

고강도 콘크리트의 염화물 침투특성

Chloride Permeability of High Strength Concrete

정 해 문* 유 환 구** 안 태 송*** 河野 廣隆****
Cheong, Haimoon Yu, Hwan-Gu Ahn, Tae-Song Kawano, Hirotaka

ABSTRACT

Chloride permeability of high strength concrete(HSC) was investigated using saltwater ponding test and rapid chloride permeability test by electrical potential(ASTM C 1202). The lower water-cement ratio concrete showed the lower diffusion coefficient of chloride. The relationship between the diffusion coefficient of chloride and charge passed by the rapid chloride permeability test could be obtained. This relationship appears to be an effective method for evaluating chloride permeability of low water-cement HSC.

1. 서론

해양환경에 있는 철근콘크리트 구조물은 염화물에 의한 철근부식이 열화의 주된 요인으로, 이 때문에 고품질의 콘크리트에 의한 충분한 피복두께의 확보가 필수적이다. 이에 대해서 강재를 피복하고 있는 피복콘크리트의 염화물 침투특성을 파악하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

역학적인 면과 내구성 측면에서 여러 장점을 가지고 있는 고강도 콘크리트는 염화물 침투에 대한 저항성이 우수하다고 알려져 있으나, 정량적으로 보통강도의 콘크리트에 비해 어느 정도 우수한지에 대해서는 보고된 바가 거의 없다. 해양환경하에 있는 콘크리트 구조물의 라이프사이클코스트(LCC)를 환산하기 위해서는 콘크리트의 정량적인 염화물 침투특성, 즉 염화물 확산계수의 파악은 반드시 필요하다.

한편, 염화물 침투특성을 파악하기 위해서는, 실제 환경과 가까운 염해 환경에 폭로시키는 것이 가장 바람직하나, 긴 시간을 필요로 하므로, 여러가지의 전기부가에 의한 촉진시험법¹⁾이 제안되고 있다. 그러나, 실제 폭로환경에서의 염화물 침투와 침투메카니즘이 다르다는 점 때문에 상대적인 비교에만 이용되고 있는 실정이다. 더군다나, 고강도 콘크리트의 경우에 대한 염화물 침투시험법은 아직 확립되어 있지 못하다.

본 연구에서는 고강도 영역인 낮은 W/C(25~40%)의 콘크리트에 대해 염수침적시험과 전기부가에 의한 촉진염화물 침투시험을 통하여 고강도 콘크리트의 염화물 침투특성과 적절한 시험방법을 검토하여 보았다.

* 정희원, 한국도로공사 도로연구소 재료연구실 책임연구원
** 정희원, 한국도로공사 도로연구소 재료연구실 연구원
*** 정희원, 한국도로공사 도로연구소 재료연구실장
**** 일본 국토교통성 토목연구소 콘크리트연구실장

2. 실험방법

2.1 공시체 제조

시멘트는 일본산 보통 포틀랜드시멘트와 벨라이트 함유량이 45%의 고강도 타입의 벨라이트계 시멘트(비중 3.20g/cm³, 비표면적 4,160cm²/g)를 사용하였다. 콘크리트 배합은 물/시멘트비를 25, 30, 40%로 하였으며, 비교를 위해 보통강도 콘크리트 배합인 55%도 함께 검토하였다. 콘크리트 배합을 표 1에 나타내었다. 콘크리트를 타설한 다음날 탈형하여 양생은 수중양생의 경우 재령28일까지 수중에서, 기중양생의 경우 탈형후 2일간 수중양생 후 25일간 상대습도 60%의 기중에서 양생하였다. 표 2에 본 실험에 사용한 공시체의 28일 압축강도 및 비중, 함수율 등을 나타내었다. 함수율은 105℃ 건조로에서 항량이 될 때까지의 중량변화로써 나타내었다.

2.2 염화물침투성 측정

2.2.1 염수 침적시험

수중과 기중에서 각각 28일간 양생한 원통형 공시체(∅10×20cm)를 염수침투를 위한 노출면인 공시체 타설방향으로 밑면 한면만을 남겨두고 나머지 면을 에폭시로 도장하여 3%NaCl 용액에 침적하였다. 일정기간 경과 후, 공시체를 염수에서 꺼내어 할렬로 파단시켜 0.1N 초산은 용액의 분무에 의한 염화물 침투 깊이를 측정하였고, 침투면으로부터 1cm두께로 절단한 시편에 대해 염화물량을 분석하였다. 0.1N 초산은 용액의 분무에 의한 염화물 침투깊이의 측정은 침적재령 6개월, 1년, 1년6개월, 2년에 대해서, 침투염화물량 분석은 침적재령 1년과 2년에 대해서 행하였다.

2.2.2 촉진침투시험

염수침적시험이 실제적인 염화물 폭로환경과 가깝지만, 측정에 시간이 많이 걸리므로, 전기부가에 의한 촉진시험방법을 병행하였다. 촉진시험방법으로서 ASTM C1202의 시험법에 준해 60V 직류정전압 부가에 의한 급속 염화물 침투 시험을 행하였다. 측정재령은 28일과 2년에서 측정하였다.

표 1 콘크리트 배합

구분	시멘트	최대 골재치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	조골재 겉보기용적 (m ³ /m ³)	s/a (%)	고성능 AE감수제 (C×%)	단위재료량(kg/m ³)			
									W	C	S	A
N25	보통	20	23±1.5	2.0±1.0	25	0.59	42.1	1.8	160	640	683	956
N30					30		45.0	1.3	160	533	770	956
N40					40		48.3	1.5	160	400	880	956
N55			8±2.5	4.5±1.5	55	-	45.0	0.3	165	300	819	1016
L25	벨라이트	20	23±1.5	2.0±1.0	25	0.59	41.8	2.6	160	640	675	956
L30					30		44.8	1.8	160	533	763	956
L40					40		48.2	2.0	160	400	874	956

표 2 콘크리트 공시체의 물성(재령28일)

구분	양생방법	비중 (g/cm ³)	함수율 (wt%)	압축강도 (kg/cm ²)	양생방법	비중 (g/cm ³)	함수율 (wt%)	압축강도 (kg/cm ²)
N25	수중	2.53	3.97	976	기중	2.53	3.67	974
N30		2.50	4.14	934		2.48	3.96	937
N40		2.47	4.65	710		2.46	4.46	691
N55		2.40	6.30	433		2.40	5.07	441
L25		2.51	3.99	1035		2.50	3.88	1067
L30		2.47	4.28	939		2.47	4.03	904
L40		2.47	5.48	735		2.44	4.64	661

3. 결과 및 고찰

그림 1은 3%NaCl 용액침적 시험 공시체로부터 구한 염화물 침투량을 나타낸 것이다. 보통 포틀랜드 시멘트와 고벨라이트계 시멘트의 종류에 따른 차이는 크게 보이지 않으며, 같은 침적재령에서 W/C가 클수록 침투표면으로부터 먼 곳까지 염화물이 침투되어 있는 반면, 표면으로부터 1cm이하의 표층부에는 W/C가 작을수록 염화물이 많이 농축되어 있었다. W/C가 40%이하의 고강도 영역에서는 수중과 기중의 양생방법에 따른 차이는 크게 확인되지 않았다. W/C가 55%의 경우 침적기간 2년 경과후에 침투면으로부터 4~5cm사이에 이미 0.06wt%(1.44kg/m³)정도가 침투해 있어, 침투가 많이 진행되었음을 알 수 있다.

그림 2는 0.1N 질산은용액 분무에 의한 염화물 침투깊이를 나타낸 것이다. 질산은 용액 분무에 의한 염화물 침투깊이의 측정은 염화물 침투경향을 상대적으로 파악하는데 실제적이면서도 매우 간편하다는데 장점이 있으나, 변색되는 경계에 있어서의 염화물량에 대해서 아직 이론이 많다. 그림 1의 염화물 침투 프로파일과 그림 2의 변색한계에 대한 결과를 비교해 변색한계에서의 염화물량을 추정해 보았다. W/C가 작은 25, 30%의 공시체의 경우, 변색에 의한 침투깊이가 표면으로부터 1cm 이하인데 비해, 염화물 침투량 측정은 1cm두께의 단위로 행하였으므로 추정이 불가능하였고, 비교적 염화물 침투가 많이 이루어진 W/C가 높은 공시체로 판정한 결과, 대략 변색 경계는 0.05~0.1wt% 정도라고 보여진다. 이 값은 지금까지 알려진 철근부식 임계염화물량과 비슷해, 대략적인 염화물량 침투의 판단기준으로 간편하게 적용할 수 있으리라 생각된다.

그림 3은 그림 1의 염화물 침투량 프로파일로부터 구한 염화물 확산계수 결과를 나타낸 것이다. 염화물 침투거동을 Fick의 확산방정식을 따른다고 가정하고, 1차원 확산방정식에서 경계조건과 초기조건을 다음 (1)식을 이용했을 때의 일반해인 (2)식으로 염화물 확산계수(Dc)를 산출했다²⁾.

$$C=C_0, x=0, t>0 \quad C=0, x>0, t=0 \quad (1)$$

$$C(x,t)=C_0\left(1-\operatorname{erf}\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}}\right) \quad (2)$$

x : 표면으로부터의 거리, t : 시간, $\operatorname{erf}()$: 오차함수, C_0 : 콘크리트표면의 염화물량

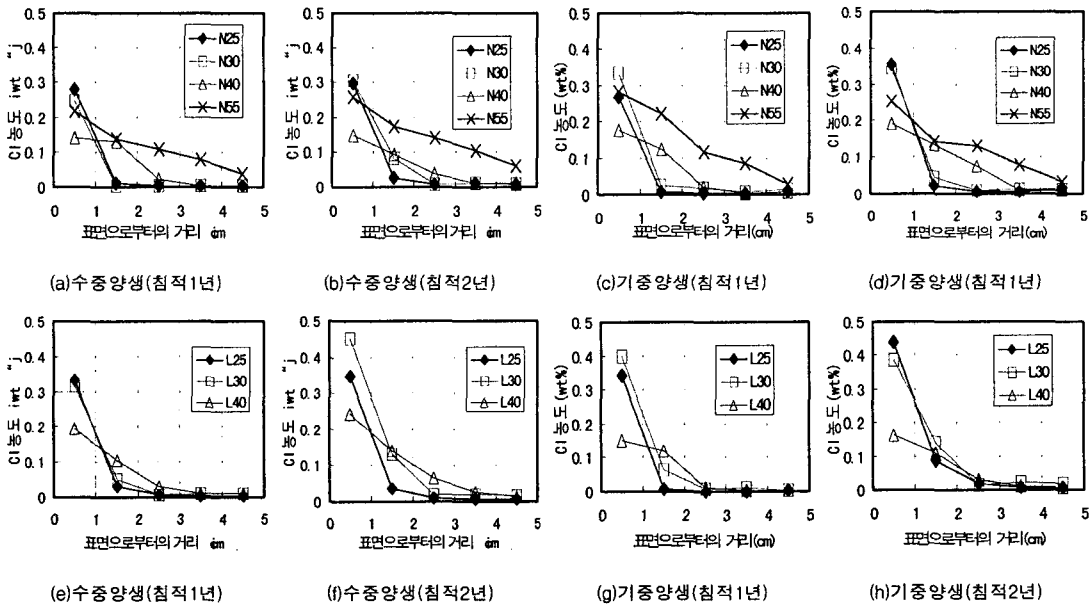


그림 1 각 공시체에 대한 염화물 침투 결과

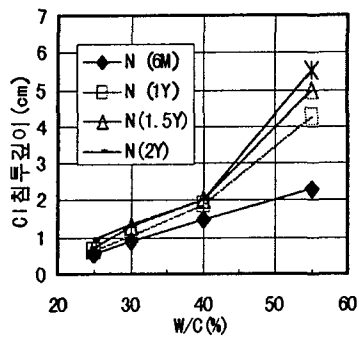
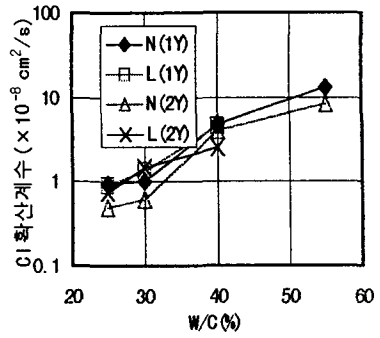
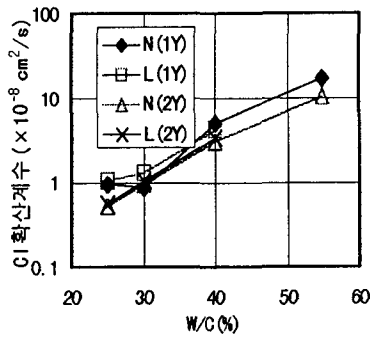


그림 2 질산은용액 분무에 의한 염화물 침투깊이 측정결과

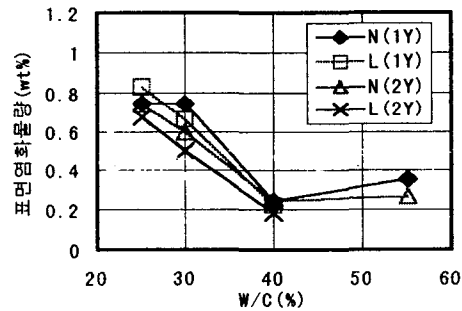
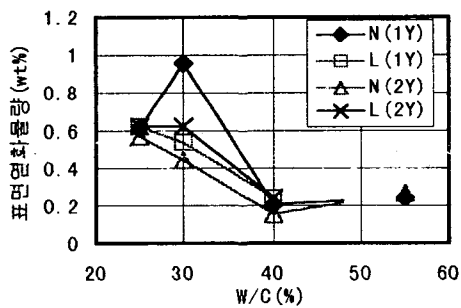


(a)수중양생 (b)기중양생
그림 3 염화물 확산계수 결과

W/C가 작을수록 염화물 확산계수가 작아지며, 침적기간 1년 보다 2년의 결과로부터 구한 결과가 더 작아, 침적기간이 길수록 작아지는 경향을 보이고 있다. 보통 포틀랜드시멘트와 고벨라이트계 시멘트와의 차이는 그다지 보이지 않으며 수중양생한 공시체보다 기중양생한 공시체가 약간 작은 확산계수값을 나타내고 있다. 이는 염화물 이온이 수중을 통하여 확산하므로 기중양생한 경우가 수중양생보다 흡수율이 낮기 때문에 작은 값을 보여주고 있다고 생각된다.

W/C가 30% 이하의 침적재령 1년의 콘크리트의 경우, 화학분석을 위한 샘플 채취 단위인 1cm도 침투하고 있지 않아, 확산방정식을 적용할 수 있는 데이터 수가 부족하여 정확도가 떨어지는 것으로 보인다. 즉, 실제보다 다소 큰 확산계수를 나타내는 것으로 보인다. 이보다 더 작은 단위로 샘플을 채취할 수 있겠으나, 조골재 크기의 영향으로 샘플 채취 단위는 1cm정도가 가장 적당하다는 보고³⁾가 있어, W/C가 낮은 고강도 콘크리트의 경우에는, 침적재령을 최소한 2년 이상의 장기간으로 하는 것이 바람직하다고 보여진다.

그림 4는 각 공시체에 대한 표면염화물량 추정결과이다. W/C가 낮은 고강도 콘크리트 영역일수록 표면염화물량이 크고, W/C가 40% 이상에서는 거의 일정한 경향을 보여주고 있다. 침적재령 1년과 2년의 차이는 그다지 보이지 않으며, 보통 포틀랜드 시멘트와 고벨라이트계 시멘트의 차이도 확인되지는 않고 있다. 수중양생을 한 공시체의 경우보다 기중양생을 한 경우가 다소 표면염화물량이 크게 나타나고 있다.



(a)수중양생 (b)기중양생

그림 4 각 공시체에 대한 표면염화물량 추정결과

그림 5에 촉진시험법인 ASTM C 1202에 의한 급속염화물 침투시험 결과를 나타내었다. 이 방법은 60V의 직류정전압을 5cm두께의 콘크리트 공시체에 6시간동안 부가했을 때 공시체를 통과한 전류량의 총합으로 나타내는데, 이 결과를 표 3과 같은 평가표에 의해 염화물 침투 저항성을 평가하는 것이다. 통과전류량은 W/C가 클수록 커지고 있는데, 이는 W/C가 클수록 콘크리트 함수율이 높고, 공극구조도 더 치밀하지 못하므로 전하가 더 많이 이동하기 때문이다. 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 벨라이트계 시멘트를 사용한 경우가 다소 작은 값을 나타내고 있는데, 이는 벨라이트계 시멘트가 보통포틀랜드시멘트에 비해 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 생성량이 작으므로, 통과전류량에 가장 큰 영향을 미치는 OH^- 이온이 벨라이트계 시멘트를 사용한 경우가 상대적으로 적고, 또 보다 치밀한 구조를 가지고 있기 때문에 전류의 이동이 상대적으로 어렵기 때문으로 보인다. 수중양생의 경우가 기중양생의 경우보다 다소 큰 전류량을 보여주고 있는데, 이는 함수율 차이에 의한 것으로 보인다. 재령28일과 재령2년의 결과를 비교해 보면, 재령2년 공시체의 통과전류량이 더 작은 값을 보여주고 있어, 재령경과에 따라 통과전류량이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 시멘트 수화에 따른 OH^- 이온의 감소와 조직의 치밀화에 따른 영향이라고 보여진다. 이와 같이 통과전류량 결과로서 콘크리트 조직의 치밀한 정도를 정성적이고 상대적으로 비교하는 것이 가능하다고 보여진다. 그러나 표 3의 ASTM C 1202에 나와있는 평가표와 비교해 보면, 재령2년의 결과는 평가표의 값과 유사한 결과를 나타내고 있으나, 재령28일의 결과는 평가표상의 참고치에 나와있는 값에 비해 더 큰 통과전류량 결과를 보여주고 있다. 즉, 참고표에 의하면 W/C 40% 이하에서는 통과전류량이 2,000coulomb 이하의 결과를 보여주어야 하지만, 재령28일의 결과로는 2,000~5,000coulomb정도의 값을 나타내고 있다. 이는 통과전류량이 재료, 양생방법, 측정재령 등에 따라 변하기 때문에, 단순히 ASTM C 1202상의 평가표에 의한 절대적인 통과전류량의 비교는 무리가 있다고 보여진다. 특히, 측정재령에 대한 검토가 더 이루어져야 하리라 생각된다.

그림 6에 급속염화물 침투시험으로부터 측정한 재령28일 공시체의 통과전류량과 염수침적시험으로부터 구한 확산계수와의 관계를 나타내었다. 통과전류량과 확산계수와의 관계를 Berke는 다음과 같은 실험식으로 표현하였다⁴⁾.

$$D_c = 0.0103 \times 10^{-8} Q^{0.84}$$

Dc : 염화물 확산계수(cm^2/s), Q : 급속염화물 침투시험으로부터 구한 통과전류량(Coulomb)
 여기에서 확산계수는 90일간 염수침적시험으로부터 구한 확산계수이다. Berke의 제안식에 따른 결과와 비교해 보았을 때 본 실험결과가 같은 값의 통과전류량에서 더 낮은 염화물확산계수를 보여주고 있다. 이는 Berke의 실험식의 경우 염화물 확산계수를 AASHTO T 259법에 의한 90일 염수침적시험으로부터 구하였는데, 앞서 서술한 바대로 W/C가 매우 낮을 경우, 90일 침적시험에 의한 결과는 침투량 자

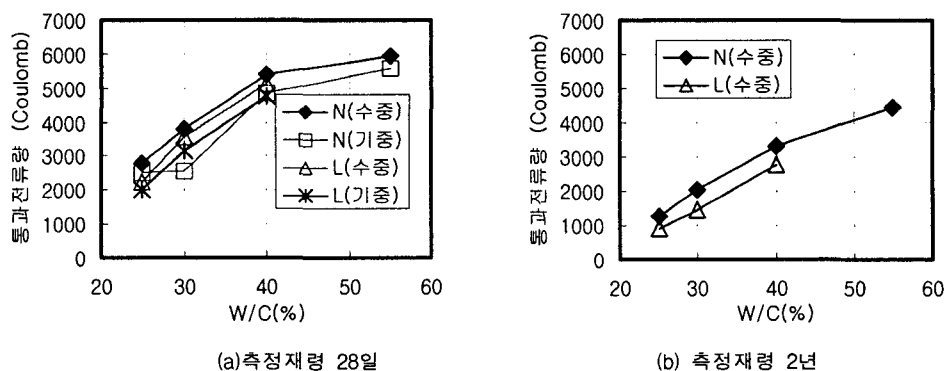


그림 5 ASTM C 1202에 의해 측정한 급속염화물 침투시험 결과

표 3 통과전류량에 의한 염화물 침투저항성의 평가

통과전류량 (Coulomb)	염화물 침투성	콘크리타입(비교치)
>4,000	높음	높은 W/C(>0.6) 일반적인 콘크리트
2,000~4,000	중간	중간의 W/C(0.4-0.5)
1,000~2,000	낮음	낮은 W/C(<0.4)
100~1,000	매우 낮음	Latex Modified Concrete, Internally Sealed concrete
<100	무시할 수 있음	폴리머함침콘크리트, 폴리머콘크리트

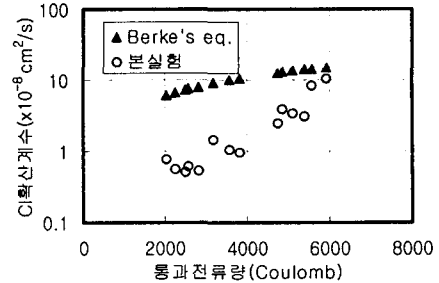


그림 6 통과전류량과 Cl 확산계수와의 관계

체가 그다지 많지 않고, 이로 인해 염화물 확산계수가 다소 크게 표현된다.

따라서 Berke의 식은 W/C가 작은 고강도 콘크리트의 경우에는 적용에 무리가 따르게 된다고 생각되어, 보다 타당한 관계를 유추하기 위해 급속염화물 침투시험의 측정재령을 28일로 하고, 염수침적을 2년하였을 때 구한 확산계수로부터 다음과 같은 실험식을 제안할 수 있다.

$$D_c = 0.1 \times 10^{-8} e^{0.0007Q}$$

실제 염분폭로 환경과 가까운 3% 염수침적 시험결과로부터 W/C 저감에 의한 콘크리트 품질 향상이 염화물 침투 저항성에도 좋은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 따라서 콘크리트 품질을 단시간 내에 상대적으로 비교평가가 가능한 급속염화물 침투시험의 결과와 염화물 확산계수와의 관계가 명확해진다면, 급속염화물 침투시험결과로부터 염화물 침투저항성에 대한 평가가 가능하리라 생각된다.

4. 결론

고강도 콘크리트의 염화물 침투특성을 염수침적시험과 전기부가에 의한 촉진시험법을 이용해 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 염화물 확산계수는 W/C가 작아질수록 작아지며, 염수침적기간이 길수록 작아지는 경향을 보였다. 보통포틀랜드시멘트와 고벨라이트계 시멘트간의 차이는 보이지 않았으며 28일간 수중양생한 공시체보다 기중양생한 공시체가 약간 작은 확산계수값을 나타냈다.
- (2) 급속염화물 침투시험으로부터 구한 통과전류량과 염수침적시험으로부터 구한 염화물 확산계수와의 상관관계를 구하였다. 이로써 단시간에 간편하게 전기부가에 의한 방법으로 구한 통과전류량으로부터 염화물 침투저항성에 대한 평가가 가능하리라 생각된다.

참고문헌

- 1) J.D.Shane et al, Recent Developments in the Measurement of Transport Properties in Cement-Based Materials, *Proceedings of the Materials Research Society's Symposium on Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-Based Systems*, pp.413-423 (1995)
- 2) 永野宏雄, 鹽分汚染構造物診斷手法提案, 大成建設技術研究所報, 第18号, pp.69-73 (1986)
- 3) 鐵筋腐食・防蝕および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2), 콘크리트技術シリーズNo.40, 日本土木學會 (2000)
- 4) N.S.Berke and M.C.Hicks, Predicting Chloride Profiles in Concrete, *Corrosion Engineering*, Vol.50, pp.233-239 (1994)