

부식 수준 및 균열폭에 따른 부식된 철근과 콘크리트 계면의 부착-미끄러짐 거동

조상현¹, 기성훈², 이정재³, 이창계^{4*}

Effect of Corrosion Level and Crack Width on the Bond-Slip Behavior at the Interface between Concrete and Corroded Steel Rebar

Sang-Hyeon Jo¹, Seong-Hoon Kee², Jung-Jae Yee³, Changkye Lee^{4*}

Abstract: In this paper, the effect of corrosion level and crack width on the cohesive strength-slip behavior of corroded steel rebar and concrete interface is conducted. The existing studies mainly focus on the decrease in bond strength with respect to the level of corrosion; there are, however, few studies on the decrease in cohesive strength according to the crack width of the concrete surface due to corrosion. Therefore, in this study, a series of tests for the cohesive strength, slip behavior and mass loss of the reinforcing bar is evaluated at the surface of corroded rebar and concrete. It is found that the tendency to decrease the bond strength is closely related to the crack width rather than the corrosion level. Hence, to determine the degradation performance for the bond strength-slip behavior relation, the occurrence of cracks on the concrete surface can be a suitable index.

Keywords: Corrosion, Crack, Bond strength, Slip behavior, Rebar-concrete surface

1. 서론

철근 콘크리트(RC)는 건설 분야에 사용되는 가장 대표적인 재료로 콘크리트는 압축을, 철근은 인장 및 전단에 대응한다(Choi et al., 2021). 하지만 RC 구조물은 종종 염화물의 침투, 동결융해 및 탄산화 등의 여러 요인에 의해 열화가 발생한다(Kim et al. 2020). 이러한 RC 구조물의 구조 성능에 영향을 미치는 여러 요인 중 철근과 콘크리트 계면의 접합부 일체성은 매우 중요한 인자이다. 특히 콘크리트의 탄산화 및 고농도의 염화물에 의한 철근 부식은 철근과 콘크리트 계면의 산화철의 부피를 약 2~6배로 팽창시켜 RC 구조물의 전단강도 및 휨강도를 직접적으로 감소시키고(Lee et al., 2021) 구조물의 균열을 발생시켜 결합 열화의 원인이 된다(Park and Lee, 2017). 따라서 철근의 부식은 철근과 콘크리트의 접합부 일체성에 큰 손상을 가하게 되고, 이는 구조물의 거동 및 구조적 성능 저하로 이어지게 된다(Lin et al., 2019). 또한 철근의 부식은 RC 구조물의 사용 수명 단축과 이를 보완하기 위한 유지-

보수에 따른 막대한 경제 손실 등 추가적인 영향을 미치게 된다(Du et al., 2022). 따라서 콘크리트의 내구성과 이에 따른 콘크리트와 철근의 결합강도는 여전히 중요한 주제로 부식 메커니즘의 이해, RC 구조물의 거동 모니터링 및 부식된 철근으로 인한 구조물의 거동 예측 등 다양한 연구가 진행되고 있다(Chung et al., 2008).

Chung et al.(2008)에 의하면 부식은 단면적의 손실과 콘크리트와 철근의 결합력 상실을 초래하여 최종적으로 콘크리트의 강도 저하로 이어지게 된다. 특히 인발 시험(pull-out test)을 통한 결과로 부식으로 인해 철근의 직경이 2% 이상 감소하면 철근과 콘크리트의 부착 강도 및 미끄러짐 거동 모두 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Euro Code(1990)에서는 많은 실험결과를 이용하여 철근과 콘크리트 계면의 부착-미끄러짐(bond-slip)을 모사한 모델을 제안하였다. 하지만 경년 열화에 따른 부식을 고려하지 않아, 실제 부식에 따른 철근의 거동을 모사하는 데 있어 한계가 있다. 이에 관하여 기존의 연구(Jiang et al., 2018)는 Fig. 1과 같이 부식수준에 따른 부착강도 저하에 초점을 맞추고 있으며 철근의 부식 수준에 따른 부착 강도에 관한 연구가 주로 이루어지고 있다. 또한 Choi et al.(2014)은 일정한 철근 부식 수준을 얻기 위해 급속 부식방법을 사용하였고, Bhargava et al.(2007)은 급속부식과 자연부식에 의해 열화가 발생한 부재의 부착 특성에 차이가 나타남을 제시하였다.

반면 Fig. 2에 도시한바와 같이 표면 균열폭에 따른 부착강

¹정희원, 동아대학교 ICT 융합 해양스마트시티 공학과 석사과정

²종신희원, 동아대학교 ICT 융합 해양스마트시티 공학과 교수

³정희원, 동아대학교 ICT 융합 해양스마트시티 공학과 교수

⁴정희원, 동아대학교 해양도시건설 방재연구소 연구교수

*Corresponding author: changkyelee@dau.ac.kr

University Core Research Center for Disaster-free & Safe Ocean City Construction, Dong-A University, Busan, 49315, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

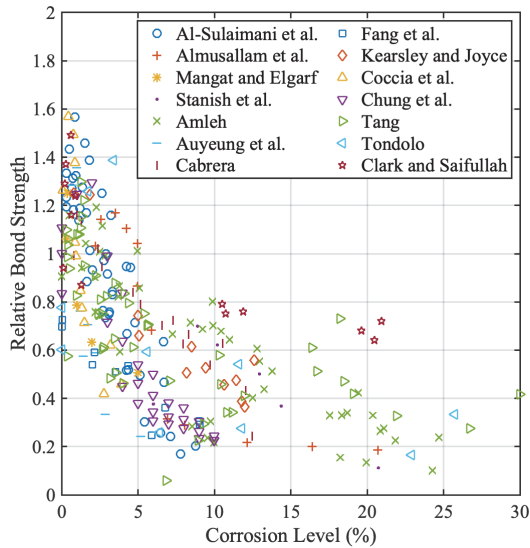


Fig. 1 References in the relation between bond strength and corrosion level

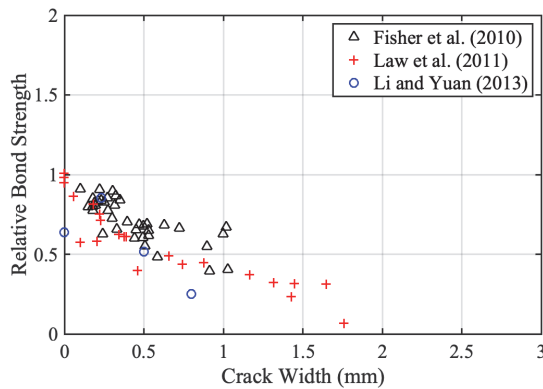


Fig. 2 References in the relation between bond strength and crack width

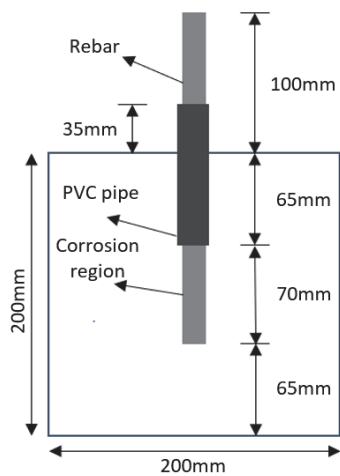


Fig. 3 Schematic design of specimen

도 저하에 관한 연구는 매우 적어 부식에 따른 콘크리트의 균열폭에 기반한 모델 개발에 관한 연구가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 직경이 서로 다른 철근의 부식 수준과 서로 다른 강도를 가지는 콘크리트 계면에서 균열폭에 의한 부착-미끄러짐(bond-slip) 거동을 실험적으로 평가하고자 한다. 또한 부식 수준 및 표면 균열폭에 따라 평가된 부식된 철근과 콘크리트 계면의 부착-미끄러짐 거동을 통하여 그 상관관계를 모사하는 모델을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 실험 개요

부착-미끄러짐 거동 실험은 실험체 제작, 급속부식 실험, 표면 균열폭 측정, 인발시험, 실제 부식을 측정과 같이 총 5단계로 나누어 진행하였다. 우선 실험체의 표면 균열폭 조건을 다르게 나타내기 위하여 목표 부식율을 설정하였다. 각 목표 부식율에 따라 4그룹으로 나누어진 실험체 중, C0(0%)는 물에서 C1(5%), C2(10%), C3(20%)는 NaCl 3% 수용액에서 각각 48시간 동안 침지시켰다. 이후 급속부식을 위해 전류측정 장치와 직류회로를 구성하고 부식량은 패러데이 법칙을 적용하여 구하였다. 또한 전하량 보존법칙을 근거로 목표 부식량에 도달하게 하였다. 목표 부식량에 도달한 실험체는 인발시험을 진행하였으며, 이후 매입되어 있던 철근의 질량 손실을 통하여 실제 부식율을 측정하였다.

2.2 실험체 준비

이 연구에서 사용한 실험체는 Fig. 3에서 도시한 바와 같이 한 변의 길이가 200mm인 정육면체 콘크리트 중심에 철근을 부분 매입한 형태이다. 실험체 제작에 사용된 콘크리트는 Table 1과 같이 설계기준강도가 각각 18, 24 및 40MPa인 레디믹스트콘크리트이며, 직경이 D19와 D22인 철근을 사용하였다. 콘크리트에 직접 매입된 철근의 길이는 70mm가 되도록 계획하였다. 철근의 중간부 100mm는 에폭시 코팅 후 테프론 테이프로 2중 코팅 후 길이 100mm의 PVC관을 끼워 3중 방수층을 구성하여, 철근 부식이 최대한 억제되도록 유도하였다.

Table 1 Design of concrete mix

MIX	Design strength [MPa]	w/c ratio	Unit weight [kg/m ³]				
			Water	Cement	Gravel	Sand	Admixtures
1	18	0.585	168	287	898	957	2.58
2	24	0.507	170	335	956	870	2.5
3	40	0.346	166	480	993	720	4.32

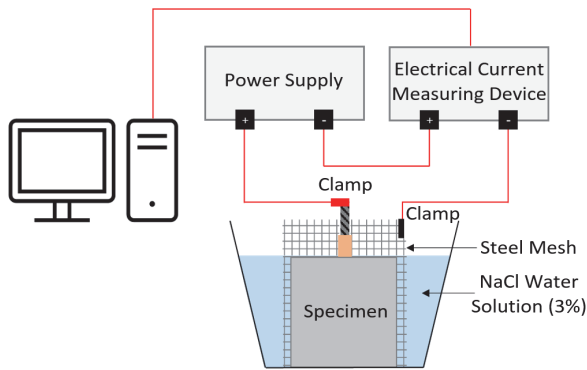


Fig. 4 Rapid corrosion measurement and monitoring

거푸집은 두께 20mm의 거푸집 제작용 목재 패널을 이용하였으며, 콘크리트 타설을 위하여 한 면이 개방된 상자 형태로 제작하였다. 거푸집 상자의 한 쪽 면의 중심에 철근이 삽입된 PVC 관의 외경과 동일한 원을 천공하였고, PVC관의 35mm 만큼 바깥쪽으로 돌출되도록 거푸집 상자에 고정하였다. 이때, 콘크리트 타설 시 철근의 위치 고정을 위하여 콘크리트는 철근이 가로로 놓혀 있는 상태에서 타설하였다.

2.3 급속부식 실험

실제 철근콘크리트 구조물에서 철근의 부식진행 속도는 매우 느리기 때문에 본 연구에서는 효율성을 위해 급속부식 기술을 사용하였다. 이를 위하여 패러데이 법칙(Faraday's law)을 통해 목표 부식량을 설정할 수 있는 전류인가법을 활용하였다. 또한 전압 분배 법칙에 의해 직렬회로에서는 전압강하가 발생하므로 정전류방식이 아닌 정전압방식으로 전류를 인가하였다.

실험체의 급속부식세팅은 Fig. 4와 같이 3% NaCl 수용액에 철근이 삽입된 콘크리트 실험체를 침지시키고 전원공급장치의 (+)극에는 철근을 (-)극에는 Sus304망을 연결하는 방식으로 전류측정장치와 직렬회로를 구성하였다. 전하량 보존법칙을 근거로 전류측정장치의 전류를 모니터링하여 총 전하량을 구하였다. 이때 철근이 목표 부식량에 도달하면 급속부식 실험이 중지하도록 구성하였다. 예측 부식율은 Table 2과 같이

Table 2 Charge of corrosion level

Corrosion level [%]	Charge [C]	
	D19	D22
0	0	0
5	27287	36869
10	54575	73738
20	109149	147475

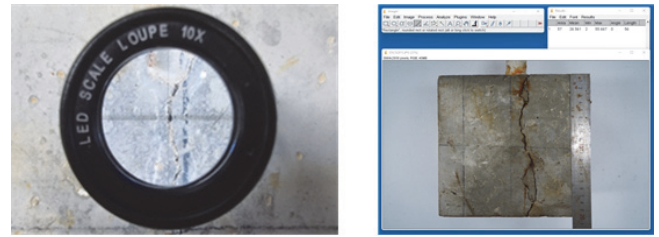


Fig. 5 Crack viewer and image processing

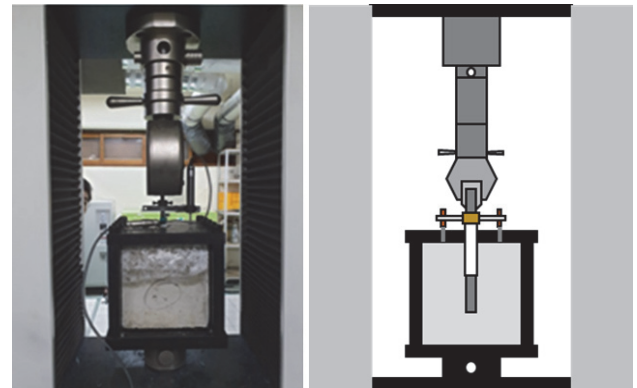


Fig. 6 Pull-out test device for measuring bond strength and slip

다음 식 (1)에 의해 도출된 부식량을 이용하였다.

$$W = \frac{I \times t \times M}{n \times F} \quad (1)$$

여기서, W 는 부식량(g), t 는 전류(C/s), M 은 Fe 분자량 (55.847g/mol), n 은 이온가 2이며 F 는 패러데이 상수 (96500C/mol)를 나타낸다.

2.4 표면 균열폭 측정

2.3절에서 기술한 바와 같이 본 연구에서는 철근을 급속 부식을 진행하였다. 철근의 부식에 의해 각각의 콘크리트 실험체에 균열이 발생하였고, 발생한 균열 측정을 위하여 Fig. 5와 같이 크랙뷰어 및 이미지프로세싱 프로그램을 사용하였다. 크랙뷰어를 통한 1차 측정 후, 이미지 프로세싱을 통하여 균열폭의 화소 치수와 기준 측정 화소 치수(1mm)의 비율을 통하여 mm단위의 균열폭을 측정하였다.

2.5 인발시험

부착강도는 ASTM C 234(Standard Test Method for Comparing Concrete on the basis of the Bond Developed with Reinforced Steel)의 인발시험 방법에 근거하여 측정하였다. Fig. 6과 같이 미끄러짐 양 측정을 위해 인발철근을 고정시킨 후 철근을 만

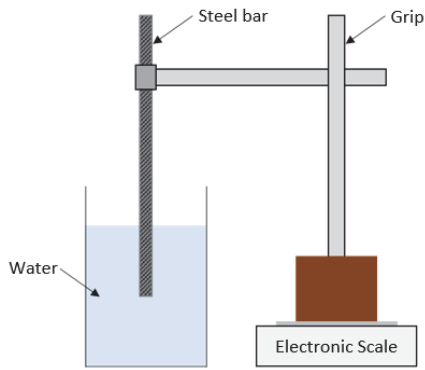


Fig. 7 Measurement method for corrosion rate

능시험기를 사용하여 잡아당겼다. 콘크리트와 철근 사이의 미끄러짐 양은 변위측정계(LVDT)로 측정하였으며, 하중 및 미끄러짐 양은 데이터로거를 사용하여 기록하였다. 여기서 부착강도는 기록된 하중을 식 (2)에 대입하여 계산하였다. 미끄러짐 양은 인발시험 시 매입 철근이 빠진 길이와 가해진 하중으로 인해 늘어난 철근의 길이를 포함하는 것으로 변위측정계가 나타내는 변위값이다.

$$\sigma = \frac{P}{\pi dl} \quad (2)$$

Table 3 List of Specimen 1 (D19)

		D19						
		Corrosion level (%)		Bond strength (MPa)		Bond slip (mm)		
		Target	Real	τ_u	τ_f	s_1	s_3	
MIX1	0	0	0	12.65	5.06	0.99	9.79	
		0	0	15.32	6.13	1.02	3.08	
		0	0	12.36	4.94	1.56	12.16	
	5	3.88	0.24	13.13	5.25	0.85	5.67	
		2.10	0.39	7.77	3.11	0.26	3.27	
		5.56	0.23	12.04	4.82	0.40	2.96	
	10	8.65	0.83	4.67	1.87	0.46	0.82	
		9.32	1.44	3.44	1.38	0.38	0.85	
		7.77	0.86	4.49	1.79	0.12	0.48	
	20	12.98	1.54	2.34	0.94	0.48	2.26	
		10.35	1.93	1.31	0.52	0.13	3.41	
		0	0	15.63	6.25	1.23	8.82	
MIX2	0	0	0	17.15	6.86	1.63	10.00	
		0	0	16.67	6.67	1.23	4.15	
		3.94	0.23	7.06	2.82	0.07	0.77	
	5	6.13	0.28	10.92	4.37	0.36	13.74	
		6.12	0.37	9.16	3.66	0.17	1.97	
		8.34	2.02	1.68	0.67	0.37	1.80	
	10	6.78	0.71	2.86	1.14	0.40	2.42	
		9.21	1.35	4.84	1.93	0.40	2.28	
		20	17.26	0.92	4.83	1.93	0.29	0.97
	MIX3	0	0	0	21.67	8.67	1.40	15.32
			0	0	23.22	9.29	1.28	12.46
			0	0	19.14	7.66	0.73	3.34
5		3.82	0.43	20.96	8.38	0.49	36.51	
		4.14	0.26	11.33	4.53	0.17	2.04	
		3.87	0.46	19.19	7.68	0.13	4.36	
10		5.62	0.36	16.50	6.60	0.20	5.38	
		5.63	0.60	7.08	2.83	0.58	1.58	
		10.91	1.46	5.25	2.10	0.31	2.62	
20		17.24	4.26	3.64	1.46	0.20	1.77	
		18.09	1.32	5.52	2.21	0.26	2.39	

Table 4 List of Specimen 2 (D22)

		D22						
		Corrosion level (%)		Bond strength (MPa)		Bond slip (mm)		
		Target	Real	τ_u	τ_f	s_1	s_3	
MIX1	0	0	0	12.66	5.06	0.71	3.11	
		0	0	10.34	4.14	1.11	9.05	
		0	0	11.60	4.64	1.27	7.81	
	5	5.60	0.60	4.32	1.73	0.10	1.22	
		5.12	0.57	5.35	2.14	0.38	1.22	
		5.52	0.88	4.17	1.67	0.86	2.39	
	10	5.79	0.82	5.37	2.15	0.50	0.94	
		10.66	1.67	2.37	0.95	0.15	2.03	
		10.15	1.02	5.57	2.23	0.27	0.89	
	20	16.56	2.61	1.04	0.42	0.10	2.01	
		13.69	2.13	2.46	0.98	0.84	7.61	
		0	0	17.75	7.10	1.23	6.15	
MIX2	0	0	0	15.66	6.26	0.72	3.97	
		0	0	14.80	5.92	1.21	4.08	
		3.10	0.48	13.95	5.58	1.07	6.05	
	5	2.91	0.45	17.30	6.92	1.01	3.68	
		5.49	0.93	6.06	2.43	0.29	2.16	
		11.86	1.69	3.28	1.31	0.43	1.61	
	10	8.05	1.56	3.61	1.44	0.63	2.16	
		13.40	2.03	2.48	0.99	0.15	1.61	
		9.72	1.72	4.77	1.91	0.08	1.48	
	20	12.39	1.88	4.78	1.91	0.98	3.51	
		12.22	1.92	2.25	0.90	0.45	5.84	
		0	0	20.68	8.27	1.71	6.35	
MIX3	0	0	0	18.47	7.39	0.59	19.48	
		5	3.89	0.61	17.93	7.17	0.32	5.91
		7.26	1.01	4.70	1.88	0.29	1.32	
	10	9.76	1.52	4.39	1.76	0.46	1.33	
		6.27	0.99	3.50	1.40	0.13	1.55	
		11.26	1.75	1.54	0.62	0.62	6.80	
	20	12.89	2.11	2.50	1.00	0.41	1.84	

여기서, σ 는 부착강도(MPa), P 는 하중(N), d 는 철근공칭지름(mm) 그리고 l 은 철근매입길이(mm)를 나타낸다.

2.6 실제 부식율 측정

부식율 측정은 Fig. 7과 같이 물의 부력을 이용해 물을 부식 부분까지 채운 후 감량된 무게를 측정하였다. 이때 추출된 철근은 샌드블라스트(Sandblast)를 이용하여 표면의 부식생성물 및 콘크리트 잔여물을 1차 제거 후, ASTM G1 기준에 따라 화학적으로 부식생성물을 2차 제거하여 부식율을 측정하였다.

각각의 실험체의 콘크리트 배합강도, 설계 부식수준 및 실제 부식율 및 접착강도와 미끄러짐 양은 다음 Tables 3과 4에 각각 명시하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 파괴메카니즘

본 연구에서 각 변수에 따른 인발시험 파괴양상을 피복콘크리트의 파괴여부 및 부착계면 파괴여부의 기준으로 분류하여 Table 5와 같이 3가지의 파괴 양상으로 제시하였다. 우선 철근의 부식수준이 0%일 때 나타나는 양상으로 피복부 콘크리트가 파괴되지 않고 철근과 콘크리트의 부착계면이 파괴되었다(Fig. 8). 철근이 부식되었을 때 다음 2가지의 파괴양상이 관찰되었다. 우선 피복부 콘크리트 및 부착계면 모두가 파괴되는 현상(Fig. 9)이 나타났고, 마지막으로 부착계면의 파괴가 발생하기 전에 피복부 콘크리트가 파괴되는 양상(Fig. 10)이 나타났다. 즉 Figs. 8과 9에서 나타나듯이 철근-콘크리트 부착계면이 파괴되어 매끈한 형태가 관찰되었고 Fig. 10에서는 피복부 콘크리트의 파괴가 선행되어 부착계면에 이형철근의 리브 형태 또한 관찰이 가능하였다.

이러한 결과는 부식생성물로 인한 피복부 콘크리트 균열 정도에 따른 결과로 피복부 콘크리트의 균열여부에 따라 파괴양상이 변화하는 것으로 판단된다. 특히 급속부식된 실험체의 경우 피복 콘크리트에 균열이 발생하였다. 균열이 발생한 실험체의 경우, 대부분이 인발시험 결과에서 피복부 콘크리트가 파괴되는 결과(Type 2 및 3)를 보였다. 또한 균열로 인해 피복부 콘크리트가 빠르게 파괴되며 부착계면의 파괴가 발생하지 않는 결과(Type 3)도 나타남을 알 수 있었다.

Table 5 Damage pattern classification

	Type1	Type2	Type3
Cover concrete	undamaged	damaged	damaged
Bonding interface	damaged	damaged	undamaged



Fig. 8 Bond-slip destruction pattern: Type 1



Fig. 9 Bond-slip destruction pattern: Type 2

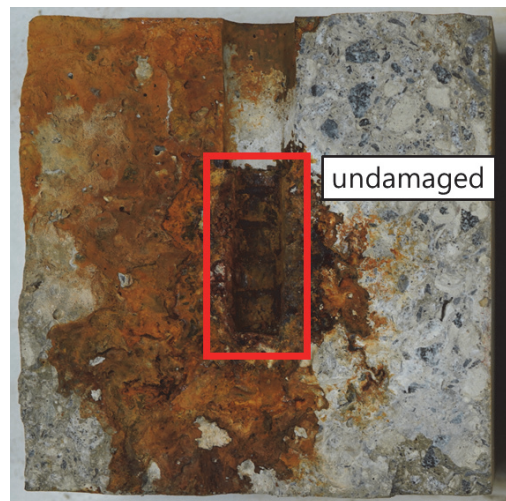


Fig. 10 Bond-slip destruction pattern: Type 3

3.2 콘크리트 강도와 부착강도의 관계

Tables 6과 7에서 각각 철근의 직경 D19인 실험체 1과 D22인 실험체 2의 부식수준에 따른 콘크리트 강도와 부착강도의 실험 결과 값을 제시하였다. 부식율이 0%일 때 실험체 1과 실험체 2의 콘크리트 강도 MIX 1에 따른 부착강도는 약 12MPa로 측정되었으며, MIX2 경우 다소 차이는 있으나 평균적으로 약 16MPa로 나타났다. MIX3의 경우 실험체 1은 최대 23.22MPa이 측정되었고 실험체 2는 최대 20.68MPa로 나타났다. 또한 MIX2의 경우 다소 차이는 있으나 평균 각각 15.62와 14.80MPa이며, MIX3은 각각 19.14와 18.46MPa로 콘크리트 강도가 높을수록 부착강도 또한 증가함을 알 수 있었다.

철근의 부식율이 0%에서 약 17% 증가할 때 실험체 1의 부착강도는 MIX1의 경우 12.65MPa에서 2.33MPa, MIX2는 16.67MPa에서 4.83MPa 그리고 MIX3는 23.22MPa에서

Table 6 Bond strength of Specimen 1 with respect to corrosion level: MIX1, MIX2 and MIX3

D19					
MIX1		MIX2		MIX3	
Corrosion level [%]	Bond strength [MPa]	Corrosion level [%]	Bond strength [MPa]	Corrosion level [%]	Bond strength [MPa]
0	12.65	0	16.67	0	23.22
0	12.36	0	15.63	0	21.67
2.10	7.77	3.94	7.06	3.82	20.96
6.10	3.44	6.12	9.16	3.87	19.19
7.77	4.49	6.78	2.86	4.14	11.33
8.65	4.67	8.34	1.68	5.62	7.08
10.35	1.31	9.21	4.84	10.91	5.25
12.98	2.33	17.26	4.83	17.24	3.64

Table 7 Bond strength of Specimen 2 with respect to corrosion level: MIX1, MIX2 and MIX3

D22					
MIX1		MIX2		MIX3	
Corrosion level [%]	Bond strength [MPa]	Corrosion level [%]	Bond strength [MPa]	Corrosion level [%]	Bond strength [MPa]
0	12.66	0	17.75	0	20.68
0	11.60	0	15.66	0	18.47
5.12	5.35	3.10	13.95	3.89	17.93
5.52	4.17	5.49	6.06	6.27	3.50
5.60	4.32	8.05	3.61	7.26	4.70
7.66	2.37	11.86	3.28	7.76	4.37
13.69	2.46	12.22	2.25	11.26	1.54
16.56	1.04	13.40	2.48	12.89	2.50

3.64MPa로 각각 약 82%, 71% 및 84%가 감소하였다. 실험체 2에서도 부식율이 증가할수록 부착강도는 급격하게 감소함이 나타났다. MIX1의 경우 12.65MPa가 약 82% 감소된 2.33MPa가 측정되었고, MIX2는 약 71% 감소한 4.83MPa 마지막으로 MIX3에서는 23.22MPa에서 3.64MPa로 약 84%의 부착강도 저하가 측정되었다. 이러한 부착강도의 저하는 부식생성물 발생으로 균열 등으로 인해 피복부 콘크리트가 손상되고 철근의 단면 또한 손실되어 부착강도가 감소한 것으로 판단된다.

3.3 균열폭 및 부식수준에 따른 영향

Figs. 11 및 12는 균열폭에 따른 최대 부착강도 및 최대 부착강도에서의 미끄러짐 거동 성능저하를 도식화한 그래프이며, Figs. 13과 14에서는 부식수준에 따른 부착강도 및 미끄러짐

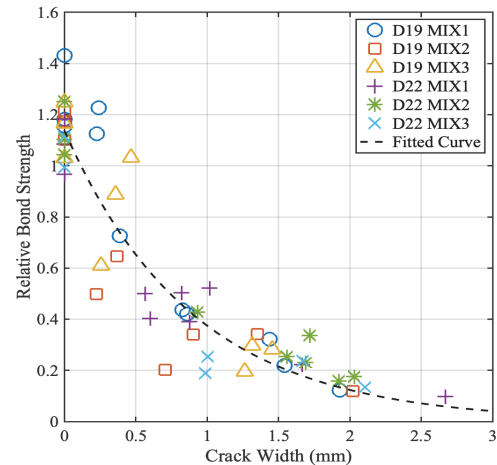


Fig. 11 The decrease of bond strength tendency with respect to crack widths

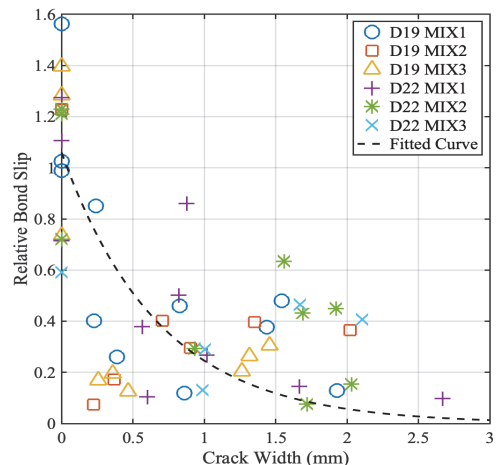


Fig. 12 The decrease of bond slip tendency with respect to crack widths

거동 성능저하를 도식화하였다. 여기서 각 Y축의 **Relative Bond Strength** 및 **Relative Bond Slip**은 각각의 부착강도 및 미끄러짐 거동에 대해 균열 및 부식 발생 전의 부착강도 및 미끄러짐 거동을 나눠준 값이다. 철근의 직경이 D19 및 D22인 두 실험체 모두 균열폭에 따른 부착강도 감소경향은 Fig. 11에서 알 수 있듯이 피복 콘크리트 강도별로 비교적 일정한 균집을 이루고 있고 균열폭이 증가하면 상대강도가 감소하는 일관적인 형태를 보여주고 있다. 하지만 Fig. 13에서 도시된바와 같이 부착강도의 저하는 나타나지만 콘크리트 강도별 균집이 균열폭에 비해 크고 넓게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 경향은 피복 콘크리트 강도에 따른 급속부식의 부식생성물의 종류가 다르게 나타나 부식생성물의 부피차이로 인한 결과인 것으로 판단된다.

또한 Figs. 12와 14에서 알 수 있듯이 균열폭 및 부식수준에

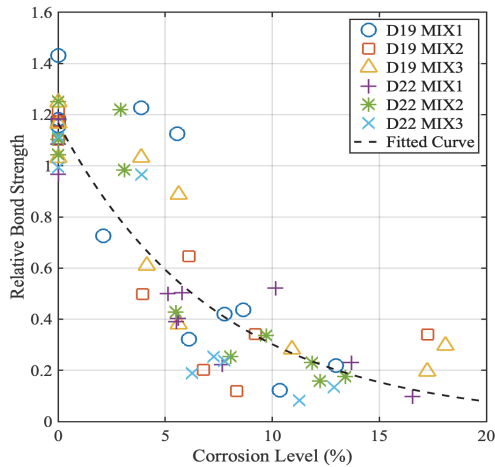


Fig. 13 The decrease of bond strength tendency with respect to corrosion levels

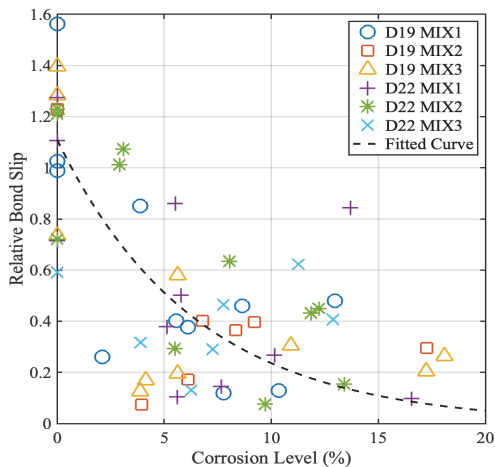


Fig. 14 The decrease of bond slip tendency with respect to corrosion levels

따른 미끄러짐 거동 감소경향은 각각의 실험결과 값이 추세선에서 다소 벗어나 있고, 부착강도 감소경향에 비해 다소 일관적이지 못한 경향을 나타내었다. 이는 부식으로 인한 피복 콘크리트 열화로 인하여 콘크리트-철근 접합면의 파괴 보다 피복 콘크리트 파괴가 조기 진행되어 취성파괴의 형태로 나타난 결과로 판단된다.

3.4 부착강도-미끄러짐 거동 모델 제시

본 절에서는 Euro Code에서 제시하는 모델(균열폭 0mm 및 부식을 0%)과 실험결과와의 부착-미끄러짐 거동을 비교·분석하였다. Figs. 15와 16에서 도시한바와 같이 앞선 일련의 실험을 통하여 부식 및 균열이 발생한 경우 부착강도 및 미끄러짐 거동이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 현재 Euro Code에서 제시하는 모델이 부식된 철근과 콘크리트 간의 부착-미끄

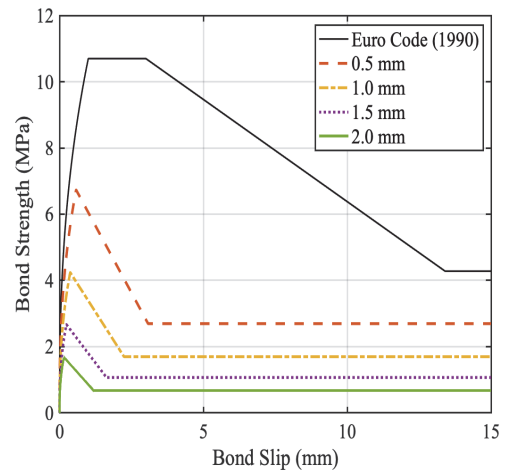


Fig. 15 The comprehensive comparison between Euro Code and bond strength decrease with respect to crack widths

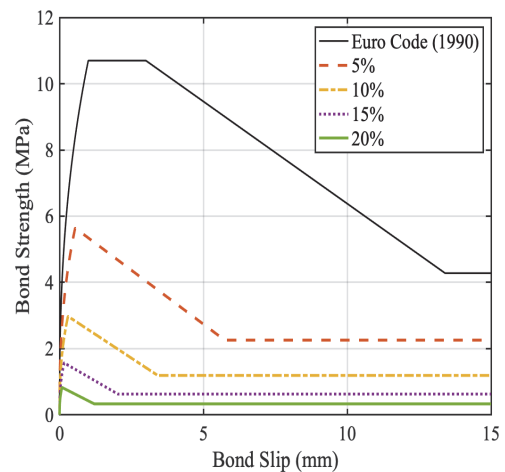


Fig. 16 The comprehensive comparison between Euro Code and bond strength decrease with respect to corrosion levels

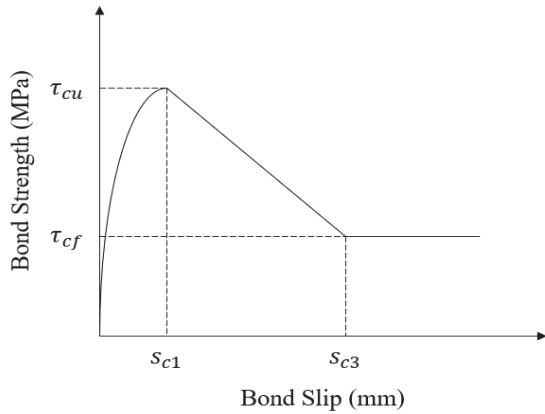


Fig. 17 Bond strength-slip relation of the proposed model

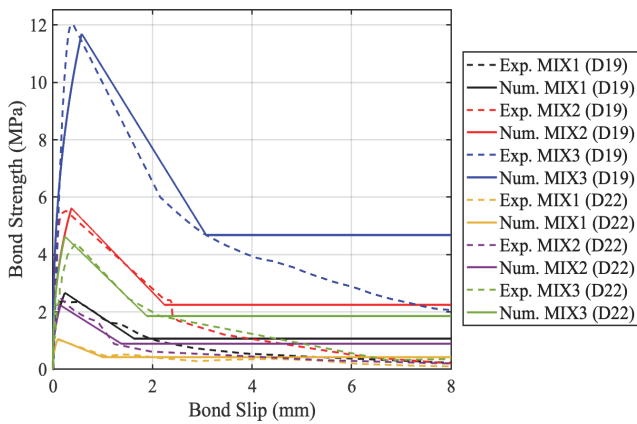


Fig. 18 Numerical model vs the experimental results for crack width: (1) D19: MIX1 (1.54mm), MIX2 (0.92mm) and MIX3 (0.46mm) and (2) D22: MIX1 (2.61mm), MIX2 (2.03mm) and MIX3 (1.52mm)

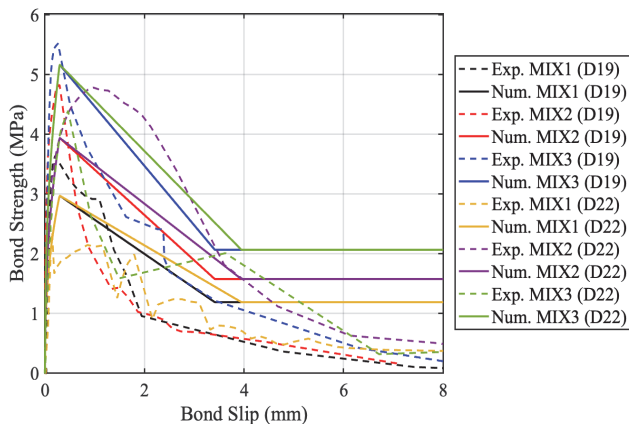


Fig. 19 Numerical model vs the experimental results for corrosion level: (1) D19: MIX1 (9.32%), MIX2 (9.21%) and MIX3 (10.91%) and (2) D22: MIX1 (10.66%), MIX2 (9.72%) and MIX3 (9.76%)

러짐 거동을 효과적으로 모사하지 못함을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 실험값으로 측정된 부착강도 및 미끄러짐 거동을 바탕으로 부착강도-미끄러짐의 상관관계를 모사하는 모델을 다음 식 (3)으로 제시하였다.

$$\tau = \begin{cases} \tau_{cu} (s/s_{c1})^{0.4}, & (0 < s \leq s_{c1}) \\ \tau_{cu} - (\tau_{cu} - \tau_{cf})(s - s_{c1}) / (s_{c3} - s_{c1}), & (s_{c1} < s \leq s_{c3}) \\ \tau_{cf}, & (s_{c3} < s) \end{cases} \quad (3)$$

여기서, 부식수준에 따른 최대부착강도(MPa)는 $\tau_{cu} = e^{-0.123x} \tau_u$ 이고 균열폭에 따른 최대부착강도(MPa)는 $\tau_{cu} = e^{-0.948x} \tau_u$ 으로 도출하였다. 또한 부식수준 및 균열폭에 따른 뿔힘과괴 시 부착강도는 $\tau_{cf} = 0.4 \tau_{cu}$ 으로 계산하였다. 여기서 최대부착강도 τ_u 와 뿔힘과괴 시 부착강도 τ_f 는 각각 $\tau_u = 2.5 \sqrt{f_{ck}}$ 와 $\tau_f = 0.4 \tau_u$ 으로 계산된다. s_{c1} 은 τ_{cu} 에 해당하는 미끄러짐 거동(mm)이며 s_{c3} 는 τ_{cf} 에 해당하는 미끄러짐 거동(mm)이다. 부식수준에 따른 각각의 s_{c1} 및 s_{c3} 는 $s_{c1} = e^{-0.118x} s_1$ 과 $s_{c3} = 0.338 e^{-0.083x} s_3$ 으로 계산되고, 균열폭을 고려할시 $s_{c1} = e^{-0.904x} s_1$ 와 $s_{c3} = 0.316 e^{-0.617x} s_3$ 으로 계산된다. 또한 s_1 은 τ_u 에 해당하는 미끄러짐 거동(mm) 이고 s_3 는 τ_f 에 해당하는 미끄러짐 거동(mm)이다. 식 (3)에서 제시한 부식수준 및 균열에 따른 최대부착강도 및 뿔힘과괴 시 부착강도와 그에 따른 미끄러짐 양을 Fig. 17에 도시하였다.

Figs. 18과 19에서는 실험 결과와 앞서 제안한 식 (3)의 부착-미끄러짐 거동을 비교하여 도식화하였다. Fig. 18은 실험체 1(D19) 및 실험체 2(D22)에서 콘크리트 강도 MIX1~MIX3 일 때 측정된 균열폭을 식 (3)에 대입한 결과이다. 균열폭은 D19 일 때 0.46 mm, 0.92 mm 및 1.54 mm이고, D22에서는 MIX1 은 1.52 mm, MIX2는 2.03 mm 그리고 MIX3은 2.61 mm로 측정되었다. D19인 경우, 인발실험 시작 후 최대부착강도 및 파괴가 발생하여 뿔힘이 시작되어 완료되기 전까지의 구간인 MIX1(0~1.6 mm), MIX2(0~2.2 mm) 그리고 MIX3(0~3.1 mm)일 때 제시한 모델이 최대부착 강도 및 실험결과의 변위-강도 곡선을 유사하게 모사함을 알 수 있었다. 특히 철근의 직경이 증가한 실험체 2의 경우 Fig. 18에서도 알 수 있듯이 최대 부착 강도 및 뿔힘과괴시 강도를 거의 유사하게 계산이 되었

Table 8 Relative errors in bond strength with respect to crack width and corrosion level

		MIX1	MIX2	MIX3
Crack width	D19	0.4232	0.3541	0.2839
	D22	1.0037	0.4011	0.4634
Corrosion level	D19	1.6495	0.8259	1.0176
	D22	1.0628	0.6221	1.5048

을 뿐만 아니라 그 거동도 훌륭히 모사함을 알 수 있다. 이에 반해 Fig. 19에 도시된 바와 같이 실험체 1은 유사한 부식수준에서 MIX1~MIX3의 부착-미끄러짐 거동이 유사하게 나타났지만, 실험체 2의 경우 일정한 패턴이 발견되지 않았다. 또한 실험결과와 본 연구에서 제안한 모델의 결과는 균열폭을 고려한 결과와 비교하였을 때 그 오차가 매우 큼을 알 수 있었다. 이러한 결과는 부식환경에 따른 부식 생성물의 부피 차이로 인해 열화가 다르게 발생하여 각 실험체마다 편차가 발생했다고 판단된다. Table 8에 실험결과 대비 제시한 모델의 부착강도 상대오차 값을 제시하였다.

4. 결론

본 연구에서는 철근 부식에 따른 철근콘크리트 계면의 부착-미끄러짐 현상의 상관관계를 일련의 실험을 통하여 분석하였고, 이를 바탕으로 부식된 철근과 콘크리트의 부착-미끄러짐 거동을 모사하는 새로운 모델을 제시하였다.

이를 위하여 서로 다른 직경의 철근 2개와 각각 서로 다른 3가지의 콘크리트 배합을 가지는 실험체에 철근을 급속부식 시킨 후 인발시험을 수행하였다. 일련의 실험을 통하여 균열이 발생하지 않고 철근-콘크리트 계면이 파괴된 양상, 균열이 발생하고 계면이 파괴된 양상 마지막으로 계면이 파괴되기 전 균열에 의하여 콘크리트가 선행 파괴된 취성 파괴 양상이 관찰 되었다.

또한 철근과 콘크리트 계면간의 부착-미끄러짐 거동은 철근의 부식수준이 중요하게 작용하지만 균열폭도 일정한 영향을 미침을 알 수 있었다. 이는 부식수준 및 균열폭이 향후 연구의 중요한 지표로 사용될 수 있다고 판단된다. 마지막으로 본 연구에서 균열폭 및 부식수준을 고려한 강도-미끄러짐을 모사하는 수치 모델을 제시하였다. 제시한 수치 모델과 균열폭 및 부식수준을 고려한 실제 실험결과를 비교하여 수치 모델의 정확성을 비교하였다. 제시한 모델은 향후 부식된 철근과 콘크리트의 부착-미끄러짐 거동의 수치해석에 벤치마크로 사용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 건설교통기술 촉진연구과제의 지원으로 수행된 연구입니다(Grant 21CTAP-C163815-01).

References

1. Choi, S. Y., Choi, M. S., Kim, I. S., and Yang, E. I. (2021), A study on the evaluation method to flexural-bonding behavior of FRP-rebar concrete member, *Journal of the Korea Institute for*

Structural Maintenance and Inspection, KSMI, 25(5), 149-156 (in Korean).

2. Kim, K., S., Park, K. T., and Kim, J. (2020), Evaluating chloride absorption of reinforced concrete structures with crack widths, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 24(6), 10-16 (in Korean).

3. Lee, S. H., Lee, S. G., Lee, H., and Hong, K. J. (2021), Seismic-performance experiments of circular shear piers considering effects of rebar corrosion, lap slice and axial load, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 25(6), 143-153 (in Korean).

4. Park, J. H., and Lee, H. S. (2017), An experimental study of the corrosion behavior evaluation of rebar in concrete by using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) method, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 21(1), 83-90 (in Korean).

5. Lin, H., Zhao, Y., Feng, P., Ye, H., Ozbolt, J., Jiang, C., and Yang, J.-Q. (2019), State-of-the-art review on the bond properties of corroded reinforcing steel bar, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 213, 216-233.

6. Du, R., Jang, I., Lee, H., and Yi, C. (2022), Effect of curing solution and pre-rust process on rebar corrosion in the cement composite, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 26(2), 1-8 (in Korean).

7. Chung, L., Najm, H., & Balaguru, P. (2008), Flexural behavior of concrete slabs with corroded bars, *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 30(3), 184-193.

8. Euro-International Committee for Concrete (1990), CEB-FIP Model Code 1990, British Standard Institution, London, UK.

9. Jiang, C., Wu, Y.-F., and Dai, M.-J. (2018), Degradation of steel-to-concrete bond due to corrosion, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 158, 1073-1080.

10. Choi, Y. S., Yi, S. T., Kim, M. Y., Jung, W. Y. and Yang, E. I. (2014), Effect of corrosion method of the reinforcing bar on bond characteristics in reinforced concrete specimens, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 54, 180-189.

11. Bhargava, K., Ghosh, A. K., Mori, Y., and Ramanujam, S. (2007), Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete - Analytical and empirical models, *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier, 237(11), 1140-1157.

12. Fischer, C., Ozbolt, J., and Gehlen, C. (2010), Numerical investigation on bond behavior of corroded reinforcement, *In Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 779-785.

13. Fischer, C., (2010), Experimental investigations on the effect of corrosion on bond of deformed bars, *In Proceedings of the 8th fib PhD Symposium*.

14. Law, D. W., Tang, D., Molyneaux, T. K. C., and Gravina, R. (2011), Impact of crack width on bond: confined and unconfined rebar, *Materials and Structures*, Springer, 44, 1287-1296.

15. Li, F., and Yuan, Y. (2013), Effects of corrosion on bond behavior between steel strand and concrete, *Construction and Building Materials*, Elsevier, 38, 413-422.

Received : 11/14/2022

Revised : 01/04/2023

Accepted : 01/04/2023

요 지 : 본 논문에서는 부식된 철근과 콘크리트 계면의 부착강도-슬립거동에 있어 부식수준 및 균열폭의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 기존의 연구는 주로 부식수준에 따른 부착강도 저하에 초점을 맞추고 있으나 부식에 의한 콘크리트 표면 균열폭에 따른 부착강도 저하에 관한 연구는 매우 적다. 따라서 본 연구에서는 부식된 철근과 콘크리트 접합부의 부착강도, 슬립 거동 및 철근의 질량손실 등을 평가하고 균열폭 대비 접합성능을 확인하기 인발시험을 실시하였다. 그 결과로 표면 균열폭에 따른 접착강도 저하의 경향성이 부식수준에 따른 경향성보다 균등하게 나타났다. 따라서 부식수준에 비해 콘크리트 표면 균열 발생 여부가 부착강도-슬립거동 관계의 성능저하를 판단하기에 적합한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 부식, 균열, 부착강도, 슬립거동, 철근 콘크리트 계면
