

반구형과 평탄형 선단 비상체의 충돌을 받는 콘크리트의 파괴특성

이상규¹, 김규용^{2*}, 김홍섭³, 손민재⁴, 남정수⁵

Fracture Property of Concrete on Spherical and Flat Nose Shape Projectile Impact

Sang-Kyu Lee¹, Gyu-Yong Kim^{2*}, Hong-Seop Kim³, Min-Jae Son⁴, Jeong-Soo Nam⁵

Abstract: In this study, projectiles with 2 kinds of nose shape: spherical and flat were impacted into normal concrete and fiber reinforced concrete panels. The fracture depth and form, crater diameter, tensile strain at rear face were evaluated. It was confirmed that smaller projectile nose areas resulted in deeper penetrations associated with concentrated impact forces and small front-face crater diameters in impact test. Conversely, larger projectile nose areas resulted in shallower penetrations and larger front-face fracture diameters. Similar front-face failure and strain distribution relationships based on the projectile nose shape were observed for normal and fiber-reinforced concrete although the rear-face tensile strain and scabbing were significantly reduced by the fiber reinforcement. In addition, a direct relationship was confirmed between the penetration depth based on the projectile nose shape and the tensile strain on the rear face. Thus the impact strain behavior is required to predict the scabbing behavior with penetration depth.

Keywords: Projectile nose shape, Impact, Fracture behavior

1. 서론

비상체의 충돌을 받는 콘크리트는 비상체에 의해 표면관입이 발생하고, 이때 생성된 압축 응력파가 방사형의 형태로 콘크리트 내부를 통과하여 배면으로 전달된다. 압축응력파는 배면의 자유단에 도달한 후, 인장응력파로 반사되고 압축응력파와 상쇄되는 작용을 반복한다. 이 시점에서 발생하는 인장응력 및 변형이 콘크리트의 동적인장강도를 초과하면, 균열 및 파괴가 발생하게 된다. 이러한 콘크리트의 국부파괴 형태는 다수의 연구보고에서 크게 표면관입, 배면박리, 관통파괴 등으로 구분하고 있다(Zhang et al., 2005).

일반적으로 군사시설물의 방호설계에 있어서는 미사일의 관통파괴를 억제하는 것을 최우선으로 판단하고 있으며, 사회기반 시설물의 경우에도 배면박리에 의한 내부 인명 및 재산의 피해에 대한 안전성능을 확보하는 것을 고려하고 있다.

따라서 구조물의 방호설계 시에는 비상체의 관통과 충격파에 의한 배면박리가 발생하지 않는 부재의 두께를 확보하는 것을 기본으로 하고 있다. 이를 위하여 연구자들에 의해 다양한 충격조건에 따른 표면관입깊이, 배면박리한계두께, 관통한계두께 등을 예측하기 위한 국부파괴 예측식이 제안되고 있다. Table 1에 기존에 제시되고 있는 콘크리트의 관입깊이와 배면박리한계두께의 예측식을 나타내었다.

비상체의 충격에 의한 콘크리트의 국부파괴는 Fig. 1과 같이 콘크리트의 압축강도, 휨·인장강도, 부재 두께 등과 같은 재료적 특성과 비상체의 직경 및 질량, 선단형상, 충돌속도와 같은 충격조건에 큰 영향을 받는다. 따라서 기존의 국부파괴

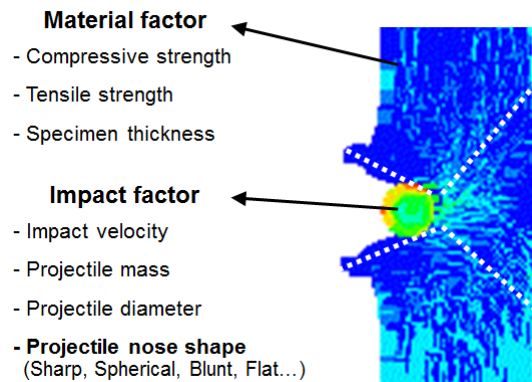


Fig. 1 Failure property of projectile impact on concrete

¹학생회원, 충남대학교 건축공학과 석사과정

²정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사, 교신저자

³정회원, 충남대학교 건축공학과 박사과정

⁴학생회원, 충남대학교 건축공학과 석사과정

⁵정회원, 동경공업대학 프론티어 재료연구소 연구원, 공학박사

*Corresponding author: gyuyongkim@cnu.ac.kr

Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Empirical formula

1) Modified NDRC(NDRC, 1946)

Penetration depth	Scabbing limit thickness
$G = 3.813 \times 10^{-5} \frac{NM}{D\sqrt{f_c}} \left(\frac{V_0}{D}\right)^{1.8}$	$\frac{s}{d} = 7.91\left(\frac{x}{d}\right) - 5.06\left(\frac{x}{d}\right)^2 \quad \left(\frac{x}{d} \leq 0.65\right)$
$G = \left(\frac{x}{2d}\right)^2 \quad \left(\frac{x}{d} \leq 2\right),$	$\frac{s}{d} = 2.12 + 1.36\left(\frac{x}{d}\right) \quad \left(0.65 < \frac{x}{d} \leq 2\right)$
$G = \frac{x}{d} - 1 \quad \left(\frac{x}{d} > 2\right)$	

x : 표면관입깊이(m), s : 배면박리한계두께(m), D : 비상체 직경(m), M : 비상체 질량(kg), V_0 : 충돌속도(m/s), f_c : 압축강도(pa), N : 선단형상계수 (Flat : 0.72, Blunt : 0.84, Spherical : 1.0, Sharp nose : 1.14)

2) Hughes(Hughes, 1984)

Penetration depth	Scabbing limit thickness
$\frac{x}{d} = 0.19 \frac{NI}{S}, I = \frac{MV_0^2}{d^3 f_t}$	$\frac{s}{d} = 5.0 \frac{x}{d} \quad \left(\frac{x}{d} < 0.7\right)$
	$\frac{s}{d} = 1.74 \frac{x}{d} + 2.3 \quad \left(\frac{x}{d} \geq 0.7\right)$

x : 표면관입깊이(m), s : 배면박리한계두께(m), D : 비상체 직경(cm), M : 비상체 질량(kg), V : 충돌속도(m/s), f_t : 인장강도(pa)(파단 시험 탄성률), N : 선단형상계수 (Flat : 1.0, Blunt : 1.12, Spherical : 1.26, Sharp nose : 1.39)

3) Haldar and Hamieh(Hadar et al, 1984)

Penetration depth	Scabbing limit thickness
$I = \frac{MNV^2}{d^3 f_c}$	
$\frac{x}{d} = -0.0308 + 0.2251I \quad (0.3 \leq I \leq 4.0)$	$\frac{s}{d} = 3.3437 + 0.0342I \quad (21 \leq I \leq 385)$
$\frac{x}{d} = 1.1875 + 0.0299I \quad (4.0 < I \leq 21.0)$	
$\frac{x}{d} = 1.1875 + 0.0299I \quad (21.0 < I \leq 455)$	

x : 표면관입깊이(m), d : 비상체 직경(m), M : 비상체 질량(kg), V : 충돌속도(m/s), f_c : 압축강도(MPa), s : 배면박리한계두께 I : 충격계수, N : 선단형상계수 (Flat : 0.72, Blunt : 0.84, Spherical : 1.0, Sharp nose : 1.14)

4) UKAEA(Barr, 1990)

Penetration depth	Scabbing limit thickness
$G = 3.8 \times 10^{-5} \frac{NM}{D\sqrt{f_c}} \left(\frac{V_0}{D}\right)^{1.8}$	$\frac{s}{d} = 5.3 G^{0.33}$
$\frac{x}{d} = 0.275 - [0.0756 - G]^{0.5} \quad (G \leq 0.0726)$	$G = 0.55 \frac{x}{d} - \left(\frac{x}{d}\right)^2 \quad \left(\frac{x}{d} < 0.22\right)$
$\frac{x}{d} = [4G - 0.242]^{0.5} \quad (0.0726 \leq G \leq 1.0605)$	$G = \left(\frac{x}{2d}\right)^2 + 0.0605 \quad (0.22 < \frac{x}{d} < 2.0)$
$\frac{x}{d} = G + 0.9395 \quad (G \geq 1.0605)$	$G = \frac{x}{d} - 0.9395 \quad \left(\frac{x}{d} \geq 2.0\right)$

x : 표면관입깊이(m), d : 비상체 직경(m), M : 비상체 질량(kg), V : 충돌속도(m/s), f_c : 압축강도(MPa), s : 배면박리한계두께, N : 선단형상계수 (Flat : 0.72, Blunt : 0.84, Spherical : 1.0, Sharp nose : 1.14)

예측식에서도 이들을 주요 팩터로 하여 표면관입깊이 및 배면박리 한계두께를 예측하고 있다(Hughes, 1984).

이러한 국부파괴 예측식은 다수의 실험을 통해 얻어진 실험 회귀식으로 적용범위가 제한적이고, 표면관입깊이에 의해 배면박리 한계두께 및 관통한계두께를 산정하는 방법을 사용하고 있다(Wen et al., 1992). 따라서 최근에는 이러한 국부파괴 예측식의 정확도를 높이고 적용범위를 넓히기 위한 연구가 진행되고 있다.

Wen et al.(2015)은 관입깊이 산정에 있어서 준정적 저항력과 동적 저항력의 변수를 추가하여 선단형상과 넓은 범위의 속도영역에서 적용할 수 있는 관입깊이 식을 제안하였다.

Shiu et al.(2008)은 개별요소법(DEM)을 사용하여 원뿔형과 평탄형 비상체에 대한 충돌해석을 실시하고, 실제 실험값과 비교한 결과, 매우 일관성있는 결과를 나타냈다. 개별요소법(DEM)에 의한 비상체 선단형상에 따른 관입깊이의 예측가능성을 확인했다.

한편, 국부파괴 예측에 있어서 비상체의 선단형상 계수에 대해서는 Flat, Blunt, Spherical, Sharp nose 등의 몇 개의 일정 형태에 대한 선단형상계수에 대해서 관입깊이 산정 시에만 직접적으로 적용하고 있으며 배면박리 한계두께 산정 시에는 표면관입깊이 예측값을 통해 간접적으로 적용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 반구형, 평탄형의 선단형상을 갖는 비상체를 일반 콘크리트 및 강섬유 보강콘크리트 패널에 충돌시켜 파괴성상, 파괴깊이 및 직경, 배면에 발생하는 변형분포를 측정하여 반구형과 평탄형 비상체에 의한 충격의 형태가 콘크리트의 파괴특성 및 배면의 변형거동에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

Table 2에 실험계획을 나타내었다. 비상체의 선단형상은 Fig. 2와 같이 반구형, 평탄형 2종류이다. 비상체의 직경과 질량은 각각 25 mm, 66.8 g으로 동일하며 충돌속도는 약 170 m/s로 설정하였다. 콘크리트 패널의 크기는 가로 700 mm, 세로 600 mm이고 두께는 50, 60 mm로 제작하였다.

Table 3은 콘크리트 배합을 나타낸 것이다. 설계 압축강도 50 MPa를 만족시키기 위해 W/B를 40%로 설정하였다. 시험체는 섬유를 혼입하지 않은 일반 콘크리트(Normal Concrete, NC)와 후크형 강섬유를 체적의 외할로 1.0% 혼입한 후크형 강섬유 보강 콘크리트(Hooked-end Steel Fiber Reinforced Concrete, HSFRC1.0)를 제작하였다.

본 연구에서 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 4에 나타내었다. 시멘트는 보통 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 혼화제는 플라이애쉬를 사용하였다. 잔골재는 밀도 2.2 g/cm^3 , 흡수율 0.81%의 강사를 사용하였고, 굵은골재는 밀도 2.65 g/cm^3 , 흡수율 0.76%, 최대치수 20 mm의 부순자갈을 사용하였다. 콘크리트의 슬럼프를 만족하기 위하여, 폴리카르보산계 고성능 감수제를 사용하였다.

후크형 강섬유는 길이 30 mm, 직경 0.5 mm, 형상비 60, 인장강도 1,140 MPa이고, 섬유 양 끝단이 후크형이다.

Table 2 Design of experiment

Projectile nose shape	Impact condition			Specimen condition	
	Projectile diameter (mm)	Projectile weight (g)	Velocity (m/s)	Size (mm)	Thickness (mm)
Spherical	25	66.8	170	700×600 (W×H)	50, 60
Flat					



Fig. 2 Configuration of projectile nose shape

Table 3 Details of concrete mixes

ID.	Fck (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	Vf (%)	sUnit wight (kg/m ³)					
					W	C	FA	S	G	Fiber
NC	50	40	55	-	220	440	110	774	655	0
HSFRC1.0										

Table 4 Mechanical properties of the used materials

Materials	Mechanical properties
Cement	Ordinary portland cement, Density : 3.15 g/cm^3 Fineness : $3,200 \text{ cm}^2/\text{g}$
Fly-ash	Density : 2.20 g/cm^3 , Fineness : $3,000 \text{ cm}^2/\text{g}$
River sand	Density : 2.61 g/cm^3 , Absorptance : 0.81%
Gravel	Crushed gravel, Maximum size : 20 mm Density : 2.65 g/cm^3 , Absorptance : 0.76%
Super plasticizer	Polycarboxylic acid type
Hooked steel fiber	Length : 30 mm, Diameter : 0.5 mm, Aspect ratio : 60, Density : 7.80 g/cm^3 , Tensile strength : 1,140 MPa

2.2 실험방법

Fig. 3에 가스압력식 고속 비상체 충돌 시험장치의 개요와, 외관 전경을 나타내었다. Fig. 3(b)의 가스 챔버에 질소가스를 충전하여, 일시적으로 분사시키는 방식이다. 본 연구에서는 질소가스를 1.5 MPa의 압력으로 약 170 m/s의 속도를 구현하였다. 비상체는 캐리어에 고정되어 발사되고, Fig. 3(c)의 속도 계측기에서 충돌속도를 측정하였다. Fig. 3(d)는 시험체 거치

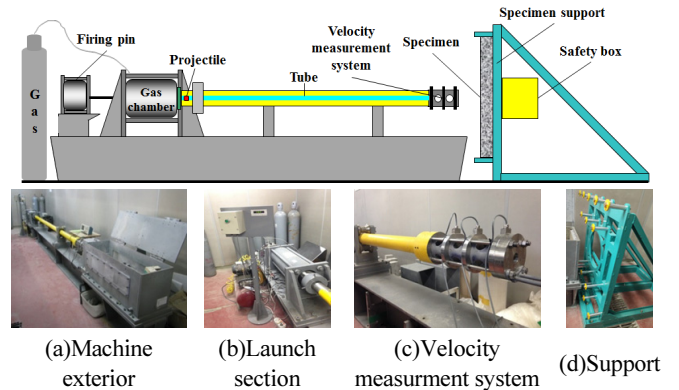
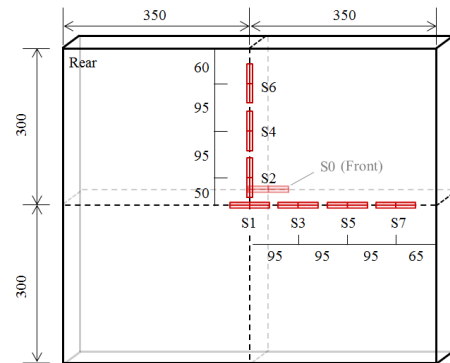


Fig. 3 High velocity impact test machine



※ S0 : Center of front face
※ Sampling rate : 200,000 Hz

Fig. 4 Position of the sensor

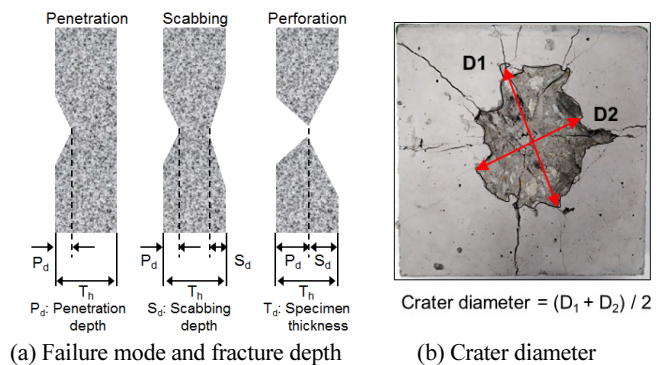


Fig. 5 Measurement of Fracture depth and crater diameter

대를 나타낸 것으로, 클램프를 사용하여 시험체의 좌우 면을 고정시켰다. Fig. 4에 배면변형특성평가를 위한 센서의 부착 개요를 나타내었다. 본 연구에서는 부착형 변형 게이지(PL-60)를 사용하였다. 콘크리트 패널 표면의 비상체 충돌점(S0)에 1개의 센서를 부착하여 충돌의 시작시점을 측정하였다. 배면에는 시험체의 중앙으로부터 직교하는 방향으로 7개의 센서(S1~S7, 0~285 mm)를 부착하였다. 변형측정 시 sampling rate는 200,000 Hz로 설정하였다.

Fig. 5에 파괴깊이와 파괴직경의 측정방법을 나타내었다. 파괴깊이는 최대 파괴깊이를 측정하였으며, 파괴직경은 최대 직경(D1)과 최소직경(D2)의 평균값으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비상체 충돌에 의한 파괴특성

Fig. 6은 비상체 선단형상에 따른 표면관입성상을 나타낸 것이다. 반구형 비상체의 충돌을 받은 경우에는 비상체의 선단형상과 같이 충돌부분 중심부가 움푹 패이는 둥근형태의

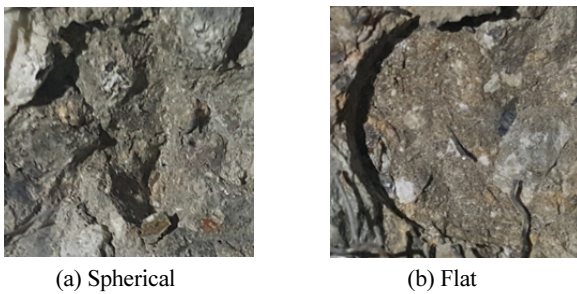


Fig. 6 Penetration form

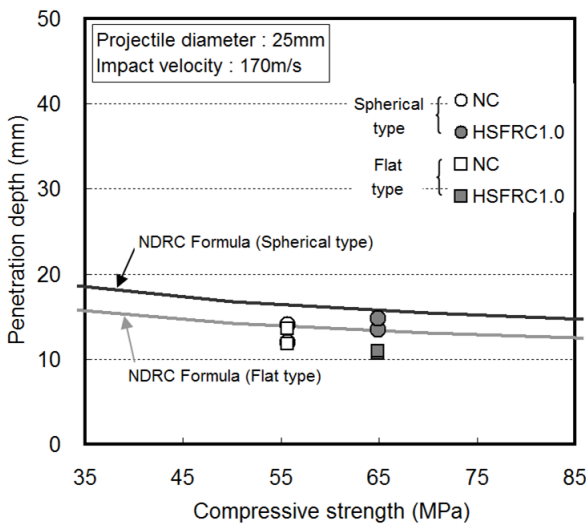


Fig. 7 Penetration depth

파괴성상을 나타내었다. 평탄형 비상체의 충돌을 받은 경우에는 패인 부분이 얇고 비상체 형태와 유사한 실린더형의 관입성상을 나타내었다.

Table 5에 비상체 충돌에 의한 콘크리트 패널의 배면박리 성상을 나타내었다. 시험체 두께 50 mm에서는 섬유보강유무에 관계없이 모두 배면박리가 발생하였으나 그 면적은 HSFRC1.0이 NC에 비해 작았다. 이는 섬유와 매트릭스의 부착력에 의해 배면파괴의 발생이 억제된 것으로 사료된다. NC의 경우 평탄형에 비해 반구형 비상체에 의해 배면박리면적이 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

시험체 두께 60 mm에서, 일반콘크리트는 반구형 비상체와 평탄형 비상체의 충돌에 의해 모두 배면박리가 발생하였고, 반구형 비상체는 원통형 비상체에 비해 배면박리면적이 크게 되었다. 한편 섬유보강 콘크리트는 섬유보강에 의한 휨-인장 성능의 향상과 시험체 두께의 증가로 인하여 배면박리가 발생하지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 7은 반구형과 평탄형에 의한 표면관입깊이 측정값과 국부파괴 예측식인 수정 NDRC식을 비교하여 나타내었다. 수정 NDRC식은 콘크리트의 국부파괴를 예측하기 위해 선단형상계수를 고려하고 있으며, 식의 형태는 서론의 Table 1에 나타내었다. 수정 NDRC식은 철근콘크리트에 의한 실험결과를 바탕으로 개발되었으나 철근배근에 의한 관입깊이의 영향은 크지 않으며(Chung et al., 2011) 철근의 영향에 관한 변수를 따로 두고 있지 않으므로 각각의 선단형상에 따른 비교군으로써 이용하였다.

초기 충돌 시 점충격을 가하는 반구형 비상체의 충돌을 받은 시험체의 관입깊이가 초기 충돌 시 면충격을 가하는 평탄형에 비해 크게 나타났다. 반구형 비상체는 둥근 선단형상에 의해 초기 충돌면적이 작게 되어 충격력이 집중되면서 관입깊이가 크게 되는 것으로 판단된다. 평탄형의 경우 평평한 선단형상에 의해 충돌면적이 반구형에 비해 크게 되어 충격력이 분산되면서 관입깊이가 작게 되는 것으로 사료된다.

수정 NDRC식에서도 선단형상계수가 클수록, 즉 선단면적이 작을수록 관입깊이가 깊어지는 것으로 나타났으며 본 연구에서 측정된 실측값은 수정 NDRC식과 유사한 경향을 나타내었다. 한편, 섬유보강에 의한 표면관입깊이의 저감효과 없었으며 보강섬유가 표면관입깊이에 주는 영향은 작은 것으로 판단된다.

Fig. 8은 반구형과 평탄형 비상체의 충돌에 의한 배면의 파괴깊이를 시험체 두께에 대한 비율로 나타낸 것이다. 두께 50 mm의 NC의 경우, 반구형 비상체에 의한 표면관입깊이 비가 평탄형에 비해 크게 나타났다. HSFRC1.0의 경우에도 반구형 비상체에 의한 표면관입깊이가 평탄형에 비해 크게 나타났지만 그 차이는 NC에 비해 크게 나타났다. 이는 평탄형 비상체

Table 5 Fracture form of rear face

ID	Thickness 50 mm		Thickness 60 mm	
	NC	HSFRC1.0	NC	HSFRC1.0
Spherical	Scabbing area ratio = 4.2%	Scabbing area ratio = 2.1%	Scabbing area ratio = 7.8%	Scabbing area ratio = 0%
Flat	Scabbing area ratio = 3.4%	Scabbing area ratio = 1.3%	Scabbing area ratio = 6.0%	Scabbing area ratio = 0%

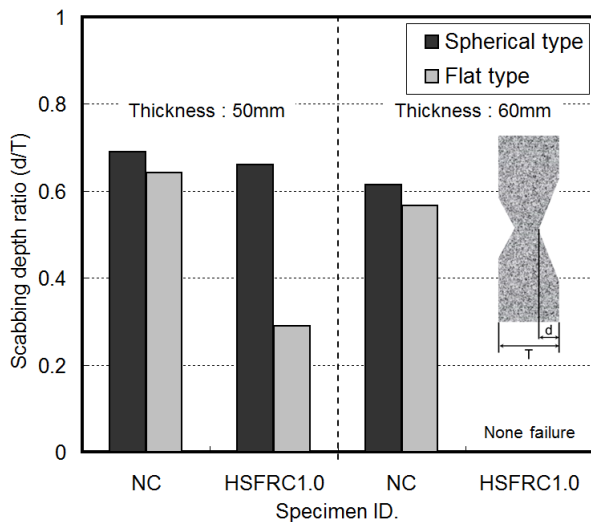


Fig. 8 Scabbing depth ratio

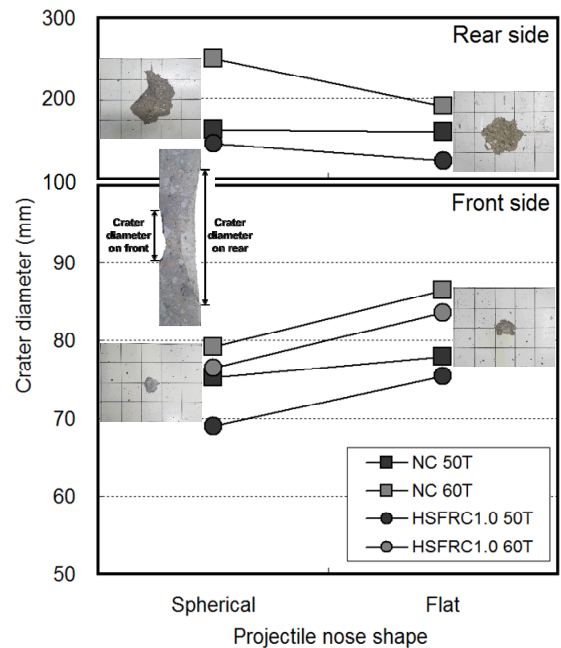


Fig. 9 Crater diameter

의 경우 면충격에 의한 충격력의 분산으로 인해 섬유보강의 영향이 반구형에서 보다 확대되었기 때문인 것으로 사료된다. 두께 60 mm에서 NC의 경우에도 두께 50 mm와 유사한 경향이 나타났지만 파괴깊이 비 값은 두께 50 mm에 비해 작게 나타났다. HSFRC1.0의 경우에는 보강섬유에 의해 배면박리 억제 효과가 크게 상승하면서 배면박리가 발생하지 않았다.

Fig. 9에 반구형과 평탄형 비상체에 의한 표면 및 배면의 파괴직경을 나타내었다. 표면파괴 직경의 경우, 선단면적이 작은 반구형 비상체의 충격을 받은 시험체가 선단면적이 큰 평탄형 비상체 보다 작게 나타났다. 또한 HSFRC1.0 시험체가

NC시험체에 비해 파괴직경이 작은 것을 확인할 수 있었다. 배면박리직경의 경우, 평탄형에 비해 반구형 비상체의 충격을 받을 때 더 크게 나타났으며 배면에서도 섬유보강 콘크리트가 일반콘크리트에 비해 파괴직경이 작은 것을 확인했다. 평탄형 비상체의 경우 충격면적이 크기 때문에 관입깊이가 작고, 배면으로 전달되는 충격력이 분산되어 배면박리 직경이 반구형에 비해 작게 되는 것으로 판단된다. 한편, 반구형

의 경우 비상체의 초기 충격면적이 작아 충격력이 집중되기 때문에 표면관입깊이가 깊어짐으로써 배면박리가 발생할 확률이 높아져 배면박리 직경 또한 평탄형에 비해 크게 발생하는 것으로 사료된다.

강섬유 보강 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 휨·인장성능이 향상되었기 때문에 표면 및 배면의 파괴직경이 작고, 배면박리가 발생할 가능성도 낮은 것으로 나타났다. 또한, 두께 증가에 의한 배면박리 직경의 증가는 배면박리가 발생하는 충돌조건에서 두께가 증가하면서 배면으로 전달되는 충격응력파의 전달 반경이 넓어졌기 때문으로 사료된다.

3.2 비상체 충돌에 의한 배면변형특성

Fig. 10은 비상체 충돌에 의한 두께 50 mm 콘크리트 패널의 배면변형이력을 나타낸 것이다. 비상체의 충돌과 함께 시험

체 표면(충돌부)의 게이지는 파단되었으며, 충돌 시작 시점을 1 ms로 설정하였다.

콘크리트는 비상체의 충돌에 의해 표면으로부터 압축응력파가 발생하여 배면으로 전달되고, 이 압축응력파는 배면의 자유단에서 인장 응력파로 전환된다. 따라서, 배면에 부착된 게이지에서는 충돌 초기에 압축변형이 발생하고, 시간이 경과함에 따라 인장변형으로 전환되었으며, 인장응력이 콘크리트의 동적인장강도를 초과하는 경우에는 콘크리트의 균열 및 파괴와 함께 게이지가 파단되었다.

반구형비상체의 충돌을 받은 경우, 중심으로부터 S3(95 mm)에 이르는 영역까지 높은 인장변형에 의해 게이지가 파단되는 것을 확인할 수 있었으며 그 이후 범위에서는 인장변형이 거의 발생하지 않았다.

평탄형비상체의 충돌을 받은 경우에도 시험체 배면 중심부

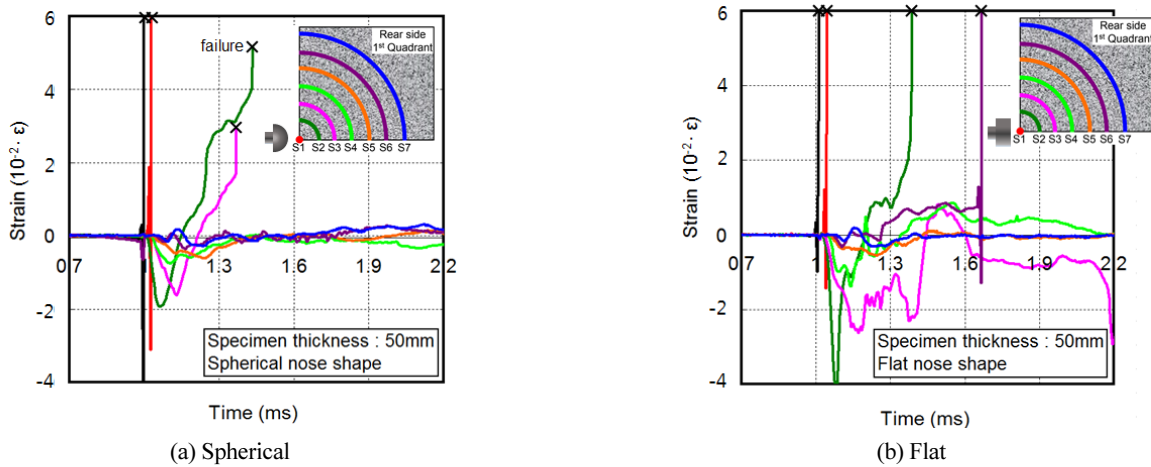


Fig. 10 Rear face strain curve of NC

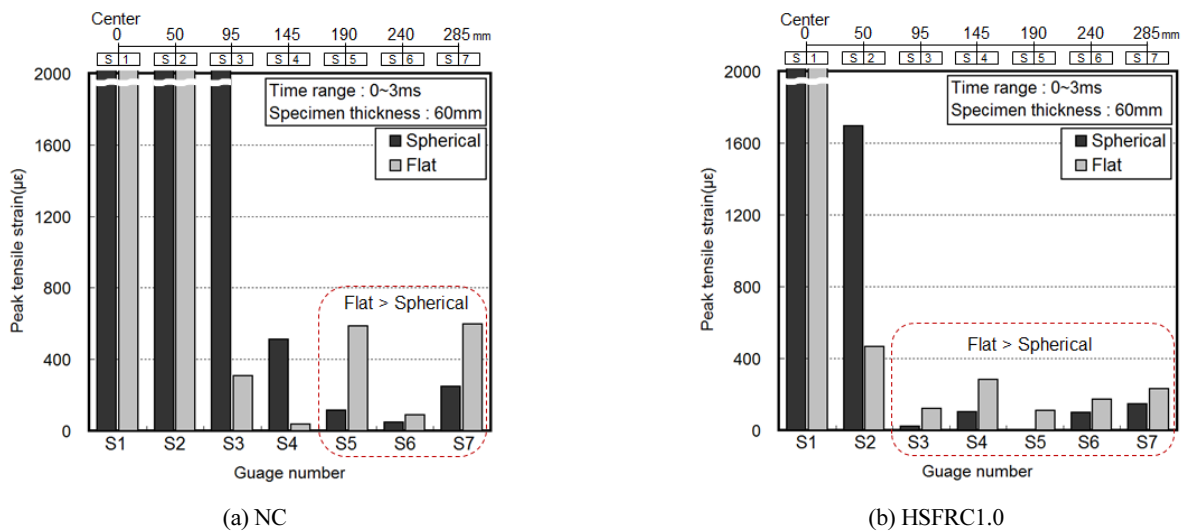


Fig. 11 Peak tensile strain by distance from center of rear face

인 S2(50 mm)영역까지 파괴에 의해 게이지가 파단되었고, 반구형과 달리 중심부에서 240 mm 떨어진 S6영역에서 균열에 의해 게이지가 파단되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 시험체 두께 60 mm에서 배면의 시간-변형 이력 곡선의 인장변형 피크값을 센서의 위치에 따라 나타낸 것이다. 반구형 비상체의 경우, 배면 중심으로부터 S3(95 mm)에 이르는 영역에서 콘크리트의 균열과 파괴에 의해 게이지가 파단되었으며 이후 S7(285 mm)영역까지는 피크인장변형이 급격하게 저하하는 것을 확인하였다.

평탄형 비상체의 경우 S3, S4(95, 145 mm)에서는 반구형에 비해 인장변형이 작았으나, S5~S7(190~285)의 범위에서는 인장변형이 더 크게 되었다.

반구형의 경우에는 점충격에 의해 충격응력이 집중되면서 평탄형에 비해 배면중심부에서 발생하는 인장변형이 크고, 평탄형의 경우에는 면충격에 의해 시험체 가장자리까지 충격응력이 분산되면서 반구형에 비해 피크인장변형이 큰 부분이 발생하는 것으로 사료된다.

섬유보강 콘크리트의 경우에도 일반콘크리트와 유사한 경향을 나타내었으나 피크변형 값의 크기는 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 보강섬유에 의한 충격력의 흡수 및 분산에 의한 영향으로 판단된다.

4. 결 론

반구형과 평탄형 비상체의 충돌을 받는 콘크리트의 파괴특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 선단형상계수가 큰 반구형 비상체가 충격을 가하게 되면 표면파괴 직경이 작고 충격력이 집중되어 관입깊이는 깊다. 반면, 선단형상계수가 작은 평탄형 비상체가 충격을 가하게 되면 충돌영역이 넓어 표면파괴 직경은 크지만 표면관입깊이가 작다.
- 2) 반구형과 평탄형 비상체의 충돌에 의한 표면파괴 특성과 충격변형거동은 섬유보강 콘크리트에서도 유사하게 나타났다. 그러나 섬유보강에 의해 배면의 인장변형이 크게 감소하였으며 배면박리 억제효과를 명확하게 확인하였다.
- 3) 비상체 선단형상에 따른 표면관입의 형태는 배면으로 전달되는 충격응력과 직접적인 연관이 있는 것으로 사료된다. 따라서 비상체 충돌에 의한 배면박리 한계두께를 예측하기 위해서는 선단형상에 따른 표면관입깊이와 함께 배면의 변형거동에 대해서도 고려할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(방호·방폭용 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 및 성능평가 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Abdel-Kader, M., and Fouada, A. (2014), Effect of reinforced on the response of concrete panels to impact of hard projectile, *Int J Impact Eng.* 63, 1-17.

Almusallam, T. H., Siddiqui, N. A., Iqbal, R. A., and Abbas, H. (2013), Response of hybrid-fiber reinforced concrete slabs to hard projectile impact. *Int J Impact Eng.* 58, 17-30.

Anderson, W. F., Watson, A. J., and Armstrong, P. J. (1984), Fiber reinforced concretes for the protection of structures against high velocity impact. In: Morton J, editor. Proceedings of the international conference on structural impact and crashworthiness. London: Imperial college, London, 687-695.

Barr, P. (1990), Guidelines for the design and assessment of concrete structures subjected to impact. Report. London: UK Atomic Energy Authority, *Safety and Reliability Directorate, HMSO*, 43.

Choi, H., Chung, C. H., and Kim, S. Y. (2011), Effect of reinforcement ratio and impact velocity on local damage of RC slabs. *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, 31(4A), 311-321.

Clifton, J. R. (1982), Penetration resistance of concrete—A review. National Bureau of Standards. *Washington DC: Special Publication*, 480-545.

Goldsmith, W. (1999), Non-ideal projectile impact on targets. *Int J Impact Eng.* 22, 95-395.

Guirgis, S., and Guirgis, E. (2009), An energy approach study of the penetration of concrete by rigid missiles. *Nucl Eng Des.* 239, 819-829.

Hughes, G. Hard missile impact on reinforced concrete. *Nucl Eng Des.* 77(1), 23-35.

Halda, r A. (1984), Hamieh H. Local effect of solid missiles on concrete structures. *ASCE J Struct Div.* 110(5), 948-960.

Li, Q. M., Reid, S. R., Wen, H. M., and Telford, A. R. (2005), Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *Int J Impact Eng.* 32(1-4), 224-84.

NDRC. Summary technical report of division 2. (1946), Effects of impact and explosion., *Washington, DC: National Defense Research Committee*, 1, 512.

Shiu, W., Donze, F. V., and Daudeville, L. (2008), Penetration prediction of missiles with different nose shapes by the discrete element numerical approach. *Computers and Structures.* 86, 2079-2086.

Siddiqui, N. A., Khateeb, B. M., Almusallam, T. H., Al-Salloum, Y. A., Iqbal, R. A., and Abbas, H. (2014), Reliability of RC shielded steel plates against the impact of sharp nose projectiles. *International Journal of Impact Engineering.* 69, 122-135.

Tai, Y. S. (2009), Flat ended projectile penetrating ultra-high strength concrete plate target. *Theor Appl Fracture Mech.* 51(2), 117-128.

Wen, H. M., and Jones, N. (1992), Semi-empirical equations for the perforation of plates struck by a mass. *Struct Under Shock Impact*, II, 369-380.

Zhang, M. H, Shim, V. P. W., Lu, G., and Chew, C. W. (2005), Resistance of high-strength concrete to projectile impact, *Int J Impact Eng*, 31, 825-41.

Received : 09/08/2016

Revised : 09/29/2016

Accepted : 10/19/2016

요 지 : 본 연구에서는 반구형과 평탄형의 비상체를 이용하여 일반콘크리트와 섬유보강콘크리트에 충격시험을 진행한 후 파괴깊이와 형태, 파괴직경, 배면의 인장변형을 평가하였다. 선단면적이 작을수록 충격력의 집중에 의해 파괴깊이는 크고 표면파괴 직경은 작게 되는 것으로 확인되었다. 반면에 선단면적이 클수록 파괴깊이는 작지만 표면파괴직경은 크게 되었다. 일반콘크리트와 섬유보강 콘크리트에서 유사한 표면파괴와 배면변형이 발생하였으나 인장변형의 크기는 일반콘크리트에 비해 섬유보강 콘크리트가 작은 것으로 나타났다. 또한, 비상체의 선단형상에 따른 표면관입의 형태와 배면의 인장변형 사이에 직접적인 연관이 있는 것으로 사료된다. 따라서 콘크리트의 배면박리한계두께 예측 시에는 표면관입깊이뿐만 아니라 배면의 변형거동 또한 고려할 필요성이 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 선단형상, 충격, 파괴거동
