

강판으로 힘 보강된 철근콘크리트 보의 조기파괴하중 산정

Premature Failure Load of Reinforced Concrete Beams with Flexural Strengthened by Steel Plates

김 행 준*

김 우**

Kim, Haeng-Jun

Kim, Woo

Abstract

This paper predicts premature failure load of reinforced concrete beams by epoxy-boned partially steel plates. A parametric study is conducted to estimate premature failure load of beams such as with or without stirrups, unplated length ratio, steel and reinforcement ratio, shear span to depth ratio of reinforcement beam. By results of finite element analysis, it turned out that the unplated length played a dominant role in partially plated beams but reinforcement ratio and shear span to depth ratio effected the premature failure load. The approximate expression with regard to combined design variables is compared with experimental results. It shows closely agreement.

요 지

강판으로 부분 보강된 철근콘크리트 보의 조기파괴하중을 추정하기 위하여 변수연구를 수행하였다. 설계변수는 전단철근의 유무, 비보강길이의 비, 인장철근에 대한 보강 강판의 철근비, 전단지간 대 보강된 보의 유효깊이 비로 하였다. 유한요소해석 결과, 강판으로 부분 보강된 철근콘크리트 보의 조기파괴를 지배하는 1차적인 요인은 비보강길이이지만 보강철근비, 전단지간 대 유효깊이의 비 등도 영향을 주는 것으로 나타났다. 설계변수의 조합작용을 고려한 근사식을 기존의 실험결과와 비교한 결과 거의 일치하였다.

Keywords : Partially plated beam, Premature failure load, Plate separation

핵심 용어 : 부분 보강보, 조기파괴하중, 강판박리

* 정희원, 목포과학대학 토목과 조교수

** 정희원, 전남대학교 토목공학과 교수

E-mail : kimhj651@hanmail.net 011-9610-2651

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2005년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

강도 저하된 철근콘크리트 구조물의 내력증진을 위한 보강공법 중 강판접착공법은 시공공간이 좁고, 사용중인 구조물에도 적용이 가능하며, 인장은 물론 압축을 받는 구조물에도 적용할 수 있다는 장점으로 인해 1970년도 이후 영국, 일본, 프랑스 등에서 교량 및 건축물의 보강에 널리 적용되어 왔다.(Sharif et al, 1994) 그러나, 많은 실험 연구와 현장 적용에도 불구하고 아직까지 강판접착공법의 파괴메카니즘에 대한 정확한 규명은 부족한 상태로 남아있다. 연구자들은 주로 극한하중에 영향을 주는 주요인자로 보강길이(Oehlers, 1992) 보강판의 폭-두께비(Macdonald, 1978), 접착제의 두께, 선행균열 유무(Swamy et al, 1987), 보강판의 정착방법(Jansze, 1997) 등에 대하여 연구하였다. 이러한 연구들은 대부분 각각 개별적인 인자가 보강된 보의 극한하중에 어느 정도 영향을 미치는지에 대해서만 언급하였으며, 이들의 조합작용에 대한 영향 등은 고려되지 않았다.

Oehlers(1992)는 지점으로부터 강판단부까지의 거리(unplated length), 즉, 강판단부에 작용하는 휨모멘트와 전단력과와의 비를 변화시켜가면서 부재의 최대하중을 구하였는데 이를 표시하면 Fig 1과 같다. Oehlers는 강판 보강길이의 변화가 부재의 최대하중에 영향을 줄 것이라고 실험초기에 예상하였으나, 그림에서 보여주고 있는 바와 같이 강판길이의 영향인 $(a - L_c)/a$ 가 부재의 최대하중에 전혀 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 그러나, Jansze(1997)는 그림에 표시한 Oehlers의 실험데이터는 분산도가 심하여 비보강길이(unplated length)의 영향이 명백하게 나타나지 않는 것으로 판단하였다.

Jansze는 Kim and White(1991)가 제안한 일반적인 철근콘크리트 보의 임계균열위치를 강판으로 휨보강한 보의 단부전단균열 위치로 대체하여 계산된 가상전단지간 개념을 사용하여 공칭 최대 전단응력($\tau_{mod\ el}$)을 계산하였는데, 이를 기존의 실험결과와 비교하면 Fig. 2와 같다. 그림에서 전단지간에 대한 비보강길이의 비(L_c/a)값의 증가에 따라 부재의 파괴시

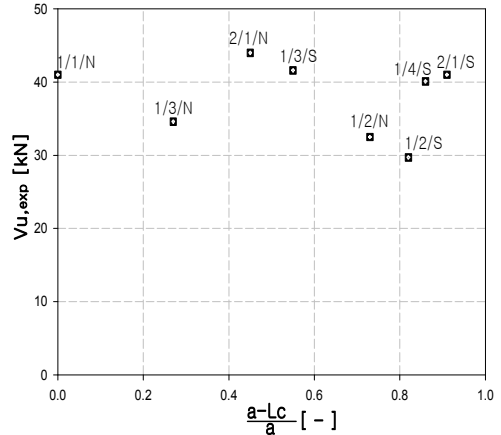


Fig. 1 비보강길이의 비에 따른 최대하중 [Oehlers, 1992]

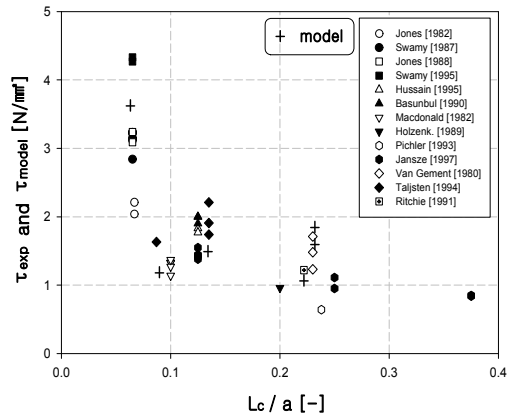


Fig. 2 비보강길이의 비에 따른 전단응력의 모델값 및 실험값 [Jansze, 1997]

콘크리트 최대전단응력(τ_{exp})은 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 Oehlers의 실험데이터 분산으로 인하여 나타나지 않았던 비보강길이의 영향이 나타났음을 의미한다고 하겠다.

그러나, 그림에서 Jansze의 제안식에 의한 모델값 및 실험값은 동일한 비보강길이에 대하여 100~120% 정도의 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 강판으로 휨 보강된 보의 최대하중은 비보강길이의 비 외에도 보강철근비, 폭-두께비, 전단지간 대 유효깊이의 비, 전단철근의 유무 등 여러 가지 요인에 의해서 영

향을 받는데 이러한 영향이 고려되지 않았기 때문에 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 비보강길이의 비인 $(L_c - a)/a$ 에 보강철근비인 $(A_s + A_p)/A_s$, 전단지간 대 유효깊이의 비인 a/d_{sp} , 그리고 전단철근의 유무에 따른 영향을 고려하여 강판으로 부분 보강된 보의 조기파괴하중을 추정하고자 한다. 이를 위하여 콘크리트의 인장균열모델을 다양하게 구현할 수 있는 비선형 유효요소 해석 프로그램인 ATENA를 사용하였으며, 기존의 강판으로 휨 보강된 국내외의 시험자료와 비교하여 제안식의 신뢰성을 검증하였다.

2. 강판으로 휨 보강된 보의 휨강도 및 전단강도

기존의 철근콘크리트 보의 인장면에 강판을 접착시켜 휨 보강할 경우, 휨강도(M_n)는 일반적인 철근콘크리트 보의 공칭휨강도를 계산하는 ACI Code를 적용하여 다음과 같은 식으로 정의할 수 있다. 여기서, 강판과 콘크리트와의 부착은 완전부착으로 가정하고, 보강된 보의 파괴는 압축측 콘크리트가 파괴되기 전에 인장철근 및 강판의 먼저 항복하는 연성파괴로 가정한다.

$$M_n = A_s \cdot f_{sv} \left(d_s - \frac{h_x}{2} \right) + A_p \cdot f_{pv} \left(d_p - \frac{h_x}{2} \right) \quad (1)$$

여기서, $h_x = \frac{A_s \cdot f_{sv} + A_p \cdot f_{pv}}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot b}$

A_s, A_p : 철근, 강판의 단면적

f_{sv}, f_{pv} : 철근, 강판의 항복강도

d_s, d_p : 압축연단에서 철근, 강판의 도심까지의 거리

한편, 강판으로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 CEB-FIP MC90 식에 의한 합성단면의 전단강도($V_{c, MC90}$)를 표시하면 아래와 같다.

$$V_{c, MC90} = \tau_{c, MC90} \cdot b \cdot d_{sp} \quad (2)$$

$$\tau_{c, MC90} = C_{m, MC90} \cdot 3 \sqrt{3 \frac{d_{sp}}{a} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d_{sp}}} \right) \cdot 3 \sqrt{\rho_{sp} \cdot f_{ck}}}$$

여기서, $\tau_{c, MC90}$: 합성단면의 전단응력

$C_{m, MC90}$: 보정계수(=0.15)

f_{ck} : 콘크리트 설계기준강도

$$d_{sp} = \frac{A_s \cdot d_s + A_p \cdot d_p}{A_s + A_p}, \quad \rho_{sp} = \frac{A_s + A_p}{b \cdot d_{sp}}$$

3. 강판으로 휨 보강된 보의 해석

3.1 시험체 모델링

강판으로 부분 보강된 보의 조기파괴하중을 추정하기 위하여 Fig. 3과 같은 시험체를 모델링하였다. 시험체는 해석편의상 전체 보의 1/2을 모델링 하였으며, 실험값과의 비교를 위하여 단면제원 및 재료상수는 Jansze(1997)의 실험값을 적용하였다.

전단지간 대 유효깊이의 영향을 고려하기 위하여 전단지간은 각각 800, 500, 350mm로 하였으며, 인장철근비를 고려하기 위하여 폭 100mm에 강판의 두께를 1.5, 3.0, 5.0mm로 사용하였다. 비보강길이의 영

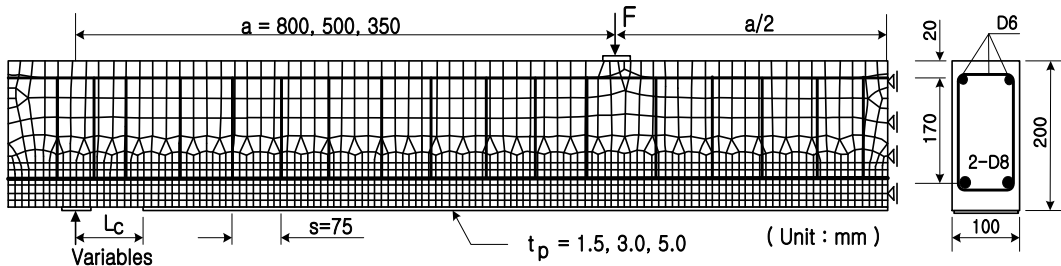


Fig. 3 강판으로 부분 보강된 보의 유효요소해석 모델

향을 고려하기 위하여 전단지간에 대한 비보강길이의 비를 0.0~62.5%로 하였다. 콘크리트와 철근 및 강판은 완전부작으로 가정한 대신에 Jansze의 실험결과를 바탕으로 하여 조기파괴하중 시점을 정의하였다.

콘크리트는 매 하중단계마다 주인장 변형률의 직각 방향으로 균열을 발생시키는 회전균열모델(rotate crack model)을 사용하였으며, 인장철근 및 강판은 완전 탄소성 재료로 모델링하였다. 해석에 사용한 각 재료의 역학적 성질은 Table 1에 표시하였다.

Table 1 해석시험체의 역학적 성질

Concrete			Internal tensile reinforcement		External steel plate	
f_c	f_t	E_c	f_{sy}	E_s	f_{py}	E_p
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
35.9	3.03	26800	592	200000	285	190000

3.2 해석결과

3.2.1 보강시험체의 하중-처짐곡선

Fig. 4는 P5×100mm강판으로 휨 보강한 시험체의 하중-처짐 곡선을 표시하고 있다. 그림에서 기준시험체(unplated beam)는 공칭휨강도에 도달하는데 반하여 비보강길이가 100mm인 보강시험체의 경우에는 합성단면의 공칭휨강도보다 낮은 하중에 조기파괴됨을

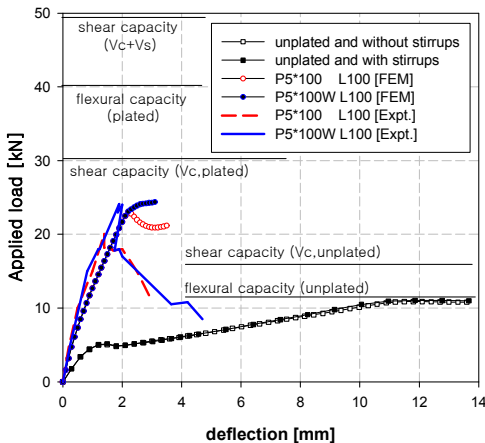


Fig. 4 보강시험체의 하중-처짐곡선

알 수 있다. 전단철근을 배근한 시험체(P5*100W)는 배근하지 않은 시험체(P5*100)와 비교하여 최대하중이 실험값에서는 3.3kN, 해석값에서는 0.5kN 정도 크게 나타났는데, 이는 전단철근이 충분한 능력을 발휘하지 못한 상태에서 파괴가 이루어졌음을 의미한다 하겠다.

3.2.2 휨 보강시험체의 조기파괴모드

강판으로 휨 보강한 시험체의 조기파괴모드는 Fig. 5에서 보여주고 있는 바와 같이 휨-전단파괴(flexural-shear failure), 단부전단파괴(plate-end shear failure), 단부박리파괴(plate separation failure, rip-off failure), 계면박리파괴(interface peeling failure)로 나타낼 수 있다.

휨-전단파괴는 Fig. 5(a)와 같이 전단철근이 배근되지 않는 보에서 지점근처까지 휨 보강을 하여 충분한 정착능력이 확보될 때 나타나며 L'Hermite(1977), Taljsten (1994) 등에 의해 연구되었다.

Fig. 5(b)의 단부전단파괴는 전단철근을 배근하지 않는 보에 강판을 부분 보강(partially plated)할 때 나타나는 파괴모드를 말한다. Sharif(1994) Husaain (1995)은 비록 스티럽이 배근된 철근콘크리트 보라 하더라도 단부전단파괴가 나타날 수 있음을 관찰하였다.

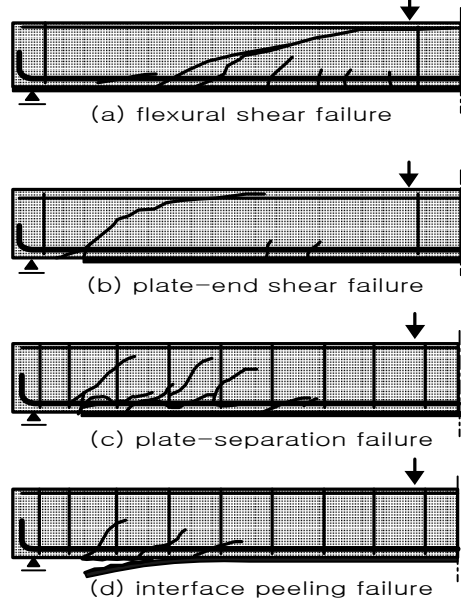


Fig. 5 강판으로 휨 보강된 보의 조기파괴모드

이들은 이러한 균열을 경사전단균열이라 하였는데, Jansze는 이를 보통의 철근콘크리트 보의 사인장균열과 구별하기 위하여 단부전단균열로 정의하였다. Fig. 5(c)는 단부박리파괴로서 강판이 콘크리트를 물고 떨어지는 파괴모드를 말하는데, 전단철근이 배근된 대부분 보강시험체의 파괴모드이다.(Oehlers, 1992)

Fig. 4(d)는 계면박리파괴로 강판과 콘크리트접착의 불량시공이나 강판단부에 프리 스트레스 앵커정착시 나타나는 파괴형태로 Pichlers(1993) 등에 의해서 연구되었다.

3.2.3 해석시험체의 조기파괴모드

본 연구를 위해서 해석한 각 시험체의 조기파괴모드도 Fig. 5 (a), (b) (c)에서 보여주고 있는 바와 같이 휨-전단파괴, 단부전단파괴, 단부박리파괴로 나타났다. 또한, 시험체에 따라서는 단부전단파괴와 동시에 단부박리파괴가 발생하기도 하였다.

Fig. 6에서 비보강길이의 증가에 따라 강판단부의 전단균열이 경사균열에서 수직균열로 점점 변화하고 있음을 알 수 있다. 이는 Oehlers(1992)가 정의한 바와 같이 비보강길이의 증가에 따라 전단박리(shear peeling) → 휨-전단박리(flexural-shear peeling) → 휨박리(flexural peeling) 순으로 파괴가 진행되고 있음을 의미하고 있다.

한편, Fig. 6에서 단부박리파괴 시험체의 파괴시점은 강판 및 인장철근의 콘크리트와의 완전부착 가정에 의한 실험값과의 차이를 수정하기 위하여 Jansze의 실험결과를 이용하였다. Jansze는 하중증가에 따른 단부박리균열의 진행과정을 관찰하였는데, 이를 표시하면 Fig. 7과 같다.

그림에서 보면 [단계 I]의 하중에서 단부균열(plate-end crack)이 발생하고(A-A), [단계 II]에서 단부균열이 단부전단균열로 성장하며(B-B), 전단철근 작용으로 더 이상 균열이 진행하지 않는 상태로 되었다.

그 결과 인장철근 위치에서 수평방향으로 박리균열이 진행되면서(C) 파괴에 이르렀다. 따라서, 유한요소 해석에서도 [단계 II]의 C상태를 단부박리파괴 시점으로 정의하여 최대하중을 결정하였다.

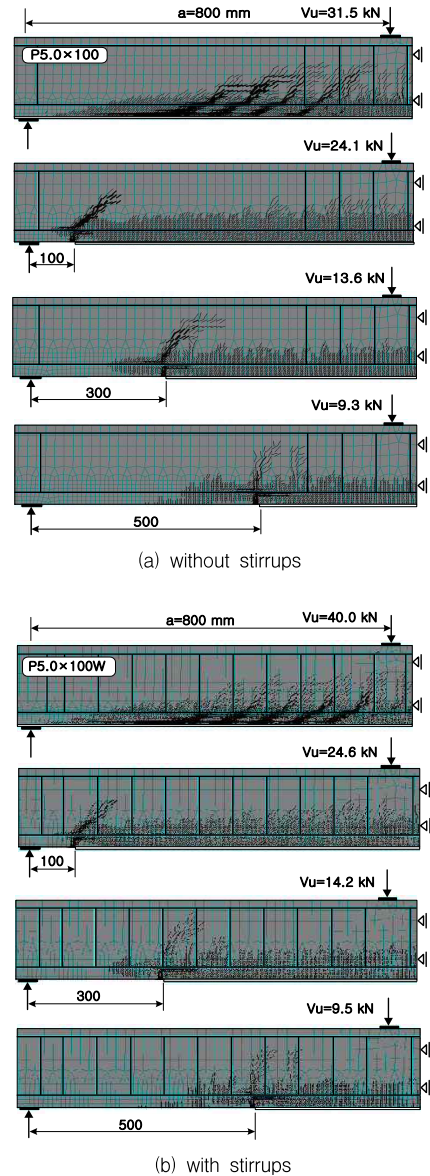


Fig. 6 전체구간 및 부분 보강된 유한요소 해석 시험체의 균열형상

3.2.4 비보강 길이, 보강단면적, 전단 철근의 유무에 따른 영향

Table 2는 전단지간 대 유효깊이의 비(a/d_s)가 4.7인 시험체의 비보강길이 및 전단철근의 유무, 그리

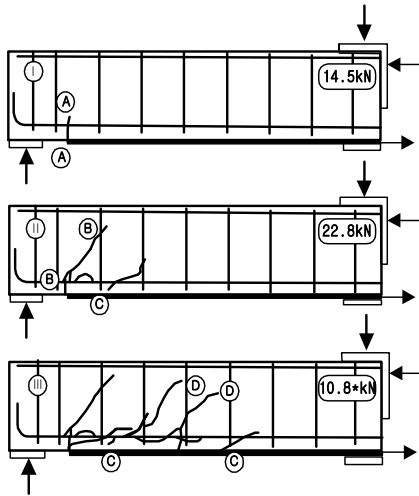


Fig. 7 보강시험체의 균열진행과정 [Jansze, 1997]

고 보강단면적에 따라 유한요소 해석에 의한 최대하중 ($V_{u,FE}$)과 Jansze의 실험에 의한 최대하중 ($V_{u,exp}$), 합성단면의 공칭휨강도 ($V_{u,fl}$), 공칭전단강도 ($V_{u,90}$)를 표시하고 있다. 유한요소 해석값에 대한 합성단면의 공칭전단강도 및 휨강도와의 비(ratio)인 (2)/(1), (3)/(1)를 살펴보면 보강단면적이 증가함에 따라 (2)/(1)<(3)/(1)으로 되어 보의 강도가 휨강도(flexural capacity)보다는 전단강도(shear capacity)에 지배를 받게됨을 알 수 있다.

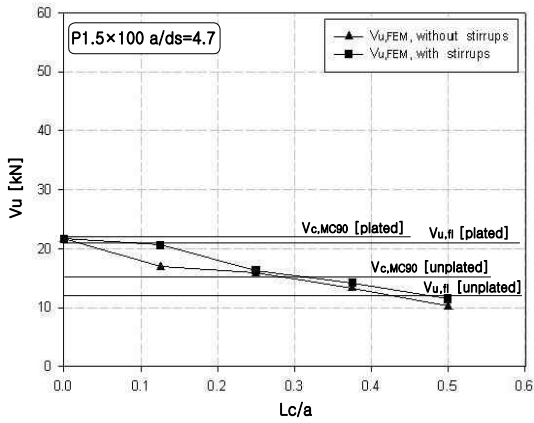
또한 비보강길이의 증가에 따라 최대하중은 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이를 그림으로 표시하면 Fig. 8과 같다.

그림에서 보면 부분 보강한 시험체의 경우 Sharif (1994)가 주목했던 바와 같이 비보강길이의 증가에 따라 강판으로 보강하지 않은 기준시험체의 전단강도보다 더 낮은 하중에 파괴됨을 알 수 있다. 한편, P1.5×100 시험체는 비보강길이의 비(Lc/a)가 0.250부터, P5.0×100 시험체의 경우에는 0.125부터 전단철근의 배근 유무와 상관없이 최대하중은 거의 비슷한 값이 나타남을 볼 수 있다. 이는 전단철근을 배근한 보통의 철근 콘크리트 보의 전단파괴 거동과 달리 강판으로 부분 보강한 시험체의 경우에는 전단철근을 배근하더라도 전단철근이 약간만 하중을 부담한 상태에

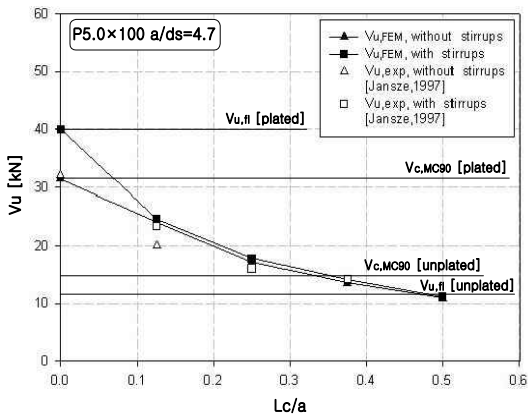
Table 2 전체 및 부분보강된 시험체의 최대 하중과 파괴 양상 (a/ds=4.7)

Test number	$V_{u,exp}$ [kN]	$V_{u,FE}$ (1) [kN]	$V_{c,90}$ (2) [kN]	$V_{u,fl}$ (3) [kN]	(2)/(1)	(3)/(1)	mode of failure
P1.5×100-Lc000	-	21.7	22.1	21.2	1.02	0.98	flexure
P1.5×100-Lc100	-	16.9	22.1	21.2	1.32	1.25	shear
P1.5×100-Lc200	-	15.9	22.1	21.2	1.39	1.33	p.e.sh.+sepa
P1.5×100-Lc300	-	13.3	22.1	21.2	1.67	1.59	p.e.sh.+sepa
P1.5×100-Lc400	-	10.2	22.1	21.2	2.17	2.08	p.e.shear
P1.5×100-Lc500	-	10.0	22.1	21.2	2.22	2.13	p.e.shear
P1.5×100W-Lc000	-	21.7	22.1	21.2	1.02	0.98	flexure
P1.5×100W-Lc100	-	20.6	22.1	21.2	1.08	1.03	flexure
P1.5×100W-Lc200	-	16.3	22.1	21.2	1.35	1.30	p.e.sh.+sepa
P1.5×100W-Lc300	-	14.2	22.1	21.2	1.56	1.49	p.e.sh.+sepa
P1.5×100W-Lc400	-	11.5	22.1	21.2	1.92	1.85	separation
P1.5×100W-Lc500	-	9.9	22.1	21.2	2.22	2.13	separation
P3.0×100-Lc000	26.7	26.6	26.4	30.0	0.99	1.12	shear
P3.0×100-Lc100	20.9	23.5	26.4	30.0	1.12	1.28	p.e.shear
P3.0×100-Lc200	16.7	16.9	26.4	30.0	1.56	1.79	p.e.shear
P3.0×100-Lc300	-	13.8	26.4	30.0	1.92	2.17	p.e.shear
P3.0×100-Lc400	-	11.6	26.4	30.0	2.27	2.56	p.e.shear
P3.0×100-Lc500	-	9.5	26.4	30.0	2.78	3.13	p.e.shear
P3.0×100W-Lc000	-	30.9	26.4	30.0	0.85	0.97	flexure
P3.0×100W-Lc100	-	24.6	26.4	30.0	1.08	1.22	separation
P3.0×100W-Lc200	-	18.3	26.4	30.0	1.45	1.64	separation
P3.0×100W-Lc300	-	13.6	26.4	30.0	1.92	2.22	separation
P3.0×100W-Lc400	-	11.0	26.4	30.0	2.38	2.70	separation
P3.0×100W-Lc500	-	9.1	26.4	30.0	2.94	3.33	separation
P5.0×100-Lc000	32.1	31.5	30.7	40.3	0.97	1.28	shear
P5.0×100-Lc100	20.1	24.1	30.7	40.3	1.27	1.67	p.e.shear
P5.0×100-Lc200	16.1	17.2	30.7	40.3	1.79	2.33	p.e.shear
P5.0×100-Lc300	-	13.6	30.7	40.3	2.27	2.94	p.e.shear
P5.0×100-Lc400	-	10.9	30.7	40.3	2.78	3.70	p.e.shear
P5.0×100-Lc500	-	9.3	30.7	40.3	3.33	4.35	p.e.shear
P5.0×100W-Lc000	-	40.0	30.7	40.3	0.77	1.00	flexure
P5.0×100W-Lc100	23.4	24.6	30.7	40.3	1.25	1.64	separation
P5.0×100W-Lc200	16.1	17.8	30.7	40.3	1.72	2.27	separation
P5.0×100W-Lc300	14.3	14.2	30.7	40.3	2.17	2.86	separation
P5.0×100W-Lc400	-	11.2	30.7	40.3	2.78	3.57	separation
P5.0×100W-Lc500	-	9.5	30.7	40.3	3.23	4.17	separation

서 단부바라피파괴가 발생하기 때문에 전단철근을 배근하지 않는 시험체와 비교하여 최대하중에는 큰 차이가 없었던 것으로 판단된다. 이러한 경향은 보강철근비 (A_p/A_s)가 클수록 더욱 낮은 비보강길이의 비(Lc/a)의 단계에서 나타났다. 이를 3차원 그래프를 이용하여 표시하면 Fig. 9와 같다. 그림에서 보면 비보강길이의 비가 증가할수록, 또 보강철근비가 증가함에 따라 보의 공칭전단강도에 대한 최대하중의 비가 낮아지고 있음을 알 수 있다.



(a) P1.5×100



(b) P5.0×100

Fig. 8 비보강길이에 따른 최대하중의 결과

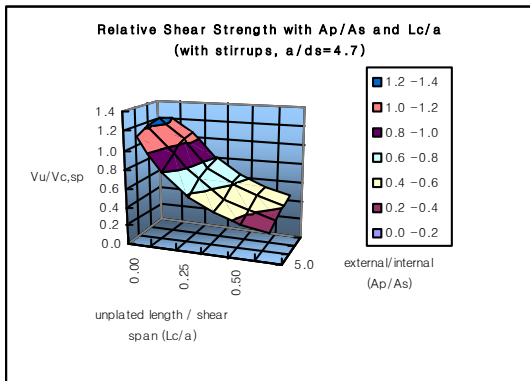


Fig. 9 비보강길이, 보강단면적에 대한 최대 하중

4. 힘 보강된 보의 조기파괴하중

4.1 비보강길이, 보강단면적, 전단지간 대 유효깊이의 비를 고려한 파괴하중

강관으로 부분 보강된 철근콘크리트 보의 조기파괴 하중을 산정하기 위하여 Fig. 10과 같이 그래프의 횡축에는 비보강길이의 영향인 $(a-Lc)/a$ 에 보강철근비의 영향인 $(A_s + A_p)/A_s$ 를 지수승으로 하여 표시하였다. 종축에는 MC90의 공칭전단강도에 대한 최대하중 비인 $V_u/V_{c,MC90}$ 을 표시하였다.

그림에서 보면 $(\frac{a-Lc}{a})^{\frac{A_s+A_p}{A_s}}$ 의 값이 감소함에 따라 즉, 비보강길이가 보강단면적이 증가할수록 최대하중이 감소하고 있음을 알 수 있다.

또한 $(\frac{a-Lc}{a})^{\frac{A_s+A_p}{A_s}}$ 값의 감소에 따라 전단지간 대 유효깊이에 따른 최대하중의 편차가 점점 감소하는데, 이는 비보강길이가 길어지고 보강단면적이 과다할 경우에 전단지간 대 유효깊이에 따른 영향이 크지 않다는 것을 의미한다. 반대로 지점근처까지 보강하여 비보강길이가 짧아지고, 보강단면적이 작으면 전단지간 대 유효깊이에 따른 영향이 크게 나타남을 의미하고 있다.

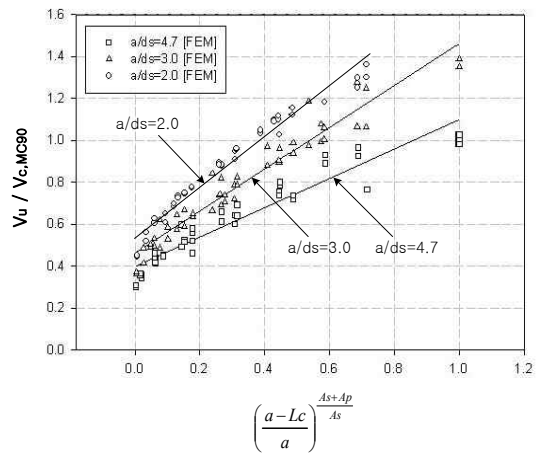


Fig. 10 비보강길이, 보강단면적, 전단지간 대 유효깊이의 영향이 고려된 상대하중

비보강깊이, 보강단면적, 전단지간 대 유효깊이의 비를 고려한 보강시험체의 조기파괴하중을 산정하기 위하여 Fig. 11과 같이 $a/ds=3.0, 4.7$ 의 경우인 시험체 대하여 회귀곡선(regression curve)을 표시하였다. 강관으로 휨 보강한 대부분의 선행 연구자들의 시험체가 $a/ds=3.0\sim 5.0$ 사이에 있었으므로 $a/ds=2.0$ 인 시험체는 제외하였다. 회귀곡선의 상한치와 하한치 곡선내의 데이터는 전체데이터의 95%를 포함하고 있다. 그림에서 보면 Fig. 11(a)의 상관계수 (R^2)는 0.776, (b)의 상관계수는 0.855로 공칭전단강도 식에 의한 최대

하중비의 회귀곡선에 대한 신뢰도가 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 강관으로 부분 보강된 보의 최대강도는 휨강도보다는 강관단부의 전단균열이 발생할 때의 전단저항에 지배를 받게 되므로(Jansze, 1997) 보강된 보의 공칭전단강도를 기준으로 조기파괴하중을 산정하는 것이 신뢰성도 높고 합리적이라 할 수 있다. 따라서, 강관으로 휨 보강된 보의 조기파괴하중을 MC90의 전단강도를 기준으로 하여 다음과 같은 회귀곡선식으로 제안하고자 한다.

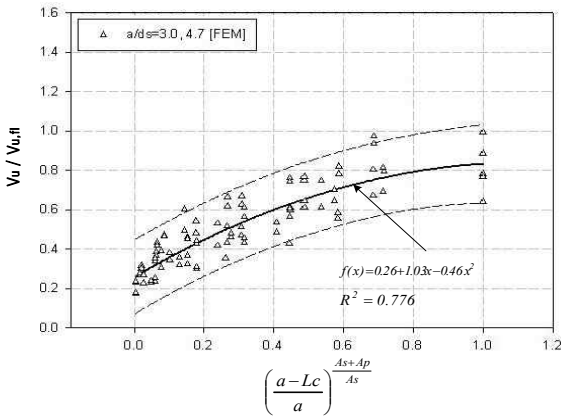
$$f(x) = 0.37 + 1.40 \cdot x - 0.62 \cdot x^2 \quad (3)$$

여기서, $f(x) = V_{u, applied} / V_{c, MC90}$

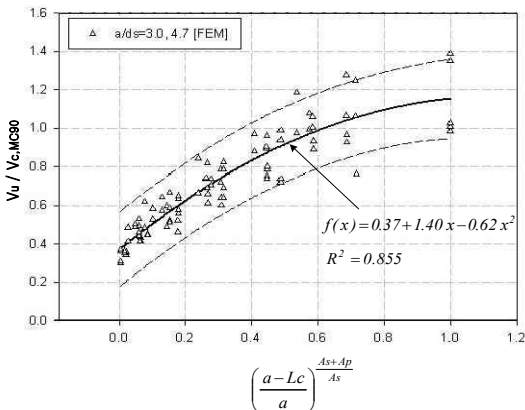
$$x = \left(\frac{a - Lc}{a} \right) \frac{As + Ap}{As}$$

4.2 제안된 극한강도 식의 검증

식(3)에 의해 제안된 강관으로 휨 보강된 보의 극한강도를 검증하기 위하여 Table 3과 같이 국내·외 연구자들의 실험자료를 이용하였다. 한편, Fig. 12는 유한요소해석 결과와 이를 이용하여 제안한 회귀곡선식에 국내의 연구자들의 실험결과를 표시한 것이다.



(a) Maximum load over flexural strength



(b) Maximum load over shear strength

Fig. 11 비보강깊이, 보강단면적, 전단지간 대 유효깊이의 영향이 고려된 회귀곡선

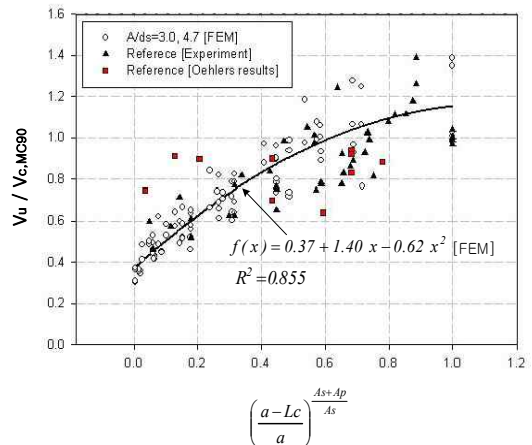


Fig. 12 제안식과 실험결과와의 비교

Table 3 강관으로 휨 보강된 시험체의 실험결과

Reference	Test No.	$\frac{a}{d_s}$	A_v [%]	$\frac{L_c}{a}$ [%]	$V_{u,exp}$ (1) [kN]	$V_{u,fl}$ (2) [kN]	$V_{c,MC30}$ (3) [kN]	(1)/(2)	(1)/(3)	Reference	Test No.	$\frac{a}{d_s}$	A_v [%]	$\frac{L_c}{a}$ [%]	$V_{u,exp}$ (1) [kN]	$V_{u,fl}$ (2) [kN]	$V_{c,MC30}$ (3) [kN]	(1)/(2)	(1)/(3)
Jones (1982)	URB2	5.8	57	6.7	20.0	17.5	19.0	1.14	1.05	Jansze (1997)	S-P8	4.7	-	12.5	20.2	31.0	27.0	0.65	0.75
	URB3	5.8	57	6.7	27.5	24.7	26.4	1.11	1.04		S-P9	4.7	-	25.0	16.9	31.0	27.0	0.55	0.63
	URB4	5.8	57	6.7	29.0	26.8	26.1	1.08	1.11		S-P10	4.7	-	0.0	26.3	29.9	26.6	0.88	0.99
	URB5	5.8	57	6.7	26.5	38.3	31.9	0.69	0.83		S-P11	4.7	-	12.5	20.7	29.9	26.6	0.69	0.78
Swamy (1987)	203	3.5	57	6.5	135	110.8	64.9	1.22	2.08		S-P12	4.7	-	25.0	20.6	29.9	26.6	0.69	0.77
	204	3.5	57	6.5	135	123.7	69.2	1.09	1.95		S-P13	4.7	-	0.0	32.1	40.3	30.8	0.80	1.04
	205	3.5	57	6.5	107	144.7	77.0	0.74	1.39		S-P14	4.7	-	12.5	20.1	40.3	30.8	0.50	0.65
Jones (1988)	F11	3.5	57	6.6	120	106.3	59.4	1.13	2.02		S-P15	4.7	-	25.0	16.1	40.3	30.8	0.40	0.52
	F31	3.5	57	6.6	91.0	138.0	72.2	0.66	1.26		S-H1	4.3	-	12.5	38.1	46.9	41.0	0.81	0.93
Oehlers (1992)	1/2/S	3.74	-	18.2	29.7	80.0	46.4	0.37	0.64		S-H2	4.3	-	12.5	40.6	45.7	39.5	0.89	1.03
	1/2/N	3.74	-	27.3	32.5	80.0	46.4	0.41	0.70		S-H3	4.3	-	12.5	40.3	45.8	39.5	0.88	1.02
	1/3/S	3.74	-	45.5	41.6	80.0	46.4	0.52	0.90	S-H4	4.3	-	12.5	34.4	57.3	44.2	0.60	0.78	
	1/3/N	3.74	-	72.7	34.6	80.0	46.4	0.43	0.75	순철대 보코시 (1994)	S2*130*1.9	4.5	157	10.0	50.1	37.8	35.0	1.33	1.43
	1/4/S	3.74	-	9.1	41.0	80.0	46.4	0.51	0.88		S2*130*1.5	4.5	157	25.0	36.8	37.8	35.0	0.97	1.05
	2/1/N	3.74	-	54.5	44.0	80.0	48.2	0.55	0.91		S2*130*0.8	4.5	157	60.0	25.0	37.8	35.0	0.66	0.71
	2/1/S	3.74	-	13.6	40.1	80.0	48.2	0.50	0.83		S3*130*1.5	4.5	157	25.0	37.2	43.2	37.9	0.86	0.98
	2/2/S	3.74	25	13.6	43.8	80.0	46.6	0.55	0.94		S4*130*1.5	4.5	157	25.0	33.3	46.8	39.7	0.71	0.84
	2/3/S	3.74	57	13.6	45.2	82.7	48.1	0.55	0.94	S2*65*1.5	4.5	157	25.0	38.7	31.3	31.1	1.24	1.24	
2/4/S	3.74	57	13.6	44.9	82.7	48.8	0.54	0.92	S4*65*1.5	4.5	157	25.0	33.3	36.2	34.2	0.92	0.97		
5/1/S	3.74	57	27.3	43.9	83.6	48.8	0.53	0.90	오용복 (1997)	G1-S	3.5	57	7.1	50.2	46.7	40.6	1.07	1.24	
Hussain (1995)	FRB3	3.7	57	12.5	37.5	29.4	28.4	1.28		1.32	G2-CON-15	3.5	57	7.1	44.1	46.2	39.6	0.95	1.11
	FRB5	3.7	57	12.5	30.0	33.6	30.3	0.89		0.99	G2-CON-30	3.5	57	7.1	47.8	47.8	43.5	1.00	1.10
	FRB7	3.7	57	12.5	29.0	41.6	33.7	0.70		0.86	G2-CON-40	3.5	57	7.1	41.7	60.1	51.1	0.69	0.82
Jansze (1997)	A-L1	4.7	57	12.5	23.4	40.3	31.0	0.58		0.75	G2-SR-39	3.5	57	7.1	47.2	55.5	42.5	0.85	1.11
	A-L3	4.7	57	25.0	16.1	40.3	31.0	0.40		0.52	G2-SR-61	3.5	57	7.1	49.7	68.4	44.6	0.73	1.11
	A-L4	4.7	57	25.0	18.9	40.3	31.0	0.47		0.61	G2-SR-88	3.5	57	7.1	55.1	72.1	46.8	0.76	1.18
	A-L5	4.7	57	37.5	14.5	40.3	31.0	0.36		0.47	G2-THK-1	3.5	57	7.1	25.1	28.4	31.5	0.88	0.80
	A-L6	4.7	57	37.5	14.3	40.3	31.0	0.35	0.46	G2-THK-5	3.5	57	7.1	43.5	63.0	47.1	0.69	0.92	
	S-P1	4.7	-	0.0	22.5	23.0	23.2	0.98	0.97	G2-THK-7	3.5	57	7.1	52.7	77.3	52.1	0.68	1.01	
	S-P2	4.7	-	12.5	20.6	23.0	23.2	0.90	0.89	G2-LEN-15	3.5	57	43.0	23.3	46.7	40.6	0.50	0.57	
	S-P3	4.7	-	25.0	17.8	23.0	23.2	0.77	0.77	김규진 (1998)	SP10-N10	2.6	157	0.0	66.2	69.1	50.4	0.96	1.31
	S-P4	4.7	-	0.0	26.7	29.8	26.6	0.90	1.00		SP8-N10	2.6	157	35.0	41.2	69.1	50.4	0.60	0.82
	S-P5	4.7	-	12.5	20.9	29.8	26.6	0.70	0.97		SP6-N10	2.6	157	70.0	30.1	69.1	50.4	0.44	0.60
박용재 (1999)	S-P6	4.7	-	25.0	16.7	29.8	26.6	0.56	0.63	S3-150	4.0	157	28.0	45.2	45.4	49.7	1.00	0.91	
	S-P7	4.7	-	0.0	26.7	31.0	27.0	0.86	0.99	S3-190	4.0	157	5.5	60.0	45.4	49.7	1.32	1.21	

Fig. 12에서의 실험결과는 Table 3에서 (1)/(2)≥1.0, 즉, 휨파괴를 제외한 조기파괴의 경우만을 적용하였다.

Fig. 12에서 보던 Oehlers 실험결과를 비롯한 몇몇 실험결과와 큰 편차를 제외하고는 대부분 ±20% 정도의 범위 내에서 제안된 식(3)의 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 강관으로 부분 보강한 철근콘크리트 보의 조기파괴(premature failure)를 지배하는 1차적인 요인은 비보강길이이지만 그 외에도 보강철근비, 전단지간 대 유효깊이의 비 등에 영향을 받는다는 사실에 주목하여 이들의 조합작용을 고려한 조기파괴하중을 산정하는 제안식을 도출하였다.

이를 위하여, 비보강길이, 보강단면적, 전단지간 대

유효깊이의 비, 전단철근의 유무를 변수로 하여 유한 요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 강관으로 부분 휨 보강된 보에서 전단 철근을 배치하지 않는 보의 주된 파괴모드는 단부전단파괴로 나타나며, 전단철근을 배근한 보의 주된 파괴모드는 단부박리파괴로 나타났다.
- 2) 보의 전체구간을 보강한 경우에는 전단철근의 유무가 최대하중에 큰 영향을 주지만, 부분 보강한 시험체의 경우에는 전단철근의 유무에 따른 최대하중의 차이가 크게 나타나지 않고 거의 비슷하게 나타났다. 이는 전단철근이 배근된 보통의 철근콘크리트 보의 전단파괴 거동과는 달리, 강관으로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 경우에는 전단철근을 배근하더라도 전단철근이 약간만 하중을 부담하는 상태에서 단부박리파괴가 발생하기 때문으로

판단된다.

참고문헌

- 3) 부분 보강한 시험체는 비보강길이가 증가함에 따라 경사균열의 각이 보의 축에 직각으로 되어가면서 단부전단파괴나 단부박리파괴함으로써 Oehlers가 정의한 전단박리(shear peeling)→휨-전단 박리(flexural shear peeling)→휨박리(flexural peeling) 순으로 파괴가 진행되었다.
- 4) 유한요소해석 결과를 이용하여 비보강길이, 보강철근비, 전단지간 대 유효깊이의 영향을 고려하여 강판으로 부분 보강된 보의 조기파괴하중을 추정하기 위한 아래와 같은 회귀곡선식을 제안하였다.

$$f(x) = 0.37 + 1.40 \cdot x - 0.62 \cdot x^2 \quad (3)$$

여기서, $f(x) = V_{u, applied} / V_{c, MC90}$

$$x = \left(\frac{a - Lc}{a} \right) \frac{As + Ap}{As}$$

단, $a/d_s \geq 3.0$

- 5) 유한요소해석 결과에 의한 제안식과 국내·외 실험자료와 비교한 결과, Oehlers를 비롯한 몇몇 연구자들의 실험값을 제외하고는 대체적으로 실험값과 제안값의 차이가 $\pm 20\%$ 로 나타나 강판으로 부분 보강한 휨 보강시험체의 조기파괴하중을 추정하는데 위의 식(3)을 사용할 수 있을 것으로 판단되었다

감사의 글

이 연구는 건설교통부에서 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구 개발사업(과제번호:04 핵심기술 CO2-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

1. 오용복. "철근콘크리트 보의 외부보강판 접착으로 인한 보강효과에 관한 연구", 서울대 박사학위논문, 1997. 8.
2. 최완철, 홍기섭, 홍영균, 신영수. "에폭시 접착 강판보강 철근콘크리트보의 역학적 거동에 관한 연구", 숭실대 생산기술연구소, 1994. 10.
3. ATENA. Cervenka Consulting, 2001.
4. Husaain, M., Sharif, A., Basunbul, I.A., Baluch, M.H. and Al-Sulaimani, G.J. "Flexural behavior of precracked reinforced concrete beams strengthened externally by steel plates". ACI Structural Journal, Vol 92, No 1, Jan-Feb 1995, pp.14-22.
5. Jansze, W. "Strengthening of reinforced concrete members bending by externally bonded steel plates", Dissertation, Delft University of Technology, August 1997.
6. Jones, R., Swamy, R.N. and Charif, A. "Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates", The Structural Engineer, Volume 66, No 5, March 1988, pp.85-94.
7. Kim, W. & White, R.N. "Initiation of shear cracking in reinforced concrete beams with no web reinforcement, ACI Structural Journal, Vol 88, No 3, 1991, pp.301-308.
8. Oehlers, D.J. "Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits", Journal of Structural Engineer, Vol 118, No 8, August 1992, pp.2023-2038.
9. Sharif, A., Al-Sulamani, G.J., Baluch, M.H. and Ghaleb, B.N. "Strengthening of initially loads reinforced concrete beams using FRP plates". ACI Structural Journal, Vol 91, No 2, March-April 1994, pp.160-168.

(접수일자 : 2004년 12월 2일) (급행)