

강섬유 보강 철근콘크리트 연속보의 강도신뢰성 해석

Strength Reliability Analysis of Continuous Steel Fiber Reinforced Concrete Beam

유한신* 광계환** 조효남***
Yoo, Han-Shin Kwak, Kae-Hwan Cho, Hyo-Nam

ABSTRACT

Steel fiber may be used to raise the effectiveness and safety of reinforced concrete structure and to relax its brittle-fracture behavior. However it is to be clearly stated that the uncertainty for the strength of fiber reinforced concrete(SFRC) is rather increased. Therefore, it is necessary to evaluate the safety of SFRC beam using reliability analysis incorporating realistic uncertainty. This study presents the statistical data and proposes the limit state model to analyze the reliability of SFRC beam. In order to verify the efficiency of the proposed limit state model, its numerical application and sensitivity analysis were performed for a continuous SFRC beam. From the results of the numerical analysis, it is founded that the reliability of SFRC beam is significantly difficult from the conventional RC beams and proposed limit state model for SFRC beam is more rational compared with that for conventional RC beams. Then it may be stated that the reliability analysis of SFRC beams must be carried out for the development of design criteria and the safety assessment.

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물이 점차 대형화, 장대화 및 특수화됨에 따라 보다 높은 강도의 물성을 갖는 콘크리트의 요구가 점차 증대되고 있으며, 이를 위해 국내·외에서 보다 고강도 콘크리트를 사용하거나 다양한 섬유를 콘크리트에 혼입한 고강도 콘크리트의 필요성이 대두되고 있다. 국내에서도 섬유를 혼입한 고강도 콘크리트를 활용하기 위해 다양한 분야에서 연구가 수행되고 있으며 앞으로 이러한 고강도 콘크리트의 수요가 급증할 것으로 예상된다. 이는 일반 콘크리트와 같이 취성파괴를 일으키는 재료는 균열발생 후 반복하중에 의해 균열선단에 응력집중이 발생하게 되고 이 응력집중으로 인하여 균열이 급격히 진행하여 파괴에 이르므로 이러한 취성적 성질을 보강하기 위해 여러 가지 섬유를 도입할 수 있으며, 섬유의 도입은 추가적으로 콘크리트의 각종 재료적 성질을 좋아지도록 하기 때문이다.

* 원광대학교 토목환경공학과 박사수료
** 정희원·원광대학교 토목환경공학과 교수
*** 정희원·한양대학교 토목환경공학과 교수

섬유 보강 철근콘크리트는 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 인성, 충격저항 그리고 초기 균열강도와 같은 물성을 개선하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 강섬유 보강 철근콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete; SFRC)의 역학적 매커니즘이 갖는 불확실성과 강섬유를 무작위로 뿌리는 콘크리트의 제작과정에서 강섬유가 균질하게 분포하지 못하는 불확실성 등에 대한 검토는 아직까지도 기초적인 구조실험에 의한 확인의 수준이고 불확실성을 고려하는 체계적인 연구는 수행되지 못하고 있는 실정이다. 특히 확률통계에 기초한 SFRC 보의 신뢰성 해석에 관한 연구는 국내외를 불문하고 거의 전무한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 SFRC 보의 불확실성을 고려하는 신뢰성 해석을 수행하고자 하며 이를 위해 SFRC에 적합한 한계상태모형을 제안하고 또한 각종 한계상태태수에 포함된 확률변수(random variable)들에 대한 확률통계적 자료를 국내외의 관련문헌을 근거하여 수집, 제시하였다. SFRC 보의 보다 신뢰성 있는 확률통계적 자료는 향후 본 연구진에 의해 수행된 시험결과를 바탕으로 보다 개선된 자료로 제시할 것이다. 이와 같이 제안된 SFRC 보의 한계상태모형 및 신뢰성 해석에 관한 타당성과 효율성을 검증하기 위해 일반 철근콘크리트와 SFRC 연속보에 대해 수치예제와 민감도분석을 수행하였다. 신뢰성 해석을 위한 수치해석기법으로는 AFOSM(Advanced First Order Second Moment)방법을 사용하였다.

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.¹⁾

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 최대 부모멘트(4.9tonf-m)가 발생하는 중앙지점의 최종적인 단면은 그림 2와 같다. 철근은 $A_s=2@D19(5.73\text{cm}^2)$ 를 사용하였다.

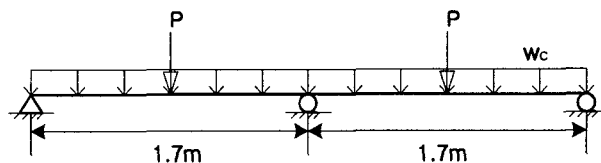


그림 1. 적용대상 연속보

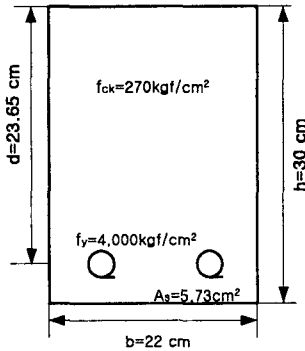


그림 2. 설계된 단면제원

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. 강도한계상태합수

3.1 확률변수 및 통계적 불확실량

주어진 설계조건에서 불확실량을 고려하여야 하는 확률변수는 재료적 물성, 단면치수, 모델링, 구조해석, 제작 등과 하중에 대한 것들이다. 이들 중 본 연구에서 고려한 확률변수와 각 확률변수의 통계적 특성값은 Estes(1997)²⁾가 Nowak등의 자료를 정리하여 만든 통계값을 적용하였으며 표 2에 나타내었다. 표 2에서 보는 바와 같이 강섬유의 함유율, v_f 는 기존의 문헌에서 확률통계 자료를 획득하기 곤란하나 계량에 의해 비교적 정확한 양을 혼입하게 되므로 비교적 유사한 철근의 확률통계 자료와 같은 값을 적용하였다. 그러나 통상적으로 변동성이 상당히 클 것으로 예상이 되는 SFRC 제작에 관한 확률변수인 γ_f 는 참고문헌³⁾을 참조하여 공칭비는 1로 그리고 변동계수는 0.05로 결정하였으며, 향후 본 연구진에 의한 실험결과를 바탕으로 Bayesian Updating 기법을 적용하여 보다 국내의 실제 사정을 반영하는 실제적 확률통계적 자료를 획득할 것이다. 다음으로 SFRC의 공칭강도를 계산하는데 필요한 강섬유와 콘크리트 간에 접착응력 τ 는 기존문헌이나 실험을 통해 쉽게 추정할 수 있는 확률변수가 아니므로 비교적 불확실량이 큰 콘크리트의 공칭비와 변동계수를 적용하는 것으로 가정하였다.

통계적 불확실량은 기존의 자료에 실험이나 관측, 또는 전문가의 의견 등으로부터 얻은 데이터를 Bayesian Updating 기법에 의해 개선할 수 있으나 현재 추가적인 가용 데이터가 부족하여 기존의 문헌을 그대로 참조하였다.

표 2. 확률변수 및 통계적 불확실량

구분	A_s	f_y	f_{ck}	τ	ν_f	d	γ	P	w_c	γ_f
확률변수	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}
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, ν_f : 강섬유의 함유율, d : 보강철근의 유효깊이, γ : RC 모델링
 P : 집중하중, w_c : 등분포하중, γ_f : SFRC 제작

3.2 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.⁵⁾

- 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, $a_1 = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b}$, $a_2 = \frac{A_s f_y / b + f_t h}{0.85 f_{ck} + f_t / \beta_f}$,
 $f_t = 0.82 \tau \nu_f d_f (L/D)$: (Ramzi, 1999)

식(1), (2)에서 a_1 , a_2 는 등가응력 직사각형 블록의 깊이로서 평형방정식으로부터 구할 수 있다. 또한, f_t 는

즉, $G(\cdot) = 0$ 인 면상의 최확파괴점(Most Probable Failure Point)에서 이루어지게 된다. 따라서 식(5)와 같이 비선형 한계상태면에 보다 근접한 파손확률을 구할 수 있다.

4.2 신뢰성 해석

SFRC 연속보의 신뢰성 해석을 위해서 다음과 같은 조건을 가정하였다. 2.2절에서 제시한 바와 같이 설계된 일반 철근콘크리트 연속보에 강섬유를 각각 0.75%(SFRC1), 1.00%(SFRC2), 1.25%(SFRC3) 혼입하여 균질하게 분포하는 것을 고려하였다. 즉, 기존 철근콘크리트 연속보와 단면과 주철근은 똑같고 추가적으로 강섬유가 혼입되어 강성이 증가하는 경우를 가정하였다 (그림 3 참조).

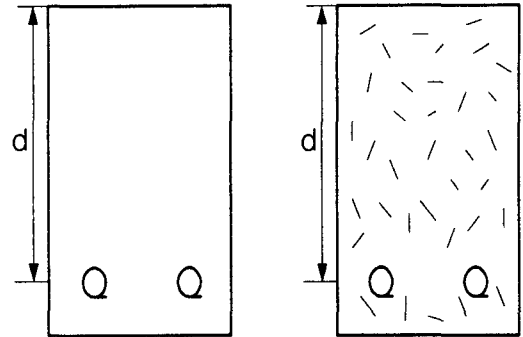


그림 3. RC와 SFRC 개념도

이러한 경우에 대해서 신뢰성 해석을 수행하여 신뢰성지수 β 와 파괴확률 P_f 를 나타내면 표 3과 같다.

표 3. 신뢰성 해석 결과

구분 (강섬유 함유율)	신뢰성지수 (β)		파괴확률	
	SFRC 제작오차 미고려	SFRC 제작오차 고려	SFRC 제작오차 미고려	SFRC 제작오차 고려
RC	1.76		0.03907	
SFRC1(0.75%)	3.09	2.87	0.00102	0.00205
SFRC2(1.00%)	3.23	3.16	0.00062	0.00080
SFRC3(1.25%)	3.29	3.24	0.00050	0.00061

표 3으로부터 SFRC의 제작오차를 고려하지 않은 경우는 RC와 같은 수준의 불확실성을 고려하는 개념으로 SFRC 연속보를 취급하는 것을 의미하며, 신뢰성지수가 강섬유 함유율에 따라 최소 3.09에서 최대 3.29까지 RC의 1.76을 크게 상회하는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 파괴확률에서도 0.00102 ~ 0.00050으로 RC의 0.03907에 비해 크게 낮아짐을 알 수가 있다. 이는 RC에 강섬유를 혼입함으로써 강도의 개선이 크게 되고 있음을 알 수가 있다. 뿐만 아니라 혼입되는 강섬유의 양이 증가할수록 강도가 개선되고 파괴확률이 감소하고 있음을 알 수가 있다. 다시 말해, RC의 파괴확률이 3.9%에서 0.1~0.05%까지 감소하고 있는 것을 알 수가 있다.

그러나 전술한 바와 같이 SFRC에서 강섬유의 혼입을 균등하게 분포시키거나 응력집중부에 분포시키는 것은 많은 불확실성을 가지고 있으므로 이에 대한 제작오차를 본 연구에서 제안한 방법에 의해 고려하게 되면 먼저 SFRC1의 경우, 신뢰성지수가 3.09에서 2.87로, SFRC2의 경우 3.23에서 3.16으로, SFRC3의 경우 3.29에서 3.24로 떨어지고 있음을 알 수가 있다. 이를 보다 이해하기 쉬운 개념인 파괴확률로 살펴보면 SFRC1의 경우 0.102%에서 0.205%로 두 배정도 파괴확률이 증가하고 있음을 알 수가 있으며, 다른 강섬유 함유율에 대한 파괴확률에서는 증가량이 둔화되고는 있지만 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4.3 민감도 분석

SFRC 연속보에서 구조물의 안전도에 가장 큰 영향을 주는 확률변수를 고찰하기 위해 대표적인 확률변수인 강섬유 함유율(v_f), 제작오차(γ), 유효높이(d), 콘크리트의 강도(f_{ck})에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석시 표 2에서 제시한 변동계수를 100%로 가정하고 각 확률변수에 대해 각각 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 씩 변화시키면서 그에 따른 신뢰성지수의 변화를 고찰하였다. 각 경우에 대한 신뢰성 해석 결과는 그림 4에 도식적으로 제시되었으며 구체적인 값은 표 4에 나타내었다.

그림과 표로부터, 제시된 확률변수 중에서는 콘크리트 강도에 가장 민감한 것으로 확인되었다. 이는 콘크리트 강도의 변동계수가 가장 큰 것으로 제시되었기 때문으로 사료된다. 반면에 통상적인 관점에서 SFRC 제작의 오차가 상당히 민감하게 영향을 미칠 것으로 생각되었지만 콘크리트의 강도에 비해 상대적으로 작음을 알 수가 있다. 그러나 일반적인 다른 확률변수에 비해서는 민감도가 크다는 것을 알 수가 있다. 다시 말해, SFRC 연속보를 설계, 가설할 경우 콘크리트의 품질관리와 강섬유 혼입에 보다더 주의해야 하는 것으로 판단할 수 있다.

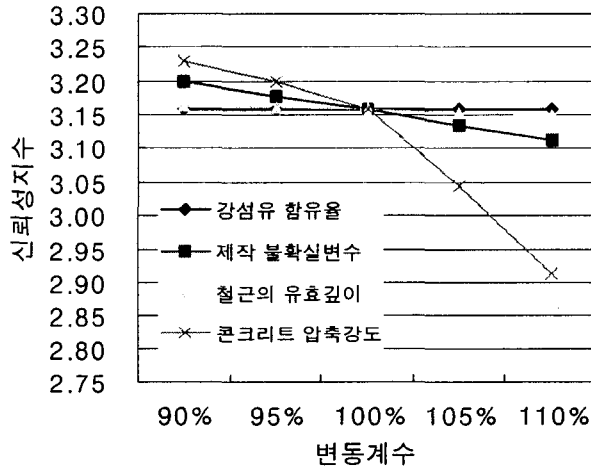


그림 4. 확률변수의 민감도 분석 결과

표 4. 확률변수의 민감도 분석 결과

구분		신뢰성지수			
		v_f	γ	d	f_{ck}
변동계수	90%	3.157281	3.197982	3.163104	3.228601
	95%	3.157185	3.178111	3.160205	3.198061
	100%	3.157150			
	105%	3.157114	3.135121	3.153941	3.044116
	110%	3.157076	3.112047	3.150576	2.914415

5. 결 론

본 논문에서는 국내외적으로 연구가 거의 전무할 뿐만 아니라 일반 철근콘크리트에 비해 제작에 관한 불확실성이 더 큰 것으로 알려져 있는 SFRC 보에 대한 신뢰성 해석을 수행하기 위하여 SFRC 보에 적합한 강도한계상태함수와 기초적인 확률통계 자료를 제안하였다. 또한 제안된 한계상태함수를 이용하여 각 확률변수에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 연구 수행결과 다음과 같은 내용을 확인할 수가 있었다.

- 1) 강섬유를 혼입하여 보강한 철근콘크리트 보는 일반 철근콘크리트 보에 비해 안전도(신뢰성지수)의 증가 효과가 큰 효율적인 보강방법으로 사료된다.
- 2) 기존의 철근콘크리트 보와 달리 SFRC 보의 경우, 추가적인 불확실량이 존재하므로 이를 충분히 반영하고 있는 본 연구에서 제안한 한계상태함수를 적용하는 것이 바람직함을 알 수가 있다.
- 3) 민감도 분석 결과, 일반 철근콘크리트 보의 콘크리트 강도 외에 SFRC의 경우에는 강섬유 혼입의 불확실성에 대한 민감도가 큰 것을 알 수가 있으며 이는 SFRC 보의 설계 및 안전도 평가시 본 연구에서 제안하는 신뢰성 해석을 반드시 수행해야 함을 알 수가 있다.
- 4) 향후 SFRC의 LRFD 설계기준의 정립 및 LCC(Life Cycle Cost)에 기초한 최적설계의 기본이 되는 신뢰성 해석 방법으로 적용 가능할 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