



직선화 가공성을 고려한 코일철근의 실험적 부착강도 평가

천성철^{1)*} · 최원철²⁾ · 진종민³⁾

¹⁾목포대학교 건축공학과 ²⁾승실대학교 건축학부 ³⁾대한제강(주)

Experimental Evaluation on Bond Strengths of Reinforcing Bar in Coils with Improved Machinability during Straightening Process

Sung-Chul Chun,^{1)*} Oan-Chul Choi,²⁾ and Jong-Min Jin³⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Mokpo National University, Muan 534-729, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Soongsil University, Seoul 121-791, Korea

³⁾Daehan Steel Co., Ltd., Seoul 100-161, Korea

ABSTRACT A new deformation of reinforcing bar in coils was proposed to improve a machinability of straightening process, which has crescent-shaped transverse ribs with an inclination angle of 50 degrees, a crest width of $0.15d_b$, and a flank inclination of 55 degrees. The proposed deformation can increase contact area between a surface of re-bar and a groove of a roller during a straightening process and, therefore, it might reduce a damage of ribs, improve a final straightness, and enhance an efficiency of the straightening process. Splice tests were conducted to evaluate bond strengths of three types of re-bar in coils including the proposed re-bar, of which the inclination angles of transverse ribs were 50, 60, and 90 degrees, respectively. Test results show that the re-bars in coils have higher bond strengths than predicted strengths by equations of Orangun et al., ACI 408, and KCI by at least 10%. Correlation coefficients of bond strengths between a straight bar and re-bars in coils are 0.94 and more. Consequently, equations of the KCI code for determining development and splice lengths can be applied to the tested re-bars in coils.

Keywords : reinforcing bar in coils, bond, rib, straightening process

1. 서 론

철근은 운반 문제로 최대 18 m 주로 12 m 이하 길이의 정 치수로 사용된다. 철근 가공공장 또는 건설 현장으로 운반된 정 치수 철근은 배근도에 맞춰 필요한 길이로 절단되고, 이 과정에서 자투리 철근이 필연적으로 발생한다. 자투리 철근의 축소를 위해, 철근 배근 상세도 작성, 철근 가공 최적화 등의 다양한 노력이 시도되고 있다.^{1,2)}

코일철근(reinforcing bar in coils)은 Fig. 1과 같이 코일 형태로 생산되고 철근 가공공장에서 직선으로 펴서 사용된다. 코일철근은 자투리 철근의 손실이 거의 없기 때문에 철근 재료비가 절감되며, 공장 가공에서 철근 인입을 위한 운반이 획기적으로 줄기 때문에 생산성이 향상된다. 최근 철근의 공장 가공 비율이 높아지고, 재료비와 인건비 상승으로 코일철근에 대한 관심이 증가하고 있다.

코일철근을 사용하기 위해서는 Fig. 2와 같이 직선화 가공이 반드시 필요하다. 철근은 콘크리트와 일체화를 위해 마디를 가지는데, 직선화 가공에서 이 마디를 가압하므로, 마디의 형태는 철근 가공성에 큰 영향을 미친다. 더불어 가공성 향상을 위한 마디의 형태는 철근과 콘크리트 사이의 부착 성능에도 영향을 주며, 또한 직선화 가공에서 발생하는 마디의 손상 또한 부착 성능에 영향을 준다. 이 연구에서는 코일철근의 국산화를 위해 직선화 가공성이 우수하면서도 부착성능을 만족하는 마디 형태를 제안하고, 이 형상에 따른 코일철근의 부착성능을 실험적으로 검증하였다.

2. 철근 형상에 따른 기계 가공성과 부착성능

코일철근을 직선으로 펴기 위해서는 일반적으로 Fig. 2와 같이 여러 롤러 사이를 통과시키는 방법을 사용한다. 이때 롤러 홈(groove)에 철근의 외부가 많이 닿을수록 균일하게 힘을 가할 수 있어 국부적으로 작용되는 힘의 크기를 낮출 수 있다. 따라서 철근 마디의 손상을 줄일 수

*Corresponding author E-mail : sccun@mokpo.ac.kr
 Received August 23, 2012, Revised November 26, 2012,
 Accepted December 9, 2012
 ©2013 by Korea Concrete Institute

있고, 직선화 후 철근 내부의 응력 상태를 비교적 균일하게 유지하여 직선도를 높일 수 있다. 더불어 가공 기계에 요구되는 힘도 줄일 수 있으므로, 가공 기계의 수명 및 소모품의 교체 주기를 늘려 생산 비용을 낮출 수 있다.

코일철근의 마디와 리브에 요구되는 형상은 부착성능만 고려된 직선철근과 상이한데, 첫째 리브와 마디를 포함한 외부 단면은 원형에 가까워야하며, 둘째 철근 길이 방향의 단면 변화는 최소화되어야 한다. 원형 단면은 가



Fig. 1 Reinforcing bar in coils

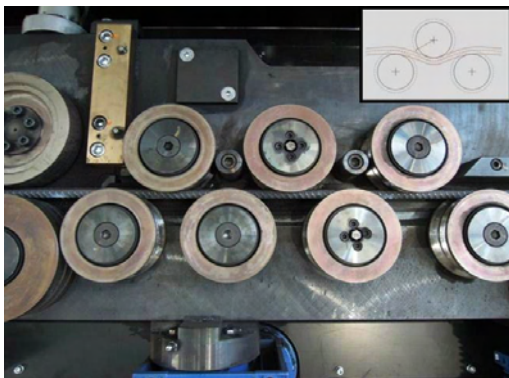


Fig. 2 Rollers for straightening bar-in-coil (courtesy of SCHNELL³⁾)

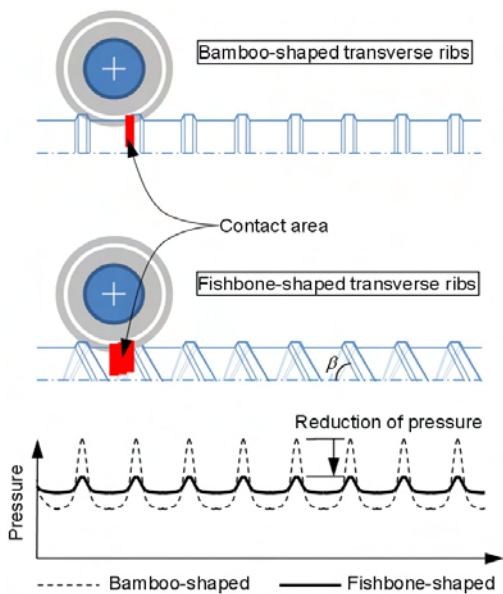


Fig. 3 Comparisons of contact areas and pressure during straightening process between bamboo-shaped and fishbone-shaped reinforcing bars

공 기계의 롤러 홈과 철근의 외부 단면 방향으로 길게 맞닿게 할 수 있다. 길이 방향의 단면 변화 최소화는 Fig. 3과 같이 길이방향으로 롤러 홈과 철근의 접촉면적을 넓게 만든다. 특히 길이 방향의 단면 변화는 철근에 작용되는 힘의 변화를 줄일 수 있어 철근 마디 손상과 직선도 향상에 유리하다. 더불어 롤러에 작용되는 힘을 균일화하여, 기계 마모도를 낮출 수 있어 유지관리비를 절감할 수 있다. 또한 진동과 소음이 줄어 작업 여건이 개선되므로 생산성을 높일 수 있다.

원형 단면을 만들기 위해서는 리브를 제거하는 것이 좋으며, 길이 방향 단면 균일화를 위해서는 Fig. 3과 같이 국내에서는 주로 사용되는 일명 대나무 마디(bamboo-shaped transverse ribs)보다 생선뼈 마디(fishbone-shaped transverse ribs)가 유리하다. 생선뼈 마디를 갖는 철근은 국내에서는 드물지만 유럽과 미국을 비롯한 국외에서는 많이 사용된다. KS,⁴⁾ ISO,⁵⁾ ASTM,⁶⁾ BS⁷⁾ 표준에서는 생선뼈 마디 철근을 허용하고 있다.

마디 각도와 구조성능의 관계에 관한 기존 연구를 살펴보면, Clark⁸⁾은 다양한 형태의 마디를 갖는 철근에 대한 인발 실험을 통해 마디 각도(angle of transverse rib inclination, β)가 클수록 부착강도가 향상된다고 보고하였다. 마디 각도가 높으면 마디 지압면에 법선 방향으로 형성된 힘의 분력 중 철근 축에 직각방향 힘이 줄어들어, 철근에 동일한 응력이 발현될 때 쪼갬과피를 유발하는 힘이 적어지기 때문이다. Goto⁹⁾는 인발실험을 통해 동일 철근응력에서 마디각도가 클수록 콘크리트에 발생된 균열폭이 크다고 보고하였다. 마디각도가 클수록 철근에서 콘크리트에 작용되는 힘이 국부적이므로 균열 발생의 가능성이 높아진다. Soretz와 Hölzenbein¹⁰⁾의 연구에 의하면 마디 각도가 클수록 반복 굽힘에서 파괴 가능성이 증가하였다. 대나무 마디 철근에 비해 생선뼈 마디 철근은 길이방향으로 단면2차모멘트(moment of inertia)가 비교적 균일하므로 휨응력의 변화가 적고 단면적이 비슷하여 응력 집중이 줄어들기 때문이다.

3. 부착실험 계획

3.1 코일철근의 형상 제한

철근 지름이 커질수록 코일화 및 직선화 가공이 어렵고 코일 1개당 길이가 짧아지므로 코일철근의 장점이 줄어든다. 따라서 코일철근은 주로 16 mm 이하 지름에 사용된다. 강종은 콘크리트구조설계기준에서 허용하는 SD500까지 적용이 가능하다. 이 연구에서는 가장 큰 지름과 가장 높은 강종인 16 mm SD500 철근을 실험 대상으로 선정하였다.

2장의 분석에 맞춰 코일철근의 형상을 선정하였으며, 국내외 표준^{4,7)}과 설계기준^{11,12)}의 요건이 충족되도록 하였다. 가공 기계의 롤러 홈과 철근의 접촉 면적을 넓히기

위하여, 생선뼈 마디를 선택하였다. 또한 철근 축과 마디 사이의 각도를 가능한 낮게 50°로 선정하고, 마디 윗면 폭(crest width)은 넓게 철근 지름의 0.15배로 하였다. 또한 마디의 종단면 각도(flank inclination)를 55°로 높여 마디 윗면 폭이 증가하여도 마디 사이에 채워지는 콘크리트 양이 크게 줄지 않도록 하였다. 원형 단면을 유지하면서 길이방향과 단면 축에 따라 단면 변화를 줄이기 위하여, 리브를 없애고 마디의 지압면을 초승달 모양으로 계획하였다. 더불어 직선화 가공에서 발생하는 마디 손상 후에도 상대마디면적비(relative rib area)가 BS 4449⁷⁾를 만족하고 직선철근과 동일하도록 마디 높이와 마디 간격을 결정하였다.

Fig. 4(a)는 실험에 사용된 철근으로, ST는 현재 국내에서 많이 사용되는 직선철근(straight re-bar)을 C는 코일철근을 의미하며, 숫자는 마디 각도를 나타낸다. Fig. 4(b)는 이 연구에서 기계 가공성 향상을 위해 제안한 마디 형상이고, Fig. 4(c)는 유럽에서 상용되고 있는 코일철근의 마디 형상 상세이다. Fig. 4(a)의 C90은 직선철근과 동일한 형상으로 제작된 코일철근이다. 실험에 사용된 철근의 상세 치수를 Table 1에 정리하였다.

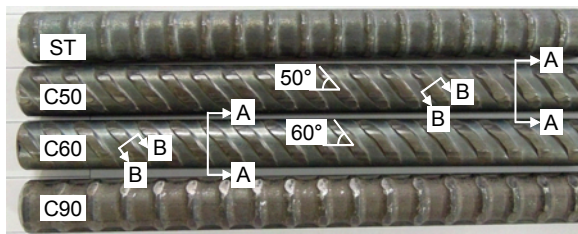
3.2 실험 방법, 변수, 및 실험체 설계

1개의 직선철근, 3개의 코일철근에 대해 부착실험을 실시하였다. 3종류의 코일철근은 마디와 철근 축의 각도가 주된 차이점이며, 마디 종단면 각도와 마디 윗면 폭이

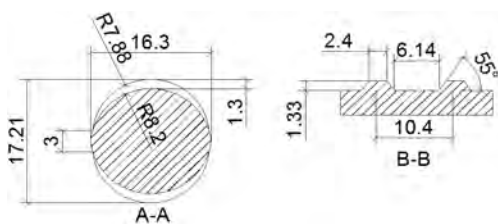
상이다. 실험 방법은 실제 응력상태를 가장 정확하게 묘사할 수 있는 이음실험(Fig. 5)¹³⁾을 선택하였다.

D16SD500 철근의 주 용도는, (1) 보/기둥의 횡보강철근, (2) 슬래브/벽체의 주철근, (3) 보/기둥의 주철근 순서일 것으로 판단되었다. 주 용도의 설계 조건과 부착강도의 영향 요인¹¹⁻¹³⁾을 비교하여 실험 변수의 우선 순위를 이음길이(L_s), 피복두께(c_b), 콘크리트강도, 횡보강철근으로 선정하였다. 이음길이는 5단계며 가장 긴 이음길이에서 철근 항복이 발생하도록 계획하였고, 피복두께는 주 용도의 피복두께인 40 mm와 20 mm를 선정하였다. 콘크리트 강도는 27 MPa을 기본으로 하고 1개 실험군을 50 MPa로 제작하였다. 주 용도를 고려하여 대부분의 실험체는 횡보강철근이 없으며, 1종류 실험군만 D10 횡보강철근을 140 mm 간격으로 배근하였다. 횡보강된 실험체의 횡보강근지수 K_r ¹²⁾은 $1.27d_b$ 이다. 전체 9개 실험군 총 38개의 실험체를 제작하였으며, 실험체별 변수를 Table 2에 정리하였다.

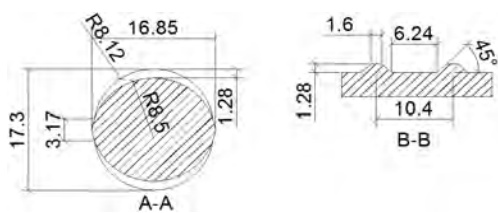
Fig. 6 (a), (b)는 각각 횡보강근철근이 없는 실험체와 있는 실험체 상세도이다. 순수 휨모멘트만 작용되는 구간에 2쌍의 겹침이음된 철근을 배근하였다. 전단스팬비는 3으로 설계하고 전단스팬구간에 충분한 전단보강철근을 배치하여 이음부 파괴 이전에 부재가 전단파괴 되지 않도록 하였다. 겹침이음된 철근의 하부 피복두께(c_b)를



(a) Tested re-bars



(b) Sections of C50



(c) Sections of C60

Fig. 4 Details of ribs of tested re-bars

Table 1 Dimensions of re-bars after straightened (unit: mm)

Re-bars		ST	C50	C60	C90
Outer diameter	Major axis	16.83	17.21	17.3	16.83
	Minor axis	16.02	16.30	16.85	16.02
Core diameter		14.82	14.55	14.74	14.82
Transverse rib	Angle of transverse rib inclination, β	90°	50°	60°	90°
	Flank inclination, α	45°	55°	45°	45°
	Height	1.26	1.33	1.28	1.26
	Spacing	9.67	10.4	10.4	9.67
	Crest width	2.01	2.4	1.6	2.01
	Gap between ribs	5.98	3.2	4.8	5.98

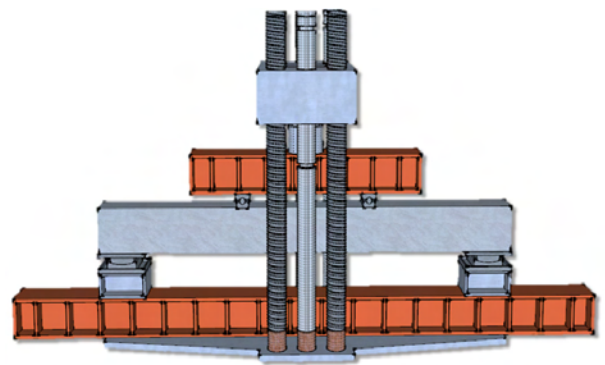


Fig. 5 Test setup

Table 2 Test matrix

Set	Specimen ID ⁽¹⁾	f_{ck} (MPa)	c_b (d_b)	L_s (d_b)	K_{tr} (d_b)		
1	S-L16-C2.5	27	$2.5d_b$	$16d_b$	-		
	S-L16-C2.5-1						
	C50-L16-C2.5						
	C60-L16-C2.5						
	C90-L16-C2.5						
2	S-L20-C2.5						
	S-L20-C2.5-1						
	C50-L20-C2.5						
	C60-L20-C2.5						
	C90-L20-C2.5						
3	S-L28-C2.5						
	S-L28-C2.5-1						
	C50-L28-C2.5						
	C60-L28-C2.5						
	C90-L28-C2.5						
4	S-L34-C2.5						
	S-L34-C2.5-1						
	C50-L34-C2.5						
	C60-L34-C2.5						
	C90-L34-C2.5						
5	S-L20-C1.25			$1.25d_b$		$20d_b$	-
	C50-L20-C1.25						
	C60-L20-C1.25						
	C90-L20-C1.25						
6	S-L28-C1.25						
	C50-L28-C1.25						
	C60-L28-C1.25						
	C90-L28-C1.25						
7	S-L40-C1.25						
	C50-L40-C1.25						
	C60-L40-C1.25						
	C90-L40-C1.25						
8	S-L28-C1.25-F50	50	$28d_b$		-		
	C50-L28-C1.25-F50						
	C90-L28-C1.25-F50						
9	S-L40-C1.25-Conf	27	$1.27d_b$		-		
	C50-L28-C1.25-Conf						
	C90-L28-C1.25-Conf						

⁽¹⁾ ①-L②-C③(-④) : ① is the re-bar types, S represents a straight bar and C50, C60, and C90 represent re-bar in coils with β of 50°, 60°, and 90°, respectively; ② is the splice length normalized by bar diameter; ③ is the bottom cover thickness normalized by bar diameter; ④ is a optional variable, F50 of set 8 is the compressive strength of concrete, Conf of set 9 represents the confined specimens, and “1” of some specimens means a duplicate specimen.

실험 변수로 하고, 측면피복은 40 mm 순간격은 80 mm로 고정하였다.

3.3 가력 및 계측 방법

가력은 Fig. 5와 같이 300 tf용량의 만능시험기를 이용하여 2점 단조 가력 하였다. 가력 속도는 KS B 0802⁽⁴⁾에 따라 철근응력 변화율 3 MPa/sec를 표준으로 가력 하였다. 처짐은 중앙부 양 측면에서 측정하여 평균값을 사용 하였다.

4. 실험 결과

4.1 재료시험 결과

콘크리트 강도 시험은 1주일 간격으로 실시하여, 설계 압축강도가 발현된 날부터 실험을 실시하였다. 실험체별 실험일 강도는 Table 3에 나타내었다. 철근은 종류별로 3 개씩 인장시험을 실시하였으며, 철근별 항복강도, 인장강도, 탄성계수를 Table 4에 정리하였다.

4.2 파괴유형

모든 실험체의 거동은 유사하였으며, 전형적인 쪼갬파괴가 발생하였다. 초기 균열은 휨균열로 이음이 끝나는 지점에서 수직방향으로 발생하였으며, 이후 순수 휨구간에서 몇 개의 수직 균열이 발생하였다. 전단스팬구간에는 미세한 휨균열이 몇 개 발생되었다. 최대하중에 이르러서 하부 피복두께가 40 mm인 C2.5 실험체들은 이음철근 위치에서 수평 균열이 발생되었고, 피복두께가 얇은 C1.25 실험체들은 보 하부면에 길이방향 균열이 발생되면서 쪼갬파괴가 발생되었다. Fig. 7은 실험군 4, L34-C2.5 실험체들의 파괴 후 균열 모습으로, 철근 종류별로 특별한 차이점은 발견되지 않았다. 이음길이 양 끝에서 발생된 수직 균열은 파괴 후 급격히 수직으로 진전된 것으로, 최대 내력 발현 직전까지는 일반적인 휨균열로 길이와 폭이 크지 않았다. S-L28-C2.5, S-L34-C2.5, S-L34-C2.5-1, S-L40-C1.25 4개 실험체는 철근 항복 후 쪼갬파괴가 발생되었다.

4.3 하중-처짐 관계

Fig. 8은 3개 실험군의 처짐-하중 그래프를 보여주고 있다. 초기 휨균열 발생시점에서 강성이 한번 저하되었으며, 이후 일정한 강성을 지녔다. 이음부 파괴로 최대내력에 이르러 급격히 하중이 저하되었다. 철근 종류에 따른 특이점 없이, 실험군별로 유사한 하중-처짐 관계를 가졌다.

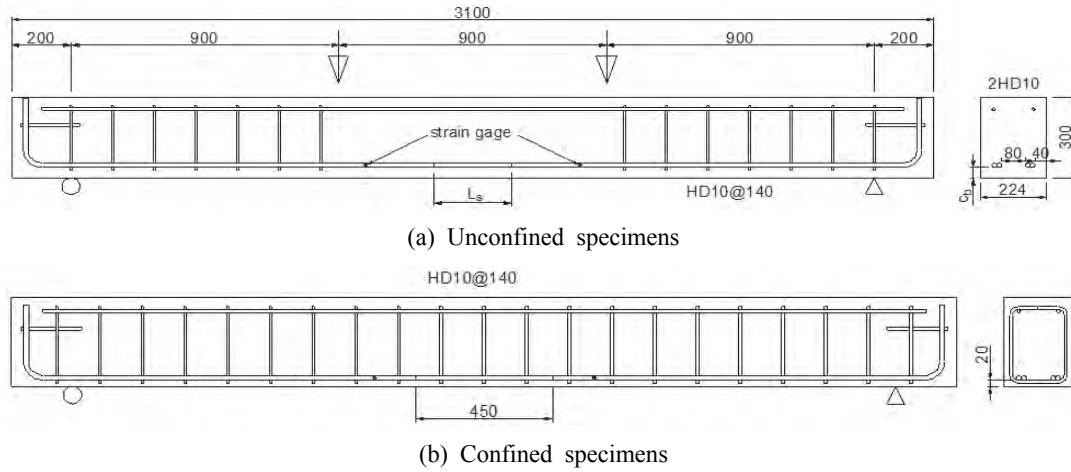


Fig. 6 Details of specimens (unit: mm)

Table 3 Test results and comparisons of bar stresses between tests and predictions

Set	Specimen ID	$f_{ck}^{(1)}$	$P^{(2)}$	$f_{s,e}^{(3)}$	Predictions (MPa)			Failure mode ⁽⁴⁾
					$f_{s,o}$	$f_{s,408}$	$f_{s,KCI}$	
1	S-L16-C2.5	32.0	73.6	405	360	347	319	SP
	S-L16-C2.5-1	27.5	63.4	353	334	335	296	SP
	C50-L16-C2.5	33.2	68.1	379	367	351	325	SP
	C60-L16-C2.5	33.2	63.1	353	367	351	325	SP
	C90-L16-C2.5	27.9	66.9	371	337	336	298	SP
2	S-L20-C2.5	33.2	88.5	486	430	400	400	SP
	S-L20-C2.5-1	27.5	72.5	401	391	381	364	SP
	C50-L20-C2.5	32.0	88.3	485	422	396	393	SP
	C60-L20-C2.5	32.0	90.4	496	422	396	393	SP
	C90-L20-C2.5	27.9	73.5	406	394	383	367	SP
3	S-L28-C2.5	32.6	124.7	678	560	504	558	SPY
	S-L28-C2.5-1	27.5	94.5	519	515	483	512	SP
	C50-L28-C2.5	33.2	102.6	563	566	507	563	SP
	C60-L28-C2.5	32.6	108.5	593	560	504	558	SP
	C90-L28-C2.5	27.9	90.5	497	518	485	516	SP
4	S-L34-C2.5	32.0	116.8	636	647	575	662	SPY
	S-L34-C2.5-1	33.2	122.2	667	660	580	676	SPY
	C50-L34-C2.5	33.2	105.5	579	660	580	676	SP
	C60-L34-C2.5	33.2	123.0	674	660	580	676	SP
	C90-L34-C2.5	27.9	108.6	595	605	555	619	SP
5	S-L20-C1.25	32.6	80.8	407	283	318	278	SP
	C50-L20-C1.25	33.2	73.5	375	286	320	280	SP
	C60-L20-C1.25	32.6	69.8	356	283	318	278	SP
	C90-L20-C1.25	27.9	57.7	297	262	306	257	SP
6	S-L28-C1.25	32.6	99.9	500	360	386	390	SP
	C50-L28-C1.25	32.6	86.4	436	360	386	390	SP
	C60-L28-C1.25	32.6	90.7	457	360	386	390	SP
	C90-L28-C1.25	27.9	80.6	408	333	372	361	SP
7	S-L40-C1.25	32.6	127.3	634	472	486	555	SPY
	C50-L40-C1.25	33.2	125.5	630	476	488	560	SP
	C60-L40-C1.25	33.2	114.0	574	476	488	560	SP
	C90-L40-C1.25	27.9	114.5	575	436	467	513	SP
8	S-L28-C1.25-F50	55.0	111.2	547	467	440	507	SP
	C50-L28-C1.25-F50	55.0	107.6	532	467	440	507	SP
	C90-L28-C1.25-F50	55.0	117.9	580	467	440	507	SP
9	S-L40-C1.25-Conf	27.5	104.6	526	483	507	512	SP
	C50-L28-C1.25-Conf	27.5	93.6	448	483	507	512	SP
	C90-L28-C1.25-Conf	27.5	100.1	553	483	507	512	SP

(1) Measured compressive strength of concrete at test date (MPa). (2) Measured maximum load (kN).

(3) Bar stress obtained from a section analysis (MPa).

(4) SP represents a splitting failure and SPY represents a splitting failure after re-bars yielding.

Table 4 Measured properties of re-bars

Re-bars	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
ST	549	661	188333
C50	563	692	207000
C60	587	717	209333
C90	517	698	188000

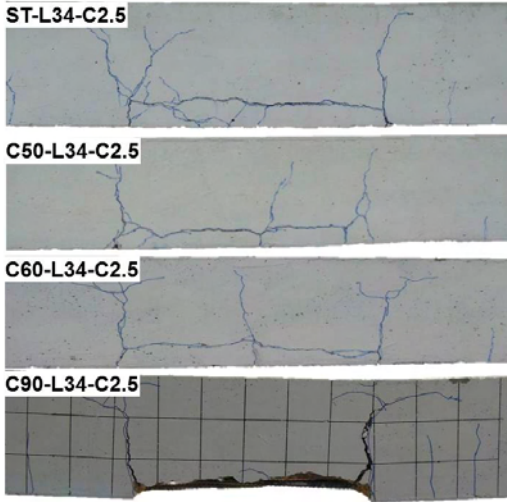


Fig. 7 Typical failures of specimens

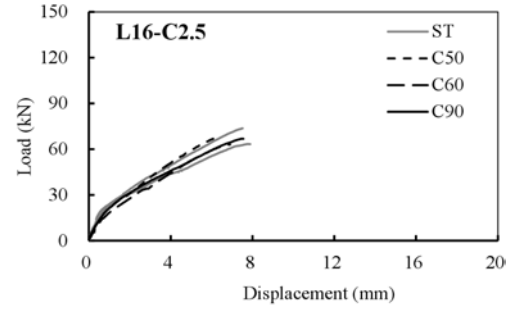
4.4 철근에 발현된 강도

이 연구에서는 ACI 408¹³⁾에서 표준으로 사용하는 단면 해석 방법에 의해 철근에 발현된 강도를 산정하였으며, 콘크리트 응력-변형률 관계는 Hognestad¹⁵⁾ 모델을 이용하였다. 계산된 철근에 발현된 강도를 Table 3에 정리하였다. Fig. 9는 C2.5-series에 대해 철근에 발현된 강도를 실험군별로 비교한 그래프이다. 철근 종류에 따른 특별한 경향을 나타내지는 않으며, 실험군별로 유사한 부착강도가 발현되었다.

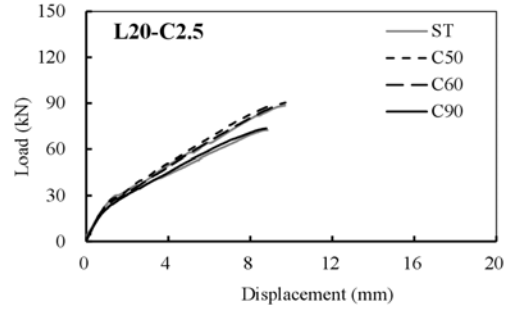
실험일별 콘크리트 강도가 약간 상이하므로 철근에 발현된 강도를 실험체간에 직접 비교하는 것보다, 부착강도 이론식으로 예측한 값과 비교하는 것이 타당하다. 현행 설계기준^{11,12)}의 정착 및 이음길이 설계식의 바탕이 되는 Orangun 등의 식,¹⁶⁾ ACI 408위원회 식,¹³⁾ 콘크리트구조설계기준¹¹⁾의 정착길이 설계식을 철근에 발현된 강도로 변환하면 각각 식 (1)~(3)과 같다.

$$f_{s,o} = \left\{ \left(0.40 + \frac{c}{d_b} \right) \frac{L_s}{d_b} + 16.6 + 0.10 \frac{A_{tr} f_{yt} L_s}{s_{tr} d_b^2 n} \right\} \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

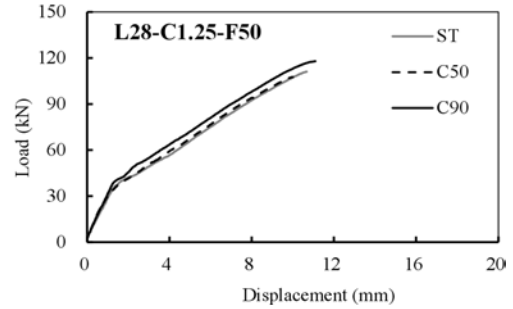
여기서, $(A_{tr} f_{yt}) / (s_{tr} d_b n) \leq 10.34$ MPa, $c = \min(c_c, c_{si})$, c_c 는 순피복두께, c_{si} 는 철근 순간격의 1/2, A_{tr} 은 이음되는 철근을 따라 쪼개질 가능성이 있는 면을 가로질러 배근된 간



(a) L16-C2.5-series



(b) L20-C2.5-series



(c) L28-C1.25-F50-series

Fig. 8 Load-deflection relationships

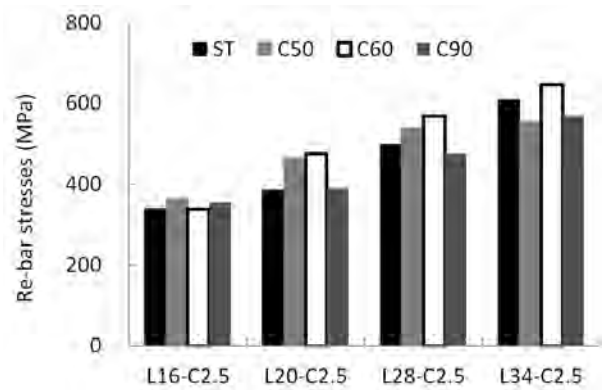


Fig. 9 Comparisons of re-bar stresses of C2.5-series

격 s_{tr} 이내에 있는 횡방향 철근 전체 단면적, n 은 이음된 철근의 수, f_{yt} 는 횡방향 철근의 항복강도이다.

$$f_{s,408} = \left\{ 1.82 \frac{L_s}{d_b} \left(\frac{c_{\min}}{d_b} + 0.5 \right) + 57.4 \right\} \left(0.1 \frac{c_{\max}}{c_{\min}} + 0.9 \right) f_{ck}^{1/4} + \left(11.3 t_r t_d \frac{L_s A_{tr}}{s_{tr} d_b^2 n} + \frac{710}{d_b^2} \right) f_{ck}^{3/4} \quad (2)$$

여기서, $(0.1c_{max}/c_{min} + 0.9) \leq 1.25$, $(c_{min}/d_b + 0.5)(0.1c_{max}/d_b + 0.9) + (6.26trtdArf_{ck}^{1/2})/(S_{tr}dbn) \leq 4.0$, $tr = 9.6R_r + 0.28$, $td = 0.03d_b + 0.22$, R_r 은 마디높이와 마디간격의 비, $c_{min} = \min(c_c, c_s)$, $c_{max} = \max(c_c, c_s)$, $c_s = \min(c_{so}, c_{si} + 6.35\text{mm})$, c_{so} 는 측면 순피복두께 이다.

$$f_{s,KCI} = \frac{L_s(C + K_{tr})/d_b}{0.90d_b\gamma} \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

여기서, $K_{tr} = (40A_{tr})/(s_{tr}n)$, C 는 철근 중심으로부터 콘크리트 표면까지의 최단거리 또는 정착되는 철근 중심 간 거리의 1/2 중 작은 값, γ 는 철근의 크기계수로 19 mm이하 철근은 0.8, 초과는 1.0이다.

실험체별 예측값과 실험값을 Table 3에 정리하였으며, Fig. 10에 실험체별 [실험값]/[예측값] 비를 나타내었다. 철근이 실제 항복한 실험체들은 철근 강도를 알 수 없기 때문에 분석에서 제외하였다. 코일철근 중 일부 실험체를 제외하고 대부분의 실험체들이 예측값을 상회하였다.

콘크리트 인장강도에 크게 영향을 받는 부착거동의 특성으로 부착강도는 동일 조건에서도 변동이 크므로, 개별 실험체의 [실험값]/[예측값]의 특성을 평가하기는 어렵다. 철근 종류별로 3가지 이론식으로 평가한 [실험값]/[예측값]비의 평균을 Fig. 11에 나타내었다. 평균적으로 실험에 사용된 4가지 철근은 이론식에 비해 모두 10%이상의 초과강도를 가졌다. Orangun 등의 식과 ACI 408 위원회 식은 기존 실험 결과를 회귀분석한 평균 강도 예측식이므로, 이 연구에 사용된 철근이 기존 자료에 비해 충분한 초과강도를 가짐을 알 수 있다. 이것은 기존 실험 자료의 상대마디면적비의 주된 범위가 0.057~0.087, 평균 0.072^{13,17)}인데 반하여, 실험에 사용된 상대마디면적비는 모두 0.1을 상회하기 때문에 이론식에 비해 높은 부착강도를 지닌 것으로 판단된다.

직선철근과 코일철근의 유사성을 평가하기 위하여, 동일 조건으로 제작된 실험체에서 산정된 직선철근의 응력과 코일철근의 응력을 Fig. 12에서 비교하였다. 각 비교군의 상관계수(correlation coefficient)를 산정한 결과, C50은 0.94, C60은 0.95, C90은 0.97로 나타났다. 상관계수가

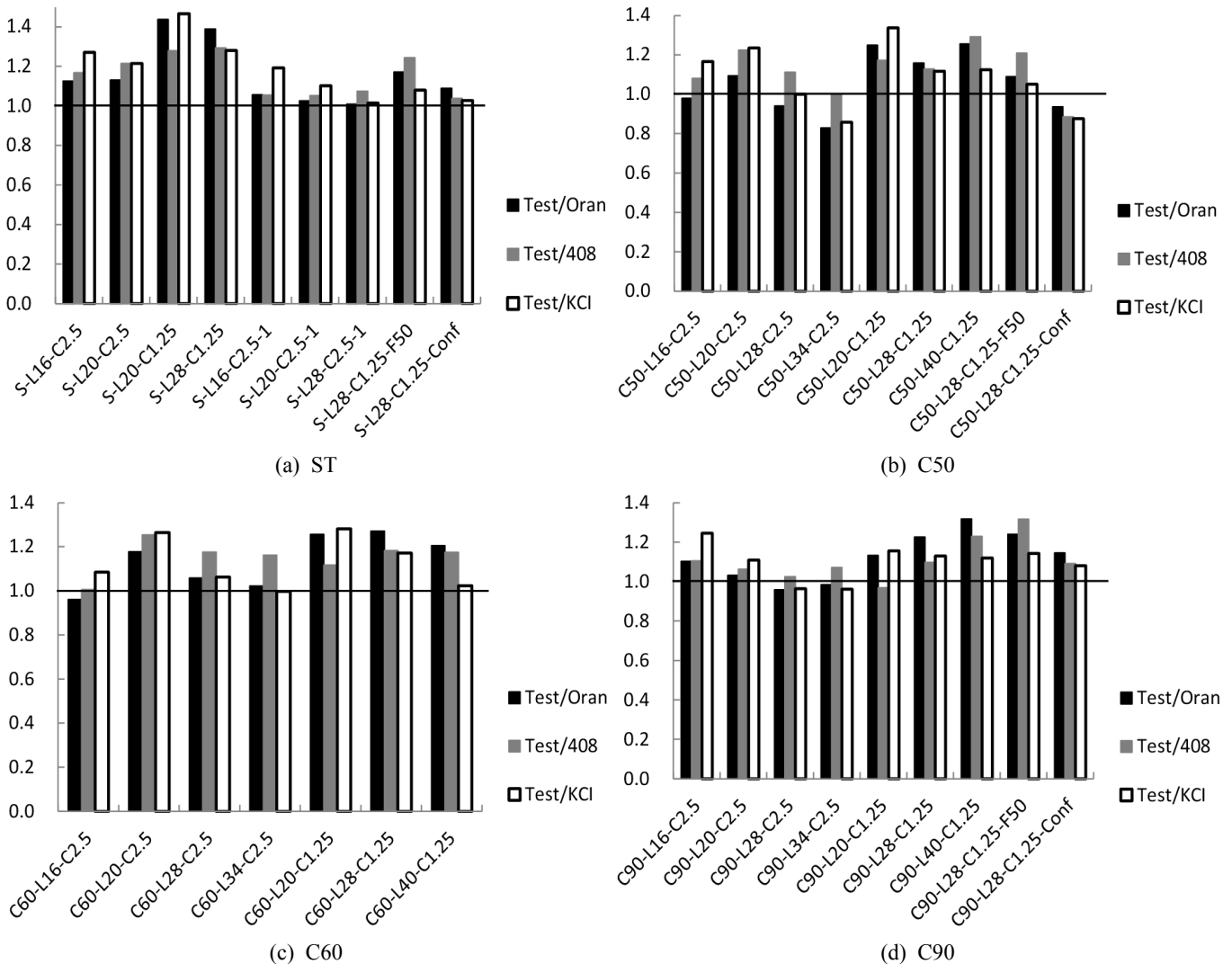


Fig. 10 Comparisons between tests and predictions of re-bar stresses

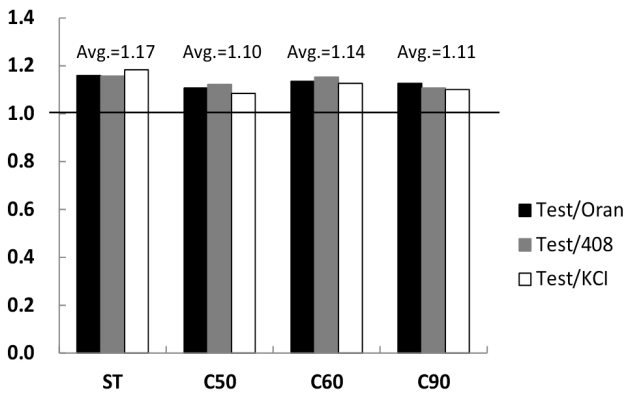


Fig. 11 Averages of ratios of tests to predictions

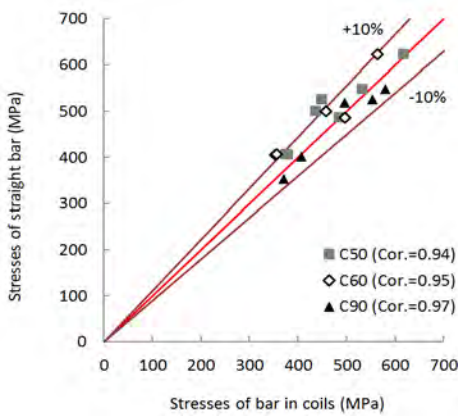


Fig. 12 Comparisons of maximum stresses of straight bars and bar-in-coils

1.0에 가까워, 통계적으로 거의 동일한 부착강도를 발현하는 것으로 평가된다.

5. 결 론

코일철근의 직선화 가공성을 향상시키기 위한 마디 형상으로, 철근 축과 마디 사이각 50°, 마디 윗면 폭 0.15db, 마디의 종단면 각도 55°에 초승달 모양 지압면을 갖는 생선뼈 마디를 제안하였다. 이 형상에 따른 코일철근의 부착성능을 실험적으로 검증하였으며, 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 제안된 형상을 포함하여 마디 각도가 상이한 3종류 코일철근(SD500D16 강종)의 부착강도를 겹침이음 실험으로 평가한 결과, 기존 평가식에 따른 예측값보다 평균 10%이상 높은 강도를 지녔다. 이것은 실험에 사용된 철근의 상대마디면적비가 기존 평가식 유도에 사용된 실험보다 높기 때문으로 판단된다.
- 2) 부착강도에 대한 직선철근과 코일철근의 상관계수는 0.94이상 이었다. 통계적으로 코일철근의 부착성능은 직선철근과 거의 유사한 것으로 평가된다.
- 3) 실험에 사용된 3종 코일철근의 부착강도는 기존 이론식에 비해 10% 이상 초과강도를 지니며 직선철

근과 상관성이 높기 때문에, 실험에 사용된 3종 코일철근의 정착길이와 이음길이는 현행설계기준에 따라 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 대한제강(주)의 연구비 지원을 받아 한국콘크리트학회에서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Cho, H. H., Park, U. Y., Kang, T. K., Park, H. Y., Yun, S. H., and Hur, Y. K., "Analysis of Re-bar Manufacturing System in Plant and Its Facilitate Method," *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 8, No. 1, 2007, pp. 57-64.
2. Polat, G., Ardit, D., Ballard, G., and Mungen, U., "Economics of on-site vs. off-site Fabrication of Rebar," *Construction Management and Economics*, Vol. 24, No. 11, 2006, pp. 1185-1198. (doi: <http://dx.doi.org/10.1080/01446190500529432>)
3. SCHNELL, www.schnell.it, Accessed on June 10, 2011.
4. KS D 3504: 2011, *Steel Bars for Concrete Reinforcement*, Korean Agency for Technology and Standards, 2011, 30 pp.
5. ISO 6935-2 *Steel for the Reinforcement of Concrete-Part 2: Ribbed Bars-Second Edition*, International Organization for Standardization, 2007, 20 pp.
6. ASTM A615/A615M-12, *Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, 6 pp.
7. BS 4449:2005+A2:2009, "Steel for the Reinforcement of Concrete-Weldable Reinforcing Steel-Bar," *Coil and Decoiled Product-Specification*, BSI 389 Chiswick High Road London, UK, 2009, 27 pp.
8. Clark, A. P., "Comparative Bond Efficiency of Deformed Concrete Reinforcing Bas," *ACI Journal Proceedings*, Vol. 43, Issue 11, 1946, pp. 381-400
9. Goto, Y., "Cracks Formed in Concrete around Deformed Tension Bars," *ACI Journal Proceedings*, Vol. 6, Issue 4, 1971, pp. 244-251.
10. Soretz, S. and Hölzenbeain, H., "Influence of Rib Dimensions of Reinforcing Bars on Bond and Bendability," *ACI Journal Proceedings*, Vol. 76, No. 1, 1979, pp. 111-125.
11. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code and Commentary*, Kimoondang Publishing Company, Seoul, Korea, 2008, 523 pp.
12. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary*, ACI, Farmington Hills, MI, USA, 2011, 503 pp.
13. ACI Committee 408, *Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension (ACI 408R-03)*, ACI, Farmington Hills, MI, USA, 2003, 49 pp.
14. KS B 0802:2003, *Method of Tensile Test for Metallic Materials*, Korean Agency for Technology and Standards, 2003, 7 pp.

15. Park, R. and Pauley, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1975, 769 pp.
16. Orangun, C. O., Jirsa, J. O., and Breen, J. E., "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," *ACI Journal Proceedings*, Vol. 74, No. 3, 1977, pp. 114-122.
17. Choi, O. C., Hadje-Ghaffari, H., Darwin, D., and McCabe, S. L., "Bond of Epoxy-Coated Reinforcement to Concrete: Bar Parameters," *SM Report No. 25*, University of Kansas Center for Research, Lawrence, Kans., 217 pp.

요 약 코일철근의 직선화 가공성을 향상시키기 위한 마디 형상으로, 철근 축과 마디 사이각 50°, 마디 윗면 폭(crest width) 0.15d_b, 마디의 종단면 각도(flank inclination) 55°에 초승달 모양 지압면을 가진 생선뼈 마디(fishbone-shaped transverse rib)를 제안하였다. 이 형상은 직선화 기계의 롤러 홈(groove)과 철근 외부의 접촉면적을 넓혀 마디 손상을 최소화하며 직선도를 향상시키고 가공 생산성을 높일 것으로 기대된다. 제안된 형상을 포함하여 마디 각도가 상이한 3종류의 코일철근(SD500D16 강종)에 대한 부착강도 평가를 위해 겹침이음실험을 실시하였다. 3종의 코일철근은 기존 부착강도 평가식에 따른 예측값보다 평균 10%이상 높은 부착강도를 지닌 것으로 평가되었다. 이것은 코일철근의 상대마디면적비가 기존 평가식 유도에 사용된 실험보다 높기 때문으로 판단된다. 부착강도에 대한 직선철근과 코일철근의 상관계수(correlation coefficient)는 0.94이상 이었으며, 코일철근의 부착성능이 직선철근과 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 실험에 사용된 코일철근의 정착길이와 이음길이 설계에 현행설계기준을 적용하는 것이 타당한 것으로 평가된다.

핵심용어 : 코일철근, 부착, 마디, 직선화 가공