

부식된 철근의 부착강도 및 정착길이 산정모델

Bond Strength and Development Length Model for Corroded Reinforcing Bars

한선진¹⁾ · 이득행^{2)*}

Han, Sun-Jin¹⁾ · Lee, Deuckhang^{2)*}

¹⁾전주대학교 건축공학과 조교수, ²⁾충북대학교 건축공학과 부교수

¹⁾Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Jeonju University, ²⁾Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University

/ A B S T R A C T /

This study aims to propose a simplified equation for estimating the bond strength of corroded reinforcing bars. To this end, extensive parametric analyses were performed using the detailed analysis method presented in the authors' previous study, where a wide range of critical variables were considered, such as compressive strength of concrete, net cover thickness, and reinforcing bar diameter. The sensitivity in bond strength of the corroded reinforcing bar according to each variable was evaluated. On this basis, a simplified formula for the bond strength of the corroded reinforcing bar was derived through regression analysis. The proposed equation was rigorously tested and verified using the bond test results of corroded reinforcing bars collected from the literature. The results confirmed that the proposed equation could estimate the bond strengths of specimens with better accuracy than the existing models, providing a reliable tool for engineers and researchers. In addition, the proposed equation was used to analyze the development length required for corroded tensile reinforcement to exert its yield strength, and it showed that the cover thickness of concrete must be at least four times the diameter of the reinforcing bar to achieve the yielding strength of reinforcing bar even at a corrosion degree of more than 5.0%.

Key words: Corrosion, Bond strength, Development length, Structural code

1. 서론

철근콘크리트(reinforced concrete, 이하 RC) 구조물의 내구성은 균열, 탄산화, 염화이온 침투 등 다양한 열화요인에 의해 저하된다. 특히, 콘크리트 탄산화와 염화이온 침투는 철근 부식을 유발하는 요소로 잘 알려져 있다 [1-3]. 부식이 진행되면 철근의 단면적이 손실되고 철근과 콘크리트 사이의 부착강도가 저하되어 결과적으로 RC 부재의 휨 및 전단강도를 감소시킨다 [4]. 따라서, 부식된 RC 구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 부식된 철근의 부착강도를 정량적으로 파악하는 것이 매우 중요하다.

따라서, 기존의 여러 연구자들은 부식된 철근의 부착강도를 규명하기 위하여 직류(direct current)를 이용하여 철근의 부식을 촉진시키고 부착 실험을 수행하였다[5-10]. 그들의 실험결과에 따르면 Fig. 1에 나타난 것과 같이, 부식 초기(state 1)에는 주변 콘크리트의 구속으로 인해 오히려 부착강도

가 증가하는 경향을 보였으며, 특정 부식을 시점부터는 콘크리트에 찢어짐 균열(splitting cracking)과 함께 부착강도가 급격히 감소하는 것으로 나타났다(state 2). 또한, 부식률이 20% 이상 크게 증가하더라도 부식된 철근과 콘크리트 사이의 잔류 마찰(residual friction)로 인해서 부착강도가 더 이상 감소하지는 않는 것으로 나타났다(state 3).

여러 부착 실험 결과들을 기반으로 일부 연구자들은 부식된 철근의 부착강도를 산정할 수 있는 간략식을 제안하였다[7, 8],[10, 11],[12-14]. 대부분의 제안식은 부식된 철근의 부착강도가 부식률(corrosion degree, ω_{corr})에 대해 선형 또는 지수적으로 감소하는 형태로 제안되었다. 다만, 이들 식은 일부 부착 실험 결과만을 활용하여 도출되었기 때문에 다양한 변수 범위를 고려하지 못하며, 상당수는 콘크리트 압축강도(f'_c), 콘크리트 피복두께(C_x), 철근 직경(d_b) 등 부착강도에 큰 영향을 미치는 주요 인자들을 반영하지 않고, 오직 부식에 의해 감소되는 부착강도의 비율만을 고려한다. 따라서, 구조 엔지니어가 손쉽게 활용 가능하면서도 주요 인자와 다양한 변수 범위를 고려할 수 있는 부식된 철근의 부착강도 산정식이 요구된다.

이 연구에서는 수정 두꺼운 벽 실린더 모델(modified thick-walled

*Corresponding author: Lee, Deuckhang

E-mail: dk@cbnu.ac.kr

(Received May 28, 2024; Revised June 27, 2024; Accepted June 27, 2024)

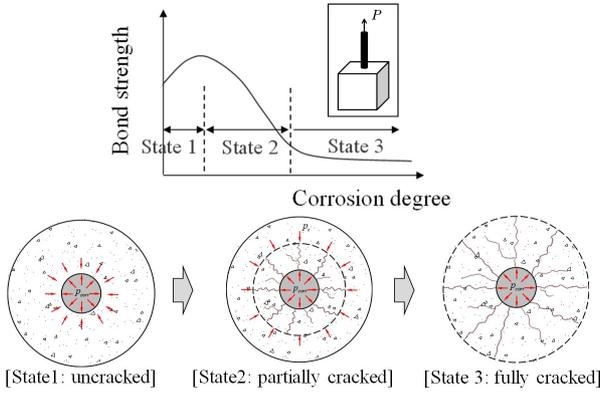


Fig. 1. Change in bond strength according to corrosion

cylinder model)을 활용하여 다양한 범위의 콘크리트 압축강도(f'_c), 콘크리트 피복두께(C_c), 철근 직경(d_b), 부식률(ω_{corr})을 고려한 변수해석을 수행하였으며, 해석 결과를 기반으로 간략화된 부식된 철근의 부착강도 산정식을 제시하였다. 기존연구로부터 총 158개의 부착 실험 결과를 수집하였으며, 제안 간략식과 기존연구자들의 식을 통해 실험체들의 부착강도를 평가 및 비교하였다. 또한, 제안식을 활용하여 철근의 부식이 진행됨에 따라 인장 철근이 항복하기 위해 요구되는 정착길이를 분석함으로써 부식된 철근의 항복을 보장하기 위한 적절한 설계 조건을 파악하고자 하였다.

2. 수정된 두꺼운 벽 실린더 모델

Fig. 2에는 Xu(1990)[15]가 제안한 부식된 철근의 부착강도 모델을 정리하여 나타내었다. 철근에 인장력이 작용하면, 철근 리브의 표면에서는 지압응력(bearing force, p_x)과 마찰응력(friction stress, f_p)이 발생하며, 힘의 평형조건으로부터 길이방향 철근의 연직방향으로 작용하는 평균 지압응력(p_{crx})과 평균 부착응력(τ_{crx})을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$p_{crx} = [\cos\alpha_c - f\sin\alpha_c] \frac{(d_0 + h_x)h_x}{d_x l_r \sin\alpha_c} p_x \quad (1)$$

$$\tau_{crx} = [\sin\alpha_c + f\cos\alpha_c] \frac{(d_0 + h_x)h_x}{d_x l_r \sin\alpha_c} p_x \quad (2)$$

여기서, α_c 는 마디 앞 파괴되는 콘크리트 면의 각도로써 25° 로 가정하였고, f 는 파괴된 콘크리트의 마찰계수($=0.6$), d_0 는 철근 코어의 직경, h_x 는 철근 리브의 높이, d_x 는 부식된 철근의 직경, l_r 은 마디사이의 간격이다.

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 철근 코어로부터 리브 높이의 3배만큼 떨어진 A지점에서의 응력이 파괴 항복장(failure criterion)에 도달하였을 때 철근의 부착파괴가 발생한다고 가정하였다. A지점에서의 3차원 응력 상태(σ_c , τ_c 및 σ_θ)는 힘의 평형조건으로부터 다음과 같이 산정할 수 있다[15].

$$\sigma_c = \frac{(\cos\gamma + f\sin\gamma)(d_0 + h_x)h_x}{(d_0 + 6h_x)l_r \sin\beta \sin\alpha_c} p_x \quad (3)$$

$$\tau_c = \frac{(f\cos\gamma - \sin\gamma)(d_0 + h_x)h_x}{(d_0 + 6h_x)l_r \sin\beta \sin\alpha_c} p_x \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(5d_x - 3h_x + 0.5d_0)/d_x}{9(1 - C_c/9d_x)(C_c/d_x)} p_{crx} \quad (5)$$

여기서, β 는 지압응력에 의해 발생하는 균열의 각도, γ 는 지압에 의한 압축 응력의 방향과 균열이 이루는 각도로써 $\pi/2 - \alpha_c - \beta$ 이며, C_c 는 콘크리트의 유효 피복두께이다. 파괴 항복장(failure criterion)으로써 Ottosen model[14]을 적용하였다.

$$A \frac{J_2}{f_c'^2} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_c'} + B \frac{I_1}{f_c'} - 1 = 0 \quad (6)$$

여기서, A, B, λ 는 재료상수[16], I_1 및 J_2 는 각각 응력텐서(stress tensor)와 편차응력(deviatoric stress)의 응력불변량이다. 결과적으로 해석시 지압응력 p_x 를 증가시켜가며, 식 (3)~(5)를 통해 A지점에서의 응력을 산정할

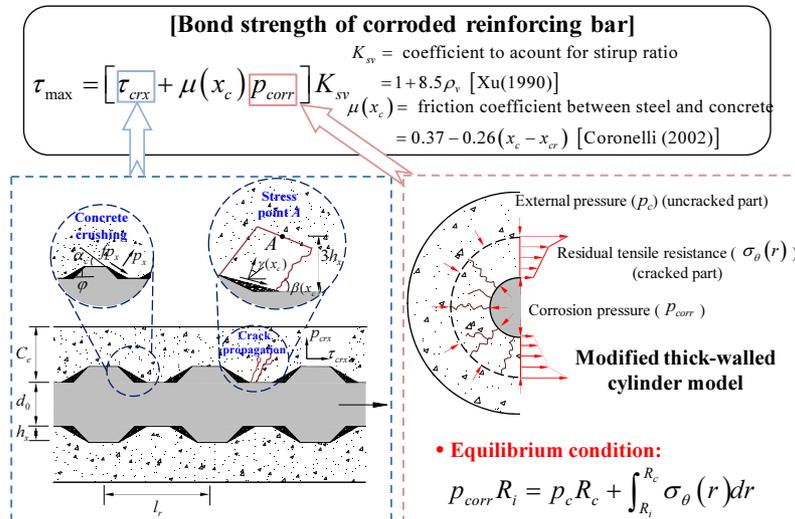


Fig. 2. Bond strength model for corroded reinforcing bars proposed by Han (2014)[1]

수 있으며, 반복계산을 수행하여 A 지점의 응력조합이 식 (6)을 만족하는 순간 철근에 작용하는 지압응력(p_x)과 평균 부착응력(τ_{crx})을 결정할 수 있다. 한편, 부식이 발생하면 부식생성물이 철근 주변을 감싸 콘크리트에 팽창압력(p_{corr})을 유발하며, 철근의 부착강도에 영향을 미친다. 또한, 철근의 팽창은 콘크리트에 찢어짐 균열(splitting crack)을 발생시키며, 이로 인해 콘크리트의 유효 피복두께(C_e)가 감소한다. Han et al.(2014)[1]은 철근의 부식에 의한 팽창압력(p_{corr})을 산정하기 위하여 수정 두꺼운벽 실린더 모델(modified thick-walled cylinder model)을 제안하였다. 부식침투 깊이(x_c)를 알고 있다고 가정한다면, 철근 표면에서의 반경방향 변형량($u(R_i)$)은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$u(R_i) = \frac{(\alpha-1)(2R_i x_c - x_c^2)}{R_c + R_i} \quad (7)$$

여기서, α 는 부식생성물의 부피팽창률로써 3.0으로 가정하였으며[17], R_i 는 철근의 반경, R_c 는 Fig. 2에 나타난 균열 실린더(cracked cylinder)에서 철근 중심부터 균열 끝단까지의 반경이다. 철근을 둘러싼 콘크리트 실린더에서 임의의 지점 r 에서 반경방향 변형량($u(r)$)은 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$u(r) = \frac{f_t}{E_c} r \frac{(R_o/r)^2 + 1}{(R_o/R_i)^2 + 1} \quad (8)$$

여기서, f_t 와 E_c 는 각각 콘크리트의 인장강도와 탄성계수이며, R_o 는 철근 중심부터 피복 끝단까지의 거리($=C_x + R_i$)이다. 위 두 식으로부터 아래의 관계를 유도할 수 있다.

$$\frac{(\alpha-1)(2R_i x_c - x_c^2)}{R_c + R_i} = \frac{f_t}{E_c} r \frac{(R_o/R_i)^2 + 1}{(R_o/R_i)^2 + 1} \quad (9)$$

따라서, 부식침투 깊이(x_c)를 알고 있으면, 위 식을 통해 균열이 진전된 반경(R_c)을 산정할 수 있다.

Fig. 2에 붉은색으로 표현한 것과 같이 철근의 팽창압력(p_{corr})은 균열이 발생한 실린더에서의 콘크리트 잔류 인장응력($\sigma_\theta(r)$)과 비균열 영역의 콘크리트에 의한 구속응력(p_c)과 힘의 평형을 이룬다. 균열 콘크리트의 접선방향 인장응력은 Pantazopoulou and Papoulia(2000)[18]가 제안한 인장연화 곡선을 적용하였다.

$$\sigma_\theta(r) = E_c \epsilon_\theta(r) \quad \text{when } \epsilon_\theta(r) \leq \epsilon_{cr} = f_t/E_c \quad (10a)$$

$$\sigma_\theta(r) = f_t \left[1 - 0.85 \frac{\epsilon_\theta(r) - \epsilon_{cr}}{\epsilon_1 - \epsilon_{cr}(r)} \right] \quad \text{when } \epsilon_{cr} \leq \epsilon_\theta(r) \leq \epsilon_1 \quad (10b)$$

$$\sigma_\theta(r) = 0.15 f_t \frac{\epsilon_u - \epsilon_\theta(r)}{\epsilon_u - \epsilon_1} \quad \text{when } \epsilon_1 \leq \epsilon_\theta(r) \leq \epsilon_u \quad (10c)$$

여기서, ϵ_1 과 ϵ_u 는 각각 기존연구(Pantazopoulou and Papoulia 2001)[18]를 참조하여 0.0003과 0.002로 적용하였다. 균열 영역의 콘크리트에 의한 구속응력(p_c)은 다음과 같이 산정할 수 있다[1].

$$p_c = f_t \frac{R_o^2 - R_c^2}{R_o^2 + R_c^2} \quad (11)$$

결과적으로 부식된 철근의 팽창압력(p_{corr})은 힘의평형조건으로부터 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$p_{corr} R_i = p_c R_c + \int_{R_i}^{R_c} \sigma_\theta(r) dr \quad (12)$$

만약, 균열이 진전되어 피복 끝단에 도달한다면($R_c = R_o$), 비균열 콘크리트에 의한 구속이 더 이상 없기 때문에 $p_c = 0$ 이다.

앞서 구한 철근의 부착강도(τ_{crx})에 팽창압력(p_{corr})의 효과를 고려하여 부식된 철근의 부착강도(τ_{max})를 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$\tau_{max} = \tau_{crx} + \mu p_{corr} \quad (13)$$

여기서, μ 는 부식된 철근과 콘크리트 사이의 마찰계수로써 Coronelli(2002)[19]가 제안한 ($0.37 - 0.26x_c$)를 적용하였다. 수정 두꺼운벽 실린더 모델에 기반한 부식된 철근의 부착강도 모델의 검증은 Han et al.(2014)[1]의 연구에 상세히 제시되어 있다.

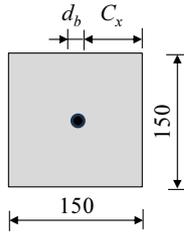
3. 부착강도 산정 간략화 모델

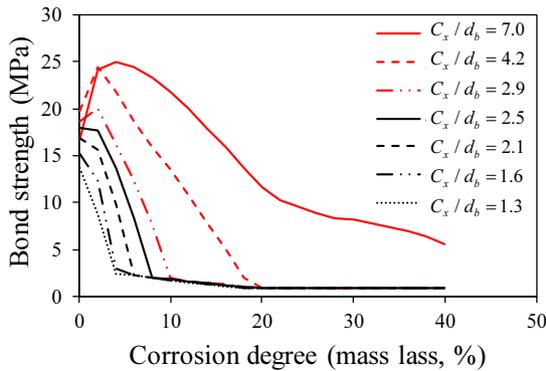
3.1 변수해석 개요

이 연구에서는 2장에 제시된 부착강도 모델을 기반으로 다양한 변수범위를 포함한 해석을 진행함으로써 간략화 모델을 제시하고자 하였으며, Table 1에는 해석에 고려한 변수와 범위를 정리하여 나타내었다. 일반적인 뽑힘시험(pull-out test)에 주로 사용되는 단면크기를 가정하였으며, 콘크리트 압축강도(f'_c)는 20~60 MPa, 철근 직경(d_b)은 10~41 mm 범위를 고려하였다. 철근직경을 선택하면 콘크리트 피복두께(C_x) 결정되며, 해석에 고려된 C_x/d_b 는 1.3~7.0이다. 또한, 최대 40%의 부식률(ω_{corr})까지 해석을 수행하였다. 이 때 ω_{corr} 는 철근의 질량손실률($= (m_1 - m_0)/m_0$), 여기서 m_1 = 부식된 철근의 질량, m_0 = 부식되지 않은 철근의 질량)을 의미한다

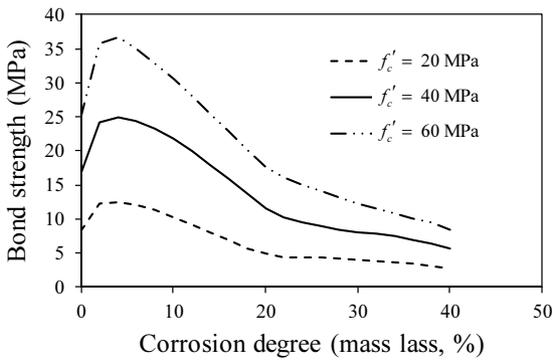
Fig. 3에는 주요 변수별 부착강도 해석결과를 나타내었다. 전반적으로 부식 초기에는 철근의 팽창압력(p_{corr})에 의한 효과로 부착강도가 증가하는 경향을 보였으나, 부식률이 증가하면서 콘크리트 피복 내 균열이 전파됨에 따라 부착강도가 급격히 감소하였다. 또한, 철근 직경대비 피복두께의 비율(C_x/d_b)과 콘크리트 압축강도(f'_c)가 증가할수록 같은 부식률에서 부착강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 철근 주변 콘크리트의 구속응력이 증가하기 때문이다. 또한, C_x/d_b 가 감소할수록 부식률(ω_{corr})에 따른 부착강도 감소는 더 급격하게 발생하였다.

Table 1. Dimensions and material properties considered in parametric analysis

Cross-section	
Compressive strength of concrete (f'_c)	20, 40, 60
Diameter of reinforcing bar (d_b)	10, 16, 22, 25, 30, 35, 41
C_x/d_b	1.3 - 7.0
Corrosion degree (w_{corr})	0 - 40%



(a) Effect of C_x/d_b

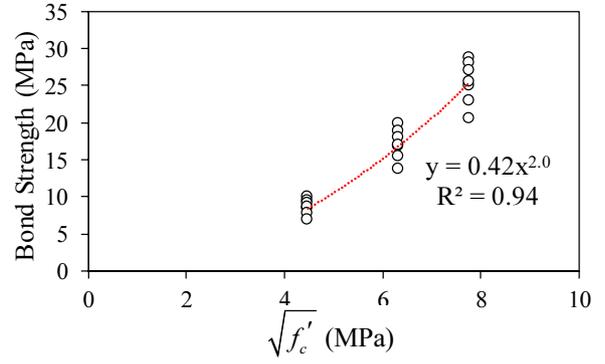


(b) Effect of f'_c

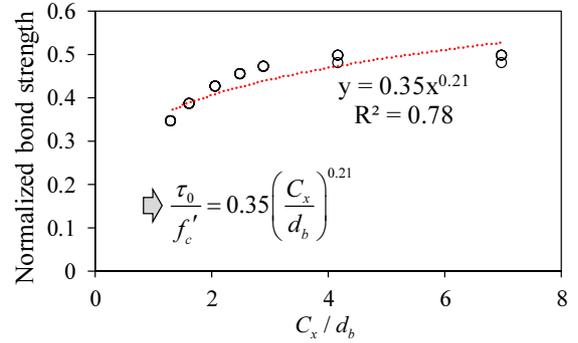
Fig. 3. Parametric analysis results

3.2 부착강도 간략화 모델

변수해석 결과를 기반으로 이 연구에서는 부식된 철근의 부착강도 간략식을 도출하였다. 다양한 형태의 회기 모델이 적용될 수 있으나, 이 연구에서는 최종적으로 좌변과 우변의 단위가 같아질 수 있도록 간략식을 도출하고자 하였으며, 이를 위하여 차원 해석을 수행하였다. Ka et al.(2018)[20]과 Tefers(1973)[21]는 철근의 부착강도가 콘크리트의 인장강도(일반적으로 $\sqrt{f'_c}$ 에 비례) 및 철근 직경 대비 콘크리트 피복두께 비(C_x/d_b)에 비례한다고 언급하였다. 따라서, 부식을 고려하지 않은 철근의 부착강도를 다음과 같이 가정하였다.



(a) Effect of f'_c



(b) Effect of C_x/d_b

Fig. 4. Regression analysis on bond strength of uncorroded reinforcing bar

$$\tau_0 = k_1 (\sqrt{f'_c})^{k_2} \left(\frac{C_x}{d_b}\right)^{k_3} \quad (14)$$

여기서, k_1, k_2, k_3 는 회기분석을 통해 결정되는 상수이다. Fig. 4에는 부식되지 않은 철근의 부착강도 해석결과를 나타내었으며, 이 결과로부터 k_1, k_2, k_3 는 각각 0.35, 2.0, 0.21로 결정되었다. 위 식은 SI 단위 이외의 단위계를 적용하더라도 상수항을 바꿀 필요가 없다는 장점이 있다.

Fig. 5에는 C_x/d_b 에 따른 부식된 철근의 부착강도를 나타내었다. 이때 그래프의 세로축은 부식된 철근의 부착강도(τ_{max})를 부식되지 않은 철근의 부착강도(τ_0)로 나누어 나타내었다. $C_x/d_b = 7.0$ 인 경우에는 부식률(w_{corr})이 10% 시점부터, $C_x/d_b = 4.0$ 인 경우에는 w_{corr} 가 5% 시점부터 부식되지 않은 철근에 비해 부착강도가 감소하기 시작하였다. 특히, C_x/d_b 가 3.0 이하인 경우, 콘크리트 구속효과가 작아 부식 초기에 부착강도가 증가하는 현상이 거의 나타나지 않았다. Fig. 5에 나타낸 해석결과를 기반으로 부식된 철근의 부착강도(τ_{max})를 아래와 같이 도출하였다.

$$\tau_{max} = \tau_0 \quad \text{when } w_{corr} \leq \omega_1 \quad (15a)$$

$$\tau_{max} = \tau_0 [1 - 0.93 \operatorname{erf}(kw_{corr})] \quad \text{when } \omega_1 < w_{corr} \quad (15b)$$

여기서, τ_0 는 식 (14)를 통해 산정한 부식되지 않은 철근의 부착강도, k 는

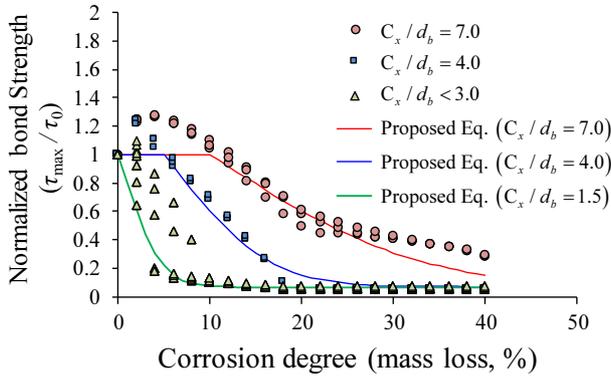


Fig. 5. Derivation of proposed equation

Table 2. Coefficients in proposed equation

	$C_x/d_b < 1.5$	$C_x/d_b = 4.0$	$C_x/d_b = 7.0$
ω_{crit}	0	5	10
k	0.20	0.08	0.04

C_x/d_b 의 크기에 따라 변화하는 상수로서 Table 2에 값을 정리하여 나타내었다. 표에 제시된 값 사이의 C_x/d_b 에 대해서는 직선보간을 통해 k 를 산정할 수 있다. 또한, $erf(x)$ 은 오차함수로서 부식률에 따른 부착강도의 변화 양상을 표현하기 위해 도입 하였으며, $erf(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 으로 정의된다.

3.3 부착강도 간략화 모델

제안 간략식을 검증하기 위하여 기존연구로부터 총 158개의 부식된 철근의 부착 실험 결과를 수집하였으며, 실험체들의 상세를 Table 3에 정리하였다. 수집된 실험체들의 콘크리트 압축강도(f'_c)는 24~52.1 MPa, 철근 직경 대비 피복두께의 비율(C_x/d_b)은 1.75~7.0 이었으며, 철근의 부식률(ω_{corr})은 최대 79.95% 이었다.

Fig. 6에는 Lee et al.(2002)[8] 및 Almusallam et al.(1996)[6]이 수행한 부착 실험 결과를 수정 두꺼운 실린더 이론에 기반한 상세해석모델과 식 (15)를 통해 평가한 결과를 비교하여 나타내었다. 전반적으로 간략식은 상세해석모델에 비해 안전측의 부착강도 산정결과를 제공하는 것으로 나타

Table 3. Collected bond test results

References	$b_1 \times b_2$ (mm)	f'_c (MPa)	d_b (mm)	C_x (mm)	C_x/d_b (mm)	ω_{corr} (%)
Al-sulaimani et al. (1990)[5]	150×150	30	10.0 - 20.0	65.0 - 70.0	3.25 - 7.00	0 - 16.73
Almusallam et al. (1996)[6]	152×254	30	12.0	63.5	5.29	0 - 79.95
Cabrera (1996)[7]	150×150	24	12.0	69.0	5.75	0 - 12.46
Lee et al. (2002)[8]	104×104	24.7 - 42.1	13.0	22.8 - 45.5	1.75 - 3.50	0 - 26.17
Fang et al. (2004)[9]	140×140	52.1	20.0	60.0	3.00	0 - 9.04
Chung et al. (2008)[10]	150×150	28.3	13.0	68.5	5.27	0 - 2.50

Notations: ω_{corr} : corrosion degree (%), C_x : net cover thickness of concrete, d_b : diameter of reinforcing bar, f'_c : compressive strength of concrete

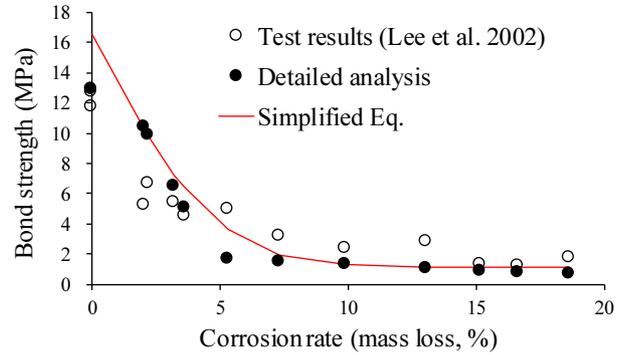
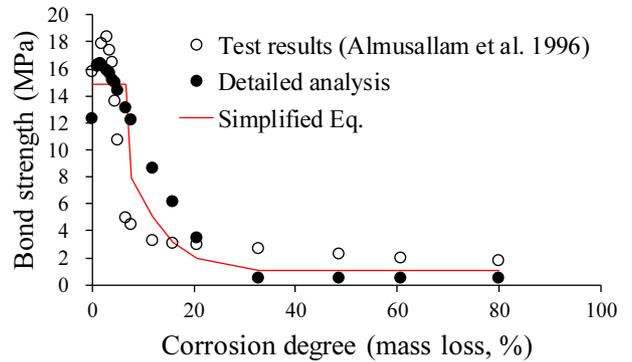
(a) $f'_c=42$ MPa, $d_b=13$ mm, $C_x=23$ mm(b) $f'_c=30$ MPa, $d_b=12$ mm, $C_x=64$ mm

Fig. 6. Verification of proposed equation

났다. 그럼에도 불구하고 해석결과의 정확도는 상세해석모델과 큰 차이를 보이지 않았으며, 부식률에 따른 부착강도 변화 양상을 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났다.

Table 4에는 기존연구자들이 제안한 부식된 철근의 부착강도 산정식을 정리하여 나타내었으며, Fig. 7에는 수집된 158개의 실험체들에 대한 부착강도 산정결과를 비교하여 나타내었다. 평가결과, 제안 간략식이 수집된 실험체들의 부착강도를 가장 근접하게 예측하는 것으로 나타났다. 식 (15)는 검증된 이론모델을 기반으로 부착강도에 영향을 미치는 주요 인자(콘크리트 압축강도, 피복두께, 철근직경)를 반영하고, 다양한 변수범위를 고려한 상세 해석을 통해 도출된 식이기 때문에 추후 부식된 RC 구조물의 구조성능 평가 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Table 4. Bond strength equations proposed by other researchers

Researcher	Bond strength equations
Maaddawy et al. (2005)[11]	$\tau_{max} = (A_1 + A_2 \frac{\omega_{corr}}{100})(0.55 + 0.25 \frac{C_x}{d_b}) \sqrt{f'_c} + 0.191 \frac{A_t f_{yt}}{s_s d_b}$
Cabrera (1996)[7]	$\tau_{max} = 23.478 - 1.313\omega_{corr}$
Bhargava et al. (2007)[12]	$\tau_0/\tau_{max} = e^{-0.117(\omega_{corr} - 1.5)} \leq 1.0$
Lee et al. (2002)[8]	$\tau_0/\tau_{max} = e^{-0.0561\omega_{corr}} \leq 1.0$
Chung et al. (2008)[10]	$\tau_0/\tau_{max} = 0.116(\omega_{corr}/100)^{-0.55} \leq 1.0$
Stanish et al. (1999)[13]	$\tau_0/\tau_{max} = 1 - 0.035\omega_{corr} \leq 1.0$
Auyeung et al. (2000)[14]	$\tau_0/\tau_{max} = e^{-0.076(\omega_{corr} - 2.4)} \leq 1.0$

Notations: ω_{corr} : corrosion degree (%), A_1 and A_2 : empirical constants depending on corrosion current density, C_x : net cover thickness of concrete, d_b : diameter of reinforcing bar, f'_c : compressive strength of concrete, A_t : area of transverse reinforcement, f_{yt} : yield strength of transverse reinforcement, s_s : spacing of stirrups

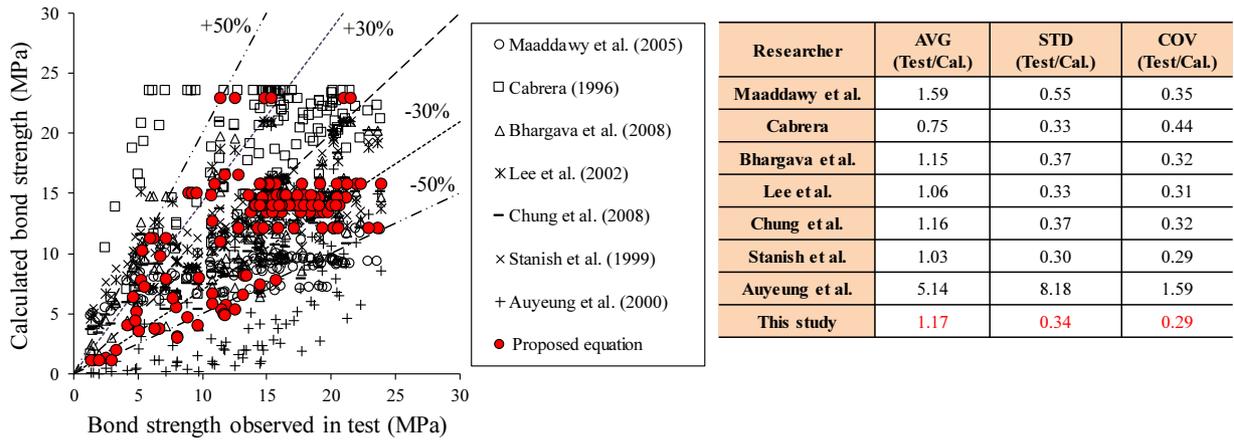


Fig. 7. Comparison of proposed equation and other models

4. 부식된 철근의 정착길이

이 연구에서는 식 (15)을 기반으로 부식이 진행됨에 따라서 철근이 항복하기 위해 요구되는 정착길이를 파악하고자 하였다. 일반적으로 RC 부재의 최대 휨모멘트 영역에서 철근이 항복하기 위해서는 정착길이(l_d) 이상의 부착길이를 확보해야 한다. 만약, 철근 표면의 부착응력이 묻힘길이에 걸쳐 일정하다고 가정한다면 요구 정착길이(l_d)는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$l_d = \frac{d_b f_y}{4\tau_{max}} \quad (16)$$

여기서, f_y 는 철근의 항복강도, τ_{max} 는 부식된 철근의 최대 부착강도이다.

최대 부착강도, τ_{max} 는 콘크리트 압축강도(f'_c), 철근 직경대비 피복두께의 비율(C_x/d_b), 에폭시 도막의 유무, 철근의 매립 위치 등 다양한 요인의 해서 영향을 받으며, KDS 14 20 52(2022)[22]에서는 인장철근의 정착길이(l_d)를 다음과 같이 규정하고 있다.

$$l_d = \frac{0.6d_b f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} (k_1 k_2 k_3) \quad (17)$$

여기서, k_1 는 철근의 직경, 순간격, 콘크리트 피복두께, 스티럽 유무를 반영하기 위한 계수로써 0.8~1.5 사이의 값을 가지며, k_2 는 철근배치 위치계수로써 상부철근의 경우 1.3, 기타 철근에 대해서는 1.0이고, k_3 는 도막계수로써 피복 두께가 3 d_b 미만 또는 순간격이 6 d_b 미만인 에폭시 도막 혹은 아연-에폭시 이중 도막 철근 또는 철선의 경우 1.5, 기타 에폭시 도막 혹은 아연-에폭시 이중 도막 철근 또는 철선의 경우 1.2, 아연도금 혹은 도막되지 않은 철근 또는 철선에 대해서는 1.0이다. λ 는 경량콘크리트의 특성을 반영하기 위한 계수이며, 보통중량콘크리트의 경우 1.0을 적용한다.

다른 한편으로, Eurocode 2(2004)[23]에서는 인장철근의 정착길이를 식 (16)과 동일한 형태로 제시하고 있다. 다만, 철근의 최대 부착강도(τ_{max})를 아래의 식을 통해 산정하도록 규정하고 있다.

$$\tau_{max} = 2.25n_1n_2f_{ctd} \quad (18)$$

여기서, n_1, n_2 는 철근의 부착조건과 철근의 직경을 반영하기 위한 계수, f_{ctd} 는 콘크리트 인장강도이다.

Fig. 8에는 이 연구의 부착강도 간략식을 기반으로 산정한 부식된 철근의 요구 정착길이와 구조기준을 통해 계산한 정착길이를 비교하여 나타내었다. 기본적으로 구조기준에서 제시하고 있는 정착길이 산정식은 안전측의 설계

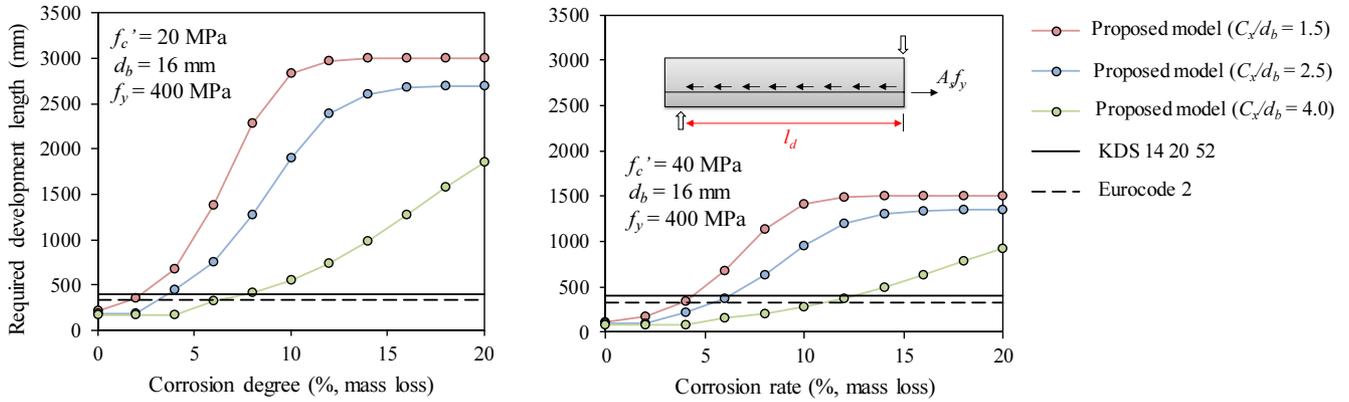


Fig. 8. Comparison of proposed equation and other models

결과를 유도할 수 있도록 제시되었기 때문에 구조기준으로 계산한 정착길이 (l_d) 이상을 확보하였다면 철근의 항복을 보장한다고 간주할 수 있다. 부식률 (ω_{corr})이 증가함에 따라 철근의 최대 부착강도(τ_{max})가 감소하기 때문에 철근의 항복을 보장하기 위한 요구 정착길이(l_d)가 증가하는 경향을 보였다. 또한, 일정 부식률 시점 이상에서는 요구 정착길이가 더 이상 증가하지 않았는데 이는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 부식이 진행됨에 따라서 철근의 부착강도가 계속 감소하는 것이 아니라 일정 부식률 이상에서는 잔류 마찰(residual friction)에 의한 부착강도가 존재하기 때문이다.

철근 직경대비 피복두께의 비율(C_x/d_b) 및 콘크리트 압축강도(f'_c)가 증가할수록 부식에 의한 요구 정착길이(l_d)는 상대적으로 느리게 증가하였다. 특히, $C_x/d_b \geq 4.0$ 인 경우에는 콘크리트 압축강도가 20 MPa로써 크게 낮더라도 약 7%의 부식률까지는 현행 구조기준에서 제시하고 있는 요구 정착길이(l_d)를 만족하는 것으로 확인되었다. 실제 RC 구조물에서 보 부재의 피복두께가 40~50 mm이고, 직경 16 mm의 철근이 사용되었다고 가정한다면 C_x/d_b 는 2.5~3.3 범위이다. 슬래브 부재의 경우, 25 mm의 피복두께와 13 mm의 철근 직경을 가정한다면 C_x/d_b 는 약 1.9에 불과하다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 C_x/d_b 가 2.5보다 작은 경우에는 콘크리트 압축강도가 40 MPa 이상으로 크더라도 약 5%의 부식률에서는 현행 구조기준에서 제시하는 요구 정착길이(l_d)가 철근이 항복하기에 부족할 수 있다. 따라서, 부식이 발생 될 수 있는 환경에 놓인 RC 구조물 설계시에는 가급적 $C_x/d_b \geq 2.5$ 으로, 심각한 부식환경에 노출된 구조물 설계시에는 $C_x/d_b \geq 4.0$ 으로 설계하는 것이 부식 시작 시점을 늦추고 부재의 급격한 강도 감소를 방지하는데 효과적일 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 기존 연구에서 검증된 수정 두꺼운 벽 실린더 모델을 활용하여 다양한 범위의 콘크리트 압축강도(f'_c), 콘크리트 피복두께(C_x), 철근 직경(d_b), 부식률(ω_{corr})을 고려한 변수해석을 수행하였으며, 해석 결과를 기반으로 간략화된 부식된 철근의 부착강도 산정식을 제시하였다. 또한, 제안식을 기반으로 철근의 부식이 진행됨에 따라 인장철근이 항복하기 위해 요구되는 정착길이를 산정하였으며, 현행 구조기준에서 제시하고 있는 정착길이 산정식과 상세히 비교 및 분석하였다. 이 연구를 통해 다음과 같은 결론을

도출할 수 있었다.

- 1) 상세 해석모델에 기반한 변수해석결과, 콘크리트 압축강도(f'_c)와 철근 직경대비 피복두께의 비율(C_x/d_b)이 증가할수록 동일한 부식률(ω_{corr})에서 철근의 부착강도는 증가하였다. 이는 f'_c 및 C_x/d_b 가 증가함에 따라 철근 주변 콘크리트의 구속응력이 증가하기 때문이다. 또한, C_x/d_b 가 감소할수록 부식률(ω_{corr})에 따른 부착강도 감소는 더 급격하게 발생하였다.
- 2) 변수해석결과를 기반으로 제안된 부식된 철근의 부착강도 간략식은 수정 두꺼운 벽 실린더 모델(상세 해석모델)에 비해 안전측의 부착강도 산정결과를 제공하였다. 그럼에도 불구하고 해석결과와 정확도는 상세해석모델과 큰 차이를 보이지 않았으며, 부식률에 따른 부착강도 변화 양상을 잘 반영하는 것으로 나타났다.
- 3) 기존연구로부터 수집된 158개의 부식된 철근의 부착실험결과를 활용하여 부착강도 간략식을 검증하였으며, 제안식은 다른 연구자들의 모델에 비해 수집된 실험체들의 부착강도를 가장 근접하게 예측하는 것으로 나타났다.
- 4) $C_x/d_b \geq 4.0$ 인 경우에는 콘크리트 압축강도가 낮더라도 약 7%의 부식률까지는 현행 구조기준에서 제시하고 있는 요구 정착길이(l_d)를 만족하는 것으로 확인되었다. 이와는 달리, C_x/d_b 가 2.5보다 작은 경우에는 콘크리트 압축강도가 40 MPa 이상으로 크더라도 약 5%의 부식률에서는 현행 구조기준에서 제시하는 요구 정착길이(l_d)가 철근이 항복하기에 부족할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 부식이 발생 될 수 있는 환경에 놓인 RC 구조물 설계시에는 가급적 $C_x/d_b \geq 2.5$ 으로, 심각한 부식환경에 노출된 구조물 설계시에는 $C_x/d_b \geq 4.0$ 으로 설계하는 것이 부식 시작 시점을 늦추고 부재의 급격한 강도 감소를 방지하는데 효과적일 것이다.

/ 감사의 글 /

제1 저자 한선진은 이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임에 감사드립니다(RS-2023-00209480). 또한, 교신저자 이득행은 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임에 감사드립니다(No. RS-2023-00209647).

/ REFERENCES /

1. Han SJ, Lee DH, Kim KS, Seo SY, Moon J, Paulo PJM, Degradation of flexural strength in reinforced concrete members caused by steel corrosion, *Constr Build Mater*, 2014;54(1):572–583.
2. Tran DVP, Sancharoen P, Klomjit P, Tangtermsirikul S, Nguyen THY, Prediction equations for corrosion rate of reinforcing steel in cement–fly ash concrete, *J Struct Integr Maint*, 2023;8(2):1–11.
3. Lakshmi A, Pandit P, Nayak G, Bhagwat Y, Kumar S, Influence of corrosion–based section loss on morphology and tensile capacity of pre–stressing strands, *J Struct Integr Maint*, 2024;9(1):91–99.
4. Oh BH, Kim KH, Jang BS, Critical corrosion amount to cause cracking of reinforced concrete structures, *ACI Mater J*, 2009; 106(4):333–339.
5. Al–Sulaimani GJ, Kaleemullah M, Basunbul IA, Rasheeduzzafar, Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members, *ACI Struct J*, 1990;87(23):220–231.
6. Almusallam AA, Al–Gahtani AS, Aziz AR, Rasheeduzzafar, Effect of reinforcement corrosion on bond strength, construction and building materials, *Constr Build Mater*, 1996 Mar;10(2):123–129.
7. Cabrera JG, Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion, *Cem Concr Compos*, 1996;18(1):47–59.
8. Lee HS, Noguchib T, Tomosawac F, Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion, *Cem Concr Res*, 2002;32(1): 1313–1318.
9. Fang C, Karin L, Chen L, Zhu C, Corrosion influence on bond in reinforced concrete, *Cem Concr Res*, 2004 Nov;34(11):2159–2167.
10. Chung L, Kim JHJ, Yi ST, Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars, *Cem Concr Compos*, 2008 Aug;30(7):603–611.
11. Maaddawy TE, Soudki K, Topper T, Analytical model to predict nonlinear flexural behavior of corroded reinforced concrete beams, *ACI Struct J*, 2005;102(4):550–559.
12. Bhargava K, Ghosh AK, Mori Y, Ramanujam S, Ramanujam S, Models for corrosion–induced bond strength degradation in re–inforced concrete, *ACI Mater J*, 2007;104(6):594–603
13. Stanish K, Hooton RD, Pantazopoulou SJ, Corrosion Effects on Bond Strength in Reinforced Concrete, *ACI Struct J*, 1999; 96(6):915–921.
14. Auyeung Y, Balaguru P, Chung L, Bond behavior of corroded reinforcement bars, *ACI Mater J*, 2000;97(2):214–220.
15. Xu YL, Experimental study of anchorage properties for deformed bars in concrete [PhD thesis], [Beijing]: Tsinghua University: c1990, 122 p.
16. Chen WF, Plasticity in reinforced concrete, New York: McGraw–Hill; c1982, 363 p.
17. Wang XH, Liu XL, Modeling bond strength of corroded reinforcement without stirrups, *Cem Concr Res*, 2004 Aug;34(8): 1331–1339.
18. Pantazopoulou SJ, Papoulia KD, Modeling cover–cracking due to reinforcement corrosion in RC structures, *Journal of Engineering Mechanics Division*, 2001;127(4):342–351.
19. Coronelli D, Corrosion cracking and bond strength modeling for corroded bars in reinforced concrete, *ACI Struct J*, 2002;99(3): 267–276.
20. Ka SB, Han SJ, Lee DH, Choi SH, Oh YH, Kim KS, Bond strength of reinforcing bars considering failure mechanism, *Eng Fail Anal*, 2018 Dec;94:327–338.
21. Tefers R, A Theory of bond applied to overlapping tensile reinforcement splices for deformed bars, Publication 73:2, Division of concrete Structures, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden; c1973.
22. Korean Design Standard, KDS 14 20 52 – Design Standard for Development and Splices in Concrete Structures, Republic of Korea; c2022.
23. European Committee for Standardization, Eurocode 2: Design of Concrete Structures Part 1–1: General Rules and Rules for Building (EM 1994–1–1: 2004), Belgium; c2004.