



## 와이어매쉬와 강섬유로 보강된 콘크리트 패널의 내충격성 규명을 위한 고속충격실험

김상희<sup>1)</sup> · 홍성걸<sup>1)</sup> · 윤현도<sup>2)</sup> · 김규용<sup>2)</sup> · 강현구<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 건축학과 <sup>2)</sup>충남대학교 건축공학과

## High-Velocity Impact Experiment on Impact Resistance of Steel Fiber-Reinforced Concrete Panels with Wire Mesh

Sang-Hee Kim,<sup>1)</sup> Sung-Gul Hong,<sup>1)</sup> Hyun-Do Yun,<sup>2)</sup> Gyu-Yong Kim,<sup>2)</sup> and Thomas H.-K. Kang<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-742, Korea

**ABSTRACT** This paper studies impact performance of wire-mesh and steel fiber-reinforced concrete based on high-velocity impact experiments using hard spherical balls. In this experimental study, panel specimens were tested with various parameters such as steel fiber volume fraction, presence/absence of wire mesh, panel thickness, impact velocity, and aggregate size for the comparison of impact resistance performance for each specimen. While improvement of the impact resistance for reducing the penetration depth is barely affected with steel fiber volume fraction, the impact resistance to scabbing and perforation is improved substantially. This was due to the fact that the steel fiber had bridging effects in concrete matrix. The wire mesh helped minimizing the crater diameter of front and back face and enhanced the impact resistance to scabbing and perforation; however, the wire mesh did not affect the penetration depth. The wire mesh also reduced the bending deformation of the specimen with wire mesh, though some specimens had splitting bond failure on the rear face. Additionally, use of 20 mm aggregates is superior to 8 mm aggregates in terms of penetration depth, but for reducing the crater diameter on front and back faces, the use of 8 mm aggregates would be more efficient.

**Keywords :** high velocity impact load, steel fiber, wire mesh, impact resistance, splitting bond failure

### 1. 서 론

철근콘크리트 슬래브나 벽체의 패널 부재는 건물을 구성하는 주요 부재이며, 외부에서 발생하는 에너지를 차단하는 1차적인 부재이다. 최근 방호의 목적을 가지고 콘크리트 패널의 내충격성 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 대부분의 연구는 무근콘크리트의 내충격성에 대한 평가를 통한 재료차원에서의 내충격성 평가가 주를 이루고 있다. 하지만 실제 구조물로서의 철근콘크리트 패널의 내충격성에 대한 연구는 드물며 국내는 특히 연구사례가 전무한 실정이다.<sup>1)</sup> 특히 와이어매쉬로 보강된 콘크리트 또는 와이어매쉬와 강섬유가 동시에 사용된 콘크리트에 대한 연구 자료는 극히 적다. 따라서 본 연구에서는 기존 재료관점의 콘크리트의 내충격성 평가

에서 벗어나, 와이어매쉬 보강여부에 따른 내충격성 평가, 강섬유로 보강한 콘크리트의 내충격성 평가, 그리고 와이어매쉬와 강섬유로 보강된 콘크리트 패널 부재에 대한 내충격성 평가를 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 특히 본 연구에서는 내충격성 증진을 위해 주로 사용되는 강섬유를 혼입하여 다양한 조건에서의 내충격성을 평가하였고, 또한 비용접 크램프 와이어매쉬(non-welded crimped wire mesh, 이하 와이어매쉬)를 사용하였다. 본 연구에서는 고속비상체가 실험체 충돌 후 나타나는 1) 와이어매쉬 보강여부에 따른 파괴형상; 2) 강섬유 혼입률에 따른 파괴형상; 3) 골재 크기에 따른 파괴형상; 4) 충돌속도에 따른 파괴형상; 그리고 5) 패널의 두께에 따른 파괴형상을 평가하고자 한다.

중국에는 강섬유 혼입률에 따른 내충격성 보강효과와 와이어매쉬에 따른 내충격성 증진 효과를 실험적 결과물 토대로 와이어매쉬와 강섬유로 보강된 콘크리트 패널의 내충격성을 평가하고자 한다. 패널의 내충격성 평가는 다른 연구자와 동일하게 관입깊이, 배면박리, 관통두께에

\*Corresponding author E-mail : tkang@snu.ac.kr

Received July 31, 2014, Revised November 22, 2014,

Accepted November 24, 2014

©2015 by Korea Concrete Institute

대하여 충격계수를 통하여 평가하였다. 또한 추가적으로 기존 연구에서 부족한 전면과 배면 탈락 면적, 그리고 중량 손실량 등을 정성적으로 평가하였다.

## 2. 기존 연구

일반 콘크리트의 내충격성 평가 실험은 여러 연구자들에 의해 수행되었는데, 내충격성을 증가시키기 위해 다양한 종류의 섬유를 혼입하거나 FRP를 부착하는 등의 연구 또한 수행되었다. Hrynyk와 Vecchio<sup>2)</sup>의 연구에서는 RC 실험체와 0.5, 1.0, 1.5% 강섬유보강콘크리트 실험체를 대상으로 무거운 질량체를 저속으로 반복하여 충격을 가하였다. 이 연구에서는 강섬유보강콘크리트는 일반콘크리트보다 우수한 내충격성을 가지며, 내충격성, 강성, 변위능력은 강섬유 혼입률과 밀접한 관계가 있다고 보고하고 있다.

Dancygier와 Yankelovsky<sup>3)</sup>의 연구에서는 강섬유가 패널 실험체에 고루 분포되어 콘크리트 매트릭스 안에서 보강효과가 증진되어 내충격성을 키우고 전면과 배면의 손상을 줄인다는 결과가 도출되었다. 그리고 철근을 배근함으로써 전면의 탈락을 감소시키기에는 효과적이지 않지만, 관통 및 배면박리에 대한 내충격성은 향상된다는 결과를 얻었다. 이것은 철근의 배근이 멤브레인 효과(membrane action)로 발전되었을 가능성을 제시한 것이다.

Almusallam<sup>4)</sup> 외 3인의 연구에서는 관입깊이에 대해서는 섬유의 종류나 혼입률에 크게 영향을 받지 않으나 전체적으로 섬유가 혼입되면 적은 탈락량을 보인다고 보고하였다. 강섬유와 폴리머섬유를 혼합한 Hybrid-fibers는 충격의 범위를 효율적으로 줄일 수 있고, 균열을 억제하며, RC콘크리트의 탈락량을 줄인다는 결론을 얻었다.

Mohammadi<sup>5)</sup> 외 3인의 연구에서는 강섬유를 혼입함으로써 일반콘크리트에 비해 내충격성이 증가한다고 보고하였는데, 2.0%의 강섬유를 혼입하였을 때 가장 우수한 성능이 나타나며 길이가 긴 강섬유를 사용하는 것이 짧은 강섬유를 사용하는 것보다 상대적으로 더 좋은 내충격성을 발현한다고 밝혔다.

Almansa와 Canovas<sup>6)</sup>의 연구에서는 강섬유를 혼입하는 것은 관통을 제어하기 위한 최소 패널두께의 감소에는 큰 효과를 기대할 수 없지만, 배면박리에 대한 박리한계 두께는 매우 적어질 수 있다고 보고하였다. 무엇보다도 강섬유 혼입 시 전면과 배면의 콘크리트 탈락량이 감소된다는 사실을 실험적으로 검증하였다. 이러한 연구는 Kim<sup>7)</sup> 외 4인의 연구결과와도 동일한 것이다.

Yazici<sup>8)</sup> 외 2인의 연구에서는 강섬유보강콘크리트는 일반콘크리트에 비해 내충격성이 높으며, 충격에 의한 파단까지 소요되는 에너지(impact fracture energy)를 3~23배까지 증가시킨다는 결과를 얻었다. 강섬유의 형상비와 혼입률은 내충격성 향상의 주요 변수라고 밝히고 있으며, 강섬유 혼입률이 1.5%에서 가장 좋은 성능을 발현하는 것을 보였다. 또한 충돌 후 압축강도 측면에서 가장 좋은

형상비는 65으로 나타났다.

## 3. 실험 계획 및 방법

### 3.1 실험 계획

이 연구에서는 강섬유 혼입률과 와이어매쉬 보강에 따른 내충격성을 평가할 수 있는 실험계획을 수립하였다. 또한 충돌속도, 골재크기와 패널두께 따른 내충격성도 비교하고자 하였다. 강섬유 혼입률은 무보강 콘크리트(강섬유 혼입률 0%)부터 0.5, 1.0, 1.5 2.0%로 5종으로 구분하였다. 골재 크기는 8 mm, 20 mm로 구분하였고, 패널 두께는 50, 70 mm를 택하였다. 충돌속도는 270 m/s와 350 m/s 두 종류의 속도를 사용하였다. 실험에서 배합된 콘크리트의 설계압축강도( $f_{ck}$ )는 30 MPa을 목표로 Table 1과 같이 배합에 하였다. 동일한 배합에서 골재의 크기에 따라서 다소 수정하여 사용하였으며, 강섬유 혼입률에 따라 강섬유를 추가하였다. 골재의 크기도 하나의 변수로 8 mm와 20 mm 두 가지를 사용하였다. 콘크리트를 배합할 때 강섬유를 각 혼입률에 따라 콘크리트 믹서기에 투입하였으며, 이 때 강섬유의 뭉침현상을 방지하기 위해서 2회에 걸쳐서 투입하였다. 실험에 사용된 강섬유는 건설현장에서 가장 흔히 사용되는  $\varnothing 0.5 \times 30$  mm ( $l/d=60$ )을 사용하였다(Table 2, Fig. 1).

실험체는 200×200×50 mm와 200×200×70 mm 패널 두

Table 1 Mix proportion of concrete

Material	Value
Specified compressive strength ( $f_{ck}$ )	30 MPa
W/B (%)	55
S/a (%)	45
$V_f$ (%)	0~2 %
Water	205 kg/m <sup>3</sup>
Cement	373 kg/m <sup>3</sup>
Sand	756 kg/m <sup>3</sup>
Coarse aggregate	924 kg/m <sup>3</sup>
Steel fiber	0~157 kg/m <sup>3</sup>

W/B = water-binder ratio, S/a = fine aggregate ratio,  $V_f$  = steel fiber volume fraction

Table 2 Properties of steel fiber

Type	Single hooked
Specific gravity	7.85
Diameter	0.5
Length	30
Aspect ratio ( $l/d$ )	60
Tensile strength (MPa)	1100
Elastic modulus (GPa)	205

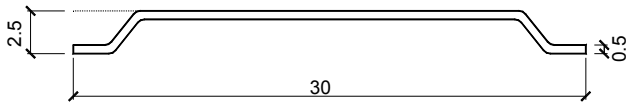


Fig. 1 Dimension of steel fiber (mm)

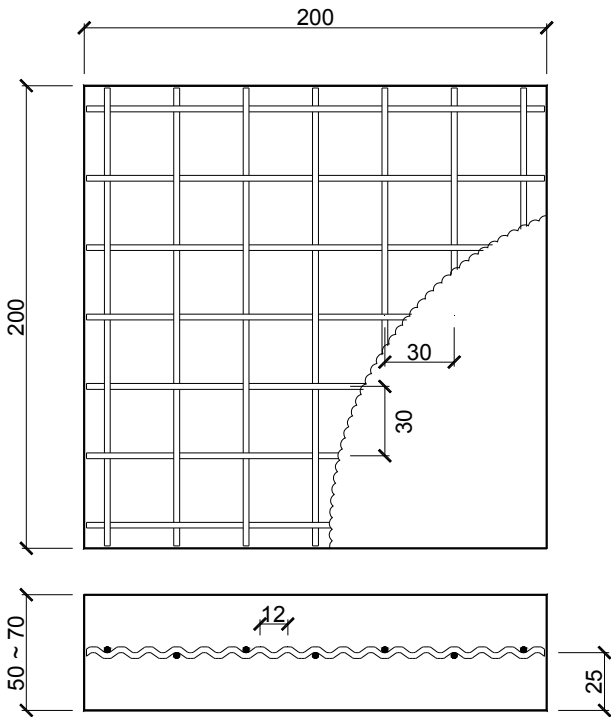


Fig. 2 Dimension of specimen and lay-out of the crimped wire mesh (mm)

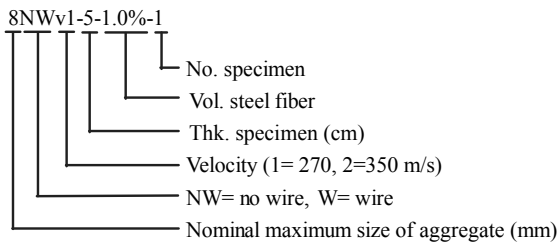


Fig. 3 Specimen ID

종류를 사용하였다(Fig. 2). 와이어메쉬는 30×30 mm 정사각형의 격자형태로서, 2.5 mm 지름의 원형 강선을 12 mm 간격으로 굴곡을 주어 성형한 후 비용접으로 엮어서 격자를 구성하는 방식으로 제작되었다. 또한 강재의 종류는 SS400을 사용하였다. 와이어메쉬는 콘크리트 패널 배면에서 25 mm 지점에 배근하였다. 실험체를 구분하기 위해서 변수별로 실험체를 Fig. 3와 같이 명명하였다.

### 3.2 실험 방법

#### 3.2.1 실험체 제작 및 물리적 성질 측정

내충격성 실험체 제작에 사용된 콘크리트의 압축강도와 휨강도를 측정하기 위해서 각각  $\varnothing 100 \times 200$  mm,  $100 \times$

Table 3 Concrete measured properties and steel fiber volume fraction

Specimens	Concrete (MPa)			Steel fiber volume fracture (%)
	$f_{cu}$	$f_r$	$f_{cu} / f_r$	
8-0%-series	45.5	6.93	0.15	0
8-0.5%-series	40.13	7.19	0.18	0.5
8-1.0%-series	40.30	11.61	0.29	1
8-1.5%-series	31.70	12.94	0.41	1.5
8-2.0%-series	28.67	12.93	0.45	2
20-0%-series	37.85	6.37	0.17	0
20-0.5%-series	42.16	9.04	0.21	0.5
20-1.0%-series	33.96	10.21	0.30	1
20-1.5%-series	35.87	10.87	0.30	1.5
20-2.0%-series	36.35	11.81	0.32	2

$f_{cu}$  = Average of measured compressive strength at 28 day,  $f_r$  = modulus of rupture of concrete

100×400 mm 실험체를 제작하였다. 압축강도는 KS F 2405와 KCI 2012에 따라 측정하였으며, 지름이 100 mm인 실험체인 점을 고려하여 보정계수 0.98을 곱하였다. 그리고 휨강도는 KSF 2408에 따라 측정하였다(Table 3). 압축강도 및 휨강도 실험체는 내충격성 실험체와 동일한 양생 조건을 가질 수 있도록 모두 24시간 동안 기건양생한 후  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 수조에서 수중양생을 하였다. 내충격성 실험체는 스티로폼으로 거푸집을 제작하였다. 양생 후 흰색 페인트를 전면과 배면을 칠한 후, 20×20 mm 간격으로 격자를 표시하여 비상체 충돌 후의 파괴양상을 파악하기 쉽게 하였다.

#### 3.2.2 충격 실험

내충격성 평가를 수행하는 방법에 대해 규정된 바는 없지만, 운동에너지를 높이기 위해서 2가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 가스압력을 이용하여 비상체의 속도를 증가시키는 방법이다.<sup>9-12)</sup> 두 번째는 비상체의 질량을 크게 하여 운동에너지를 증가시키는 방법이다. 본 연구에서는 첫 번째 방식을 택하여 가스탱크에 가스를 압축하여 비상체를 발사하였다. 즉, 고정틀에 패널 실험체를 고정시킨 후 비상체를 가스압력방식으로 발사하였다(Fig. 4). 비상체로는 지름 20 mm (32.8 g)의 쇠구슬을 사용하였으며, 속도는 270 m/s와 350 m/s를 목표로 가스압력을 조절하여 발사하였다. 실험체의 4면을 고정하기 위해서 실험체의 상하좌우의 끝을 고정하였는데, 실험체의 좌우는 10 mm, 상부면은 5 mm, 하부면은 15 mm 겹쳐지게 고정하였다. 그리고 전면 고정판의 두께는 5 mm, 배면의 고정판 두께는 20 mm로서 실험체를 고정판 사이에 끼우고 전산나사와 볼트로 고정하였다. 결과적으로 비상체에 노출된 면은 180×180 mm이 되게 설치하였다. 비상체가 실

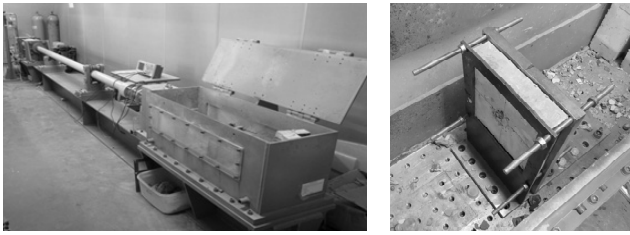


Fig. 4 Impact test machine and set-up

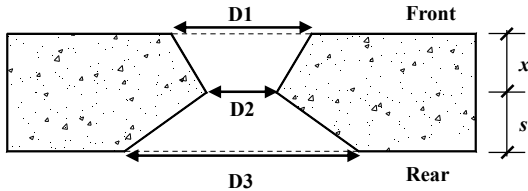


Fig. 5 Dimension and regions of damaged specimen under impact load

험체에 충돌 후 육안으로 관찰한 파괴형상에 따라서 1) 관입 및 전면파괴(spalling); 2) 배면균열(spalling (R)); 3) 배면파괴(scabbing); 그리고 4) 관통파괴(perforation)의 등급으로 분류하였다. 그 중 배면의 탈락량이 미미하거나 균열이 발생한 실험체는 배면균열(spalling (R)) 등급으로 분류하였다. 충돌 후 실험체의 관입깊이, 배면탈락 깊이, 전면과 배면의 손실 넓이, 중량손실량 등을 측정하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

실험체의 내충격성을 평가하기 위해서 실험체의 전면과 배면을 촬영한 후 컴퓨터 프로그램을 이용하여 탈락면적을 정확히 측정하였다. 탈락한 표면적이 불규칙하기 때문에 상대적인 비교를 용이하게 하기 위해서 탈락한 표면적을 등가의 원으로 표현하였다. 전면탈락면적의 등가원의 지름(D1), 관통된 실험체에서 발생하는 내부 관통면적 등가원 지름(D2), 그리고 배면탈락면적의 등가원 지름(D3)으로 치환하였다(Fig. 5). 또한 실험체의 관입깊이(x)를 측정하였으며, 필요에 따라 배면박리두께(s)를 측정하였다. 충돌 전후의 중량을 측정하여 충돌에 의한 중량손

실량도 확인하였다. 3.2.2절에서 언급하였듯 실험체의 파괴형상을 육안으로 검사하여 4등급으로 분류하였다.

#### 4.1 압축강도와 휨강도 평가

본 실험에서 제작된 콘크리트의 물성치에 가장 많은 영향을 끼친 변수는 다음의 2가지이다. 첫 번째는 강섬유 혼입률이고 두 번째는 골재의 크기이다. 골재의 크기에 따라 상이한 경향을 보이는데, Table 3의 결과를 살펴보면 8 mm 골재의 압축강도에서는 강섬유 혼입률이 증가할수록 콘크리트의 압축강도가 감소하였다. 그리고 강섬유 혼입률 2.0%에서는 설계압축강도에 미치지 못하였다. 그러나 20 mm 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도는 강섬유 혼입률과 상관없이 비슷한 값을 보이고 있다. 기존 연구를 참고<sup>13-16)</sup>하면, 본 실험에서 사용한 강섬유와 콘크리트 배합은 콘크리트 압축강도 증진 효과가 미흡하였다고 사료된다.

그러나 휨강도는 강섬유 혼입률에 따라서 크게 증가하는 경향을 보였다. 강섬유 무혼입 콘크리트의 휨강도는 6.93 MPa와 6.37 MPa로 나타난 반면, 강섬유 혼입률 2.0%에서는 12.93 MPa와 11.81 MPa로 약 85% 증가하였다. 하지만 강섬유 혼입률이 증가한다고 휨강도가 계속 증가한다고 판단할 수는 없다. 강섬유 혼입률 1.0%까지는 휨강도의 증가량이 컸으나, 1.0~2.0%에서는 강섬유 혼입률이 증가하여도 휨강도의 증가가 크지 않았다. 골재의 크기에 따라 비교하면, 8 mm 골재를 사용한 콘크리트의 휨강도는 20 mm 골재를 사용한 콘크리트의 휨강도보다 컸다. 골재의 크기가 작을수록 강섬유의 분산성이 높아지고 또한 공극률이 작아져 휨강도가 증가한다고 판단된다.

#### 4.2 충돌 후 파괴 특성

Table 4는 실험데이터이며, Table 5는 비상체가 충돌 후 관통된 일부 실험체의 사진이다. 일반적으로 콘크리트에 충격이 가해질 때 8NWv2-5-0.5%, 8NWv2-5-1.0%, 20NWv2-5-0%, 20Wv2-5-1.0%와 같이 전면에 원형 형태의 표면박리가 발생하였으며, 배면도 대개 원형의 형태로 박리되었다. 그

Table 4 Selected experimental results

Specimen	Velocity	Failure mode	Front (mm)			Rear (mm)			Weight (kg)		
			Range	Depth (x)	Loss (%)	Range	Depth (s)	Loss (%)	Before	After	Loss (%)
8NWv1-5-0%-1	270	Perforation	52~67	16	9.62	44~148	34	9.07	4.807	4.64	3.47
8NWv2-5-0%-2	350	Perforation	78~96	13	13.63	126~161	37	40.89	4.814	4.209	12.57
8NWv1-7-0%-1	270	Spalling (R)	58~77	14	10.77	0	0	0	6.7	6.6	1.49
8NWv2-7-0%-2	350	Perforation	51~64	21.82	6.7	100~110	48.18	19.6	6.72	6.39	4.91
8NWv1-5-0.5%-1	270	Spalling (R)	63.0~92.4	16	12	0	0	0	4.806	4.728	1.62
8NWv2-5-0.5%-2	350	Perforation	72.0~80.3	15.34	13.29	99.0~127	34.66	27	4.743	4.424	6.73

**Table 4** Selected experimental results (continue)

Specimen	Velocity	Failure mode	Front (mm)			Rear (mm)			Weight (kg)		
			Range	Depth (x)	Loss (%)	Range	Depth (s)	Loss (%)	Before	After	Loss (%)
8NWv1-7-0.5%-1	270	Spalling (R)	60.0~64.7	14.6	8	0	0	0	6.65	6.58	1.05
8NWv2-7-0.5%-2	350	Spalling (R)	77.0~96.7	19.4	15.24	0	0	0	6.58	6.44	2.13
8NWv1-5-1.0%-1	270	Spalling (R)	56.0~70.5	14.6	8.81	0	0	0	4.897	4.851	0.94
8NWv2-5-1.0%-2	350	Perforation	60.7~86.1	14.94	11.22	100~115	35.06	27.26	4.749	4.469	5.9
8NWv1-7-1.0%-1	270	Spalling (R)	61.1~74.2	15.3	10.14	0	0	0	6.866	6.811	0.8
8NWv2-7-1.0%-2	350	Spalling (R)	79.0~87.9	19.1	14.42	0	0	0	6.739	6.641	1.45
8NWv2-7-1.0%-3	350	Spalling (R)	69.5~91.6	20.4	13.25	0	0	0	6.818	6.765	0.78
8NWv2-5-1.5%-2	350	Perforation	63.4~73.6	14.6	9.75	71.4~115	28.5	18.2	4.841	4.589	5.21
8NWv1-7-1.5%-1	270	Spalling (R)	61.6~73.2	17.9	9.71	0	0	0	6.58	6.5	1.22
8NWv2-7-1.5%-2	350	Spalling (R)	75.4~86.8	19.3	12.36	0	0	0	6.66	6.56	1.5
8NWv2-5-2.0%-2	350	Scabbing	62~93.5	20.3	12.83	34.5~67.1	18.36	9.98	4.864	4.717	3.02
8NWv1-7-2.0%-1	270	Spalling (R)	47.0~64.0	14.44	8.06	0	0	0	6.68	6.62	0.9
8NWv2-7-2.0%-2	350	Spalling (R)	65.0~81.0	20.14	11.04	0	0	0	6.6	6.48	1.82
8Wv1-5-0%-1	270	Scabbing	48~75	13	9.04	77~111	27	18.65	3.939	3.753	4.72
8Wv2-5-0%-2	350	Perforation	61~101	18	14.2	109~149	32	40.46	3.96	3.38	14.69
8Wv1-7-0%-1	270	Spalling (R)	46~64	13	7.21	0	0	0	5.36	5.29	1.25
8Wv2-7-0%-2	350	Spalling (R)	64~103	19	14.01	0	0	0	5.27	5.19	1.59
8Wv1-5-0.5%-1	270	Spalling (R)	68~85	13.2	10.26	0	0	0	3.93	3.86	1.76
8Wv2-5-0.5%-2	350	Perforation	67.5~98	17.3	14.3	95~125	32.7	28.04	3.96	3.63	8.33
8Wv1-7-0.5%-1	270	Spalling (R)	65~73	12.4	9.68	0	0	0	5.28	5.22	1.02
8Wv1-5-1.0%-1	270	Spalling (R)	54.9~72.6	12.4	8.31	0	0	0	4.09	4.04	1.13
8Wv1-7-1.0%-1	270	Spalling (R)	59.3~79.1	16.7	10.63	0	0	0	5.34	5.29	1.01
8Wv2-7-1.0%-2	350	Spalling (R)	59.7~85.9	20	10.65	0	0	0	5.41	5.33	1.35
8Wv1-5-1.5%-1	270	Spalling (R)	54~67	14.6	8.46	0	0	0	3.99	3.93	1.50
8Wv1-7-1.5%-1	270	Spalling (R)	53.5~76.4	17.2	8.13	0	0	0	5.37	5.31	1.15
8Wv2-7-1.5%-2	350	Spalling (R)	67.7~82.1	20.6	11.54	0	0	0	5.26	5.16	1.88
8Wv1-5-2.0%-1	270	Scabbing	62.6~78.8	16.84	9.7	27.8~60	12.73	4.62	3.92	3.85	1.94
8Wv2-5-2.0%-2	350	Perforation	60~81.1	20.44	6.72	57~115	29.56	15.54	3.96	3.74	5.36
8Wv1-7-2.0%-1	270	Spalling (R)	56.7~67.4	13.52	8.52	0	0	0	5.28	5.21	1.31
8Wv2-7-2.0%-2	350	Spalling (R)	61~86	18.93	12.99	0	0	0	5.41	5.30	1.92
20NWv1-5-0%-1	270	Perforation	69.1~104	14.46	15.6	111~139	35.54	31.13	4.872	4.304	11.66
20NWv2-5-0%-2	350	Perforation	81.4~122	18.2	25.78	132~159	31.8	40.92	4.838	3.963	18.09
20NWv1-7-0%-1	270	Spalling (R)	64.0~87.0	16.46	10.59	0	0	0	7.18	6.82	5.01
20NWv2-7-0%-2	350	Scabbing	82.4~114	29.17	21.3	20.4~25.8	20.16	2.67	7.01	6.58	6.13
20NWv2-7-0.5%-1	350	Spalling (R)	84.2~101	19.12	16.71	0	0	0	6.93	6.67	3.75
20NWv2-7-0.5%-2	350	Spalling (R)	74.2~110	19.76	17.37	0	0	0	6.71	6.6	1.64
20NWv1-5-1.0%-1	270	Spalling (R)	49.1~79.6	18.9	8.42	0	0	0	4.864	4.803	1.25
20NWv2-5-1.0%-2	350	Scabbing	62.1~91.9	19.6	11.44	56.3~86.4	12.9	11.64	4.796	4.667	2.69
20NWv1-7-1.0%-1	270	Spalling (R)	716~85.1	15.9	12.1	0	0	0	6.78	6.68	1.47
20NWv2-5-1.5%-1	350	Scabbing	55.8~84.0	19	12.09	25.8~40.2	17	6.24	4.845	4.774	1.47
20NWv2-5-1.5%-2	350	Scabbing	68.0~82.5	20	13.46	24.0~69.4	21.5	14.88	4.879	4.772	2.19
20NWv1-7-1.5%-1	270	Spalling (R)	49.0~79.0	17.5	8.01	0	0	0	6.803	6.763	0.59

**Table 4** Selected experimental results (continue)

Specimen	Velocity	Failure mode	Front (mm)			Rear (mm)			Weight (kg)		
			Range	Depth (x)	Loss (%)	Range	Depth (s)	Loss (%)	Before	After	Loss (%)
20NWv2-7-1.5%-2	350	Spalling (R)	69.0~96.0	21	13.88	0	0	0	6.813	6.73	1.22
20NWv2-5-2.0%-1	350	Perforation	67.6~84.7	19.53	12.95	60.6~116	30.47	13.71	4.948	4.794	3.11
20NWv2-5-2.0%-2	350	Scabbing	61.5~84.4	19.71	11.85	70.8~106	20.29	15.01	4.994	4.824	3.4
20NWv1-7-2.0%-1	270	Spalling (R)	49.7~74.9	11.9	7.09	0	0	0	6.84	6.81	0.44
20Wv1-5-0%-1	270	Scabbing	64~80	13.74	10.03	79.5~145	23.06	26.02	3.942	3.637	7.74
20Wv2-5-0%-2	350	Perforation	78.2~12.7	23.94	19	106~158	26.06	30.11	3.937	3.091	21.49
20Wv1-7-0%-1	270	Spalling (R)	73.4~82.3	12.81	11.4	0	0	0	5.424	5.365	1.09
20Wv2-7-0%-2	350	Spalling (R)	71~97.5	19.9	14.21	0	0	0	5.4	5.293	1.98
20Wv1-5-0.5%-1	270	Scabbing	47.8~77.6	15.29	8.51	26~47.8	13.38	3.44	4.028	3.96	1.69
20Wv2-5-0.5%-2	350	Perforation	80~10.9	18.81	17.12	103~134	31.19	33.12	3.968	3.292	17.04
20Wv1-7-0.5%-1	270	Spalling (R)	72.3~10.2	21.78	13.68	0	0	0	5.415	5.31	1.94
20Wv1-5-1.0%-1	270	Scabbing	61.6~89.5	17	10.33	20.2~37.1	8.5	1.81	3.975	3.896	1.99
20Wv2-5-1.0%-2	350	Perforation	57.7~103	20.96	12.97	102~145	29.04	33.88	3.983	3.535	11.25
20Wv1-7-1.0%-1	270	Spalling (R)	57.1~77.6	18.6	9.75	0	0	0	5.417	5.36	1.05
20Wv1-7-1.0%-2	270	Spalling (R)	62~81	16	10.95	0	0	0	5.448	5.391	1.05
20Wv1-5-1.5%-1	270	Spalling (R)	61~89	15.5	10.78	0	0	0	4.015	3.94	1.87
20Wv2-5-1.5%-2	350	Scabbing	57.6~81.1	16	9.19	78.8~11.4	26	19.55	3.983	3.803	4.52
20Wv1-7-1.5%-1	270	Spalling (R)	48.5~94	13	9.22	0	0	0	5.42	5.38	0.74
20Wv2-7-1.5%-2	350	Spalling (R)	69~81	17	12.22	0	0	0	5.345	5.265	1.50
20Wv1-5-2.0%-1	270	Spalling (R)	48~74.9	14.49	7.7	0	0	0	4.037	4.005	0.79
20Wv2-5-2.0%-2	350	Scabbing	61.4~87	20.11	12.15	39.8~65.6	22.05	9.76	4.124	4.004	2.91
20Wv1-7-2.0%-1	270	Spalling (R)	56~64.1	15.12	7.19	0	0	0	5.505	5.47	0.64
20Wv2-7-2.0%-2	350	Spalling (R)	58.9~91.1	21.17	11.97	0	0	0	5.391	5.315	1.41

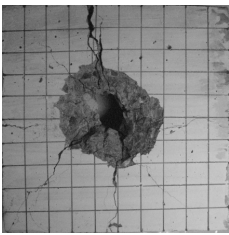
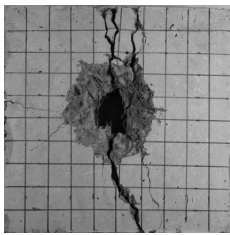
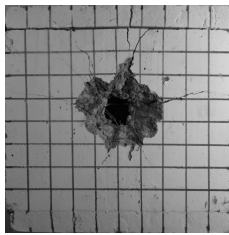
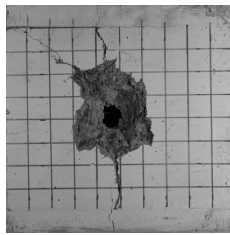
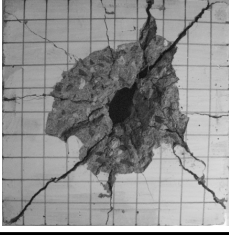
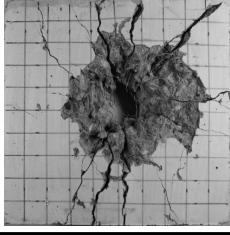
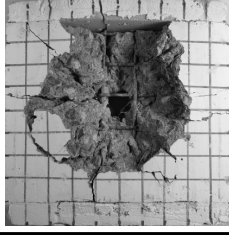
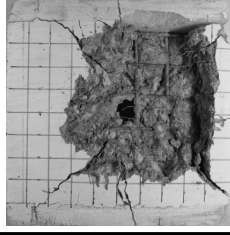
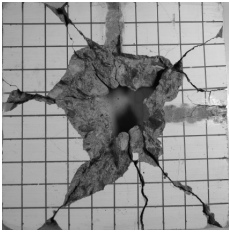
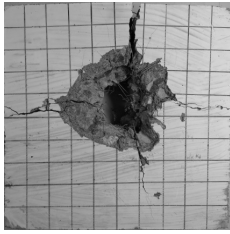
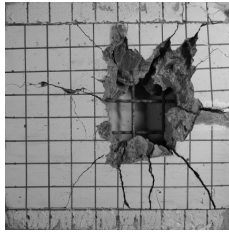
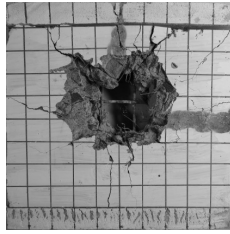
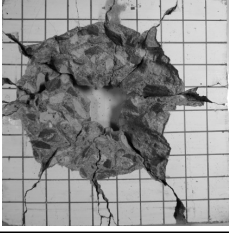
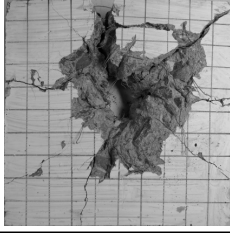
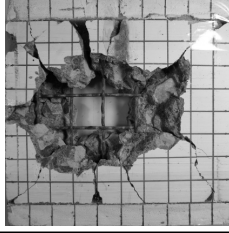

리고 전면에서보다 배면에서 더욱 큰 손실을 보였다.

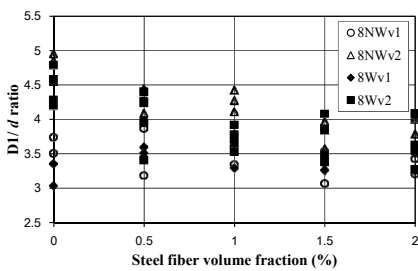
와이어매쉬로 보강한 실험체에서는 좀 더 다양한 형태의 박리형태를 확인할 수 있었다. 8Wv2-5-0.5%, 8Wv2-5-1.0%와 같이 전면에서는 원형의 박리 형태를 띠었지만, 배면에서는 둥근 사각형 형태의 박리가 발생한 실험체도 있었다. 이는 와이어매쉬로 인해 30×30 mm 콘크리트 블록이 구획되었고, 비상체가 충돌할 때 블록 형태로 탈락하였기 때문으로 판단된다. 이 현상은 20 mm 골재를 사용한 콘크리트에서 나타난 점으로 보아, 큰 골재가 30×30 mm 블록 안에 갇혀 있다가 충돌할 때 블록의 모르타르와 함께 탈락되었을거라 사료된다. 이러한 형태의 모양은 패널두께 50 mm에서만 나타났다. 즉, 패널이 얇기 때문에 나타난 현상이다. 한편 배면에서 와이어매쉬면을 따라서 넓은 면적의 탈락량을 보인 실험체도 있었다. 이는 실험체가 변형을 일으키면서 콘크리트의 인장 파괴 및 와이어매쉬가 인장력을 받아서 피복면을 따라 균열이 전달되어 부착파괴가 일어난 것으로 판단된다.

### 4.3 강섬유와 와이어매쉬 보강 콘크리트의 내충격성

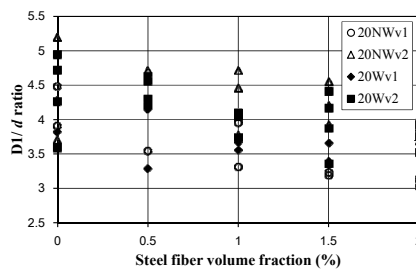
Figs. 6(a)와 (b)는 모든 실험체를 1차적으로 골재 크기로 구분한 후 강섬유 혼입률로 분류하여 나타낸 것이다. Fig. 6(c)는 관통실험체의 D1, D3를 각각 D2로 나눈 후 강섬유 혼입률에 따라 구분하였다. Fig. 6(a)에 의하면 강섬유혼입률 0%일 때 270 m/s의 충돌속도(v1)에서는 약 3.4d의 탈락면적을, 350 m/s의 충돌속도(v2)에서는 약 4.5d의 탈락면적을 나타내었다. Fig. 6(a)와 6(b)에서 와이어매쉬로 보강된 8 Wv와 20 Wv의 값이 그렇지 않은 8 NWv와 20 NWv값보다 각각 아래에 위치해 있음을 보인다. 수치로 보면 골재의 크기가 8 mm이며 강섬유 혼입률이 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0%일 때, 각각 4.30d, 4.04d, 3.92d, 3.58d, 3.74d의 표면적 탈락수치를 보였다. 한편 와이어매쉬로 보강한 실험체는 각각 4.04d, 3.85d, 3.64d, 3.55d, 3.56d로 나타났는데 수치의 저하는 와이어매쉬에 의한 내충격성 증진을 의미한다. 또한 골재의 크기가 20 mm이며 강섬유 혼입률이 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0%일 때, 와이어매쉬가 없는 실

**Table 5** Observed failure of selected perforated specimens

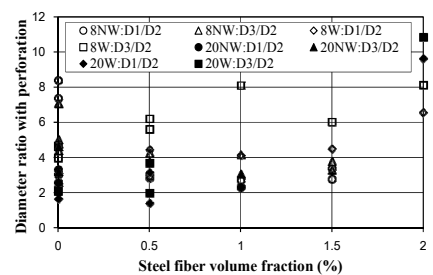
Specimen	8NWv2-5-0.5%	8NWv2-5-1.0%	8Wv2-5-0.5%	8Wv2-5-1.0%
Front face				
Rear face				
Specimen	20NWv2-5-0%	20Wv2-5-1.0%	20Wv2-5-0%	20Wv2-5-0.5%
Front face				
Rear face				



(a) D1 to  $d$  ratio with 8 mm diameter aggregates



(b) D1 to  $d$  ratio with 20 mm diameter aggregates



(c) D1/D2 or D3/D2 for specimens with perforation

**Fig. 6** D1 to  $d$  ratio and D1/D2 or D3/D2 according to steel fiber volume fraction ( $d$  = diameter of spherical ball)

협체는 각각  $4.60d$ ,  $4.28d$ ,  $4.05d$ ,  $3.86d$ ,  $3.59d$ 의 값이 나타난 반면 와이어매쉬로 보강한 실험체는  $4.27d$ ,  $4.19d$ ,  $3.81d$ ,  $3.81d$ ,  $3.55d$ 의 값을 보이며 표면 콘크리트의 탈락이 감소하였다. Fig. 6(a)와 (b)의 분포도에서는 와이어매쉬로 보강한 실험체의 D1/ $d$ 의 값이 와이어로 보강하지 않은 실험체보다 아래쪽에 분포하고 있음을 확인할 수 있는데, 이를 통하여 내충격성의 증가를 정량적으로 판단할 수 있다. 역시 강섬유 혼입률이 증가할수록 D1/ $d$ 값이 감소하는

데, 강섬유 혼입률 1.5%까지는 혼입률이 증가할수록 내충격성이 증가하는 경향이 확연히 나타남을 확인할 수 있다. 전면과 배면의 탈락넓이와 내충격성의 상관관계 있어서 강섬유 혼입률과 와이어매쉬는 각각 내충격성을 증가시킨다고 결론내릴 수 있다.

파괴형상이 관통인 실험체를 살펴보면 전체 실험체 대비 8 mm 골재를 사용한 실험체는 60개 중 17개이었고, 20 mm 골재를 사용한 실험체 군에서는 56개 중 7개이었

다. 8 mm 골재를 사용한 실험체 군에서는 강섬유 혼입률이 0~2.0% 사이에서 골고루 관통된 실험체가 나타났다. 반면 20 mm 골재를 사용한 실험체 군에서는 와이어매쉬로 보강한 2.0% 실험체 1개를 제외하고는 모두 0, 0.5%의 실험체에서 관통이 발생하였다. 20 mm 골재를 사용한 실험체만 보았을 때 강섬유 혼입률이 증가함에 따른 내충격성의 증가가 확연히 나타난다. 그러나 8 mm 골재에 대한 실험에서는 강섬유 보강에 의한 관통의 방지는 관찰할 수 없었다. 즉, 강섬유 혼입률 1.0~2.0%에서도 8 mm 골재 실험체에서는 관통이 관찰되었다. 골재의 크기에 따라 강섬유 혼입률에 의한 내충격성이 다른 것으로 판단된다. 골재의 크기와 강섬유 혼입률을 종합적으로 고려할 수 있는 변수를 찾자면 콘크리트의 압축강도이다. 강섬유 혼입률이 증가할지라도 콘크리트 압축강도가 낮아지면 내충격성이 감소한다는 결과를 실험적으로 관찰하였다. 이는 다양한 내충격성 평가식<sup>17,18)</sup>에서 압축강도를 사용한다는 점에서 일맥상통하는 부분이다. 두 개의 비슷한 압축강도를 가지는 강섬유 혼입률 0.5%에서 골재 크기에 따른 내충격성을 비교하자면, 20 mm 골재를 사용한 실험체에서의  $D1/d$ 값이 8 mm 골재를 사용한 실험체의  $D1/d$ 값보다 전체적으로 컸다. 그러므로 전면과 배면의 탈락범위만 고려하였을 경우, 20 mm 골재를 사용한 실험체가 8 mm 골재를 사용한 콘크리트보다 상대적으로 내충격성에 약하다고 판단된다. 관통된 실험체의 대부분은 50 mm 두께였으며, 강섬유 무혼입 콘크리트 중 70 mm 실험체가 1개 있었다. 이는 관통한계두께(perforation limit thickness,  $e$ )가 50~70 mm 사이에 있다는 것을 의미한다.

Fig. 6(c)는 관통(perforation)된 실험체 중에서 관통지름( $D2$ )이 20 mm 이상인 실험체의  $D1/D2$ 와  $D3/D2$ 의 값을 나타낸 것이다. 강섬유 혼입률 0%와 0.5% 범위에서 와이어매쉬로 보강한 실험체가  $D2$ 대비 더욱 작은 파괴면적을 가졌다. 하지만 일부 실험체 중에서  $D3/D2$ 값이 큰 실험체가 있었는데, 이는 부착파괴에 의하여 배면에 큰 손실량을 가졌기 때문이다. 강섬유 혼입률 1.0%와 1.5%에서 와이어매쉬로 보강한 실험체 중 관통된 실험체는 없었다. 이와 같이 와이어매쉬로 보강했을 때 더욱 우수한 내충격성 보강효과가 나타났다.

Fig. 7은 배면박리 없이 관입 및 전면파괴, 배면균열이 발생한 실험체의 관입깊이를 강섬유 혼입률에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 추세를 보았을 때 8 mm 골재를 사용한 실험체는 강섬유 혼입률 1.5%까지는 관입깊이가 점진적으로 증가하는 경향을 보인다. 이러한 차이는 압축강도의 차이 때문인 것으로 판단된다. 반면, 20 mm 골재를 사용한 실험체는 강섬유 혼입률과 상관없이 비슷한 관입깊이를 보인다. 그리고 와이어매쉬를 보강한 실험체의 관입깊이도 비슷하게 나타났다. 이를 수치로 나타내면, 8NWv1, 8NWv2, 8Wv1, 8Wv2, 20NWv1, 20NWv2, 20Wv1, 20Wv2의 경우, 관입깊이의 평균값은 각각 15.29, 18.71, 14.12, 20.32, 14.47, 20.56, 15.91, 19.08 mm이었다.

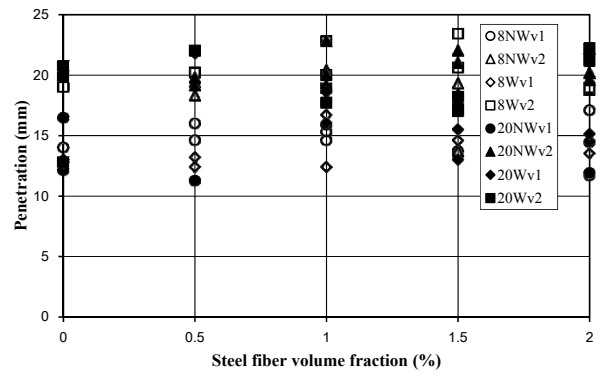


Fig. 7 Penetration depth for specimens with spalling and spalling (R)

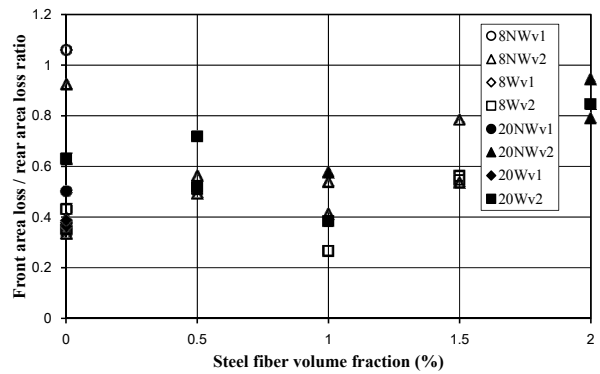


Fig. 8 Front area loss to rear area loss ratio for specimens with perforation

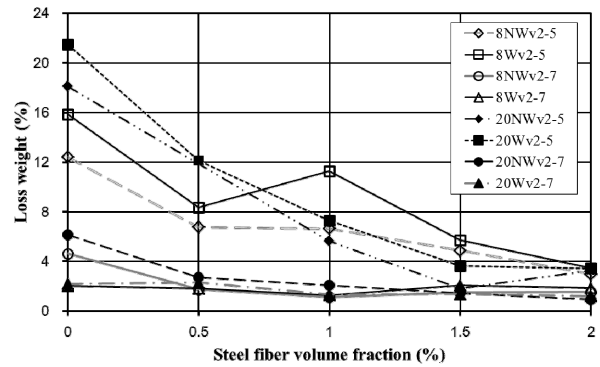


Fig. 9 Loss-weight for specimens with perforation due to 350 m/s velocity impact

관입깊이의 평균값을 비교하였을 때 와이어매쉬를 보강하였다 할지라도 관입깊이를 억제하는데에는 효과가 없다는 결과가 나타났다. 이러한 사실은 앞서 언급한 Dancygier와 Yankelevsky<sup>2)</sup>의 연구결과와 유사하다.

Fig. 8은 관통(perforation) 실험체의 전면과 배면의 탈락범위를 강섬유 혼입률에 따라서 구분하였다. 일반적으로 관통모델(model of perforation)에<sup>1,19)</sup> 의하면 전면의 탈락범위 대비 배면의 탈락범위가 더 큰 것이 일반적이다. 본 실험에서도 전면의 탈락범위 대비 배면의 탈락범위 값이 1 이하이므로 배면의 탈락범위가 더 크게 나타났다.



강섬유 혼입률이 0.5%에서는 약 3배 가까운 탈락면적을 가지기도 하였다. 이러한 실험체는 부착과피에 의하여 배면이 지나치게 큰 탈락면적을 가지는 실험체인 경우이다. 그럼에도 불구하고 전체적인 경향을 보면 강섬유 혼입률이 0, 0.5, 1.0%에까지는 탈락면적비가 0.4~0.7 범위 안에 주로 분포된 반면, 강섬유 혼입률이 1.5%와 2.0%에서는 그 값이 증가하는 추세를 보였다. Fig. 9는 350 m/s의 충돌속도를 가지는 비상체가 실험체에 충돌하였을 때 충돌 전후의 중량을 계량한 후 손실중량을 평균백분율로 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 것처럼 강섬유 혼입률이 증가할수록 중량손실량이 강섬유 혼입률 1.5%까지 큰 폭으로 떨어졌다. 강섬유 혼입률 1.5%와 2.0%일 때는 비슷한 중량손실량을 보이고 있다. 골재의 크기에 따라서는 20 mm의 골재를 사용한 실험체의 중량손실량이 더 컸다. 그리고 와이어매쉬 보강여부에 대한 영향은 패널두께에 따라서 다른 결과가 나타났다. Fig. 9를 보면 8Wv2-5와 20Wv2-5는 각각 8NWv2-5와 20NWv2-5보다 중량손실량이 더 많았다. 그러나 8Wv2-7와 20Wv2-7는 각각 8NWv2-7와 20NWv2-7보다 중량손실량이 적게 나타났다. 이는 동일한 운동에너지가 배면의 피복에 쪼갬부착과피를 일으킬 수 있느냐 없느냐의 차이로 볼 수 있다. 50 mm 두께의 실험체에서는 얇은 두께로 인해 전체적인 변형이 발생하여 철근의 인장효과로 피복의 쪼갬부착과피가 발생하였다. 하지만 70 mm 두께의 실험체는 휨변형이 발생하지 않아 철근에 인장력이 크게 발생하지 않았고 따라서 쪼갬부착과피가 억제되었다.

실험체의 두께가 충분하지 않으면, 실험체가 대변형을 일으키고 이에 따라 와이어에 인장력이 발생하여 배면의 피복을 탈락시킬 수 있다. 이러한 현상은 강섬유 1.0%까지 확인되었다. 그러나 강섬유 혼입률이 1.5%, 2.0%일 때 배면박리는 제어되었는데, 강섬유의 가교효과로 인해서 피복층의 쪼갬부착강도가 증가된 것이라 사료된다.

Fig. 6과 Fig. 9을 고려하여 종합적으로 판단하였을 때, 강섬유를 혼입하면 표면박리의 넓이는 감소하고 콘크리트 매트릭스 내의 결속효과는 커져서 내부의 파손량이 적게 발생할 것이다. 본 실험결과에 의하면, 강섬유 혼입률 1.5% 이상을 사용하였을 때 와이어매쉬 전후의 콘크리트 매트릭스 내 부착강도를 증가시켜 와이어매쉬의 인장에 따른 부착과피를 방지할 수 있다고 판단된다.

### 4.3 충격계수를 고려한 내충격성 평가

본 절에서는 실험체의 대변형에 의해 소실되는 에너지와 무관하게 내충격성을 평가하기 위하여 운동에너지를 바탕으로 제시된 충격계수(impact factor,  $I$ )<sup>1,20</sup>를 활용하여 관입깊이와 박리, 관통을 평가하였다.

$$I = \frac{MV^2}{d^3 f_{ck}} \quad (1)$$

여기서  $M$ 은 비상체의 중량(kg);  $V$ 는 충돌속도(m/s);  $d$ 는 비상체의 지름(m);  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도(Pa)이다. Fig. 10은 관입 및 전면과피 실험체의 관입깊이( $x$ )를 충격계수로 나누어 강섬유 혼입률로 구분하였다. 우선 골재 크기에 따른 관입깊이 저항능력을 파악하면 다음과 같다. 20 mm 골재를 사용한 경우 단위 충격계수 당 관입깊이는 평균적으로 1.6 mm로 나타났는데, 8 mm 골재를 사용한 실험체는 강섬유 혼입률 0~1.0%까지는 20 mm 골재를 사용한 실험체보다 관입깊이 억제력이 부족하게 나타났지만, 1.5%에서는 비슷하게 나타났으며, 2.0%에서는 8 mm 골재를 사용한 실험체의 관입깊이 저항능력이 더 우수하였다. 한편 와이어매쉬 사용에 따른 관입에 대한 저항능력 향상은 뚜렷한 경향을 찾기 힘들다. Fig. 10에서 NW, W 계열의 단위충격 당 관입깊이 값은 엇비슷하게 혼재되어 있음을 확인할 수 있다. 즉 와이어매쉬에 따른 관입깊이 저항능력 향상은 미비하다고 사료된다.

Fig. 11에서 두께가 50 mm인 실험체의 배면박리 및 관통실험체의 배면박리두께( $s$ )를 충격계수로 나눈 후 강섬유 혼입률로 구분하였다. 여기서 배면박리두께 값이 증

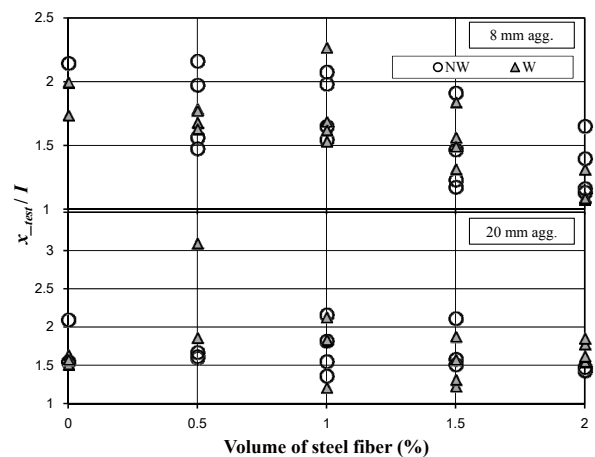


Fig. 10 Penetration depth to impact factor ratio for specimens with perforation

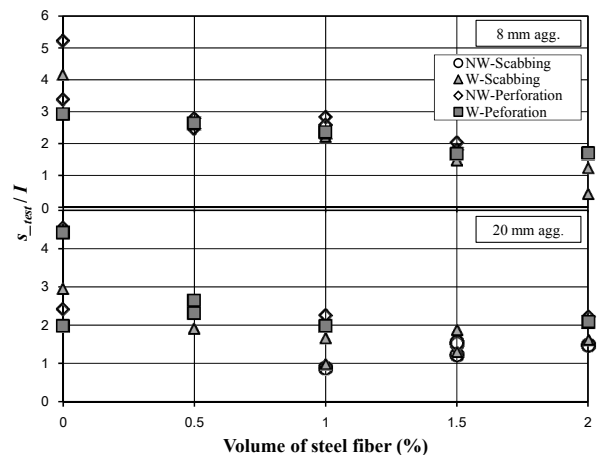


Fig. 11 Scabbing depth and impact factor ratio for specimens with scabbing and perforation

가하면 관통이 발생하므로 관통실험체도 동일하게 배면 박리두께로 판단하였다. 골재의 크기, 와이어매쉬 보강여부와 관계없이 강섬유 혼입율이 증가하면 1.0%까지는 단위 충격계수 당 배면박리두께가 점진적으로 감소한다. 강섬유 혼입률 1.0~2.0%의 단위 충격계수 당 배면박리두께의 변화량은 크지 않지만, 콘크리트에 강섬유를 1.0% 이상 혼입하면 배면박리와 관통에 대한 내충격성을 향상시킬 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

강섬유 혼입률이 0%를 기준으로, 와이어매쉬를 보강한 W계열 실험체가 와이어로 보강하지 않은 NW계열의 실험체보다 단위 충격계수가 작으며, 관통되지 않은 실험체도 다수 확인되었다. 이는 와이어매쉬가 배면박리와 관통에 대한 측면에서는 내충격성을 향상시켰다고 판단할 수 있다. 하지만 강섬유 혼입률 0.5%에는 와이어매쉬의 보강여부와 상관없이 유사한 단위 충격계수 당 배면박리깊이를 보이고 있다. 이를 종합하였을 때, 배면박리두께와 관통의 측면에 있어서는 와이어매쉬를 사용하는 것보다 강섬유를 혼입하는 것이 더 효율적이라는 결론에 도달한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 고속충격 하에서 강섬유와 와이어매쉬로 보강된 콘크리트 패널의 내충격성을 실험적으로 고찰하였다. 변수로는 강섬유 혼입률, 와이어매쉬 보강여부, 패널두께, 골재 크기, 충돌속도를 변수로 사용하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 강섬유 혼입률이 증가하면 관입 억제력의 향상은 없지만, 배면박리와 관통에는 효과가 있다고 판단된다. 강섬유 혼입률이 높아질수록 전면과 배면의 탈락면적과 탈락량은 줄어드는 효과가 있다. 그리고 와이어매쉬와 강섬유를 함께 사용할 경우, 강섬유의 가교효과 및 와이어매쉬로 인한 쪼갬부착강도의 증가로 인해 쪼갬부착과피를 줄일 수 있다.
- 2) 관입깊이, 배면박리, 관통의 관점에서 20 mm 골재를 사용한 실험체는 8 mm 골재를 사용한 실험체보다 내충격성이 상대적으로 우수하다고 판단된다. 하지만 전면박리, 배면박리 그리고 중량 탈락량의 관점에서는 8 mm 골재를 사용한 콘크리트의 내충격성이 20 mm 골재를 사용하였을 때보다 상대적으로 우수하다고 사료된다. 이와 같이 골재크기에 따라 각기 다른 내충격성을 갖는 것을 확인하였다.
- 3) 와이어매쉬로 보강하였을 때 전반적으로 내충격성이 향상되는 결과를 얻었다. 관입깊이에 대한 내충격성 향상은 미흡하지만, 전면의 탈락면적은 크게 감소하였다. 그리고 관통과 배면박리 측면에서의 내충격성은 향상되었다. 특히 실험체가 외부 충격하중을 받을 때 휨변형을 일으켜 실험체의 배면에서 인장파괴가 일어나는데, 와이어매쉬는 휨변형을 억제

하여 주는 효과가 있는 것으로 판단된다. 하지만 외부 충격하중이 과다하면 얇은 패널의 경우 휨변형이 발생하여 와이어 매쉬와 피복사이에 쪼갬부착과 피 현상이 발생할 수 있다.

- 4) 본 충격실험에서는 동일조건인 실험체가 1개 또는 2개 제작되어 사용되었기 때문에 충분한 데이터를 확보하지 못했고 따라서 표준편차도 다소 크게 나타났다. 이에 추가적인 실험을 수행하여 더 많은 실험데이터를 확보할 필요가 있다고 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02) 및 한국연구재단의 연구비지원(2012005905)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Li, Q. M., Reid, S. R., Wen, H. M., and Telford, A. R., "Local Impact Effects of Hard Missiles on Concrete Targets", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, 2005, pp. 224-284.
2. Hrynyk, T. D. and Vecchio, F. J., "Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Slabs under Impact Load", *ACI Structural Journal*, Vol. 111, No. 5, 2014, pp. 1213-1224.
3. Dancygier, A. N. and Yankelevsky, D. Z., "High Strength Concrete Response to Hard Projectile Impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, No. 5. 1996.
4. Almusallam, T. H., Siddiqui, N. A., Iqbal, R. A., and Abbas, H., "Response of Hybrid-fiber Reinforced Concrete Slabs to Hard Projectile Impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 58, 2013, pp. 17-30.
5. Mohammad, Y., Carkon-A., R., Singh, S. P., and Kaushik, S. K., "Impact Resistance of Steel Fibrous Concrete Containing Fibrous of Mixed Aspect Ratio", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 2009, pp. 183-189.
6. Almansa, E. M. and Canovas, M. F., "Behavior of Normal and Steel Fiber-Reinforced Concrete under Impact of Small Projectiles", *Cements and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 1807-1814.
7. Kim, S., 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 Korea Concrete Institute*, Vol. 26, No. 6, 2014, pp. 731-739 (in Korean)
8. Yazici, S., Arel, H. S., and Tabak, V., "The Effects of Impact Loading on The Mechanical Properties of the SFRCs", *Construction and Building Materials*, Vol. 41, 2013, pp. 68-72.
9. Kim, G. Y., Nam, J. S., and Miyauchi, H., "Evaluation on Impact Resistance Performance of Fiber Reinforced Mortar

- under High-Velocity Impact of Projectile”, *Journal of Korea Architecture Institute*, Vol. 27, No. 9, Sep. 2011, pp. 101-108 (in Korean).
10. 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).
  11. Zhang, M. H., Shim, V. P. W., Lu, G., and Chew, C. W., “Resistance of High-Strength Concrete to Projectile Impact”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, No. 7, Aug. 2005, pp. 825-841.
  12. Beppu, M., Miwa, K., Itoh, M., Katayama, M., and Ohno, T., “Damage Evaluation of Concrete Plates by High-Velocity Impact”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 12, Dec. 2008, pp. 1419-1426.
  13. Hsu, L. S. and Hsu, C.-T. T., “Stress-Strain Behavior of Steel-Fiber High-Strength Concrete under Compression”, *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, 1994, pp. 448-457.
  14. Lee, H.-H. and Lee, H. J., “Characteristic Strength and Deformation of SFRC Considering Steel Fiber Factor and Volume Fraction”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 6, 2004, pp. 759-766 (in Korean).
  15. ACI Committee 544, *ACI544.4R-88 (Reapproved 2009) Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, 1988.
  16. 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, Nov. 1992, pp. 415-429.
  17. ACE, *Fundamentals of Protective Structure. Report AT120 AT1207821*, Army Corps of Engineer, Office of the Chief of Engineers, 1946.
  18. NDRC, *Effect of Impact and Explosion, Summary Technical Report of Division 2*, vol. 1, National Defence Research Committee, 1946.
  19. Hughes, G., “Hard Missile Impact on Reinforced Concrete”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 77, 1984, pp. 23-35.
  20. Haldar, A. and Hamieh, H. A., “Local Effect of Solid Missiles on Concrete Structures,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 110, No. 5, 1984, pp. 948-960.

**요 약** 본 실험적 연구는 고속 비상체에 의한 충돌하중을 받는 강섬유보강콘크리트 패널의 내충격성을 파악하는데 그 목적이 있다. 본 실험에서는 또한 와이어매쉬 보강 유무에 따른 내충격성을 파악하였다. 강섬유 혼입률, 와이어매쉬 보강, 패널두께, 충돌속도, 골재크기를 변수로 조절하면서 고속충격을 가하여 실험체의 성능을 비교하였다. 강섬유의 혼입으로 인한 관입깊이에 대한 내충격성 향상은 미흡하였지만, 배면박리와 관통에 대해서는 내충격성 향상에 효과가 있었다. 이는 강섬유가 콘크리트매트릭스 내에서 가교효과를 발현하였기 때문이다. 그리고 와이어매쉬로 보강하였을 때 전면과 배면의 파괴면적은 감소하였고 관통과 배면박리에 대해서는 효과적이었지만, 관입깊이 억제력 향상에는 미흡하였다. 한편, 일부 실험체에서는 배면의 피복층을 따라서 쪼갬부착파괴가 발생한 경우도 있었지만, 대체적으로 와이어매쉬는 충격에 의한 패널의 휨변형을 억제하는 효과를 보였다. 관입깊이의 관점에서는 20 mm 골재의 사용이 내충격성 향상에 효과적이었고, 전면과 배면의 파괴면적 감소 측면에서는 8 mm 골재의 사용이 20 mm 골재와 비교하여 보다 효과적이었다.

**핵심용어** : 고속충격하중, 강섬유, 와이어매쉬, 내충격성, 쪼갬부착파괴