

강섬유 보강 철근콘크리트보의 신뢰성 해석 Reliability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams

유한신* 광계환** 장화섭***
Yoo, Han Shin Kwak, Kae Hwan Jang, Hwa Sup

ABSTRACT

The purpose of this study is to practical use with increase safety, usability and economical. In this study, the property of fatigue behavior was tested by comparing reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete. The basic test, the static test and fatigue test were used as the research methods.

Basic on the test, the material compressive strength test and split tensile strength test were conducted 7 days and 28 days after the concrete was poured.

In the static test, there were four types of experimental variables of the steel fiber mixing ratio : 0.00%, 0.75%, 1.00%, and 1.25%. The ultimate load, initial diagonal tension crack, and initial load of flexural cracking were all observed by static test.

A methodology for the probabilistic assessment of steel fiber reinforced concrete(SFRC) which takes into account material variability, confinement model uncertainty and the uncertainty in local and global failure criteria is applied for the derivation of vulnerability curves for the serviceability and ultimate limit states, the reliability of SFRC using the proposed practical linear limit state model is evaluated by using the AFOSM(Advanced First Order Second Moment) method and MCS(monte-Carlo simulation) method.

1. 서론

최근 국가경제 및 건설기술의 발전으로 인하여 구조물이 점차 대형화, 장대화 및 특수화되고 있음에 따라 보다 높은 강도의 재료적 물성을 갖는 콘크리트의 요구가 점차 증대되고 있으며, 이를 위해 국내·외에서 보다 고강도 콘크리트를 개발하거나 다양한 섬유를 콘크리트에 혼입한 섬유 보강 콘크리트(FRC; Fiber Reinforced Concrete)의 필요성이 대두되고 있다. 섬유 보강 철근콘크리트는 불연속 섬유를 콘크리트의 타설 시에 무작위로 뿌려서 만든 보통 콘크리트이다. 콘크리트에 혼입하는 섬유들은 시멘트와 시멘트 모르타르를 강화하기 위해 여러 가지가 사용되어 왔다. 이중 가장 일반적으로 혼입하는 섬유로 강섬유(steel fiber)를 사용하고 있으며, 많은 연구에서 강섬유 보강은 콘크리트의 인장강도, 압축강도, 전단강도, 휨강도와 인성, 충격 저항 그리고 초기 균열강도와 같은 물성을 개선하는 것을 확인할 수 있다.

* 종신회원 · 원광대학교 토목환경, 도시공학부 겸임교수, 공학박사

** 종신회원 · 원광대학교 토목환경, 도시공학부 교수, 공학박사

*** 원광대학교 토목환경공학과 석사과정

그러나 강섬유에 의해 역학적 성질이 개선되는 이면에는 SFRC의 복잡한 역학적 파괴기구가 갖는 불확실성과 강섬유를 임의의 방향으로 흩어 뿌리는 SFRC 제작과정에서 강섬유가 균질하게 분포하지 못하는 불확실성 등이 근원적으로 SFRC에는 내재될 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 SFRC 보의 불확실성을 고려하는 신뢰성 해석을 수행하고자 하며 이를 위해 SFRC에 적합한 한계상태모형을 제안하고 또한 각종 한계상태 함수에 포함된 확률변수(random variable)들에 대한 확률통계적 자료를 국내외 관련문헌을 근거하여 수집, 제시하였다. 또한 Bayesian 기법을 통하여 새롭게 개선된 특성값을 추정하였으며, 제안된 SFRC의 한계상태 함수와 같이 비선형성을 보이는 구조물의 신뢰성 해거과 비교를 위해 제1차 2계 모멘트(First Order Second Moment; AFOSM) 기법과 시뮬레이션에 의한 기법인 MCS(Monte Carlo Simulation)에 기초하여 신뢰성 해석 프로그램을 개발하였으며, 강도와 피로에 대해 각각 신뢰성 해석을 수행하였다. 뿐만 아니라 SFRC구조물의 신뢰성 및 안전특성에 지배적이고 민감한 불확실성 요인을 밝히기 위해 다양한 확률변수들에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

2. 강섬유 보강 철근콘크리트 연속보

2.1 강섬유 보강 철근콘크리트의 특성

콘크리트를 미세파괴 균열의 관점에서 보면 먼저 콘크리트 제작시 존재하는 공기틈이나 자갈과 시멘트풀 사이에 약하거나 접촉되지 않은 부분이 근본적으로 존재하게 된다. 이러한 결함들은 콘크리트의 복잡한 매커니즘에 의해 느리게 성장하다가 한계치에 이르면 이후부터는 빠르게 성장한다. 콘크리트 내에 강섬유는 임의의 방향으로 분포되어 콘크리트가 응력을 받을 때에 발생하는 미세균열을 강섬유들이 제어하거나 큰 균열이 발생하였을 경우, 균열의 진행을 제지하여 콘크리트의 강도 및 연성을 증가시키게 된다.

2.2 강섬유 보강 철근콘크리트보의 설계

강섬유를 보강한 철근콘크리트 연속보의 파괴, 피로거동 등의 관찰과 신뢰성 해석을 수행하기 위해 본 연구진에서는 구조실험 시편을 설계, 제작하여 실험을 실시하였다. 그러나 본 논문은 신뢰성 해석에 관련된 연구이므로 SFRC 연속보의 설계에 관한 내용만 기술한다. 실험을 전제로 하중조건은 그림 1과 같이 계획하였다. 여기서 하중 P는 15tonf이다. 이와 같은 하중에 견딜 수 있는 철근콘크리트 연속보를 설계하였으며 최대부모멘트(4.9tonf-m)가 발생하는 중앙지점의 최종적인 단면은 그림 2와 같다. 철근은 $A_s=2@D19(5.73cm)$ 를 사용하였다.

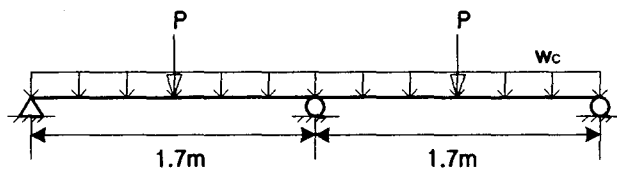


그림 1. 적용대상 연속보

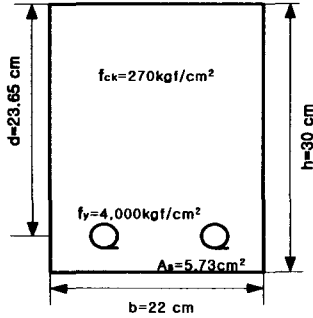


그림 2. 설계된 단면제원

설계된 철근콘크리트 연속보에 강섬유를 첨가하여 실험체를 제작하였으며, 이에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 첨가된 강섬유의 특성값은 표 1과 같으며 강섬유의 혼입율(u_f , %)은 0.75, 1.0, 1.25로 하였다.

표 1. 강섬유의 특성값

형상비(L/D)	길이(mm)	직경(mm)	항복강도(kgf/mm ²)	형태
80	60	0.75	30 ~ 40	양단 hook

3. 강섬유 보강 철근콘크리트보의 통계적 특성값 추정

3.1 정적실험과 피로실험 결과

정적실험은 총 7개 실험체에 대해 수행하였으며 SFRC는 강섬유의 함유율에 따라 실험체의 명칭을 구분하였다. RC1은 철근콘크리트 실험체를 말하며, 동일한 크기의 SFRC 실험체는 강섬유 함유율(0.75%, 1.00%, 1.25%)에 따라 각각 SFRC1, 2, 3로 구분하였다. 각 강섬유 함유율에 대해 SFRC 연속보 실험체를 2개씩 만들었다. 예를 들면 SFRC1-1, SFRC1-2는 각각 강섬유 함유율 0.75인 실험체의 첫 번째, 두 번째 시험체를 나타낸다.

표 2. 정적실험결과

번호	실험체명	압축강도 f_{ck} (kgf/cm ²)	강섬유 함유율 u_f (%)	부모멘트 초기균열 (tonf)	정모멘트 초기균열 (tonf)	항복 하중 (tonf)	극한 하중 (tonf)
1	RC1	421	0	10.0	6.2	34	42.0
2	SFRC1-1	431	0.75	21.0	4.1	39	51.0
3	SFRC1-4			10	11		43.5
4	SFRC2-1	450	1.0	16.0	6.4	41	51.0
5	SFRC2-3			19	5		46.7
6	SFRC3-1	475	1.25	12.0	10.1	44	50.0
7	SFRC3-6			18	11		46

표 3. 피로실험 결과

시편명	재하속도	최대하중	최소하중	하중범위	응력비	반복회수
RC2	5Hz	20.4tonf	2.04tonf	60%	0.1	4,490,000회
RC3	5Hz	22.1tonf	2.21tonf	65%	0.1	2,179,000회
RC4	5Hz	23.8tonf	2.38tonf	70%	0.1	1,670,000회
SFRC1-2	5Hz	29.25tonf	2.925tonf	75%	0.1	2,148,500회
SFRC1-5	5Hz	27.3tonf	2.73tonf	70%	0.1	2,639,000회
SFRC1-6	5Hz	25.35tonf	2.54tonf	65%	0.1	2,577,000회
SFRC2-4	5~7Hz	45.9tonf	4.59tonf	90%	0.1	776,897회
SFRC2-5	5Hz	32.8tonf	3.28tonf	80%	0.1	663,220회
SFRC2-6	5Hz	30.8tonf	3.08tonf	75%	0.1	750,000회
SFRC3-2	7Hz	40.0tonf	4.0tonf	80%	0.1	446,900회
SFRC3-3	5Hz	33.0tonf	3.3tonf	75%	0.1	443,922회
SFRC3-4	5Hz	35.2tonf	3.52tonf	80%	0.1	435,599회

3.2 통계적 특성값의 추정

본 연구에서 고려한 확률변수와 각 확률변수의 통계적 특성값은 Estes(1997)가 Nowak의 연구 등 다양한 자료를 정리하여 만든 통계값과 NBS보고서(1980)를 참조하여 추정하였으며, 추정된 결과를 다음 표4에 나타내었다.

표 4. 철근콘크리트 보의 확률변수에 대한 통계적 특성값

구분	A_s	f_y	f_{ck}	b	d	γ	M_{LL}	M_{DL}
확률변수	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8
공칭값	5.73	4,000	270	22	23.65	1.0	-	-
공칭비	1.0	1.12	0.92	1.0	1.0	1.02	1	1.05
변동계수	0.015	0.11	0.18	0.0182	0.02	0.06	0.028	0.10
확률분포	정규분포(Normal)							

A_s : 철근의 단면적, f_y : 철근의 항복강도, γ : 모델링 관련 확률변수, f_{ck} : 콘크리트의 압축강도, b : 보의 폭, d : 보강철근의 유효깊이, M_{LL} : 활하중에 의한 모멘트, M_{DL} : 고정하중에 의한 모멘트

3.3 한계상태함수의 정식화

어떤 구조물이 가지고 있는 저항능력은 한계를 가지고 있다. 구조물에 외부하중이 작용할 때, 불확실성을 고려하여 구조물의 저항능력이 외부하중보다 크다면 구조물은 안전하지만 반대의 경우에는 파괴될 것이다. 강도한계상태란 구조물에 작용하는 외부하중이 구조물의 저항강도를 초과하여 구조적 파손을 일으키는 상태를 말한다. 본 연구에서 SFRC 연속보의 단일 파괴모드(휨파괴)에

대해 전술한 확률변수를 가지고 한계상태함수를 구성하여 이를 제안하였다. SFRC와 비교를 위해 일반적인 RC 연속보를 고려하였으며 이에 대한 한계상태함수는 기존에 발표되었던 것을 그대로 이용하였다.

먼저, RC와 SFRC 연속보에 적용할 수 있는 공칭저항강도식을 정리하면 각각 식(1), (2)와 같다. 여기서 SFRC보의 공칭저항강도식은 혼입한 강섬유의 저항강도를 고려하여 제안한 식을 이용하였다.

- 구형 철근콘크리트 보 :

$$M_R = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a_1}{2} \right) \quad (1)$$

- 구형 SFRC 보 :

$$M_R = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a_2}{2} \right) + f_t \cdot b \cdot \left(h - \frac{a_2}{\beta_f} \right) \left(\frac{h}{2} + \frac{a_2}{2\beta_f} - \frac{a_2}{2} \right) \quad (2)$$

여기서, $a_1 = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b}$, $a_2 = \frac{A_s f_y / b + f_t h}{0.85 f_{ck} + f_t / \beta_f}$,

$$f_t = 0.82 \tau v_f d_f (L/D) : (\text{Ramzi, 1999})$$

식(1), (2)에서 a_1 , a_2 는 등가응력 직사각형 블록의 깊이로서 평형방정식으로부터 구할 수 있다. 또한, f_t 는 강섬유로 보강된 콘크리트의 인장강도를 나타낸다. 여기서, 강섬유와 콘크리트 간에 접착응력 τ 는 기존문헌⁵⁾에서 실험을 통해 산정한 값을 적용하였다. β_f 는 강섬유 보강 콘크리트의 등가응력 직사각형의 깊이 결정계수로서 280kgf/cm² 이하의 강도에서는 대략 0.85로 나타난다. d_f 는 양단이 휘어진 강섬유에 대한 접착계수를 나타내고, L/D 는 강섬유의 형상비를 나타낸다.

보에 작용하는 외부하중에 의한 모멘트는 구조물의 자중과 실험실의 재하하중으로 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 식(3)은 주어진 설계조건에 의해 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_L = M_{DL} + M_{LL} \quad (3)$$

$$M_L = 0.09031 \omega_c + 0.31875 P \quad (4)$$

여기서, ω_c 는 자중에 의한 등분포하중이고, P 는 경간 중앙의 집중하중이다.

따라서, SFRC 보의 강도한계상태함수는 표 2의 확률변수를 적용하여 식(5)와 같이 제안하였다. 여기서, Z_{10} 은 전술한 바와 같이 SFRC에서 강섬유 혼입에 따른 제작상 불확실량을 고려하는 것으로서 철근콘크리트 보에서는 제거하고 오직 SFRC의 신뢰성 해석에서만 고려되는 확률변수이다. 마찬가지로 식(5)의 한계상태함수에서 최외단 중괄호의 두 번째 항부터는 RC의 경우에는 적용되지 않는 내용임을 주의해야 한다.

$$\begin{aligned}
G(\cdot) &= M_R - M_L \\
&= Z_{10} \left\{ Z_1 Z_2 Z_7 \left\{ Z_6 - \frac{Z_1 Z_2 + 32472 Z_4 Z_5}{2(18.7 Z_3 + 1273.39 Z_4 Z_5)} \right\} \right. \\
&\quad \left. + 1082.4 Z_4 Z_5 Z_7 \left\{ 30 - \frac{Z_1 Z_2 + 32472 Z_4 Z_5}{0.85(18.7 Z_3 + 1273039 Z_4 Z_5)} \right\} \right. \\
&\quad \left. \left\{ 15 + \frac{3(Z_1 Z_2 + 32472 Z_4 Z_5)}{34(18.7 Z_3 + 1273039 Z_4 Z_5)} \right\} \right\} \\
&\quad - 31875 Z_8 - 36125 Z_9
\end{aligned} \tag{5}$$

여기서, 확률변수 $Z_1 \sim Z_{10}$ 은 표 4에 나타내었다.

4. 강섬유 보강 철근콘크리트보의 신뢰성 해석

4.1 부모멘트부에서의 신뢰성 해석

표 5. 신뢰성해석 결과(부모멘트부)

강섬유 함유율	신뢰성지수(β)			파괴확률(P _f)		
	철근량			철근량		
	5.730cm ²	3.972cm ²	2.534cm ²	5.730cm ²	3.972cm ²	2.534cm ²
SFRC1(0.75%)	2.65	2.52	2.16	0.0040562	0.0058352	0.0153413
SFRC2(1.00%)	2.59	2.40	2.00	0.0048182	0.0081599	0.0228589
SFRC3(1.25%)	2.50	2.37	1.91	0.0062237	0.0089116	0.0282581

4.2 정모멘트부에서의 신뢰성 해석

표 6. 신뢰성해석 결과(정모멘트부)

강섬유 함유율	신뢰성지수(β)			파괴확률(P _f)		
	철근량			철근량		
	5.730cm ²	3.972cm ²	2.534cm ²	5.730cm ²	3.972cm ²	2.534cm ²
SFRC1(0.75%)	2.68	2.55	2.17	0.0036631	0.0053867	0.0148905
SFRC2(1.00%)	2.60	2.38	2.09	0.0046195	0.0085562	0.0182655
SFRC3(1.25%)	2.49	2.30	1.94	0.0064331	0.0106773	0.0264777

4.3 피로에 대한 신뢰성 해석

표 7. 피로실험 결과표

시편명	재하속도(Hz)	최대하중(tonf)	최소하중(tonf)	하중범위(%)	응력비	반복회수(회)
RC2	5	20.4	2.04	60	0.1	4,490,000
RC3	5	22.1	2.21	65	0.1	2,179,000
RC4	5	23.8	2.38	70	0.1	1,670,000
SFRC1-2	5	29.25	2.925	75	0.1	2,148,500
SFRC1-5	5	27.3	2.73	70	0.1	2,639,000
SFRC1-6	5	25.35	2.54	65	0.1	2,577,000
SFRC2-4	5~7	45.9	4.59	90	0.1	776,897
SFRC2-5	5	32.8	3.28	80	0.1	663,220
SFRC2-6	5	30.8	3.08	75	0.1	750,000
SFRC3-2	7	40.0	4.0	80	0.1	446,900
SFRC3-3	5	33.0	3.3	75	0.1	443,922
SFRC3-4	5	35.2	3.52	80	0.1	435,599

피로 신뢰성해석을 위해서는 다음 식(6)을 이용하였다

$$\begin{aligned}
 P_F &= 1 - R_N(n) \\
 &= 1 - \exp\left[-\left\{\frac{n}{E(N)} \Gamma(1 + V_{RN}^{1.08}) V_{RN}^{1.08}\right\}\right]
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, 피로수명의 변동계수인 V_{RN} 는 실험결과를 바탕으로 구한 통계적 특성값이다.

표 8. 피로파괴확률

시편명	재하속도	logC	$S_{req}(kgf/cm^2)$	m	파괴확률
RC	5Hz	19.635	89.875	6.775	0.4886
SFRC1	5Hz	10.439	110.966	1.981	0.4469
SFRC2	5Hz	9.9876	129.187	1.961	0.8820
SFRC3	5Hz	9.3103	147.963	0.296	0.9651

4.4 민감도분석

SFRC 연속보에서 구조물의 안전도에 가장 큰 영향을 주는 확률변수를 고찰하기 위해 대표적인 확률변수인 강섬유 함유율(v_f), 제작오차(y_f), 유효높이(d), 콘크리트의 강도(f_c)에 대한 민감도분석을 실시하였다.

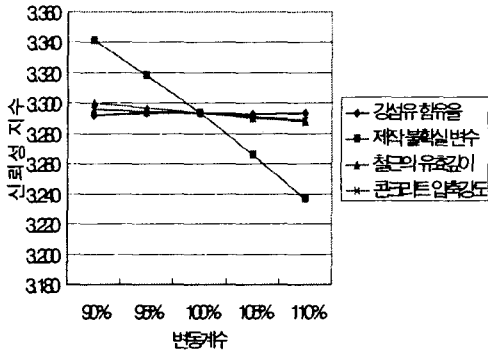


그림 3. MCS에 의한 민감도분석 결과

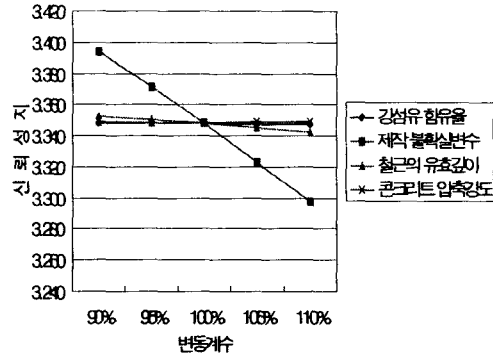


그림 4. AFOSM에 의한 민감도분석 결과

5. 결론

- 1) 휨강도의 경우, 동일한 SFRC 단면에 대해서 강섬유 함유율이 증가함에 따라 신뢰성지수가 증가하며 파괴확률이 감소함을 알 수가 있었다.
- 2) 같은 하중에 대해 설계된 보의 경우, SFRC보가 철근콘크리트 보보다 더 큰 안전도를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) SFRC 보의 신뢰성 해석을 위해 제안된 휨강도 한계상태함수와 피로파괴확률식은 SFRC의 불확실성을 정확하게 반영한 타당한 식이었다.
- 4) 본 연구에서 제안한 비선형 한계상태함수의 신뢰성 해석 방법으로 MCS와 같은 정밀해석기법이 타당하다.
- 5) 민감도 분석 결과 SFRC 보는 제작오차에 가장 민감한 것으로 확인되었으며 따라서 SFRC 구조물의 제작시 강섬유의 혼입과정에 특별히 주의해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 광계환, "강섬유를 혼입한 철근콘크리트 보의 전단거동에 관한 연구", 1991
2. Estes, "A System Reliability Approach to the Lifetime Optimization of Inspection and Repair of Highway," Thesis, Colorado University, 1997
3. M.K. Lee, B.I.G. Barr. "Strength and fracture properties of industrially prepared steel fiber reinforced concrete" Cement & Concrete Composites 25 (2003) 321-332
4. Ramzi B. Abdul-Ahad, Omer Qarani Aziz. "Flexural strength of reinforced concrete T-beams with steel fibers", M.Sc. Thesis, University of Technology, Baghdad, Iraq, 1999
5. Achintya Haldar., Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design, John Wiley & Sons, Inc 2000
6. 광계환, "강섬유를 혼입한 2경간 연속보의 정적실험에 관한 연구", 대한토목학회 2001 학술발표회 논문집