중성화가 콘크리트의 염소이온 확산특성에 미치는 영향에 관한 실험연구

Effects of Carbonation on Chloride Diffusion Properties of Concrete

오 병 환* 강 의 영** 정 상 화** 김 선 우*** 서 정 문****
Oh, Byung Hwan Jiang, Yi Rong Jung, Sang Hwa Kim, Sun Woo Seo, Jeong Moon

ABSTRACT

The studies on chloride diffusion of concrete have been done so far by many researchers. However, there are few studies on the effects of other attacks, like carbonation, on chloride diffusion properties. In this study, the experiments are carried out focusing on this by varying cement type, water to cement ratio and replacement of fly ash of concrete. The results show that carbonation attacks do not affect greatly chloride diffusion properties of plain concrete, while the different tendencies are exhibited for fly ash concrete. Therefore, it is desirable to consider the effects of carbonation attacks on the chloride diffusion model to predict accurately the penetration of chloride ion if fly ash is partially replaced for cement.

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

그러므로 본 연구는 복합열화 환경조건 하에서의 콘크리트 열화특성에 관한 연구의 일환으로, 중성화가 콘크리트 염소이온 확산특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

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

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획 및 배합사항은 표 1과 같다. 먼저 실험변수는 물시멘트비, 시멘트 종류, 플라이애쉬 치환율 등을 조합하여 총 6개로 정한다. 시편의 처리는 28일간 표준양생한 시편을 표에 제시한 두 방법에 의해 처리하고, 실험항목은 28일 및 91일 재령에서의 압축강도와 침지직전, 침지후 15주 재령에서 시편 깊이별 염소이온량을 측정한다. 또한, 콘크리트의 배합은 목표슬럼프(15±2.5cm)와 목표 공기량(4.5±1.5%)을 만족하도록 예비시험에 의해 정한다.

표 1. 실험계획 및 배합사항

구 분	기 호	시멘트 종류	플라이애쉬 치환율(%)	W/B	단위시멘트량 (kg/m³)	플라이애쉬량 (kg/m³)	단위수량 (kg/m³)	잔골재량 (kg/m³)	굵은골재량 (kg/m³)
실험변수 및 배합사항	H1FA00	1종	0	0.38	449	-	171	616	1050
	H1FA20		20		359	90	171	573	1056
	H5FA00	5종	0		449	-	171	616	1050
	H5FA20		20		359	90	171	573	1056
	N5FA00		0	0.42	449	-	176	690	959
	N5FA20		20		359	90	176	648	965
시편처리	- 염수침지 - 10%CO_2 촉진중성화 + 염수침지 반복 (1주간격)								
실험항목	- 강도 (28, 91일) - 염소이온량 (측정시기 : 침지직전, 침지후 15주; 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 : 2.63, 조립율 : 6.7), 잔골재는 강사(비중 : 2.54, 조립율 : 2.54)를 사용한다. 시멘트 및 플라이애쉬의 화학조성은 표 2와 같다.

실험방법으로서 침지시편은 직경과 높이가 10cm의 원주형 시편을 제작하고, 염화물 침투 및 중성화 진행 등이 1방향으로 발생하도록 주변을 에폭시 수지로 코팅한다. 침지용액은 5% 염화나트륨 용액을 사용하고, 촉진 중성화 시험은 CO_2 농도 10%, 온도 30℃, 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

구 분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	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 강도특성

그림 1은 시멘트 종류 및 플라이애쉬 치환율에 따른 콘크리트의 압축강도를 재령별로 나타낸 것이다. 먼저, 물시멘트비가 큰 N5FA00과 N5FA20의 경우는 비교적 낮은 압축강도를 발휘하는 것을 확인되었고, 플라이애쉬를 20% 치환한 경우는 포졸란 반응에 의해 91일 재령에서 압축강도가 향상된 경향을 나타나고 있다. 한편, 물시멘트비가 낮은 여러 배합에 있어서는 시멘트 종류 및 플라이애쉬 치환율에 따른 강도 변화는 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다.

3.2 염소이온 침투특성

그림 2는 콘크리트 종류별로 깊이에 따른 초기(침지 직전) 염소이온량을 나타낸 것이다. 재료 자체에 함유하고 있는 염소이온량으로서 깊이에 따라서는 변화가 거의 없는 것으로 나타났고, 물시멘트비, 시멘트 종류 및 플라이애쉬 침환율 변화에 따라서는 다소 차이가 있지만, 침지 후의 염소이온 침투량에 비해 그 차이는 매우 미미하므로 거의 무시할 수 있을 것으로 생각된다.

그림 3은 플라이애쉬를 치환하지 않은 시편을 15주 동안 침지 후 콘크리트의 종류별·열화조건별 염소이온량을 깊이에 따라 나타낸 것이다. 전반적으로 염소이온은 표면에서부터 내부로 침투하므로 그 양은 깊이에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다.

시멘트 종류에 따른 염소이온 확산특성은 유사한 경향을 나타냈고, 물시멘트비 변화에 의해서는 물시멘트비 0.42인 N5FA00의 경우 기타 물시멘트비 0.38의 경우에 비해 염소이온 확산추세가 비교적 완만한 것으로 나타났다. 그 이유는 N5FA00 배합이 강도가 낮아 콘크리트 조직의 밀실성이 작으므로 염소이온 농도가 표면부근에서는 기타의 경우와 비슷하지만 내부로 갈수로 염소이온이 상대적으로 많이 침투되어 농도가 높아진 것으로 판단된다. 열화조건별로는 염수에만 침지한 단일열화조건의 경우 염소이온이 촉진중성화와 염수침지 반복작용한 복합열화조건보다 많이 침투된 것으로 나타났는데, 이는 복합열화조건의 시편은 중성화와 염수침지를 1주간격으로 반복하기 때문에 실제 염수에 침지된 시간은 적어 이러한 결과를 얻은 것으로 사료된다.

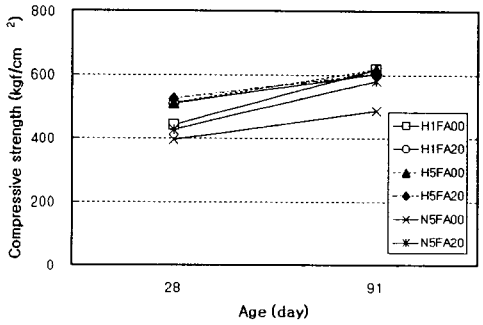

그림 1. 콘크리트 종류별 압축강도

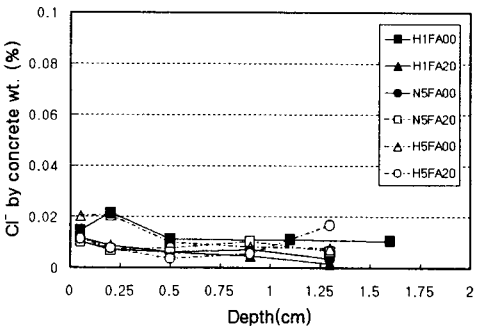

그림 2. 콘크리트 종류별 초기 염소이온 함유량

한편, 그림 4는 그림 3과 같은 요령으로 플라이애쉬를 20% 치환한 콘크리트의 염소이온량을 나타낸 것인데, 플라이애쉬를 치환하지 않은 경우와 유사한 경향을 보이고 있다. 단, 단일열화조건하에서 시멘트 종류, 물시멘트비에 관계 없이 플라이애쉬 치환율에 따른 염소이온 확산특성은 비슷한 경향을 보이는 반면, 복합열화조건하에서는 플라이애쉬를 20%로 치환한 콘크리트가 치환하지 않은 콘크리트보다 전반적으로 약간 높은 염소이온 침투량을 나타나고 있다.

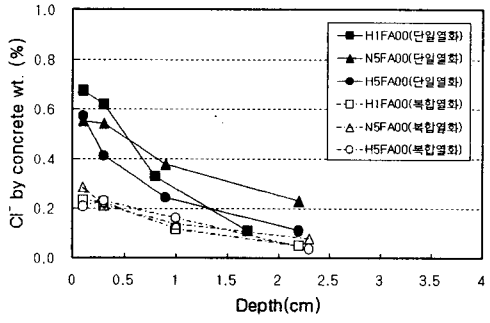

그림 3. 열화조건별 콘크리트 종류에 따른 염소이온 침투량 변화 (FA : 0%)

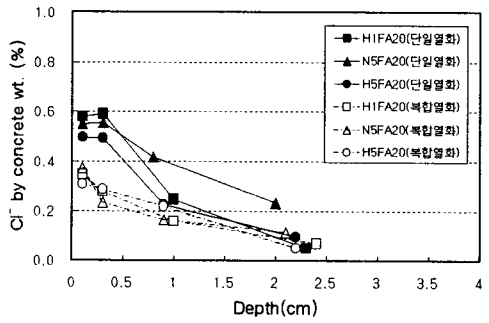

그림 4. 열화조건별 콘크리트 종류에 따른 염소이온 침투량 변화 (FA : 20%)

3.3 염소이온 확산모델에 의한 검토

그림 5 및 6은 H5FA00 및 H5FA20 배합에 대하여 Browne이 제시한 염소이온 확산모델(식 1)을 이용해서 추정한 염소이온 침투량과 실측치를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 15주 복합열화조건(촉진 중성화와 염수 침지 반복)의 경우 실제 염수에 침지한 시간은 8주이므로 추정식에서의 시간 t를 8주로 정하고, 확산계수는 CTH법 및 염화나트륨 용액에 15주 침지한 시편의 염소이온 프로파일에 의해 구한 두 값을 사용하였다.

$$C(x,t) = C_i + (C_0 - C_i) \cdot \mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{eff} \cdot t}} \right) \quad \cdots (1)$$

여기서, C_0 : 콘크리트표면의 시간에 따른 염소이온 농도

C_i : 콘크리트내부의 초기 염소이온농도

$C(x,t)$: 시간 t, 거리 x에서의 염소이온농도

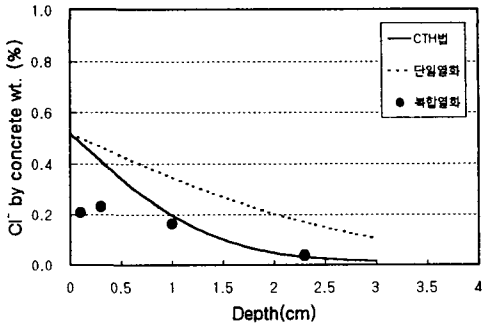

그림 5. H5FA00 시편에 대한 추정값과 측정값 비교

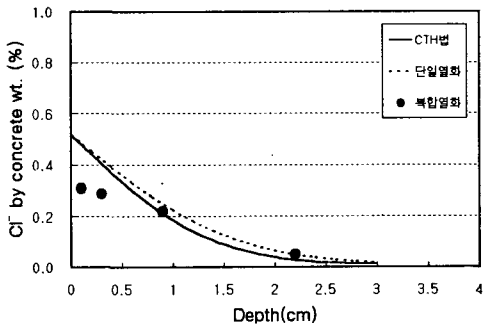

그림 6. H5FA00 시편에 대한 추정값과 측정값 비교

플라이애쉬를 치환하지 않은 경우 단일열화 실측치에 의해 추정한 염소이온 침투량은 CTH법에 의해 추정한 것보다 전반적으로 높은 경향을 나타냈고, 촉진중성화와 염수침지 복합열화조건 하에서 얻은 실험결과는 표면부근에서 비교적 큰 차이를 보이고 내부로 갈수로 CTH법에 의한 추정결과와 근접한 것으로 나타났다. 이는 촉진중성화 작용에 의해 콘크리트 표면의 조직이 변화되므로 나타난 결과로 사료된다. 한편, 플라이애쉬를 치환한 경우 CTH법 및 단일열화 실측치에 의해 추정한 결과는 비슷한 경향을 나타냈고, 복합열화조건 하에서 실측한 결과는 플라이애쉬를 치환하지 않은 경우와 유사하나, 표면부근에서의 차이는 약간 감소한 것으로 나타났다. 종합적으로 기존의 염소이온 확산모델을 이용하여 염소이온 침투량을 추정할 때 플라이애쉬의 치환여부 및 중성화의 진행정도 등을 고려하여 환산모델을 보완해야 보다 정확한 예측결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

중성화가 콘크리트의 염소이온 확산특성에 미치는 영향을 규명하기 위해 시멘트 종류, 물시멘트비, 플라이애쉬 치환율 등 변수에 따라 실험 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

염수침지에 의한 단일열화조건 하에서는 시멘트 종류, 물시멘트비에 관계 없이 플라이애쉬 치환율에 따른 염소이온 확산특성은 비슷한 경향을 보이는 반면, 촉진중성화와 염수침지 복합작용을 받은 복합열화조건 하에서는 플라이애쉬를 20%로 치환한 콘크리트가 치환하지 않은 콘크리트보다 전반적으로 약간 높은 염소이온 침투량을 나타나고 있다. 또한, 기존의 염소이온 확산모델에 의해 추정한 결과를 복합열과조건 하에서 실측한 결과와 비교할 때 비교적 큰 차이가 있으므로, 기존의 염소이온 확산모델을 이용하여 염소이온 침투량을 추정할 때 플라이애쉬의 치환여부 및 중성화의 진행정도 등을 고려하여 환산모델을 보완해야 보다 정확한 예측결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 오병환 외; 해수의 영향을 받는 콘크리트 구조물의 수명증가에 따른 영향 연구, 한국원자력안전기술원, 1999.2