강섬유 보강 철근콘크리트 연속보의 신뢰성 해석

Reliability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Continuous Beams

곽 계 환† 유 한 신* 장 화 섭**

Kwak, Kae-Hwan Yoo, Han-Shin Jang, Hwa-Sup

(논문접수일 : 2004년 8월 2일 ; 심사종료일 : 2004년 12월 8일)

요 지

최근 콘크리트 균열선단에서 균열의 발생을 억제하거나 균열 발생시 균열폭을 제어하고 일정부분 하중저항 능력을 향상시킬 목적으로 다양한 형태의 강섬유(Steel Fiber)를 혼입하는 방법이 개발되어 사용되고 있다. 강섬유 보강 철근콘크리트보(SFRC; Steel Fiber Reinforced Concrete)의 복잡한 파괴역학적 성질에 의한 불확실성 등이 내재되어 있다. 본 연구에서는 SFRC보의 불확실성을 고려하는 신뢰성 해석을 수행하였다. 이를 위해 강도 한계상태모형을 제시하였고, 한계상태함수에 포함된 각종 확률변수들에 대한 통계적 특성값을 국내외 관련 문헌을 근거하여 수집, 제시하였다. 향후 추가적인 관련정보가 수집되면 보다 개선된 통계적 특성값을 제공 할 수 있도록 Bayseian Updating 기법을 사용하여 실험결과로부터 불확실성을 개선하는 과정을 제시하였다. 뿐만 아니라 피로신뢰성의 해석을 위해 피로파괴확률식을 제안하고 필요한 통계적 특성 값을 제시하였다.

핵심용어 : 강섬유보강 철근콘크리트, 피로, 강도, 신뢰성 해석, 민감도 분석

Abstract

Methods for mixing variable types of steel fibers have been developed recently to suppress outbreak of crack or to control the width of crack and improve the load resistible capacity at the same time. On the other hand, uncertainty by complex nature of destruction dynamics of steel fiber reinforced concrete(SFRC) is included.

In this study, analysis of reliance considering uncertainty of SFRC beam is done. For this, intensity limit state model was proposed. Moreover, characteristic values about almost every kinds of probability variables were collected and presented according to home and foreign references. Process of improving uncertainty from the result of experiments by Bayseian updating method is also proposed on the purpose of offering better statistical characteristic values with more data in the near future. Fatigue fracture probability equation is proposed and needed statistical characteristic values were presented to analyze fatigue reliance

keywords : *steel fiber reinforced concrete, fatigue, strength, reliability*

1. 서 론

최근 국가 경제 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 철근 콘크리트(FRC; Fiber Reinforced Concrete)의 필요성이 대두되고 있다. 섬유 보강 철근콘크리는 불연속 섬유를 콘크리트의 타설시에 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 인

† 책임저자, 정회원 · 원광대학교 토목환경도시공학부 정교수
전화: 063-850-6720 ; Fax: 063-850-6720(교환)
E-mail: kkh6720@wonkwang.ac.kr
* 정회원 · 원광대학교 토목환경 도시공학부 겸임교수
** 원광대학교 토목환경공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

성, 충격저항 그리고 초기 균열강도와 같은 물성을 개선하는 것을 확인할 수 있다. 지금까지의 이러한 불확실성에 대한 인식에 바탕을 두고 강섬유의 특성에 따른 SFRC의 정,동적인 역학적 성질의 규명에 집중적으로 연구가 수행되고 있는 반면에 불확실성을 합리적으로 고려할 수 있는 신뢰성해석 및 설계 등에 대한 기초적 연구는 거의 전무한 실정이다. 강섬유에 의해 역학적 성질이 개선되는 이면에는 강섬유 보강 철근 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete; SFRC)의 복잡한 파괴역학적 성질에 의한 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 한계상태함수에 포함된 확률변수(random variable)들에 대한 확률통계적 자료를 국내외 관련문헌을 근거하여 수집, 제시하였다. 또한 Bayesian 기법을 통하여 새롭게 개선된 특성값을 추정하였으며, 제안된 SFRC의 한계상태함수와 같이 비선형성을 보이는 구조물의 신뢰성 해석과 비교를 위해 제1차 2계 모멘트(First Order Second Moment; AFOSM) 기법과 시뮬레이션에 의한 기법인 MCS (Monte Carlo Simulation)에 기초하여 신뢰성해석 프로그램을 개발하였으며, 강도와 피로에 대해 각각 신뢰성해석을 수행하였다.[1] 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 접착되지 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 발생되는 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 15$tonf$이다. 이와 같은 하중에 견딜 수 있는 철근콘크리트 연속보를 설계하였으며 최대부모멘트(4.9$ton f$-m)가 발생하는 중앙지점의 최종적인 단면은 그림 2와 같다. 철근은 A_s=2@D19(5.73㎠)를 사용하였다.

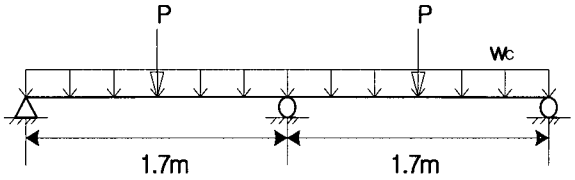

그림 1 적용대상 연속보

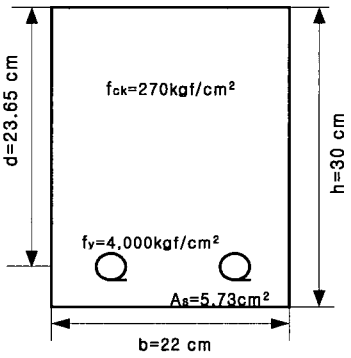

그림 2 설계된 단면제원

설계된 철근콘크리트 연속보에 강섬유를 첨가하여 실험체를 제작하였으며, 이에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 첨가된 강섬유의 특성값은 표 1과 같으며 강섬유의 혼입율(v_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 SFRC

는 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 번째로서 정적실험을 위한 실험체를 나타내고 1-3, 1-4, 1-5는 피로실험을 위한 실험체를 나타낸다. 피로실험은 정적실험의 극한하중을 기준으로 하여, 이 극한하중의 90%를 최대하중으로 하고 60-90%를 하중범위로 해서 반복 재하횟수를 달리하여 반복하중을 재하 하였다.

표 2 정적실험결과

번호	실험체명	압축강도 $f_{ck}(kgf/cm^2)$	강섬유 함유율 v_f (%)	초기균열하중 (tonf)		항복하중 (tonf)	극한하중 (tonf)
				부모멘트 초기균열	정모멘트 초기균열		
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	SFRC1-2			10	11		43.5
4	SFRC2-1	450	1.0	16.0	6.4	41	51.0
5	SFRC2-2			19	5		46.7
6	SFRC3-1	475	1.25	12.0	10.1	44	50.0
7	SFRC3-2			18	11		46

표 3 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
SFRC1-3	5	29.25	2.925	75	0.1	2,148,500
SFRC1-4	5	27.3	2.73	70	0.1	2,639,000
SFRC1-5	5	25.35	2.54	65	0.1	2,577,000
SFRC2-3	5~7	45.9	4.59	90	0.1	776,897
SFRC2-4	5	32.8	3.28	80	0.1	663,220
SFRC2-5	5	30.8	3.08	75	0.1	750,000
SFRC3-3	7	40.0	4.0	80	0.1	446,900
SFRC3-4	5	33.0	3.3	75	0.1	443,922
SFRC3-5	5	35.2	3.52	80	0.1	435,599

그림 3, 그림 4는 동일한 반복재하속도를 갖는 SFRC1 실험체와 SFRC실험체의 S-N곡선을 나타낸다.

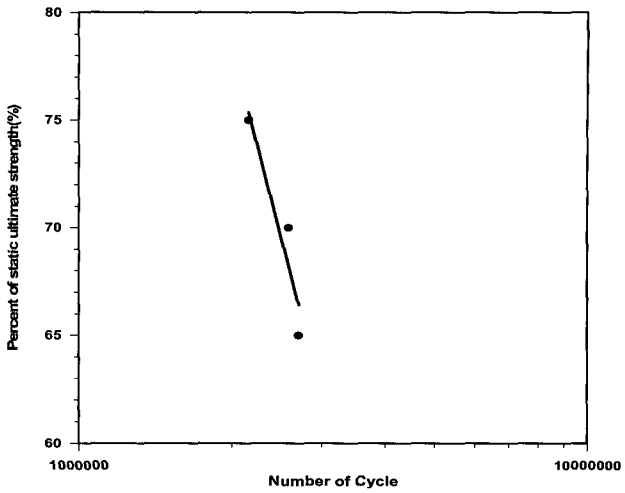

그림 3 동일한 Hz를 갖는 SFRC1 실험체에 대한 S-N곡선

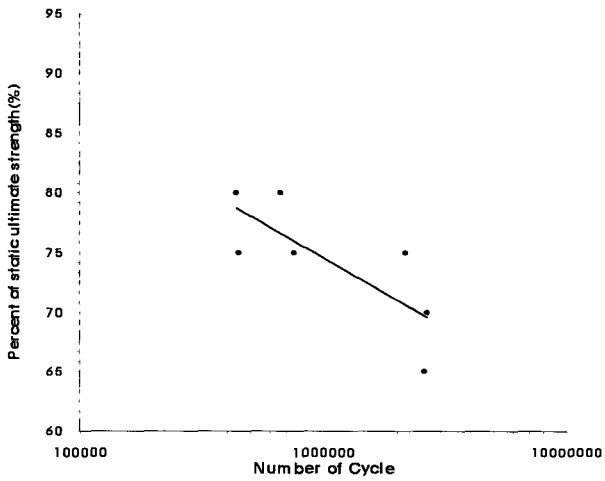

그림 4 동일한 Hz를 갖는 SFRC 실험체에 대한 S-N곡선

3.2 RC 및 SFRC 시리즈의 피로강도 추정식

(1) RC시리즈의 피로강도 추정식

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

(2) SFRC시리즈의 피로강도 추정식

$$S = -5.06155 \times \log(N_u) + 144.636 \, (R^2 = 0.58)$$

3.3 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 표 4에 나타내었다.[2)]

표 4 확률변수 및 통계적 불확실량

구분	A_s	f_y	f_{ck}	τ	v_f	d	γ	P	w_c	γ_f
확률변수	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
공칭값	5.73	4,000	270	45.415	-	23.65	1.0	15	0.165	1.0
공칭비	1.0	1.12	0.92	0.92	1.0	1.0	1.02	1	1.05	1.0
변동계수	0.015	0.11	0.18	0.18	0.015	0.02	0.06	0.028	0.10	0.05
확률분포	정규분포(Normal)									

A_s : 사용철근의 공칭단면적, f_y : 사용 철근의 공칭항복강도,
f_{ck} : 사용 콘크리트의 공칭압축강도,
τ : 강섬유와 콘크리트간에 접착응력, v_f : 강섬유의 함유율,
d : 보강철근의 유효깊이, γ : RC 모델링
P : 집중하중, wc : 등분포하중, γ_f : SFRC 제작

3.4 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.[8)]

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 :

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

- 구형 SFRC 보 :

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

여기서, $a_1 = \dfrac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b}$,

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

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

식(1), (2)에서 a_1, a_2는 등가응력 직사각형 블록의 깊이로서 평형방정식으로부터 구할 수 있다. 또한, f_t는 강섬유로 보강된 콘크리트의 인장강도를 나타낸다. 여기서, 강섬유와 콘크리트 간에 접착응력 τ는 기존문헌[5)]에서 실험을 통해 산정한 값을 적용하였다. β_f는 강섬유 보강 콘크리트의 등가응력 직사각형의 깊이 결정계수로서 280 kgf/cm^2 이하의 강도에서는 대략 0.85로 나타난다. d_f는 양단이 휘어진 강섬유에 대한 접착계수를 나타내고, L/D는 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.

$$M_L = M_{DL} + M_{LL} \tag{3}$$

$$M_L = 0.09031\omega_c + 0.31875P \tag{4}$$

여기서, ω_c는 자중에 의한 등분포하중이고, P는 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.

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

여기서, 확률변수 Z_1 ~ Z_{10}은 표 4에 나타내었다.

4. 강섬유 보강 철근콘크리트보의 신뢰성 해석

4.1 철근콘크리트보의 신뢰성 해석

철근콘크리트 연속보의 신뢰성 해석은 기존연구(곽계환, 2002)의 2경간 연속보를 대상으로 수행하였다.[9] 신뢰성 해석 방법은 SFRC보에서 수행한 것과 동일하게 MCS를 이용하였다. 철근콘크리트 보의 정,부모멘트에 대해 각각 수행한 신뢰성 해석 결과는 다음과 같다.

표 5 철근콘크리트 보의 신뢰성 해석결과

단면위치	신뢰성지수(β)	파괴확률(P_f)
부모멘트	1.89	0.02919
정모멘트	3.17	0.00077

4.2 SFRC보의 부모멘트부에서의 신뢰성 해석

강섬유보강 철근콘크리트 보의 설계에서 SFRC 보의 부모멘트부 설계 단면에 대해 신뢰성 해석을 수행하였다. 표 6은 부모멘트에 대한 신뢰성 해석을 수행한 결과인 신뢰성 지수β와 파괴확률 P_f를 설계 단면별(철근량기준)로 나타내었다. 표4의 철근콘크리트 연속보와 비교를 해보면, 철근콘크리트 보는 부모멘트에 대해 신뢰성 지수가 1.89인 반면에 SFRC보의 경우 최소 1.91부터 최대 2.65까지 모두 철근콘크리트보 보다 큰 것을 알 수가 있다. 이는 강섬유로 인해 추가적으로 안전성을 확보할수 있음을 나타낸다.

표 6 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

위의 표 6으로부터 동일한 강섬유 함유율에 대해 인장 철근량이 줄어들고 대신 콘크리트 단면이 커지는 경우 신뢰성지수가 작아지고 파괴확률이 증가함을 알수가 있다. 이와 같은 경향은 하중의 분담이 강재에서 콘크리트와 강섬유로 갈수록 파괴확률이 증가하는 불안전측임을 나타낸다. 이는 강섬유의 함유율이 높도록 설계할수록 같은 하중에 대해서 불안전측임을 의미하며, 따라서 설계시 강섬유의 함유율을 높일 때에는 그만큼 안전율을 증가시키거나 신뢰성에 기초한 일정한 파괴확률을 가질 수 있도록 설계해야만 한다.

4.3 SFRC보의 정모멘트부에서의 신뢰성 해석

정모멘트 단면으로 설계한 경우에 표 7과 같이 신뢰성 해석을 수행한 결과가 나타난다.

표 7 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

정모멘트부에서도 부모멘트부와 같이 강섬유의 증가에 따라 파괴확률이 높음을 확인할 수 있었는데 이와 같은 경향은 부모멘트부의 고찰에서도 언급한 바와 같이 하중의 분담이 강재에서 콘크리트와 강섬유로 갈수록 파괴확률이 증가하는 불안전측임을 나타낸다. 이는 강섬유의 함유율에 따른 SFRC보를 설계할 때 부모멘트부에서와 마찬가지로 설계시 강섬유의 함유율을 높일 때에는 그만큼 안전율을 증가시키거나 신뢰성에 기초한 일정한 파괴확률을 가질 수 있도록 설계해야만 한다.

4.4 피로에 대한 신뢰성 해석

피로 신뢰성해석을 위해서는 다음 식(6)을 이용하였다.[2]

$$P_F = 1 - R_N(n) \tag{6}$$

$$= 1 - \exp\left[-\left\{\frac{n}{E(N)}\Gamma(1+V_{RN}^{1.08})^{V_{RN}^{1.08}}\right\}\right]$$

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

표 8 피로파괴확률

시편명	재하속도	$logC$	S_{req} (kgf/cm2)	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

S_{req} : *등가응력범위*
C : S-N 회귀직선의 절편
m : S-N 회귀직선의 역기울기

4.5 민감도 분석

SFRC 연속보에서 구조물의 안전도에 가장 큰 영향을 주는 확률변수를 고찰하기 위해 대표적인 확률변수인 강섬유 함유율(V_f), 제작오차(γ_f), 유효높이(d), 콘크리트의 강도(f_{ck})에 대한 민감도분석을 실시하였다.

표 9 MCS에 의한 민감도분석 결과

구분		신뢰성지수			
		V_f	γ_f	d	f_{ck}
변동계수	90%	3.29188	3.34082	3.30058	3.29646
	95%	3.29341	3.31805	3.29724	3.29425
	100%	3.29407			
	105%	3.29268	3.26573	3.29060	3.29125
	110%	3.29341	3.23660	3.28817	3.28919

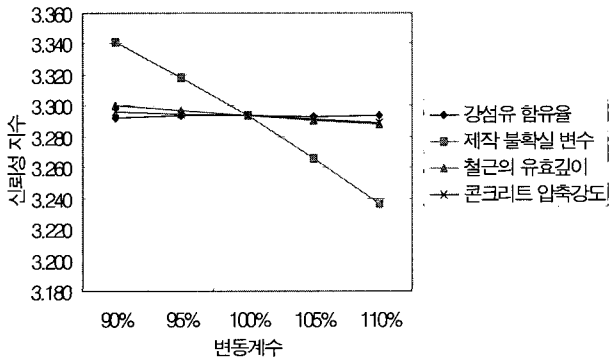

그림 5 MCS에 의한 민감도 분석결과

표 10 AFOSM에 의한 민감도분석 결과

구분		신뢰성지수			
		V_f	γ_f	d	f_{ck}
변동계수	90%	3.34807	3.39394	3.35315	3.34932
	95%	3.34801	3.37153	3.35062	3.34866
	100%	3.34796			
	105%	3.34789	3.32324	3.34515	3.34926
	110%	3.34783	3.29740	3.34221	3.34868

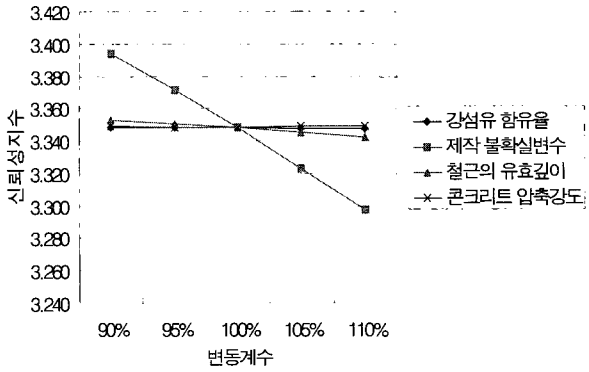

그림 6 AFOSM에 의한 민감도분석 결과

5. 결 론

본 연구에서는 SFRC보의 신뢰성 해석을 통하여 불확실성 요인을 밝히고 제안한 한계상태함수의 타당성을 검토하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1) 같은 크기의 저항단면에 대해 강섬유 함유율을 높이는 쪽으로 설계할 때 오히려 신뢰성지수는 감소하는 것을 확인 할 수 있는데, 강섬유의 증가에 따라 불확실이 더 커지기 때문이며 따라서 설계시 강섬유의 증가에 따른 추가적인 안전율을 확보해 주거나 신뢰성에 기초한 설계에 의해 일정한 파괴 확률을 갖도록 설계해야만 할 것으로 판단된다.
2) 역으로 같은 강섬유 함유율에 대해서 인장철근의 단면적을 줄이고 대신 콘크리트의 단면적을 크게 하는 설계를 수행 할 경우 강섬유의 함유율과 무관하게 인장철근의 단면적이 줄수록 안전도가 일향적으로 감소함을 알수가 있었다. 이는 SFRC보의 경우 하중을 인장철근, 압축측 콘크리트, 인장측 강섬유가 분담하게 되는데, 인장철근의 하중분담율을 줄이는 대신 콘크리트나 강섬유의 하중분담율을 늘이게 되면 상대적으로 불확실성이 큰 재료에 의해 하중을 지지하도록 하는 것이기 때문에 안전 도가 감소하는 것으로 판단된다.
3) SFRC보의 경우 강섬유 혼입에 따른 강도는 개선되는 것으로 판단되지만, 동적 피로특성은 강섬유로 인해 결함의 내재 가능성과 강섬유의 불균질 배치로 인한 콘크리트와 강섬유 사이의 응력집중 현상으로 인하여 피로파괴확률이 상당히 높음을 알 수가 있다.
4) 민감도 분석 결과 SFRC 보는 제작오차에 가장 민감한 것으로 확인되었으며, 따라서 SFRC 구조물의 제작시 강섬유의 혼입과정에 특별히 주의해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2004년도 원광대학교의 교비지원에 의해 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1. Achintya Haldar., Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design, *John Wiley & Sons, Inc.* 2000
2. Estes, "A System Reliability Approach to the Lifetime Optimization of Inspection and Repair of Highway, " Thesis, Colorado University, 1997
3. Kwak, K. H., June, S., Cheng, T. Z., Thomas, H., "Shear-Fatigue Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams" *ACI Journal*, 1991
4. Lee, M. K., Barr. B.I.G., "Strength and fracture properties of industrially prepared steel fiber reinforced concrete" *Cement & Concrete Composites*, Vol.25 2003 pp.321~332
5. Ramzi B. Abdul-Ahad, Omer Qarani Aziz. "Flexural strength of reinforced concrete T-beams with steel fibers", M.Sc. Thesis, University of Technology, Baghdad, Irag, 1999
6. 곽계환, "강섬유를 혼입한 2경간 연속보의 정적실험에 관한 연구", 대한토목학회 2001 학술발표회 논문집
7. 곽계환 외 2인 "강섬유 보강 철근콘크리트보의 강도 신뢰성해석", 한국전산구조공학회, 학술발표회 논문집, 2002
8. 곽계환 외 2인 "강섬유 보강 철근콘크리트보의 신뢰성 해석", 한국전산구조공학회, 학술발표회 논문집, 2004
9. 곽계환 외 2인 "강섬유 보강 철근콘크리트 2경간 연속보의 피로거동에 관한연구", 한국콘크리트학회, 2003, 제15권 2호, pp.163~172
10. 조효남외 3인 "강바닥판교의 개선된 다단계 최적설계 알고리즘", 한국전산구조공학회, 2003, Vol.16, No. 3, pp.237~250
11. 조효남외 3인 "확률신경망을 이용한 철도 판형교의 손상 평가" 한국전산구조공학회, 2003, Vol.16, No. 3, pp.229~236
12. 양영순외 1인 "신뢰도지수와 목표성능치에 기반한 확률론적 구조설계 최적화기법에 대한 비교연구", 한국전산구조공학회, 가을학술발표회논문집, 2000, pp. 32~39