

초기재령에 고온이력을 받은 고강도 콘크리트의 염화물 침투 특성

정 해 문

〈한국도로공사 도로연구소〉

1. 서 론

최근 들어 구조물의 초고층화, 대형화, 특수화라고 하는 추세로 인해, 합리적이고 경제적인 구조물 설계, 시공법의 개발에 대해 사회적 관심이 고조되고 있다. 이러한 새로운 구조물의 설계, 시공법은 우수한 성능의 건설재료를 필요로 하므로, 가장 안정적이고 경제적인 시멘트 콘크리트에 대한 고품질화가 적극적으로 검토되고 있다.

고강도 콘크리트는 일반강도 콘크리트에 비해 부재의 단면적 축소에 의한 경량화, 역학적인 고성능화가 가능해 콘크리트 구조물의 시공성 및 내구성을 향상시킬 가능성을 가지고 있어, 실용화를 위한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 특히 최근 들어 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 관심이 높아지면서 우수한 내구성을 가지고 있는 고강도 콘크리트의 실용화에 대한 기대가 한층 고조되고 있는 가운데, 고강도 콘크리트 배합기법, 고성능 펌프 등이 개발되어, 실용화를 위한 길은 점점 가까워지고 있다.

고강도 콘크리트는 단위시멘트량이 매우 많은 배합이므로, 시멘트 수화로 기인한 발열로 인해 부재사이즈에서는 초기재령에 높은 온도이력을 나타내게 된다. 이러한 초기재령의 고온이력은 시멘트 수화반응에 영향을 미쳐 미세조직의 변화를 가져오므로, 조직의 치밀한 정도에 영향을 크게 받는 염화물 침투 특성에 영향을 미칠 수 있다.

한편, 염화물 침투성을 판단하는 규격화된 시험방법으로는 AASHTO T259의 90일간 3% 염수에 침적시키는 시험¹⁾, ASTM C 1202의 급속 염화물 침투시험²⁾ 등이 있고, 연구레벨로 진행중인 전위부가에 의한 촉진시험^{3~5)} 등이 있다.

염화물 침투에 대한 성능 평가는 실제 염해 환경에 폭로시키는 것이 가장 바람직하나, 폭로하는 위치에 따라 달라지는 염해 환경에 대해 정량적으로 평가하기가 힘들고, 특히 고강도 콘크리트의 경우 측정에 매우 긴 시간이 소요된다는 점 때문에 실내 촉진시험이 매우 실용적이라고 할 수 있다.

그러나 간편성으로 인해 최근 많이 이용되고 있는 급속 염화물 침투시험법의 경우 측정방법상의 여러 문제점들이 지적되고 있고^{6,7)}, 특히 고강도 콘크리트에 대한 데이터 축적도 많지 않다. 즉, 고강도 콘크리트에 대한 염화물 침투성을 판단하는 시험방법이 아직 확립되어 있지 못한 것이 현실적이다.

본 연구에서는 W/C가 25%의 고강도 콘크리트에 대해 초기재령에서 고온이력이 염화물 침투 특성에 미치는 영향을 여러 시험방법을 이용해 검토하여 보았다. 이와 함께 여러 시험방법을 통해 고강도 콘크리트에 대한 적절한 시험방법을 검토하여 보았다.

2. 실험 방법

2.1 출발원료 및 공시체 제작

시멘트는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 세골재는 하천사와 쇄사의 혼합사(표건비중 2.6g/cm³, 흡수율 1.45%, 조립율 2.89)를, 조골재는 19mm의 쇄석(표건비중 2.64g/cm³, 흡수율 0.5%, 실적율 60.1%, 조립율 6.63)을 사용하였다. 혼화제로는 폴리카본산계 고성능 AE감수제를 사용하였다.

<표 1> 콘크리트 배합

Slump flow (cm)	Air (%)	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	SP (C×%)	단 위 재 료 량 (kg/m ³)			
						W	C	S	G
57.5±2.5	4.0±0.5	19	25	45.0	1.6	160	640	699	868

<표 1>에 콘크리트 배합을 나타내었다. 단위수량을 160kg/m³, W/C를 25%로 하고, 목표 슬럼프 플로우를 57.5±2.5cm, 목표 공기량을 4.0±0.5%로 시방배합을 정하였다. 공시체는 고온이력의 영향을 검토하기 위해 φ10×20cm의 표준 공시체와 스티로폴을 이용해 단열을 한 1×1×0.6m의 블록 공시체를 이용했다. φ10×20cm의 표준 공시체는 재령 1일에 약 40℃ 정도까지의 온도이력을 받았으나, 블록 공시체는 상부표면이 재령 16시간에 73℃, 중심부분이 재령 21시간에 101℃까지 상승했다. <그림 1>에 블록 공시체가 받은 온도이력을 나타내었다.

공시체의 양생방법은 표준 공시체는 재령 1일에 탈형 후, 수중양생의 경우에는 20℃의 수중에서 28일간(표준수중으로 표기), 기중양생의 경우에는 상대습도 60%, 20℃의 기중에서 28일간(표준기중으로 표기) 양생하였다. 블록 공시체는 재령 5일까지 스티로폴에 의한 단열양생을 행한 후, 그 이후에는 단열재를 벗겨내고 재령 28일까지 대기중에 방치시켰다. 재령 28일에 직경 10cm의 코어 공시체를 채취해 상부의 표면으로부터 5cm(블록 윗면으로 표기)와 중심(블록 중심으로

표기)의 공시체에 대해서 실험을 행하였다.

2.2 염화물 침투성 측정

각종 염화물 침투성 측정 시험방법의 적용성을 비교 검토하기 위해 다음의 3가지 방법에 의해 실험을 하였다. 공시체는 모두 재령 28일에 측정하였다.

(1) 3% 염수 침적시험

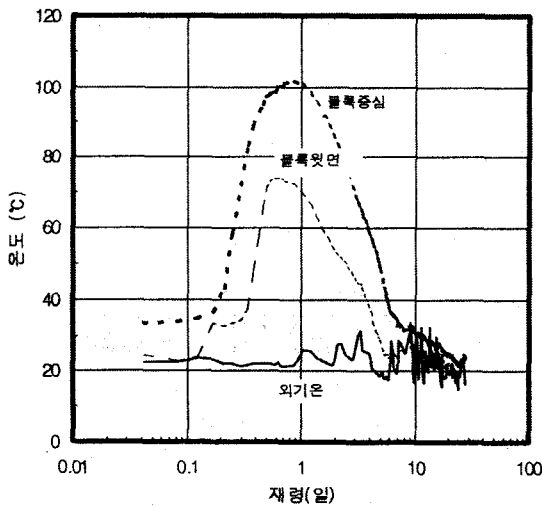
공시체를 염화물이 침투하는 면(공시체의 타설 바닥면) 이외의 표면을 에폭시로 2회 도장하여, 한면으로만 침투하게 한 다음, NaCl 3%의 용액에 일정기간 침적시켰다. 일정기간 경과 후, 염수에서 꺼내어 염화물 침투면으로부터 1cm 간격으로 절단하여, JCI-SC4(일본콘크리트공학협회, 경화콘크리트 중에 함유된 염분의 분석방법)의 방법에 따라 산가용성 염화물량을 분석하였다.

(2) 급속 염화물 침투시험

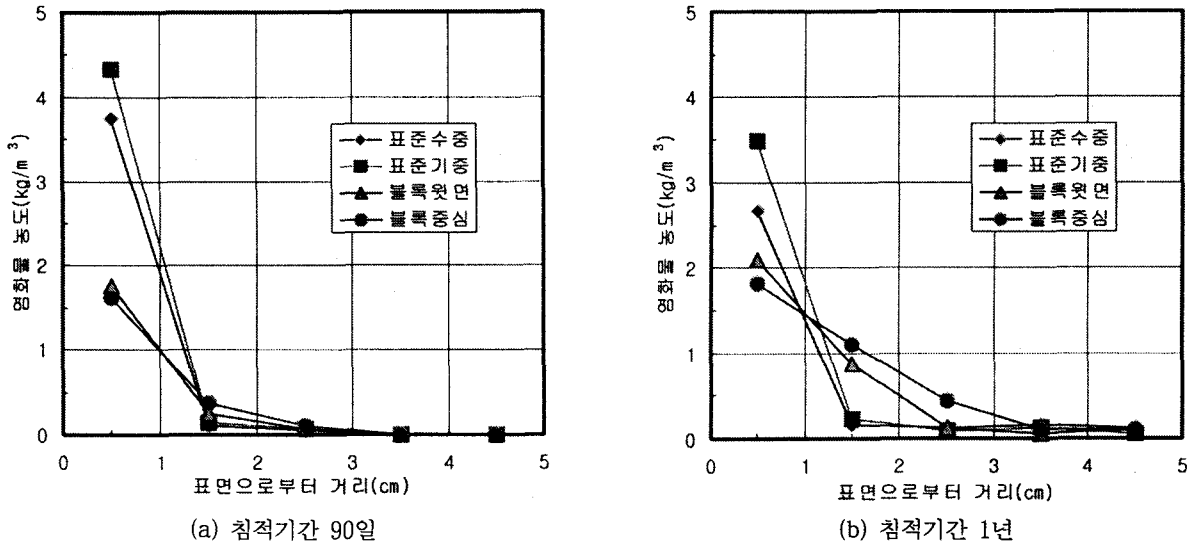
ASTM C 1202의 방법에 준해 급속 염화물 침투시험을 행하였다. 이 방법은 두께 5cm의 공시체를 준비하여, 규격에 나와 있는대로 확산셀에 장착하고, 음극쪽에 3%의 NaCl 용액을, 양극쪽에 0.3N NaOH 용액을 넣은 다음, 60V의 직류전압을 인가해 6시간 동안 공시체를 통과한 전류량을 측정하여, 통과 전류량으로서 염화물 침투성을 평가하는 것이다. 본 실험에서는 통과 전류량에 의해 판단하는 방법 외에 시험 종료 후, 2.2. (1)의 염수 침적시험에서와 동일하게 1cm 간격으로 절단하여 염화물 침투량을 측정하였고 이와 더불어 공시체의 할렬면에 0.1N 초산은 용액을 분무해, 변색한계에 의한 염화물 침투깊이도 측정하였다.

(3) 전위 부가에 의한 촉진시험

2.2. (2)의 급속 염화물 침투시험과 같은 시험장치를 이용해 직류전압 15V를 부가하여, 공시체를 투과하여 이동한 염화물량을 측정하였다. 이 방법은 ASTM C 1202의 급속 염화물 침투시험



<그림 1> 블록 공시체의 온도이력



〈그림 2〉 3% 염수에 침적시킨 공시체에 대한 염화물 침투 상황

법이 매우 높은 전압의 인가로 인해 측정 도중 공시체에 많은 열을 발생시키고, 통과 전류량으로 염화물 침투성을 평가하는 것에 대한 문제점들^{6,7)}로 인해, 열발생을 최소화 하기 위해 10~30V 정도를 인가하고, 통과 전류량의 측정이 아닌, 공시체를 투과하여 실제로 이동한 염화물량을 측정하여 평가하는 방법으로 노르웨이를 비롯한 유럽과 일본에서 많은 연구^{3~5)}가 진행중이다.

3. 실험 결과

3.1 염수 침적시험 결과

〈그림 2〉는 3% 염수에 90일간, 1년간 침적시킨 공시체의 염화물 침투 프로파일을 나타낸 것이다. 침적기간 90일에 비해 1년의 경우가, 침투면으로부터 먼곳까지 염화물이 많이 침투되어 있어 침적기간이 길수록 염화물 침투량이 많은 것을 알 수 있고, 표준 공시체에 비해 블록 공시체가, 블록 공시체 중에서는 표면보다 중심, 즉 이력온도가 높은 경우가 더 많은 염화물량이 깊은 부분까지 침투되어 있는 것을 볼 수 있다.

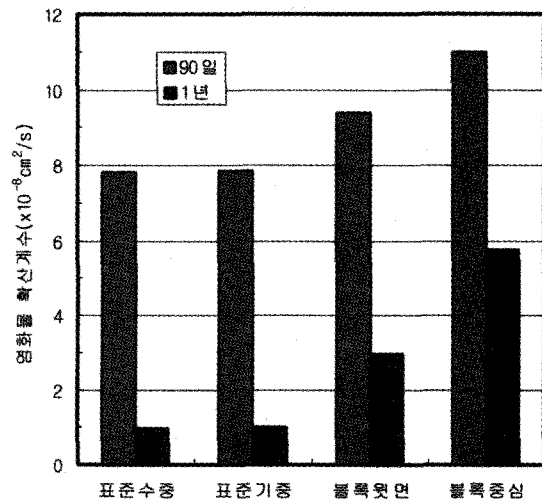
염화물 침투가 많을수록 침투 표면으로부터 깊은 부분까지 침투가 되어 있고, 염화물 침투가 많지 않을수록 1cm 이후에는 염화물 침투가 거의 없는 반면, 0~1cm까지의 표면층 부위에만 염화

물이 많이 농축되어 있는 것을 볼 수 있다.

〈그림 3〉은 〈그림 2〉의 염화물 침투 프로파일이 Fick의 확산 2법칙을 따른다고 가정하여 구한 확산계수를 나타낸 것이다. 확산계수는 (1) 식과 같은 확산방정식이 (2) 식과 같은 경계조건과 초기 조건을 만족하는 해 (3) 으로서 구하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$C(0, t) = C_s, \quad C(x, 0) = 0 \quad (2)$$



〈그림 3〉 염화물 확산계수 산정 결과

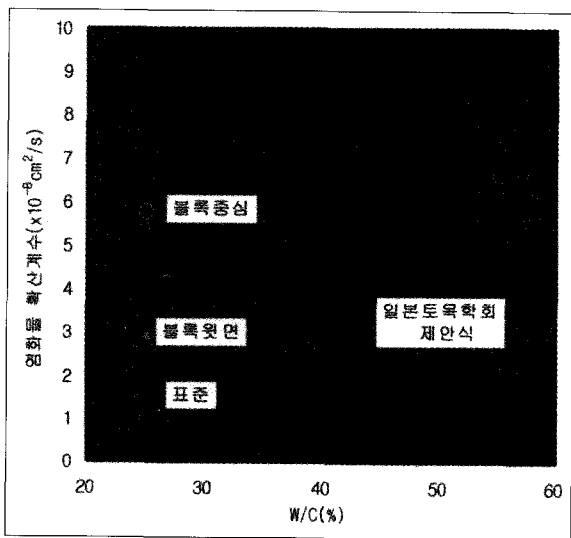
$$C(x, t) = C_s \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{4D_c t}} \right\} \quad (3)$$

D_c : 염화물 확산계수 (cm^2/s)
 C_s : 표면 염화물량 (kg/m^3 혹은 wt%)
 x : 확산거리 (cm)
 t : 확산시간 (sec)
 erf : 오차함수

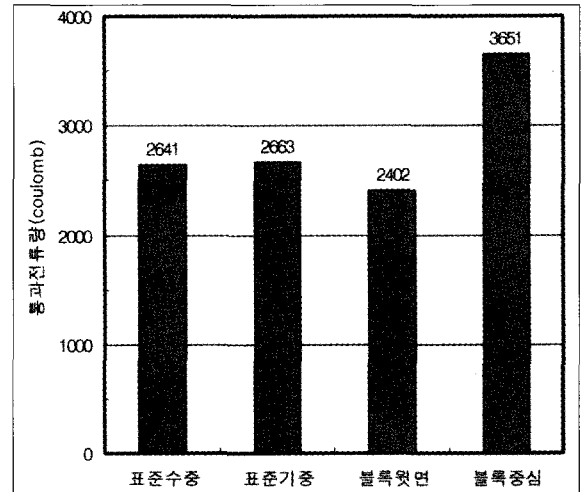
고온이력을 받지 않은 표준 공시체의 경우, 수중양생과 기중양생의 차이는 나타나지 않았으나, 고온이력을 받은 블록 공시체의 경우, 표준 공시체에 비해 큰 염화물 확산계수를 보여주고 있다. 그리고 침적기간 90일의 데이터로 구한 확산계수가 1년에 비해 훨씬 큰 값을 보여주고 있다. 이는 침적기간 90일의 경우, 염화물 침투깊이가 크지 않아 확산방정식에 놓일만한 유효한 데이터의 수가 확보되지 않아 오차가 크고, 다소 큰 값을 나타내고 있다.⁹⁾

<그림 4>에 W/C와 염화물 확산계수와의 관계를 나타내었다. 그림 중에 일본토목학회 콘크리트 표준 시방서에서 제안한 W/C에 따른 염화물 확산계수를 나타내었다. 시방서상에서는 W/C가 35%에서 70%까지만 제안하였으나, 이 제안식을 W/C 25%까지 연장시켜 나타내어 보았다.

이와 비교해 보아도, 침적기간 1년으로부터 구한 확산계수는 신뢰성이 있어 보이나, 90일간 침적시켜서 구한 확산계수의 경우 매우 큰 값을 나



<그림 4> W/C와 염화물 확산계수와의 관계



<그림 5> 급속 염화물 침투시험으로부터 구한 통과 전류량 결과

타내는 것을 알 수 있다. 그리고, W/C가 25%의 동일한 콘크리트라고 하더라도 고온이력을 받은 유무에 따라 W/C가 40%~50%의 콘크리트와 비슷한 염화물 확산계수를 보여주고 있다.

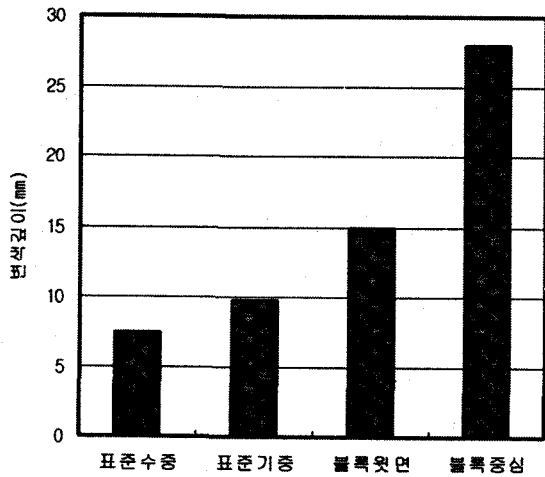
3.2 급속 염화물 침투시험 결과

<그림 5>에 급속 염화물 침투시험으로부터 구한 통과 전류량 측정 결과를 나타내었다. 가장 높은 온도이력을 보인 블록 중심만 3,651쿨롱의 측정 결과를 보여준 반면, 표준 공시체와 블록 공시체 윗면은 2,400~2,600쿨롱 정도의 결과값을 보여주고 있다. 표준 공시체와 블록 윗면과의 통과 전류량의 차이는 보이지 않고 있다.

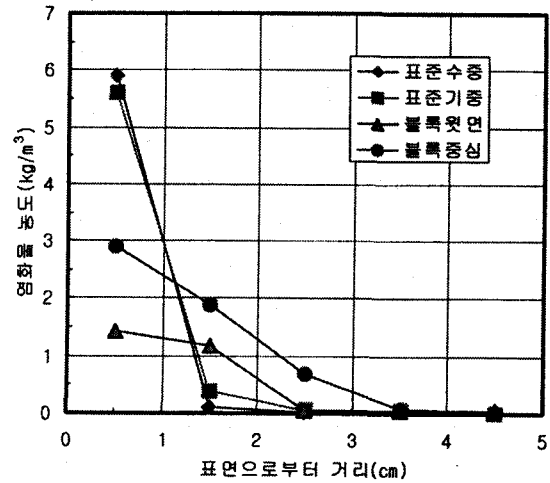
<표 2>에 ASTM C 1202의 통과 전류량으로부터 염화물 침투성을 판단하는 평가표를 나타내었다.⁹⁾ 이 평가표로 판단해 보면, 염화물 침투성이 중간 정도로 평가되며, W/C가 0.4~0.5 정도의

<표 2> 통과 전류량에 의한 염화물 침투성 평가표 (ASTM C 1202)

통과전류량(Coulomb)	염화물 침투성	콘크리트 타입
4,000 이상	높 음	W/C > 0.6
2,000~4,000	중 간	0.4 < W/C < 0.5
1,000~2,000	낮 음	W/C < 0.4
100~1,000	매우 낮음	LMC 등
100 이하	무시 가능	폴리머 함침 콘크리트 등



〈그림 6〉 급속 염화물 침투시험 종료후 염화물 침투 깊이 측정 결과



〈그림 7〉 급속 염화물 침투시험 종료후 염화물 침투 프로파일

콘크리트에 해당하는 침투성을 보여주고 있다.

한편, 〈그림 6〉과 〈그림 7〉에 급속 염화물 침투 시험 종료 후 측정된 염화물 침투 프로파일과 침투깊이를 나타내었다. 염화물 침투 프로파일로부터 고온이력을 받을수록 침투면으로부터 깊은 곳까지 많은 양의 염화물이 침투해 있는 것을 확인할 수 있고, 초산은 용액 변색에 의한 염화물 침투깊이 결과도 이력온도가 높을수록 침투깊이가 큰 것을 알 수 있다.

이와 같이 실제 염화물의 침투 경향은 온도이력에 따른 차이를 보이는데 비해, 통과 전류량 결과는 그와 같은 경향을 나타내지 않아, 실제 염화물 침투 경향과 통과 전류량과의 상관성이 크지 않은 결과를 나타내었다.

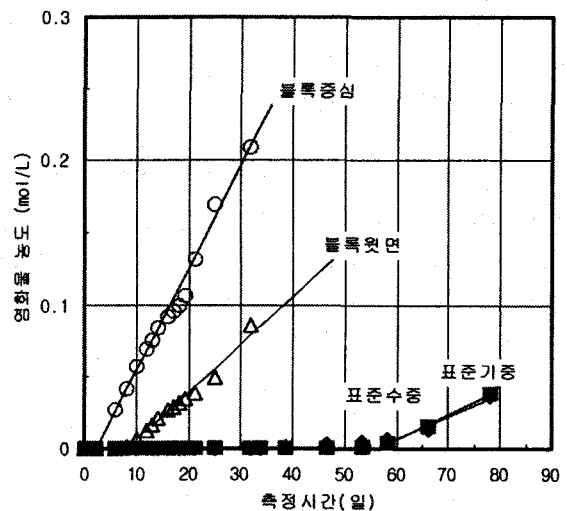
급속 염화물 침투 시험법의 통과 전류량의 의미가 전기 부가에 의해 염화물 이동량을 직접 측정하는 것이 아니고, 콘크리트 공시체가 가지고 있는 비저항 특성에 의해 통과 전류량이 결정되도록 되어 있는데, 전류량에 가장 큰 영향을 미치는 것이 OH⁻ 이온으로서 공시체내의 염화물 이동량을 나타내는 것이 아니다. 따라서 OH⁻ 이온은 양생일수, 양생조건, 무기계 혼화재 유무의 여부 등에 의해 크게 달라지므로¹⁰⁾ 단순히 평가표상의 쿨롱값으로 비교하는 것은 무리가 있다고 생각된다.

따라서 공시체간의 평가를 통과 전류량으로서 뿐만 아니라, 측정 종료 후 실제 침투한 염화물 침투깊이를 함께 비교 검토하는 편이 타당하리라

생각된다.

3.3 전위 부가에 의한 촉진시험 결과

〈그림 8〉에 공시체에 15V의 직류 전압을 인가 하였을 때 공시체를 투과하여 이동한 염화물량의 시간에 따른 변화를 나타내었다. 〈표 3〉은 〈그림 8〉로부터 구한 염화물의 투과개시일(t_0)과 단위시간당 이동한 염화물량(dC/dt)을 나타낸 것이다. 염화물의 투과개시일은 〈그림 8〉의 염화물 농도 증가부분을 시간에 대한 1차식으로 회귀하였을 때 얻은 시간축 절편값이다. 고온의 이력을 받지 않은 표준 공시체의 경우 측정개시 후 약 55일



〈그림 8〉 전기부가에 의한 염화물 침투 촉진시험 결과

〈표 3〉 전위 부가에 의한 촉진시험 결과

공 기 체	t_0 (일)	dC/dt ($\times 10^{-3}$ mol/ ℓ day)
표 준 수 중	55.3	1.53
표 준 기 중	56.5	1.77
블 록 윗 면	8.3	3.35
블 록 중 심	2.3	7.11

t_0 : 염화물 투과개시일.

dC/dt : 단위시간당 투과 염화물량.

이후에 염화물 투과가 확인되었으나, 고온의 이력을 받은 블록 공시체의 경우, 8.3일, 2.3일에 공시체를 투과하는 것으로 나타났다.

한편, 염화물 농도 데이터 회귀선의 기울기인 정상상태가 된 후의 단위시간당 이동한 염화물량은 표준 공시체보다 블록 공시체가 약 2~5배 정도 큰 것으로 확인되었다.

이로부터 고온이력을 받은 공시체가 이력을 받지 않은 공시체에 비해 공시체내의 염화물 이동속도가 훨씬 빠르다는 것을 알 수 있다.

4. 고 찰

4.1 염화물 침투성에 미치는 고온이력의 영향

본 실험 결과, 표준 공시체의 경우, 수중양생과 기중양생과의 차이는 확인되지 않았으나, 표준 공시체와 블록 공시체의 고온이력 유무의 영향은 확인되었다. 고온이력을 받지 않았을 경우에는 공시체의 W/C가 25%로 매우 낮아 치밀한 조직을 보이므로, 수중양생과 기중양생에 의한 차이는 나타나기 힘들었다고 생각된다.

한편, 초기재령에 고온이력을 받았을 경우, 시멘트 수화반응이 급속하게 진행되어, 공극의 조대화 현상(coarsening effect)^{11, 12)}이 나타날 가능성이 있고, 또 시멘트 페이스트와 골재의 열팽창 계수 차이에 의해 이들의 접촉부분에 간극이 발생할 가능성도 있다. 게다가 고온의 영향으로 인해 자기수축이 촉진되어 미세한 마이크로 크랙의 발생 가능성도 있다.¹³⁾ 이와 같은 여러 요인들에 의해 고온이력을 받은 경우, 받지 않은 경우에 비해 형성되는 내부 미세조직이 치밀하지 않게 되므로, 염화물 침투성이 크게 된다고 보여

진다.

고온이력의 영향이 어느 정도인지 정량적으로 알아본 결과, 〈그림 4〉의 결과를 보면, W/C가 25%의 동일한 콘크리트라고 하더라도 고온이력을 받은 유무에 따라 W/C가 40%~50%의 콘크리트와 비슷한 염화물 확산계수를 보여주고 있고, 〈그림 8〉의 결과를 보면, 약 2~5배 정도 염화물 이동속도가 빠른 것으로 나타났다.

따라서 고강도 콘크리트를 이용한 구조물의 경우, 부재 레벨에서 수화열 발생에 의한 고온이력이 발생하기 쉬우므로, 내구성 측면으로부터 고온이력을 억제할 수 있는 대책의 검토가 반드시 필요하다고 생각된다. 그러나, 본 실험의 경우, W/C가 25%의 한가지 배합의 콘크리트에 대해, 약 70°C와 100°C의 고온이력만의 영향을 보았으므로, 콘크리트 배합과 온도 수준에 따른 영향을 정량적으로 검토해야 되리라 생각된다.

4.2 염화물 침투성 측정시험법에 대한 검토 결과

본 실험 결과, 현재 규격화 되어 있는 AAS HTO T 259의 90일간 염수 침적시험이나, ASTM C 1202의 급속 염화물 침투시험법으로 고강도 콘크리트에 대한 염화물 침투성을 평가하는 것은 다소 무리가 있다는 것이 확인되었다.

먼저, 3% 염수 중 90일간 침적시키는 AAS HTO T 259상의 시험법의 경우, 조직의 치밀도에 비해 침적기간이 너무 짧아 염화물이 침투되는 표면에서 1cm 이내의 부분에만 염화물이 존재할 뿐, 1cm보다 깊은 부분에는 염화물이 매우 적은 양 존재하는 것으로 나타나, 이와 같이 표면에만 농축되는 분포상황으로서는 염화물 침투성을 상대적으로 비교하는 것도 어려울 뿐만 아니라, 확산계수의 정량적인 평가도 어려웠다. 따라서 고강도 콘크리트 공시체에 대한 염수 침적시험의 경우에는 1년 이상의 장기간 침적을 시켜야 한다고 생각된다.

급속 염화물 침투시험법과 같은 전기 부가에 의한 촉진시험의 경우, 확산계수와 같은 정량적인 데이터를 얻기는 아직 힘들지만, 자연폭로에 비해 단기간에 상대적인 평가가 가능하다는 장점이 있어 앞으로 더욱 일반화, 실용화 될 가능성이 매우 높다고 볼 수 있다. 그러나, 앞서 설명

한 바대로 급속 염화물 침투시험법의 여러 문제점들이 지적되고 있고^{6,7)}, 15V 정도의 낮은 전압인가에 의한 방법은 상대적인 평가로서는 급속 염화물 침투시험법보다 양호하다고 생각되나, 투과에 걸리는 시간이 매우 길고, 염화물 화학분석을 행하여야 하는 번거로움이 있으므로, 본 실험의 범위내에서 보면, 급속 염화물 침투시험의 통과 전류량 뿐만 아니라, 시험 종료 후의 염화물 침투깊이로서 염화물 분포상황을 파악하는 것이 좋으리라 생각된다.

4. 결 론

W/C가 25%인 고강도 콘크리트에 대해 재령초기에 고온이력을 받을 여부가 염화물 침투 저항성에 미치는 영향을 검토한 결과, 이력온도가 높을수록 염화물 침투가 빠르게 되는 결과를 얻었다. 이는 초기재령에서 고온의 이력을 받게 되면, 공극의 조대화, 시멘트 물탈과 조골재의 열팽창 계수 차에 의한 물탈부분과 조골재 사이에 간극형성, 자기수축 촉진에 의한 미세균열 발생 등의 요인이 복합적으로 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

염해를 포함한 내구성 평가시 통상적으로 고온이력이나 양생방법 등의 시공요인 등은 고려치 않고 있는데, 부재레벨의 고강도 콘크리트 구조물에서는 수화열에 의한 온도상승을 보이므로 고온이력의 영향을 검토하지 않으면 안되리라 생각되며, 이에 대한 적극적인 검토와 데이터 축적이 필요하리라 보여진다.

또한, 염화물 침투성을 평가하기 위한 시험방법으로 염수 침적시험의 경우, 침적기간을 최소한 1년 이상 장기간으로 해야 할 것과, 급속 염화물 침투시험을 행할 경우에는 통과 전류량 뿐만으로는 평가가 곤란할 수 있으므로, 시험 종료 후의 실제 침투한 염화물 침투깊이 등을 함께 평가하는 것이 바람직하다고 생각된다.

<참 고 문 헌>

1. AASHTO T 259, Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration, American Association of State Highway Transporta-

tion Officers.

2. ASTM C 1202, Standard Test Method for Electrical Indications of Concrete Ability to Resist Chloride Penetration, American Society for Testing and Materials.
3. R. J. Detwiler, K. O. Kjellsen and O. E. Gjorv, Resistance to Chloride Intrusion of Concrete Cured at Different Temperatures, ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 1, pp. 19~24 (1991).
4. C. Andrade, Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements, Cement and Concrete Research, Vol. 23, pp. 724~742 (1993).
5. 鳥居和之, 電氣的促進試驗法により求めたセメント硬化体の塩化物の拡散係數, セメント・コンクリート, No. 604, pp. 18~22 (1997).
6. R. F. Feldman, G. W. Chan, R. J. Brousseau and P. J. Tumidajski, Investigation of the Rapid Chloride Permeability Test, ACI Materials Journal, Vol. 91, pp. 246~255 (1994).
7. J. D. Shane, J-H. Hwang, D. Shon, T. O. Mason, H. M. Jennings and E. J. Garboczi, Recent Developments in the Measurement of Transport Properties in Cement-Based Materials, Proceedings of the Materials Research Societys Symposium on Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-Based System, pp. 413~423, Boston, USA (1995).
8. 田中良樹, 藤田學, 渡辺博志, 高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性に關する檢討, 第23回日本道路回議一般論文集(B), pp. 338~339 (1999).
9. D. Whiting, Rapid Detetmination of the Chloride Permeability of Concrete, Final Report No. FHWA/RD-81/119, NTIS No. P B82130724, Federal Highway Administration (1981).
10. C. Shi, J. Stagemann and R. Caldwell, Effect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of

-
- Pore Solution and its Implications on the Rapid Chloride Permeability Test, *ACI Materials Journal*, Vol. 95, pp. 389~394 (1998).
11. E. J. Sellevold, "Mercury Porosimetry of Hardened Cement Paste Cured or Stored at 97", *Cement and Concrete Research*, Vol. 4, pp. 399~404 (1974).
 12. R. J. Detwiler, C. A. Fapohunda and J. Natale, Use of Supplementary Cementing Materials to Increase the Resistance to Chloride Ion Penetration of Concretes Cured at Elevated Temperatures, *ACI Materials Journal*, Vol. 91, pp. 63~66 (1994).
 13. 丁海文, 河野広隆, "渡辺博志, 鈴木雅博, 水和熱による高温履歴が高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす影響, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol. 21, No. 2, pp. 1117~1122, 1999.