

강섬유보강콘크리트의 압축거동 특성을 반영한 기둥의 내폭해석

김재민¹, 이상훈², 김재현³, 김강수^{4*}

Numerical Study on Columns Subjected to Blast Load Considering Compressive Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete

Jae-Min Kim¹, Sang-Hoon Lee², Jae Hyun Kim³, Kang Su Kim^{4*}

Abstract: Steel fiber reinforced concrete (SFRC) exhibits enhanced strength and superior energy dissipation capacity compared to normal concrete, and it can also reduce crack propagation and fragmentation of concrete even when subjected to blast loads. In this study, the parameters defining failure surface and damage function of the K&C concrete nonlinear model were proposed to be applied for the properties of SFRC in LS-DYNA. Single element analysis has been conducted to validate the proposed parameters in the K&C model, which provided very close simulations on the compressive behavior of SFRC. In addition, blast analysis was performed on SFRC columns with different volume fractions of steel fibers, and the blast resistance of SFRC columns was quantitatively analyzed with Korea Occupational Safety & Health Agency (KOSHA) guidelines.

Keywords: Steel fiber-reinforced concrete, Numerical analysis, LS-DYNA, K&C model, Blast load

1. 서론

강섬유보강콘크리트(Steel-fiber reinforced concrete, SFRC)는 일반 콘크리트(Normal concrete, NC)에 비하여 상대적으로 높은 강도 및 에너지 소산 능력을 보인다. 또한 SFRC는 폭발하중과 같은 극한하중이 작용할 때 균열 전파 및 파편 발생을 억제하므로 충격 및 폭발 하중을 받는 구조물의 내폭설계에 활용될 수 있으며, 이러한 SFRC의 내폭성능을 규명하기 위한 해석적 연구들이 수행되고 있다(Lee et al., 2021; Yin and Ouyang, 2022, Lee et al., 2013).

폭발하중을 받는 구조물의 해석 및 설계에는 일반적으로 단자유도 해석이 활용된다. 단자유도 해석은 구조물의 응답에 연관된 복잡한 시스템을 등가의 단순화된 시스템으로 치환하여 응답을 도출하는 해석법이다. 따라서 계산 과정이 간단하고 해석 소요시간이 단축된다. 다만, 해석 대상 부재에 발생하는 국부적인 손상을 파악할 수 없고 높은 변형률 속도로 인한 재료의 물성변화를 해석에 반영하기가 어렵다. 따라서

최근에는 ANSYS 및 LS-DYNA와 같은 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 해석방법이 내폭해석에 널리 활용되고 있다. LS-DYNA는 콘크리트 재료의 비선형 거동해석을 구현할 수 있는 K&C(Karagozian and Case) 모델, CDPM(Concrete damage plastic model), RHT (Riedel-Hiermaier-Thoma) 모델과 같은 다양한 비선형 재료 모델을 제공한다(LST, 2021). K&C 모델은 콘크리트의 구속효과, 연성거동 및 변형률 속도에 의한 재료의 물성변화를 반영할 수 있기 때문에 폭발하중에 대한 해석에 널리 활용되고 있다(Lee et al., 2022). 특히, NC를 모델링 할 때는 NC의 압축강도만을 입력함으로써 K&C 모델을 구성하는 49개의 파라미터가 자동적으로 산정되는 이점이 있다. 다만, SFRC와 같이 NC와는 재료물성이 다른 재료를 해석하기 위해서는 일부 파라미터들이 보정되어야 한다. 따라서 SFRC의 물성을 해석에 적절히 구현할 수 있는 입력 파라미터를 도출하기 위한 연구가 수행되고 있다. Lin(2018)은 초고성능 섬유보강 콘크리트(Ultra high performance fiber-reinforced concrete, UHPFRC)의 재료시험 결과에 기반하여 UHPFRC에 적합한 K&C 모델의 손상 조절 파라미터(Damage scaling parameters) 및 손상 함수 (Damage function, $\eta(\lambda)$)를 정의하는 파라미터를 제안하였다. Lee et al.(2021)은 SFRC의 재료 시험 결과로부터 파괴 곡면(Failure surface)에 대한 파라미터 산정식을 SFRC 압축강도에 대한 함수로 나타내었으며, 손상 함수를 정의하는 파라미터를 강섬유 중량비, 강섬유 혼입률 및 SFRC 압축강도에 대한 함수로 나타내었다. 다만 제안된

¹학생회원, 서울시립대학교 건축공학과 스마트시티융합전공 석사과정

²정회원, 서울시립대학교 건축공학과 스마트시티융합전공 박사과정

³정회원, 서울시립대학교 건축학부 박사후연구원

⁴정회원, 서울시립대학교 건축공학과 스마트시티융합전공 교수, 교신저자

*Corresponding author: kangkim@uos.ac.kr

Department of Architectural Engineering and Smart City Interdisciplinary Major Program, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2023년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

산정식에는 SFRC 물성과 연관이 있는 강섬유 종류(Straight steel fiber, Hooked-end steel fiber, Micro steel fiber) 및 강섬유 물성에 대한 영향이 고려되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 SFRC의 재료시험 데이터베이스(Database, DB)를 구축하고 이를 활용하여 파괴 곡면과 손상 함수를 정의하는 파라미터를 도출하였으며, 압축력이 작용하는 단일요소해석을 수행하여 도출된 파라미터를 검증하였다. 또한, 폭발하중을 받는 SFRC 기둥 부재에 대한 유한요소해석을 수행하여 섬유 혼입률에 따른 기둥 부재의 내폭성능을 정량적으로 평가하였다.

2. K&C 모델 파라미터 도출

2.1 파괴 곡면 (Failure surface)

파괴 곡면은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 재료 삼축압축시험에서 정수압 응력(hydrostatic pressure, p)에 따른 편심 응력(deviatoric stress, $\Delta\sigma$)을 나타낸 것이며, 재료의 최대응력(maximum stress, $\Delta\sigma_m$), 항복응력(yield stress, $\Delta\sigma_y$) 및 잔류응력(residual stress, $\Delta\sigma_r$)은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta\sigma_m = \alpha_0 + \frac{p}{\alpha_1 + \alpha_2 p} \quad (1-a)$$

$$\Delta\sigma_y = \alpha_{0y} + \frac{p}{\alpha_{1y} + \alpha_{2y} p} \quad (1-b)$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{p}{\alpha_{1f} + \alpha_{2f} p} \quad (1-c)$$

여기서 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_{0y}, \alpha_{1y}, \alpha_{2y}, \alpha_{1f}, \alpha_{2f}$ 는 회귀상수이며, $\varepsilon_m, \varepsilon_y, \varepsilon_r$ 은 각각 최대, 항복 및 잔류응력에서의 변형률을 의미한다.

본 연구에서는 SFRC의 파괴 곡면을 정의하기 위하여 기존 문헌을 바탕으로 SFRC 삼축 압축시험 DB를 구축하였다(Lee

Table 1 Parameters of failure surface for SFRC

Parameter	Value
α_0	$0.3472f_c$
α_1	0.4906
α_2	$0.0566/f_c$
α_{0y}	$0.0461f_c$
α_{1y}	0.9650
α_{2y}	$0.1377/f_c$
α_{1f}	0.5244
α_{2f}	$0.0400/f_c$

f_c : Compressive strength of SFRC

et al., 2015; Gholampour and Ozbakkaloglu, 2018; Abbass et al., 2018; Ou et al., 2012; Shafieifar et al., 2017; Chern et al., 1992; Babanajad et al., 2012; Yoo et al., 2015; Dwarakanath and Nagaraj, 1991; Lu et al., 2006, Ren et al., 2016, Meng et al., 2021; Chi et al., 2014). DB에 기반하여 회귀분석을 수행하였으며, 그 결과 SFRC의 파괴곡면을 정의하기 위한 회귀상수는 Table 1과 같이 산정되었다. 검증 결과, $\Delta\sigma_y, \Delta\sigma_m$, 및 $\Delta\sigma_r$ 회귀식의 결정계수가 0.97, 0.95, 및 0.94로 산정되어 실험 결과를 매우 유사하게 반영하는 것으로 나타났다.

2.2 손상 함수 (Damage function)

강섬유 혼입으로 인하여 SFRC의 강도 및 내구성은 일반적으로 NC에 비하여 우수한 경향을 보인다. 특히, SFRC는 변형 연화 구간의 거동에서 NC에 비하여 높은 에너지 소산능력을 보인다. 따라서, K&C 모델에서 일반 콘크리트 압축강도에 맞추어 제공되는 49개의 파라미터 값은 SFRC의 변형 연화 구간의 거동을 해석에 반영하지 못한다. 본 연구에서는 SFRC 일축 압축실험 데이터를 수집하였으며, 변형 연화 구간의 거동

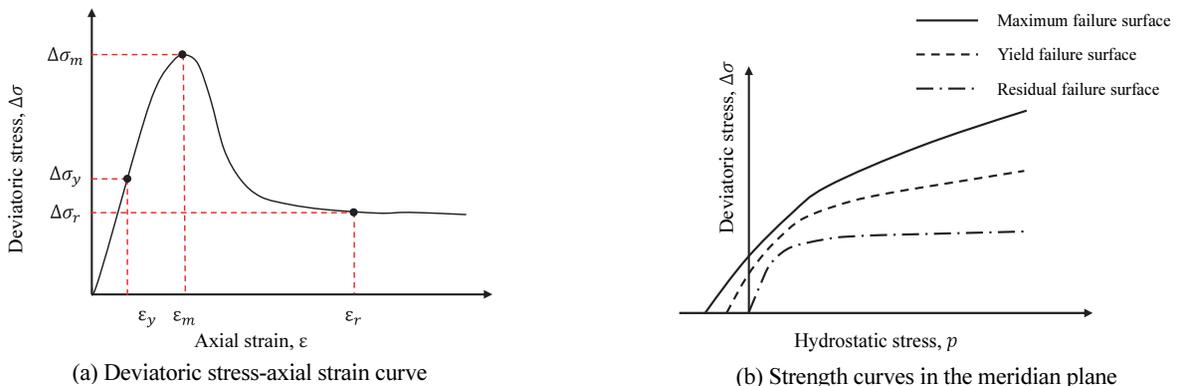


Fig. 1 Failure surfaces in K&C model

을 적절히 모사하기 위하여 손상함수와 연관된 파라미터를 보정하였다(Xu and Lu, 2016; Aoude et al., 2009; Nataraja et al., 1999; Jang and Yun, 2018; Bencardino et al., 2008; Jo et al., 2001; Mansur et al., 1999).

Kong et al.(2017)은 LS-DYNA에서 사용되는 K&C모델에 적합한 손상함수(Damage function, $\eta(\lambda)$)를 다음과 같이 제안하였다.

$$\eta(\lambda) = \begin{cases} \alpha \frac{\lambda}{\lambda_m} + (3-2\alpha) \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2 + (\alpha-2) \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^3, & \lambda \leq \lambda_m \\ \frac{\lambda/\lambda_m}{\alpha_c(\lambda/\lambda_m - 1)^{\alpha_d} + \lambda/\lambda_m}, & \lambda > \lambda_m \end{cases} \quad (2)$$

여기서, η 는 재료의 일축 압축실험으로부터 다음과 같이 산정된다.

$$\eta = \begin{cases} \frac{\Delta\sigma - \Delta\sigma_y}{\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_y}, & (\text{hardening}) \\ \frac{\Delta\sigma - \Delta\sigma_r}{\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_r}, & (\text{softening}) \end{cases} \quad (2)$$

α 는 변형 경화 구간, α_c 및 α_d 는 변형 연화 구간의 거동에 연관된 파라미터이며, λ 는 다음과 같이 산정된다.

$$\lambda = \frac{1}{\left(1 + \frac{p}{f_t}\right)^{b_1}} \bar{\epsilon}^p \quad (p \geq 0) \quad (3)$$

여기서, λ_m 은 η 가 1일 때의 λ 이며, p 는 정수압 압력, f_t 는 재료의 인장강도, b_1 은 재료 실험으로부터 산정되는 손상 조절 파라미터, $\bar{\epsilon}^p$ 는 등가 소성 변형률이다. 본 연구에서는 Mardalizad et al.(2019)이 제시한 방법을 사용하여 총 77개의 SFRC 응력-변형률 곡선으로부터 각 재료 배합에 적합한 $\alpha_c, \alpha_d, \lambda_m$ 을 도출

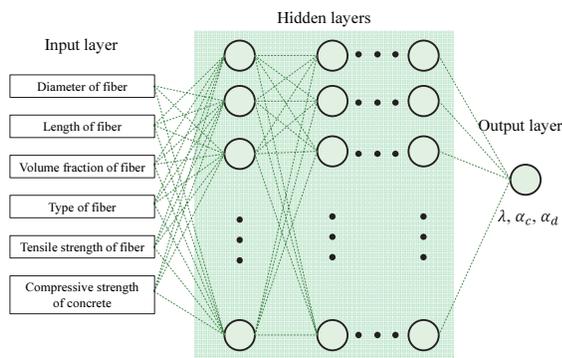


Fig. 2 Structure of ANN model

하였다. 또한, 산정된 각 배합의 $\alpha_c, \alpha_d, \lambda_m$ 을 활용하여 다양한 배합비를 갖는 SFRC의 손상함수 파라미터를 도출할 수 있는 인공신경망(Artificial neural network, ANN) 모델을 구성하였다.

ANN 모델은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 입력층(Input layer), 은닉층(Hidden layer), 출력층(Output layer)으로 구분되며, 은닉층은 12개의 노드(Node)로 구성된 4개의 층으로 구성하였다. Fig. 3과 같이 각 층 사이의 연산에는 Leaky ReLU (Rectified linear unit) 활성화함수(Activation function)가 사용되었으며, 출력층 연산에는 Linear 활성화함수가 적용되었다. 입력변수는 강섬유직경(0.18 ~ 1.1 mm), 섬유길이(12.5 ~ 60.0 mm), 강섬유 혼입률(0.5 ~ 3.6%), 섬유 유형(Straight, Hooked, Micro fiber), 강섬유 인장강도(400 ~ 3,000 MPa), 콘크리트 압축강도(35 ~ 171 MPa)가 선정되었다. 학습을 수행하기 전에 모델의 학습속도를 향상시키고 지역 최적해(Local optimum)에 수렴하는 가능성을 줄이기 위하여, 입력변수를 정규화(Normalization)하는 과정이 필요하다. 따라서 각 입력변수는 MinMaxScaler를 사용하여 값의 범위가 0~1이 되도록 정규화된 후 ANN 모델의 입력층에 입력되었다. ANN 학습모델을 검증하기 위하여 평균제곱합(Mean squared error, MSE)이 모델검증 지표로 선정되었으며, λ 와 α_d 학습모델의 MSE는 0.1 미만이고 α_c 학습모델의 MSE는 약 0.15로 산정되었다. 본 연구에서 해석모델에 입력된 파라미터 α_c, α_d 및 λ_m 은 개발 ANN 모델로부터 산정된 결과가 사용되었다.

2.3 상태방정식 (Equation of state, EOS)

폭발하중과 같은 높은 압력조건에서의 SFRC 거동을 모사하기 위해서는 정수압에 따른 체적변형을 나타내는 상태방정식(Equation of state, EOS)이 입력되어야 한다. K&C 모델에서 정수압 응력과 체적 변형률의 관계식은 다음과 같이 정의된다.

$$p = C(\epsilon_v) + \gamma T(\epsilon_v) E_i \quad (4)$$

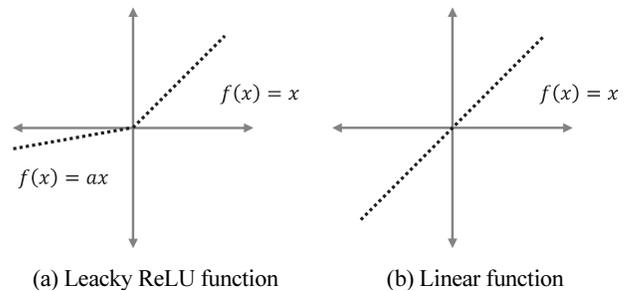


Fig. 3 Activation functions of ANN model

여기서, ϵ_v 는 체적 변형률, $C(\epsilon_v)$ 는 절대 영도 (absolute zero) 에서 체적 변형률에 따른 정수압 응력이다. 또한, $\gamma T(\epsilon_v) E_i$ 는 열압력(thermal pressure)으로 인한 증가의 정수압을 의미하며, γ 는 비열, $T(\epsilon_v)$ 는 보정계수, E_i 는 초기 체적의 내부 에너지를 의미한다. 다만, 본 연구에서는 열압력으로 인한 정수압은 고려하지 않았다.

LS-DYNA에서는 EOS_TABULATED_COMPACTION 키워드(Keyword)를 사용하여 10개 쌍의 정수압 응력, 체적 변형률 및 제하 체적탄성계수(Unloading bulk modulus)를 입력하여 상태방정식을 정의할 수 있다. Yang et al.(2021)은 정수압 압축시험 및 flyer-plate impact test로부터 SFRC의 정수압 응

력, 체적 변형률 및 제하 체적탄성계수를 측정하였으며, SFRC의 EOS를 Table 2와 같이 제시하였다.

2.4 단일요소해석 (Single element analysis)

단일요소해석은 유한요소해석 프로그램에서 8개 노드 (node)로 이루어진 단일요소의 거동을 분석하는 방법이며, 기하적 영향을 줄이고 재료 본연의 물성을 확인할 수 있어서 재료모델 검증용 목적으로 주로 수행된다. (Xu et al, 2020; Su et al, 2022). 본 연구에서는 SFRC의 압축시험 데이터로부터 도출된 K&C 모델의 파라미터를 검증하기 위하여 단일요소해석을 수행하였다. 해석모델의 메쉬 사이즈(Mesh size)는 50 mm이며, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 경계조건 및 하중조건을 설정하여 압축하중을 받는 입방형 공시체를 모사하였다. Fig. 5는 단일요소 해석 및 SFRC 압축시험으로부터 산정된 응력-

Table 2 Ten pairs of EOS parameters for SFRC

Volumetric strain, ϵ_v	Pressure (GPa)	Unloading bulk modulus, K (GPa)
0	0	K
-0.0015	0.03	K
-0.0043	$1.96p_f$	$1.014K$
-0.0101	$4.41p_f$	$1.065K$
-0.0305	$11.8p_f$	$1.267K$
-0.0513	$21.5p_f$	$1.470K$
-0.0726	$32.0p_f$	$1.672K$
-0.0943	$47.3p_f$	$1.825K$
-0.1740	$128.0p_f$	$4.106K$
-0.2080	$181.0p_f$	$5.000K$

p_f : Hydrostatic pressure at failure of uniaxial compressive test

$$K: \frac{dp}{d\epsilon_v} = \frac{E_c}{3(1-2\nu)}$$

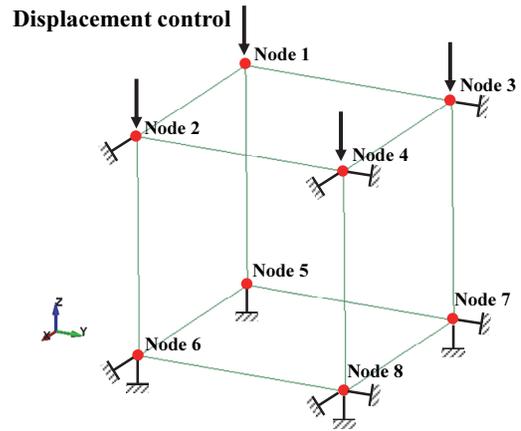


Fig. 4 Single element analysis model

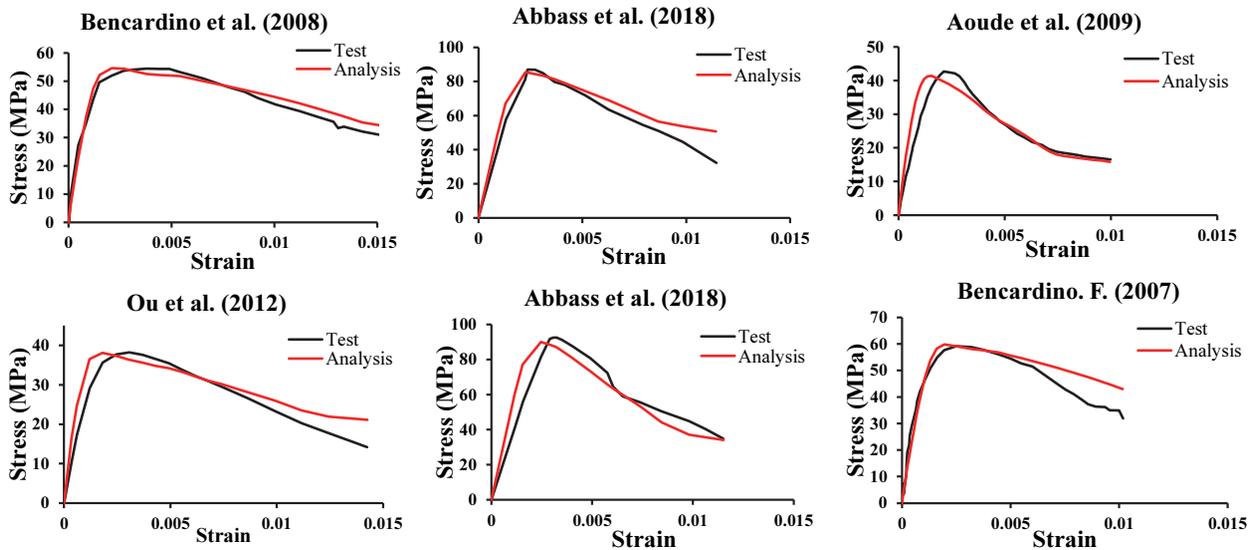


Fig. 5 Stress-strain curve derived from single element analysis and test

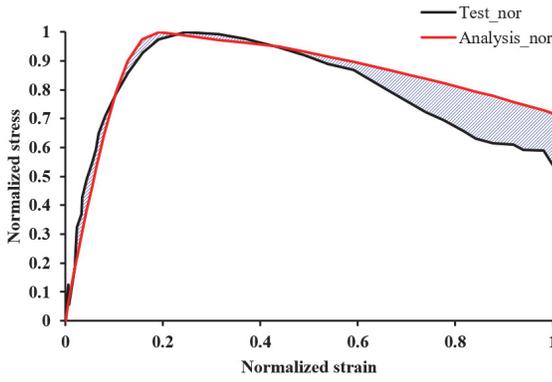


Fig. 6 Normalized stress-strain curve

변형률 곡선을 나타낸 것이다. 재료모델의 모사성을 정량적으로 평가하기 위하여 Fig. 6에 나타난 바와 같이 산정된 응력-변형률 곡선을 정규화하고 두 곡선 사이의 면적을 산정하였다. 77개의 SFRC 데이터에서 산정된 면적의 평균값은 약 0.13으로 산정되었으며, 도출된 K&C 모델의 파라미터는 SFRC의 거동을 합리적으로 모사하는 것으로 나타났다.

3. SFRC 기둥 내폭해석

3.1 변형률 속도 효과 (Strain-rate effect)

높은 변형률 속도를 경험하는 재료의 강도 및 강성은 정적 하중이 작용할 때에 비해 증가한다는 연구결과가 보고되었다 (Dilger et al., 1984; Lok and Zhao, 2004). 이러한 재료물성의 변화는 정적강도에 대한 증가된 동적강도의 비율인 동적증가 계수(Dynamic increase factor, DIF)를 통하여 해석에 반영될 수 있다. 본 연구에서는 내폭해석에 SFRC의 동적 강도 증진 효과를 해석에 반영하기 위하여 Zhang and Mindess(2011) 및 Thomas and Sorensen(2017)이 제안한 DIF 모델을 사용하였으며, 철근의 DIF 산정에는 Malvar and Ross(1988)의 모델을 사용하였다.

3.1.1 SFRC의 DIF

Zhang and Mindess(2011)는 SFRC 압축강도의 DIF_c 를 다음과 같이 제안하였다.

$$DIF_c = \begin{cases} (\phi \cdot \dot{\epsilon})^\alpha, & \dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_{BLC} \\ \beta \cdot \dot{\epsilon}^{1/3}, & \dot{\epsilon} \geq \dot{\epsilon}_{BLC} \end{cases} \quad (5-1)$$

$$\dot{\epsilon}_{BLC} = 25 \cdot e^{(f_c/130)} \quad (5-2)$$

$$\alpha = \frac{\ln(\beta \cdot \dot{\epsilon}_{BLC}^{1/3})}{\ln(\phi \cdot \dot{\epsilon}_{BLC})}, \beta = \frac{5}{9 \cdot e^{(-f_c/230)}}, \phi = 10^5 \quad (5-3)$$

여기서, f_c 는 SFRC의 압축강도, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도를 의미한다. 또한, Thomas and Sorensen(2017)이 제안한 SFRC의 인장강도에 대한 DIF_t 를 다음과 같이 제안하였다.

$$DIF_t = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right)^\delta, & \dot{\epsilon} \leq 10s^{-1} \\ \beta \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right)^{3/4}, & \dot{\epsilon} > 10s^{-1} \end{cases} \quad (6-1)$$

$$\delta = 1 / \left(1 + 8 \frac{f_c}{f_{c0}}\right), \beta = 10^{(7\delta - 5.25)} \quad (6-2)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_s (=1 \times 10^{-6} s^{-1})$ 은 정적 변형률 속도, f_{c0} 는 10 MPa이다.

3.1.2 철근의 DIF

Malvar and Ross(1988)은 철근의 항복강도에 대한 DIF_y 를 다음과 같이 제안하였다.

$$DIF_y = \frac{(\dot{\epsilon})^{0.019 - 0.009 \frac{f_y}{414}}}{10^{-4}} \quad (7)$$

여기서 f_y 는 철근의 항복강도를 의미한다.

3.2 해석모델 검증

Burrell et al.(2015)는 폭발물 없이도 폭발로 인한 충격파를 모사할 수 있는 충격튜브(Shock tube) 실험을 통해서 SFRC 기둥의 내폭성을 평가하였다. 본 연구에서는 섬유 혼입률 1.5% 실험체(SCC-1.5%-75)를 대상으로 유한요소해석 모델의 검증을 수행하였다. 충격튜브 실험에서는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 기둥부재 측면에 충격파가 등분포로 작용될 수 있도록 하중 전달장치가 설치되었으며, 유압잭(Hydraulic jack)을 사용하여 기둥에 축하중을 가력하였다. SCC-1.5%-75 실험체의 단면크기는 152 mm×152 mm, 철제 지점 사이의 유효 길이는 1,980 mm이며, 11.3 mm 직경의 길이방향 철근이 4개, 6.3 mm 직경의 전단철근이 75 mm의 간격으로 보강되었다. SFRC의 압축강도는 56.6 MPa, 길이방향 철근 및 전단철근의 항복강도는 각각 480 MPa, 615 MPa이며, 혼입된 강섬유의 인장강도 및 중횡비는 각각 1,100 MPa 및 55이다.

충격튜브 실험에서는 2,033 mm×2,033 mm 크기의 하중 전달 장치를 사용하여 기둥에 폭발하중을 적용하였으며, 하중 전달 장치에서 계측된 최대 폭압은 73.2 kPa이며, 충격량은 681.1 kPa·ms이다. 다만 해석모델에서는 Fig. 8와 같이 해석에 소요되는 시간을 줄이기 위하여 하중 전달장치를 모델링하는 대신에 압력을 환산하여 기둥 측면에 최대 폭압 1 MPa,

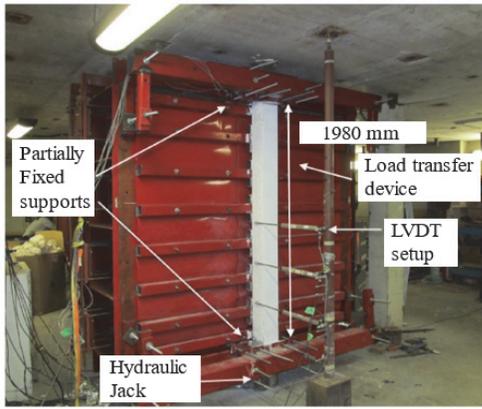


Fig. 7 shock tube test set up (Burrell et al., 2015)

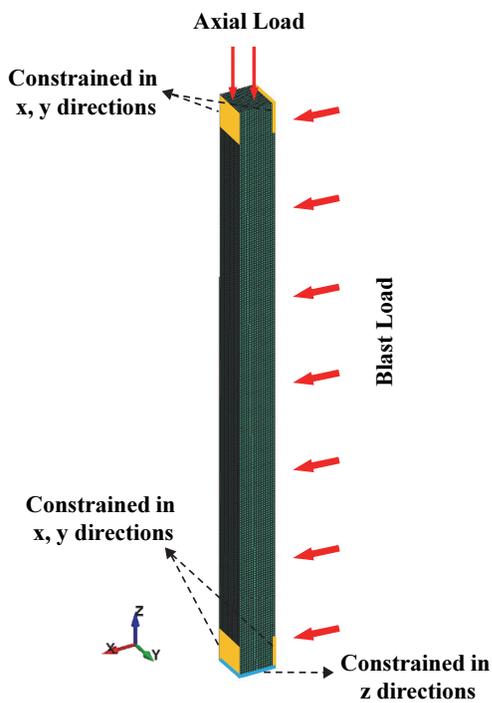


Fig. 8 Details of blast analysis model

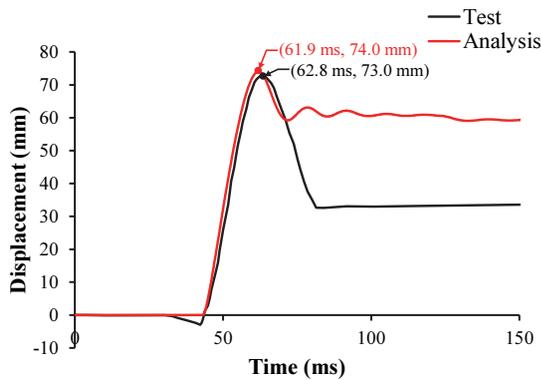


Fig. 9 Comparison of displacement-time curves

충격량 9.35 MPa·ms의 폭발하중을 단순화된 삼각형 형태의 하중-시간 이력곡선으로 적용하였다. 기둥 상부에는 실험과 동일하게 294 kN의 축하중을 모델링하였다. SFRC는 8개의 노드로 구성된 솔리드(Solid) 요소, 철근은 2개의 노드로 구성된 빔(Beam) 요소로 모델링하였다. SFRC와 철근의 부착거동은 CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID 키워드를 통하여 적용되었다. 모든 요소의 메쉬 사이즈는 10 mm로 설정되었으며, 기둥 상하부 측면은 x,y 방향, 기둥 하단부는 z 방향으로 구속되었다.

실험에서 계측된 기둥 중심부에서의 횡변위 데이터와 해석을 통하여 산정된 횡변위 데이터를 비교하여 해석모델을 검증하였다. 실험에서 계측된 최대변위는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 62.8 ms 시점에서 73.0 mm이었으며, 해석을 통해 산정된 최대변위는 61.9 ms 시점에서 74.0 mm인 것으로 나타났다. 실험결과와 해석결과의 오차는 약 1.37%로 나타났으며, 이는 본 연구에서 제시한 SFRC 재료 모델링 파라미터 및 유한요소해석 모델링이 폭발하중을 받는 SFRC 기둥 부재의 거동을 매우 근사하게 모사하고 있다는 것을 의미한다.

3.3 강섬유 혼입률에 따른 SFRC 기둥의 거동 분석

본 연구에서는 검증된 SFRC 해석모델을 활용하여 섬유 혼입률이 SFRC 기둥의 내폭성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 해석모델 및 폭발 시나리오는 3.2에 서술된 바와 같으며, 섬유 혼입률에 따른 K&C 모델 파라미터를 산정하여 재료 모델링을 수행하였다. 섬유 혼입률 1%, 1.5%, 2%의 SFRC 기둥을 대상으로 내폭해석을 수행하였으며, 기둥 중심부의 변위 데이터를 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 섬유 혼입률 1%, 1.5%, 2%일 때 산정된 최대변위는 각각 81.2 mm, 74.0 mm, 68.5 mm로 나타났으며, 지점 회전각은 각각 4.69°, 4.27°, 3.96°로 나타났다(Table 3 참조). 한국산업안전보건공단의 방호구조의 설계 및 설치에 관한 기술지침(KOSHA GUIDE D-65-2018)에서는 Table 3과 같이 폭발하중을 받는

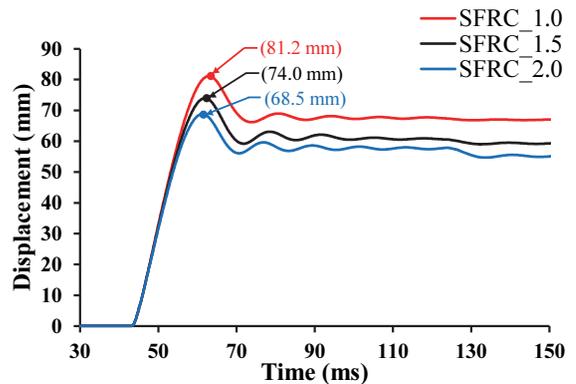


Fig. 10 Blast analysis results of SFRC columns

Table 3 Response limits for RC members presented in KOSHA GUIDE D-65-2018 and Response of SFRC members by blast analysis

Member type	Support rotation limits (KOSHA), θ°	
	Protection level 1	Protection level 2
RC	2	4
Specimens	Response of SFRC members by blast analysis, θ°	
SFRC_1.0	4.69	
SFRC_1.5	4.27	
SFRC_2.0	3.96	

구조부재의 변형한계를 규정하고 있다. KOSHA 지침에서는 폭발하중을 받는 철근콘크리트 구조부재의 지점회전각이 2° 이하(방호단계 1)인 경우에는 구조물내의 인명 및 기자재를 보호할 수 있고, 4° 이하(방호단계 2)인 경우에는 구조부재 자체의 붕괴 및 파괴를 방지할 수 있는 것으로 제시하고 있다. 결과적으로, 본 연구에 적용된 폭발 시나리오에서 섬유 혼입률이 1% 및 1.5%인 기둥 부재는 지점 회전각이 4° 이상 발생하였으므로 내폭구조물로서 적합하지 않은 것으로 판단된다. 반면, 섬유 혼입률이 2% 이상인 기둥 부재는 4° 미만의 지점 회전각이 발생하여 방호단계 2에 해당하는 성능이 확보되는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 SFRC 재료시험 데이터를 근거로 내폭해석에 주로 활용되는 K&C 모델의 파괴곡면 및 손상함수에 대한 모델링 파라미터를 도출하였다. 단일요소해석을 수행하여 도출된 파라미터를 검증하였으며 섬유 혼입률에 따른 SFRC 기둥의 내폭성능을 정량적으로 평가하였다. 이 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. SFRC의 항복강도, 최대 강도 및 잔류 강도 등 파괴곡면을 결정하는 회귀상수와 손상함수 파라미터를 도출하여 단일요소 해석에 적용하였다. 본 연구에서 도출한 회귀상수와 손상함수 파라미터는 SFRC의 해석적 연구에 적용할 수 있는 수준의 정확도를 확보한 것으로 판단된다.
2. 본 연구에서 제안한 K&C 모델 파라미터가 적용된 SFRC 기둥 해석결과는 실험결과와 매우 유사한 것으로 나타났다. 다만, 최대변위 이후 잔류변위에 대해서는 해석결과와 실험결과의 차이가 다소 크게 나타났으므로 이를 개선하기 위한 노력이 지속되어야 할 것으로 판단된다.
3. 섬유 혼입률이 내폭성능에 미치는 영향을 분석하고자 섬유 혼입율을 변수로 SFRC 기둥의 내폭해석을 수행하였으며, 섬유 혼입률이 2%인 SFRC 기둥만이 KOSHA에서 규정하는 방호 2단계 수준의 내폭성능을 갖는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KA163162).

References

1. Lee, M. J., and Kwak, H. G. (2021), Numerical simulations of blast response for SFRC slabs using an orthotropic model, *Engineering Structures*, 238, 112150.
2. Yin, H., and Ouyang, Y. (2022), Experimental and Numerical Study on Steel Fiber Concrete under Blast Loading, *Buildings*, 12(2), 2119.
3. Lee, J. Y., Shin, H. O., Min, K. H., and Yoon, Y. S. (2013), Analytical Evaluation of High Velocity Impact Resistance of Two-way RC Slab Reinforced with Steel Fiber and FRP Sheet, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 17(3), 1-9 (in Korean, with English abstract).
4. Livermore Software Technology (LST). (2021), LS-DYNA Keyword User's Manual, Volumn 2.
5. Lee, K. H., Kim, J. M., Kim, J. H., Lee, S. H., and Kang, S. K. (2022), Evaluation on Blast Resistance Performance of Reinforced Concrete Wall Strengthened by FRP Sheet, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 26(5), 151-160 (in Korean, with English abstract).
6. Lin, X. (2018), Numerical simulation of blast responses of ultra-high performance fibre reinforced concrete panels with strain-rate effect, *Construction and Building Materials*, 176, 371-382.
7. Lee, M. J., Kwak, H. G., and Part, G. K. (2021), An improved calibration method of the K&C model for modeling steel-fiber reinforced concrete, *Composite Structures*, 269, 114010.
8. Lee, S. C., Oh, J. H., and Cho, J. Y. (2015), Compressive Behavior of Fiber-Reinforced Concrete with End-Hooked Steel Fibers, *Materials*, 8(4), 1442-1458.
9. Gholampour, A., and Ozbakkaloglu, T. (2018), Fiber-reinforced concrete containing ultra high-strength micro steel fibers under active confinement, *Construction and Building Materials*, 187, 299-306.
10. Abbass, W., Khan, M. I., and Mourad, S. (2018), Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete, *Construction and Building Materials*, 168, 556-569
11. Ou, Y. C., Tsai, M. S., Liu, K. Y., and Chang, K. C. (2012), Compressive Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(2), 207-215
12. Shafieifar, M., Farzad, M., and Azizinamini, A. (2017), Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC), *Construction and Building Materials*, 156, 402-411.
13. Chern, J. C., Yang, H. J., and Chen, H. W. (1992), Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete in Multiaxial Loading, *ACI Materials Journal*, 89(1), 32-40.

14. Babanajad, S. K., Farnam, Y., and Shekrcchi, M. (2012), Failure criteria and triaxial behaviour of HPFRC containing high reactivity metakaolin and silica fume, *Construction and Building Materials*, 29, 215-229
15. Yoo, D. Y., Yoon, Y. S., and Banthina, N. (2015), Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate, *Cement and Concrete Composites*, 64, 84-92.
16. Dwarakanath, H. V., and Nagaraj, T. S. (1991), Comparative Study of Predictions of Flexural Strength of Steel Fiber Concrete, *ACI Structural Journal*, 88(6), 714-720.
17. Lu, X., and Hsu, C. T. T. (2006), Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression, *Cement and Concrete Research*, 36, 1679-1685.
18. Ren G. M., Wu, H., Liu, Q. F., and Gong, Z. M. (2016), Triaxial compressive behavior of UHPCC and applications in the projectile impact analyses, *Construction and Building Materials*, 113, 1-14.
19. Meng, K., Xu, L., and Chi, Y. (2021), Experimental investigation on the mechanical behavior of hybrid steel-polypropylene fiber reinforced concrete under conventional triaxial cyclic compression, *Construction and Building Materials*, 291, 123262.
20. Chi, Y., Xu, L., Mei, G., Hu, N., and Su, J. (2014), A unified failure envelope for hybrid fibre reinforced concrete subjected to true triaxial compression, *Composite Structures*, 109, 31-40.
21. Xu, J., and Lu, Y. (2016), Analytical and Finite Element Concrete Material Models: Comparison of Blast Response Analysis of One Way Slabs, American Concrete Institute(ACI), 3.1-3.22.
22. Aoude, H., Cook, W. D., and Mitchell, D. (2009), Behavior of Columns Constructed with Fibers and Self-Consolidating Concrete, *ACI Structural Journal*, 106(3), 349-357.
23. Nataraja, M. C., Dhang, N., and Gupta, A. P. (1999), Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression, *Cement & Concrete Composites*, 21(5-6), 383-390.
24. Jang, S. J., and Yun, H. D. (2018) Combined effects of steel fiber and coarse aggregate size on the compressive and flexural toughness of high-strength concrete, *Composite Structures*, 185, 203-211.
25. Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., and Swamy, N. (2008), Stress-Strain Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete in Compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(3), 255-263.
26. Jo, B. W., Shon, Y. H., and Kim, Y. J. (2001) The Evaluation of Elastic Modulus for Steel Fiber Reinforced Concrete, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 37(2), 152-161.
27. Mansur, M. A., Chin, M. S., and Wee, T. H. (1999), Stress-Strain Relationship of High-Strength Fiber Concrete in Compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(1), 21-29.
28. Mardalizad, A., Caruso, M., Manes, A., and Giglio, M. (2019), Investigation of mechanical behavior of a quasi-brittle material using Karagozian and Case Concrete (KCC) model, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(6), 1119-1137.
29. Yang, S., Kong, X., Wu, H., Fang, Q., and Xiang, H. (2021), Constitutive modeling of UHPCC material under impact and blast loadings, *International Journal of Impact Engineering*, 153, 103860.
30. Xu, S., Wu, P., and Wu, C. (2020), Calibration of KCC concrete model for UHPC against low-velocity impact, *International Journal of Impact Engineering*, 144, 103648.
31. Su, Q., Wu, H., and Fang, Q. (2022), Calibration of KCC model for UHPC under impact and blast loadings, *Cement and Concrete Composites*, 127, 104401.
32. Dilger, W. H., Koch, R., and Kowalczyk, R. (1984), Ductility of Plain Confined Concrete Under Different Strain Rates, *ACI Journal*, 81(1), 73-81.
33. Low, T. S., and Zhao, P. J. (2004), Impact Response of Steel Fiber-Reinforced Concrete Using a Split Hopkinson Pressure Bar, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(1), 54-59.
34. Zhang, L., and Mindess, S. (2011), Dynamic Compressive Toughness of High Strength Fiber Reinforced Concrete, *ACI Symposium Publication*, 281, 1-21.
35. Thomas, R. J., and Sorenson, A. D. (2017), Review of strain rate effects for UHPC in tension, *Construction and Building Materials*, 153, 846-856.
36. Malvar, L. J. (1998), Review of Static and Dynamic Properties of Steel Reinforcing Bars, *ACI Materials Journal*, 95(6), 609-616.
37. Burrell, R. P., Aoude, H., and Saatcioglu, M. (2015), Response of SFRC Columns under Blast Loads, *Journal of Structural Engineering*, 141(9), 04014209.
38. Korean Occupational Safety Health Agency. (2012). KOSHA GUIDE D-65-2018, KOSHA (in Korean).

Received : 09/18/2023

Revised : 10/06/2023

Accepted : 10/06/2023

요 지 : 강섬유보강콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 높은 강도 및 우수한 에너지 소산 능력을 보이며, 폭발하중 작용 시 균열 전파 및 파편 발생을 감소시킬 수 있다. 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA에 SFRC 재료물성을 구현하고자 콘크리트 비선형 재료모델인 K&C 모델의 파괴 곡면(Failure surface) 및 손상 함수(Damage function)를 정의하는 파라미터를 제안하였다. 제안 파라미터 검증에 위하여 단일요소해석을 수행하였으며, 제안 파라미터가 적용된 재료모델은 SFRC 재료시험 거동을 상당히 유사하게 묘사하는 것으로 나타났다. 또한, 강섬유 혼입률에 따른 SFRC 기둥의 성능을 평가하기 위하여 내폭해석을 수행하였으며, KOSHA 규정을 참조하여 섬유 혼입률에 따른 SFRC 기둥의 내폭성능을 정량적으로 분석하였다.

핵심용어 : 강섬유보강콘크리트, 수치해석, LS-DYNA, K&C 모델, 폭발하중
