

# 鋼纖維를 混入한 鐵筋콘크리트 보의 剪斷舉動에 關한 研究

## A Study Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Mixed Steel Fiber

郭桂煥\* · 李光明\*\*

Kwak, Kae Hwan · Lee Kwang Myong

### Abstract

Recently the use of steel fibers has been increased in flexural members and columns of concrete structures subjected to cyclic loadings; such as bridge decks, highway roads, runway of airport, buildings, etc.. However only a few experimental tests have been carried out under fatigue loading.

In the present study, the reinforced concrete beams with 1% and 2% steel fiber volume fraction are investigated with and without stirrups. It has been found that in fatigue tests, the failure of the beam is usually due to breaking of fibers rather than fiber pull-out.

A comparison of experiments and numerical analysis using the nonlinear F.E.M. program (ADINA) is also presented herein.

### 요 지

최근에 피로하중을 받는 보나 기둥 구조물에 강섬유의 사용이 증가하는 추세이다. 예로서 교량, 고속도로, 비행장 그리고 빌딩 등이다. 본 연구에서는 강섬유를 혼입한 철근 콘크리트 보에 대하여 정적실험과 피로실험을 중점적으로 실시했다.

본 연구의 대상모형은 강섬유를 1% 또는 2% 포함한 경우, 스티럽이 있는 경우와 없는 경우로 구별하였다. 피로실험에 있어서 보의 파괴는 강섬유의 뽑힘이 아니라 절단에 있다는 사실을 확인할 수 있었으며, 강섬유 보강 콘크리트보의 해석적 적용성을 검토하기 위하여 실험의 결과치와 수치해석을 비교했는데 수치해석은 비선형 유한요소 프로그램(ADINA)을 사용했다.

### 1. 序 論

섬유를 사용한 구조물의 실용성을 높이고저 부단한 노력을 하고 있다.<sup>(1)</sup>

대표적인 예로 Batson은 1.25"×0.014" 섬유를

용적 2.98%로 사용할 때 피로강도는 초기 균열강도의 74~83%이며 후 균열강도는 초기 균열강도보다 훨씬 크고 빔의 파손은 섬유의 절단이 아니라 섬유의 뽑힘에 있다고 했다.<sup>(2)</sup>

Kormeling은 섬유를 첨가하므로써 보의 피로수명과 정적 극한강도를 증가시켜 준다고 했으며,<sup>(3)</sup> Sharma는 섬유 콘크리트의 정적 전단강도를 해석할

\* 정회원 · 圓光大學校 工科大學 土木工學科 副教授

\*\* 정회원 · 美國M.I.T 工科大學 土木工學科 博士過程

수 있도록 제안하기도 했다.<sup>(4)</sup> 그래서, 본 연구에서는 다음과 같은 사항을 중점적으로 연구했다. 비선형 해석과 정적 및 피로실험이다. 정적 및 피로실험에서는 강섬유, 철근 콘크리트의 강도(압축, 인장), 하중-변형을 곡선, 응력-반복횟수에 관한 사항, 정적 실험과 피로실험에서 스티럽의 변형률관계, 정적 실험과 피로실험에서의 균열 성장과정, 하중과 중앙 처짐관계, 전단 극한강도 등이다.

섬유에는 강섬유, 유리섬유, 포리에틸렌섬유 등이 있는데 이중 강섬유는 직선 섬유, 양끝에 갈고리가 있는 섬유, 양끝에 패들이 있는 섬유로 구분된다. 그러나 본 연구에서는 양끝에 갈고리가 있는 강섬유를 사용하였다.

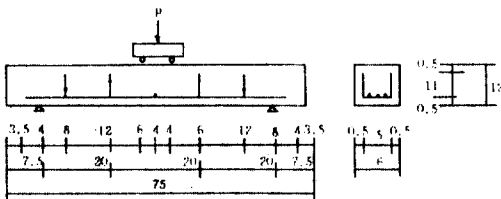
본 연구를 통하여 강섬유 철근 콘크리트 보 콘크리트 구조물의 취약점인 취성파괴를 보완할 수 있고 저온에서의 초기양생에 바람직한 구조물로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 실험계획

강섬유 철근콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)보의 크기는 폭 6", 깊이 12" 그리고 길이는 75"(15 cm×30 cm×190 cm)이다. 본 실험은 4점 재하 실험으로서 재하간격은 4"(10 cm)이다. 여기에 사용된 사용부재의 수량과 명칭은 표 1과 같고 스트레인 게이지의 부착위치 및 부재의 제원은 그림 1과 같다.

시멘트는 Type I인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 굵은 골재는 3/8"(10 mm)의 크기, 비중은 2.62이다. 잔 골재의 비중은 2.5이고 섬유의 형상비는

$$100 \left( \frac{2.0}{0.02} = 100 \right) \text{이다.}$$



Note: · denotes the location of strain gauge in stirrup

그림 1. Beam cross section & Loading arrangements (unit: inch)

본 실험에 사용한 섬유는 양끝에 갈고리가 있는 강섬유를 사용하여 용적의 1%와 2%를 첨가한 경우, 스티럽을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우로 구별하였다. 실험방법은 정적실험과 피로실험으로 구별하였으며 각각의 경우 8개씩을 제작하였다.

사용재료의 성질과 배합콘크리트의 성분은 표 2, 3과 같다. 콘크리트의 압축강도는 KS규준에는  $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 를 사용하는 것이 원칙이지만 본 연구에서는 부재거동을 분석하는 것이므로  $10 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 의 공시체를 100개 만들어 재령에 따라 강도를 측정하였다. 강도를 측정한 결과 섬유 1%인 경우의 평균압축강도는  $\sigma_{28} = 338 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma_{90} = 411 \text{ kg/cm}^2$ 이고, 섬유 2%인 경우의 평균압축강도는  $\sigma_{28} = 353 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma_{90} = 425 \text{ kg/cm}^2$ 이었다. 또한, 평균인장강도는 KS규준에 의하여 실험한 결과 섬유 1% 용적인 경우에  $61 \text{ kg/cm}^2$ , 섬유 2% 용적인 경우에  $68 \text{ kg/cm}^2$ 이었다. 유효높이에 대한 전단지간의 비는 2.5인 짧은 보로 국한하기로 했다. 보를 습윤양생할 때 섬유 1% 함유한 보는 초결이 시작되면서부터 온도가 점차 증가하다가 18시간 후에 최대인  $38^\circ\text{C}$ 이었고, 섬유 2% 함유한 보는 20시간 후에 최대가 되어  $40^\circ\text{C}$ 에 이르게 되었는데 공히 양생이 시작되어 24시간 후에는 실온으로 되었다.

## 3. 정적실험

하중을 증가시킴에 따라서 부재의 균열 발생과정은 초기에는 순수 휨 구간에서 인장균열이 미세하게 발전하였다. 계속 하중을 증가시킴에 따라서 어느 순간에 이르러 사인장균열이 발생하였다. 이러한 사인장균열은 하중의 증가에 따라서 어느 순간에 이르러 사인장균열이 발생하였다. 이러한 사인장균열은 하중의 증가에 따라서 스티럽이 없는 경우에는 재하점 방향과 지지점 방향으로 약  $45^\circ$ 의 경사로서 발전되었다. 이때 전단 균열하중과 극한 전단하중은 섬유의 함유량에 따라서 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있었다. 이것을 선형탄성이론에 의해 구한 변형률 값과 실험값은 거의 일치하고 있다.

스티럽을 포함한 보의 경우에도 좌, 우 거의 같은 모양으로 균열되는데 각각의 경우 스티럽과 스티럽의 사이에서 거의  $45^\circ$  경사로 서너 군데씩 균열성

### II 1. Specimen details

Beams	Specimen beam size (inch <sup>3</sup> )	Tensile steel bars (inch)	Vertical steel bar (stirrup, inch)	Fiber size (inch)	Fiber content presentc (volume)	$\frac{a}{d}$	Specimen cylinder (inch)
IAS1	6.0×12.0×75.0 (15×30+190 cm)	#6, 0.75 (1.905 cm)	NONE	.02×2.00 (0.5×5 cm)	1%	1-2.5	4×8 (10×20 cm)
IAS2	∕	∕	∕	∕	∕	∕	∕
IIAS1	∕	∕	#3, 0.375 (1.905 cm)	∕	∕	∕	∕
IIAS2	∕	∕	∕	∕	∕	∕	∕
IIAS3	∕	∕	#4, 0.5 (1.27 cm)	∕	∕	∕	∕
IIAS4	∕	∕	∕	∕	∕	∕	∕
IAF1	∕	∕	NONE	∕	∕	∕	∕
IAF2	∕	∕	∕	∕	∕	∕	∕
IIAF1	∕	∕	#3, 0.375 (1.905 cm)	∕	∕	∕	∕
IIAF3	∕	∕	#4, 0.5 (1.27 cm)	∕	∕	∕	∕
IIAF4	∕	∕	∕	∕	∕	∕	∕
IBS1	∕	∕	NONE	∕	2%	∕	∕
IIBS1	∕	∕	#3, 0.375 (1.905 cm)	∕	∕	∕	∕
IBF1	∕	∕	NONE	∕	∕	∕	∕
IBF2	∕	∕	∕	∕	∕	∕	∕
IIBF1	∕	∕	#3, 0.375 (1.905 cm)	∕	∕	∕	∕

Remarks: I: Tensile steel bars+ No stirrup+ Fiber S1: Static test one  
 II: Tensile steel bars+ Stirrup+ Fiber S2: Static test two  
 A: Fiber content present by volume 1% F: Fatigue test  
 B: Fiber content present by volume 2% F1, F2: Fatigue test one, two  
 S: Static test a: Shear span  
 d: Effective depth of beam

### II 2. Reinforcing bars

Bar Size	Nominal Area (inch <sup>2</sup> )	Minimum yield stress of steel, fy(KSi)	Ultimate tensile strength(KSi)	Modulus of elasticity of steel(kg/cm <sup>2</sup> )
#3	0.11 (0.71 cm <sup>2</sup> )	44 (3,100 kg/cm <sup>2</sup> )	71 (5,002 kg/cm <sup>2</sup> )	2.04×10 <sup>6</sup>
#4	0.20 (1.29 cm <sup>2</sup> )	45 (3,170 kg/cm <sup>2</sup> )	75 (5,284 kg/cm <sup>2</sup> )	2.04×10 <sup>6</sup>
#6	0.44 (2.84 cm <sup>2</sup> )	44 (3,100 kg/cm <sup>2</sup> )	72 (5,073 kg/cm <sup>2</sup> )	2.04×10 <sup>6</sup>

표 3. Concrete mix proportion

Maximum size of aggregate (inch) (10 mm)	Slump (inch)		Water (lb) (13.4 kg)	Cement Type I (lb) (26.8 kg)	Sand (lb) (36.35 kg)	Aggregate (lb) (49.55 kg)	Fiber 1% (lb) (3.45 kg)	Fiber 2% (lb) (7.18 kg)	Strength, $\sigma_{28}$ (psi)	
	Fiber (1%) (12.7 cm)	Fiber (2%) (2.54 cm)							Fiber 1% (390 kg/cm <sup>2</sup> )	Fiber 2% (353 kg/cm <sup>2</sup> )
3/8 (10 mm)	5 (12.7 cm)	1 (2.54 cm)	29.5 (13.4 kg)	53.61 (26.8 kg)	72.7 (36.35 kg)	109 (49.55 kg)	7.5 (3.45 kg)	15.8 (7.18 kg)	4797 (390 kg/cm <sup>2</sup> )	5010 (353 kg/cm <sup>2</sup> )

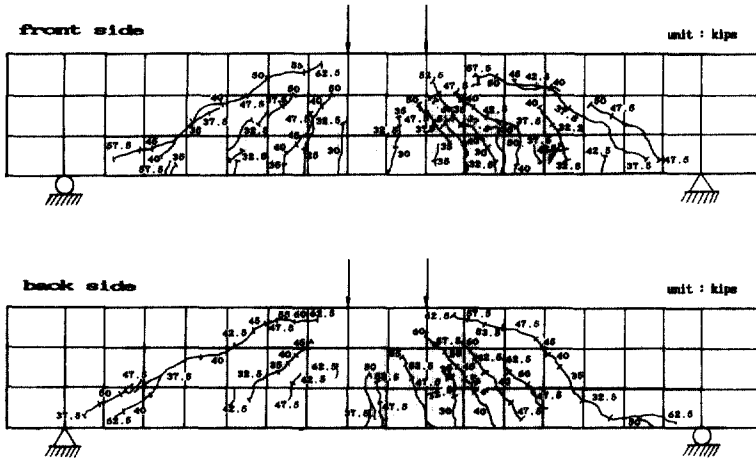


그림 2. Crack growth pattern (IAS2)

장이 발전되었다. 균열 발생과정에서 가장 윤곽이 뚜렷한 곳은 지지점에서 2/3d 만큼 떨어져서 재하점을 향하는 사인장 균열이다.

하중의 증가에 따른 부재의 균열 발생과정은 그림 2와 같다.

스터립의 변형률은 사인장 균열의 발생과 밀접한 관계에 있으며 휨 균열과는 거의 무관한 것으로 나타났다.

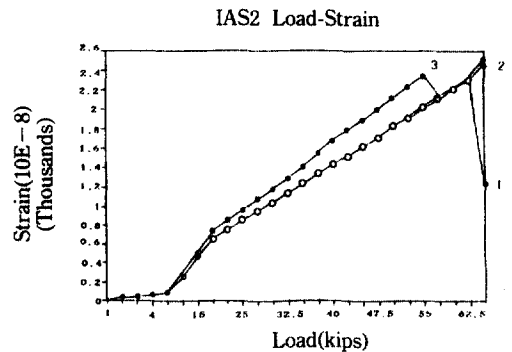
하중과 스테립의 변형을 관계는 그림 3과 같다.

하중과 중앙처짐은 비선형 증가이다. 초기균열에 파괴되지 않고 후균열에 더욱 많은 중앙처짐이 있었다. 대단히 큰 연성적임을 알 수 있다.

하중과 중앙처짐은 관계는 그림 4와 같다. 정적 실험의 결과를 정리하면 표 4와 같다.

#### 4. 피로실험

피로실험에서의 최소값은 25 Kips(11.364 ton)으로 거의 일정하게 유지시키면서 200~500 CPM 범위에서



Note: 1, 2 and 3 indicate the strain gauge No. as shown in Fig. 1 and 6

그림 3. Load and strain relationship.

속하는 5 Hz(300 C/min)의 속도로 재하했다. 피로하중을 측정하는 것은 1회, 10회, 100회, 1,000회, 10,000회, 그리고 매 십만회씩 측정하여 2백만번 전후로 측정하였다. 각 부재에 작용시킨 피로하중과 스트레인 게이지가 파손된 순간의 반복횟수는 표 5와 같다.

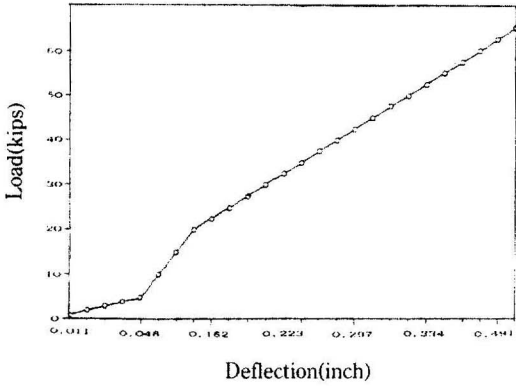


그림 4. Load and mid-span deflection relationship

반복횟수의 증가에 따라서 스테럽의 변형율은 계속 변화를 보이는데 이의 관계는 그림 5와 같다.

일반적으로 반복횟수가 증가함에 따라서 스테럽과 인장철근의 변형률은 계속 증가하는 추세를 보이지만 사인장 균열이 발생할 때 라든가 보에 있는 강

섬유의 온도변화, 스테럽이 항복점에 도달할 때는 일시적으로 또는 간헐적으로 어느 순간 스테럽의 변형률이 감소하는 경우도 있음을 알 수 있다. 이는 부재의 파괴가 진행되면서 콘크리트 내부에 발생한 균열로 인한 응력 재분포현상(redistribution of stress)에 기인한다고 볼 수 있다.

반복횟수의 증가에 따른 균열성장 거동은 초기의 미세균열이 점차로 성장하여 표면균열을 확대시키고 사인장 균열로서 발전하게 된다. 이의 진전상황은 그림 6과 같다. 이때의 사인장 균열은 45° 방향으로 이루어지며 균열의 폭은 가장 큰 쪽이 평균 0.8 mm 정도이다. 또한, 반복횟수의 증가에 따라 부재의 중앙처짐도 계속 증가하고 있다.

임의의 반복하중을 받은 후의 부재에 있어서 잔류변형을 알기위해 하중을 가한 후, 다시 하중을 제거했을 때의 중앙처짐 관계는 그림 7과 같다. 여기에서 잔류변형이 있음을 확인할 수 있다. 피로실

표 4. Result of static test

Beams	Fracture		$\sigma_c'$ (psi)	$P_{ic}$ (kips)	$P_{dc}$ (kips)
	$P_u'$ (kips)	$M_u'$ (in-kips)			
IAS1	61 (43 ton)	30 (21 t.m)	4795 (338 kg/cm <sup>2</sup> )	25 (11.4 ton)	30 (13.6 ton)
IAS2	65 (46 ton)	31.5 (22 t.m)	4820 (340 kg/cm <sup>2</sup> )	25 (11.4 ton)	32.5 (14.8 ton)
IIAS1	62.5 (44 ton)	37.5 (26 t.m)	4980 (351 kg/cm <sup>2</sup> )	35 (15.9 ton)	42.5 (19.3 ton)
IIAS3	65 (43 ton)	32.5 (23 t.m)	5020 (354 kg/cm <sup>2</sup> )	30 (13.6 ton)	35 (15.9 ton)
IIAS4	70 (49 ton)	25 (18 t.m)	5110 (360 kg/cm <sup>2</sup> )	20 (9.1 ton)	30 (13.6 ton)
IBS1	60 (42 ton)	30 (21 t.m)	4790 (337 kg/cm <sup>2</sup> )	27.5 (12.5 ton)	32.5 (14.8 ton)
IBS2	62.0 (44 ton)	35 (25 t.m)	4985 (351 kg/cm <sup>2</sup> )	27.5 (12.5 ton)	40 (18.2 ton)
IIBS1	62.5 (44 ton)	45 (32 t.m)	5060 (357 kg/cm <sup>2</sup> )	40 (18.2 ton)	47.5 (21.6 ton)

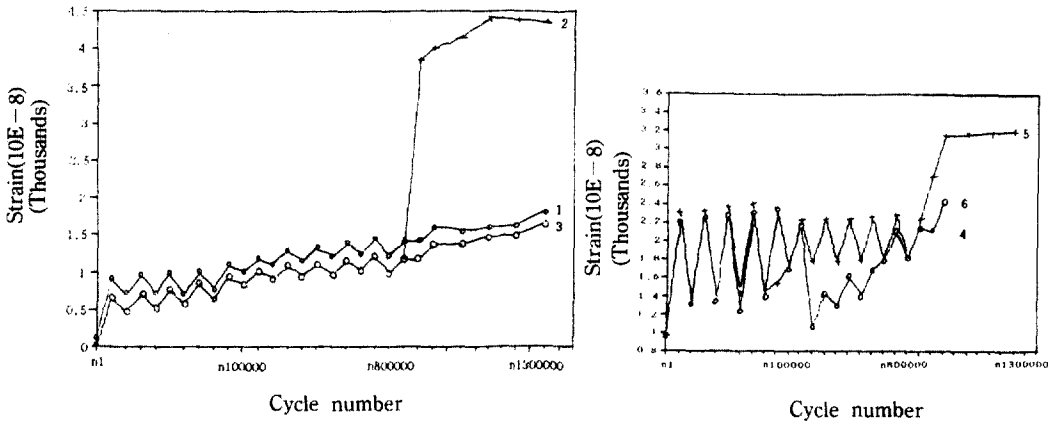
$\sigma_c'$ : Compressive strength of concrete

$P_u'$ : Ultimate load at failure

$P_{ic}$ : The load at initial stage of microcrack

$P_{dc}$ : The load at initial stage of crack growth

$M_u'$ : Ultimate moment at failure



Note: 1, 2, 3, 4, 5 and 6 indicate the strain gauge No. as shown in Fig. 1 and 6

그림 5. Strain of the stirrups and the number of loading cycles relationship

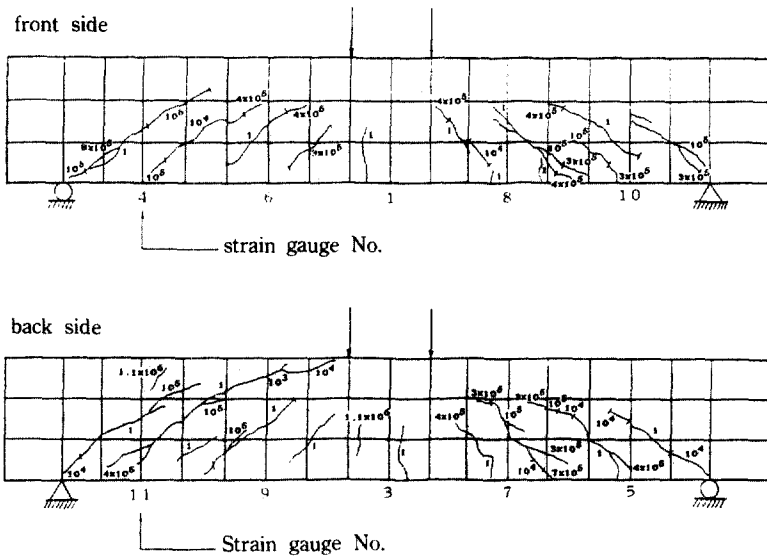


그림 6. Crack growth and number of loading cycles

험에서 하중을 제거하면 미세균열(micro crack)은 상당히 복원되는 특성을 가지고 있는 것으로 사료된다.

보의 파괴가 정적실험에서는 강섬유의 절단이 아니라 뿔힘이었고, 피로실험에서는 콘크리트의 잠존 미세 균열의 합체와(Microcrack coalesce)의 현상이 크게 일어나는 곳에서는 뿔힘이었으나 이것이 적게 일어나는 곳에서는 강섬유의 절단이라는 사실을 알았다.<sup>(5)</sup>

초기 균열 강도와 후 균열 강도를 비교할 때 후 균열 강도(post crack strength)가 월등하게 크다는 사실도 확인할 수 있었다.

## 5. 실험결과와 수치해석의 비교

실험결과와 ADINA<sup>(6)</sup>(EQ4 : curve description) 유한요소 해석에 의한 결과를 비교하였다. 유한요소의 모형은 그림 8과 같다. 그림 9는 비교의 결과를

표 5. Result of fatigue test

Beams	$P_{min}$ (kips)	$P_{max}$ (kips)	$R^{1)}$	$P_u^{2)}$ (kips)	$N_u$ (cycle)	$N_u'$ (cycle)	$V_{co}$ (kips)	$P_{fc}$ (kips)	$P_{dc}$ (kips)
IAF1	25 (11.4t)	43.4 (19.7t)	0.7	61 (27.8t)	>2 MIL.	>2 MIL.	15 (6.8t)	25 (11.4t)	30 (13.7t)
IAF2	25 (11.4t)	52.2 (23.7t)	0.8	65 (29.5t)	335,900	>1 MIL.	16.25 (7.4t)	25 (11.4t)	32.5 (14.8t)
IIAF1	25 (11.4t)	53.125 (24.1t)	0.85	62.5 (28.4t)	1,000,000	1,465,743	21.25 (9.7t)	35 (15.9t)	42.5 (19.3t)
IIAF3	30.6 (13.9t)	59.8 (27.2t)	0.92	65 (29.5t)	185,000	>1 MIL.	17.5 (8.0t)	30 (13.7t)	35 (15.9t)
IIAF4	31.88 (14.5t)	59.8 (27.2t)	0.85	70 (31.8t)	155,000	>1 MIL.	12.5 (5.7t)	20 (9.1t)	25 (11.4t)
IBF1	25 (11.4t)	52.2 (23.7t)	0.87	60 (27.8t)	15,773	—	16.25 (7.4t)	27.5 (12.5t)	32.5 (14.8t)
IBF2	40 (18.2t)	50 (22.7t)	0.81	62 (28.2t)	15,000	—	23.75 (10.8t)	40 (18.2t)	47.5 (21.6t)
IIBF1	40 (18.2t)	50 (22.7t)	0.8	62.5 (28.4t)	>2 MIL.	>2 MIL.	20 (9.1t)	27.5 (12.5t)	40 (18.2t)

1): Ratio of ultimate cyclic load and ultimate static load

2): Ultimate static load

$V_{co}$ :  $P_{dc}/2$

$N_u$ : Numbers of cycles for which the strain gauge in the tensile bar are damaged

$N_u'$ : Number of cycles for which the strain gauge on the stirrups are damaged

$P_{min}$ : Minimum of ultimate static

$P_{max}$ : Maximum of ultimate static

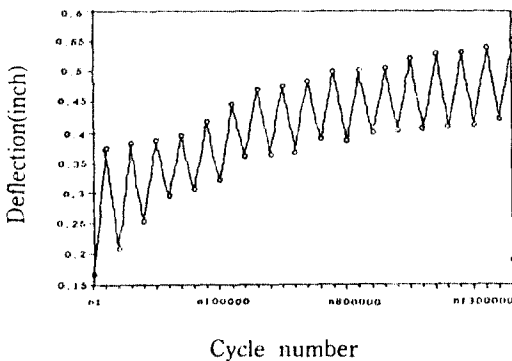


그림 7. Mid-span deflection and number of loading cycles

나타낸 것이다.

중앙처짐의 비교에 있어서 실험치의 결과는 ADINA 해석에 의한 결과치 보다 거의 2배 가량 컸다. 후균열의 거동은 ADINA의 한계 때문에 실험결과치와 비교할 수 없었다. 좀더 발전된 프로그램이 활용될 때 후균열 거동에 대한 모형화를 통하여 하중과 중앙 처짐관계를 밝힐 수 있겠다.

## 6. 결 론

실험연구의 결과와 ADINA 유한요소 해석에 의한 결과를 비교하여 다음과 같이 결론을 내릴 수 있다.

1) 워어커빌리티의 난이도를 고려할 때 강섬유의 용적 1%인 경우가 바람직하다고 사료된다.

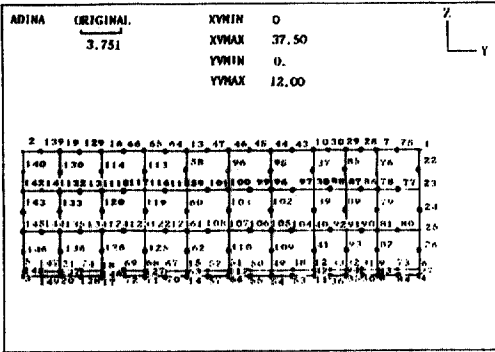


그림 8. Finite element modeling by ADINA

2) 하중과 중앙치짐은 비선형이다. 정적실험인 경우 초기균열에 파괴되지 않고 후균열에 더욱 많은 중앙치짐이 있었다. 피로실험에서는 정적실험인 경우보다 더욱 많은 중앙치짐이 있었다.

3) 스테럽이 없는 보의 경우, 피로강도는 극한 정적 전단강도의 82%에서 1,000,000회 이상으로서 파괴되었다.

4) No.3과 No.4의 스테럽을 사용한 경우, 피로강도는 극한 정적 전단강도의 87~92%에서 1,000,000회 이상으로서 파괴되었다.

5) 정적실험인 경우에는 보가 강섬유의 절단이 아니라 뽑힘이었고, 피로실험에서는 콘크리트의 잠존미세 균열의 합체화 현상이 크게 일어나는 곳에서는 뽑힘이었으나 이것이 적게 일어나는 곳에서는 강섬유의 절단이었다.

6) 실험연구의 결과와 ADINA 유한요소 해석에 의한 결과의 비교에 있어서 중앙치짐인 경우, 실험연구의 결과는 ADINA 해석에 의한 결과값보다 거의 2배 가량 컸다.

### Acknowledgements

The financial support of The Korea Ministry of Education, The Korea Science and Engineering Foundation (Grant No. 881-1301-011-2) and New Jersey Institute of Technology is gratefully acknowledged. The experimental work described in the

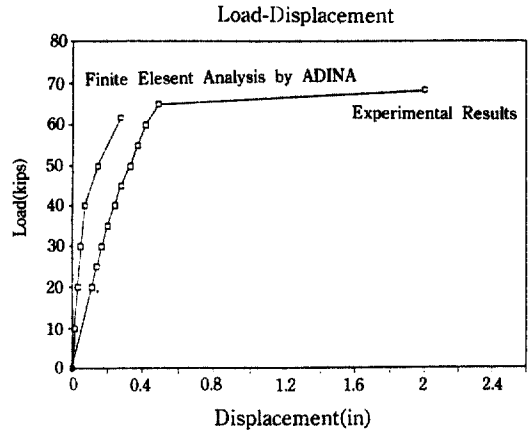


그림 9. Comparison of static experimental results and finite element analysis

paper was performed using the MTS testing system which was purchased under the NSF grant, NO. CEE8308339.

### 참 고 문 헌

1. ACI Committee 544 (1989), "Design consideration for steel fiber reinforced concrete," *ACI structural Journal*, Vol.85, No.52, Setp.-Oct., pp.564.
2. Batson, G., Ball, C., Barley, L., Landers, E. and Hooks, J. (1972), "Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete beams," *ACI J.*, Vol.69, No.64, Nov., pp.673-677.
3. Kormeling, H.A., Reinhardt, H.W., Shah, S.P. (1980), "Static and fatigue properties of concrete beams reinforced with continuous bars and with fibers," *ACI J.* Vol.77, No.6, Jan.-Feb., pp.36-43.
4. Sharma, A.K. (1986), "Shear strength of steel fiber reinforced concrete beam," *ACI J.*, Vol.83, No.56, Jul.-Aug., pp.624-628.
5. Kent, G., Kaiser, C., Learnt, E. and Larsgunnar, N. (1982), "Fatigue of Concrete Structures," ACI Publication SP-75, pp.269-287.
6. ADINA (1987), ADINA R&D Manual, Version 5. M.I.T. pp.B19-1-12.

(접수 : 1990. 9. 8)