

## 강섬유를 혼입한 2경간 연속보의 피로수명 예측에 관한 연구

### A Study on the Prediction Fatigue Life of Two-Span Beams with Steel Fibrous

곽 계 환\*  
Kwak, Kae-Hwan

김 원 태\*\*  
Kim, Won-Tae

이 진 성\*\*\*  
Lee, Jin-Sung

#### ABSTRACT

This study is attempted to predict experimentally the fatigue crack propagation behavior of two-span beams with steel fibrous for various steel fibrous contents. The static tests and the fatigue tests were performed on a series of SFRC(steel fibrous reinforced concrete) to investigate the fatigue behavior of SFRC varying with the steel fibrous contents. Through this test, the diagonal cracking loads, ultimate loads, deflections, strains of concrete and steels. Fatigue crack length were measured by the eye-observation. As a result of test, A model for S-N relationship, and propagation life of fatigue crack of SFRC was proposed. The crack growth and failure of SFRC beams were studied.

#### 1. 서 론

구조물의 파괴는 부재내에 존재하는 여러 가지 결함이나 구조물의 형상에 의한 응력 집중부, 사용 중에 생긴균열 등이 이미 균열의 핵으로서 활동하고, 파괴하중 보다 낮은 반복하중에 의하여 응력집중을 일으켜 미세균열의 발생과 성장을 통해 파단에 이르게 된다. 이러한 피로파괴현상에 대한 중요한 영향인자는 반복하여 작용되는 응력의 변동폭과 반복횟수 등으로 이들 두 인자를 대수 관계로 표시하면 거의 직선으로 표시되는데 이것이 S-N 선도이다. 이 S-N선도에서 소정의 반복회수 N에 대한 반복응력의 크기인 피로 강도를 측정하여 응력 범위에 대한 파괴현상에 이르게 되는 피로수명을 구하고자 한다. 또한, 사용반복하중에 대한 강섬유를 혼입한 2경간 연속 철근 콘크리트 보를 대상으로 균열발생 및 수명 등을 규명하고 구조물을 구성하는 재료에 결함의 존재와 발생이 어떠한 영향을 미치며 안전한 사용을 위한 제작조건 및 사용조건을 제시하고자 한다.

\* 정회원 · 원광대학교 토목환경공학과 교수

\*\* 학생회원 · 원광대학교 토목환경공학과 박사과정

\*\*\* 학생회원 · 원광대학교 토목환경공학과 석사과정

## 2. 실험계획 및 이론적고찰

본 연구에서는 강섬유를 혼입한 2경간 연속보의 피로파괴 거동을 파악하기 위하여 시편을 설계, 제작하였으며 기본물성실험, 정적실험 및 피로실험을 실시하였다.

### 2.1 배합설계

배합설계는 강섬유 혼입율( $V_f$ ) 0%, 0.75%, 1.0%, 1.25%의 변화를 주어 실시하였고 적절한 워커빌리티를 도출하기 위해 수차례의 시험배합을 수행하여 아래 표 1과 같은 배합설계를 도출하였다.

표 1 강섬유를 보강한 콘크리트의 배합표

콘크리트 종류	굵은골재 최대치수 (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	잔골재율 (%)	강섬유 혼입율 $V_f$ (%)	Unit volume(kg/cm <sup>3</sup> )				
						W	C	S	G	SP (%)
강섬유 보강 0%(RC)	25	10±2	36	45.7	0	156.24	433	711.24	951.83	0.2
강섬유 보강 0.75%(SFRC 1)	25	10±2	36	45.7	0.75	156.24	433	711.24	951.83	0.4
강섬유 보강 1.0%(SFRC 2)	25	10±2	36	45.7	1.0	156.24	433	711.24	951.83	0.4
강섬유 보강 1.25%(SFRC 3)	25	10±2	36	42.5	1.25	169.93	433	703.65	946.15	0.6

### 2.2 시편제작

본 연구에서 제작된 시편은 시방기준 및 강도설계법에 의한 시편설계를 실시하였다. 휨인장파괴를 유도하기 위해 전단보강을 100% 원칙으로 22×30cm의 보에 각 혼입율 별로 제작하였으며 시편의 제원과 형상은 아래 표 2와 그림 1과 같다.

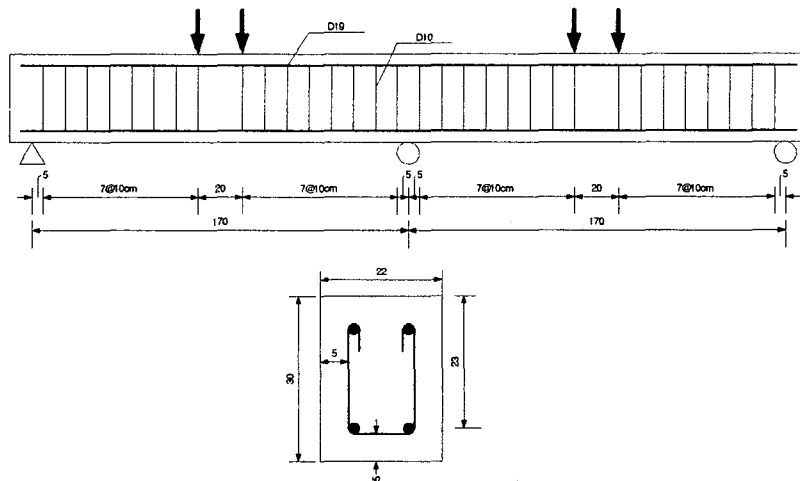


그림 1 시편의 단면형상

표 2 시편의 제원 및 명칭

시편명	압축강도 $f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	시편제원 (cm)	강섬유 혼입율 $V_f$ (%)
RC 1~4	421	15×30×360	0
SFRC 1-1~1-5	431	15×30×360	0.75
SFRC 2-1~2-5	431	15×30×360	1.00
SFRC 3-1~3-5	450	15×30×360	1.25

### 2.3 정적실험 및 피로실험

정적실험은 강섬유를 보강한 2경간 연속보의 거동특성을 분석하기 위해 실험변수로 강섬유 혼입율의 변화를 선택하였으며 극한하중, 하중에 따른 균열성장과정, 변형율의 변화, 경간중앙 및 부모멘트부의 변위를 관찰하였다. 또한 피로실험에서는 극한하중의 90%를 최대하중으로 하고 60~90%를 하중범위로 하였으며 반복하중재하는 하중조절방식으로, 반복파형은 정현파(Sine) 형태, 반복하중의 재하속도는 5Hz(300 C/min)로 하였다. 또한 최저응력수준과 최고 응력수준의 비율인 응력비는  $R = 0.1$ 로, 측정횟수는 100회, 1,000회, 10,000회, 20,000회, 30,000회, 50,000회, 100,000회 그리고 매 10만회에서 측정하는 것을 원칙로 하여 실험을 실시하였다. 측정항목으로는 반복횟수에 따른 균열성장과정과 변형율의 변화, 경간중앙 및 부모멘트부의 변위를 관찰하였고 응력범위와 반복횟수의 관계를 이용하여 S-N 곡선을 도출하고 피로강도 추정식을 산출하였다.

### 2.4 피로파괴 및 피로수명

하중, 변위 또는 응력의 반복작용으로 부재의 손상이나 파괴가 일어나는 현상을 피로라고 하며, 구조부재가 피로로 인하여 파괴될 때까지의 하중, 변위 또는 응력의 반복횟수를 피로 수명이 라고 한다. 피로 수명은 다음과 같이 3종류로 나누어 진다.

- ① 피로로 인하여 재료내의 미세 결함에서 균열이 발생하든가 필연적으로 존재하는 내부 결함 끝에서 발생균열(life of fatigue initiation) :  $N_c$
- ② 부재 또는 시험편이 피로에 의해서 파단될 때까지의 반복횟수인 파단수명(life of failure):  $N_F$
- ③ 부재에서 피로균열이 성장하고 있는 기간의 응력 반복횟수인 피로균열성장수명(Propagation life of fatigue crack) :  $N_p$

위의 세 피로 수명 사이에는 아래의 관계가 성립한다.

$$N_F = N_F - N_c$$

이 세 피로수명은 피로설계에 있어서 중요한 인자들이며, 설계목적에 따라 평가를 달리하는 경우가 있다. 구조물 피로설계에 있어서 부재가 항복점보다도 낮은 응력 수준의 반복작용으로 일어나는 피로현상을 탄성피로라고 하며, 이 거동의 실험은 응력 제어로 이루어지며 반복횟수  $N=10^4$ 이상이 대상이 된다. 한편  $N=10^4$ 이하의 반복횟수로 파괴현상이 일어나며 항복점보다 같거나 높은 응력 수준을 대상으로 하는 피로거동을 소성피로라 한다. 이 거동의 실험은 변형률 제어로 이루어진다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 정적실험

초기균열은 부모멘트나 정모멘트의 일정한 구분없이 불규칙적으로 발생하였고 시편의 파괴양상은 전단보강 철근의 영향으로 강섬유의 보강유무에 관계없이 휨파괴가 유발되었다. 또한 양쪽의 정 모멘트부에서 하중이 집중되는 한부분이 파괴된 이후에 부모멘트부가 파괴되었으며, 부모멘트부에서 파괴가 일어나거나 양쪽 정 모멘트부가 동시에 파괴되는 경우는 일어나지 않았다. 강섬유를 보강한 시편은 콘크리트와 강섬유의 부착강도로 인하여 철근이 항복한 이후에도 추가되는 하중에 저항하였으며 강섬유 자체가 끊어지는 것이 아닌 뿔힘으로 파괴되는 후균열 현상을 보이며 천천히 파괴되었다.

표 3 정적실험결과

번호	시편명	압축강도 $f_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	강섬유 혼입율 $V_f$ (%)	부모멘트 초기균열 (tf)	정모멘트 초기균열 (tf)	항복하중 (tf)	극한하중 (tf)
1	RC1	421	0	10.0	6.2	34.0	42.0
2	SFRC 1-1	431	0.75	21.0	4.1	39.0	51.0
3	SFRC 1-2			10	11	40.0	43.5
4	SFRC 2-1	450	1.00	16.0	6.4	41.0	51.0
5	SFRC 2-2			19	5	42.0	46.7
6	SFRC 3-1	475	1.25	12.0	10.1	44.0	50.0
7	SFRC 3-2			18	11	44.0	46

#### 3.2 피로실험

피로실험 초기에 5회의 정적하중을 가력하였을 때 정모멘트 부와 부모멘트 부의 일정한 경향없이 순수 휨구간에서 휨균열이 발생하였으며 강섬유 혼입과 전단보강 철근의 영향으로 사인장 균열은 거의 발생하지 않았다. 대부분의 시편은 정적하중으로 인해 발생한 균열이 반복횟수가 증가함에 따라 점차로 진전하여 피로파괴의 주요인자인 주균열로 성장하였으며 정모멘트부 양쪽이 동시에 파괴되는 것이 아니라 하중이 집중되는 어느 한쪽 부에서 파괴가 발생되었고 철근이 절단되는 큰 평음과 함께 급작스럽게 파괴되었다. 부모멘트 부의 파괴는 정모멘트 부가 파괴된 후 그 영향으로 2차적인 파괴로 일어났으며 피로반복하중에 의한 철근의 절단은 일어나지 않았다. 또한 강섬유가 혼입되지 않은 시편인 RC는 미세균열이 거의 없었으나 강섬유가 혼입된 SFRC 시편은 강섬유의 구속 작용으로 미세균열이 많이 발생되었다. 균열의 발생형태나 진전과정은 정적하중을 받는 경우와 흡사하나 균열의 개폐라든지 개방된 균열폐쇄에서 골재와 강섬유의 맞물림 현상같은 복잡한 거동특성이 발생되었고 피로실험도중 하중을 제거하면 미세균열은 상당히 복원되는 양상을 보여주었다. 강섬유 혼입시편은 반복하중으로 인하여 철근이 파단되어 시편이 급작스럽게 파괴되더라도 구조체로서의 기능을 완전히 상실하지는 않았다.

표 3 피로실험결과

시편명	재하속도	최대하중	최소하중	하중범위	응력비	반복회수
RC2	5Hz	20.4tf	2.04tf	60%	0.1	4,490,000회
RC3	5Hz	22.1tf	2.21tf	65%	0.1	2,179,000회
RC4	5Hz	23.8tf	2.38tf	70%	0.1	1,670,000회
SFRC1-3	5Hz	29.25tf	2.925tf	75%	0.1	2,148,500회
SFRC1-4	5Hz	27.3tf	2.73tf	70%	0.1	2,639,000회
SFRC1-5	5Hz	25.35tf	2.54tf	65%	0.1	2,577,000회
SFRC2-3	5Hz	45.9tf	4.59tf	90%	0.1	776,897천회
SFRC2-4	5Hz	32.8tf	3.28tf	80%	0.1	663,220회
SFRC2-5	5Hz	30.8tf	3.08tf	75%	0.1	750,000회
SFRC3-3	5Hz	40tf	4.0tf	80%	0.1	44,690회
SFRC3-4	5Hz	33tf	3.3tf	75%	0.1	443,922회
SFRC3-5	5Hz	35.2tf	3.52tf	80%	0.1	435,599회

### 3.3 피로강도와 S-N 선도

피로실험은 일반적으로 주어진 반복횟수에 저항할 수 있는 정적극한하중의 비율로 나타내고 응력(S)과 반복횟수(N)와의 관계로서 표시되며 이 곡선을 S-N 곡선이라고 한다. 콘크리트의 피로파괴에 있어서 응력의 수준은 응력-피로수명 곡선으로 나타내며 종축은 응력을, 횡축은 파괴시까지의 반복횟수를 대수눈금으로 나타내게 된다. 본 연구에서는 Graf4win 프로그램을 이용하여 회귀분석을 통해 S-N 곡선을 도출하였다.

그림 2은 동일한 반복재하속도(Hz)를 갖는 SFRC 시편의 S-N 곡선과 RC 시편의 S-N 곡선을 나타낸 것이다. 그림 2의 (a)에서 보는 바와 같이 강섬유 혼입율 0.75~1.25%의 SFRC 시편은 정적극한강도의 65~80%에서 파괴되었고 반복횟수 100만회에 대한 피로강도는 74.5% 전후라고 판단된다.

피로실험결과 각각의 부재에 대한 피로강도 관계식은 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있으며 적용된 작용응력과 반복횟수의 관계식은 다음 식 1과 같다.

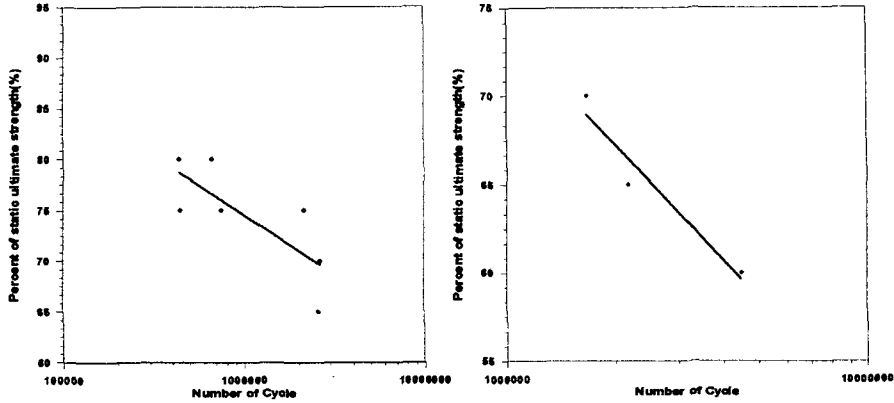
$$Y = B \times \log(X) + A \quad (\text{식 1})$$

여기서 A와 B는 실험에 의하여 결정되는 상수이며 식 1을 다음과 같은 형태로 바꾸어 실험결과로부터 얻은 결과값을 정적극한하중에 대한 피로하중 백분율인 피로강도와 피로수명의 관계를 회귀분석하면 식 2와 같은 SFRC의 피로강도 추정식을 얻을 수 있다.

$$S = -5.06155 \times \log(X) + 144.46 \quad (R^2=0.60) \quad (\text{식 2})$$

그림 2의 (b)에서 보는 바와 같이 RC 시편은 정적극한강도의 60~70%에서 파괴되었으며 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 67.2% 전후라고 판단되며 실험결과로부터 얻은 결과값을 정적극한하중에 대한 피로하중 백분율인 피로강도와 피로수명의 관계를 회귀분석하면 식 3과 같은 RC의 피로강도 추정식을 얻을 수 있다.

$$S = -9.4393 \times \log(X) + 204.198 \quad (R^2=0.93) \quad (\text{식 } 3)$$



(a) SFRC의 S-N 곡선

(b) RC의 S-N 곡선

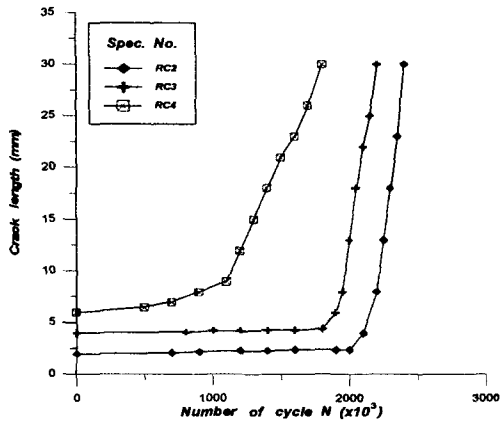
그림 2 동일 Hz를 갖는 SFRC 시편 및 RC 시편에 대한 S-N Curve

### 3.4 피로수명

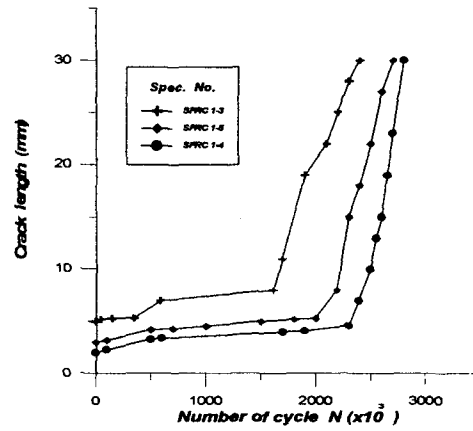
응력비를 일정하게 하고 하중의 반복횟수에 따른 피로균열의 발생횟수와 균열성장길이와의 관계를 그림 3에 나타내었고 부재의 결함 끝에서 하중의 반복으로 인해 성장하는 발생균열과 시험편이 피로에 의해서 파단 될 때 까지의 파단수명은 표 4에 나타내었다. 그림3과 표4에서 균열진전속도는 선결함의 크기에 관계없이 응력수준이 낮아질수록 저하되며, 응력수준이 높을수록 증가하고 있음을 알 수 있다.

표 4 피로수명 및 파단수명

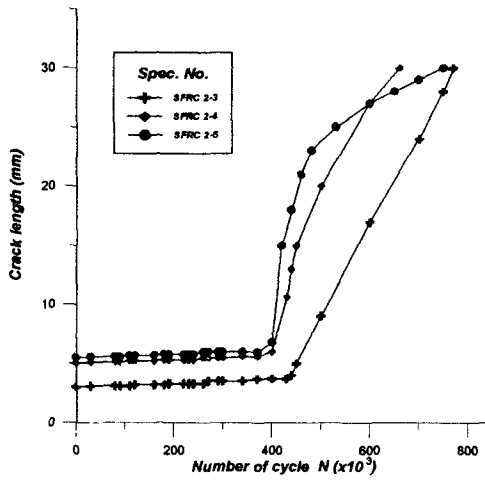
시편명	최대하중 (tf)	최소하중 (tf)	하중범위 (%)	Crack cycle $N_c (\times 10^3)$	Failure cycle $N_f (\times 10^3)$	응력비 R
RC2	20.4	2.04	60	2,000	2,400	0.1
RC3	22.1	2.21	65	1,800	2,200	0.1
RC4	23.8	2.38	70	1,100	1,800	0.1
SFRC1-3	29.25	2.93	75	1,600	2,400	0.1
SFRC1-4	27.3	2.73	70	2,000	2,700	0.1
SFRC1-5	25.35	2.54	65	2,300	2,800	0.1
SFRC2-3	45.9	4.59	90	440	770	0.1
SFRC2-4	32.8	3.28	80	410	750	0.1
SFRC2-5	30.8	3.08	75	400	660	0.1
SFRC3-3	40	4.0	80	200	410	0.1
SFRC3-4	33	3.3	75	140	440	0.1
SFRC3-5	35.2	3.52	80	80	430	0.1



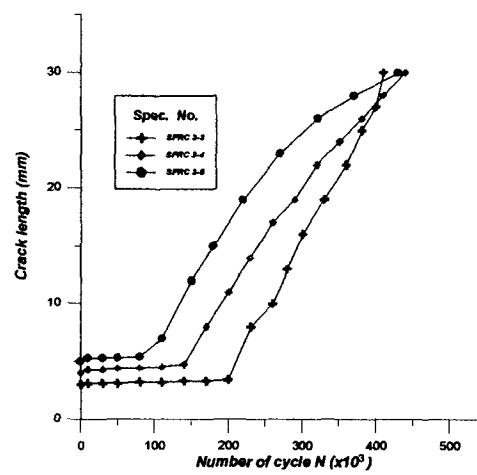
(a) RC



(b) SFRC 1



(c) SFRC 2



(d) SFRC 3

그림 3 RC 시편 및 SFRC 시편의 피로균열 진전곡선

#### 4. 결 론

- (1) 정적 및 피로실험시 부모멘트 부에서 파괴되지 않고 하중의 집중되고 균열성장이 빠른 쪽에서 파괴됨을 확인할 수 있었다.
- (2) RC 시편은 정적극한강도의 60~70%에서 파괴되었으며 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 67.2% 전후라고 판단된다. 또한, 강섬유 혼입율 0.75~1.25%의 SFRC 시편은 정적극한강도의 65~80%에서 파괴되었고 반복횟수 100만회에 대한 피로강도는 74.5% 전후라고 판단된다.
- (3) 강섬유를 혼입하지 않은 RC와 강섬유를 0.75%, 1.0%, 1.25%를 혼입한 2경간 연속보의 피로시험 결과 각각의 피로강도 추정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

① RC의 피로강도 추정식

$$S = -9.4393 \times \log(X) + 204.198 \quad (R^2=0.93)$$

② 강섬유 혼입을 0.75 ~ 1.25%의 SFRC의 추정식

$$S = -5.06155 \times \log(X) + 144.46 \quad (R^2=0.60)$$

- (4) 낮은 응력 범위에서는 초기균열 발생시기까지의 반복회수가 상당히 늘어남을 알 수 있었다. 이와 같은 사실을 볼 때, 초기균열이 발생하는 반복회수는 응력진폭이 낮아짐에 따라 대단히 커져 응력진폭의 감소와 함께 균열발생이 지연됨을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. ACI Committee 544, "Design Constructions for Steel Fiber Reinforced Concrete," ACI Structural Journal, Vol.35, No.5, Sep.-Oct., 1998, pp.536-580.
2. ACI Committee 215, "Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading", ACI Journal, ACI 215R-74, Vol.71, No.3, March 1974. pp97~121
3. ACI Committee 212, "Chemical Admixtures for Concrete(A221.3R-89)", ACI Material Journal, Vol.86, No.3, May-June 1989, pp237~297
4. "시멘트·콘크리트의 품질시험 및 품질관리", 사단법인 한국콘크리트 학회, 2000년 제 1회 기술강좌, pp 58~61
5. 1998년도 한국건축구조기술사회 제1차 기술세미나 자료집, "강섬유 보강 콘크리트의 설계 및 적용."
6. 장동일, "강구조물의 피로현상(II)" 한국 강구조학회지, 기술자료, 제3권 제1호, 1991, pp. 63~71
7. 장동일, "강섬유 혼입량에 의한 강섬유 보강 콘크리트의 파괴에너지에 관한 실험적 연구", 콘크리트 학회 논문집, 제 3권 4호, 1991.12, pp79~88
9. 장동일, "강섬유 보강 콘크리트의 휨 피로거동에 관한 연구", 콘크리트 학회 논문집, 제 4권 1호, 1992.3, pp81~87
10. 박계환외 2인 "강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트 보의 전단강도", 한국콘크리트학회지, 제12권 4호. 2000. 8. pp.23~30
11. Kae-Hwan, Kwak. "Fatigue Strength in polymer Reinforced Concrete Beams due to Cyclic". Nuclear and Engineering Design Journal Elsevier Science. 1995. 6. Vol. 156.
12. Kae-Hwan, Kwak. "Shear-Fracture Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams". ACI Structural Journal 1990. pp.41~48