

해수에 노출된 원전 콘크리트 구조물의 철근부식 예측
Prediction of Corrosion of Steel Reinforcement in Nuclear Safety
Related Structures Exposed to Seawater

오병환, 장봉석
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

이성규, 최강룡
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

요 약

본 연구에서는 해수에 직접 노출되어 있는 콘크리트 구조물의 철근부식 예측 및 수명평가를 위하여 현재 원전에 사용되고 있는 배합을 사용하여 강도실험, 염소이온 침투시험 그리고 염소이온 확산계수 측정시험을 수행하였으며, 이 결과를 이용하여 유한요소 해석으로 콘크리트내의 철근부식 시작 시점을 예측하였다. 유한요소해석은 Fick의 확산법칙을 이용하여 염소이온 침투를 해석할 수 있는 프로그램을 개발하여 수행하였다.

본 연구 결과, 염수에 침지한 경우와 그렇지 않은 경우 초기 및 1년 이내의 재령에서는 콘크리트의 강도가 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 염소이온 확산계수는 재령 90일에서 플라이애쉬를 혼입한 배합이 가장 작은 확산계수를 나타내었으며 실험에서 도출한 확산계수를 이용하여 현재 사용중인 원전 구조물의 철근부식 시작시점을 해석한 결과 약 45년 정도 걸리는 것으로 나타났다.

염소이온의 확산해석을 통한 부식시점 예측은 염소이온 확산계수, 수분확산계수, 구속계수 등의 재료 특성값이 명확히 정의되어야 신뢰할 수 있는 예측결과를 기대할 수 있으며, 해석 결과의 신뢰성 제고를 위하여 앞으로 각각의 재료 특성을 결정을 위한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Abstract

In this study, the characteristics of concrete strength according to age/curing condition and the penetration mechanism of seawater into the concrete have been studied. To this end, a comprehensive experimental program has been setup. The major test variables include the type of cements and the type of mineral admixture. The strength test as well as corrosion test have been conducted to explore the effects of chloride ion penetration on the properties of concrete.

The experimental results and the developed theory in the present study can be efficiently used to analyze the chloride ion penetration and to estimate the durability of concrete structures.

1. 서론

사회 기반 시설물로서의 원자력 발전소 구조물은 그 입지 특성상 해수에 직접 노출 또는 해안가에서 해수환경에 직접 영향을 받는다. 원자력 발전소 구조물은 국가 중요 시설물로서 국민의 안전과 경제 활동에 직접 영향을 미치므로 그 수명의 예측과 연장이라는 부분에 대한 연구의 필요성이 절실하다. 근래에 들어 해수에 노출된 콘크리트 구조물의 내구성 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 많은 연구들이 각각의 연구에서 사용하는 배합 종류와 노출 조건에 따라 서로 상이한 결과를 나타내는 경우가 많으며 따라서 실제 국내 원전에 사용된 배합들에 대한 각종 내구성 실험 연구는 필수적이라고 하겠다.

본 연구에서는 현재 국내 원전 구조물에 사용하고 있는 배합을 사용하여, 해수에 노출된 콘크리트 구조물에서 콘크리트의 강도특성, 염소이온의 침투 실험 그리고 염소이온의 확산계수 측정을 통한 해석을 통한 해수에 직접 노출되어 있는 콘크리트내의 철근 부식 시점 예측에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험 변수 및 실험 방법

해수에는 철근부식에 영향을 미치는 여러 가지 이온들이 존재하고 있으나 NaCl의 결합 형태로 존재하는 Cl⁻ 이온이 철근의 부식에 가장 큰 영향을 미치는 연구들에 근거하여 본 연구에서는 해석과 분석의 단순화를 위하여 NaCl 5% 용액을 사용하여 각종 특성 실험을 수행하였다.

2.1 실험 변수

본 연구에서는 해수에 노출된 콘크리트의 강도특성 및 철근부식 시점 예측을 위하여 각 배합 변수들에 대하여 재령(14일, 28일, 56일, 6월)과 양생조건에 따른 압축강도 실험을 수행하였고, 해석에 사용하기 위하여 재령 28일과 90일에서 염소이온 투과 실험을 수행하여 염소이온의 확산계수를 도출하였으며 그리고 염소이온 침투실험 등을 수행하였다. 실험 변수는 표.1에 나타내었다.

표.1 각 변수별 배합표 (1차 실험 / 2차 실험)

실험변수	시멘트 (kg/m ³)	혼화재(kg/m ³)		물 (kg/m ³)	굵은골재 (kg/m ³)	잔골재 (kg/m ³)	SP (%)
		FA	BS				
N*	430	-	-	170	972	705	0.5
NB*	301	-	129	170	972	705	0.5
NF*	301	129	-	170	972	705	0.5
V*	430	-	-	170	972	705	0.5
VB	301	-	129	170	972	705	0.5
VF	301	129	-	170	972	705	0.5

*: 1차실험에 사용한 변수

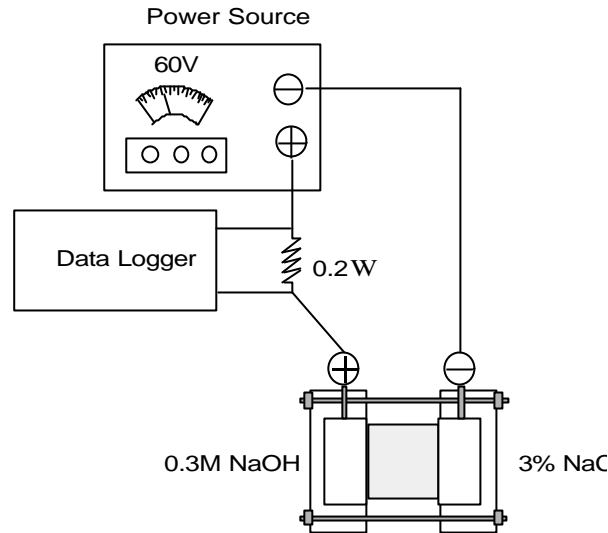


그림.1 염소이온 투과시험 장치도

2.2 실험방법

2.2.1 강도 시험

해수에 노출된 콘크리트의 강도 특성 규명을 위하여 $\phi 10 \times 20$ cm의 공시체를 제작하여 재령 14일까지 표준 양생한 후, 일부는 NaCl 5% 수용액에서 양생하여 재령 28일, 56일, 6월에서 압축 강도(KS F 2405)를 표준 양생 공시체와 비교하였다.

2.2.2 염분 침투에 따른 철근 부식시험

염소이온 침투시험은 ASTM G 109에 규정되어 있는 방법을 이용하여 철근 순댓개를 2cm로 하여 2주일 간격으로 철근의 자연전위를 측정(ASTM C 876)하여 부식전위에 도달시 표면에서 염소이온의 침투깊이에 따른 농도를 측정하였다.

2.2.3 콘크리트내의 염분침투시험

본 실험에서는 염소이온의 침투깊이 산정의 실험 자료를 확보하고자 그림.2와 같이 무근 시험시편에 대해서도 같은 조건의 폭로시험을 수행하였으며, 2.2.2절의 실험에서 자연전위를 주기적으로 측정하여 철근의 부식확률 90%이상이 되는 전위값이 -350mV 가 되었을 때 시험시편을 각 깊이별로 잘라내어 깊이별 염분량을 측정하였다.

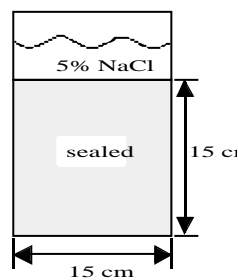


그림.2 염분침투시험 개요도

염소이온의 농도는 시편의 표면에서 1cm, 2cm, 3cm, 4cm의 깊이별로 전염분량을 측정을 하였다.

2.2.4 염소이온 확산계수 측정

T.Zhang과 O.E.GjØrv 등에 의해 제안된 전기적 방법은 기본적으로 투수성 평가에 사용되는 염소이온 투과시험(ASTM 1202-91, 그림.1)과 동일한 실험방법이다. 이들의 연구에 따르면 염소이온 투과시험법에서의 전위차에 의한 염소이온의 이동이 온도, 전위차와 농도차의 함수로 나타나기 때문에 확산계수 D_c 는 아래 식과 같은 형태로 주어진다.

$$D_c = \beta_0 \frac{300kT}{\varepsilon e_0 \Delta\psi} \frac{LV}{C_0 A_0} \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

여기서, β_0 : Boltzman 상수(1.38×10^{-16} ergs/K)	A_0 : 시편의 면적(cm^2)
T : 절대온도(K)	ε : 이온의 원자가
L : 시편의 두께(cm)	e_0 : 전자의 전하량(4.8×10^{-10} e.s.u)
V : NaOH용액이 담긴 셀의 부피(cm^3)	$\Delta\psi$: 전위차(Volt)
C_0 : NaCl의 농도(mol/l)	dC/dt : 염소이온의 농도증가율(mol/l/sec)

위 식으로부터 일정 온도와 일정 전위차로 염소이온 투과시험을 수행한다면 양극셀(anode cell)에서의 염소이온의 농도증가율(dC/dt)을 제외한 모든 변수가 일정한 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 즉,

$$D = \beta \cdot \alpha \cdot \frac{dC}{dt} \quad (2)$$

여기서, $\beta = \beta_0 \frac{300k}{\varepsilon e_0}$: 상수항, $\alpha = \frac{TLV}{\Delta\psi C_0 A_0}$: 실험조건변수

따라서 양극셀에서의 염소이온농도의 변화율을 측정함으로써 확산계수를 계산할 수 있다. 이 실험은 정상상태(steady-state)의 실험이므로 이로부터 결정되는 확산계수는 이온의 구속을 고려하지 않은 확산계수가 된다는 점을 주지해야 한다. 농도의 측정은 실험 도중에 양극셀에서 계속해서 시료를 채취하기 힘들기 때문에 매우 까다로운 작업이 된다. 따라서, 본 연구에서는 주로 전류를 측정하여 이로부터 투과농도를 간접적으로 구함으로써 이러한 어려움을 극복하고자 했다. 이는 염소이온 외에 다른 종류의 음이온(OH^- 등)이 염소이온의 농도에 비해 상대적으로 매우 작게 함유되어 있다고 가정할 수 있기 때문에 가능해진다.

3. 염소이온 침투해석

3.1 내구년한의 기본개념

본 연구에서는 내구년한 예측을 위한 수학적 모델의 기본개념은 Tuutti⁴⁾의 모델을 이용하였다. 이 모델에서 Tuutti는 전체 부식과정을 휴지기(initiation period)와 부식진전기(propagation period)로 나누어 설명하고 있다(그림2). 휴지기는 염소이온의 농도가 철근위치에서 어느 한계치에 도달할 때까지의 기간이며 이 기간 동안 부식이 전혀 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 그러므로 휴지기는 오직 염소이온의 확산계수와 부식발생 염소이온의 농도에만 의존하는 것으로 단순화될 수 있고, 염소이온의 확산은 다음과 같은 Fick의 1차원 확산법칙을 따른다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

여기서, x 와 t 는 각각 확산거리(m), 확산시간(sec)을 의미하고, C 는 염소이온의 농도(kg/m^3)이며, D 는 염소이온의 확산계수(diffusion coefficient, m^2/sec)로 상수로 가정하고 있다. 한편, 염소이온은 앞서 설명한 바와 같이 시멘트의 수화반응물질인 $C_3A(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 와 반응하여 화학적으로 구속되거나 반델발스 힘에 의해 간극표면에 물리적으로 구속되므로 자유염소이온(free chloride ion)과 구속염소이온(bound chloride ion)의 두 가지 성분을 갖게 되고 이들과의 관계는 다음과 같다.

$$C_b = \alpha \cdot C_f \quad (4)$$

여기서, C_f 와 C_b 는 각각 자유염소이온의 농도와 구속염소이온의 농도(kg/m^3)이고, α 는 이들의 비례상수이다. 따라서, 염소이온 농도에 대한 확산방정식은 다음과 같은 형태를 갖게 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{1+\alpha} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

여기서, $D_{\text{eff}} = D/(1+\alpha)$, 즉, 콘크리트 내에서 구속되는 염소이온의 양을 고려한 염소이온의 유효확산계수(effective diffusion coefficient, m^2/sec)이다.

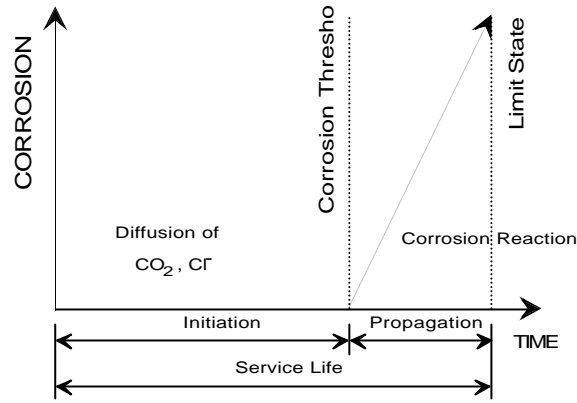


그림.3 Tuutti 모델의 개념도⁴⁾

3.2 유한요소 해석모델

Fick의 1차원 확산법칙을 질량보존의 법칙, 염소이온의 구속계수를 도입한 유효확산계수, 콘크리트 간극수 속에서 수분 확산을 지배 방정식에서 고려하고 콘크리트의 온도, 재령 등 콘크리트의 확산특성을 고려하여 초기조건과 경계조건을 정리하여 잔류가중치법(weighted residual method)⁶⁾ 과 Galerkin 방법에 의해 유한요소 정식화를 하면,

$$M_{\#}^c \frac{\partial C_j}{\partial t} + K_{\#}^c C_j = q_j^c \quad (6)$$

$$M_{\#}^h \frac{\partial h_j}{\partial t} + K_{\#}^h h_j = q_j^h \quad (7)$$

여기서, $M_{\#}^c$, $K_{\#}^c$, $M_{\#}^h$, $K_{\#}^h$, q_j^c 와 q_j^h 는 각각 다음과 같다.

$$M_{\#}^c = M_{\#}^h = \int N_j N_j dx \quad (8)$$

$$K_{\#}^c = \int \left(D_{\infty} \frac{\partial N_j}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \nu \frac{\partial N_j}{\partial x} N_j \right) dx + [B_c]_b \quad (9)$$

$$K_{\#}^h = \int D_k \frac{\partial N_j}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} dx + [B_k]_b \quad (10)$$

$$q_j^c = [B_c C_{en}]_b \quad q_j^h = [B_k h_{en}]_b \quad (11)$$

여기서, 아래첨자로 표시된 b는 표면(경계)요소에서 작용하는 항을 의미한다. 이상의 행렬미분

방정식은 generalized trapezoidal rule을 이용하여 시간증분 Δt 에 대해 단계적으로 적분함으로써 해를 구할 수 있다⁵⁾.

$$\begin{aligned} & \left[-\frac{M_{\#}^c}{\Delta t} + \beta K_{\#}^c{}^{t+\Delta t} \right] C_{\#}{}^{t+\Delta t} \\ & = \left[-\frac{M_{\#}^c}{\Delta t} - (1-\beta) K_{\#}^c{}^t \right] C_{\#}{}^t + \left[\beta f_{\#}{}^{t+\Delta t} + (1-\beta) f_{\#}{}^t \right] \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, 계수 β 에 따라 차분시간 Δt 는 해의 안정성을 보장할 수 있는 상한값을 갖게 된다. 일반적으로 $\beta \geq 1/2$ 이면, 해의 안정성은 어느 정도 확보될 수 있다. 본 연구에서는 Crank-Nicolson 방법을 적용하여 $\beta=0.5$ 를 사용하였다. 수분의 확산방정식으로부터 수분의 이동속도를 결정하면 각 시간단계에서 수분의 이동속도(v)는 상수로 결정된다.

4. 실험 및 해석결과

각 배합의 강도실험 결과는 표.2 및 그림.4에 나타내었다. 염분 침투에 따른 철근 부식실험 결과는 그림.5에 나타내었으며, 염분침투실험 결과는 그림.6과 그림.7에 나타내었다. 염소이온 확산계수 측정결과는 표.3에 나타내었다.

표.2a 강도실험 결과(1차 실험) (kg/cm²)

변수 재령	N		NB		NF		V	
	NaCl 0% 양생	NaCl 5% 양생	NaCl 0% 양생	NaCl 5% 양생	NaCl 0% 양생	NaCl 5% 양생	NaCl 0% 양생	NaCl 5% 양생
	14일	434		390		409		391
28일	474	445	459	433	491	460	455	454
56일	513	512	542	521	528	553	545	566
6월	547	563	580	558	581	584	597	-

표.2b 강도실험 결과(2차 실험) (kg/cm²)

변수 재령	N	NB	NF	V	VB	VF
28일	471	378	438	431	439	347
90일	550	551	531	533	555	471

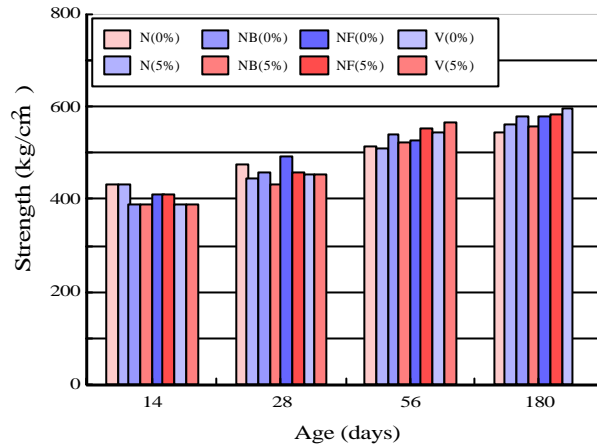


그림 4 각 변수의 재령별 강도비교

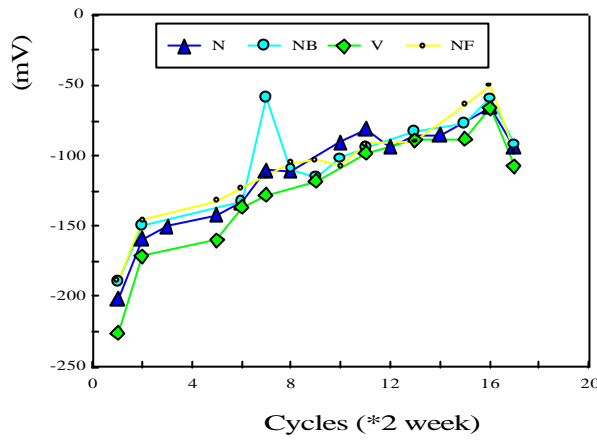


그림 5 시간에 따른 자연전위의 변화

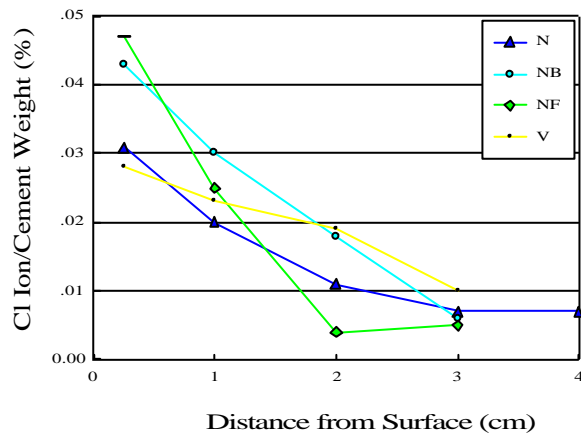


그림 6 깊이별 콘크리트내의 염소이온량 (mg/Kg)

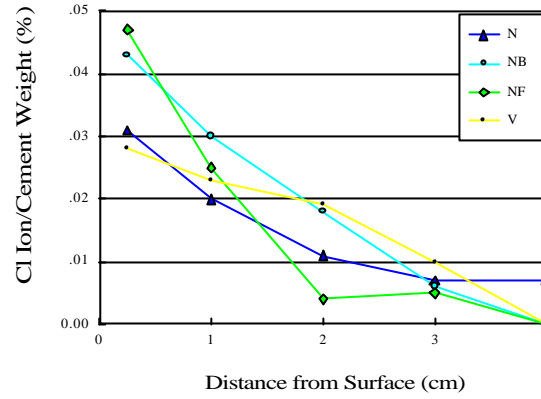


그림.7 콘크리트내의 염소이온량(%)

표.3 각 변수별 확산계수(1차 실험)

변수명	Slope (mol/l/sec), ($\times 10^{-6}$)	Diffusivity ($\times 10^{-11}$ m ² /sec)	Effective Diffusivity ($\times 10^{-12}$ m ² /sec) (0.55D)	Average
N	7.6	18.9	10.4	9.93
	6.9	17.2	9.47	
NB	5.0	12.5	6.85	6.06
	3.8	9.56	5.26	
NF	1.5	3.85	2.12	2.00
	1.4	3.41	1.88	
V	6.3	15.7	8.64	7.93
	5.3	13.1	7.23	

표.4a 변수별 확산계수, 재령 28일(2차 실험)

변수명	Slope (mol/l/sec), ($\times 10^{-6}$)	Diffusivity ($\times 10^{-11}$ m ² /sec)	Effective Diffusivity ($\times 10^{-12}$ m ² /sec) (0.55D)
N	11.4047	2.85	15.7
NB	10.0011	2.50	13.7
NF	5.36639	1.34	7.37
V	15.2133	3.80	20.9
VB	5.06972	1.27	6.96
VF	14.8894	3.72	20.4

표.4b 변수별 확산계수, 재령 90일(2차 실험)

변수명	Slope (mol/l/sec), ($\times 10^{-6}$)	Diffusivity ($\times 10^{-11}$ m ² /sec)	Effective Diffusivity ($\times 10^{-12}$ m ² /sec) (0.55D)
N	6.65500	1.66	9.14
NB	5.70306	1.42	7.83
NF	4.58083	1.14	6.29
V	8.69806	2.17	11.9
VB	5.09028	1.27	6.99
VF	5.26667	1.31	7.23

표.5 각 변수의 부식시작 예상년수

변수명	부식시작 예상년수 (년)	비고
1차 실험(90일)		
N	36,762	1,39
NB	56,855	1,97
NF	162	3,33
V	44,671	2,13
2차 실험(28일)		
N	25,901	1,0
NB	28,819	1,0
NF	48,636	1,0
V	20,956	1,0
VB	51,173	1,0
VF	22,608	1,0
2차 실험(90일)		
N	39,468	1,52
NB	45,175	1,58
NF	54,959	1,13
V	31,592	1,51
VB	49,975	0,98
VF	48,485	2,14

5. 결론

1. 해수에 노출된 경우와 노출되지 않은 경우, 재형에 따른 강도의 변화는 크게 나타나지 않고 있으며 강도의 크기가 유사하고 특별한 상관관계를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 이는 해수에 침지된 콘크리트의 경우 초기 및 몇 년 내에는 강도에 미치는 영향이 크지 않음을 나타내고 있다.

2. 염소이온의 확산계수를 측정한 결과 재형 90일에서 플라이애쉬를 혼입한(NF) 배합이 가장 작은 확산계수를 나타내었다. 이는 플라이애쉬의 포졸란 반응으로 내부조직이 치밀해져서 나타난 결과로 설명될 수 있다.

3. 해석을 통하여 현재 사용중에 있는 철근콘크리트 구조물의 철근부식이 시작되는 시작 시점까지의 내구수명을 예측한 결과 현재 20년이 경과한 구조물의 경우 내구수명이 약 25년 정도이고, 현재 6년 정도 경과한 구조물의 경우는 약 40년으로 나타나고 있으나 이것은 환경의 변화와 실제 재료의 장기 열화속도에 따라 영향을 받을 수 있으며 따라서 앞으로 재료특성이 장기적으로 변화되는 것을 고려하여야 하는 지속적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

4. 염소이온의 확산계수는 공시체의 제작 및 양생에 따라 많은 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 최상의 배합일지라도 현장에서의 타설 및 양생관리에 따라 많은 변동성을 가질 것으로 예측되며, 이러한 부분에 대한 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다

참고문헌

1. 오 병환, 장 승엽, 차 수원, 이 명규, "염소이온의 확산모델에 의한 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 예측연구," 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집 제9권 1호, 1997년 5월, pp.254-260.
2. Clifton, J. R., "Predicting the Remaining Service Life of Concrete," National Institute of Standards and Technology, NISTIR 4712, Nov., 1991.
3. Schießl, P., "Corrosion of Steel in Concrete," Report of Rilem Report Technical Committee 60-CSC, Chapman & Hall, London, 1988.
4. Tuutti, K., "Corrosion of Steel in Concrete," Swedish Cement and Concrete Research institute, Stockholm, 1982.
5. Cook, R. D., "Concepts and Applications of Finite Element Analysis," 3rd Ed., John Wiley & Son, 1989.