반복) 조건하에서의 염소이온 침투량을 나타낸 것인데, 그림 4와 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, 본 연구결과에 의하면 시멘트 종류(1종 혹은 5종)와 플라이애쉬 치환여부가 콘크리트의 염소이온 침투특성에 큰 영향을 미치지 않은 것을 알 수 있었다.

### 3.2.3 열화조건에 따른 콘크리트 염소이온 침투특성

그림 7~9에서는 배합별로 열화조건에 따른 콘크리트 염소이온 침투특성을 나타내고 있다. 전반적으로 침지 12주 및 28주 후 각 배합의 염소이온 침투량은 공히 3중복합 열화조건(3M)과 2중복합 열화조건(2M)에서 단일열화조건(1M)보다 약간 높은 것으로 나타났다. 단, 플라이애쉬를 20% 치환한 경우는 3중복합열화작용의 경우 2중복합열화작용의 경우보다 비교적 높은 염소이온 침투량을 보이고 있는데, 이는 기존 연구결과와 일치한 것으로 플라이애쉬를 치환한 경우 중성화에 의한 열화속도가 상대적으로 빠르고, 이에 따라 염소이온 침투량도 약간 증가하게 된 것으로 생각된다.

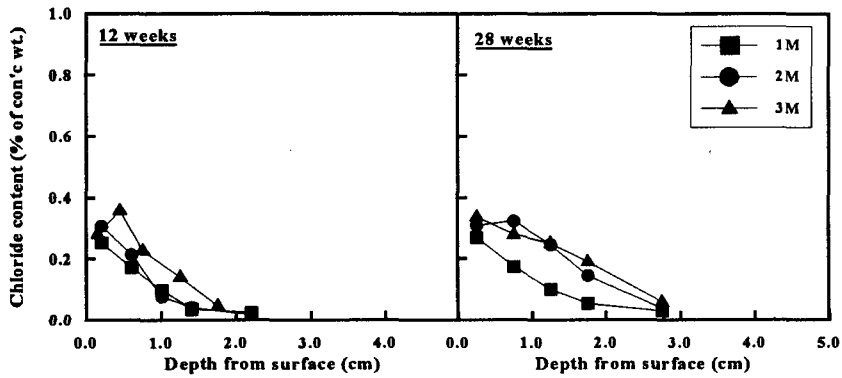


그림 7. 열화조건에 따른 콘크리트 염소이온 침투특성  
(I-00 : 1종시멘트, 플라이애쉬 치환율 0%)

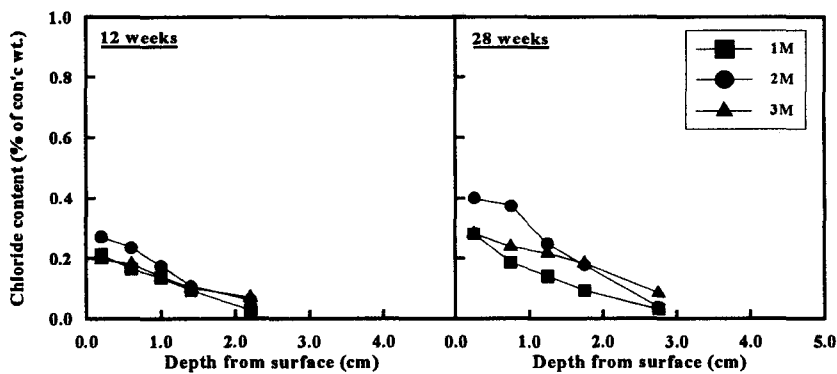


그림 8. 열화조건에 따른 콘크리트 염소이온 침투특성  
(V-00 : 5종시멘트, 플라이애쉬 치환율 0%)

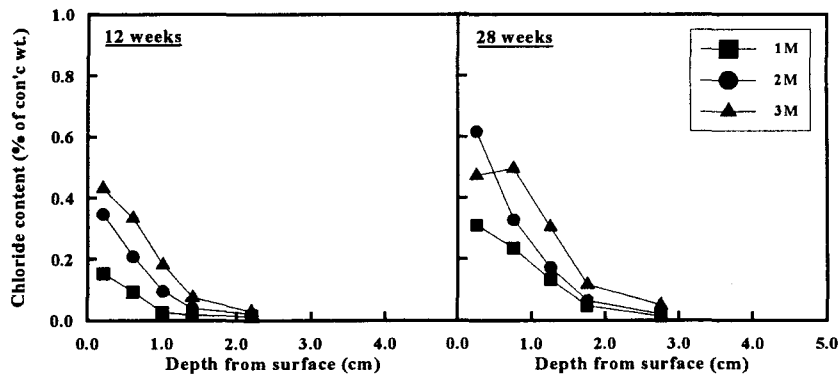


그림 9. 열화조건에 따른 콘크리트 염소이온 침투특성  
(V-20 : 5중시멘트, 플라이애쉬 치화율 20%)

#### 4. 결 론

콘크리트내의 염소이온 침투특성에 미치는 복합열화작용의 영향을 규명하기 위해 시멘트 종류, 플라이애쉬 치환 여부 등 변수에 따라 실험 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

콘크리트 압축강도와 동탄성계수는 복합열화작용에 의해 큰 변화가 없었다. 콘크리트내의 초기 염소이온 함유량은 혼화재료 및 시멘트 종류에 따라 약간 차이가 있을 수 있으므로, 실무에서는 이러한 혼화재료를 사용할 때 염소이온 함유량 및 철근 방청성능에 대한 영향 등을 사전에 검토할 필요가 있다.

염소이온 침투량은 콘크리트 배합에 따라서 큰 차이를 보이고 있지 않고, 열화조건에 따라서는 복합열화작용의 경우 단일열화작용의 경우보다 약간 높은 염소이온 침투량은 보이고 있다. 특히 플라이애쉬를 치환한 경우 중성화에 의한 열화속도가 상대적으로 빨라지므로 염소이온 침투량을 예측할 때 이러한 영향에 대해서도 고려할 필요가 있을 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

이 논문은 원자력중장기 연구개발사업의 지원에 의한 연구이며 이에 관계된 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 오병환 외; 해수의 영향을 받는 콘크리트 구조물의 수명증가에 따른 영향 연구, 한국원자력안전기술원, 1999.2
- 오병환 외, 고탍량 플라이애쉬 콘크리트의 개발 및 실용화 연구, 서울대학교 기초전력공학공동연구소, 1997. 12
- 콘크리트 표준시방서, 건설교통부, 1999
- 한국공업규격, 한국공업규격협회.
- Browne, R. D.; Performance of Corrosion in Marine Environment, Journal of American Concrete Institute, 1975
- V. T. Ngala and C.L. Page; Effects of Carbonation on Pore Structure and Diffusional Properties of Hydrated Cement Pastes, Cement and Concrete Research, Vol.27, No.7, 1997
- M. N. Haque & M. Kawamura, "Carbonation and chloride-induced corrosion of reinforcement in fly ash concretes", ACI M. J., 1992, pp41-48
- 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