

겹이음된 FRP 보강근으로 보강된 콘크리트 보의 휨거동

Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Lap Spliced FRP Bar

오 흥 섭*

Oh, Hongseob

Abstract

This is a part of the extensive ongoing investigation being carried out by author to develop appropriate design procedure of the concrete member reinforced with FRP rebars instead of conventional steel rebars. This study presents the experimental results of a research programme to assess the structural characteristics of spliced rebar in reinforced concrete members with FRP reinforcement. The test variables are the diameter of FRP rebar and the embedment length. The development length (l_d) was calculated according to the ACI 440 for FRP rebars in concrete. A total of 14 concrete beams reinforced with spliced FRP rebars and 4 reference beams reinforced with non-spliced FRP rebars were tested. The effects of bar size (10, 13, 16 and 19 mm) and splice length (from 0.72 to 1.58 l_d) on the bond strength were empirically evaluated. The test results indicate that a modification factor of 1.3 and 1.6 is relatively sufficient for the bond development length of glass FRP rebars in order to achieve an adequate tension lap splice length.

요 지

본 연구는 저자가 수행하고 있는 FRP로 보강된 콘크리트 보의 거동연구에 관한 일련의 연구 중 일부로서 본 연구에서는 인장보강근이 겹이음된 콘크리트보의 휨거동에 대한 실험적 연구결과를 제시하였다. 실험변수로는 보강근의 직경과 보강근의 겹이음길이를 적용되었으며, 총 14개의 겹이음된 실험체와 4개의 겹이음되지 않은 기준실험체에 대한 휨실험을 실시하여 각 실험변수인 보강근의 직경(10, 13, 16, 19mm)과 겹이음길이(0.72부터 1.58 l_d)에 대한 실험결과를 정리하였다. 각 보강근의 겹이음길이는 ACI 440에서 제시하고 있는 FRP 보강근에 대한 기준을 적용하였으며, 실험결과에서 사용된 FRP 보강근의 경우, 기준에서 제시하고 있는 부착길이에 대한 1.3과 1.6의 계수가 충분한 것으로 나타났다.

Keywords : Bond development length, FRP rebars, Tension lap splice length

핵심 용어 : 인장겹이음 길이, 부착길이, FRP 보강근

* 정희원, 국립진주산업대학교 토목공학과 교수

E-mail : hongseob@jinju.ac.kr 055-751-3299

•본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2009년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

지난 20여년간 건설분야에서의 고성능 재료의 사용이 급속히 증가하고 있으며, 특히 FRP(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP) 재료의 활용이 그 선두를 이루고 있다. 그동안의 연구와 축적된 경험들에 의하여 초기에 발생되었던 FRP 재료에 대한 문제들은 많이 해결되고 있으며, 재료와 공법에 대한 신뢰성이 차츰 향상되고 있는 추세이다. 또한 최근 국외에서는 FRP 보강근(rebar)를 신설구조물에 철근 대체재료로서 활용하고자 하기 위한 연구⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾뿐만 아니라 건설현장에서의 적용이 점차 증가하고 있으며, ACI의 ACI 440⁽⁵⁾ 및 ISIS CANADA의 Design Manual⁽⁶⁾과 같이 표준화된 설계지침의 제시가 이루어지고 있다. 그러나 국내의 상황은 연구실 수준에서 가능성 입증과 실험 시공을 준비하는 단계에 있으며, 아직까지 국내실정을 고려한 설계기준이나, 지침은 제시되지 않은 상태이다.

특히 FRP 보강근은 사용되는 섬유와 매트릭스를 구성하는 레진, 표면을 형성하는 재료 등에 따라 재료의 설계와 제작방법이 달라지기 때문에 ISIS Canada의 설계기준 등에서는 제품별 재료특성 기준을 제시하고 있는 상태이다.⁽⁶⁾ 이와 같이 재료별 특성차가 크기 때문에 휨 등에 대한 설계방법은 충분히 제시되고 있으나, 정착길이, 겹이음 길이 등과 같은 보강상세에 대한 규정은 국외의 경우에도 충분히 제시되고 있지 않다.

공장생산되는 FRP 보강근의 경우, 제작시에는 길이의 제한이 없으나, 운반 및 작업성을 위하여 10m 내외로 절단하여 사용할 수 밖에 없다. 그러나 FRP 보강근은 제작에 사용되는 열경화성 수지로 인하여 현장에서의 변형이 불가능하기 때문에 섬유의 인장강도를 상회하는 기계적이음 방법이 충분히 제시되어 있지 않은 현재의 상태에서는 보강근을 겹이음을 하는 것이 가장 효과적인 시공방법이다.

FRP 보강근의 겹이음에 가장 큰 영향을 미치는 FRP 보강근의 부착강도는 보강근의 직경, 보강근의 표면형상, 부착길이 등의 영향을 받으며, 콘크리트 강도의 영향은 거의 없는 것으로 제시되고 있다.⁽⁷⁾ 따라서 겹이음 길이는 탄성이론과 실험에 근거한 부착길이

공식에 활용계수를 더하여 적용하고 있다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 그러나 이 겹이음 길이에 관한 제안규정 등이 국외의 FRP보강근과 실험결과들에 기초한 것이기 때문에 국내에서 제작된 FRP보강근의 겹이음 길이 산정에 적용하기에는 아직 충분한 실험결과 등이 확보되지 않은 상태이기 때문에 보다 충분한 실험 및 해석을 통한 데이터의 확보가 선행되어야만 국외규정의 수정 또는 국내의 독자적인 겹이음 길이 규정이 제안될 수 있을 것이다.

아직까지 국내에서 생산되는 FRP 보강근은 종류가 다양하지는 않으나, 최근 품질이 급격히 향상되고 있는 상태이기 때문에 건설현장에서의 FRP 보강근의 적용을 활성화하기 위해서는 국내제품과 국내 건설조건에 적합한 설계기법 등의 개발이 필요한 상황이다. 특히 국외의 경우는 표면에 요철을 둔 이형 보강근⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 또는 표면에 모래 등을 함침시킨 표면코팅형 보강재⁽⁷⁾에 대한 연구결과는 많은 반면, 국내에서 많이 사용되고 있는 표면을 섬유로 3차원 성형한(surface braided) 형태의 보강근에 대한 겹이음 거동에 대한 연구는 충분치 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 국내 생산된 FRP 보강근의 겹이음 길이와 보강근의 직경에 따른 휨거동 특성을 실험적으로 평가하였으며, 국내외에서 많이 적용되고 있는 ACI 440에서 제시하고 있는 겹이음 길이 기준과 비교하여 국내 재료에 대한 기준의 적용가능성 등을 분석하였다.

2. 실험체 설계

본 연구에서는 겹이음 길이에 따른 부재의 휨거동 특성을 평가하기 위하여 FRP bar를 적용한 콘크리트 보를 ACI 440의 기준에 따라 과보강단면으로 설계하였다. 이때 균형보강비는 식(1)과 같으며, 과보강단면에 대한 보의 극한 휨강도는 식(2)와 같이 산정된다.

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (1)$$

과보강($\rho_f > \rho_{fb}$)의 경우:

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2)$$

$$\text{여기서, } a = \frac{A_f f_s}{0.85 f'_c b}$$

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0.5 E_f \epsilon_{cu} \right) \leq f_{fu}$$

보강근의 겹침이음 길이는 부착 또는 정착길이의 함수로 주어지게 된다. 부착길이는 FRP 보강근의 응력이 0에서 극한강도까지 도달할 수 있는 최소한의 길이로 정의된다. 재료역학적 관점에서 직선보강근에 대한 부착길이는 식(3)과 같이 표현되며, ACI와 ISIS Canada에서는 Pleiman⁽⁸⁾⁽⁹⁾ Faza와 GangaRao⁽¹⁰⁾, Ehsani et al⁽¹¹⁾ 등의 연구에 근거하여 부착과괴형태에 따라 뽑힘(pull-out) 파괴와 할렬(splitting) 파괴에 대한 부착길이를 각각 식(4)와 식(5)에 의하여 산정하도록 제시하고 있다.

$$l_{frp} \pi d_b \mu_{frp} = A_{frp} f_{frp} \quad (3)$$

여기서, l_{frp} 는 부착길이, mm

d_b 는 보강근의 직경, mm

A_{frp} 는 보강근의 면적, mm^2

f_{frp} 는 보강근의 극한강도, MPa

$$\text{뽑힘 파괴 : } l_{bf} = \frac{d_b f_{frp}}{18.5} \quad (4)$$

$$\text{할렬 파괴 : } l_{bf} = 0.028 \frac{A_{frp} f_{frp}}{\sqrt{f'_c}} \quad (5)$$

Challal과 Benmokrane⁽¹²⁾은 직선 보강근에 대한 최소부착길이를 직경의 20배 또는 380mm이상 되도록 제안하였다.

이때 단면에서의 겹이음의 경우에는 보강근에 발생하게 되는 응력의 정도에 따라 Class A와 Class B로 분류하여 겹이음하도록 규정하고 있다. Class A는 겹이음되는 보강재가 전체 보강재의 1/2이하이고, 응력이 극한강도의 50%이하로 발생하는 경우를 뜻하며, 이외의 경우는 모두 Class B로 정의된다. 설계시 적

Table 1 FRP 보강근의 재료성능

	항복강도 (MPa)	극한강도 (MPa)	항복변형율 (%)	극한변형율 (%)
GFRP 보강근	-	1107	-	3.12

용되는 겹침길이는 Class A의 경우는 $1.3l_{bf}$ 를 Class B의 경우는 $1.6l_{bf}$ 를 적용하도록 하고 있다.

따라서 본 연구에서는 Table 1에 나타난 국내에서 시판중인 D사의 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer, 이하 GFRP) 보강근을 적용하여 실험체를 설계하였으며, 보강근의 겹이음 길이는 직경에 따라 최저 $0.66l_{bf}$ 부터 최대 $1.58l_{bf}$ 가 되도록 하였다. 이때 실험체단면에서 보강근간의 수평간격은 ACI 440에서 제시하고 있는 것과 같이 굵은 골재 최대치수보다 크도록 고려하였다. 설계된 실험 변수는 Table 2에 정리하였다.

3. 구조실험

3.1 실험체 제작 및 실험변수

본 연구에서 제작된 보 실험체는 콘크리트 28일 압축강도 30MPa의 레미콘 제품을 사용하였으며, 굵은 골재 최대치수는 20mm로 하였다. 스티럽은 항복강도 400MPa의 D10 철근을 사용하였다. 적용된 FRP 보강근은 표면이 유리섬유로 3차원으로 가공된(surface braided) D사의 제품으로 제조사에서 제시한 극한강도 및 극한변형율은 Table 1에 정리하였다. 모든 실험체는 콘크리트 압괴에 의해서 파괴되는 파괴강도로 설계되었으며, 평형보강비는 0.001689이다.

Table 2와 Fig. 1에는 실험변수와 실험체의 개요도를 정리하였다.

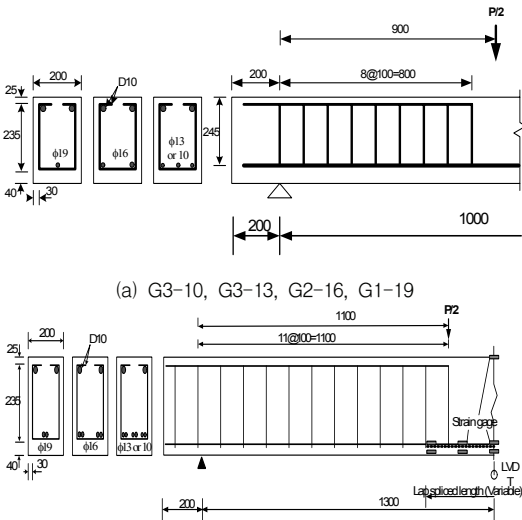
3.2 실험 방법

G3-10, G3-13, G2-16 및 G1-19 실험체는 총 2.4m의 길이 중 순지간 2.0m의 단순보 형식으로 거치되었으며, 겹이음 길이를 둔 실험체는 총 3.0m 지간에 순지간 2.7m로 실험체를 거치하였다.

Table 2 FRP 보강 실험체의 실험변수

실험체명	보강량	접이음 길이	보강근간 횡방향 순간격 (mm)	보강비
G3-10	φ10mm*3	$0l_{bf}$	45	0.0046
G3-10-442*		$0.74l_{bf}$	30	
G3-10-631		$1.05l_{bf}$	30	
G3-10-757		$1.26l_{bf}$	30	
G3-10-820		$1.37l_{bf}$	30	
G3-10-946		$1.58l_{bf}$	30	
G3-13	φ13mm*3	$0l_{bf}$	40.5	0.0078
G3-13-598		$0.77l_{bf}$	21	
G3-13-854		$1.1l_{bf}$	21	
G3-13-1110		$1.43l_{bf}$	21	
G2-16	φ16mm*2	$0l_{bf}$	44	0.0079
G2-16-687		$0.72l_{bf}$	28	
G2-16-981		$1.02l_{bf}$	28	
G2-16-1276		$1.33l_{bf}$	28	
G1-19	φ19mm*1	$0l_{bf}$	50.5	0.0056
G1-19-757		$0.66l_{bf}$	41	
G1-19-1082		$0.95l_{bf}$	41	
G1-19-1407		$1.23l_{bf}$	41	

여기서, *는 접이음 길이(단위 : mm)



(a) G3-10, G3-13, G2-16, G1-19
(b) G3-10-(Var.), G3-13-(Var.), G2-16-(Var.)
and G1-19-(Var.)

Fig. 1 각 실험체의 단면 및 배근상세(단위 : mm)

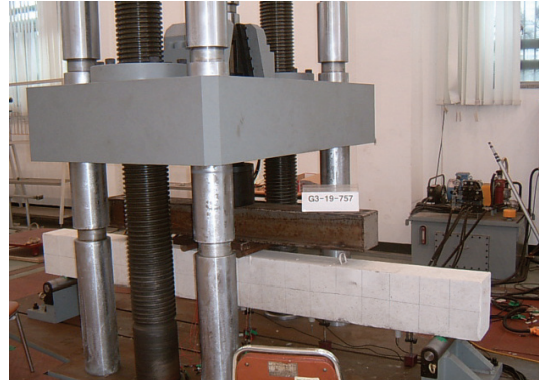
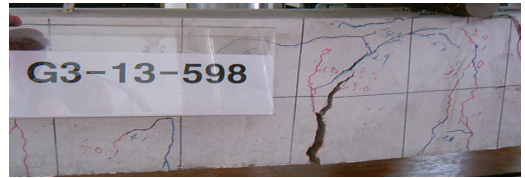


Fig. 2 실험 전경



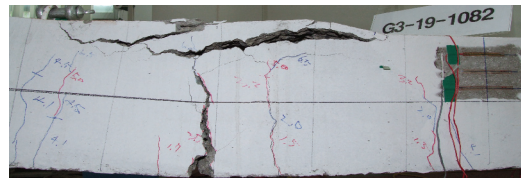
(a) G3-10-631



(b) G3-13-598



(c) G2-16-981



(d) G1-19-1082

Fig. 3 접이음 실험체의 파괴형상

Fig. 3과 같이 하중가력은 5000kN 용량의 UTM 을 사용하여 분당 1mm의 변위제어로서 4점 휨 재하 를 실시하였으며 휨 실험시 사용된 전단스팬비는 각각

3.67과 4.68의 값을 사용하였다. 변위계측은 100mm 용량의 변위계(LVDT)를 보 중앙부와 지점으로부터 1/6과 1/3 지점에 설치하여 처짐을 측정하였다. 변형율의 계측은 보의 인장보강근의 중앙과 겹이음부에 철근게이지를 부착하여 GFRP 휨 보강근의 변형율을 측정하였다. 또한 단면 깊이에 대한 콘크리트 변형율 분석을 위하여 보의 상면에서부터 4cm 간격으로 총 4개의 콘크리트 게이지를 부착하였다.

4. 실험 결과 분석

4.1 균열 및 파괴양상

보강근 직경별 실험체의 파괴형태는 Fig. 3에 나타내었으며, 겹이음되지 않은 실험체는 모두 휨-전단균열 발생후 콘크리트 압괴에 의하여 파괴된 반면, 겹이음된 실험체는 부착길이 및 보강근의 횡간격의 영향에 따라 보강근의 뽑힘(pull-out) 파괴가 발생하거나, 압괴파괴가 발생하였다. 보강근 사이의 횡간격이 작았던 G3-10 계열과 G3-13 계열은 모두 기준 실험체의 강도

에 도달하지 못한 상태에서 부재가 뽑힘 파괴되었다.

그러나 횡간격이 상대적으로 충분한 G2-16 계열과 G1-19 계열 실험체의 경우에는 ACI 기준에 의한 겹이음 길이에서 충분한 강도를 확보하는 것으로 나타났다. 겹이음된 실험체와 겹이음 되지 않은 실험체의 내하력을 동등하게 비교하기 위하여 최대 내력을 모멘트로 정리하여 Table 3에 나타내었으며, 파괴시의 보강근과 콘크리트의 변형율을 같이 제시하였다. Table 3의 파괴형태에서 F-C, F-P 및 F-B는 각각 콘크리트 압괴, FRP 뽑힘파괴 및 균형파괴를 의미하는 것이다.

G3-10-442 실험체의 경우는 전형적인 휨파괴 형식을 나타내었으나, 균열의 개수와 균열간격은 겹이음되지 않은 G3-10과 비교하여 현저히 작은 것으로 나타났다. G3-10-757, G3-10-820과 G3-946 실험체의 경우는 모두 가력점 내의 주균열에 의하여 실험체가 파괴되는 형태를 나타내었으며, 부분적으로 보강근 위치에서의 할렬파괴에 의한 수평균열이 관찰되었다. 보강근의 직경이 13mm이고 3개가 수평배근된 G3-13 계열 실험체의 파괴 형태 역시 G3-10 계열의 실험체와 유사한 파괴형태를 나타내었으며, 최종파괴 단계에

Table 3 실험체 실험결과

실험체	극한모멘트 (kN·mm)			최대하중시 인장변형율 (10 ⁻⁶)	파괴시 인장변형율 (10 ⁻⁶)	최대 압축변형율 (10 ⁻⁶)	최대하중시 처짐(mm)	파괴형태
	실험(E)	이론(T)	E/T					
G3-10	28,575	34,495	0.828	12,110	12,110	-3,422	18.1	F-C1
G3-10-442	20,075		0.582	5,865	out	-1,437	22	F-P2
G3-10-631	25,492		0.739	out	out	-1,214	25	F-P2
G3-10-757	18,150		0.526	9,198	9,302	-4,135	22.5	F-P2
G3-10-820	20,900		0.606	5,008	5,342	-1,097	18	F-P2
G3-10-946	21,725		0.630	9,974	5,335	-1,698	24.5	F-P2
G3-13	51,075	42,645	1.198	18,217	19,255	-4,111	32.2	F-C1
G3-13-598	33,550		0.787	7,067	7,106	-1,703	36.5	F-P2
G3-13-854	37,400		0.877	9,564	3,207	-1,662	43.2	F-P2
G3-13-1110	44,000		1.032	14,126	3,901	-2,698	40	F-P2 & F-C1
G2-16	55,125	42,539	1.296	15,388	15,443	-4,190	27.7	F-C1
G2-16-687	54,500		1.281	7,814	7,399	-2,399	39.6	F-P2
G2-16-981	62,150		1.461	10,392	10,279	-3,232	44.5	F-C1
G2-16-1276	72,600		1.707	10,002	9,532	-3,501	49.7	F-C1
G1-19	34,204	36,271	0.943	out	out	-4,018	18.4	F-C1
G1-19-757	32,725		0.902	6,924	6,879	-1,779	29.6	F-P2
G1-19-1082	43,175		1.190	7,114	out	-2,588	38.3	F-B3
G1-19-1407	48,950		1.350	out	out	-2,906	41.1	F-B3

1: 콘크리트 압괴, 2: FRP 뽑힘(pull-out)파괴, 3: 콘크리트 압괴 및 FRP 파단이 동시에 발생하는 평형파괴

서 가력지점 외부 겹이음부가 끝나는 지점에서 생성된 주균열에 의하여 파괴되었다. 또한 보강근간의 수평간격 부족으로 인하여 부분적인 수평할렬균열이 관찰되었으며, 모든 실험체가 압괴파괴되는 양상을 나타내었다.

G2-16 계열의 실험체의 경우에는 겹이음 길이에 관계없이 모두 압괴파괴되었으며, 최종파괴 역시 다른 겹이음 실험체와 같이 겹이음부의 주균열에 의하여 취성적인 파괴를 나타내었다.

G1-19 계열의 실험체의 경우는 전체적으로 콘크리트 압괴와 FRP 파단 또는 뽑힘(pull-out)이 동시에 발생하는 형태로 파괴되었으며, 지간 중앙부의 휨균열 보다는 압괴후 겹이음 끝단에서 발생한 균열에 의하여 실험체가 파괴되는 형태를 나타내었다.

Fig. 4에 나타낸 것과 같이 보강근간의 수평간격이 상대적으로 작았던 G3-10 계열과 G3-13 계열의 경우는 겹이음 길이에 관계없이 겹이음 되지 않은 실험체의 기준 내하력이었던 것으로 나타났으며, 특히 G3-10 계열의 경우는 겹이음 길이와 내하력과 상관관계가 없는 것으로 관찰되었다. 이는 보강근간의 파괴응력 또는 부착응력이 겹침으로써 부재가 최대하중에 도달하기 전에 겹이음부의 부착파괴 또는 수평 할렬파괴가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 G2-16과 G1-19의 경우에는 ACI440 기준에 의한 Class A의 요구조건인 인장겹이음 길이가 $1.3l_{bf}$ 이상인 경우에는 충분한 강도를 발휘하는 것으로 실험되었다. 특히 G1-19 실험체의 경우에는 $1.0l_{bf}$ 이상일 경우에도 충분한 내하력을 발휘하는 것으로 나타났으나, 겹이음 길이 증가에 따른 내하력의 증가 정도는 둔화되는 것으로 관찰되었다.

4.2 모멘트-변위 관계

Fig. 5와 6에는 각 실험체별 모멘트-변위 곡선을 나타내었다. 거의 모든 실험체의 균열 하중은 보강량에 관계 없이 20~25kN인 것으로 나타났으며, G3-10 계열 실험체의 경우에는 횡방향 균열에 의하여 겹이음 길이에 관계없이 기준실험체(G3-10) 이상의 강도를 발휘하지 못하는 것으로 나타났다. 대부분의 실험체가 일정하중 증가후 보강근의 부착파괴 또는 겹이음부의

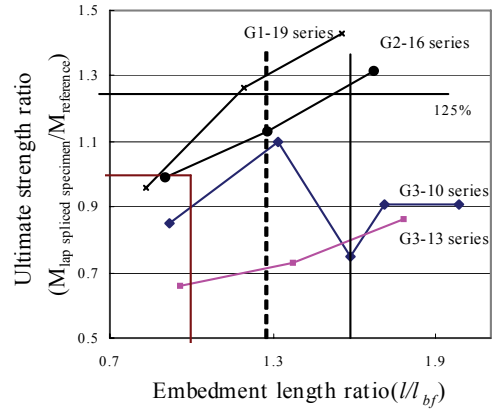
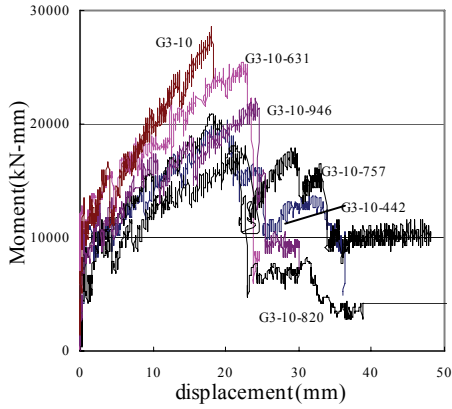


Fig. 4 겹이음 길이에 따른 강도비

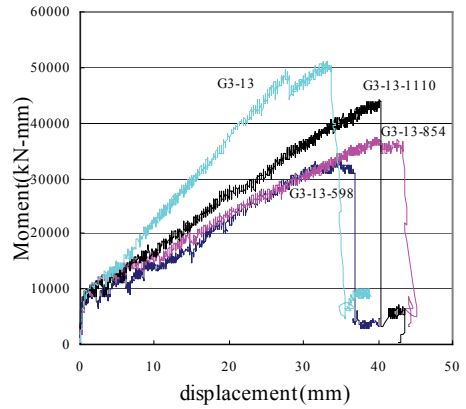
할렬파괴에 의하여 보강근의 슬립이 발생하면서 하중이 감소하는 현상을 나타냈다. G3-13 실험체의 경우에는 전반적인 파괴형태는 G3-10 계열과 유사한 것으로 관찰되었다. 이때 균열하중은 거의 동일하였으나, 실험체의 강성은 겹이음 길이와 반비례하는 것으로 나타났다. 강성의 변화는 겹이음된 보강근의 부분적인 슬립 때문인 것으로 판단되며, 보강근의 뽑힘과 콘크리트 압괴에 의하여 실험체가 파괴된 것으로 판단된다.

이에 반하여 G2-16 계열과 G1-19 계열 실험체는 전체적으로 겹이음 길이가 최소 겹이음 길이의 1.3배 이상이 될 경우에는 강도가 기준실험체보다 높게 나타났으나, 강성의 경우에는 다른 경우와 같이 기준실험체보다 낮게 나타났으며, 전체적으로 겹이음 길이가 증가할수록 강성은 증가하는 것으로 관찰되었다.

G1-19-1407 실험체의 경우는 최소겹이음 길이의 1.55배 겹이음된 실험체로서 기준실험체의 내하력보다 45%정도 크게 나타났으며, 강성 또한 거의 동일한 것으로 나타났다. 이는 ACI 440 기준에서 제시하고 있는 Class B의 기준인 보강근의 응력이 항복강도의 50%이상일 경우 요구되는 $1.6l_{bf}$ 의 조건을 충분히 만족하고 있는 것으로 판단된다. 모멘트-변위관계에서 내하력의 측면에서는 전체적으로 겹이음길이가 $1.3l_{bf}$ 이상인 경우에는 충분한 것으로 판단되나, 강성의 측면을 고려할 경우에는 최소 $1.6l_{bf}$ 이상이 필요한 것으로 나타났다.

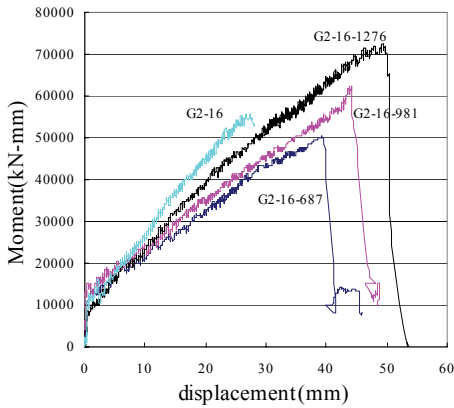


(a) G3-10 계열

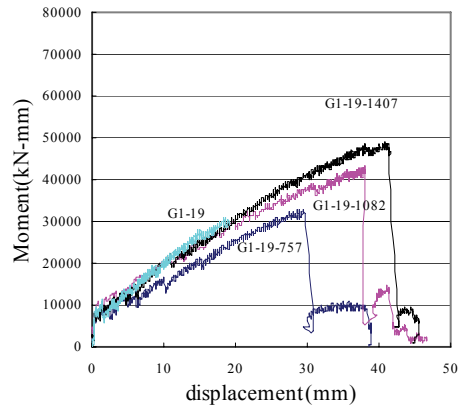


(b) G3-13 계열

Fig. 5 G3-10 및 G3-13 계열 모멘트-변위 관계



(a) G2-16 계열



(b) G1-19 계열

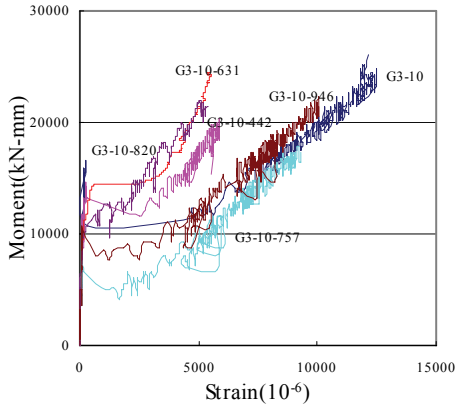
Fig. 6 G2-16 및 G1-19 계열 모멘트-변위 관계

4.3 모멘트-변형률관계

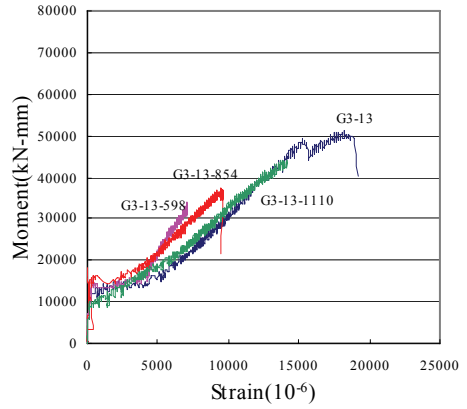
실험체별 모멘트-변형률 관계는 Fig. 7과 8에 정리하였으며, 보강근의 변형률은 실험체 중앙부의 변형률을 의미하고 있다. 거의 모든 실험체의 변형률이 각 계열의 기준실험체보다 작게 나타났으며, G2-16과 G1-19 계열의 경우에는 겹이음 길이가 증가할수록 보강근의 변형률이 작아지는 것으로 나타나, 겹이음부된 보강근 사이의 응력분산이 원활하게 되는 것으로 판단되었다.

그러나 부분적인 뽑힘(pull-out) 현상이 발생된 G3-10 계열과 G3-13 계열의 경우에는 보강근의 겹이음 길이가 증가할수록 기준실험체의 변형과 유사해지는 반대의 현상을 나타냈었으며, 이는 겹이음된 보강근의 슬립(slip)에 기인하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 9에는 G2-16-687 실험체의 보강근의 위치에 따른 변형률을 표시하였다. 전체적으로 모든 실험체에서 겹이음부 끝단으로 갈수록 변형률이 작아지는 것으로 나타났으며, 하중의 증가에 따라 실험체 중앙부와 겹이음 끝단의 차이는 커지는 것으로 관찰되었다.

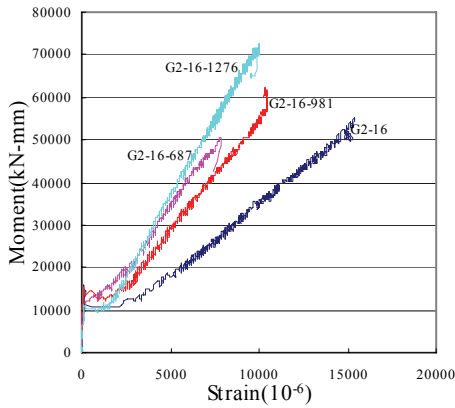


(a) G3-10 계열

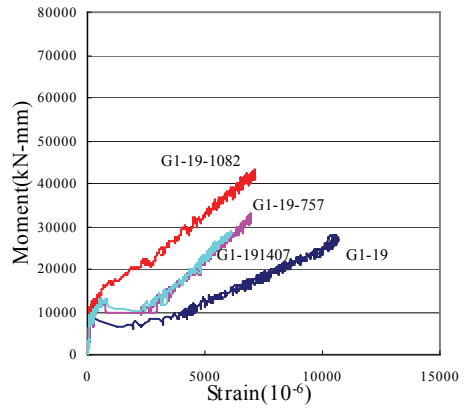


(b) G3-13 계열

Fig. 7 G3-10 및 G3-13 계열 모멘트-변형률관계



(a) G2-16 계열



(b) G1-19 계열

Fig. 8 G2-16 및 G1-19 계열 모멘트-변형률관계

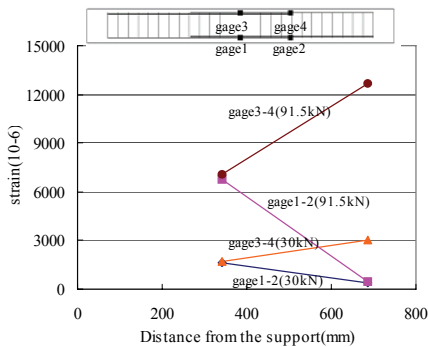


Fig. 9 하중변화에 따른 보강근의 변형률 분포(G2-16-687)

5. 소 결

직경이 작은 실험체의 경우에는 대체적으로 겹이음 길이에 관계 없이 기준실험체 이상의 강도를 발현하지 못하는 것으로 나타났으나, 직경이 큰 실험체의 경우에는 겹이음 길이가 최소겹이음 길이의 1.3배 이상일 경우에는 강도가 기준실험체보다 높게 나타났으나, 강성의 경우에는 다른 경우와 같이 기준실험체보다 낮게 나타났으며, 전체적으로 겹이음 길이가 증가할수록 강성은 증가하는 것으로 관찰되었다.

실험결과로부터 ACI 440 기준에서 제시하고 있는 Class B의 기준인 보강근의 응력이 항복강도의 50% 이상일 경우 요구되는 $1.6l_{bf}$ 의 조건은 약간 보수적인 것으로 판단되며, 모멘트-변위관계에서 내하력의 측면에서는 전체적으로 겹이음길이가 $1.3l_{bf}$ 이상인 경우에는 충분한 것으로 판단된다. 그러나 정확한 기준을 제시하기 위해서는 추가적인 실험과 해석이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가연구원 지정 R&D (05 기반구축 D04-01 and 05첨단융합B01) 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Pecce M., Manfredi G. and Cosenza E., "Experimental response and code models of GFRP RC beams in bending," J. Compos. Constr. 4 4, 2000, pp. 182-190.
2. Houssam A. Toutanji, Mohamed Saafi "Flexural Behavior of Concrete beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer(GFRP) Bars," ACI Structural Journal, Vol. 97, No. 5, 2000, pp. 712-719.
3. Benmokrane B., Chaallal O. and Masmoudi R. "Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bar," ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 1, 1996, pp. 46-55.
4. Theriault M. and Benmokrane B., "Effects of FRP reinforcement ratio and concrete strength on flexural behavior of concrete beams," J Composite Construction Vol. 2, 1998, 1, pp. 7-16.
5. ACI 440.1R-01. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001. p. 41.
6. ISIS Canada: Design Manual 3. Reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers. The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, September 2001, p. 207.
7. Benmokrane B., Tighiouart B., and Thériault M., "Bond strength of FRP rebarspllices", Proc. of the third international symposium on Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRC-3), edited by Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, 1997, pp. 405-412.
8. Pleiman L.G., "Tension and bond pull-out tests of deformed fiberglass rods", Final Report for Marshall-Vega Corporation, Marshall, Arkansas, Civil engineering department, Fayetteville, Arkansas, USA, 1987, pp. 5-11.
9. Pleiman L.G., "Strength modulus of elasticity, and bond of deformed FRP rods," Advanced Composites Materials in Civil Engineering Structures, Proc. of the Specialty Conference, Materials Division, ASCE, 1991, pp. 99-110.
10. Faza SS, GangaRao HVS., "Bending and bond behavior of concrete beams reinforced with plastic rebars," Transportation Research Record 1290, 1990, pp. 185-193.
11. Ehsani, M. R., Saadatmanesh H., and Tao S., "Design recommendation for bond of GFRP rebars to concrete," J of Structural Engineering, Vol. 122, No. 3, 1996, pp. 247-257.
12. Chaallal O. and Benmokrane B., "Physical and mechanical performance of an innovative glass-fiber-reinforced plastic rod," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 20, No. 2, 1993, pp. 254-268.

(접수일자 : 2008년 7월 2일)

(심사완료일자 : 2008년 4월 25일)