

비색판별법을 이용한 콘크리트의 표면염화물량 산정 및 매립철근의 건전도 평가

이문환^{1)*} · 이진우²⁾

¹⁾ 한국건설기술연구원 건축연구부 ²⁾ 고려산업개발(주) RC연구개발실

(2003년 3월 21일 원고접수, 2003년 9월 23일 심사완료)

Calculation of the Surface Chloride and Estimation for the Soundness of Embedded Rebar by Using Colorimetric Distinction Method

Mun-Hwan Lee^{1)*} and Jin-Woo Lee²⁾

¹⁾ Korea Institute of Construction Technology, 2311, Daehwa-dong, Ilsan-gu, Koyang, Kyonggi-do, 411-712, Korea

²⁾ Korea Industrial Development Co., LTD, 2726, BangBae-dong, Seocho-gu, Seoul, 137-062, Korea

(Received March 21, 2003, Accepted September 23, 2003)

ABSTRACT

As it is important to measure the degree of the deterioration and predict service life caused by chloride in concrete structure, the methods of measuring chloride in the concrete is raised important problems.

This study is to set a new standard for using of the colorimetric method through grasping the character of the colorimetric distinction method, and measuring the chloride content at the place discolored. Also, to predict chloride content around embedded bar and time reaching limit chloride concentration through measuring the chloride content of concrete surface by colorimetric distinction method and this study presents the new concept of concrete degradation and diagnosis of the durability by salt damage. According the results, it is possible to use colorimetric distinction method as simplified measurement to measure the fixed quantity of the chloride concentration. What is more, it would make calculation of concrete surface chloride had a wide fluctuation at the general environment extended. Also, it would be make estimating durability of reinforced concrete structures applied to the basic data.

Keywords : chloride content of surface, diffusivity, colorimetric distinction method, salt attack, non-destructive test

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 경우 성능저하를 유발하는 가장 큰 요인은 이산화탄소에 의한 콘크리트의 중성화와 염화물 이온 등의 유해물 침투에 따른 반응생성물 및 철근부식이라 할 수 있다¹⁾. 이산화탄소 침투에 의한 성능저하 및 평가방법에 대한 연구가 활발히 이루어져 여러 평가방법이 제안되었으며, 평가의 편이성과 다량의 샘플확보에 있어 페놀프탈레인법을 가장 많이 이용하고 있다. 이에 반해 염화물 이온 침투에 따른 철근콘크리트 구조물의 성능평가에 대한 검토는 충분히 이루어지지 못하였다. 따라서 염화물 이온 침투에 따른 성능평가에 대한 검토가 필요하며, 이와 더불어 페놀프탈레인법과 같은 편리하고 신뢰성을 가진 평가방법의 개발이 필요하다 할 것이다²⁾.

이에 본 연구는 염해로 인한 철근콘크리트 구조물의 성

능저하 평가방법으로 색상의 변화를 통해 염화물 이온의 침투위치를 판정하는 비색판별법의 적용가능성을 검토하여, 매립철근의 부식을 고려한 내구성 예측분야에 실용적 평가수단으로 제시하고자 한다.

2. 콘크리트 내부의 염화물

2.1 염화물 침투현상^{3,4)}

염화물은 골재와 시멘트 경계면에서의 미세균열 혹은 비교적 큰 균열같은 콘크리트의 결함부나 시멘트 경화체 중에 있는 무수한 공극 등을 통해 침투된다. 콘크리트 내부에는 기포나 재료분리에 의해 발생하는 1~2mm 정도의 큰 공극으로부터 시멘트 입자간의 수백 Å의 공극 및 수화작용에 의해 생긴 시멘트겔(길이;1µm, 직경;50~1000 Å 정도의 미세한 섬유상의 결정)의 세공으로 15 Å 이내의 것까지 여러 종류의 세공이 존재한다³⁾.

일반적으로 염화물 이온은 세공 중의 물에 용해되어 콘

* Corresponding author

Tel : 031-910-0366 Fax : 031-910-0713

E-mail : mhlee@kict.re.kr

크리트 내부로 확산된다. 그러나 세공의 크기 및 모양이 제각각 다르기 때문에 개개의 확산현상 또한 다른 양상을 나타내게 되므로 실제의 확산현상을 정확히 표현하는 것은 매우 어렵다. 따라서 거시적으로 이를 나타내고자 시멘트 경화체에 NaCl 용액을 사용하여 겉보기 확산계수를 구하고 그 확산정도를 표시한다.

균열이 없는 경우 확산계수 산정은 Fick의 확산 이론에 따라 다음의 식 (1)과 같이 표현된다⁴⁾.

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

- 여기서, x : 콘크리트 표면으로부터의 거리 (cm)
- C : x 에서의 염화물 함유량 (%)
- C_0 : 표면에서의 염화물 함유량 (%)
- D : 겉보기 확산계수 (cm^2/s)
- erf : 오차함수
- t : 대상 콘크리트 구조물의 사용연수 (sec)

2.2 표면염화물의 변동

해양환경에서 염화물의 공급상태는 지형 또는 기상작용에 크게 좌우되고, 이 중에서 시간적인 변동은 1년을 주기로 하는 기상의 변화에 영향을 받으며, 계절풍에 의한 비래염화물의 부착과 우수에 의한 부착염화물의 세정이라는 2가지 상반된 작용이 존재한다.

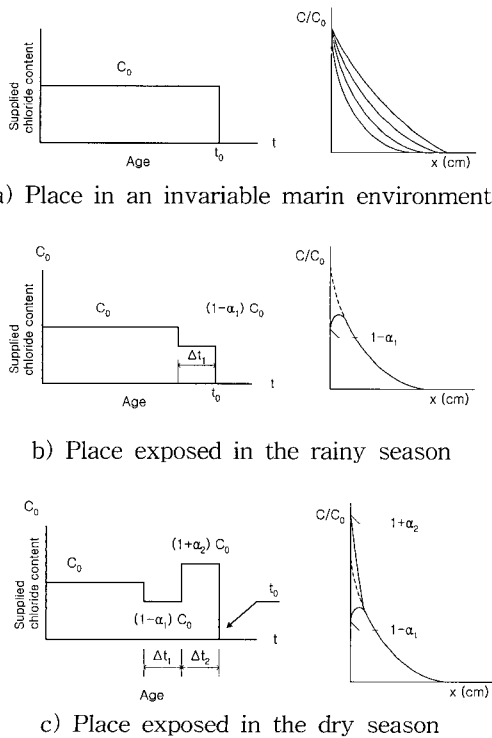


Fig. 1 Distributary of marine environment

따라서 표면염화물량의 시간적 변동에 대해서는 1년 정도를 고려하고, 그 이전은 평균적인 일정 값으로 취급하여 3가지로 분류할 수 있다. 여기서, Δt_1 , Δt_2 는 반년 정도의 기간이며, 계수 a_1 , a_2 는 평균 C_0 에 의해 변동된다^{5,6)}.

3. 실험

3.1 실험개요

비색판별법에 이용하는 시약과 염화물의 반응정도를 고찰하고, 콘크리트 내부 염화물량의 정량분석을 통해 비색판별법에 의한 변색위치의 염화물량을 규명하여 콘크리트의 표면염화물량 측정방법으로 비색판별법의 적용가능성을 검토하였다. 또한, 이를 이용해 콘크리트의 표면염화물량을 산정하고, 콘크리트 내부 철근위치의 염화물량 산정과 한계 염화물량 도달시간의 예측방안을 제시하고자 하였다.

3.1.1 사용재료

가. 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 규정된 S사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

나. 골재

① 굵은골재

굵은골재는 최대치수 25mm인 쇄석골재로 표면의 미분을 세척, 표면건조 포화상태로 조정하여 사용하였다.

② 잔골재

잔골재는 한강산 강모래로서 5mm의 체를 전량 통과하도록 입도를 조정하여 사용하였다.

골재의 물리적 성질은 KS F 2504(잔골재의 비중 및 흡수량 시험방법), KS F 2505(골재의 단위용적중량 시험방법)에 따라 기초 물성을 시험하였다(Table 1 참조).

다. 시약

① 검지약

질산은(AgNO_3) 특급시약을 100~150℃로 유지된 오븐 안에서 약 1시간 건조하고, 데시케이터에서 식힌 후 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40 N 농도의 질산은 용액을 제조하여 사용하였다.

② 지시약

1) 5% 크롬산칼륨(K_2CrO_4) 용액

크롬산칼륨 시약 5g을 메스플라스크(100ml)에 넣어 소량의 증류수로 용해한 다음, 100ml로 희석하여 사용하였다.

Table 1 Physical properties of aggregate

Aggregate	Gravity	Water absorption (%)	Fineness modulus	Unit weight (kg/m^3)	Percentage of fill (%)
Crushed rock	2.63	1.03	6.92	1,727	59.7
sand	2.54	0.94	2.76	1,549	63.5

Table 2 Basic properties of concrete specimens

Specific concrete strength (MPa)	Air content (%)	Slump (cm)	Slump flow (cm)	Unit weight (kg/m ³)	Compressive strength (28day) (MPa)
18	4.0	15.0	23	2332	21.8
21	3.9	17.5	23	2348	23.7
24	3.2	19.0	26	2297	27.6
27	3.1	17.5	24	2299	30.3

2) 1% 플로레센나트륨(C₂H₁₀O₅Na₂) 용액

95% 에탄올 수용액에 1 mg/ml의 플로레센나트륨을 함유한 용액과 증류수에 1 mg/ml의 플로레센나트륨을 함유한 용액을 사용하였다.

3.1.2 실험 변수 및 조건

가. 콘크리트 시편의 제작 및 배합

S사의 레미콘 배합으로 호칭강도 18, 21, 24, 27MPa의 수준을 샘플링하여 Ø10×20 cm의 원형몰드로 제작하였다.

나. 사전 염화물 함유량

시멘트 중량비로 하여 NaCl을 무혼입, 0.5, 1.0, 1.5 wt%의 4가지로 구분하여 S사의 레미콘 배합으로 호칭강도 24 MPa의 수준을 샘플링하여 제작하였다.

3.1.3 실험체의 주요 품질특성

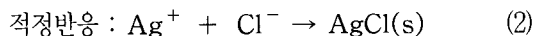
콘크리트의 배합조건이 실용적인 범주에 속하고 있음을 확인하고 실험변수인 콘크리트의 치밀도를 검토하기 위한 품질특성으로 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 슬럼프 플로우 시험과 굳은 콘크리트의 단위용적중량 및 압축강도 시험을 실시하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

3.2 비색판별법의 기본특성 실험

3.2.1 염화물과 사용시약의 반응검토

가. 염화물과 질산은 용액

질산은 용액으로 염화물 이온(Cl⁻)을 적정하면 백색의 침전물이 생기며, 이는 용액 중의 Ag⁺ 이온이 Cl⁻ 이온과 반응하여 생긴 것으로 적정반응은 식 (2)에 의한 것이다.



나. 플로레센나트륨 용액

형광을 띠는 녹색의 용액이지만, NaCl을 용액에 첨가하였을 경우 황색으로 변화하였다. 여기에 염화물의 적정을 위해 질산은 용액을 첨가하면 상기의 백색 침전물로 인하여 유백색의 현탁액으로 변하고, 계속해서 질산은 용액을 첨가하면 종말점에 이르러 현탁액은 주황색을 나타내었다. 이는 음이온성 지시약이 침전물의 양이온 입자에 흡착되면서 나타나는 현상으로 간주된다.

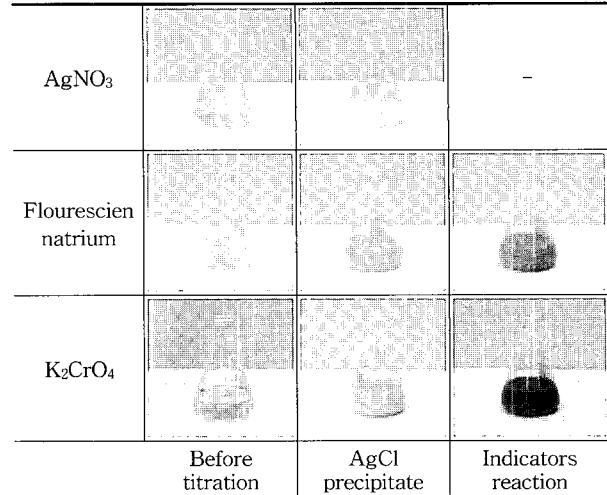
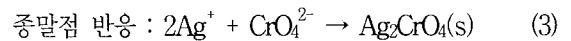


Fig. 2 Reaction among reagent, indicator and chloride

다. 크롬산칼륨 용액

짙은 황색을 띠는 용액으로 NaCl 용액에 첨가하면 연한 황색을 나타내고 여기에 질산은 용액으로 염화물 이온을 적정하게 되면, 종말점에 이르기 전에 백색침전이 생겨 유백색의 용액으로 변하고 계속 질산은 용액을 첨가하면 종말점에 이르러 진한 적갈색으로 변화하였다. 이는 식 (3)과 같은 반응이 일어나는 것으로 종말점 이전에는 AgCl이 침전되어 유백색을 나타내나, 종말점에 이르러서는 Ag₂CrO₄가 침전하여 짙은 적갈색이 나타나는 현상으로 판단된다.



3.2.2 염화물을 함유한 콘크리트 실험체의 반응검토

비색판별법에 의해 나타내는 색상의 변화와 질산은의 농도에 따라 나타나는 색상의 변화를 사전 염화물(콘크리트 배합시 혼입된 염화물)의 농도에 따라 관찰한 결과, 사전 염화물량이 많을수록 전체적으로 백색을 나타내며 질산은 농도가 짙을수록 적갈색의 색상변화를 나타내었다. 이것은 염화물과 질산은의 반응생성물인 AgCl의 영향에서 비롯된 것으로 질산은의 첨가량이 적은 경우 질산은 전량이 염화물과 반응하여 염화은으로 침전되고 플로레센나트륨과 적갈색의 후반응 색상을 보일 수 없기 때문이며, 질산은이 과다하게 첨가되었을 때는 염화물과 반응을 하고 남은 질산은이 플로레센나트륨과 반응을 일으키기 때문인 것으로 분석된다. 따라서 비색판별법을 적용하기 위해서는 콘크리트 내부의 염화물량에 대응하는 수준의 질산은 농도를 선정할 필요가 있다.

3.2.3 해수 중에 침지한 콘크리트 실험체의 반응검토

가. 사용 질산은 농도결정

질산은 농도에 따라 전체적으로 색상농도의 등차(等差)

는 나타났으나, 변색위치의 깊이 차이는 극히 미약하여 질산은 농도에 따라 염화물 침투깊이를 나타내는 변색위치의 차이는 크지 않은 것으로 관찰되었다. 즉, 변색위치는 질산은 농도에 관계없이 일정하며, 다만 0.1~0.3N 농도범위의 질산은 용액의 사용이 변색위치 판별에 용이한 것으로 관찰되었다. 따라서, 비색판별법의 이용에 있어 이 농도 범위의 질산은 용액을 사용하는 것이 가장 효과적이라고 판단된다.

나. 측정 시료의 함수상태

콘크리트 시험편을 채취할 때, 위치 및 환경조건, 기후 등에 따라 시험편의 함수상태가 달라지게 된다. 따라서 채취한 콘크리트 시험편의 함수상태가 측정결과에 미치는 영향에 대해서 고찰할 필요가 있었다. 실험은 콘크리트 시험체의 함수율을 기건상태를 포함하여 5~24%가 되도록 인위적으로 변동시켜 측정결과를 비교하였다. 실험결과, 콘크리트 시험체의 함수를 변동에 따른 변색정도의 차이는 극히 미약하였다. 따라서 비색판별법의 적용범위는 함수상태에 따른 콘크리트 부재 및 위치, 환경조건, 기후 등의 영향을 고려하지 않아도 무방할 것으로 사료된다.

다. 지시약의 선정

① 지시약의 종류별 효과를 관찰하기 위하여 플로레센나트륨 용액 및 크롬산칼륨 용액, 지시약을 사용하지 않은 각각의 실험결과를 상호 비교하였다. 지시약을 사용하지 않은 경우에도 염화물 침투깊이의 측정이 가능하였으나

플로레센나트륨 용액을 지시약으로 이용한 경우에 비하여 나타나는 변색위치의 판별이 다소 어려웠으며, 측정 후 시간의 경과에 따라 그 차이가 더욱 뚜렷이 나타났다. 또한, 크롬산칼륨 용액을 사용한 경우, 용액 중에서의 반응과는 달리 건조한 콘크리트 표면에서는 색상의 변화가 관찰되지 않았다. 따라서, 지시약의 사용은 플로레센나트륨 용액이 적합하다고 사료된다.

② 측정표면에서 지시약의 분무에 의한 염화물의 표면이동을 최대한 억제하기 위하여 용매로서 95% 에틸알코올을 사용하는 경우에 대해 고찰하였다. 용매로서 95% 에틸알코올을 사용하였을 때 용매의 증발이 빨라 측정표면에서 염화물의 표면이동을 억제할 수는 있으나 변색 경계부분의 판별이 증류수를 용매로 사용하였을 경우와 비교하여 현저히 떨어지는 것으로 나타났다. 즉, 측정표면에서 염화물의 표면이동을 고려하더라도 용매로써 증류수를 사용하는 것이 더욱 효과적이라고 할 수 있다.

3.2.4 비색판별법 이용상의 선결조건 고찰

비색판별법의 기본특성 실험을 통하여 나타난 결과를 토대로 비색판별법의 이용방안에 대하여 고찰하였다. 측정 표면의 염화물이 시약 분무에 의해 표면이동하는 것을 억제하기 위하여 시약이 미세한 입자로 분무가 가능하도록 하였으며, 실험체로부터 약 30~40cm를 떨어뜨려 분무하였다. 이는 요철이 심한 측정표면의 특성을 고려한 것으로 시약의 부족 및 과다 분무를 방지하여 측정오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 분무량이 적을 경우 변색위치의 판별이 어렵고 과다하였을 경우 시약으로 인한 염화물의 표면이동이 심화되어 측정결과에 오차를 일으킬 수 있으므로, 본 실험에서는 분무량을 약 0.0056~0.0069 ml/cm² 정도로 측정표면을 충분히 적실 수 있도록 하였다. 또한, 지시약과 검지약은 염화물과의 반응이 완료된 시점에서 재분무할 경우, 검지약의 과다로 인한 측정결과 오차가 발생하였다. 따라서, 검지약과 지시약의 반응이 시작된 후에 검지약이나 지시약의 재분무는 바람직하지 않다고 할 수 있다.

3.3 비색판별법의 적용성 평가

본 연구에서는 매 실험체에 대한 염화물의 침투를 일정하게 하여 비색판별법을 이용한 변색위치의 염화물량을 측정하고자 실제 해수조건과 유사한 인공해수를 제조하여 실험체를 6개월 동안 침지시킨 후 실험을 실시하였다.

3.3.1 표면염화물량의 실측

인공해수에 6개월 동안 침지시킨 실험체의 표면 1~2mm 부근에서 시료를 채취하여 KS F 2515의 방법으로 염화물량을 측정하였다. 실험결과는 Table 3과 같으며, 콘크리트

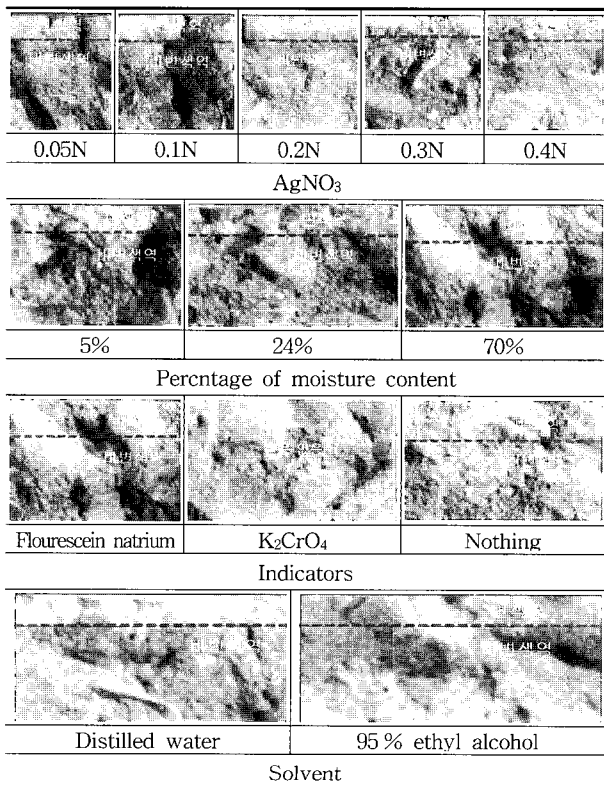


Fig. 3 Properties of colorimetric distinction method

Table 3 Surface chloride content of concrete specimens

Specific concrete strength (MPa)	Compressive strength (28day) (MPa)	0.1N AgNO ₃ (ml)	Chloride of concrete surface (%)
18	21.8	32.9	0.681
21	23.7	32.3	0.667
24	27.6	31.6	0.645
27	30.3	30.8	0.634

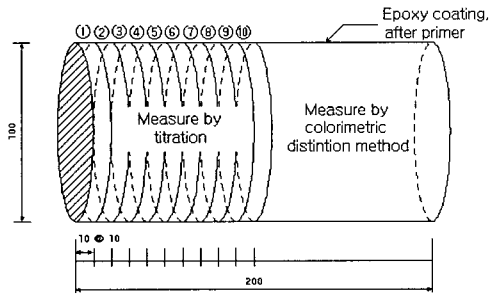


Fig. 4 Sampling point to measure chloride (unit : mm)

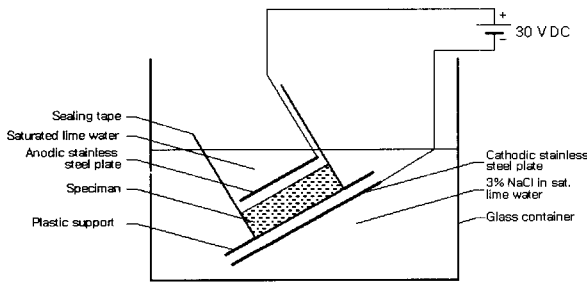


Fig. 5 Tang & Nilsson's testing apparatus of diffusion

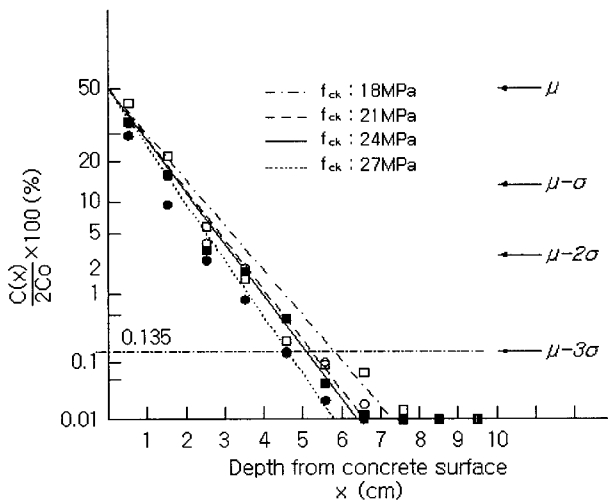


Fig. 6 Calculation of diffusivity by normal probability

의 압축강도가 클수록 표면염화물량이 적은 것을 알 수 있었다. 이는 곧 콘크리트의 치밀도가 염화물 침투속도에 영향을 미치는 것으로, 콘크리트의 치밀도에 직접적으로 관계되는 압축강도가 그 대표적인 평가 수단이 될 수 있음을 보여주는 결과라 할 것이다.

3.3.2 실측한 콘크리트 내부의 염화물량 및 확산계수

실측한 표면염화물량(C₀)와 Fig. 4의 위치에서 구한 콘크리트 내부의 염화물량(C)를 이용한 C/2C₀와 표면으로부터의 거리(x)를 정규확률지 상에 도해하여 얻게되는 구배 1/√2Dt 에서 확산계수 D를 구하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다.

3.3.3 변색위치의 염화물량

정상조건에서 해수중에 침지시켜 구한 염화물 확산계수의 정도(精度)평가와 단기간에 염화물 확산계수를 산정할 수 있는 방안에 대해 모색하고자 Tang & Nilsson의 방법 (Fig. 5 참조)에 의해 염화물 침투 깊이를 구하고 실험시간에 대응하는 염화물 확산계수^{7,8)}를 산정하여 이론값으로 취급하였다. 또한, 정규확률지로 확산계수를 산출하여 curve-fitting한 실측농도 곡선과 Tang & Nilsson의 방법을 이용하여 계산한 이론농도 곡선을 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

Tang & Nilsson의 방법에 의한 실험결과는 비정상 상태에서의 결과값인 만큼, 연구자에 따라 실제 확산계수와

Specific concrete strength 18MPa	Depth(cm)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5
	Chloride(wt%)	0.3352	0.1667	0.0475	0.0118	0.0018	0.0006	0.0005
	$\frac{C}{2C_0} \times 100$	41.018	20.398	5.8125	1.4439	0.2202	0.0734	0.0611
□	t=6months=15,552,000sec, C ₀ =0.4086wt%, x _{3σ} =5.72cm D = $\left(\frac{x_{3\sigma}}{3}\right)^2 \times \frac{1}{2t} = 1.1696 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$							
Specific concrete strength 21MPa	Depth(cm)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5
	Chloride(wt%)	0.3015	0.1236	0.0348	0.0145	0.0013	0.0007	0.0002
	$\frac{C}{2C_0} \times 100$	37.668	15.442	4.3478	1.8115	0.1624	0.0874	0.0249
○	t=6months=15,552,000sec, C ₀ =0.4002wt%, x _{3σ} =5.29cm D = $\left(\frac{x_{3\sigma}}{3}\right)^2 \times \frac{1}{2t} = 0.9984 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$							
Specific concrete strength 24MPa	Depth(cm)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5
	Chloride(wt%)	0.2931	0.1206	0.0284	0.0135	0.0035	0.0003	0.0001
	$\frac{C}{2C_0} \times 100$	37.868	15.581	3.6692	1.7441	0.4522	0.0387	0.0129
■	t=6months=15,552,000sec, C ₀ =0.3870wt%, x _{3σ} =5.16cm D = $\left(\frac{x_{3\sigma}}{3}\right)^2 \times \frac{1}{2t} = 0.9497 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$							
Specific concrete strength 27MPa	Depth(cm)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5
	Chloride(wt%)	0.2572	0.0743	0.0241	0.0054	0.0013	0.0002	0
	$\frac{C}{2C_0} \times 100$	33.806	9.7660	3.1677	0.7097	0.1708	0.0262	0
●	t=6months=15,552,000sec, C ₀ =0.3804wt%, x _{3σ} =4.65cm D = $\left(\frac{x_{3\sigma}}{3}\right)^2 \times \frac{1}{2t} = 0.7715 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$							

다른 값을 보일 수 있다고 지적하고 있으나 본 실험결과와 근사하는 결과를 나타내고 있다.

따라서 본 실험과 같이 6개월 또는 비교적 장기간의 흡수침지 과정을 거치지 않고서도 이론적으로 염화물 확산계수를 산출하여 본 연구의 성과를 응용할 수 있을 것으로 사료되며, 모든 실험체에서 압축강도 등의 품질수준에 대응하여 염화물 확산계수가 비례관계가 있음을 전제로 한다면, 실측된 결과로 산출하였던 염화물 확산계수의 유의도가 높음을 확인할 수 있었다.

Fig. 7의 염화물 농도곡선을 이용하여 변색위치의 염화물량을 구한 값을 Table 4에 나타내었다. 결과에서처럼 콘크리트의 치밀도에 따라 변색깊이의 증가가 비례적인 관계에 있는 반면, 변색위치의 염화물량은 0.27 ± 0.004 wt % 수준에서 일정한 것으로 나타났다. 즉, 변색위치의 염화물량은 콘크리트의 강도나 치밀도에 관계없이 콘크리트 내부로 침투한 염화물량의 분포선상에서 동일한 값으로 볼 수 있다. 따라서, 비색판별법으로 측정된 변색위치의 염화물량은 0.27 wt %로 취급하는 것이 가능하다.

4. 매립철근의 건전도 평가

염화물의 침투현상은 확산계수와 표면염화물량에 따라 결정된다. 여기서, 확산계수는 콘크리트의 품질에 관계하는 것으로 구조물 부위의 영향이 비교적 적고 안정한 값을 가지는 반면, 표면염화물량은 외부환경 및 공용년수에 의한 영향이 크기 때문에 부위별로 상당한 오차가 생기게 된다. 확산계수와 표면염화물량의 특성에 따라 확산계수는 일정하다고 가정하고, 표면염화물량을 산정하여 이를 Fick의 확산식에 적용하면 철근위치의 염화물량 및 한계염화물량에 도달하는 시간을 예측할 수 있다.

따라서 본 연구의 비색판별법을 이용한 표면염화물량의 산정을 통해 철근위치의 염화물량 및 한계염화물량에 이르는 시간 등 내부상태와 그 경시변화의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

4.1 비색판별법을 이용한 표면염화물량의 산정

측정시기 및 부위에 따라 공용조건에서 실측한 표면염화물량은 비색판별법으로 구한 표면염화물량과 다소의 차이를 보일 수 있다. 다만, 철근의 건전도를 평가하거나 잔존수명을 예측하기 위해서는 연단위의 평균값에 근사하는 겉보기 표면염화물량을 산정하여 경계조건으로 취급할 필요가 있다고 판단된다. 따라서 염화물 침투현상을 나타내는 Fick의 확산식에 비색판별법으로 측정된 변색위치의 염화물량 0.27 wt %를 적용하면 식 (4)와 같다.

$$C_0 = 0.27 / \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_1}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (4)$$

여기서, C_0 : 겉보기 표면염화물량 (wt%)

erf : 오차함수

x_1 : 비색판별에 의한 변색위치 (cm)

D : 콘크리트의 염화물 확산계수 (cm^2/s)

t : 대상 콘크리트 구조물의 사용년수 (sec)

4.2 철근의 건전도 평가

가. 철근위치의 염화물량 예측

비색판별법을 이용한 염화물량 예측방법의 개념을 Fig. 8과 같이 나타내었다. 비색판별법을 이용하여 임의의 지점 (x_1)의 염화물량을 측정하고 식 (4)를 통해 겉보기 표면염화물량 (C_0)을 산정한 후, 이를 다시 Fick의 확산식인 식 (5)를 이용하여 철근위치의 염화물량을 예측할 수 있다.

$$C_{x_2} = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_2}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (5)$$

여기서, C_{x_2} : 철근위치의 염화물량 (wt%)

x_2 : 철근위치 (cm, 콘크리트 피복두께)

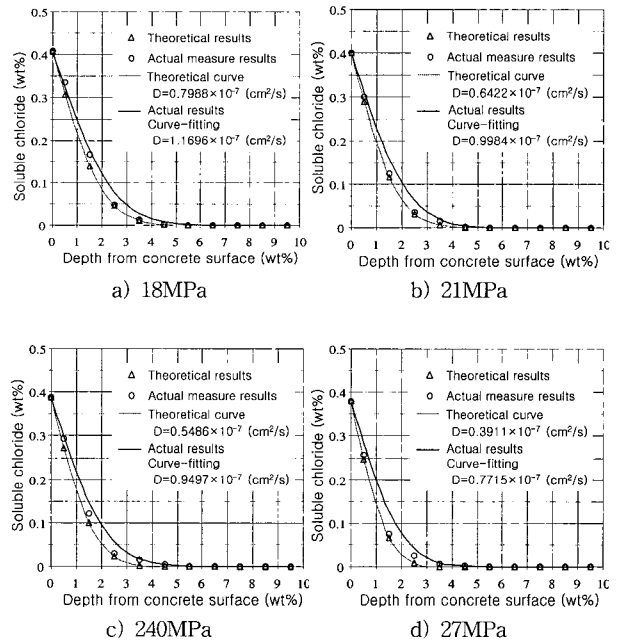


Fig. 7 Chloride distribution curve inside concrete

Table 4 Chloride content of discolored position

Specific concrete strength (MPa)	Discolor point (cm)	Chloride content (wt%)
18	0.842	0.269
21	0.715	0.274
24	0.663	0.271
27	0.601	0.266

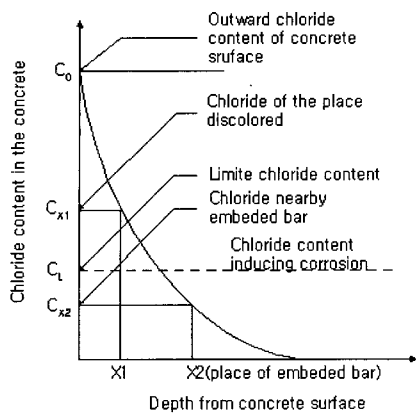


Fig. 8 Prediction of chloride around embedded bar

식 (5)를 이용하여 산정한 철근위치의 염화물량(C_{x_2})이 한계염화물량(C_l) 미만일 경우 매립철근은 건전하다고 할 수 있으며, 한계염화물량 이상일 때에는 매립철근의 부식이 시작되었거나, 부식이 발생할 수 있는 조건이 형성되었다고 판단할 수 있다.

나. 한계염화물량 도달시간 예측

겉보기 표면염화물량은 시간의 흐름에 관계없이 일정하다 할 수 있으므로 한계염화물량 도달시간 예측은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_l = \frac{1}{D} \cdot \left[\frac{x_2}{2 \left(\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_l}{C_0} + 1 \right) \right)} \right]^2 \quad (6)$$

여기서, t_l : 한계염화물량 도달시간(sec)

C_l : 한계염화물량(Wt%)

그러나, 실구조물의 표면염화물량은 해양환경하에서 재령에 따라 증가하는 경향을 나타내며, 그 증가량은 시간에 따른 함수로 표현할 수 있다. 재령이 오래된 구조물의 경우 시간에 따른 표면염화물량의 증가는 큰 차이를 보이지 않으나, 재령이 짧은 구조물일 경우에는 증가량의 차이가 크게 나타난다. 따라서 구조물의 사용년수에 따라 식 (6)을 이용하여 예측한 한계염화물량의 도달시간에 표면염화물량의 증가에 대한 보정을 고려해야 할 것이다. 다만, 한계염화물량 및 표면염화물량 증가율에 대해서는 여러 학설이 있으나 본 연구에서는 논외로 하였다.

5. 결 론

가. 비색판별법의 기본특성

- 1) 염화물 침투깊이 측정시 변색위치의 판별은 0.1 N 이하의 농도를 사용할 경우 명도가 너무 높고, 0.3 N 이상

의 농도에서는 변색위치의 판별이 어려웠다. 따라서, 비색판별법의 이용에 0.1~0.3 N 농도의 검지약을 사용함이 적절한 것으로 분석되었다.

- 2) 지시약은 플로레센나트륨 용액의 사용이 지시약을 사용하지 않거나 크롬산칼륨 용액을 사용하는 경우보다 변색위치의 판별에 있어 유리하였으며, 플로레센나트륨 용액의 용매로서 증류수를 사용함이 효과적인 것으로 검토되었다.
- 3) 지시약의 분무는 측정표면으로부터 약 30~40 cm 떨어진 위치에서 $0.0056 \sim 0.0069 \text{ ml/cm}^2$ 를 측정표면에 고르게 분무하고 충분히 건조시킨 뒤 검지약을 분무해야 지시약과 검지약의 선 반응 없이 염화물 침투 깊이를 정확히 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

나. 비색판별법의 활용성 평가

- 1) 염화물의 실측과 Tang & Nilsson의 방법을 이용하여 구한 각각의 확산계수는 콘크리트의 압축강도에 따라 차이를 나타내었으며, 확산계수의 실측값과 이론값을 비교·검토한 결과 이론적으로 확산계수를 산출하여 본 연구의 성과에 응용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 변색위치의 염화물량을 측정한 결과 콘크리트의 압축강도 수준에 관계없이 $0.27 \pm 0.004 \text{ wt} \%$ 로 일정하게 나타났으므로 비색판별법을 이용한 변색위치의 염화물량을 $0.27 \text{ wt} \%$ 로 하여 Fick의 확산식에 적용, 표면염화물량을 산정할 수 있을 것으로 검토되었다.
- 3) 비색판별법을 이용하여 산정한 콘크리트의 표면염화물량은 겉보기 표면염화물량으로써 실측한 표면염화물량값과는 상당한 오차를 발생하게 된다. 따라서, 콘크리트 내부 매립철근 위치의 염화물량과 한계염화물량에 도달하는 시간을 예측하기 위해서는 외기에 따라 변동하는 실측한 표면염화물의 이용보다는 연단위의 평균값인 겉보기 표면염화물량을 이용하는 것이 합리적이라 사료된다.

이상의 연구결과는 현재까지 번잡하고 신뢰성이 떨어지던 구조물의 염해실태조사 분야에 신개념을 제시할 수 있을 것으로 판단되며, 비색판별법을 이용하여 염화물의 침투깊이는 물론 표면염화물량을 산정함에 따라 철근콘크리트 구조물의 건전성을 평가하는 실용적 접근이 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 건설교통부, “고품질 시공을 위한 고내구성 콘크리트의 개발 및 실용화 연구”, 95’ 연구개발사업 연차보고서, 1996. pp.6~67.

2. 전력연구원, “발전소 구조재 및 내·외장재의 염해방지 방안 연구”, 1997. pp.1~8.
3. 김도겸, “콘크리트 중의 염화물 확산速度에 따른 鐵筋 腐蝕 豫測에 관한 研究”, 충남대학교 대학원, 2000. pp.73~101.
4. 김진철, “電位差를 이용한 콘크리트 중의 염소이온 擴散 評價와 固定化 特性 研究”, 한양대학교 대학원, 2000. pp.53~107.
5. 大郎信明, 檉野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 友澤士紀, 樺田佳寛, 宮川豊章, “コンクリート構造物の耐久性シリーズ-鹽害-”, 技報堂出版, 1986. pp.103~111.
6. 小林一輔, 鈴木一孝, 野尻陽一, 松岡康訓, “コンクリートの組織構造の診断”, 1993, pp.109~110.
7. Tang, L. and Nilsson L. O., “Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field,” *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.1, 1992, pp.49~53.
8. Tang, L. and Nilsson, L. O., “A Discussion of the Paper-Calculation of Chloride Diffusivity in Concrete from Migration Experiment in Non-steady state Condition,” *Cement and Concrete Research*, Vol.25, No.5, 1995, pp.1133~1137.

요 약

건축물의 요구성능에 대한 관심이 점차 높아짐에 따라 건축물의 성능평가를 통하여 사용연한을 예측하고 건축물의 수명을 연장시키거나, 새롭게 재구성하려는 노력이 계속되고 있다. 그러나 아직 염화물에 의한 성능저하 평가에 있어 그 비용의 문제와 평가과정의 전문성 등의 많은 난점을 가지고 있다.

본 연구는 콘크리트 내부의 염화물침투 깊이를 측정하는 간이적 방법인 비색판별법을 이용하여 염화물에 의한 성능저하평가를 하고자 비색판별법의 적용가능성을 검토 후 변색위치의 침투염화물량을 정량분석하였다. 또한, 이를 이용하여 콘크리트 표면염화물량을 산정하고 철근위치 염화물량의 예측 및 한계염화물량에 도달시간 예측의 실용적 평가수단을 제시하였다. 염화물에 의한 철근콘크리트 구조물의 성능평가에 있어 간이평가 수단인 비색판별법의 활용에 따라 샘플수의 다량확보를 통한 신뢰수준의 향상을 이룰 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 표면염화물량, 확산계수, 비색판별법, 염해, 비파괴 시험