

콘크리트 내부염소이온에 의한 철근의 부식특성 및 임계 염소이온농도의 결정 연구

Corrosion Characteristics of Steel Reinforcements Induced by
Internal Chlorides in Concrete and Determination of
Chloride Thresholds



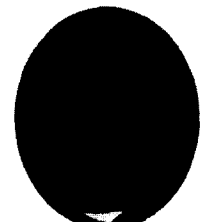
오병환*

Oh, Byung-Hwan



장승엽**

Jang, Seung-Yup



신용석***

Shin, Yong-Seok

ABSTRACT

The corrosion of steel reinforcements in concrete is of great concern in recent years. This study is focused on the corrosion behavior of steel bars induced by internal chlorides in concrete at early ages. The main objective of this study is to determine the chloride thresholds causing depassivation and active corrosion of steel reinforcement in concrete. To examine the threshold concentration of chloride ion, the half-cell potential, chemical composition of expressed pore solutions of concrete and the rate of corrosion area of the specimens were measured. Major variables include the added amount of chlorides in concrete, types of binders, and water-to-binder ratios. From the present comprehensive experimental results, the factors influencing chloride-induced corrosion are investigated, and the chloride thresholds causing active corrosion of steel bars are proposed. The present study will enable to specify the realistic chloride limit in concrete which can be used in the future technical specification.

Keywords : corrosion, internal chloride, chloride thresholds, half-cell potential, pore solution

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정
*** 정회원, 서울대학교 토목공학과 연구원

·본 논문에 대한 토의를 1999년 10월 30일까지 학회로 보
내 주시면 1999년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트의 내구성에 있어 철근의 부식문제는 매우 중요한 위치를 차지한다. 특히, 염소이온에 의해 발생하는 부식은 해사 사용의 증대, 해양구조물 건설의 증가와 더불어 날로 그 중요성이 커지고 있다. 염소이온에 의한 부식 메카니즘은 현재에도 많은 연구가 진행되고 있으나, 명확한 규명이 이루어지지 않고 있다. 그 중에서도 부식을 유발하는 염소이온의 부식임계농도(chloride thresholds)를 밝히는 것은 부식발생시점을 예측하고, 콘크리트의 허용 염분량을 결정하는데 있어 실제적으로 매우 중요한 문제로 부각되고 있다. 또한, 콘크리트 구조물의 허용 염분규정은 각국마다 차이를 나타내고 있어 부식발생 허용염분량에 대한 연구가 절실히 필요하다.

염해환경에 있는 일반적인 콘크리트는 콘크리트내의 세공용액의 높은 알칼리도로 인해 부동태(passivity)상태를 유지한다⁽¹⁻²⁾. 그러나, 배합 시에 이미 내부에 존재하거나 외부로부터 침투하는 염소이온이 일정 농도, 즉 부식임계농도에 이르게 되면 이러한 부동태상태는 파괴된다. 콘크리트에 매설된 철근 주위의 부동태는 세공용액의 OH⁻이온농도에 의해 좌우된다. Hausmann⁽³⁾과 Gouda⁽⁴⁾는 알칼리 용액 중에 침지한 철근의 부식상태를 관찰하여 일정한 염소이온과 수산화이온 농도비([Cl⁻]/[OH⁻])가 일정 값에 이르면 부동태가 파괴된다는 사실을 보였다. 그러나, 콘크리트 내에서는 알칼리용액에서의 강재의 거동과는 다소 다른 양상을 나타낸다는 보고가 있다. 현재까지 실제 콘크리트 내에서의 임계농도를 밝히기 위한 많은 연구가 시도되었는데⁽⁵⁻⁸⁾, 이 가운데 Lambert⁽⁶⁾ 등은 콘크리트 내에서는 철근 주위에 접해 있는 시멘트 수화물의 보호작용(bubble effect)으로 인해 임계치가 알칼리 용액에서보다 더 커질 수 있다고 보고하였다.

이러한 보호작용은 염소이온의 구속과도 밀접한 연관이 있다. 콘크리트 중의 염소이온은 시멘트 수화물의 물리적, 화학적 구속에 의해 구속되는 성분과 세공용액 중에 녹아있는 자유염소이온의 두가지 상태가 서로 농도평형을 유지하면서 존재하게 된다. 최근까지의 연구에 의하면⁽⁹⁻¹¹⁾, 이러한 염소이온의 구속은 주로 세공용액의 OH⁻이온농도, 시멘트와 혼화재료의 화학조성(C₃A, alkali 성분 등), 분말도

등 물리적 성질과 콘크리트의 내부온도에 따라 좌우된다. 결국 임계농도를 결정하기 위해서는 세공용액의 OH⁻이온농도와 염소이온의 구속도 등의 복합적인 영향인자들을 종합적으로 고려해야 할 필요가 있다.

본 연구는 염소이온을 함유한 콘크리트의 부식발생특성을 연구하여 내부 염소이온에 의한 부식임계농도를 규명하는 데 목적을 두고 있으며, 이를 위해 혼입된 염소이온의 양을 주변수로 하고 각 시험체의 철근 부식면적율과 경과시간에 따른 반쪽전지 전위(half-cell potential)를 측정하여 내부에 묻힌 철근의 부식상태를 관찰하였다. 또, 내부염소이온의 고정화 현상에 의해 결합재의 성분, 배합특성 및 세공용액(pore solution)의 성분 등에 따라 직접적으로 부식을 유발하는 자유염소이온의 양이 크게 달라지기 때문에 결합재의 종류, 물-결합재비에 따라 7가지의 배합으로 나누어 실험을 수행하였으며, 각 시험체의 세공용액의 성분을 관찰하기 위한 방법으로 세공용액 압착추출법(pore solution expression method)⁽¹²⁾을 도입하여 각 변수의 자유염소이온(Cl⁻)농도와 OH⁻이온 농도를 분석하였다. 이러한 결과를 토대로 내부 염소이온의 작용으로 인한 철근의 부동태의 변화 및 경과시간에 따른 부식발생특성과 염소이온농도에 따른 염소이온의 고정화 상태를 분석하고, 결합재와 세공용액의 성분에 따라 달라지는 내부 염소이온의 부식임계농도를 분석하여 규명하였다.

2. 내부염소이온에 의한 철근콘크리트내의 철근부식실험

2.1 실험변수

본 실험의 실험변수와 배합조건은 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 부식임계농도를 파악하기 위해 각국의 염분허용기준을 고려하여 염분함량을 시멘트 중량비 0.0~2.0%범위까지 8가지 나누었다. 배합종류는 결합재의 성분에 따른 부식특성을 파악하기 위해 시멘트 종류, 물-시멘트비, 혼화재(플라이애쉬, 슬래그)의 혼입량 등에 따라 7가지의 배합을 선정하였다. 실험에 사용한 시멘트와 혼화재의 화학조성을 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Test Variables

test variables	levels of variables	remarks
total chloride addition	0.0%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 0.12%, 0.16%, 2.0%	wt % of binders
types of mixtures	LI, NI, HI, NV, NIFA15, NIFA30, NISlag30	see Table 2

Table 2 Details of mixture proportions

types of mixture	water/binder ratio	types of cement	admixture
LI	0.55	type I	-
NI	0.45	type I	-
HI	0.35	type I	-
NV	0.45	type V	-
NIFA15	0.45	type I	Fly ash 15%
NIFA30	0.45	type I	Fly ash 30%
NISlag30	0.45	type I	Slag 30%

Table 3 Chemical composition of binders

binders	Oxide composition percent by weight									Potential compound composition percent by weight				
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Alkali
type I	61.20	22.00	6.20	3.20	2.80	1.10	0.10	2.00	1.40	35.7	36.2	11.0	9.7	1.2
type V	62.03	22.11	4.20	4.27	2.87	0.72	0.09	2.03	1.70	50.1	25.6	3.9	13.0	0.8
Slag	43.34	33.86	14.67	0.32	5.95	0.61	0.19	0.12	0.67	-	-	-	-	-
Fly ash	3.89	59.74	23.60	6.07	0.95	0.96	0.49	0.40	3.90	-	-	-	-	-

2.2 시험체의 제작 및 실험방법

각 실험변수에 대해 Fig. 1과 같이 직경 13 mm의 철근을 매설한 각주형의 시험체를 베이스 콘크리트로부터 추출된 모르타르로 제작하였다. 제작된 시험체를 20±2℃의 온도와 95±5%의 상대습도에서 양생하면서 재령 30일까지의 자연전위를 3일 간격으로 측정하였고, 재령 30일 후에 세공용액을 추출하여 염소이온(Cl⁻), 수산화이온(OH⁻) 농도와 철근의 부식면적율을 측정하였다. 각 변수의 배합비는 Table 4에 나타낸 바와 같다.

2.2.1 반쪽전지 전위 측정

염소이온에 의한 부식진행정도를 분석하기 위해 반쪽전지 전위(half-cell potential)를 측정하였으며, 반쪽전지 전위의 측정은 구리-황산동전극(CSE)을 사용하였고, ASTM C 876^[13]에 따랐다.

2.2.2 세공용액의 추출 및 분석

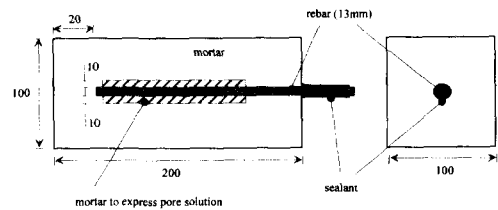


Fig. 4 Schematic diagram of test specimens (unit : mm)

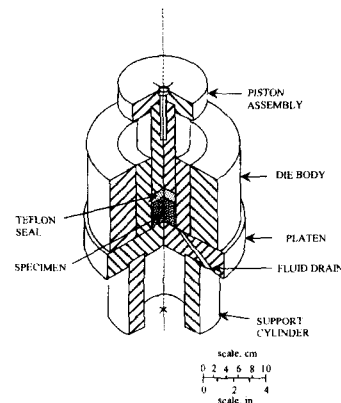


Fig. 5 Test apparatus for pore solution expression^[12]

Table 4 Mixture proportions

W/C	결합재 (kg/m ³)	물 (kg/m ³)	잔골재 (kg/m ³)	굵은골재 (kg/m ³)	AE감수제 (%, 시멘트중량비)
0.55	316	174	749	1034	0.5
0.45	387	174	690	1035	0.5
0.35	497	174	621	1013	0.8

콘크리트내의 세공용액의 추출은 Fig. 2와 같은 세공용액 추출장치를 사용하여 수행하였고, 추출된 세공용액으로부터 크로마토그래피법과 페놀프탈레인을 이용한 습식적정법을 이용하여 자유염소이온과 수산화이온의 농도를 측정하였다.

3. 부식특성실험결과 및 분석

3.1 철근부식특성 분석

3.1.1 양생시간과 반쪽전지 전위 관계

Fig. 3은 재령에 따른 반쪽전지 전위의 변화과정을 측정한 것으로서 각 배합변수에 대해 재령초기에 반쪽전지 전위가 증가하는 경향을 보이고 이후 일정 값에 접근하는 변화가 나타난다. 이는 수화가 진행됨에 따라 철근 주위의 부동태화가 형성되어가는 현상을 반영하는 것으로 사료된다.

30일 양생기간동안의 평균 반쪽전지 전위를 염소이온 첨가량에 대해 나타내면, Fig. 4에서 보듯이 염소이온의 첨가량이 많을수록 대부분 낮은 농도에서는 비슷한 값을 보이다가 일정 농도에서 거의 직선에 가깝게 전위가 감소함을 알 수 있다. 일반적으로 ASTM^[13] 등에 -0.35V(vs CSE)에서 부식의 확률이 90% 이상이 되므로 이 부근에서의 염소이온

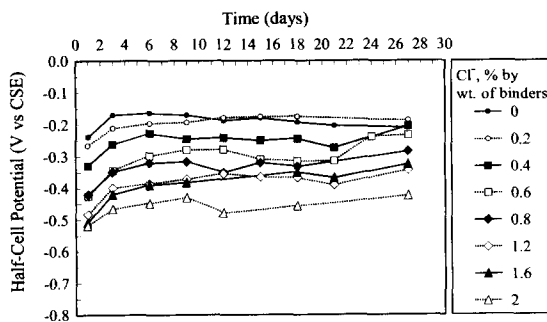


Fig. 3 Variation of half-cell potential according to age (OPC, w/c=0.45)

첨가량이 임계부식농도일 가능성이 높다. 그러나, 물-시멘트비에 따라서는 반쪽전지전위 값의 차이가 거의 없는 것으로 나타나고 있다(Fig. 4). 즉, 결합재 중량에 대해 일정한 농도에서는 유사한 부식특성을 나타내고 있음을 보여주고 있다.

결합재 종류별로는 C₃A함량이 가장 적은 5종배합이 가장 낮은 전위를 나타내고, 상대적으로 1종배합이 가장 높은 전위를 나타낸다.

3.1.2 염소이온 첨가량과 철근의 부식면적률

반쪽전지 전위와 함께 재령 30일에 시험체로부터 추출된 철근의 부식상태를 관찰하여 Fig. 6과 같이 철근의 부식면적율을 측정하였다.

Fig. 6은 각 배합변수별로 부식면적율을 측정한 것으로서 LI, NI와 NV가 가장 높은 부식면적율을 나타내고 있고, 다음으로 HI, NIFA15, NIFA30 등이 그보다 다소 낮은 부식면적율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 부식면적율은 표면의 부식상태를 시각적으로 관찰하는 것이므로 실제 부식발생량과는 다소 차이가 있을 수 있지만 전반적으로 염소이온 첨가량이 증가할수록 커지는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 7은 부식면적율과 반쪽전지 전위의 관계를 측정된 53개의 Data에 대해 나타낸 것이다. 구리-황산동전극(CSE)을 기준으로, -200mV~-350mV 사이의 범위는 부식가능성이 불확실한 영역인데, 실험결과 역시 -200mV~-350 mV의 범위에서 0~2%사이의 부식면적이 관찰되었으며, 반쪽전지 전위 -325mV를 전후로 부식면적율이 상대적으로 급격히 증가함을 알 수 있다.

3.2 세공용액 추출 결과분석

3.2.1 염소이온 첨가량과 자유 염소이온량 관계

세공용액 분석 결과를 통해 얻은 자유염소이온량과 총 염소이온첨가량과의 관계는 Fig. 8에 나타낸

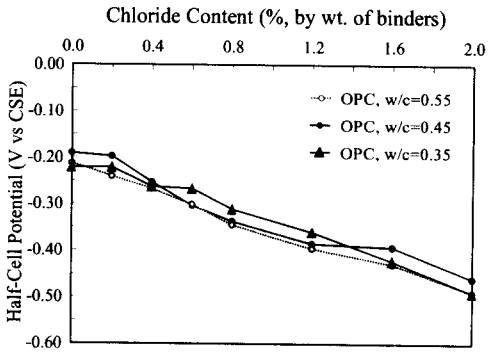


Fig. 4 Variation of half-cell potential according to chloride content (effect of water/binder ratio)

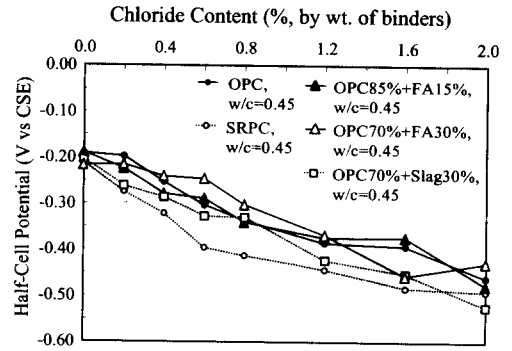


Fig. 5 Variation of half-cell potential according to chloride content (effect of types of binders)

바와 같다. Fig. 8에서 보면 염소이온침가량이 증가할수록 자유염소이온량도 따라서 점차 증가하는 선형적 관계를 나타냄을 알 수 있다. 각 영향인자에 따른 자유염소이온량의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 물-결합재비에 따른 자유염소이온량의 변화

Fig. 9에서 알 수 있듯이 물-결합재비에 따른 자유염소이온량의 차이는 특별한 경향을 보이지 못하고 있다. 결합재량에 비례해서 염소이온을 첨가하였으므로 물-결합재비가 감소함에 따라 염소이온의 절대량은 증가함에도 불구하고 염소이온의 고정화 및 구속도에는 큰 영향이 없는 것을 보여주고 있다. 즉, 염소이온의 결합재 중량비가 일정하면 물-결합재비가 변화하더라도 염소이온의 구속도는 크게 달라지지 않음을 알 수 있다.

(2) 시멘트 종류에 따른 자유염소이온량의 변화

시멘트 종류에 따른 특성변화는 반쪽전지 전위의 결과에서도 나타났듯이 매우 뚜렷하다. 즉 5종 시멘트와 1종 시멘트의 C₃A 함량의 차이에 의해 염소이온의 고정화 정도가 매우 크게 변하고 있음을 알 수 있다. 사용된 5종시멘트와 1종시멘트의 C₃A량이 각각 3.9%, 11.0%임을 감안하여 볼 때 염소이온 침가량이 작을 경우에는 구속도에서 별 차이를 보이지 않고 있지만 염소이온혼입량이 증가할수록 5종시멘트를 사용한 배합의 자유염소이온량이 1종시멘트를 사용한 배합에 비해 현저히 증가하고 있음을 알 수 있다(Fig. 10).

(3) 혼화재의 혼입에 따른 자유염소이온량의 변화 기존의 연구를 살펴보면 포졸란계 혼화재는 염소이온의 구속도에 일부 영향을 미치는 것으로 나타나 있다. 그러나, Fig. 11에서 보듯이 재령초기에서는 혼화재의 혼입에 따른 영향이 그다지 크게 나타나지 않고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로 보아 염소이온의 구속에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 시멘트중의 C₃A함량임을 알 수 있다. Fig. 12(a)는 C₃A함량에 따른 염소이온 구속도의 차이를 분명히 보여주고 있다. 또, Fig. 12에 따르면 C₃A함량 이외에 alkali content, 세공용액의 OH⁻농도 등도 염소이온 구속도에 상당히 중요한 영향인자임을 알 수 있다.

3.3 부식임계농도의 추정

3.3.1 부식 임계치의 추정

부식특성실험을 통해 나타난 반쪽전지전위에 대한 염소이온침가량과 자유염소이온량 및 [Cl⁻]/[OH⁻]의 관계는 Fig. 13과 같다(OPC, w/c=0.45의 경우). 그림에서 자유염소이온과 염소이온침가량 및 [Cl⁻]/[OH⁻] 모두 반쪽전지전위에 대해 선형적인 관계를 가짐을 알 수 있다.

앞서 부식면적율과 반쪽전지 전위의 관계에서 부식면적율의 급격한 증가가 관찰된 -325mV를 임계전위로 정의한다면, 이 임계전위에 해당하는 염소이온의 임계농도를 Fig. 13의 관계에서 추정할 수 있다. 30일간의 부식자료만으로 임계농도를 추정하는 것은 다소 무리가 있을 수 있지만, 이미 서술한 바

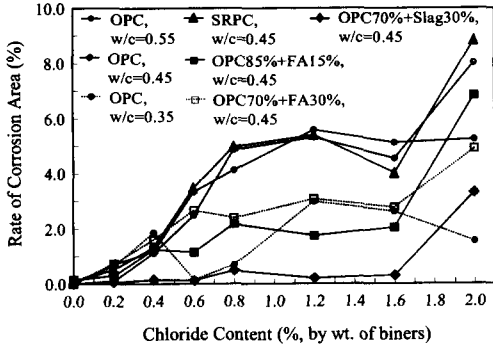


Fig. 6 Rate of corrosion according to chloride content

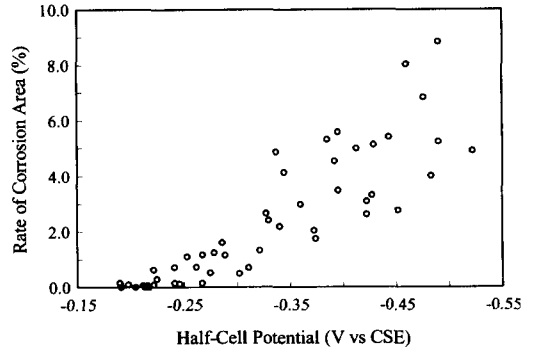


Fig. 7 Rate of corrosion area according to half-cell potential

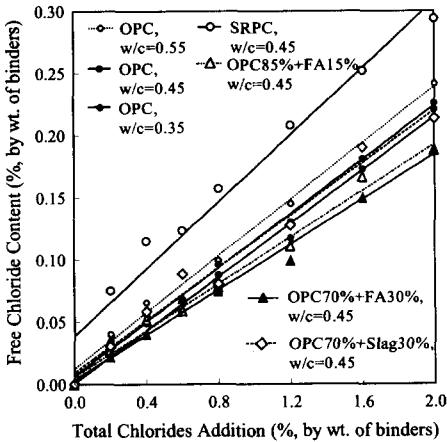


Fig. 8 Relation between total chloride content and free chloride content

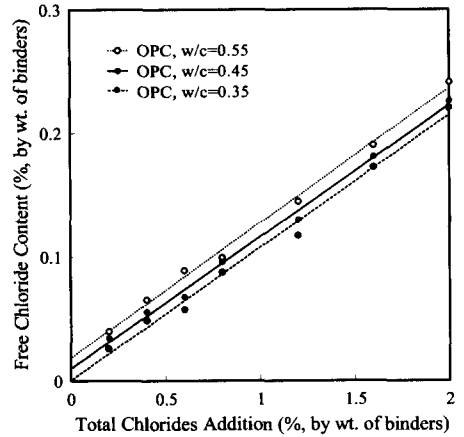


Fig. 9 Relation between total chloride content and free chloride content according to the water/binder ratio

와 같이 초기재령에서의 반쪽전지 전위가 가장 크고 이후 전위가 계속 감소하는 경향을 나타내기 때문에 30일간의 부식발생면적이 낮다면 추가적인 염소이온의 침투가 없는 상태에서는 더 이상의 부식발생이 없다는 가정이 가능하다고 사료된다.

따라서 이와 같이 설정된 임계전위 -325mV에 해당하는 자유염소이온량과 염소이온침가량(총 염소이온량) 및 $[Cl^-]/[OH^-]$ 의 임계치를 추정하였고, 이 결과를 Table 5에 요약하여 제시하였다.

3.3.2 임계 총 염소이온량(Threshold content of total chlorides)

본 연구결과로부터 임계 총 염소이온량의 경우 결합재 중량에 대해 0.45~0.97%의 값을 가짐을 알

수 있다. 이는 Hussain⁽⁷⁾ 등의 C_3A 함량에 따른 부식임계농도에 대한 연구결과와 거의 일치한다. 이 연구결과에 따르면, C_3A 함량이 2.43, 7.59, 14%의 시멘트에 대해 임계 염소이온량이 각각 시멘트 중량에 대해 0.48~0.59, 0.73~0.85, 1.01~1.20%로 나타났는데, 본 실험결과는 C_3A 함량 3.9, 11.0 %에 대해 각각 0.45, 0.93%로서 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 14는 C_3A 함량에 따른 임계 총 염소이온량을 본 연구결과와 Hussain의 연구결과를 비교하고 있으며, Fig. 15는 fly ash의 혼입에 따른 영향을 Thomas⁽⁸⁾의 연구결과와 비교한 것이다. Fig. 15에서 플라이애쉬의 혼입에 따른 임계 염소이온 침가량의 변화는 플라이애쉬 혼입량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내는데, 이러한 경향

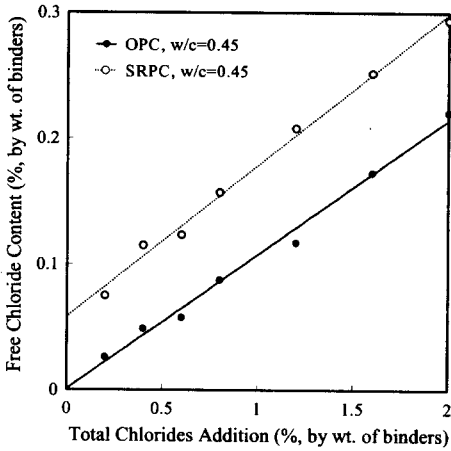


Fig. 10 Relation between total chloride content and free chloride content according to the types of cement

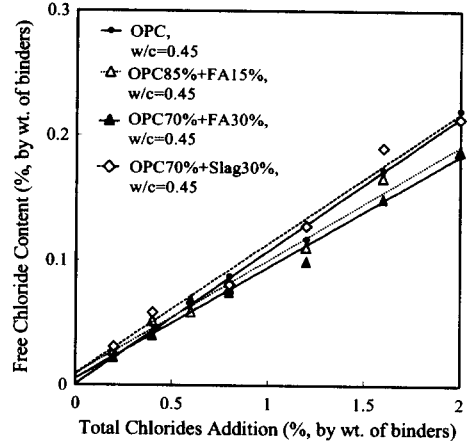


Fig. 11 Relation between total chloride content and free chloride content according to the types of admixture

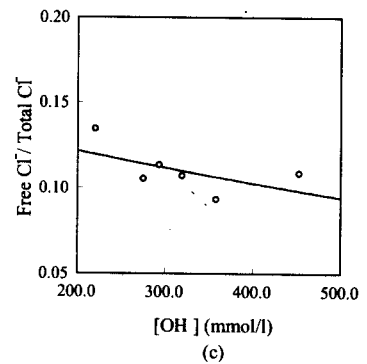
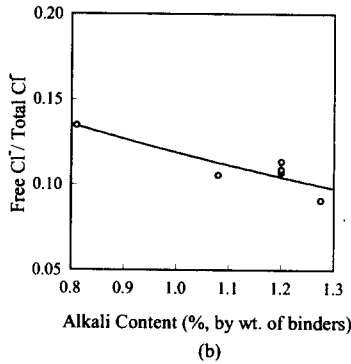
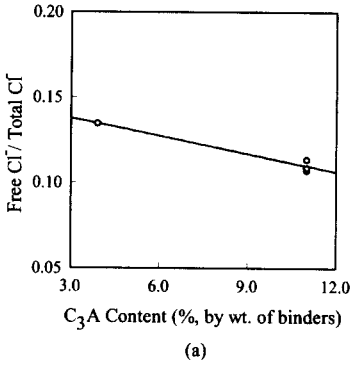


Fig. 12 Variation of chloride binding ratio according to (a) C_3A content, (b) alkali content, and (c) OH^- concentration in pore solution

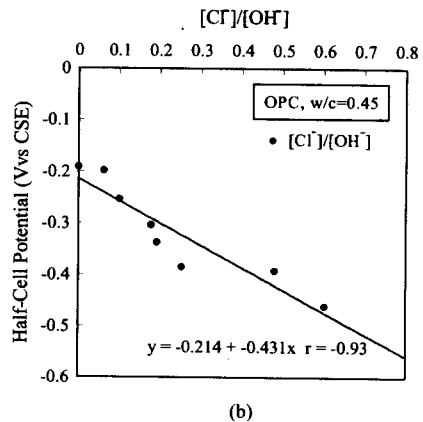
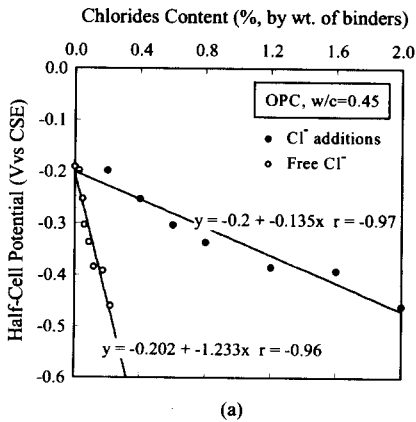


Fig. 13 Relation between half-cell potential and chloride content, and deduction of chloride thresholds

Table 5 Deduced chloride thresholds

types of mixture	Chloride thresholds		
	Total chlorides, percent by wt. of binders	Free chlorides, percent by wt. of binders	$[Cl^-]/[OH^-]$
LI	0.78	0.12	0.17
NI	0.93	0.11	0.25
HI	0.89	0.12	0.19
NV	0.45	0.12	0.26
NIFA15	0.90	0.11	0.19
NIFA30	0.68	0.07	0.21
NISlag30	0.97	0.13	0.23

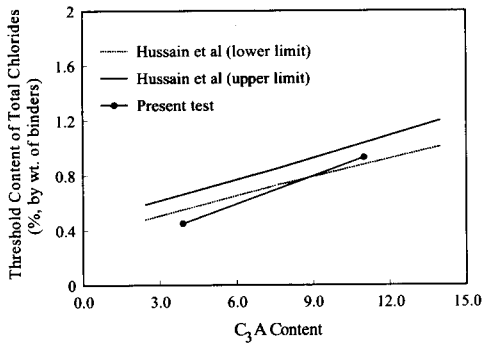


Fig. 14 Threshold content of total chlorides according to C₃A content

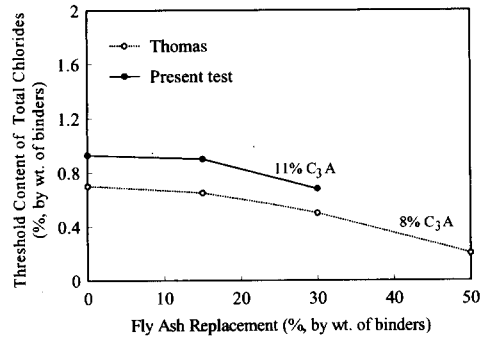


Fig. 15 Threshold content of total chlorides according to fly ash replacement

도 Thomas의 기존 연구결과와 잘 일치한다. 이러한 경향을 나타내는 것은 앞서 서술한 바와 같이 플라이애쉬의 혼입에 의한 pH의 감소가 주원인으로 판단되며, 플라이애쉬는 주로 염소이온의 화학적 구속력을 증가시키는 것으로 알려져 있으나, 초기 재령에서는 포졸란 반응이 활발하지 않기 때문에 구속력의 증가가 크게 나타나지 않은 것으로 사료된다.

반면, 슬래그를 30% 혼입한 경우는 염소이온 구속효과가 높게 나타나지 않았음에도 불구하고 임계 염소이온량이 가장 크게 나타나 부식저항성이 1종시멘트 배합에 비해 상대적으로 우수 또는 유사한 정도로 나타났다. 또, 물-결합재비에 따라서는 차이가 매우 근소하게 나타났으며, 이 차이는 시멘트량이나 물-결합재비에 따른 수화도의 차에 의해 나타나는 것으로 보는 것이 타당할 것이다.

3.3.3 임계 자유염소이온량(Threshold content of free chlorides)

Table 5의 결과에서 보듯이 임계 자유염소이온량을 살펴보면, 각 변수별로 약간의 차이는 있지만 약 0.07~0.13% 사이의 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 앞에서 추정된 임계 총 염소이온량과는 많은 차이를 보이고 있다. 즉, 총 염소이온 중의 내부 구속에 의해 임계농도가 상당히 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 임계 총 염소이온량(0.45~0.97%)에 비해 거의 편차가 없다고 볼 수 있다. 즉, 임계 총 염소이온량은 시멘트 종류나 배합에 따라 다르게 나타나지만, 임계 자유염소이온량은 비교적 일정한 값을 나타낸다는 것을 보여주고 있는 것이다. 이것은 Fig. 16의 각 변수에 따른 임계 총 염소이온량과 자유염소이온량의 상대적인 비를 보면 아주 분명한 사실로 나타나는 것을 알 수 있다.

3.3.4 임계 $[Cl^-]/[OH^-]$

또 하나의 기준값으로서 $[Cl^-]/[OH^-]$ 값을 살펴보면 Table 4에서 임계값이 약 0.17 ~0.26 정도의

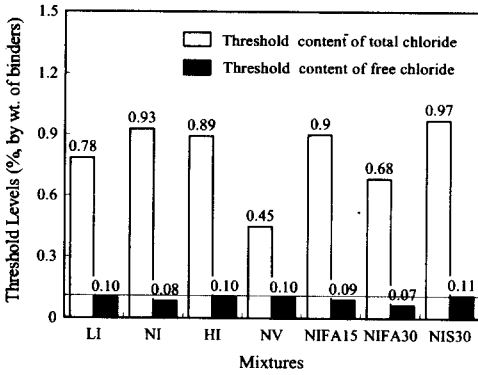


Fig. 16 Comparison between threshold content of total chlorides and free chlorides

범위에 나타나고 있다. 물론 각 시멘트의 종류에 따라 세공용액의 pH가 다르기 때문에 차이가 있을 수 있으나 Haussmann^[3] 이 제시한 임계치인 0.6이나 Gouda^[4]가 제시한 0.3보다 다소 작은 것으로 나타나 부식임계농도로서 본 연구결과가 좀 더 강화된 안전측의 결과를 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구는 콘크리트내의 염분의 함량, 시멘트의 화학조성, 혼화재의 종류, 물-시멘트비 등에 따른 철근의 부식특성실험을 통해 콘크리트 내 세공용액의 성분과 철근의 부식상태를 관찰하여 콘크리트 내에서의 염소이온의 구속특성 및 그 영향인자와 염소이온 부식임계농도와의 관계를 규명하고자 하였다. 본 연구를 통해 염소이온 고정화 특성의 주요 영향인자의 영향과 염소이온 부식임계농도를 도출하였으며 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 염소이온의 고정화 특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 시멘트의 C₃A함량으로 나타났으며, 혼화재(플라이애쉬, 슬래그) 등의 대체에 따른 영향은 재령 초기에는 미약하게 나타났다. 또한 물-결합재비는 결합재 중량에 대해 중량비로 표현되는 임계 자유염소이온의 양은 큰 영향을 보이지 않는 것으로 나타났다

(2) 본 연구결과 콘크리트내의 철근의 부식을 유발하는 염소이온농도의 임계치는 다음과 같이 나타

났다.

- 임계 총 염소이온량 (total chlorides)
: 0.45~0.93% (결합재 중량비)
- 임계 자유염소이온량 (free chlorides)
: 0.11~0.13% (결합재 중량비)
- 임계 [Cl⁻]/[OH⁻] 농도비
: 0.17 ~ 0.26

(3) 본 연구결과 염소이온의 구속도에 따라 부식 저항성이 크게 좌우되는 것으로 나타났으며, 따라서, 콘크리트의 허용염분량을 규정할 때에는 각각의 배합특성에 따라 그 기준을 구분하여 적용하는 것이 좀더 바람직한 것으로 나타났다.

(4) 현재 내부염소이온에 대한 제한 규정은 배합에 관계없이 시멘트 중량이나 단위부피에 대해 일정량으로 제한하고 있다(콘크리트시방서: 0.3kg/m³). 그러나, 본 연구결과, 시멘트 종류 및 혼화재(플라이애쉬 및 슬래그 등)의 사용량에 따라 적정 임계 염소이온량이 달라진다.

따라서, 현행 시방서의 콘크리트 중 염분허용기준은 이러한 시멘트의 종류와 혼화재 사용량등에 따른 영향을 고려하여 콘크리트 중의 자유염소이온량에 대해 규정하거나 골재 등 배합재료의 총 염분량과 콘크리트 자유염소이온량을 동시에 규정하는 것이 더 합리적인 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구결과에서 제안된 임계농도는 내부염소이온에 국한된 것이므로 보다 합리적인 염분허용기준의 정립을 위해서는 외부염소이온의 침투량을 합리적으로 예측할 수 있는 방안이 보다 많은 연구를 통해 수반되어야 할 것으로 사료된다.

(5) 본 실험에서 세공용액의 성분분석을 위해 사용된 세공용액 압착추출법(pore solution expression method)을 이용하여 체계적인 절차와 실험규정을 도입한다면 자유염소이온량으로 콘크리트내의 내부염소이온을 규정함으로써 실제 배합특성, 즉 시멘트 종류, 단위시멘트량 그리고 혼화재의 종류 및 첨가량에 따른 염소이온량 제한규정을 보다 합리적으로 제시할 수 있을 것으로 사료되며, 이것이 실제 구조물의 관리에도 적용가능할 것으로 사료된다.

아울러 본 연구는 앞으로 콘크리트 구조물의 철근 부식에 관한 허용염분량의 제정에 유용한 자료와 토대를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 건설교통부 연구과제 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Kdroff, K. and Hilsdorf, H.K., "Performance Criteria for Concrete Durability," Rilem report 12, E & FN Spon, Rilem, London, 1995.
2. Sciessel, P., "Corrosion of Steel in Concrete," Report of the Technical Committee 60-CSC, Rilem, Chapman and Hall, 1997.
3. Hausmann, D.A., "Steel Corrosion in Concrete : How Does It Occur?," Materials Protection, Vol.6, No.11, 1967, pp.19-23.
4. Gouda, V.K., "Corrosion & Corrosion Inhibition of Reinforcing Steel : 1-Immersion in Alkaline Solution," British Corrosion Journal, Vol.5, Sept. 1970, pp.198-203.
5. Hope, B.B. and Ip, A.K.C., "Chloride Corrosion Threshold in Concrete," ACI Materials Journal, Vol.84, No.4, 1987, pp.306-314.
6. Lambert, P., and Page, C.L., "Investigations of Reinforcement Corrosion. 2. Electrochemical Monitoring of Steel in Chloride-Contaminated Concrete," Materials and Structures, Rilem, Paris, Vol.24, 1991, pp.351-358.
7. Hussain, S.E., Al-Gahtani, A.S., and Rasheeduzzafar, "Chloride Threshold for Corrosion of Reinforcement in Concrete," ACI Materials Journal, Nov.-Dec., 1996, pp.534-538.
8. Thomas, M., "Chloride Thresholds in Marine Concrete," Cement and Concrete Research, Vol.26, No.4, 1996, pp.513-519.
9. Tang, L., "Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction," Publication No. P-96:6, Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, Goteborg, 1996.
10. Rasheeduzzafar, Hussain, S.E., and Al-Saadoun, S.S., "Effect of Tricalcium Aluminate Content of Cement on Chloride Binding and Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete," ACI Materials Journal, Vol.89, No.1, Jan.- Feb., 1992, pp.3-12.
11. Page, C.L., Lambert, P., and Vassie, P.R.W., "Investigations of Reinforcement Corrosion. 1. The Pore Electrode Phase in Chloride-Contaminated Concrete," Materials and Structures, Rilem, Paris, Vol.24, 1991, pp.243-252.
12. Barneyback, R.S. and Diamond, S., "Expression and Analysis of Pore Fluids From Hardened Pastes and Mortars," Cement and Concrete Research, Vol.11, No.2, 1981, pp.279-285.
13. "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete," ASTM C 876-87, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, 1990.

요 약

콘크리트의 내구성에 있어 철근의 부식문제는 매우 중요한 위치를 차지한다. 특히, 염소이온에 의해 발생하는 부식은 해사사용의 증대, 해양구조물 건설의 증가와 더불어 날로 그 중요성이 커지고 있다. 따라서, 부식을 유발하는 염소이온의 부식임계농도(critical concentration)를 밝히는 것은 부식발생 시점을 예측하고, 콘크리트의 허용 염분량을 결정하는데 있어 매우 중요한 문제라 할 수 있다.

본 연구는 초기부터 염소이온을 함유한 콘크리트의 부식발생특성을 고찰하여 내부염소이온의 부식임계농도를 규명하는 데 목적을 두고 있으며, 이를 위해 혼입된 염소이온의 양을 주변수로 하고 각 시험체의 철근 부식면적율과 경과시간에 따른 반쪽전지 전위(half-cell potential)를 측정하여 내부에 묻힌 철근의 부식상태를 관찰하였고, 염소이온의 고정화 현상을 파악하기 위해 결합재의 종류, 물-결합재비에 따라 7가지의 배합을 변수로 선택하여 실험을 수행하였으며, 세공용액 압착추출법을 도입하여 각 변수의 자유염소이온 농도와 OH⁻농도 등 세공용액의 성분을 분석하였고, 이를 통해 부식임계농도를 규명하여 제시하였다.

본 연구결과 콘크리트 내의 철근부식을 유발하는 임계 총 염소이온량은 시멘트의 종류 및 결합재의 화학조성 등 배합특성에 따라 달라지는 것으로 나타났으나, 내부의 임계 자유염소이온량은 배합특성에 관계없이 어느 정도 일정한 값으로 나타났으며, 본 연구에서는 이 값을 도출하여 제시하였다.

본 연구는 앞으로 철근콘크리트 구조물에 존재하는 내부염소이온의 부식임계농도를 결정할 수 있는 중요한 기초를 제공하는 것으로 제시된 연구결과는 앞으로 설계 및 시공기준에 유용한 자료가 될 것으로 사료된다.

(접수일자 : 1999. 3. 27)