

염해환경에서의 RC보의 허용 균열폭 산정에 관한 연구

A Study on the Allowable Crack Width of RC Beam with Corrosive Environment

Dongbaek Kim^{a,1}, Soondong Kwon^{b,2}, Kwanghee An^{c,3}

^a Department of Civil, Safety & Environmental Engineering, Hnakeyong National University, 327 Jungangro Anseong City, Kyeonggi 456-749, Republic of Korea

^b Department of Civil, Safety & Environmental Engineering, Hnakeyong National University, 327 Jungangro Anseong City, Kyeonggi 456-749, Republic of Korea

^c Department of Civil, Safety & Environmental Engineering, Hnakeyong National University, 327 Jungangro Anseong City, Kyeonggi 456-749, Republic of Korea

ABSTRACT

Deterioration of reinforced concrete structures in corrosive environment is tend to be accelerated due to ingress of aggressive ion such as chloride ion. Chloride-induced corrosion is affected by various factors such as cover concrete qualities, width of existing cracks, and cover depth of concrete. However, the allowable crack width of RC structure in design code does not consider the concrete material properties and conditions of construction except the cover depth.

In this paper, an equation for allowable crack width is proposed to consider the cover concrete quality, crack width, and cover depth. Crack width, cover depth, and water-cement ratio of concrete are selected as influencing factors on corrosion of reinforcement for rapid chloride tests. From test results, the relationships between the factors and corrosion are derived. Finally, the equation for allowable crack width is derived in terms of concrete compressive strength and cover depth. The presented equation is verified by comparative calculations with design code variables.

KEYWORDS

deterioration
corrosion
cover depth
allowable crack width
water-cement ratio

콘크리트에 발생하는 균열은 구조물의 진행성 파괴로 연결되어 구조물의 안전성에 직결 되는 문제이며, 철근콘크리트 구조물에 발생한 균열은 사용성 뿐만 아니라 유해물질의 침입에 따른 열화를 촉진하여 내구성 문제와 직결된다. 특히 외부 염화물 이온의 침입에 따라 철근에 발생하는 부식은 철근콘크리트 구조물의 안전성에도 큰 영향을 미친다. 따라서, 콘크리트의 균열을 제어하기 위해 초기재령 콘크리트에서의 수화, 수분이동을 규명하여 안전성 및 내구성을 확보하기 위해 허용 균열폭을 합리적으로 산정하는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 철근부식에 영향을 미치는 영향인자를 분석하고 부식영향인자의 변화에 따른 부식의 정도를 파악할 수 있는 철근콘크리트 보를 제작하여 실험을 실시한다. 이러한 실험의 결과를 이용하여 부식영향인자를 고려한 허용 균열폭에 대한 식을 제안한다.

열화
부식
피복두께
허용 균열폭
물-시멘트비

© 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

a Corresponding author. Tel. 82-10-2355-5143. Fax. 82-31-678-4674.
Email. dbkim@hknu.ac.kr

1 Tel. 82-10-2355-5143. Email. dbkim@hknu.ac.kr
2 Tel. 82-10-5384-1020. Email. ksd1020@gmail.com
3 Tel. 82-10-3325-3980. Email. u804@naver.com

ARTICLE HISTORY

Received Jun. 01, 2015
Revised Jun. 04, 2015
Accepted Jun. 22, 2015

1. 서론

콘크리트에 발생하는 균열은 구조물의 진행성 파괴로 연결되어 구조물의 안전성에 직결되는 문제이며, 철근콘크리트 구조물에 발생한 균열은 외관, 사용성 뿐만 아니라 유해물질의 침입에 따른 열화를 촉진하여 내구성 문제와 직결된다. 특히 외부 염화물 이온의 침입에 따라 철근에 발생하는 부식은 철근콘크리트 구조물의 안전성에도 큰 영향을 미친다 (ACI Committee 222, 1985).

이러한 콘크리트의 균열을 제어하기 위해 초기재령 콘크리트에서의 수화, 수분이동을 규명하여 균열저항성을 확보하려는 노력과 함께 안전성뿐만 아니라 내구성 측면에서 철근 콘크리트에서의 허용 균열폭을 합리적으로 산정하려는 연구는 매우 필요한 실정이다.

현재 국·내외에서 사용하고 있는 허용 균열폭은 콘크리트 자체의 재료 특성(W/C, 고강도)과 시공특성(피복두께, 다짐 정도), 즉 콘크리트의 품질이 전혀 반영되지 않고, 단지 콘크리트 피복두께에 의해서만 결정하도록 되어있다. 구조물의 용도와 시공 상황에 따라 다르게 결정되는 콘크리트의 품질을 고려하지 않고, 일률적으로 정해지는 현재의 허용 균열폭은 사용성, 안전성 및 내구성을 고려한 측면에서 볼 때 콘크리트 품질을 고려할 수 있도록 바뀌어야 할 것이다.

철근 콘크리트 구조물의 사용성, 안전성 및 내구성을 판단할 수 있는 결정적인 기준은 콘크리트 내 철근 부식의 시기와 정도이다(ASTM Committee C-9, 1991). 따라서 허용 균열폭의 합리적 산정을 위해서는 콘크리트의 품질과 균열폭이 콘크리트 내 철근의 부식에 미치는 영향과 상관관계에 대한 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 철근부식에 영향을 미치는 영향인자를 분석하고 부식영향인자의 변화에 따른 부식의 정도를 파악할 수 있는 철근콘크리트 보를 제작하여 실험을 실시한다. 이러한 실험의 결과를 이용하여 부식영향인자(균열폭, 피복두께, W/C)등을 고려한 허용균열폭을 산정해 본다.

2. 연구동향

철근콘크리트 구조물의 철근부식은 구조물의 내구수명에 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 많은 연구자들이 철근부식 메카니즘의 규명과 부식영향인자에 관한 많은 연구를 수행하였다(Andrade, C.,1999). 그러나 구조물 내 철근부식실험이 장시간에 걸쳐 이루어져야 하며 철근부식에 관여하는 부식영향인자의 다양성으로 인해 실제 구조물에 반영할 수 있는 명확한 설계규정이나 지침을 만들어 내지 못하고 있다. 따라서 철근부식에 관한 연구방법은 최근 들어 실제 구조물이 받는 환경을 조성한 장기폭로실험과 더불어 철근부식에 결정적인 영향을 미치는 염화물의 확산을 연구하기 위하여 전기화학적인 방법을 응용한 연구방법이 많이 도입되고 있는 실정이다(CEB/FIP, Model Code 1990). 장기폭로 실험과 염화물 확산 실험 등 부식과 관련된 연구방법은 균열폭, 콘크리트의 품질, 피복두께, 유해이온(Cl⁻)제한, 확산계수, 투수계수 등의 많은 부식영향인자에 대하여 광범위 하게 이루어지고 있다(Aldea et al., 1999), (Chatterji, S.2003).

3. 철근 콘크리트 보의 부식촉진 실험

3.1 실험방법

국내·외에서 사용되는 허용 균열폭은 콘크리트 자체의 재료특성(W/C, 고강도) 및 시공특성이 고려되지 않고 단지 콘크리트 피복에 의해서만 결정하도록 되어 있다. 이에 본 연구는 부식 영향인자 중 지배적인 영향을 미치는 피복두께, 물-시멘트 비(W/C), 균열폭을 영향인자로 규정하고 부식 환경은 바닷가에 위치한 해안구조물 등에 해당하는 고부식성 환경을 모사하기 위해 종합 내구성 시험기를 이용하여 촉진염해환경을 적용하였다. 또한, 철근콘크리트 구조물의 철근부식과 균열간의 상관관계를 규명하기 위해서 염해를 받는 환경에 대해 철근부식 촉진시험을 수행하였다. 시험의 변수가 되는 영향인자들은 시방규정에서 사용되는 허용 균열폭을 고려하여 선정하였다.

3.2 시편의 제작

균열과 철근부식과의 연관성 규명 및 모델링 개발을 위해 균열폭, 피복두께, W/C를 부식영향인자로 규정하고 철근콘크리트 보의 염해환경을 조성할 수 있는 종합내구성시험기를 이용하여 촉진시험을 수행하였다. 부식영향인자와의 부식 관계를 파악하기 위하여 하나의 부식영향인자를 변화시켜 시편을 만들고 다른 부식영향인자는 고정 값으로 설정하였다. 균열폭의 변화에 따른 부식정도를 파악하기 위해 W/C 55%, 피복두께는 3cm로 고정한 뒤 실험을 수행하였다. 또한 철근피복두께가 부식에 미치는 영향을 파악하기 위해 W/C를 55%, 균열폭을 1.0mm로 고정하고 피복두께를 1cm~6cm로 변화시켜 실험하였다. W/C의 영향에 대한 실험은 균열폭 1.0mm, 피복두께 3cm로 고정하고 W/C를 35%, 55%, 70%으로 변화시켰다. 촉진염해시험 부식영향인자들은 Table. 1과 같으며 배합표는 Table. 2와 같다.

Table 1. The Corrosion Influencing Factor of Facilitative Test

고정변수			종속변수	
균열폭(mm)	피복두께(cm)	W/C(%)		
-	3	55	균열폭(mm) : ω	0, 0.2, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5
0.2, 0.1	-	55	피복두께(cm) : c	1, 2, 3, 4, 6
0.2, 0.1	3	-	물-시멘트비(%) : x	35, 55, 70

Table 2. The Mix Table of Specimens

구 분	W/C (%)	S/a (%)	단위량 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	AE감수제
Type I	35	39.5	171.5	490.1	639.7	998.7	0.9802
Type II	55	43.5	171.5	311.9	768.5	1017.4	0.6238
Type III	70	50	171.5	228.7	982.8	982.8	0.4574

3.3 균열의 도입 및 염해촉진 실험

시편은 3점 휨 시험을 수행하여 균열을 도입하였으며, 염해환경에 철근콘크리트 구조물이 장기간 노출되었을 때 발생하는 효과를 만들기 위한 염해분무 촉진실험은 습도와 온도를 조절할 수 있는 내구성 시험기내에 균열이 가해진 시험체를 거치한 후, 40℃의 온도를 유지하며 NaCl 5%용액을 5시간 30분 주기로 분무하였으며 35일-150일의 염해에 해당하도록 수행되었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 균열폭에 따른 철근부식

균열폭의 크기 변화에 따른 철근의 부식 활성화도 변화를 보기위하여 15×55(cm) 크기의 보 시편 윗면에 3×3(cm) 격자 좌표를 설정하고 균열부위에서의 반전위차(Half cell potential)를 측정한 결과, 단계별 하중을 가하여 균열폭이 0mm-1.5mm 변화하는 동안 반전위차는 균열폭이 증가함에 따라 -245mV에서 -340mV까지 감소하였다. 측정한 값들의 평균치는 균열부위에서의 반전위차로 사용하여 Fig. 2와 같이 그래프로 도시하고 식(1)을 도출하였다. Table 3은 균열부위에서의 평균 전위값을 나타낸 것이고 Fig. 1은 대표 값으로 균열에 따른 전위값의 경향을 나타낸다.

$$y = -48.50x_1 - 250.92 \quad \text{단, } x_1 : \text{균열폭} \tag{1}$$

Table 3. The Half Potential with Variation of Crack Width

Case	시편	물-시멘트비(%)	피복두께(cm)	균열폭(mm)	평균 전위값(mV)
Case 1	A-1	55	3	0.00	-265
	A-2			1.51	-340
	A-3			1.50	-325
Case 2	A-4	55	3	1.00	-310
	A-5			1.00	-340
	A-6			0.00	-
Case 3	A-7	55	3	0.00	-245
	A-8			0.51	-280
	A-9			0.54	-265

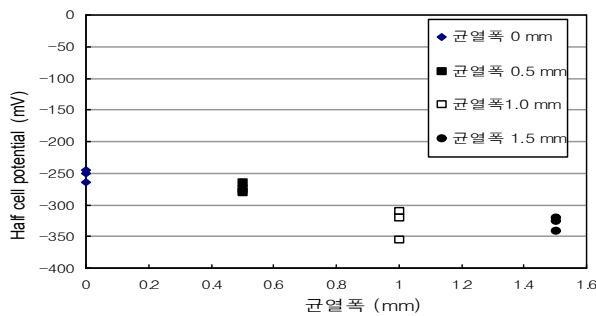


Fig. 1 The Mean Half Potential at Crack

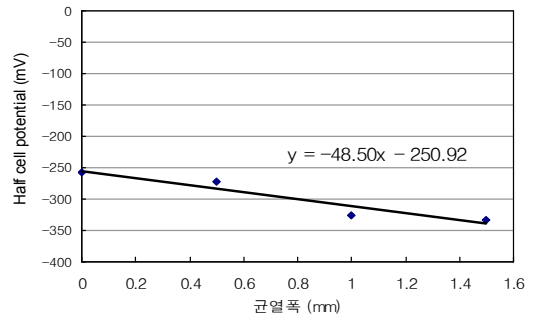


Fig. 2 The Trend of Half Potential

4.2 피복두께에 따른 철근부식

피복두께의 변화에 따른 철근의 부식 활성도를 측정된 결과, 피복두께가 1~6cm로 변할 때 반전위차는 -265~-520mV 사이의 값으로 변하며 이것은 균열폭에 따른 변화폭보다 큰 값이다. 피복두께가 1cm에서 3cm로 증가하는 경우 전위값의 변화가 심한 반면, 피복두께가 3cm 이상이 되면 전위값의 변화가 매우 완만하게 나타난다. 즉, 최소피복두께로 산정해야 할 값이 3cm~4cm 사이라는 것을 의미하며 일정한 값 이상의 피복두께가 확보되면 피복두께가 부식에 큰 영향을 미치지 않는다는 의미이다. 이 값들을 이용하여 식(2)를 도출하였으며, 균열부위에서의 평균 전위값과 그 경향은 Table 4 및 Fig. 3과 같으며 Fig. 4는 대표 값으로 균열에 따른 전위값 경향을 나타낸다.

$$y = 107.55 \ln x_2 - 473.62 \quad \text{단, } x_2 : \text{피복두께} \quad (2)$$

Table 4 The Mean Half Potential with Variation of Cover Depth

Case	시편	물-시멘트비(%)	균열폭(mm)	피복두께(cm)	평균 전위값(mV)
Case 1	B-1	55	0.00	1	-
	B-2		1.04	1	-520
	B-3		1.00	1	-445
Case 2	B-4	55	1.13	3	-355
	B-5		1.10	3	-310
	B-6		0.00	3	-
Case 3	B-7	55	1.00	6	-325
	B-8		1.01	6	-265
	B-9		0.00	6	-

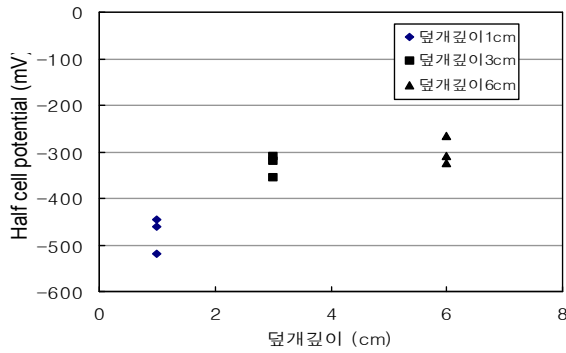


Fig. 3 The Mean Half Potential at Crack

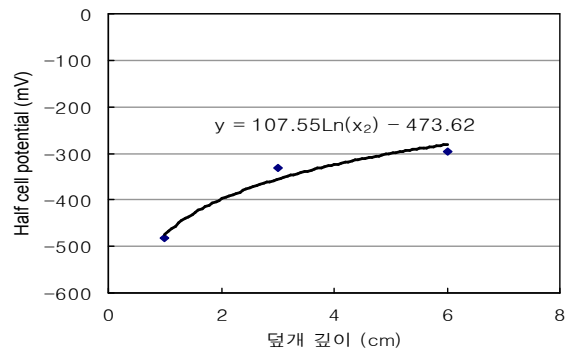


Fig. 4 The Trend of Half Potential

4.3 물-시멘트비에 따른 철근부식

W/C의 변화에 따른 철근의 부식 활성화도 변화를 보기 위하여 균열부위에서의 반전위차를 측정 한 결과, 균열부위에서도 W/C 70%의 콘크리트를 사용한 경우와 W/C 35% 및 55%를 사용한 콘크리트와 확연한 차이를 보이며, 균열폭과 피복두께에 의한 전위값의 변화폭보다 W/C에 의한 전위값의 변화폭이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 철근부식에 W/C로 표현한 콘크리트의 품질이 많은 영향을 미친다는 사실을 알 수 있으며, 이러한 결과는 W/C 55%를 경계로 콘크리트의 투수계수가 급격히 증가하는 것 과도 의미가 같다. 이러한 측정 한 값들의 평균치 및 대표값을 균열부위에서의 반전위차로 사용하여 Fig. 5 및 Fig. 6과 같이 그래프로 도시하고 식(3)을 도출하였다.

$$y = -271.90 \ln x_3 + 798.23 \quad \text{단, } x_3 : \text{물-시멘트비(W/C)} \quad (3)$$

Table 5 The Mean Half Potential with Variation of W/C

Case	시편	피복두께(cm)	균열폭 (mm)	물-시멘트비(%)	평균전위값(mV)
Case 7	C-1	3	1.00	35	-190
	C-2		1.00	35	-180
	C-3		0.00	35	-
Case 8	C-4	3	0.00	55	-
	C-5		1.05	55	-235
	C-6		1.00	55	-245
Case 9	C-7	3	1.00	70	-315
	C-8		0.00	70	-
	C-9		1.10	70	-470

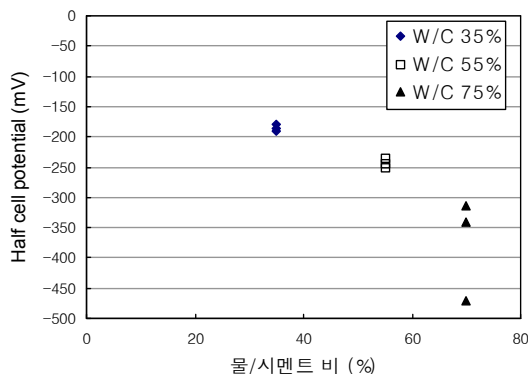


Fig. 5 The Mean Half Potential at Crack

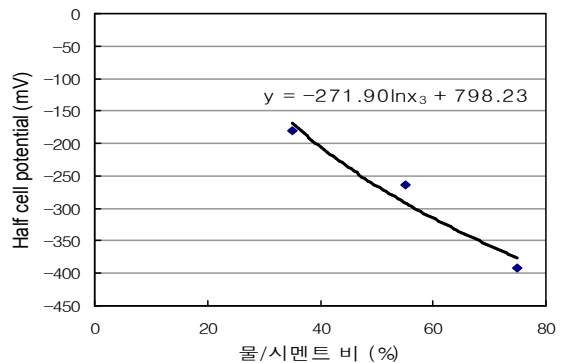


Fig. 6 The Trend of Half Potential

3.4 피복두께와 물시멘트비를 고려한 철근부식 평가

각각의 부식영향인자와 철근부식 사이의 관계식을 이용하여 균열폭, 피복두께, W/C를 모두 포함한 허용균열폭 식을 산출하기 위하여 피복두께와 W/C가 철근부식에 미치는 영향을 나타내는 새로운 변수 α 를 도입하여 표현하면 (4)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = 21.739\ln(x_2/x_3) - 31.913 \quad \text{단, } \alpha = \frac{c}{W/C} = (x_2/x_3) \quad (4)$$

α 는 피복두께와 W/C에 따라 Table 6과 같은 값을 갖으며 α 값의 변화에 따른 식 (4)의 값을 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다. 이 그래프에서 반전위차는 균열폭 변화에 따른 영향을 고려하지 않은 전위값으로서 피복두께와 W/C의 변화에 따른 전위값의 변화를 보여준다. 그래프를 살펴보면 피복두께와는 상관없이 W/C가 높아질수록 전위값이 낮아져 부식확률이 높아지고 있음을 보여주고 있다. 또한 피복두께 변화에 따른 전위값의 변화 양상은 피복두께가 3cm보다 작은 경우, 피복두께 1cm 단위로 살펴볼 때 급격한 차이를 보이지만 3cm 이상인 경우는 피복두께의 변화에 전위값의 변화가 그리 심하지 않음을 알 수 있다. 이러한 경향은 최소한 확보해야 하는 피복두께의 값이 3cm 전후라는 사실에 잘 부합한다.

Table 6 The Value of α with Variation of Cover Depth and W/C

물-시멘트비	피복두께		
	1 cm	3 cm	6 cm
35 %	0.029	0.086	0.171
45 %	0.022	0.067	0.130
55 %	0.018	0.055	0.109
70 %	0.015	0.043	0.086

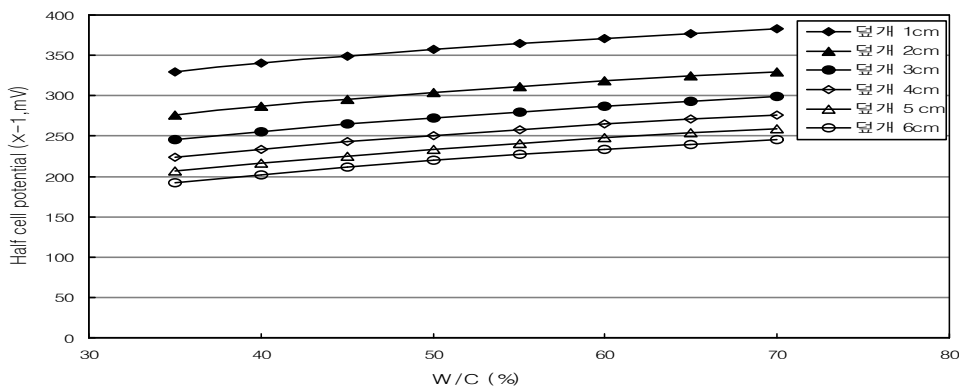


Fig. 7 The Half Potential with Variation of Cover Depth and W/C

4. 허용 균열폭의 산정

4.1 허용 균열폭의 산정식의 도출

각각의 부식영향인자가 부식에 미치는 영향을 반전위차 측정을 통해 경향식으로 도출하고 피복두께와 물-시멘트비를 같이 고려할 수 있는 변수 α 를 도입하여 균열폭, 피복두께, 압축강도를 고려한 허용균열폭식을 산정하는 과정은 먼저 변수 α 를 포함하고 있는 반전위차를 식(5)와 같이 구하고 균열폭을 변수로 하는 반전위차를 식(6)으로 구한다. 동일한 부식수준일 경우 같은 반전위차(y)를 갖게 되는데, 균열폭과 변수 α 가 미치는 영향이 동일하다고 가정하면 식 (5)+ (6)의 산술평균은 균열폭과 변수 α 가 반전위차에 미치는 영향을 반영하게 되며 식(7)과 같이 표현할 수 있으며, 이 식을

다시 균열폭(x_1)으로 나타내면 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$y = 21.739 \ln \alpha - 31.913 \tag{5}$$

$$y = -48.50x_1 - 250.92 \tag{6}$$

$$y = 10.870 \ln(\alpha) - 24.25x_1 - 141.417 \tag{7}$$

$$x_1 = 0.0448 \ln(\alpha) - 0.0041y - 0.5832 \tag{8}$$

철근부식 평가 기준으로 제시하는 기준전극은 ASTM의 기준을 따르며, 식 (8)을 이용하여 피복두께와 물-시멘트비가 정해지면 부식정도에 따른 균열폭을 정할 수 있다. 기준전극 값을 살펴보면 철근콘크리트 구조물의 철근부식을 방지하기 위해서는 반전위차를 -200mV 이상으로 제어해야 하므로 따라서 식 (8)의 y 항에 -200을 대입하여 정리하면 식(9)가 된다.

$$x_1 = 0.0448 \ln(\alpha) + 0.2368 \tag{9}$$

여기서 변수 α 에 포함되어 있는 W/C의 항을 Table 7에서 제시하는 W/C와 강도의 관계를 나타내는 식들을 이용하여 f_c' 를 포함하는 식으로 바꿀 수 있으며, 식(1), (2), (3)을 이용하여 W/C항을 f_c' 항으로 표현하면 최종적으로 피복 두께와 콘크리트의 압축강도로 표현되는 균열폭을 식(10)으로 표현할 수 있다.

$$x_1 = 0.0448 \ln [c \times (f_c' + a)] + b \quad \text{단, } f_c' : \text{콘크리트의 압축강도} \tag{10}$$

a 와 b 는 콘크리트의 압축강도 범위에 따라 표현되는 상수 값으로써 Table 8과 같다. 식 (10)이 나타내고 있는 균열폭은 힘을 받는 콘크리트 구조물의 피복두께와 콘크리트의 압축강도가 정해져 있는 경우, 기준전극 -200mv에 해당하는 철근부식이 발생할 수 있는 균열폭을 나타내는 값이다. 따라서 구조물의 피복두께와 강도가 정해지는 경우, 기준전극 -200mV에 해당하는 철근부식을 방지하기 위해서는 식 (10)에 의해 구해지는 균열폭 미만으로 균열을 제어해야 한다. 기준전극 -200mV가 나타내는 부식수준은 ASTM의 기준에 의하면 부식발생 확률이 10%미만이며 실제로 부식이 발생하지 않았다고 판단할 수 있는 값이다.

Table 7 The Strength Relative Equation with W/C

콘크리트 표준시방서	일본 건축공사 표준시방서
$W/C = \frac{215}{f_c' + 210}$	$W/C = \frac{51}{f_c'/k + 0.31}$ k : 시멘트 몰탈의 강도(kgf/cm ²)

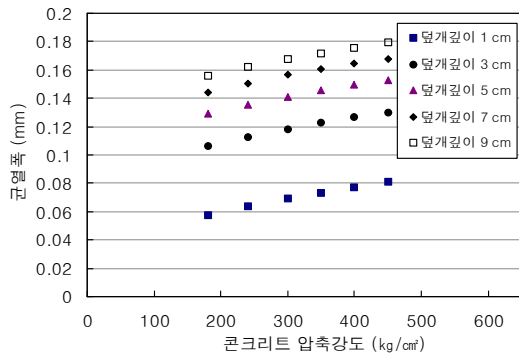
Table 8 The Parameter a and b

상 수	콘크리트 표준시방서	일본 건축공사 표준시방서
a	210	204
b	-0.210	-0.208

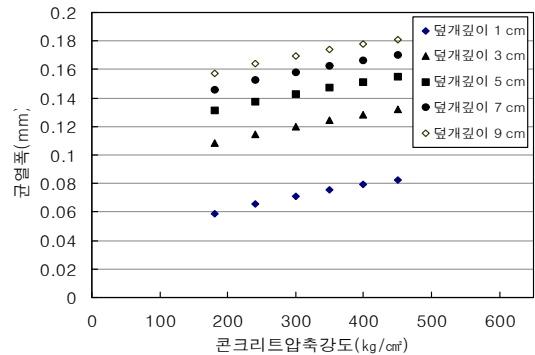
4.2 허용 균열폭의 산정식의 비교분석

균열폭을 강도와 피복두께에 따라 도시하면 Fig. 8과 같으며, (a)는 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 규정에 의해 구한 상수 a, b를 사용한 그래프이고, (b)는 일본 건축공사 표준시방서의 규정에 의해 구한 상수 a, b를 사용한 그래프이다. 균열폭에 대한 식 (10)은 반전위차 기준전극으로 판단할 때 부식 발생 확률이 5%-10% 미만에 해당하는 -200mV를 기준으로 만들어진 식이므로 부식 발생을 방지하기 위해서는 그래프에서 나타나는 균열폭 미만으로 균열을 제어하면 된다. 따라서 Fig. 8(a), (b)에서 콘크리트의 압축강도와 피복두께에 따라 나타나고 있는 균열폭은 정해진 콘크리트의 압축강도와 피복두께에 대하여 부식이 발생할 수 있는 최소의 균열폭이 된다.

한편, Fig. 8의 균열폭의 크기는 상수 a, b에 따라 그 값이 달라지는데, 균열폭의 범위는 차이가 있지만 두 그래프 모두 비슷한 경향을 보인다. 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 동일한 염해환경 아래에서 허용할 수 있는 균열폭이 증가하고 있으며, 피복두께 3cm를 기점으로 균열폭의 변화가 매우 뚜렷하다. 따라서 피복두께가 증가함에 따라 허용할 수 있는 균열폭의 크기가 증가하지만 일정 수준 이상의 피복두께가 확보된 상태에서는 피복두께가 부식에 미치는 영향이 작아진다는 것을 의미한다. 일본건축표준시방서 기준에 의한 균열폭이 콘크리트 표준시방서에 의한 값보다 다소 크며, 피복두께가 작을수록 차이가 커지고 피복두께가 커질수록 차이가 작아지며 그 차이는 0.01 mm 이하로 나타났다.



(a) Korea Concrete Standard Specification



(b) Japan Architecture Society

Fig. 8 The Crack Width with Cover Depth and Strength of Concrete

5. 결론

균열폭, 피복두께, W/C를 고려한 염해부식 환경 하에서 철근콘크리트 보의 허용 균열폭 산정에 관한 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 균열폭, 피복두께, W/C를 부식 영향인자로 하여 철근콘크리트 보의 촉진염해시험을 실시한 결과를 정리하여 부식영향인자 별로 철근부식과 관계를 나타내는 식을 도출하였다.
- (2) 부식 영향인자 별 식들을 통하여 피복두께와 W/C를 동시에 고려할 수 있는 변수를 도입하고, 기준 전극값을 포함하는 허용 균열폭식을 도출하였다.
- (3) 산정한 허용균열폭식에 의한 허용 균열폭과 철근콘크리트 구조설계기준에서 제시하고 있는 허용 균열폭을 비교·분석한 결과, 기존의 허용 균열폭과 비교하여 물/시멘트비의 변화를 고려함으로써 콘크리트의 품질을 반영할 수 있는 허용 균열폭을 산출할 수 있는 방법을 제시하였다.
- (4) 산정한 허용 균열폭 식의 일반적인 사용을 위해서는 기준전극에 따른 부식수준을 정량적으로 평가하는 연구가 보충되어야 하며, 확실한 검증을 위해 균열폭을 0.1mm-0.3 mm로 구분하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

- ACI Committee 222, "Debate: Cracks, Cover and Corrosion," Concrete International, May, pp. 20-35, 1985.
- ASTM Committee C-9, "Standard Test Method for Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete," Annual Book of ASTM Standard, Vol. 03, pp. 434-439, 1991.
- Aldea, C.M., Shah, S.P., and Karr, A., "Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 181-186, 1999.
- Aldea, C. M., Ghandehari, M., Shah, S. P., and Karr, A., "Estimation of Water Flow Through Cracked Concrete Under Load," ACI Materials Journal, Vol. 97, No. 5, pp. 567-575, 1999.
- Andrade, C., "Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete From Ionic Migration Measurements", Cement and Concrete Research, Vol. 23, No. 5, pp. 724-742, 1993.
- CEB/FIP, Model Code 1990, Comité Euro-International du Béton, 1990.
- Chatterji, S., "Transportation of Ions Through Cement-Based Materials. Part 1-Fundamental Equations and Basic Measurement Techniques," 2003
- Korea Concrete Standard Specification, W/C Strength Relative Equation, 2009
- Japan Architectural Standard specification, W/C Strength Relative Equation, 2010