



구형 비상체에 의한 충격하중을 받는 강섬유보강 콘크리트 패널의 손상특성

장석준¹⁾ · 손석권²⁾ · 김용환²⁾ · 김규용¹⁾ · 윤현도^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾충남대학교 기계설계공학과

Face Damage Characteristic of Steel Fiber-Reinforced Concrete Panels under High-Velocity Globular Projectile Impact

Seok-Joon Jang,¹⁾ Seok-Kwon Son,²⁾ Yong-Hwan Kim,²⁾ Gyu-Yong Kim,¹⁾ and Hyun-Do Yun^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²⁾Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT This paper investigates the effects of fiber volume fraction and panel thickness on face damage characteristics of steel fiber-reinforced concrete (SFRC) under high-velocity globular projectile impact. The target specimens were prepared with 200 × 200 mm prismatic panels with thickness of 30 or 50 mm. All panels were subjected to the impact of a steel projectile with a diameter of 20 mm and velocity of 350 m/s. Specifically, this paper explores the correlation between mechanical properties and face damage characteristics of SFRC panels with different fiber volume fraction and panel thickness. The mechanical properties of SFRC considered in this study included compressive strength, modulus of rupture, and toughness. Test results indicated that the addition of steel fiber significantly improve the impact resistance of conventional concrete panel. The front face damage of SFRC panels decreased with increasing the compressive toughness and rear face damage decreased as the modulus of rupture and flexural toughness increased. To evaluate the damage response of SFRC panels under high-velocity impact, finite element analysis conducted using ABAQUS/Explicit commercial program. The predicted face damage of SFRC panels based on simulation shows well agreement with the experimental result in similar failure mode.

Keywords : steel fiber, damage mitigation, impact resistance, high velocity impact, mechanical properties, concrete

1. 서 론

콘크리트 구조물의 내충격성능 향상을 위해서는 비상체에 의한 관통방지 및 손상저감이 요구된다. 이를 위하여 기존에는 콘크리트 벽체의 두께를 증진시키는 방법을 주로 사용하였으며, 관입깊이, 관통깊이 한계두께, 배면 박리 한계두께 예측을 위한 연구가 활발하게 진행되었다.^{1,3)} 상기의 연구들에서는 비상체 및 콘크리트의 특성을 근거로 예측식을 제안하고 있으며, 동일한 조건에서 압축강도 및 파괴계수가 향상됨에 따라 내충격성능이 향상되는 것으로 보고되었다. Almansa와 Canovas의⁴⁾ 연구에서는 일반콘크리트와 강섬유보강 콘크리트(Steel fiber-reinforced concrete, SFRC) 패널의 비상체 충돌에 따른 내충격성능

을 평가하였다. 연구결과 강섬유의 혼입이 관입깊이에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났으나, 전면 및 배면의 박리방지에 크게 기여하는 것으로 나타났다.

김상희 등의⁵⁾ 연구에서는 고속충격하에서 SFRC 패널의 손상 특성을 평가하였으며, 기존의 예측식과의 비교를 통해 고속비상체의 관입깊이를 평가하였다. 연구결과 강섬유 혼입률 1.5%까지는 일반콘크리트에 비해 관입깊이가 증가되는 특성을 나타내었으나, 섬유가 혼입됨에 따라 전면손실 범위와 탈락중량이 감소되는 양상을 나타내었다. 또한 상기연구에서는 기존식을 통한 SFRC 패널의 관입깊이 평가는 예측이 가능하나 정면 및 배면 손실률의 평가는 어려운 것으로 보고되었으며, 강섬유 혼입에 따른 패널의 손상완화를 반영하는 재료모델 개발의 필요성을 제안하였다.

강섬유의 혼입은 장석준 등의⁶⁾ 연구에서 나타난 바와 같이 압축강도 보다는 파괴계수 증진에 효율적이며, 재료의 인성향상에 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 강섬유 혼입에 따른 내충격성능의 향상은 압축강도 보다는

*Corresponding author E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr
 Received February 5, 2015, Revised March 14, 2015,
 Accepted March 16, 2015
 ©2015 by Korea Concrete Institute

파괴계수 및 인성향상에 기인한 것으로 판단된다. 콘크리트의 역학적 특성과 내충격성능의 상관성은 김홍섭 등의⁷⁾ 연구에서 나타난 바와 같이 압축강도의 향상은 표면 관입저항 성능을 향상시키고, 전면의 파괴를 완화시키는 것으로 나타났다. 특히, 섬유가 보강된 경우 휨 인장성능 및 파괴에너지가 증가함에 따라 배면박리 성상이 완화되는 것으로 보고되고 있다. Marar 등의⁸⁾ 연구에서는 고강도 SFRC의 압축인성과 자유낙하에 의한 내충격성능에 관한 실험을 진행하였다. 실험결과 섬유혼입률이 증가함에 따라 압축인성 및 내충격성능이 향상되었으며, 결과에 근거한 상호관계를 규명하였다.

따라서 본 연구에서는 다양한 혼입률의 SFRC를 제작하였으며, 두께 변화에 따른 전면 및 배면 손실률에 대한 평가를 실시하였다. 또한 압축 및 휨 거동을 평가하여 재료의 강도 및 인성과 고속충격에 의한 손상 특성의 상관성을 평가하였으며, 유한요소해석을 통한 SFRC 패널의 손상 특성예측 기법을 제안하였다.

2. 실험

2.1 실험계획

본 연구는 강섬유의 혼입률 및 패널의 두께가 SFRC 패널의 손상 및 내충격특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실시되었으며, 이를 위하여 Table 1과 같이 실험체를 계획하였다. 섬유의 혼입률은 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0%로 설정하였으며, 패널의 크기는 200×200 mm, 두께는 30

Table 1 Summaries of specimens

Thickness (mm)	$V_f^{(1)}$ (%)	Size (mm)	Impact condition	Number (EA)
30	0	Width× Height: 200×200	Diameter: 20mm	2
	0.5			2
	1.0		Mass: 32.6g	1
	1.5			2
	2.0			2
50	0	Velocity: 350m/s		1
	1.0			2
	1.5			2
	2.0			2

⁽¹⁾ V_f : steel fiber volume fraction

Table 2 Mix proportions of concrete

$f_{ck}^{(1)}$ (MPa)	W/C ⁽²⁾ (%)	Unit weight (kgf/m ³)			
		Water	Cement	Sand	Coarse aggregate
30	55	205	373	756	924

⁽¹⁾Specific compressive strength ⁽²⁾Water-cement ratio

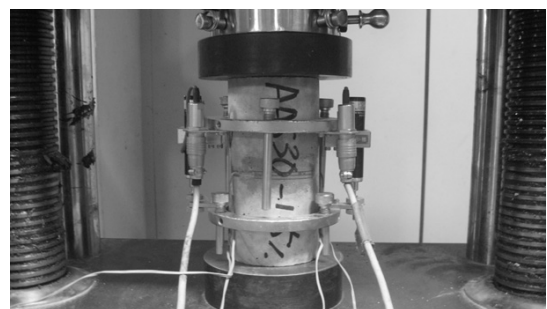
및 50 mm로 계획하였다. 사용된 콘크리트의 배합을 Table 2에 나타내었으며, 섬유혼입률에 따라 단위부피당 0~157 kg의 섬유를 혼입하였다. 설계기준 압축강도는 30 MPa로 계획하였으며, 물-시멘트 비는 55%로 설정하였다. 강섬유는 국내 K사의 양단후크형 강섬유를 사용하였으며, 역학적 특성을 Table 3에 정리하여 나타내었다. SFRC의 제조를 위하여 200 L 용량의 이축 믹서(mixer)를 사용하였으며, 일반콘크리트 제조 후 강섬유를 투입하였다. 1.5% 이상의 혼입률에서 급격한 섬유투입으로 인한 작업성 저하 및 섬유몽킴 현상을 방지하기 위하여, 30초 간격으로 2차에 나누어 분할혼입을 실시하였다.

2.2 역학적 특성 평가방법

콘크리트 및 SFRC의 일축압축 거동평가를 위하여 KS F 2405에⁹⁾ 준하여 원주형 압축공시체(100×200 mm)를 제작하였으며, 2000 kN 용량의 만능재료시험기를 사용하여 초당 0.01 mm의 변위제어방식으로 가력하였다. 변위제어 방식은 안경림 등의¹⁰⁾ 연구에 나타난 바와 같이 하중제어방식에 비하여 탄성계수 및 압축강도의 정밀한 평가에 제약을 미치지지만, 균열발생 후 SFRC의 압축거동을 평가하기에 유리한 것으로 판단된다. 본 연구의 압축강도 시험체 설치현황을 Fig. 1(a)에 나타내었으며, 중앙부 100 mm

Table 3 Mechanical properties of steel fiber

Type	Specific gravity	Diameter (mm)	Length (mm)	Aspct ratio (l/d)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Hooked	7.85	0.5	30	60	1,100	205



(a) Compressive test



(b) Flexural test

Fig. 1 Test set-up for mechanical properties

구간에 두 개의 선형변위계를 설치하여 변형을 측정하였다.

Fig. 1(b)는 휨시험체 설치상황을 나타낸 것으로 KS F 2408에¹¹⁾ 준하여 100×100×400 mm의 각주형 공시체를 사용하여 지간 300 mm의 4점 휨시험을 실시하였다. 시험을 위해 200 kN 용량의 만능재료시험기를 사용하여 분당 0.75 mm 변위제어 방식으로 가력하였다. 중앙부에서의 수직처짐을 측정하기 위하여, 요크(Yoke)형태의 철물에 고정된 2개의 선형변위계를 사용하였다.

2.3 내충격 특성 평가방법

Fig. 2는 내충격특성 평가 장치 및 실험체 설치현황을 나타낸 것이다. 그림과 같이 질소가스 압력식 충격실험장치를 사용하였다. 비상체는 직경 20 mm, 무게 23.6 g의 구형 강체를 사용하였으며, 충격속도는 350 m/s 범위에서 실험을 진행하였다. 제작된 패널은 챔버(Chamber)내에 고정된 철물을 사용하여 4면 구속된 상태로 실험을 진행하였다. 콘크리트와 SFRC의 내충격성능을 평가하기 위하여 관통파괴, 배면파괴, 표면파괴로 나누어 평가하였으며, 전면 및 배면의 면적손실률을 기존의 면적과 파괴된 면적의 비율로 산정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 역학적 특성 평가결과

3.1.1 압축거동

Fig. 3(a)는 일반콘크리트 및 SFRC의 압축거동 평가결과를 나타낸 것으로, 강섬유가 1% 이상 혼입될 경우 압

축강도 및 탄성계수가 감소하는 것으로 나타났다. 최대 하중 이후 거동의 경우 섬유가 혼입됨에 따라 연성적인 파괴양상을 나타내었다. 이는 섬유의 가교작용이 균열의 진전을 완화하기 때문으로 판단된다. 압축인성의 경우 변형 0.005까지의 응력-변형 곡선 면적을 압축강도의 40%까지의 면적으로 나누어 산정하였으며, 산정된 결과를 Table 4에 정리하여 나타내었다. 강섬유 혼입에 따른 압축인성의 향상은 섬유혼입률 1%까지 급격하게 나타났으며, 1% 이상의 섬유가 혼입될 경우 압축인성의 변화가 미소한 것으로 나타났다.

3.1.2 휨거동

Fig. 3(b)는 콘크리트와 SFRC의 휨거동을 나타낸 것으로, 초기균열이후 취성적 파괴양상을 나타내었다. 반면, 강섬유가 혼입된 경우 초기균열이후 강섬유가 균열의 진전을 완화하면서 연성적인 파괴거동을 나타내었다. 혼입률 1.5% 이상의 시험체의 경우 유사 처짐경화 특성을 나타내었으며, 2%의 섬유가 혼입된 경우 가장 높은 파괴계수를 나타내었다. 휨인성의 경우 ASTM C 1609에¹²⁾ 따라 처짐 1/150까지의 평균잔여강도와 식 (1)에 따라 계산된 값의 비율로 산정하였다.

$$f_r (MPa) = 0.62\lambda\sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

여기서 f_r 은 콘크리트의 파괴계수(MPa), λ 는 경량콘크리트 계수, f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도(MPa)를 나타낸다. 예상된 바와 같이, 섬유혼입률이 증가함에 따라 휨인성이 향상되었으며, 1.5%의 혼입률까지 급격한 증가를 나타내었다. 2%의 실험체의 경우 1.5% 실험체와 미소한 차

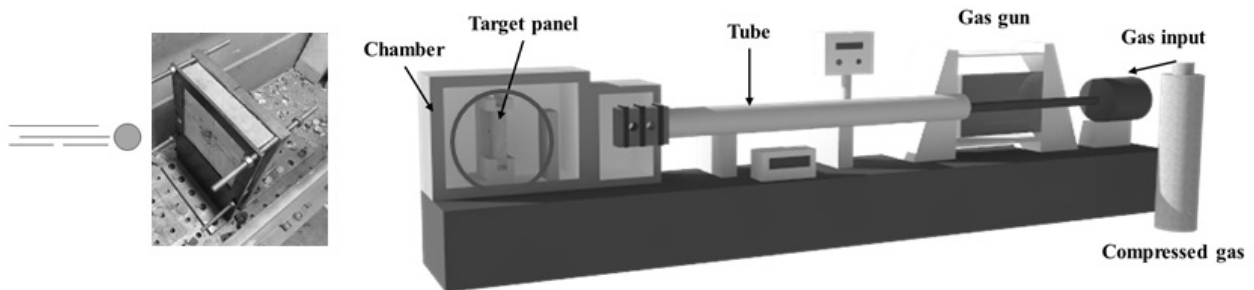
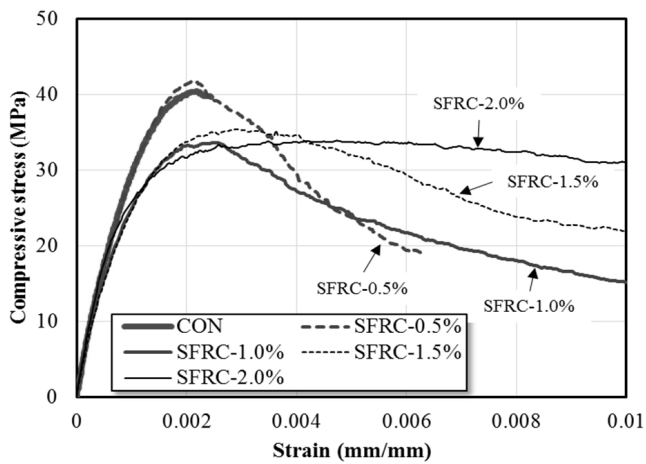


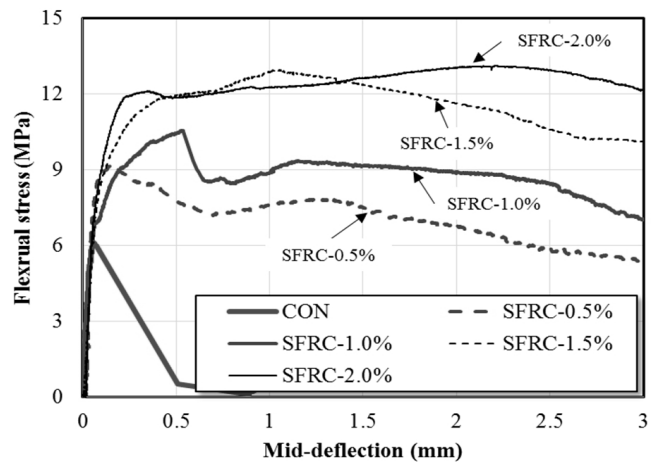
Fig. 2 Test set-up for high velocity impact loading

Table 4 Mechanical properties of concrete and SFRC

Mixture type	Fiber volume fraction (%)	Compressive strength (MPa)	Compressive toughness index	Modulus of rupture (MPa)	Flexural toughness index
CON	-	40.5	1.91	6.37	0
SFRC-0.5%	0.5	42.2	3.44	9.04	1.91
SFRC-1.0%	1.0	34.0	4.37	10.56	2.48
SFRC-1.5%	1.5	35.9	4.08	12.96	3.15
SFRC-2.0%	2.0	36.4	4.95	13.13	3.19

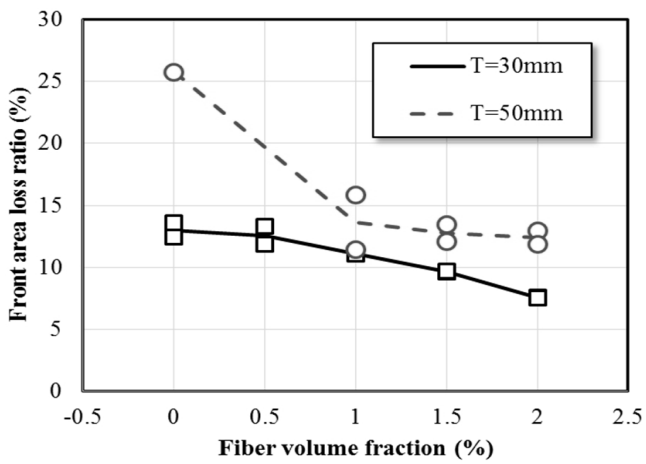


(a) Compressive responses

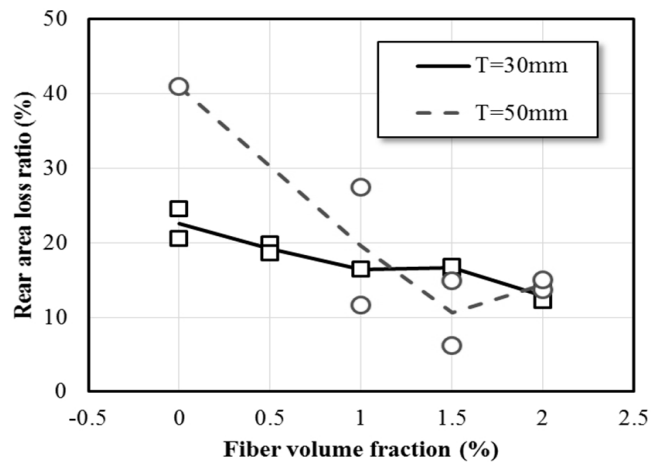


(b) Flexural responses

Fig. 3 Mechanical properties of concrete and SFRC



(a) Front area loss



(b) Rear area loss

Fig. 4 Effects of fiber volume fraction on front and rear face damage

이로 파괴계수 및 인성이 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 콘크리트 및 SFRC 패널의 손상 특성

3.2.1 섬유혼입률과 정면손실률의 관계

Fig. 4(a)는 섬유혼입률에 따른 전면손실률을 나타낸 것이다. 두께 30 mm의 실험체의 경우 모든 실험체에서 관통파괴가 발생하였다. 반면 50 mm 실험체의 경우 섬유가 보강되지 않은 경우 관통파괴가 발생하였고, 1% 이상의 섬유가 혼입된 경우 관통파괴가 발생하지 않았다. 일반콘크리트 실험체의 경우 두께 50 mm가 30 mm에 비해 높은 전면손실률을 나타내었다. 이는 두께가 증가할수록 관입저항에 의한 충격에너지 흡수량이 증가하기 때문에 패널의 손상이 큰 것으로 판단된다. 따라서 관통 후 비상체의 속도는 실험방법의 한계로 측정이 어렵지만, 패널의 두께가 두꺼워짐에 따라 속도가 감소할 것으로 사료된다. 0~2% 혼입률에서 관통파괴가 발생한 두께 30 mm 실험체의 경우 섬유혼입에 따른 전면손실률의 차이

가 미소한 것으로 나타났으나, 두께 50 mm의 실험체의 경우 1%이상의 섬유가 혼입됨에 따라 전면손실률이 크게 감소하는 양상을 나타내었다.

3.2.2 섬유혼입률과 배면손실률의 관계

Fig. 4(b)는 섬유혼입률이 패널의 배면손실률에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 대체적으로 정면손실률과 유사한 양상을 나타내었다. 이는 섬유의 혼입에 따른 파괴계수 및 재료의 인성 향상으로 인해 배면손실을 완화하기 때문으로 판단된다. 다만, 섬유혼입률 1.5% 실험체의 경우 두께 50 mm가 30 mm에 비해 배면손실이 완화되는 특성을 나타내었다. Fig. 5는 두께 50 mm의 실험체의 대표적인 파괴양상을 나타낸 것으로, 섬유혼입률이 증가함에 따라 손상이 완화되는 특성을 확인할 수 있다. 섬유의 혼입에 의한 내충격성능의 향상은 관입되는 비상체의 충격 에너지 흡수와 가교작용에 의한 박리방지에 기인한 것으로 판단된다.

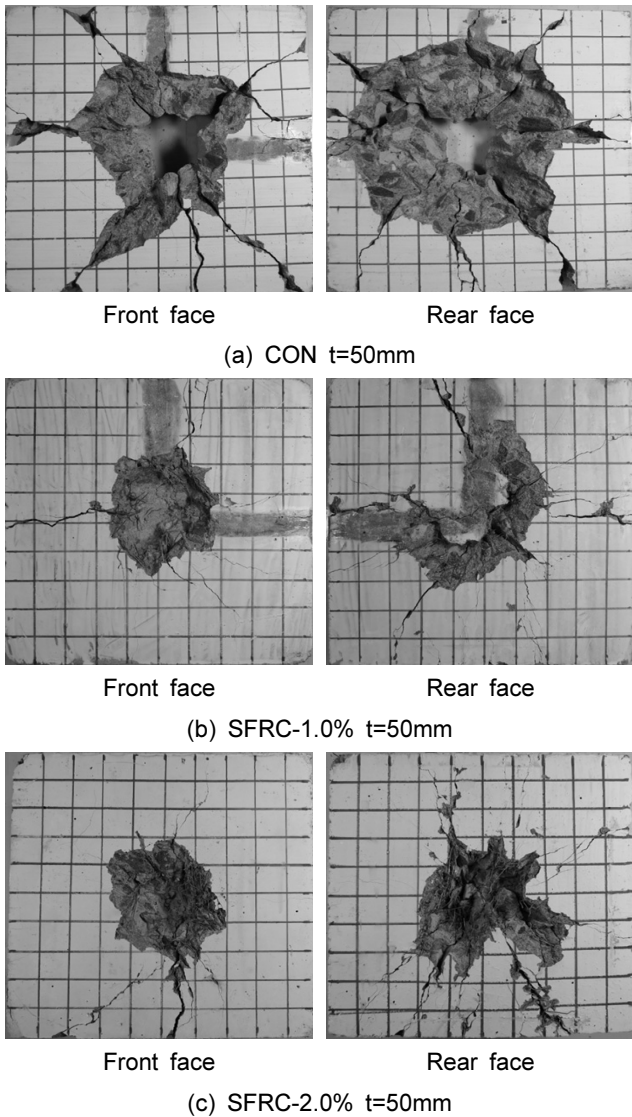


Fig. 5 Face damage of concrete and SFRC panels

3.3 역학적 특성과 손상 특성의 상관관계

3.3.1 압축거동과 정면손상의 관계

일반적으로 콘크리트 패널의 내충격성능은 비상체관입 및 정면손상은 압축거동, 배면손상은 휨거동과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. Fig. 6(a)는 압축강도와 정면손실률의 관계를 나타낸 것으로 압축강도가 증가함에 따라 정면손실이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 3.1.1에 나타난 바와 같이 섬유를 혼입함에 따라 압축강도가 감소하였기 때문에 판단되며, 압축강도만으로 SFRC의 정면 손상 특성을 평가하기 어려울 것으로 사료된다. Fig. 6(b)는 압축인성과 정면손실률의 관계를 나타낸 것으로 압축인성이 증가함에 따라 정면손실이 완화되는 것으로 나타났다. 섬유혼입률 1%이상에서는 압축인성이 변화가 미소하였으며 손상 특성에서도 동일한 양상이 나타났다. 따라서 정면손실을 완화하기 위한 최적혼입률은 1%로 판단된다.

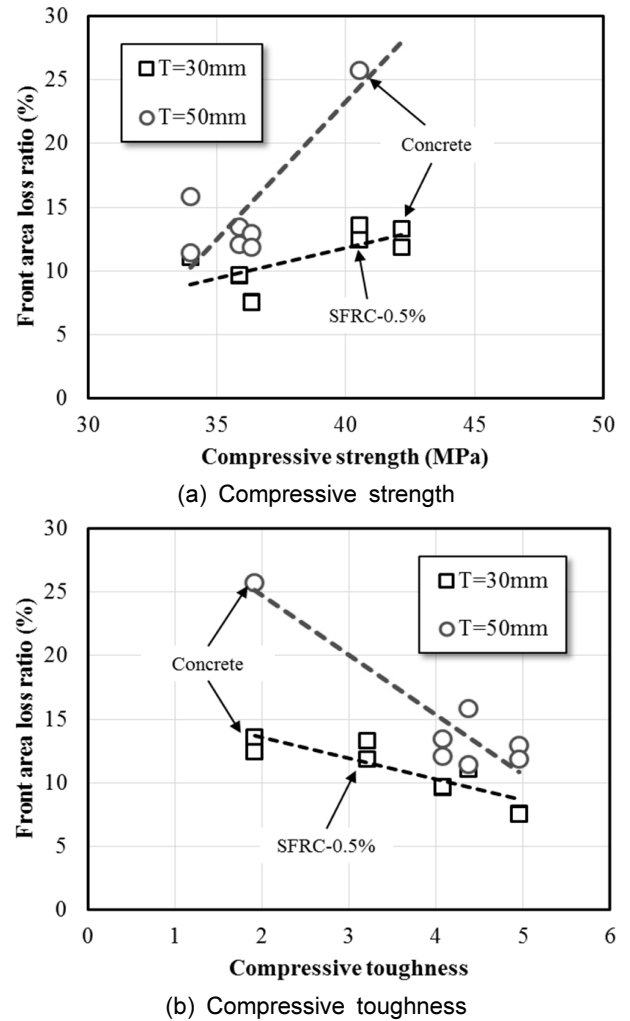


Fig. 6 Effects of compressive behavior on front face damage

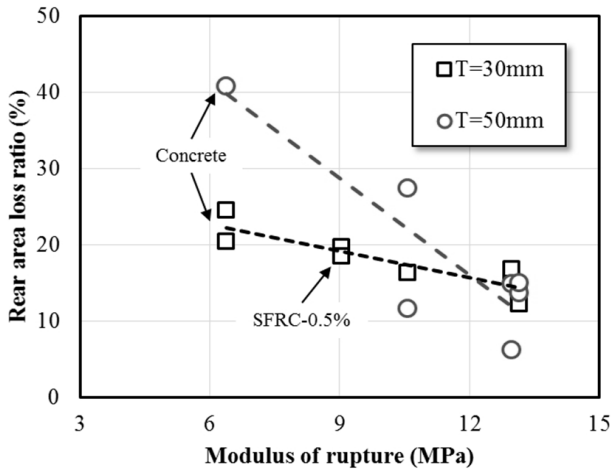
3.3.2 휨거동과 배면손상의 관계

Fig. 7(a)는 파괴계수와 배면손실률의 관계를 나타낸 것으로 파괴계수가 증가함에 따라 배면손실이 완화되는 특성을 나타내었다. 이는 파괴계수가 섬유혼입률에 따라 선형으로 증가되는 특성을 나타내었기 때문에 판단되며, 섬유혼입에 따른 내충격성능 향상을 적절하게 반영하는 것으로 판단된다. 휨인성과의 상관관계에서도 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 인성이 증가함에 따라 배면손실률이 감소하는 경향을 나타내었다. 비상체의 충격 및 역학적 특성평가 결과에 근거하여, 배면손실을 완화하기 위한 강섬유의 최적 혼입률은 1.5%로 판단된다.

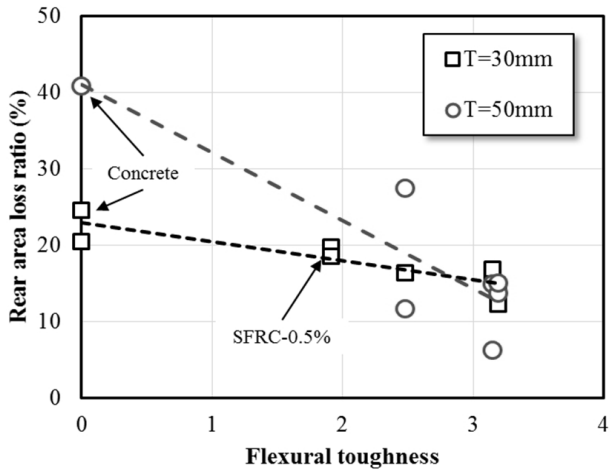
4. 유한요소해석

4.1 해석방법 및 재료모델

본 연구에서는 상용프로그램인 ABAQUS/Explicit을 이용하여 고속충격에 의한 콘크리트 및 SFRC의 패널의 유한요소 해석을 실시하였다. 사용된 강체는 지름 20 mm의 구 형상이며, 실험된 패널의 크기를 적용하여 해석을



(a) Modulus of rupture



(b) Flexural toughness

Fig. 7 Effects of flexural behavior on front face damage

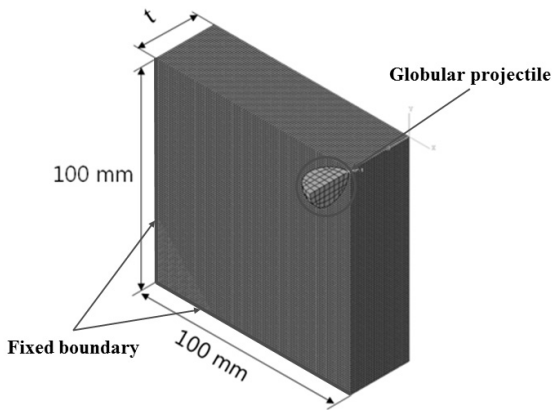


Fig. 8 Finite element mesh of specimen

실시하였다. Fig. 8은 유한요소해석을 위한 1/4 모델링을 나타낸 것으로, 두께 30 및 50 mm에 대해 해석을 실시하였다.

판을 구성하는 요소는 HEX8로 하였으며, 재료는 균질한 것으로 가정하였다. 강섬유 형상에 대한 모델을 포함하지 않았으며, 재료모델의 변화를 통해 섬유의 기여분을 해석에 적용하였다. 사용된 재료모델은 식(2)에 나타

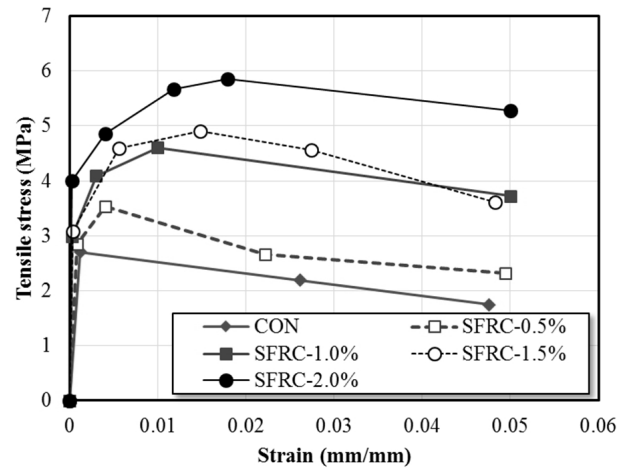


Fig. 9 Tensile models of concrete and SFRC

낸 바와 같이 Ezeldin과 Balaguru의¹³⁾ 연구에서 제안된 식을 사용하였다. 여기서 응력-변형 곡선을 구성하기 위한 β 는 보강계수 RI 에 따라 식(3)과 같이 계산된다.

$$\frac{f_{cf}}{f_c} = \frac{\beta(\epsilon_{cf}/\epsilon_c)}{\beta - 1 + (\epsilon_{cf}/\epsilon_c)^\beta} \quad (2)$$

$$\beta = 1.093 + 0.7132(RI)^{-0.926} \quad (3)$$

여기서 f_{cf} 는 재료모델에서 SFRC의 응력(MPa), ϵ_{cf} 는 변형을 나타낸다. f_c 는 압축강도(MPa), ϵ_c 는 압축강도 시 변형을 나타내며, 보강계수 RI 은 식(4)를 통해 산정할 수 있다. 여기서, W_f 는 강섬유의 중량 혼입률, (l/ϕ) 는 강섬유의 형상비를 나타낸다.

$$RI = W_f \times (l/\phi) \quad (4)$$

강섬유보강 콘크리트 패널의 내충격성능을 해석적으로 평가하기 위해서는 일축인장성능 평가를 통해 재료모델을 제안하는 것이 타당하나, 섬유의 비균질 혼입 및 굽은골재 위치에 따라 정확한 성능평가가 어려운 단점을 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 콘크리트의 인장모델에 혼입된 강섬유의 기여분을 포함하기 위하여 휨 성능평가 결과에 기초한 인장모델을 제안하였다. 해석에 적용된 콘크리트 및 SFRC의 인장모델을 Fig. 9에 나타내었으며, Montagnac 등의¹⁴⁾ 연구에서 제안된 모델을 기초하여 인장모델을 제안하였다.

4.2 해석결과 및 분석

4.2.1 두께 30 mm 패널

Fig. 10는 대표적인 실험체의 해석결과를 나타낸 것으로, 정면 및 배면의 파괴양상과 비상체의 관통여부 평가 방법을 나타낸 것이다. 손실률은 실험과 동일하게 손실

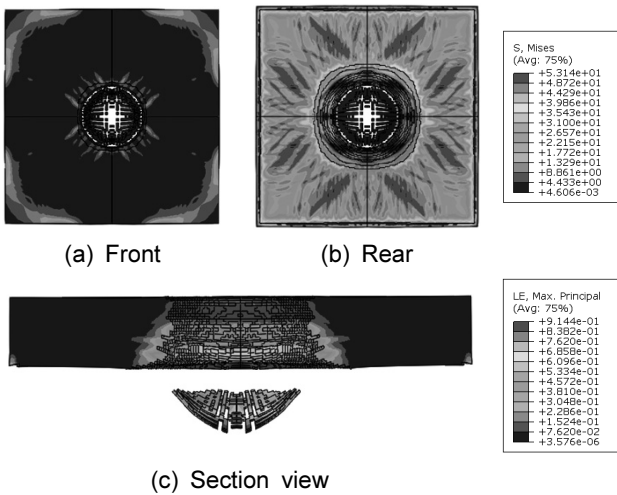


Fig. 10 Simulation results of SFRC-0.5%(t=30mm)

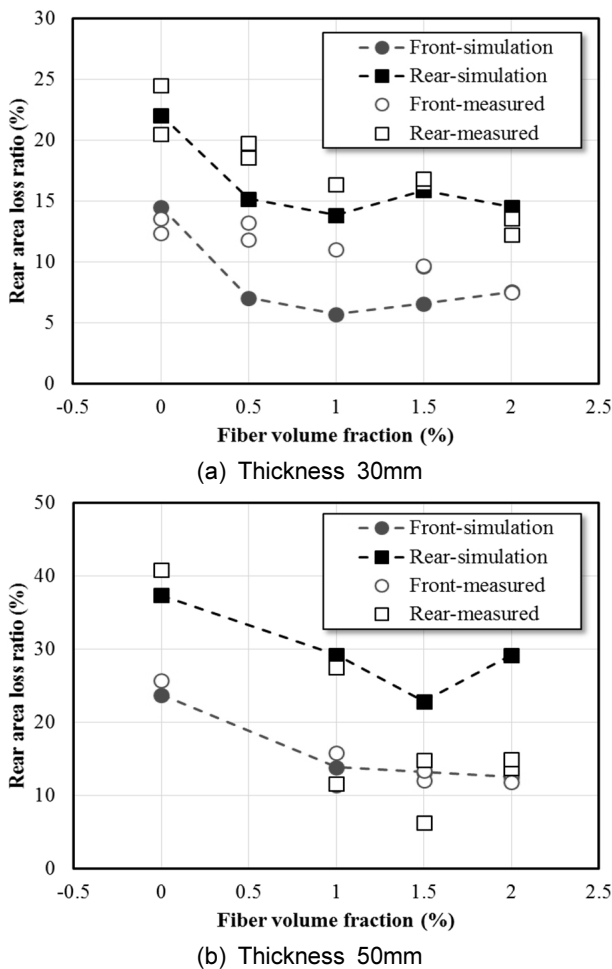


Fig. 11 Comparison of measured with simulation results

면적과 전체면적의 비율로 산정하였으며, 단면파괴양상을 통해 지름을 측정하였다. 해석을 통한 파괴양상은 실험결과와 동일하게 모든 실험체에서 관통파괴가 발생하였다.

Fig. 11(a)는 두께 30 mm 콘크리트 및 SFRC 패널의 고속충격 해석결과 및 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다.

해석결과는 배면의 파괴양상을 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 섬유혼입률 0.5~1.5% 실험체에서 내충격 성능을 과소평가하는 것으로 나타났다. 두께 30 mm 패널의 경우 섬유혼입률 1%에서 가장 높은 손실저감을 나타내었다.

4.2.2 두께 50 mm 패널

Fig. 11(b)는 두께 50 mm 패널의 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타낸 것으로, 전면손실률의 경우 실험결과를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났으나, 배면 손실률의 경우 큰 오차가 발생하였다. 해석을 통한 파괴양상은 1%이상의 섬유혼입률에서 배면파괴가 발생한 실험과 달리 모든 실험체에서 관통파괴가 발생하였으며, 이로 인해 실험결과를 과소평가하는 것으로 판단된다. 따라서 SFRC 패널의 두께에 따른 파괴양상을 적절하게 묘사할 수 있는 재료모델 및 해석방법이 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 SFRC의 역학적 특성이 고속비상체에 의한 SFRC 패널의 손상 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 강섬유 혼입률 및 패널 두께를 변수로 하여 실험을 진행하였다. 또한 손상모델 제안을 위한 유한요소 해석을 실시하였으며, 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) SFRC의 역학적 특성평가 결과, 1%이상의 섬유가 혼입될 경우 일반콘크리트에 비해 압축강도가 감소하는 양상을 나타내었다. 압축인성의 경우 혼입률 1%까지 급격하게 증가하는 양상을 나타내었다. 파괴계수 및 휨인성은 섬유혼입률이 증가함에 따라 1.5%까지 증가하는 경향을 나타내었다.
- 2) 고속충격에 의한 일반콘크리트 및 SFRC 패널의 파괴양상을 평가한 결과, 두께 30 mm 패널의 경우 섬유혼입률 0~2% 범위에서 모든 실험체가 관통파괴를 나타내었고, 두께 50 mm 패널의 경우 섬유혼입률 1% 이상에서 비상체의 관통을 방지하고 배면파괴만 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 강섬유의 혼입이 관통방지를 위한 방호벽 두께 감소에 효율적일 것으로 판단된다.
- 3) 전면손실률은 압축강도가 증가함에 따라 오히려 증가하는 양상을 나타내었으며, 이는 섬유를 혼입함에 따라 압축강도가 감소하기 때문으로 판단된다. 압축인성이 증가함에 따라 전면손상이 완화되는 것으로 나타났으며, 향후 SFRC 패널의 전면손상 평가에서 중요한 지표로 활용될 것으로 판단된다.
- 4) 배면손상은 파괴계수와 휨인성이 증가함에 따라 감소하는 양상을 나타내었으며, 두가지 역학적 특성 모두 SFRC의 내충격 성능 향상을 잘 반영하는 것

으로 판단된다. 실험결과를 근거로 하여 SFRC 패널의 내충격 성능이 효율적으로 향상되는 섬유혼입률은 1%로 판단된다.

- 5) 유한요소해석을 활용한 SFRC 패널의 내충격성능 평가는 파괴양상이 같을 경우 정면 및 배면손실률을 비교적 잘 예측하는 것으로 판단되며, 관통파괴가 발생할 경우 발생하지 않은 경우에 비해 배면손실률 과소평가하는 것으로 판단된다. 따라서 SFRC의 파괴양상을 동일하게 묘사할 수 있는 재료모델의 제안이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 한국연구재단의 한-일 협력사업(NRF-2014K2A2A4001650)의 지원을 받아 수행되었으며, ABAQUS 해석을 위한 (주)코메스 코퍼레이션 이영오 연구원의 지원과 협력에 감사드립니다.

References

1. Kennedy, R. P., "A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.37, No.2, 1976, pp.183-203.
2. Army Corps of Engineers, "Fundamentals of Protective Design", Report AT120 7821, 1946.
3. Hughes, G., "Hard Missile Impact on Reinforced Concrete", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.77, 1984, pp.23-35.
4. Almansa, E. M. and Canovas, "Behavior of Normal and Steel Fiber-Reinforced Concrete under Impact of Small Projectiles", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, 1999, pp.1807-1814.
5. Kim, S. H., Kang, T. H. K., Hong, S. G., Kim, G. Y., and Yun, H. D., "Impact Resistance of Steel Fiber-Reinforced Concrete Panels Under High Velocity Impact-Load", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.26, No.6, 2014, pp. 731-739 (in Korean).
6. Jang, S. J., Ahn, K. L., and Yun, H. D., "Effects of Aggregate Size and Fiber Volume Fraction on Flexural Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol.31, No.2, 2015 (in Korean).
7. Kim, H. S., Nam, J. S., Hwang, H. K., Jeon, J. K., and Kim, G. Y., "A Study on the Penetration Resistance and Spalling Properties of High Strength Concrete by Impact of High Velocity Projectile", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.25, No.1, 2013, pp.99-106 (in Korean).
8. Marar, K., Eren, O., and Celik, T., "Relationship Between Impact Energy and Compression Toughness Energy of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete", *Materials Letters*, Vol.47, 2001, pp.297-304.
9. Korea Standards Association, "KS F 2405. Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete", 2010 (in Korean).
10. Ahn, K. L., Jang, S. J., Yun, Y. J., D. G., and Yun, H. D., "Effect of Fiber Volume Fraction on Compressive and Flexural Properties of High-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete", *Applied Mechanics and Materials*, Vol.597, 2014, pp.296-299.
11. Korea Standards Association, "KS F 2408. Method of Test for Flexural Strength of Concrete", 2000 (in Korean).
12. ASTM C 1609, "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)", American Society for Testing Materials, 2012.
13. Ezeldin, A. S. and Balaguru, P. N., "Normal and High Strength Fiber Reinforced Concrete Under Compression", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.4, No.4, 1992, pp.415-429.
14. Moutagnac, R., Massicotte, B., Charron, J., and Nour, A., "Design of SFRC Structural Elements: Post-Cracking Tensile Strength Measurement", *Materials and Structures*, Vol. 45, 2012, pp.609-622.

요약 본 연구는 섬유혼입률 및 패널 두께가 구형비상체 충격에 의한 강섬유보강 콘크리트(SFRC) 패널의 손상특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실시되었다. 실험체는 200×200 mm의 각형 패널로 계획하였으며, 두께는 30 및 50 mm로 설정하였다. 비상체는 직경 20 mm의 강재이며, 속도는 350 m/s로 실험을 실시하였다. 또한 본 연구에서는 SFRC의 역학적 특성과 내충격 성능의 상호관계를 평가하였다. SFRC의 역학적특성은 압축강도, 파괴계수 및 재료의 인성을 평가하였다. 비상체 충격에 의한 패널의 전면손실률은 압축인성이 증가함에 따라 감소하였고, 파괴계수 및 휨인성이 향상됨에 따라 배면손실률이 감소하는 것으로 나타났다. 강섬유보강 콘크리트의 동적특성 평가를 위하여, 상용 프로그램인 ABAQUS/Explicit를 사용하여 유한요소해석을 실시하였다. 해석결과 파괴양상이 유사한 경우 전면 및 배면손실률을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 강섬유, 손상완화, 내충격성능, 고속비상체 충격, 역학적 특성, 콘크리트