

콘크리트 중의 철근부식 임계염화물량에 대한 실험적 검토

양승규* · 엄태선 · 이종열

<쌍용양회 기술연구소>

1. 서 론

콘크리트는 내구성이 우수하기 때문에 장기간 공용되는 구조물에 사용되어 왔으나, 최근 콘크리트 구조물은 여러 가지 열화인자에 의한 조기 열화가 문제되고 있다. 콘크리트 중의 철근부식도 이러한 열화인자의 하나로써, 철근부식의 주원인은 염화물이온(이하 Cl^-)이다. 콘크리트 중에 존재하는 Cl^- 의 확산, 외부로부터의 침투 및 중성화에 의한 농축 등에 의해 철근주변의 Cl^- 의 농도가 높아지면 부식이 발생한다. 특히, 콘크리트에 내재되어 있는 Cl^- 의 확산에 의한 철근부식은 콘크리트 구조물의 조기열화를 발생시키기 때문에 각국에서는 콘크리트 중의 Cl^- 량을 규제하고 있다. 한국과 일본의 경우, 콘크리트중의 Cl^- 량의 허용치를 $0.30kg/m^3$ 이하로 규제하고 있다. 또한, 일본의 경우에는 시멘트 중의 Cl^- 량을 200ppm이하로 규제하여 왔지만, 시멘트 제조에 있어서의 폐기물의 원료화 등의 사회적 요청도 있어, 350ppm까지 규제가 완화(2003년 12월)되었다.¹⁾

한국의 경우에는 시멘트 중의 Cl^- 함유량의 규제는 행해지지 않고 있지만, 리사이클링 자원의 시멘트 제조에의 유효이용, 콘크리트용 잔골재(강사)의 부족으로 인한 해사의 사용 등 콘크리트 제조시 염화물이 혼입 될 가능성이 높아지고 있기 때문에 콘크리트 중의 Cl^- 량을 $0.30 kg/m^3$ 이하로 만족하는 것이 곤란해지는 경우도 적지 않은 것이 실정이다.

그러나, 시멘트에는 수화에 따라 Cl^- 을 고정하는 능력이 있기 때문에 단위시멘트량에 의하지 않은, 콘크리트 $1m^3$ 에 함유되어 있는 Cl^- 의 총량에 의한 규제(콘크리트 총량규제)는 합리적이 아니고, 시멘트의 사용량에 근거한 규제(시멘트 총량규제: 사용되는 단위시멘트량에 의해 콘크리트 중의 Cl^- 량의 규제치가 변화, $C \times mass\%$ 이하)가 바람직하다고 생각된다. 실제 미국과 유럽에서는 시멘트 총량에 의해 콘크리트 중의 Cl^- 량을 규제하고 있다 (<표 1> 참조).

<표 1> 콘크리트 중의 Cl^- 규제치(미국, 유럽)

구분	시멘트 중의 Cl^-	콘크리트 중의 Cl^-	단위시멘트량이 500kg/m ³ 인 경우(예)	비 고
미국	-	PC : 0.08% 이하 습윤환경 RC : 0.10% 이하 건조환경 RC : 0.20% 이하	0.4kg/m ³ 이하로 규제 0.5kg/m ³ 이하로 규제 1.0kg/m ³ 이하로 규제	시멘트 총량표기 (시멘트량×mass%)
유럽	1,000ppm	무근콘크리트 : 1.00% 이하 RC : 0.20% 이하 PC : 0.10% 이하	5.0kg/m ³ 이하로 규제 1.0kg/m ³ 이하로 규제 0.5kg/m ³ 이하로 규제	시멘트 총량표기 (시멘트량×mass%)

또한, 콘크리트 표준시방서에서는 콘크리트 중의 철근부식 임계염화물이온농도(철근 부식시점의 콘크리트 중의 Cl⁻ 농도, 부식 한계염화물이온 농도)를 1.2kg/m³로 규정하고 있지만, 이 값은 시멘트의 종류, 콘크리트 배합 등에 의해서 변화하는 것이라고 추측된다.

따라서 본 연구에서는 단위시멘트량의 변화가 콘크리트 중 철근의 부식에 미치는 영향을 파악하기 위하여 단위시멘트량을 변화시킨 콘크리트 및 모르타르 시편을 제작하여 전기화학적 방법에 의한 철근부식 모니터링, EPMA에 의한 Cl⁻량의 면분석 등의 실험적인 검토를 수행하였다. 또, 철근부식이 확인된 부분의 Cl⁻량을 임계염화물량으로 하여 콘크리트 총량표기와 시멘트 총량표기의 비교·검토를 통한 콘크리트 중의 Cl⁻량에 대한 합리적인 규제방법을 제안하였다.

2. 철근부식과 부식에 영향을 미치는 인자의 관계

2.1 콘크리트 중의 철근부식 임계염화물량

콘크리트 중의 철근은 주위에 어느 정도 이상의 Cl⁻이 있을 때 부식한다. 이 양을 임계염화물량이라고 한다. 임계염화물량에 대해서는 많은 연구자에 의해 <표 2> 및 <표 3>과 같은 값이 보고되고 있다. <표 2>는 Funahashi²⁾가 정리한 콘크리트 중의 임계염화물량을 나타낸 것이고, <표 3>은 최근의 연구 결과를 김³⁾이 정리한 것이다.

이들 표와 같이 임계염화물량에 대해서는 많은 연구가 이루어지고 있음에도 불구하고 연구자에 따라 다른 값이 보고 되고 있으며, 원인으로

<표 2> 콘크리트 중의 철근부식 임계염화물량

연구자	발표년도	임계염화물량	
		kg/m ³	ppm(콘크리트 내부)
Lewis	1962	0.7	300
Hausmann	1967	0.2~2.8	75~1175
Berman	1972	0.77	325
Clear and Hay	1973	0.6~0.9	250~370
Clear	1974	0.66	286
Stratfull etc.	1975	0.66	286
Cady	1978	0.6~1.3	250~500
Browne	1980	1.33	572
Pfeifer etc.	1986	0.5~1.33	230~380

<표 3> 철근부식 임계염화물량에 관한 연구결과

연구자	조건		Cl ⁻ 함유량(%)
	시편	시험조건	
Gouda and Halaka	모르타르 현탁액	OPC	2.42
		BFSC	1.2
Hansson and Sorensen	OPC 모르타르 (외래 Cl ⁻)	100%RH	1.4
		50%RH	0.6
Gouda and Halaka	콘크리트 (내재 Cl ⁻)	OPC	3.04
		BFSC	1.01
Hussain etc.	C ₃ A 함유량	2.43%	0.35
		7.59%	0.62
		14.0%	1.0
Thomas etc.	해양환경 하의 콘크리트 기둥	-	0.50
Hope and Ip	콘크리트 슬래브	OPC	0.097~0.19

서는 콘크리트의 배합, 콘크리트 중의 함수량, 온도, 실험에 이용한 양이온의 종류, 시멘트의 C₃A량, 광물질 혼화제, 알칼리량, 부식의 검출방법 등의 차이를 생각할 수 있다. 특히, 시멘트의 C₃A량이나 광물질 혼화제 등의 사용은 시멘트의 Cl⁻의 고정화 및 자유 Cl⁻, 세공용액 중의 pH에 영향을 준다. 또한, 임계염화물량이 크게 상이한 이유를 Alonso⁴⁾ 등은 임계염화물량의 정의에 대한 연구자들 간의 견해차이로 지적하고 있다. 즉, 철근부식의 개시 또는 탈부동태 여부의 확인에 대한 기준이 상이하다는 점이다.

2.2 세공용액 중의 [Cl⁻]/[OH⁻]와 철근부식의 관계

과거에 행해진 조사결과에 의하면 일반적인 환경에 있는 콘크리트 구조물에서는 어느 정도의 Cl⁻을 함유하고 있어도 중성화가 철근의 주위까지 진행되지 않으면, 철근부식은 현저하게 나타나지 않는다. 이것은 Cl⁻이 존재해도 수산화물이온(OH⁻)이 일정 농도 이상 존재하면 철근표면에 부동태피막이 생성되어 부식이 발생하기 어려운 환경을 조성하기 때문이다. 즉, 철근부식의 발생 여부는 콘크리트 중의 Cl⁻농도와 수산화물이온 농도의 비([Cl⁻]/[OH⁻])에 크게 영향을 받아 반응을 일으키는 최소의 물리량이 존재하는 것이라고 생각할 수 있다.

알칼리 수용액 중의 철근부식에 관한 반응을 일으키는 최소의 물리량으로서는 Hausmann의 [Cl⁻]/[OH⁻]=0.6이 잘 알려져 있다. Hausmann은 pH치가 11.6에서 12.4의 범위에서는 pH의 증가와 함께 부식반응을 일으키는 [Cl⁻]/[OH⁻]에 대한 최소의 물리량은 증대하는 경향이지만, 대략 0.6이하라고 발표하였다.

Gouda는 pH치가 11.75에서 13.0을 넘는 알칼리성의 용액에 대한 연구를 실시하였으며, Diamond는 Gouda의 결과로부터 pH와 부식한계 [Cl⁻]/[OH⁻]의 관계를 산출해, pH가 증가하는 것에 따라 [Cl⁻]/[OH⁻]는 감소한다고 보고하였다. <표 4>에 이러한 값을 정리해 나타낸다.

<표 4> 부식한계 [Cl⁻]/[OH⁻]의 값⁵⁾

연구자	[Cl ⁻]/[OH ⁻]
Hausmann	0.6
Diamond	0.3
Breit	[Cl ⁻]/[OH ⁻] ^{1.5} = 10 ^{-0.245}

3. 실험개요 및 실험방법

3.1 사용재료

실험에 사용된 재료의 종류 및 물성을 <표 5>에 나타내었다. 철근은 이형철근D13을 사용하였으며, 10% 구연산암모늄 용액에 침적(60℃, 약 3일간)하여 철근표면의 흑피를 제거하였다.

3.2 배합

콘크리트 및 모르타르의 배합은 일정조건으로써 물시멘트비 및 공기량을, 변동조건으로써 단위시멘트량을 변화시켰다. 단위시멘트량은 콘크리트의 경우 300, 400kg/m³의 2수준으로 하였으며, 모르타르의 경우 400, 500, 600, 700 kg/m³의 4수준으로 하였다. <표 6>에 본 실험의 배합 및 초기 Cl⁻량을 나타내었다. 여기서, 배합명의 C는 콘크리트를, M은 모르타르를, 각각의 수치는 단위시멘트량을 나타낸다.

<표 5> 실험에 사용된 재료

재 료	종 류	물 성
시멘트(C)	보통포틀랜드시멘트	비중: 3.16, Cl ⁻ 량: 200ppm
잔골재(S)	小笠産육사	비중: 2.60, 흡수율: 1.52%, 조립률: 2.52
굵은골재(G)	岩瀬産쇄석	비중: 2.63, 흡수율: 0.98%, 최대치수: 10mm
혼화제(T)	소포제	마이크로에어404(NMB사 제품)

<표 6> 실험의 배합 및 초기 Cl⁻량

배합명	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	단위재료량					초기Cl ⁻ 량 (kg/m ³)
				W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	T (C×%)	
C-300	60	58.6	0	180	300	1105	790	0.02	0.051
C-400				240	400	867			0.072
M-400		100		240	400	1647	0		0.074
M-500				300	500	1409			0.085
M-600				360	600	1170			0.107
M-700				420	700	932			0.129

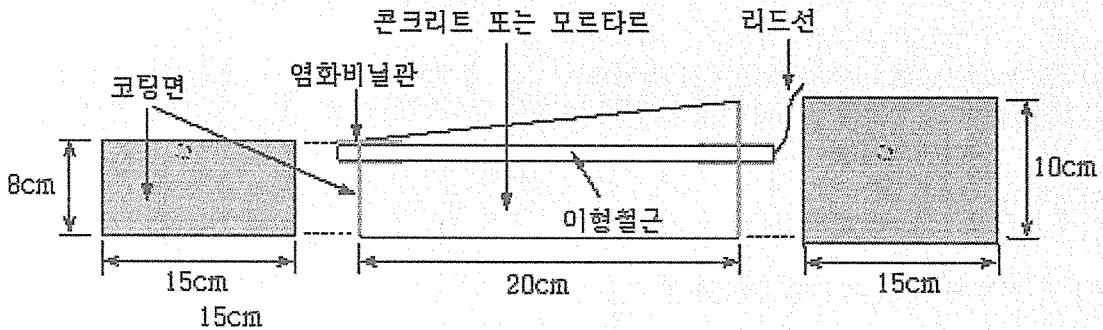
3.3 공시체의 형상 및 양생

공시체는 <그림 1>과 같이 덮개 콘크리트가 연속적으로 변화되도록 배근한 모르타르 및 콘크리트 공시체를 제작하였다. 또한, 재령 1일에 탈형해, 재령 28일까지 표준양생을 행하였으며, 1일간 건조시킨 후 시험을 개시하였다.

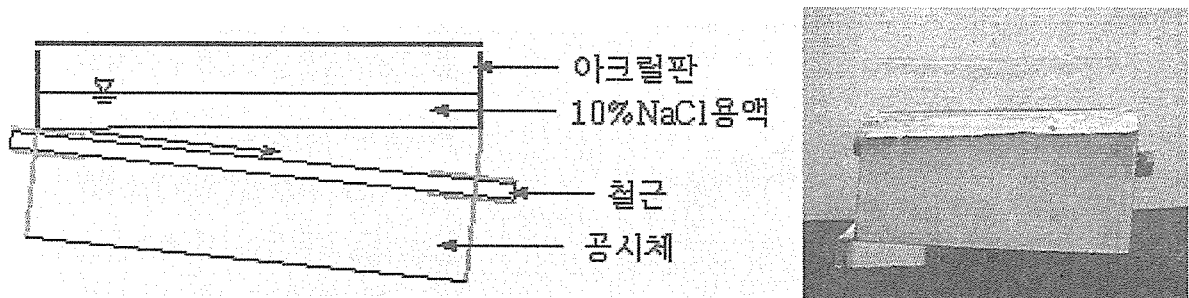
3.4 시험방법

3.4.1 Cl⁻ 침투방법

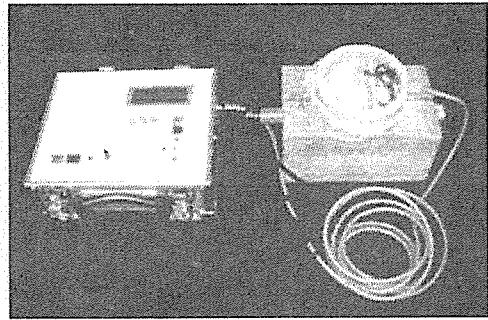
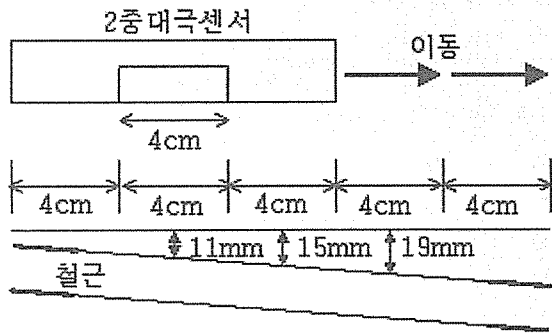
그림 2와 같이 공시체의 상면을 Cl⁻의 침투면으로 해, 공시체의 측면으로부터 부식이 진행되도록 하였다.



<그림 1> 공시체의 형상



<그림 2> Cl⁻의 침투방법



<그림 3> 철근의 분극저항 측정

3.4.2 철근부식 모니터링

소정의 침투기간이 경과한 공시체 중 철근의 분극저항을 측정하여 부식개시 시기 및 위치를 파악하였다. 분극저항의 측정은 교류임피던스법에 의해 행하였다.

3.4.3 공시체 중의 Cl⁻량 분석

철근의 부식임계염화물량을 파악하기 위하여 부식이 진행되고 있다고 판단된 공시체 내부의 Cl⁻량을 EPMA를 이용하여 측정하였다.

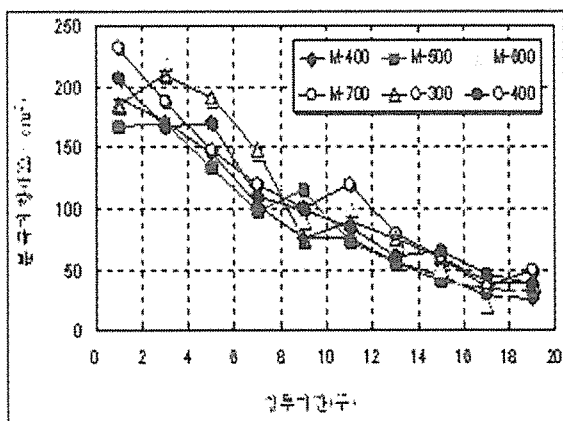
Cl⁻의 침투기간의 경과에 의한 덮개 콘크리트 11mm부분의 분극저항의 변화를 <그림 4>에 나타내었다. 그림과 같이 철근의 분극저항은 모든 수준에서 침투기간의 경과와 함께 감소하는 경향을 보였다. 분극저항의 감소는 Cl⁻의 침투에 의한 것으로 철근의 부식전류밀도 및 부식속도의 증가를 의미한다.

4. 결과 및 고찰

4.2 분극저항과 실제 부식상황과의 관계

분극저항의 측정으로부터 철근의 부식상황을 판단하는 기준은 아직까지 확립된 것은 없고 연구자 및 연구기관에 의해 제안되고 있는 상황이다. 본 연구에서는 <표 7>과 같은 CEB(유럽 콘크리트 위원회)에서 제안한 기준을 적용하여 분극저항과 철근의 실제 부식상황을 비교하였다.

4.1 Cl⁻의 침투에 의한 철근의 분극저항 분포



<그림 4> 분극저항의 경시변화

수준	침투기간7주	침투기간17주
M400	[Image]	[Image]
M500	[Image]	[Image]
M600	[Image]	[Image]
M700	[Image]	[Image]
C300	[Image]	[Image]
C400	[Image]	[Image]

<그림 5> 철근의 부식상황

<표 7> 부식속도 판정기준의 일례(유럽 콘크리트위원회)

분극저항 ($K\Omega \cdot cm^2$)	부식속도 추정치			부식속도의 판정
	부식전류밀도 $I_{corr}(\mu A/cm^2)$	부식손실량 ($mg/cm^2/년$)	침식속도 PDY($mm/년$)	
130이상	0.2미만	1.8미만	0.0023미만	부동태 상태
52~130	0.2~0.5	1.8~4.6	0.0023~0.0058	저~중정도의 부식속도
26~52	0.5~1.0	4.6~9.1	0.0058~0.0116	중~고정도의 부식속도
26미만	1.0이상	9.1이상	0.0116이상	높은 부식속도

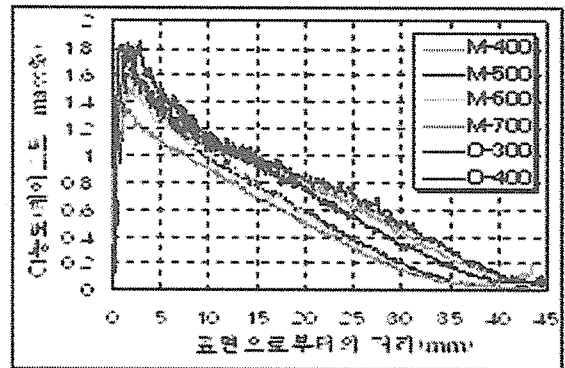
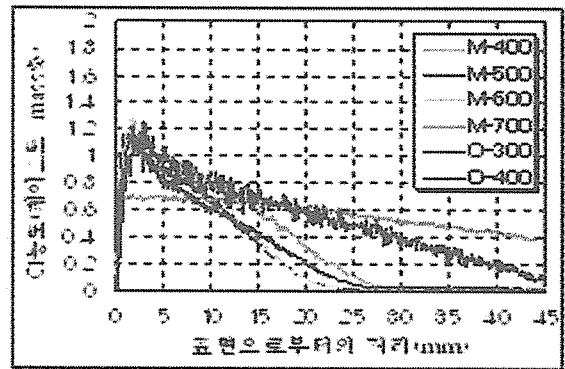
CEB의 기준으로 저~중정도의 부식속도를 나타낸 침투기간 7주와 중~고정도의 부식 속도를 나타낸 침투기간 17주의 공시체를 해체하여 공시체 중의 철근의 실제 부식상태를 관찰하였다.

<그림 5>는 철근의 부식상태를 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 그림과 같이 침투기간 7주의 철근은 부식이 발생하지 않은 상태였으며, 침투기간 17주의 철근에는 부식이 확인되었다. 이와 같은 결과로부터 교류인피던스법에 의한 분극저항(본 실험의 경우 26~52 $K\Omega \cdot cm^2$ 의 범위)의 측정으로 실제 콘크리트 중의 부식을 파악할 수 있었다.

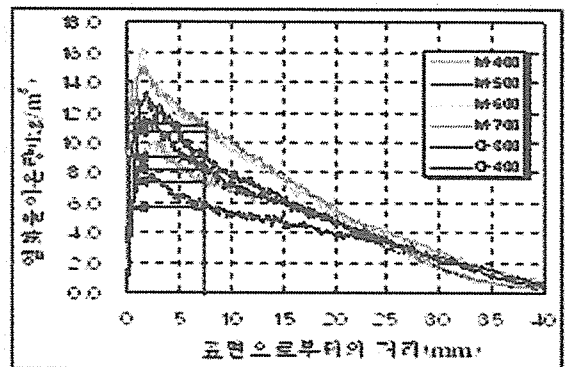
4.3 Cl^- 의 농도프로파일과 부식임계염화물량

부식이 개시되었다고 판단된 침투기간 7주와 17주의 공시체 중의 Cl^- 량을 분석한 결과, 침투기간의 경과와 함께 공시체 내부의 Cl^- 량이 증가하고 있음을 알 수 있었다(<그림 6> 참조).

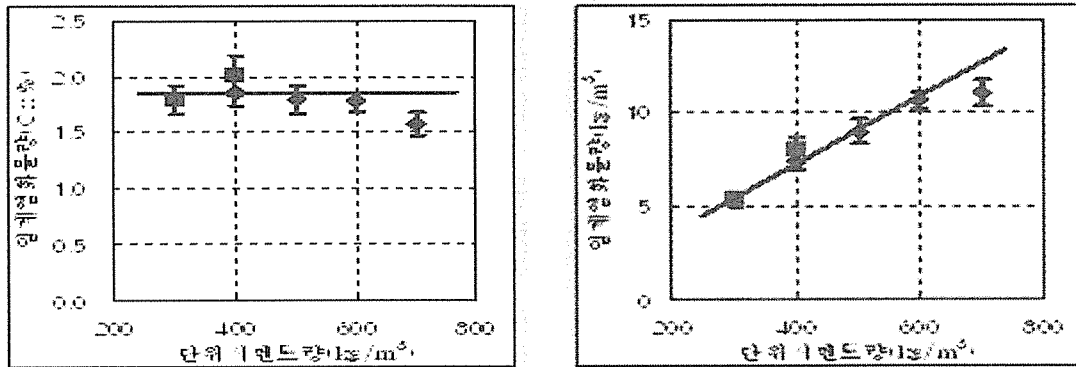
부식이 확인된 침투기간 17주의 Cl^- 량을 콘크리트 총량으로 표기한 것이 <그림 7>이다. 부식이 발생한 위치의 Cl^- 량을 임계염화물량으로 하면, 그림과 같이 임계염화물량은 단위시멘트량별로 5.37~11.0 kg/m^3 의 범위로서 임계염화물량은 단위시멘트량의 증가와 함께 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 단위시멘트량 등의 콘크리트 배합조건을 고려하지 않은 콘크리트 총량규제의 문제점을 증명하고 있다고 생각된다.



<그림 6> 공시체 중의 Cl^- 량의 변화



<그림 7> 임계염화물량의 변화



<그림 8> 콘크리트 총염화물(좌)과 시멘트 총염화물(우)의 비교

4.4 콘크리트 중의 Cl^- 규제에 관한 콘크리트 총염화물과 시멘트 총염화물의 비교

콘크리트 총염화물과 시멘트 총염화물의 차이점을 비교하기 위하여 <그림 7>을 단위시멘트량과 임계염화물량과의 관계로 정리하여 나타낸 것이 <그림 8>이다. 그림과 같이 콘크리트 총염화물의 경우에는 단위시멘트량에 의해 임계염화물량이 변화하지만, 이것을 시멘트 총염화물로나타내면 거의 일정한 값(단위시멘트량의 1.8% 정도)을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 콘크리트 중의 Cl^- 량에 관한 규제는 콘크리트 총염화물이 아닌 시멘트 총염화물이 합리적임을 실험적으로 검증할 수 있었다.

5. 결 론

콘크리트 중의 Cl^- 량의 합리적인 표기방법의 제안을 목적으로 실험적인 검토를 행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철근부식 임계염화물량은 콘크리트 단위체적당의 양으로 표기(총염화물)한 경우, 단위시멘트량(300~700kg/m³)의 증가에 비례하여 5.37~11.0kg/m³로 증가하였다.
- 2) 철근부식 임계염화물량은 단위시멘트량당의 양으로 표기(총염화물)한 경우, 단위시멘트량의 변화에 의하지 않고 단위시멘트량의 약 1.8% 정도로 일정하게 됨을 알 수 있었다.

- 3) 콘크리트 중의 Cl^- 량에 대한 규제는 시멘트 총염화물로 하면, 시멘트에 의한 Cl^- 의 고정화 등이 고려되어, 단위시멘트량에 의존하지 않고 일정하게 되기 때문에 합리적이라고 판단된다.
- 4) 향후 시멘트 및 혼화재의 종류, 물시멘트비가 부식에 미치는 영향, 세공용액조성과 철근부식과의 관계에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

<참고문헌>

1. 横田優 : “電氣化學的方法”, 콘크리트構造物の診斷f技術講演會, App.26~36, 2001.
2. M. Funahashi : “Predicting Corrosion-free Service Life of a Concrete Structure in a Chloride Environment”, ACI Materials Journal” No.6/V-87, pp. 581~587, 1990.
3. 김홍삼 : “전기화학적 기법에 의한 콘크리트 중의 염소이온 확산평가 및 철근부식 개시시기 예측”, 한양대학교 박사학위 논문, pp. 130~132, 2000.
4. C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote and P. Castro : “Chloride Threshold Values to Depassivate Reinforcing Bars Embedded in a Standardized OPC Mortar”, Cement and Concrete Research, V-30, pp. 1047~1055, 2000.
5. 細川佳史, 山田一夫 : “空隙水の $[Cl^-]/[OH^-]$ 의 経時變化と鋼材發錆に關する解析的檢討”, 中央研究所 月報分