

Research Paper

고속 발사체와 충돌한 시멘트복합체의 보강재 종류에 따른 내충격 특성 연구

Impact Resistance Characteristics of Cementitious Composites Subjected to High-velocity Projectiles with Reinforcement Types

석원균^{1,2} · 김영선³ · 이예찬² · 남정수⁴ · 김규용^{4*}

Seok, Won-Kyun^{1,2} · Kim, Young-Sun³ · Lee, Yae-Chan² · Nam, Jeong-Soo⁴ · Kim, Gyu-Yong^{4*}

¹Director, Research & Development Institute, LOTTE E&C, Gangnam-Gu, Seoul, 06034, Korea

²Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea

³Senior Researcher, Research & Development Institute, LOTTE E&C, Gangnam-Gu, Seoul, 06034, Korea

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea

*Corresponding author

Kim, Gyu-Yong

Tel : 82-2-821-5623

E-mail :

gyuyongkim@cnu.ac.kr

Received : February 27, 2023

Revised : May 1, 2023

Accepted : May 6, 2023

ABSTRACT

This research concentrates on the potential explosion hazards that could arise from unforeseen accidents in the rapidly proliferating hydrogen refueling stations and Energy Storage System(ESS) facilities. It underscores the pivotal role of structural protection technology in alleviating such risks. The research contributes primary data for the formulation of structure protection design by assessing the impact resistance across various reinforcement techniques used in cement composites. The experimental results elucidate that reinforced concrete, serving as the quintessential structural material, exhibits a 20% advancement in impact resistance in comparison to its non-reinforced counterpart. In situations typified by rapid loads, such as those seen with high-velocity impacts, the reinforcement of the matrix with fibers is demonstrably more beneficial than local reinforcement. These insights accentuate the importance of judiciously choosing the reinforcement method to augment impact resistance in structural design.

Keywords : green energy, protection, high-velocity impact, impact resistance, reinforcement

1. 서론

우리나라는 반도체, 자동차, 철, 석유·화학 등 제조·생산업 선진국으로 특수 구조물(생산공장 및 에너지 저장 시설 등)의 규모는 매년 증가하고 있다. 최근에는 “2050 탄소중립” 정책에 따라 에너지 분야의 세계적 기술 선도를 위해 화석연료 에너지를 그린에너지 기반으로 전환하고 있으며, 이는 수소 저장·충전 및 ESS(Energy storage system) 시설 등의 증가로 나타나고 있다. 이와 같은 구조물은 고효율의 에너지를 취급함에 따라 폭발 잠재성을 가지고 있으며, 실제로도 매년 폭발사고가 발생하고 있어 이에 대한 대책이 필요한 실정이다[1,2].

폭발사고는 폭발과 비산물 충격으로 피해를 발생시킨다. 폭발 또는 고속 비상체의 충격 하중은 일반적인 정하중과 달리 미소시간에 극한하중으로 도달하여 부재 파괴 또는 손상을 유발하게 된다. 이러한 폭발의 극한하중은 발생시 인명 및 재산 피해를 크게 유발하기 때문에 에너지 인프라 시설구조물은 극한하중에 저항할 수 있는 설계 또는 방호기술이 적용될 필요가 있다[3-6].

국내의 방폭 연구는 주로 군사적 목적으로 수행되어 왔으나, 2000년대 초반부터 민간 영역에서도 폭발 및 충격 등의 극한



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하중에 대한 재료 특성, 부재 거동, 해석적 연구가 진행되고 있으며, 사고에 대응한 보강재, 보수재 및 충격 완충재의 연구도 함께 증가하고 있다[7]. Nam et al.[8]은 섬유 혼입에 따른 휨인성의 증가로 고속 비상체에 대한 섬유보강 시멘트복합체의 내충격성능이 향상되는 것과 섬유종류에 따라 흡수하는 충격에너지가 다른 것을 확인하였다. Lim and Cho[9]은 다양한 섬유 각도를 갖는 층상 복합판이 고속충격을 받을 때 섬유 각도가 충격파 전달과 물체 파괴에 영향을 규명하였으며, 효과적인 보강재 및 충격완충재 선정 방법을 제시하였다.

본 연구는 고속 비상체의 구조물 충돌에 대한 방호 설계 및 재료 개발 연구의 일환으로 시멘트 복합체에 적용할 수 있는 보강재 종류에 따른 내충격 특성을 검토하여 구조물의 방호설계를 위한 기초자료를 축적하는 데 목적이 있다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

실험계획은 Table 1과 같이 변수에 따라 세 가지 시리즈로 구성하였다. 시리즈 I 은 콘크리트 두께 50, 80, 200mm와 발사체 속도 170m/s, 340m/s를 변수로 하였으며 콘크리트 두께는 기존 연구결과 및 예측식[8-13]을 토대로 관통파괴, 배면파괴 및 표면관입파괴를 보일 수 있는 수준으로 결정하였다. 시리즈 II 는 콘크리트에 보강한 철근의 직경 10, 13mm와 보강 위치 전면, 배면을 고려하였다. 시리즈 III 은 모르타르를 모체로 용접철망, 철근, 유기섬유 및 강섬유 보강재 적용에 따른 내충격 특성을 평가하였다. 시리즈 I 에서 선정한 시험체 두께는 시리즈 II 및 III 는 시험체 두께는 80mm, 발사체 속도는 340m/s를 적용하였다. 평가항목은 시험체 제작에 사용한 시멘트복합체의 압축강도, 탄성계수와 고속충돌 시험에 의한 시험체 파괴형상(등급화), 표면관입깊이, 배면박리두께, 파괴면적손실률 및 중량손실률로 설정하였다.

Table 1. Experimental plan

Series	Type	Specimen thickness(mm)	Projectile velocity(m/s)	Reinforcement		Specime ID ^b	Test item
				Type ^a	Location		
I	Concrete	50	170	-	-	C5-N-170	Compressive strength(MPa) Elastic modulus(GPa) Failure area ratio (Front & Rear side, %) Penetration depth(mm) Scabbing thickness(mm) Weight loss ratio(%)
		80		-	-	C8-N-170	
		200		-	-	C20-N-170	
		50	340	-	-	C5-N	
		80		-	-	C8-N	
		200		-	-	C20-N	
II	Concrete	80	340	Re-bar D10	Front	C8-D10F	
					Rear	C8-D10R	
				Re-bar D13	Front	C8-D13F	
					Rear	C8-D13R	
				Wire welding 2-layer	Front	M8-WF	
					Rear	M8-WR	
III	Mortar	80	340	Re-bar D10	Rear	M8-D10R	
				PA 2.0 Vol%	Dispersion	M8-PA	
				SF 2.0 Vol%	Dispersion	M8-SF	

a. PA and SF refer to polyamide and steel fibers, respectively.

b. Specimen type and thickness – Reinforcement type and location – Projectile velocity(Show only for projectile velocity 170m/s; omit for 340m/s)

2.2 사용재료 및 시멘트 복합체 배합

본 연구에서 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 2와 같다. 결합재는 1종 보통포틀랜드 시멘트, 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 콘크리트를 위한 잔골재는 세척사, 모르타르는 규사를 사용하였고, 굵은골재는 최대치수 20mm의 부순자갈을 사용하였다. 보강재로서 철근은 KS D 3504 「철근 콘크리트용 봉강」에 준하는 SD 400 D10 및 D13을 사용하였고, 용접철망은 직경 1.15mm 철사가 12.5×12.5mm 격자형태로 만들어진 기성 제품을 사용하였다. 혼입섬유는 Figure 1 및 2와 같이 길이 30mm, 인장강도 594MPa의 폴리아미드섬유와 길이 30mm, 인장강도 1,140MPa의 강섬유를 사용하였다.

시멘트 복합체 배합은 Table 3과 같다. 시험체 목표강도는 기존 연구와 비교할 수 있도록 많이 사용된 50MPa로 설정하였으며 기존 연구 배합 및 예비실험을 통해 콘크리트는 W/B 43%, 모르타르는 40%로 설정하였다. M8-PA 및 M8-SF의 섬유는 체적의 2.0vol%를 혼입하였다.

Table 2. Properties of the materials used

Materials	Mechanical properties
Cement(C ^a)	Ordinary portland cement, Density : 3.15g/cm ³ , Fineness : 3,630cm ² /g
Fly-ash(FA)	Density : 2.20g/cm ³ , Fineness : 3,228cm ² /g
Slag powder(SP)	Density : 2.90g/cm ³ , Fineness : 6,500cm ² /g
Silica sand(S)	Density : 2.64g/cm ³ , Absorptance : 0.38%
Sand(S)	Density : 2.56g/cm ³ , Absorptance : 0.97%
Gravel(G)	Crushed granite, Maximum size : 20mm, Density : 2.65g/cm ³ , Absorptance : 0.90%
Re-bar(R)	KS Product, SD400, D10 and D13
Wire welding(W)	Wire diameter : 1.15mm, Grid : 12.5×12.5mm
Polyamide fiber(PA)	Bundle type Ø0.5mm, Length : 30mm, Density : 1.14g/cm ³ , Tensile strength : 597MPa
Steel fiber(SF)	Hooke type Ø0.5mm, Length : 30mm, Density : 7.85g/cm ³ , Tensile strength : 1,140MPa

a. The letter in brackets means an abbreviation.

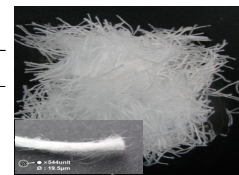


Figure 1. PA Fiber

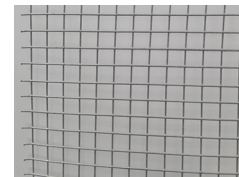


Figure 2. Wire welding

Table 3. Mix proportions of cementitious composites

Type	W/B (%)	S/a (%)	Water (kg/m ³)	Unit weight(kg/m ³)						
				C	SP	FA	S ^a	G	PA	SF
C	43	48	170	316	40	40	824	907	-	-
M										
M-PA2	40	-	400	850	-	150	350	-	22.8	
M-SF2										157

a. Sand was used for concrete, and silica sand was used for mortar.

2.3 실험방법 및 시험체 제작

2.3.1 역학적 특성 시험

압축강도 및 탄성계수 시험은 Ø100×200mm의 원주형 시험체를 제작하여 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」과 KS F 2438 「콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 푸아송 비 시험 방법」에 따라 실시하였다. 인장강도 시험은 시험체 두께 20mm의 아령형 박판 시험체를 제작하여 일축 직접 인장성능평가 시험장치에 의해 0.15mm/분의 속도로 재하하였다[8].

2.3.2 고속충격 시험

Figure 3 및 4에 가스 압력식 고속 비상체 충돌 시험장치의 개요, 시험체 크기 및 변형센서 부착위치, 발사체 제원 등을 나타냈다. 고속충격 시험은 KCI-UC108:2018 「비상체 충돌에 의한 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 파괴특성 시험방법」을 참조하였다. 내충격 특성을 평가하기 위한 시험체 크기는 200×200×80mm를 기준으로 하였으며, 두께를 변수로 하는 시리즈 I 은 두께 50, 200mm를 추가하였다. 고속충격시험은 직경 25mm, 질량 70g의 반구형 강재를 고압 가스로 발사시켜 170m/s 및 340m/s(충격에너지로 환산시 1,011.5 및 4,046J)의 속도로 충돌시켰다. 충돌속도는 자기장 속도 측정시스템으로 확인가능한 최고속도와 1/2의 속도로하였으며, 실험에 사용한 충돌속도는 예비실험을 통해 가스챔버 압력 조정으로 결정하였다.

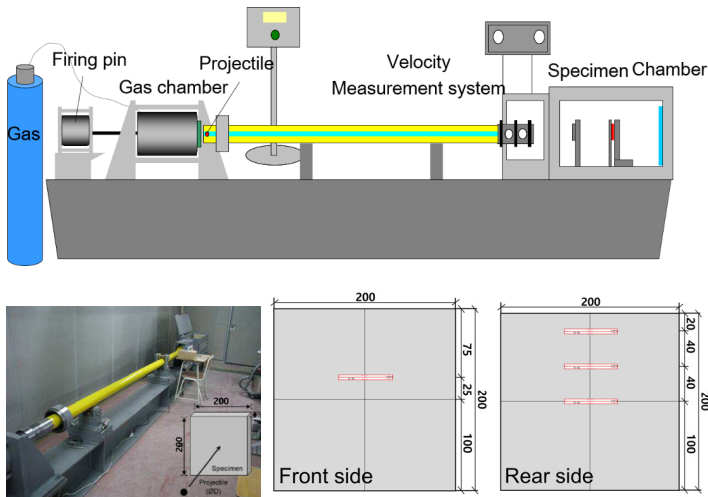


Figure 3. Specifications of high velocity impact test machine and specimen

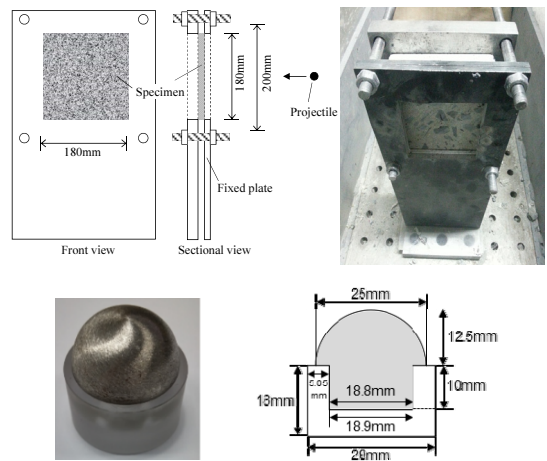


Figure 4. Projectile and specimen jig

고속충격 시험용 시험체 제작은 압축강도 시험체와 동일하게 타설 익일 탈형을 실시한 후 20±2°C 온도 조건에서 수중양생을 28일간 실시하였다. 이후 약 1주일 건조한 후 재령 35일에서 고속충격시험을 실시하였다. 철근 보강시험체는 시험체 단면 철근비가 약 2.5%가 되도록 하였으며 D10은 5열, D13은 3열을 가로·세로에 각각 사용하였다. 전면(F) 또는 배면(R)에 설치한 철근은 피복두께 20mm를 적용하였다. 배근 방법은 가로·세로근을 중심에 교차하게 설치하고 가장 바깥쪽 철근의 측면 피복두께를 20mm가 되도록 한 후 동일한 간격으로 나머지 철근을 배근하였다. 용접철망 피복두께는 철근과 동일하게 20mm를 적용하였으며, 10mm 간격으로 2겹을 적용하였다.

시험체 파괴성상은 기존 연구결과[5-7,9]를 참고하여 Table 4와 같이 관입파괴(Penetration), 배면파괴(Scabbing), 관통파괴(Perforation)로 구분하였다. 관입파괴는 발사체 충돌시 시험체 내부로 침투하여 발생하는 손상을 말하며 배면에는 박락이 발생되지 않은 상태이다. 배면파괴는 발사체의 충돌에 의해 표면관입과 배면 박락현상이 모두 나타날 때로 정의하였다. 배면 균열은 발생하였더라도 탈락한 부위가 없다면 관입파괴로 분류하였고, 관통

Table 4. Localized damage

(i) Penetration ^a	(ii) Scabbing	(iii) Perforation
(a) $P_d / T < 1.0$	(b) $(P_d + S_d) / T < 1.0$	(c) $(P_d + S_d) / T = 1.0$

a : T : Specimen thickness(mm), P_d : Penetration depth(mm), S_d : Scabbing thickness(mm), $T - P_d - S_d$: Remaining thickness

파괴는 발사체가 시험체를 완전히 관통하거나 표면관입 파괴와 배면박락으로 시험체가 존재하지 않는 공간이 만들어졌을때도 관통파괴로 분류하였다.

파괴 면적비는 Figure 5와 같이 충돌시험후 촬영한 사진을 이미지 편집 프로그램에 의해 시험체 전체크기와 파괴된 면적에 대한 픽셀(Pixel)수의 비율로 제시하였다.

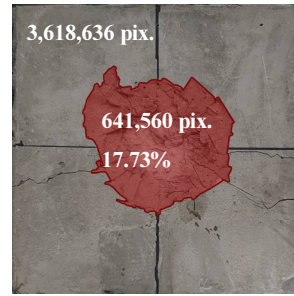


Figure 5. Methodology for failure area calculation

3. 실험결과 및 고찰

3.1 역학적 특성

Table 5는 시험체 제작에 사용된 시멘트 복합체의 종류에 따른 재령 28일 압축강도, 탄성계수 및 인장강도를 나타낸 것이다. 시멘트 복합체의 28일 압축강도는 56~58MPa범위로 유사하게 나타난 반면, 보강재로 PA섬유를 사용한 시험체의 압축강도는 약 7MPa 낮은 49.5MPa로 나타났다. 탄성계수는 콘크리트 시험체에서만 높은 값을 보였으며, 모르타르 시험체에서는 보강재 종류에 관계없이 유사한 값을 보였다. 인장강도는 M-SF2 > C > M-PA2 > M의 순으로 나타났다.

Table 5. Mechanical property results

ID	f_c (MPa) ^a	E(GPa) ^b	f_t (MPa) ^c
C	57.4	31.3	2.67
M	56.7	22.1	1.88
M-PA2	49.5	21.0	2.03
M-SF2	56.2	22.9	4.88

a. f_c : Compressive strength, b. E : Elastic modulus

c. f_t : Tensile strength

3.2 내충격 특성

3.2.1 파괴성상 및 등급

Table 6은 고속 발사체 충격을 받은 시멘트복합체의 보강재 종류에 따른 파괴 형상 및 등급을 나타내었다.

무보강 콘크리트 시험체의 경우 170m/s의 발사체 속도 조건에서는 두께 50mm에서만 관통파괴가 발생하였으며, 80mm이상 시험체는 배면파괴가 억제되었다. 하지만 340m/s의 발사체 충돌속도에서는 80mm 두께의 시험체까지 관통파괴가 발생하였다. 철근 보강 영향을 검토한 시리즈 II의 경우 철근을 보강한 시험체는 모두 배면파괴 형태로 관통파괴를 억제하였다. 또한, 13mm철근을 보강한 시험체가 10mm철근을 보강한 시험체에 비해 배면파괴 억제 효과가 양호한 것으로 관찰되었다.

보강재 종류에 따른 충격시험의 결과는 용접철망을 전면에 보강한 모르타르 시험체는 관통파괴가 발생하였고, 배면에 보강한 경우 배면 전체적으로 큰 균열이 발생하고 일부 박락되었으나 관통파괴는 억제되었다. 철근을 배면에 보강한 M8-D10R은 배면 피복이 박락되는 배면파괴 형태를 나타내었다. PA 및 강섬유를 보강한 시험체는 전면에 일부 관입 파괴가 나타났고 배면은 균열이 확인되나 박락은 관찰되지 않았다. 섬유를 보강한 시험체는 속도 340m/s의 발사체와 충돌한 시험체 중 표면 상태가 가장 건전하였으며, 배면은 시험체 두께가 두꺼운 C20-N 다음으로 건전하였다. 섬유 종류에 따른 M8-PA와 M8-SF의 손상정도는 유사하게 나타났다.

Table 6. Failure classification

Series	C5-N-170	C8-N-170	C20-N-170	C5-N	C8-N	C20-N
I						
Grade	(iii) Perforation	(i) Penetration	(i) Penetration	(iii) Perforation	(iii) Perforation	(i) Penetration
Series	C8-N	C8-D10F	C8-D10R	C8-D13F	C8-D13R	
II						
Grade	(iii) Perforation	(ii) Scabbing	(ii) Scabbing	(i) Penetration	(i) Penetration	
Series	M8-WF ^a	M8-WR	M8-D10R	M8-PA	M8-SF	
III						
Grade	(iii) Perforation	(II) Scabbing	(ii) Scabbing	(i) Penetration	(i) Penetration	

a. Left picture : Front side of specimen, Right picture : Rear side of specimen
 b The area marked in a separate color on the specimen means the peeled part.

3.2.2 시험체 두께 및 발사체 속도에 따른 내충격 특성

Figure 6은 고속 충격을 받은 무근 콘크리트 시험체의 두께 및 발사체 속도에 따른 전면·배면 파괴깊이와 잔존두께를 나타낸 것이다. 전면 관입깊이는 시험체 두께 50, 80, 200mm에 대하여 발사체 속도 170m/s의 경우 18.8, 16.1, 15.4mm, 340m/s의 경우 34.3, 41.9, 44.6mm로 나타났다. 전면관입 깊이는 동일한 두께의 시험체에서 발사체 속도가 증가할 경우 증가하는 것으로 나타났으나, 시험체 두께에 따른 전면 관입깊이는 발사체 속도에 따라 반대의 경향을 나타냈다.

Table 7은 미국 국방위원회(National defense research committee)의 고속충격에 관한 수정NDRC식을 나타낸 것이다[12]. 제안식으로 산출한 표면관입깊이는 동일한 압축강도 조건에서 발사체 속도 170m/s의 경우 27.3mm, 속도 340m/s의 경우 33.0mm로 나타났으며 Figure 6에 점선으로 나타내었다. 본 연구의 관입깊이는 수정 NDRC제안식에 의한 값에 비해 발사체 속도 170m/s의 경우 시험체 두께와 관계없이 모두 작게 나타났으며, 340m/s의 경우 모두 크게 나타났다. 제안식에 따른 관통파괴 한계 두께는 발사체 속도 170m/s의 경우 65.7mm, 340m/s의 경우 75.9mm로 나타났으며, 배면파괴 한계 두께는 170m/s의 경우 90.1mm, 340m/s의 경우 97.8mm로 나타났다. Table 6의 파괴 형상과 제안식 결과 비교시 C8-N은 두께가 제안식의 관통파괴 한계 두께 75.9mm보다 큰 80mm이지만 관통파괴가 발생하였고, 다른 시험체는 제안식 예측과 동일한 파괴 형태를 나타냈다.

Figure 7은 전면·배면 파괴면적과 중량감소율을 나타낸 것이다. 전면 파괴면적비는 발사체 속도 170m/s의 경우 9.0~17.4%, 340m/s의 경우에는 36.08~37.61%로 나타났다. 발사체 속도 2배 증가에 대하여 평균 약 23% 증가한 것이다. 반면, 시험체 두께 증가에 따라서는 유사하게 나타났다. 배면 파괴면적은 발사체 속도 170m/s의 경우 두께 50mm 시험체만 나타났으며, 속도 340m/s의 경우 80mm두께의 시험체까지 발생하였다. 수정 NDRC는 발사체 속도 170m/s 조건에서 배면파괴 한계 두께는 90.1mm로 예상하였으나, 본 연구에서 두께 80mm시험체는 배면 박락은 없고 균열만 발생하였다. NDRC에서는 배면파괴(back spalling)를 시험체 배면의 균열도 포함하기 때문으로 판단된다. 중량감소율은 전면파괴 면적에 비해 배면파괴 면적과 유사한 경향을 나타내고 있다. 이는 발사체 고속충돌에 의한 시험체의 손상은 전면보다 배면의 결과에 영향이 크기 때문으로 보인다. 발사체 속도 증가에 따라서는 손상 정도가 증가하나 비례관계는 아닌 것으로 확인된다.

Figure 8은 전면 관입깊이와 파괴면적비의 관계를 나타낸 것이며, Figure 9는 배면 파괴 깊이 및 면적비의 관계를 나타낸 것이다. 표면 관입깊이와 파괴면적비는 선형적 비례관계를 보이고 있으며 발사체 속도 상승에 따라 증가하는 상관관계를 나타냈다. 또한, 발사체 속도에 따라 시험값들은 군집을 형성하고 있어 시험체 두께는 전면파괴 및 면적에 특별한 영향이 없는 것을 확인했다. 배면 파괴 깊이 및 면적비의 관계는 관통파괴가 발생한 시험체에서만 결과를 나타내고 있어 분석 결과를 제시하기는 어려웠다.

Table 7. Empirical formula(Modified NDRC)

Penetration depth	Perforation limit thickness	Scabbing limit thickness
$G = 3.813 \times 10^{-5} \frac{NM}{d\sqrt{f_c}} \left(\frac{V_0}{d}\right)^{1.8}$	$\frac{e}{d} = 3.19\left(\frac{x}{d}\right) - 0.718\left(\frac{x}{d}\right)^2 \quad \left(\frac{x}{d} \leq 1.35\right)$	$\frac{h_s}{d} = 7.91\left(\frac{x}{d}\right) - 5.06\left(\frac{x}{d}\right)^2 \quad \left(\frac{x}{d} \leq 0.65\right)$
$G = \left(\frac{x}{2d}\right)^2 \quad \left(\frac{x}{d} \leq 2\right), \quad G = \frac{x}{d} - 1 \quad \left(\frac{x}{d} > 2\right)$	$\frac{e}{d} = 1.32 + 1.24\left(\frac{x}{d}\right) \quad \left(1.35 < \frac{x}{d} \leq 13.5\right)$	$\frac{h_s}{d} = 2.12 + 1.36\left(\frac{x}{d}\right) \quad \left(0.65 < \frac{x}{d} \leq 11.75\right)$

G : impact function, N : Nose shape factor = 0.72(flat), 0.84(hemispherical), 1.0(blunt) and 1.14(very sharp), M : mass, d : diameter of projectile, f_c : compressive strength of concrete, V_0 : velocity of projectile, x : penetration depth, e : perforation limit thickness, h_s : scabbing limit thickness

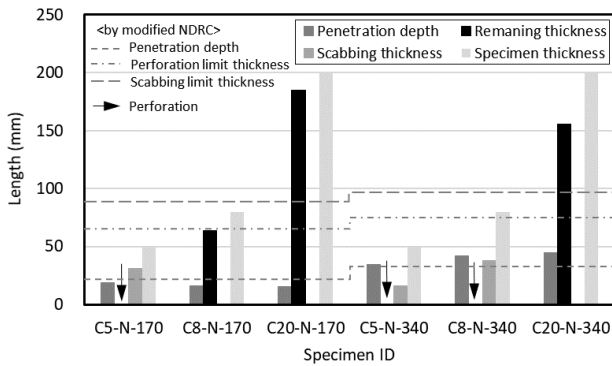


Figure 6. Length of failure on specimen front and rear according to thickness and projectile velocity

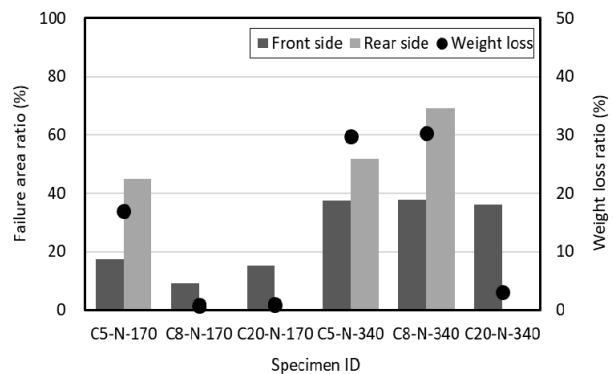


Figure 7. Ratio of failure area and weight loss relative to specimen thickness and projectile velocity

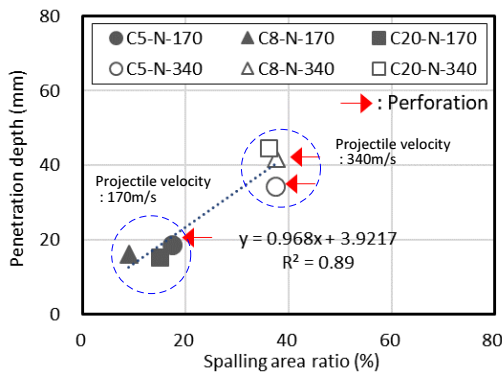


Figure 8. Relationship between penetration depth and spalling area ratio in accordance with specimen thickness and projectile velocity

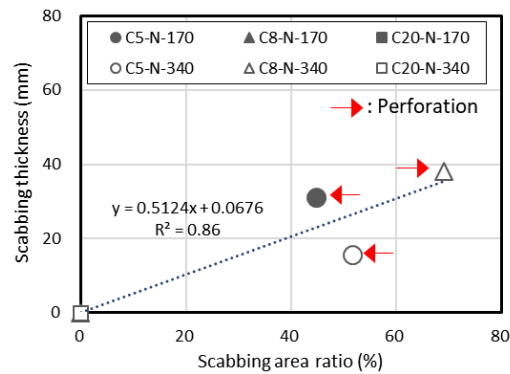


Figure 9. Relationship between scabbing thickness and scabbing area ratio in accordance with specimen thickness and projectile velocity

3.2.3 철근 직경 및 배근 위치에 따른 내충격 특성

Figure 10은 철근 직경 및 배근 위치에 따른 콘크리트 시험체의 전·배면 파괴깊이와 잔존두께를 나타낸 것이다. 표면파괴 깊이는 철근을 보강할 때 다소 감소하였고, 철근 직경이 작은 경우가 효과적인 것으로 나타났다. 기존 연구[10]에서는 철근 보강이 시험체의 표면관입 저항성을 향상시키지 못하는 것으로 제시하고 있으며 발사체 충돌 위치에 배근된 철근의 변형 상태가 표면관입 깊이에 영향을 미치는 것으로 제시하고 있다.

배면파괴 깊이는 철근 직경이 크거나 배면측에 위치할 때 감소하는 것으로 나타났다. 무근인 C8-N시험체는 관통파괴가 나타나 배면파괴 깊이가 불분명할 수 있으나 대부분 유사한 배면파괴 깊이를 나타내고 있어 철근 보강이 배면파괴 깊이에 미치는 영향은 미미한 것으로 예상되나 철근을 보강한 시험체는 모두 배면파괴 형상을 나타내고 있어 철근 보강이 관통파괴 억제에는 일부 영향이 있는 것으로 판단된다.

Figure 11은 철근 직경 및 배근 위치에 따른 콘크리트 시험체의 전·배면 파괴면적비와 중량감소율을 나타낸 것이다. 철근을 보강한 시험체의 중량감소율 및 파괴면적비는 C8-N시험체 보다 대부분 작게 나타나 철근 보강이 콘크리트의 내충격 성능을 보완하는데 효과가 있는 것을 확인하였다. 한편, 파괴면적비는 철근의 위치에 영향을 받는 경향을 보이고 있다. 철근을 배치한 면의 파괴면적비가 더 크게 나타나고 있으며 철근 직경에 관계없이 동일한 경향을 보였다. 이는 피복두께가 영향을 미친 시험 결과로 추측되며 피복두께를 변수로한 추가적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

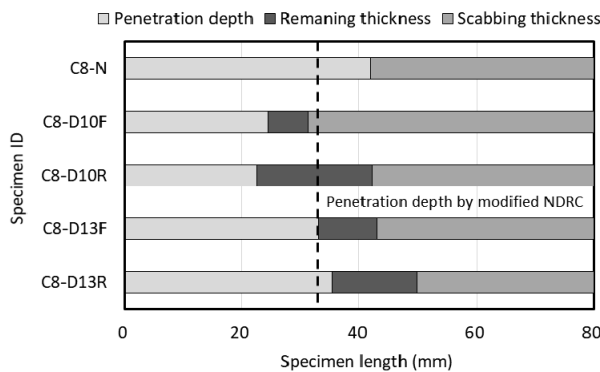


Figure 10. Depth of failure on specimen front and rear according to re-bar type and reinforcement location

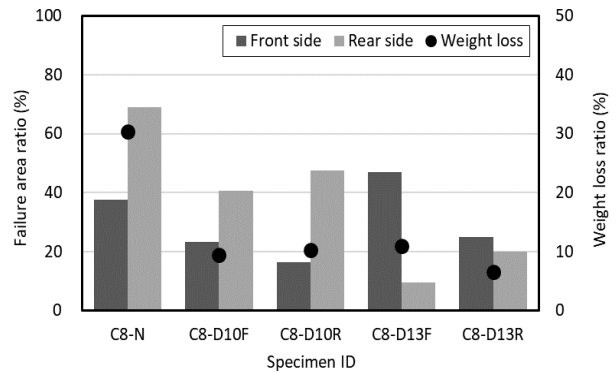


Figure 11. Ratio of failure area and weight loss based on re-bar type and reinforcement location

3.2.4 보강재 종류에 따른 내충격 특성

Figure 12 및 Figure 13은 340m/s속도의 발사체와 충돌한 80mm두께 시멘트 복합체의 보강재 종류에 따른 전후면 파괴 깊이, 파괴면적 및 중량손실율을 나타낸 것이다.

표면 관입깊이는 보강재 종류에 따라 19.7~54.2mm 범위로 나타났으며 시험체 전체 길이 대비 24.6~67.8%에 해당한다. 수정 NDRC 제안식에 의한 표면 관입깊이 33.0mm(32.9~33.2mm)에 비해서 최대 21.2mm(170%)의 큰 차이를 나타내고 있다. 콘크리트에 비해 취성파괴 경향이 높은 모르타르 시험체가 발사체 충돌에 의한 표면 손상이 더 크게 나타난 결과로 보이며 표면파괴면적도 같은 이유로 유사한 경향이 나타났다.

배면 파괴깊이는 M-D10R, C8-N, C8-D10R이 유사한 수준으로 나타난 반면 M-WR은 다소 작게 나타났다. 전면 파괴깊이가 상대적으로 크게 나타난 M-WR은 배면에 폭이 큰 균열이 발생하고 있으나 배면 보강 용접철망이 박락을 억제시켜 배면파괴 깊이와 면적이 작게 나타났으며, 시험편 비산도 방지하였다. 이를 제외하고는 모르타르 시험체의 배면파괴 면적은 콘크리트 시험체와 유사한 수준으로 보인다. 모르타르를 모체로한 시험체의 중량손실율은 전면 파괴면적과도 관계가 있으

나 증가-감소 패턴으로 검토시 배면 파괴면적과 보다 뚜렷한 상관성이 있는 것으로 확인되었다.

한편, 섬유형태로 보강한 M-PA 및 M-SF의 표면관입깊이는 25.7 및 19.7mm로 다른 시험체에 비해 10mm 이상 작게 나타났을 뿐만 아니라 발사체 충돌위치의 국부 파괴 외 전면부 손상은 나타나지 않았다. 특히 배면은 미미한 균열만 발생하는 수준으로 시험편 비산을 완전 방지하였으며, 1.4~2.0%의 매우 낮은 중량감소율 결과로 섬유보강방법이 내충격 성능 향상에 가장 효과적인 것을 알 수 있었다.

보강재 종류에 따른 내충격 특성을 종합하면, 전면에 용접철망을 보강한 M-WF는 관통 파괴되었으나 배면을 보강한 M-WR 및 M-D10R은 관통파괴를 억제하였고, M-WR의 중량감소율은 11.6%로 M-D10R 결과의 40%수준으로 작고, C-D10R과는 유사한 수준이다. M-WR과 M-D10R 또는 C-D10R에 적용된 용접철망과 철근의 보강비는 철근이 약 6.3배 크지만 본 연구의 범위에서 내충격 성능은 동등 이상으로 나타났다. 이와 같은 결과를 토대로 철근과 같이 방향성을 가지고 특 정의 위치에서 국부적으로 시험체를 보강하는 것보다는 섬유와 같이 위치에 관계없이 전방위적으로 시험체를 보강하는 재료가 효과적인 것으로 판단된다. 동일한 맥락으로 단면 보강비는 철근에 비해 많이 낮으나 비표면적은 약 70%수준으로 나타난 용접철망의 내충격 성능이 철근과 유사한 내충격 성능을 나타낸 것으로 추측된다. 참고적으로 본 연구에서 적용한 보강재의 비표면적은 용접철망 347cm², D10 철근 502cm² 및 SF 5,205cm²이다.

Figure 14는 속도 340m/s의 발사체와 충돌한 80mm 두께의 시험체 전후면 파괴깊이 및 잔존두께의 상관관계를 나타낸 것이다. 섬유를 보강한 시험체를 제외하고 모든 시험체의 잔존 시험체 두께는 20mm이하로 나타났다. 비교 대상으로 표시한 C8-N170은 63.8mm가 잔존하였으며 발사체 속도를 340m/s로 상승시켰을 때 시험체의 잔존두께는 최소 55%이상 감소하는 것으로 확인된다. 발사체 속도 2배 증가에 따라 시험체 파괴정도는 3.7배 증가하였다. 이러한 관점에서 M-PA 및 M-SF에 적용된 2%의 섬유는 발사체 속도 약 170m/s를 감쇠시키는 수준의 내충격 성능 향상 효과가 있는 것으로 예상된다.

Figure 15는 파괴면적비 및 중량손실율의 상관관계를 나타낸 것이다. 전면과 배면 파괴면적비에 대한 중량손실율의 관계를 검토하기 위해 선형회귀를 실시한 결과 전면파괴면적비-중량손실율의 결정계수(R²)는 0.32인 반면 배면파괴면적비-중량손실율의 결정계수는 0.73을 나타내고 있어 고속충격하중에 의한 시험체 손상은 표면파괴보다 배면파괴에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 비상체와 충돌하는 시험체 전면은 충격에 의해 발생하는 강한 압축 응력이 발생하는 반면 배면은 전면에서 발생하는 압축응력 파동이 배면에서 반사되어 인장응력을 유발하기 때문에 인장응력이 압축응력에 비해 약한 시멘트 복합체는 배면파괴가 전면파괴에 비해 손상 정도를 결정하는데 더 크게 기여한 것으로 판단된다[12-14].

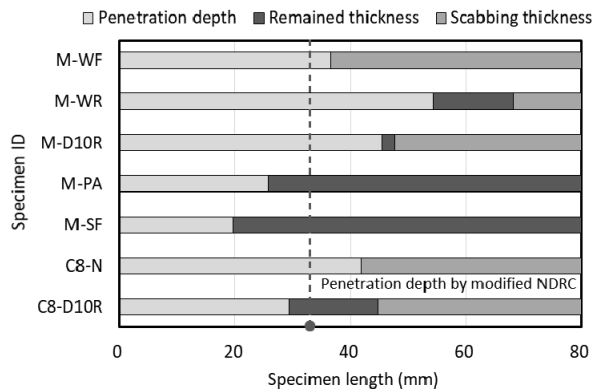


Figure 12. Depth of failure on specimen front and rear as per reinforcement type

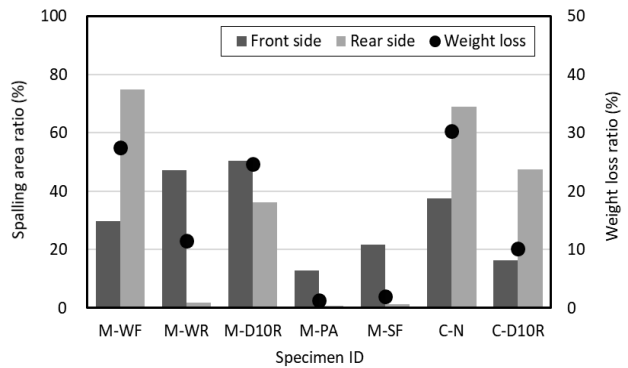


Figure 13. Ratio of failure area and weight loss according to reinforcement type

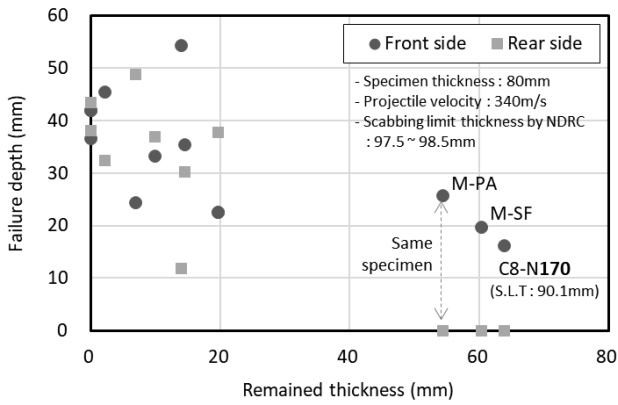


Figure 14. Relationship between failure depth and remaining thickness based on reinforcement type

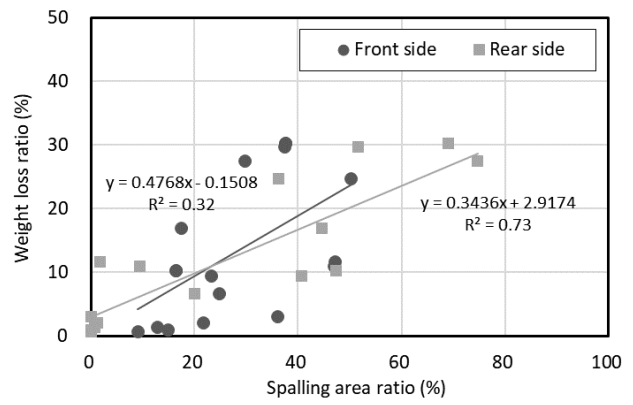


Figure 15. Relationship between spalling area ratio and weight loss ratio in accordance to reinforcement type

4. 결론

본 연구는 고속 발사체 충격에 노출된 시멘트 복합체의 보강재 종류에 따른 내충격 특성을 검토하였으며, 결과는 다음과 같이 요약한다.

- 1) 고속 발사체 충돌에 의한 전면 관입깊이는 발사체 속도가 증가할수록 뚜렷하게 증가하는 경향을 나타내었으나, 시험체 두께, 보강재 종류에 따라서는 유사한 결과를 나타냈다.
- 2) 철근 보강은 시멘트 복합체의 내충격 성능에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났으나, 배면파괴 및 관통파괴를 억제하고 있으며, 손상으로 인한 중량감소율은 무근에 비해 약 20% 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 고속 충격에 의한 손상 정도는 직접 충격을 받는 전면보다 배면 손상 결과에 더 큰 영향을 받는 것을 확인하였다. 또한, 전면 보강재를 사용한 시험체는 배면 보강재를 사용한 시험체보다 전면 파괴 면적율이 더 크지만 배면 파괴면적율은 보강재의 위치에 특별한 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
- 4) 시멘트 복합체의 보강재 종류에 따른 내충격 성능은 철근이 용접철망과 섬유에 비해 보강비가 6.3배 크게 적용되었으나 철근 ≤ 용접철망 << 섬유의 순으로 나타났으며, 이는 고속충격에 대한 시멘트복합체 내충격성능은 국부적인 보강보다는 매트릭스 전체에 균질한 보강에 효과적이기 때문으로 추측된다.
- 5) 보강재 종류에 따라 콘크리트 구조물의 내충격 방호특성이 차이를 실험적으로 확인하였으며, 변수를 확대한 시험 데이터 축적시 보강재 성능에 대한 추세가 가능할 것으로 판단된다.

요약

본 연구는 현재 늘어나고 있는 수소 충전소 및 ESS 시설 등에서 예상치 못한 사고로 발생할 수 있는 폭발 위험과 이로 인한 구조물 방호 기술의 중요성에 초점을 맞추고 있다. 시멘트 복합체의 보강 방법에 따른 내충격 특성을 평가하여 구조물의 방호 설계를 위한 기초 데이터를 제시하였다. 실험결과 가장 기본적 구조재료인 철근콘크리트는 내충격 성능에 미치는 보강 효과가 무근 콘크리트에 비해 약 20% 향상되는 것으로 나타났으며, 고속충격과 같은 빠른 하중에 대해서는 국부적 보강보다는 섬유와 같이 매트릭스 전체를 보강하는 방법이 효과적인 것으로 확인되었다.


키워드 : 수소충전소, 방호, 고속 충격, 내충격 성능, 보강재


Funding


This work was supported by LOTTE E&C Research & Development Institute grant funded by the LOTTE E&C.


ORCID

Won-Kyun Seok,  <https://orcid.org/0000-0003-3809-2441>

Young-Sun Kim,  <http://orcid.org/0000-0001-8119-2232>

Yae-Chan Lee,  <http://orcid.org/0000-0002-5643-9771>

Jeong-Soo Nam,  <http://orcid.org/0000-0002-9723-5994>

Gyu-Yong Kim,  <http://orcid.org/0000-0002-8662-8899>

References

1. Pyo DY. A study on the safety assessment for fire and explosion in hydrogen handling facility [master's thesis]. [Ulsan (Korea)]: Ulsan University; 2018. 65 p.
2. Hirata H, Yonezawa K, Ono Y, Tabata Y, Hagio H. High-speed collision simulation of flying object and steel wall due to hydrogen tank rupture. Tokyo (Japan): Report of Obayashi Corporation Technical Research Institute; 2021 Dec. p. 1-6. Report No.: 85
3. Lee KK. Recent blast-related research for progressive collapse prevention. Magazine of the Korean Society of Steel Construction. 2005 Dec;17(4):39-45.
4. Kwon SK, Park JC. A review of TNT equivalent method for evaluating explosion energy due to gas explosion. Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering. 2015 Sep;33(3):1-13.
5. Kim YS, Cho HB, Lee SH, Ki JD, Jeon HS, Seok WK. An experimental study on damage and deformation properties by thickness of concrete impacted by high-velocity projectile. Proceedings of the Korea Institute of Building Construction; 2022 Nov 10-11; Busan (Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2022. p. 203-4.
6. Seok WK, Kim GY, Nam JS, Lee YC, Jeon HS, Kim YS. Experimental study on fracture properties with re-bar reinforcement of cement composite subjected to impact of high-velocity projectile. Proceedings of the Korea Institute of Building Construction; 2022 Apr 20-22; Naju (Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2022. p. 220-1.
7. Kim SW, Kwak HK, Park CW, Yoon YS, Kim DJ, Park JI, Park YS, Paer HG, Kim GH, Bae SW, Jung JK. Development of protection and blast resistance structure application technology using high-performance fiber reinforced cement composite materials. Sejong (Korea): Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2019 Jul. 100 p. Report No.: 18SCIP-B128706-02.
8. Nam JS, Kim HS, Lee IC, Miyauchi H, Kim GY. Evaluation on the impact resistant performance of fiber reinforced concrete by high-velocity projectile and contacted explosion. Journal of the Korea Concrete Institute. 2013 Feb;25(1):107-14. <https://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2013.25.1.107>
9. Im JM, Cho MJ. High velocity impact characteristics of laminated composite plates with various fiber angles. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A. 2018 Jun;38(6):589-94.
10. Lee YC, Kim GY, Nam JS, Kim HS, Lee SK. The effect of fiber on the pull-out behavior and tensile performance of FRCC. Journal of the Korea Concrete Institute. 2021 Aug;33(4):411-20. <https://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2021.33.4.411>
11. Han SH, Kim GY, Kim HS, Kim JH, Nam JS. Evaluation on rear fracture reduction and crack properties of cement composites

- with high-velocity projectile impact by fiber types. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2015 Apr;27(2);157-67. <https://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2015.27.2.157>
12. National Defense Research Committee. Summary technical report of division 2: Effects of impact and explosion; WA: National Defense Research Committee; 1946. 512 p.
 13. Choi H, Chung CH, Yoo HK, Kim SY. Effect of reinforcement ratio and impact velocity on local damage of RC slabs. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*. 2011 Aug;31(4A):311-21. <https://doi.org/10.12652/Ksce.2011.31.4A.311>
 14. Ismail AR, Ahmad MAZ, Qadir BAIL, Muhammad YI. Empirical formula prediction on critical impact energy for scabbing phenomena on concrete structures. *Applied Physics Research*. 2010 Nov;2(2);192-97. <https://doi.org/10.5539/apr.v2n2p192>