



고속비상체 충돌 및 접촉폭발에 의한 섬유보강 콘크리트의 내충격 성능 평가

남정수¹⁾ · 김홍섭¹⁾ · 이인철¹⁾ · 미야우치 히로유키¹⁾ · 김규용^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과

Evaluation on the Impact Resistant Performance of Fiber Reinforced Concrete by High-Velocity Projectile and Contacted Explosion

Jeong-Soo Nam,¹⁾ Hong-Seop Kim,¹⁾ In-Cheol Lee,¹⁾ Hiroyuki Miyauchi,¹⁾ and Gyu-Yong Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-742, Korea

ABSTRACT In this study we experimentally evaluated an impact resistant performance of fiber reinforced concrete in the moment of explosion by high-velocity projectile with emulsion explosive. To assess the impact resistance, we conducted the impact test of high-velocity projectile which reaches an impact speed of 350 m/s and the experiment of contact exploding emulsion explosive. As a result, bending and tensile performance depending on type of PVA, PE fiber (polyvinyl alcohol fiber, polyethylene fiber) and steel fiber affects destruction of rear side in the form of spalling. Destroying the backside of the concrete compressive strength compared to suppress the bending and tensile performance is affected. In addition, the experiment shows that the destruction patterns of concrete specimen produced by high velocity impact and contact explosion are significantly similar. Therefore, it is possible to predict the destruction patterns of specimens in the situation of contact explosion by high-velocity projectile.

Keywords : fiber reinforcement, impact resistant performance, high-velocity projectile, explosion, local damage

1. 서 론

콘크리트는 취성적인 특성을 가지고 있으며, 주로 구조물의 압축응력을 부담하는 구조부재의 재료로 사용되고 있다. 이러한 콘크리트의 취성적 특성은 외부의 충격이나 극한 하중을 받을 경우, 국부적으로 파괴되는 원인이 되기 때문에 이를 보완하기 위하여, 콘크리트에 섬유를 혼입하여 휨인장강도 및 변형률을 향상시킨 섬유보강 콘크리트가 등장하였고, 구성재료에 따라 다양한 성능을 가지는 섬유보강 시멘트 복합재료를 개발 적용하고 있다. 이와 같이 콘크리트의 취성적 국부파괴를 저감시키기 위한 내충격 성능에 관한 기존 연구 결과¹⁻³⁾들을 살펴보면, 크게 표면파괴와 배면파괴에 관한 내용을 위주로 충격 조건에 따라 콘크리트 시험체의 손상저감을 위한 연구활동이 이루어지고 있다.

콘크리트 시험체의 충격파괴에 대한 손상저감 메커니즘은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 표면관입깊이는 콘크리트의 압축성능이 큰 영향을 미치며, 배면박리파괴에는

휨인장성능이 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 어떠한 충돌체가 콘크리트 재료에 고속으로 충격력을 가할 경우, 충돌순간에는 시험체의 표면강성 또는 압축강도의 정도에 따라 충격력에 저항하는 정도가 다르게 되며, 정량적인 실험 결과로서 관입깊이에 의해 평가가 가능하다.^{4,5)} 그러나 표면부에서 고속충격에 대한 저항능력이 충분하지 못할 경우에는 시험체 배면부는 박리파괴가 발생하거나 국부적으로 관통파괴된다. 이와 같이 고속충격하중에 대하여 배면부에 발생하는 박리파괴를 저감시키기 위해서는 콘크리트 재료의 휨인장성능을 향상시키는 것이 효과적이라 판단된다.⁶⁾

이에 이 연구에서는 Fig. 2와 같은 압축강도와 인장변형 관계를 가지는 콘크리트 시험체 범위를 대상으로 고속충돌 조건 및 접촉폭발 상황에서 콘크리트 시험체의 배면박리파괴를 저감시키기 위하여 휨인장성능을 향상시킨 섬유혼입률 약 2vol.%의 섬유보강 콘크리트를 섬유종류별로 구별하여, 고속비상체의 충격시험 및 접촉폭발실험을 실시하여 섬유보강 콘크리트의 내충격 성능을 평가하고, 그 결과를 바탕으로 고속비상체의 충돌과 접촉폭발에 의한 콘크리트 재료의 파괴거동 관계에 대하여 검토하고자 하였다.

*Corresponding author E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.kr

Received October 9, 2012, Revised December 14, 2012,

Accepted January 2, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 배합

이 연구에서 사용한 시험체 종류, 콘크리트배합 및 평가항목 등의 실험계획은 Table 1과 같으며, 시험체 종류에 따라 정적 특성평가와 내충격 성능평가를 실시하였다. 콘크리트 시험체는 물결합재비 0.3 및 0.4의 고강도 콘크리트를 사용하였으며, 압축강도에 의한 표면관입깊이의 영향과 일반적인 콘크리트와 섬유보강에 의한 배면박리 파괴 억제효과를 비교검토하기 위한 실험계획으로 설정하였다. 또한, 목표플로우를 만족하는 범위에서 직접인장 성능 평가시 최대응력의 발생 이후 직접인장변형률 2.0% 이상으로 평가된 시험체를 바탕으로 섬유혼입률은 최대 2.0vol.%를 혼입하였다.

2.2 사용재료

사용재료의 물리적 성질은 Table 2에 나타내었다. 섬유혼입률 2.0vol.%의 비빔효율을 향상시키기 위하여 모르

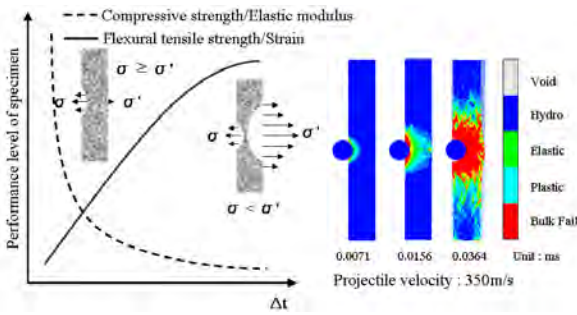


Fig. 1 Impact resistance according to performance level of specimen

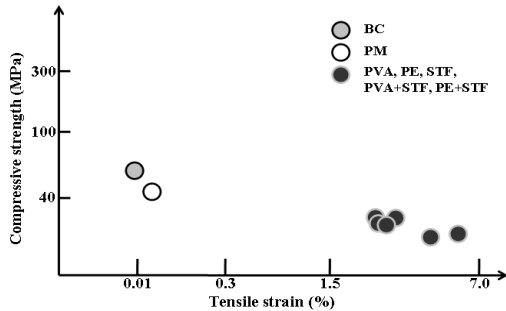


Fig. 2 Performance of cement-based composite materials

Table 1 Experimental plan and mix proportions of concrete

Mix ID ⁽¹⁾	W/B	Unit weight (kg/m ³)								Properties
		Cement	Fly-ash	Water	Agg. coarse	Agg. sand I ⁽²⁾	Agg. sand II ⁽³⁾	Fibers ⁽⁴⁾	SP ⁽⁵⁾	
BC	0.3	533	-	160	948	750	-	-	4.3	<ul style="list-style-type: none"> Compressive strength (MPa) Tensile strength (MPa) Tensile strain (%) Flexural tensile strength (MPa) Impact resistance Blast resistance
BM	0.4	960	169	452	-	-	395	-	0.0	
PVA	0.4	960	169	452	-	-	395	25.5	16.9	
PE	0.4	960	169	452	-	-	395	18.6	22.6	
STF	0.4	960	169	452	-	-	395	153.9	5.6	
PVA+STF	0.4	960	169	452	-	-	395	12.9+77.7	11.3	
PE+STF	0.4	960	169	452	-	-	395	9.4+77.7	16.9	

Note) ⁽¹⁾ BC: base concrete, BM: base mortar, PVA: polyvinyl alcohol, PE: polyethylene, S: steel fiber,

PVA+STF: PVA+steel (ratio 1:1), PE+STF: PE+steel (ratio 1:1)

⁽²⁾ Sea sand, ⁽³⁾ silica sand, ⁽⁴⁾ fiber ratio: 2vol.%

⁽⁵⁾ High range water reducer, setting flow of BC: 550±50 (mm), setting flow of the rest: 170±20 (mm)

Table 2 Physical properties of used material

Material	Physical properties
Cement	OPC, density: 3.15 g/cm ³ , fineness: 3770 cm ² /g
Fly ash	Density: 2.30 g/cm ³ , Fineness: 3228 cm ² /g
Sand	Sea: Density: 2.54 g/cm ³ , absorption: 1.01%
	Silica: Density: 2.64 g/cm ³ , absorption: 0.38%
Agg. coarse	Density: 2.65 g/cm ³ , absorption: 1.39%, 25 mm
Fiber	PVA: Density: 1.30 g/cm ³ , Tensile strength: 1300 MPa, Length: 12 mm, Diameter: 40 μm
	PE: Density: 0.95 g/cm ³ , Tensile strength: 2700 MPa, Length: 15 mm, Diameter: 12 μm
	Steel: Density: 7.85 g/cm ³ , Tensile strength: 1,140 MPa, Length: 50.9 mm, Diameter: 700 μm, Hook type
Super plasticizer	Polycarboxylic acid type

타르 배합의 경우, 잔골재로 7호 규사를 사용하였으며, 사용섬유는 고인성 콘크리트용으로 사용되는 유기섬유 2종 (PVA, PE)과 hook type의 일반 강섬유를 사용하였다.

2.3 시험체 제작 및 시험 방법

시험체 제작은 정적시험과 충격 및 폭발실험을 구분하여 실시하였다. 시험체는 작업성을 고려한 목표슬럼프 및 플로우를 각각 콘크리트의 경우, 슬럼프-플로우 550±50 mm, 모르타르의 경우는 테이블-플로우 170±20 mm로 설정하였으며, 이를 모두 만족하는 범위에서 시험체를 제작하였다.

정적시험의 경우, 압축강도는 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준하여 $\phi 100 \times 200$ mm의 치수로 공시체를 제작하여 평가하였고, 휨인장강도평가는 KS F 2408 「콘크리트의 휨강도 시험방법」에 준하여 4점 휨시험을 실시하였다. 또한 인장성능평가는 시험체 두께 20 mm의 아령형 박판시험체를 제작하여 일축직접인장성능평가 시험장치에 의해 0.15 mm/분의 속도로 재하하여 인장응력과 변형을 평가하였으며, 인장변형은 최대응력의 시점에서의 값을 기록하였다.

이 연구에서 실시한 내충격 성능평가는 Fig. 3에서 나타낸 모식도와 같은 가스압력식 고속 비상체에 의한 충격 시험장치를 사용하였다. 이 시험장치는 최대 약 350 m/s의 속도로 시험체에 충돌이 가능하다. 시험체의 충돌에 사용되는 비상체는 구형의 강재로 직경 4 mm, 질량 0.261 g의 것을 사용하여 내충격 성능평가를 실시하였다.

또한, Fig. 4는 고속비상체가 콘크리트 시험체에 충돌하는 상황을 초고속카메라를 활용하여 촬영한 것으로 충격상황에 따라 시험체의 파괴진행 정도의 관찰이 가능하며, Fig. 5⁷⁾와 같이 시험체의 파괴정도에 따라 표면파괴, 배면파괴 및 관통파괴로 분류하여 각각에 대한 파괴정도

를 정량적으로 산출하였다.

한편, Fig. 6은 폭발실험 모식도 및 폭약설치상황과 폭발전경을 나타낸 것으로 콘크리트 시험체와 지지판(support)은 폭발충격량이 지면으로 흡수되는 것을 최대한 방지하기 위해 비고정 상태로 하였다. 콘크리트 시험체 상면에 폭발열에너지 4605 kJ/kg의 에멀전폭약을 부착시킨 후 너관을 통해 기폭할 수 있도록 하였으며, 폭약은 시험체의 정중앙부분에 설치하였다. 폭약량은 시험체 종류와 관계없이 동일하게 100 g을 사용하였다.

또한, Fig. 7⁸⁾은 접촉폭발에 의한 시험체의 파괴정도를

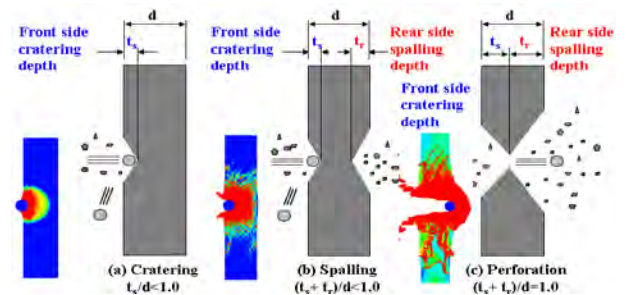


Fig. 5 Example of damage mapping on specimen by impact test

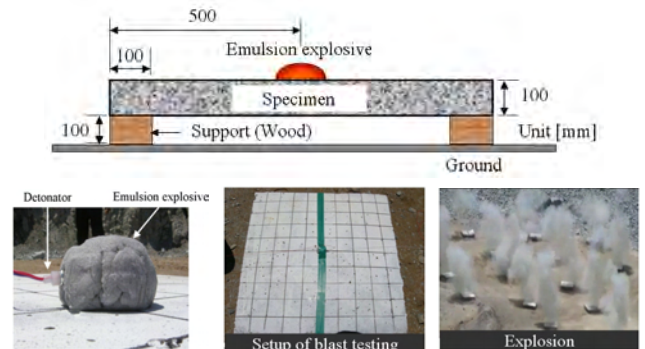


Fig. 6 Setup of blast testing and explosion

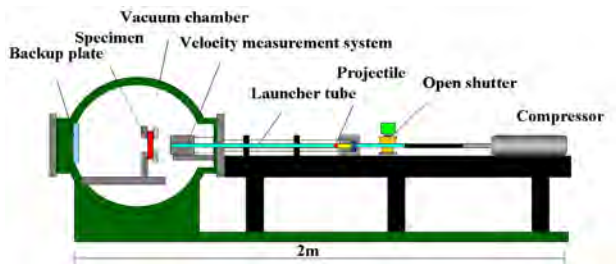


Fig. 3 Schematic graph of the impact test set-up

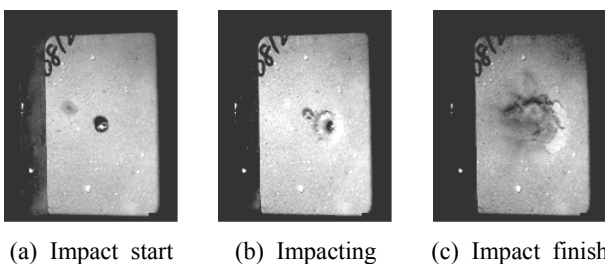


Fig. 4 Impact test shot with a high-speed camera situation

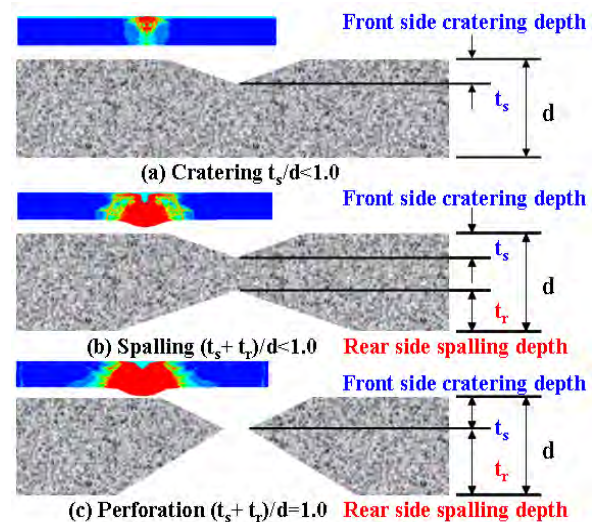


Fig. 7 Example of damage mapping on specimen by blast test

평가하기 위한 산출방법을 나타낸 것으로 기본적인 파괴 패턴 및 표면파괴깊이, 배면박리두께는 고속비상체의 충돌에 의한 파괴정도의 정량적 평가 방법과 동일하게 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 정적시험 평가 결과

3.1.1 압축강도

Table 3은 시험체 종류에 따른 재령 28일에서의 정적 시험 결과를 나타낸 것이다. 압축강도 평가 결과, 고강도 콘크리트 배합인 BC시험체가 가장 높게 나타났으며, 모르타르 시험체의 경우, 섬유를 보강하지 않은 BM시험체가 43.7 MPa로 가장 높게 나타났다. 섬유보강 콘크리트 시험체는 BM시험체에 비해 압축강도가 저하하였으며, 이는 모르타르 시험체에 2.0vol.%의 섬유가 혼입됨에 따

Table 3 Test results of engineering properties

Properties IDs	Ave. compressive strength (MPa)	Ave. tensile strength (MPa)	Ave. tensile strain (%)	Ave. flexural-tensile strength (MPa)
BC	64.3	2.78	0.01	5.87
BM	43.7	1.71	0.05	4.13
PVA	28.5	3.96	6.33	24.66
PE	27.9	3.61	4.01	30.74
STF	34.7	3.92	2.27	33.15
PVA+STF	35.8	6.34	2.12	29.08
PE+STF	36.7	8.88	2.87	29.37

라 골재량이 적은 배합조건에 섬유가 직접적으로 압축강도 발현에 영향을 미친 것으로 판단된다. 강섬유가 혼입된 시험체의 경우는 강섬유 자체의 강성이 작용하여 비교적 압축강도 저하율이 낮은 것으로 사료되며, 모르타르 시험체의 압축강도 최대 및 최소의 차는 15.8 MPa로 나타났다.

3.1.2 직접인장강도 및 직접인장변형률

직접인장성능 평가 결과, 섬유를 보강하지 않은 BM시험체에 비하여 섬유를 보강한 시험체는 섬유종류에 관계없이 보강효과에 의해 약 2~5배 정도 강도가 향상되는 것을 알 수 있었으며, 직접인장변형률에 있어서도 PE시험체의 경우, BM시험체에 비하여 약 127배 이상 변형경화성능을 발휘하는 것으로 나타나 섬유보강에 의해 압축강도는 저하하였지만, 직접인장강도 및 직접인장변형률은 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

3.1.3 휨인장강도

유기섬유 및 강섬유의 보강에 의한 휨인장강도 향상 결과를 확인할 수 있었으며, 섬유 종류에 관계없이 약 25~33 MPa의 범위에서 휨인장강도가 평가되었다. 특히 PVA 및 PE섬유를 혼입한 시험체의 경우, 다수의 미세균열이 발생하여 응력을 분산시키는 능력이 효율적이었으며, 최대 응력시까지 변형경화현상을 나타냈다.

3.2 고속비상체에 의한 내충격 성능평가

3.2.1 시험체 외관 관찰

고속비상체의 충돌 이후, 시험체의 파괴성상을 관찰하기 위해 시험체의 표면(충격면), 배면 및 단면을 스케닝하여 이미지화 하여, Fig. 8에 시험체의 파괴성상 및 파괴

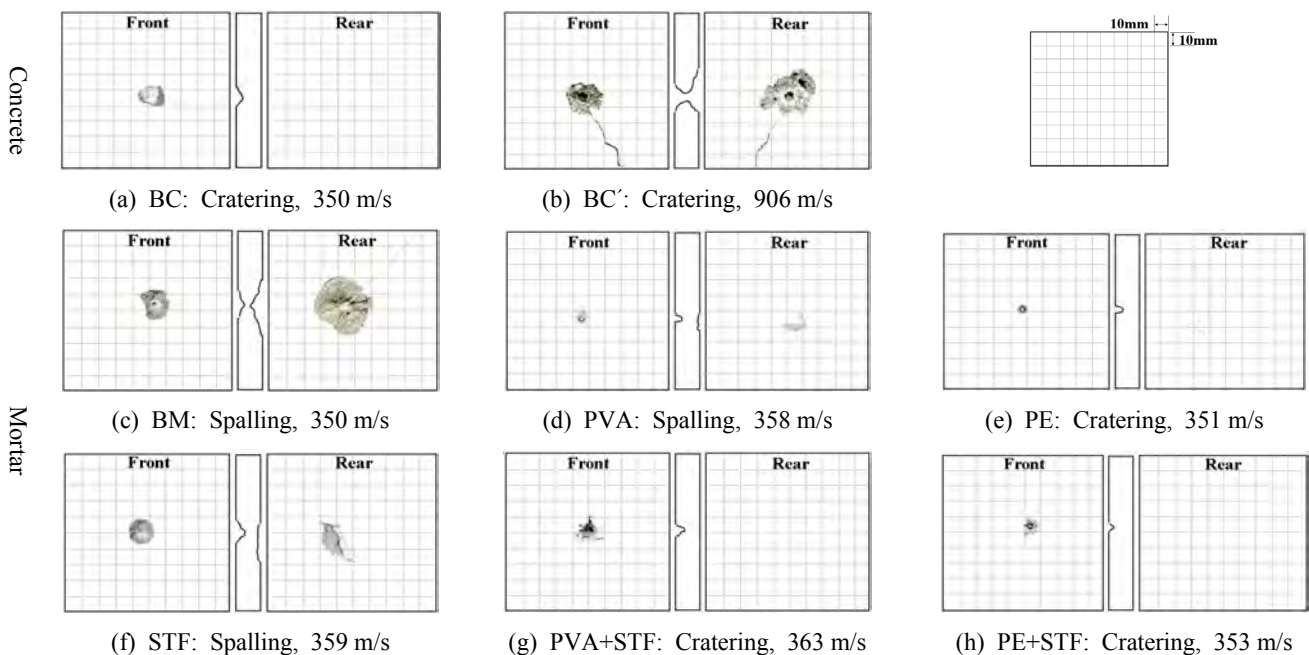


Fig. 8 Damage of specimens with reinforcement type after impact test

등급을 나타내었다. 외관관찰 결과, 시험체 종류에 관계없이 약 350 m/s의 고속충격하중에 의해 표면관입이 발생하였으며, 그 깊이도 유사하게 나타났다. 그러나 배면의 경우, 섬유혼입조건에 따라 배면인장력에 작용하는 영향이 다르기 때문에 배면박리 및 들뜸현상이 발생하는 등 섬유종류 및 보강조건에 따라 파괴등급의 차이를 보였다.

3.2.2 표면관입깊이 및 배면박리파괴 성상

Fig. 9 및 10은 고속비상체의 충돌에 의한 시험체의 파괴성상 결과를 나타낸 것으로 BC시험체의 경우, 충격속도 350 m/s의 범위에서는 배면파괴가 발생하지 않아, 콘크리트의 굵은 골재에 의한 영향을 배제하기 위해서는 충격수준의 증가가 필요할 것으로 판단된다. 반면, 충격속도 906 m/s에서는 관통파괴가 발생하였다. 모르타르 시험체의 경우, 섬유를 보강하지 않은 시험체는 섬유를 보

강한 시험체에 비하여 압축강도가 우수하기 때문에 비상체가 충돌하는 표면의 관입깊이는 다소 저감되었지만, 배면박리깊이 및 파괴면적손실율은 가장 크게 나타났다. 특히 유기섬유(PVA, PE)와 강섬유를 각각 1.0vol.%씩 혼합한 PVA+STF, PE+STF시험체는 배면파괴면적율이 0.0%로 평가되었으며, 강섬유와 유기섬유를 복합화하여 강성 및 인성이 확보되어 내충격 성능이 크게 향상된 것으로 판단된다.⁹⁾

3.3 접촉폭발실험에 의한 내충격 성능평가

3.3.1 시험체 외관 관찰

접촉폭발실험 이후, 시험체의 외관파괴성상 및 파괴등급을 관찰하여 Fig. 11에 나타내었다. 섬유를 보강하지 않은 BC시험체 및 BM시험체의 경우, 배면파괴 및 관통

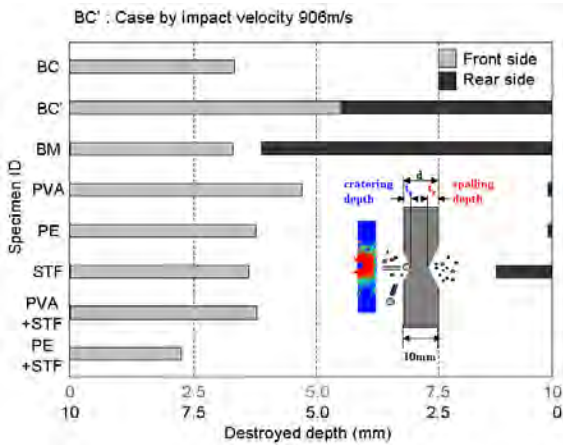


Fig. 9 Destroyed depth of specimens by impact test

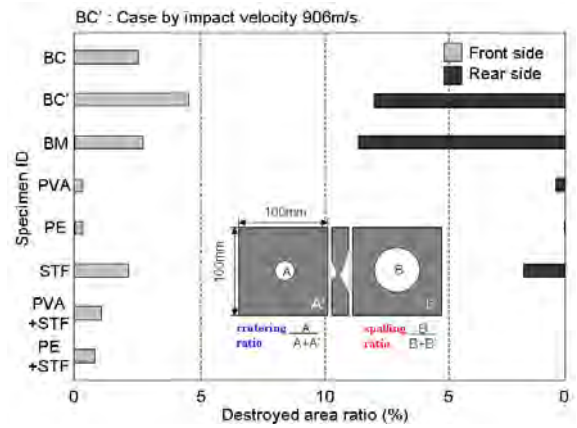


Fig. 10 Destroyed ratio of specimens by impact test

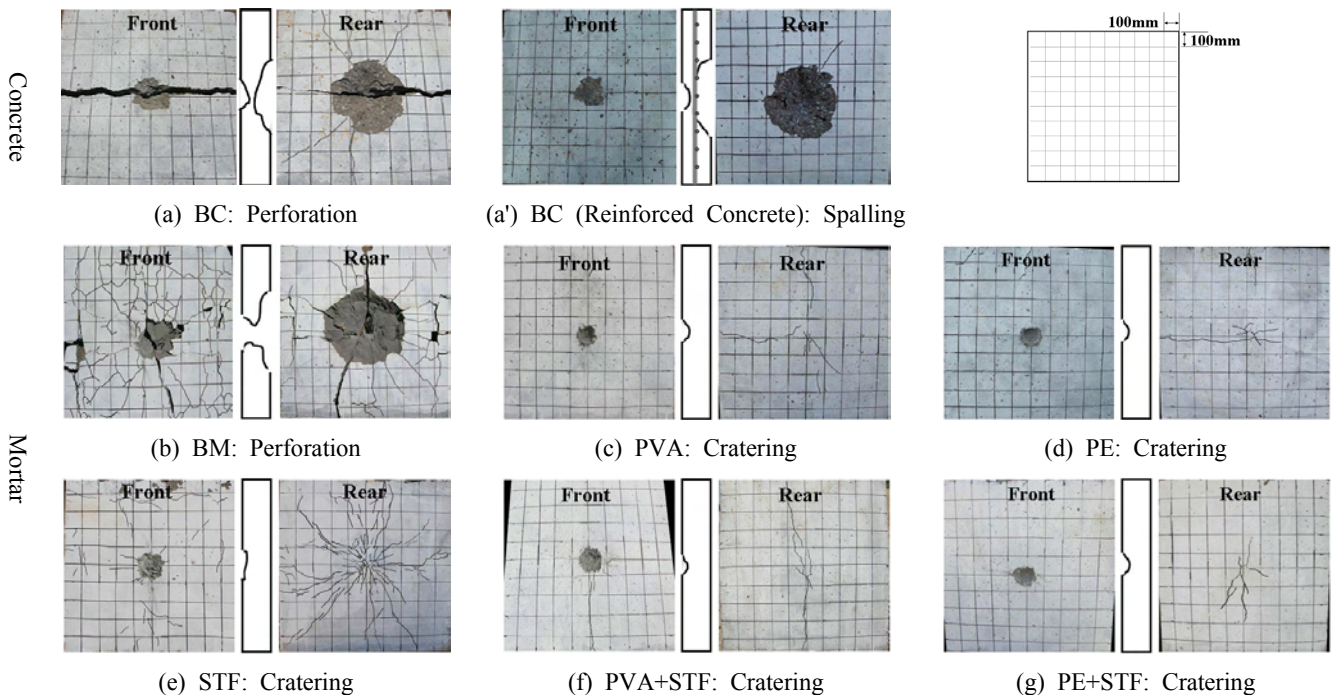


Fig. 11 Damage of specimens with reinforcement type after blast test

파괴가 발생하였다. BC시험체에 있어서 철근을 보강하지 않은 시험체는 절반으로 파단되는 결과가 나타났으며, D10 철근을 100 mm간격으로 단배근한 철근콘크리트시험체는 파단은 발생하지 않았으나 폭발에 의한 배면파괴가 발생하여 철근보강에 의한 내충격 성능 향상효과는 확인할 수 없었다.

한편, 섬유를 단일 및 복합화하여 보강한 시험체의 경우는 배면에 작용하는 인장성능의 차이에 의해 크고 작은 균열이 발생하였으나 박리현상은 발생하지 않았으며, 파괴등급상 표면파괴로 평가되어 양호한 내충격 성능을 확인할 수 있었다.

3.3.2 표면관입깊이 및 배면박리파괴 성상

Fig. 12 및 13은 접촉폭발에 의한 시험체의 파괴성상을 나타낸 것으로 표면파괴깊이는 STF시험체가 가장 작은 것으로 나타났다. STF시험체의 경우, 보강된 강섬유의 자체강성의 작용으로 접촉폭발에 의한 표면파괴를 억제시킨 것으로 판단되며, 관통파괴된 BM시험체를 제외하고 유사한 경향으로 나타났다. 또한, 배면파괴깊이 평가 결과, 섬유를 보강하지 않은 BC, BC(RC), BM시험체는 시험체 두께의 50%이상 파괴가 발생하였다. 특히 철근을 보강한 BC(RC) 시험체의 경우, 시험체 중앙부에 배근된 철근위치 이상에서부터 배면박리가 발생하여 시험체의

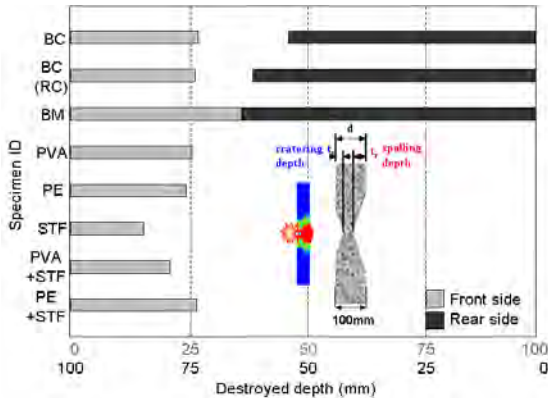


Fig. 12 Destroyed depth of specimens by blast test

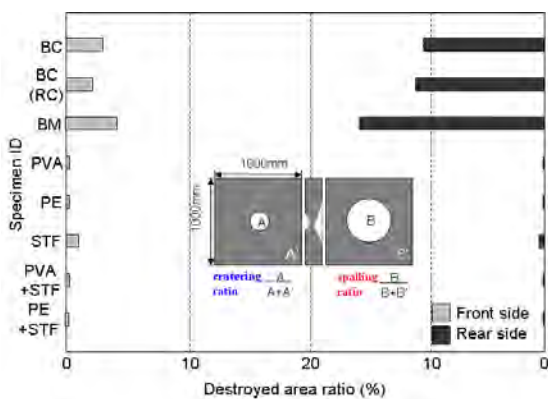


Fig. 13 Destroyed ratio of specimens by blast test

철근이 노출되었으며, 철근보강에 의한 배면파괴억제효과는 확인할 수 없었다. 섬유보강 모르타르 시험체는 보강섬유의 종류에 관계없이 배면에 일부 균열이 발생하는 정도로 접촉폭발에 의한 배면박리는 관찰되지 않았다. 특히 유기섬유를 보강한 시험체는 강섬유에 비하여 섬유의 개체수가 많고, 부착효율이 양호하여 폭발하중 작용 시 모르타르 매트릭스의 균열제어에 매우 효과적인 것으로 나타났다.¹⁰⁾

한편, 파괴면적율의 경우 파괴깊이와 달리 표면파괴에 대해서도 섬유보강에 의한 저감효과를 확인할 수 있었으며, 배면파괴면적은 현저히 저감되는 것으로 나타났다. 또한, 섬유를 보강하지 않은 BC, BC(RC), BM시험체는 표면으로부터 전달되는 폭발충격력을 억제시키지 못하고 표면에 비해 최대 5배 이상의 면적으로 배면파괴가 발생하였으나, 섬유보강 모르타르 시험체의 경우는 섬유 종류에 관계없이 배면에 발생한 균열면적 수준으로 배면파괴를 억제할 수 있었다.

3.4 정적시험 결과와 내충격 성능의 상관성

Fig. 14 및 15는 시험체 종류에 따른 역학특성과 내충격 성능의 관계를 나타낸 것으로 고속충격실험 및 폭발

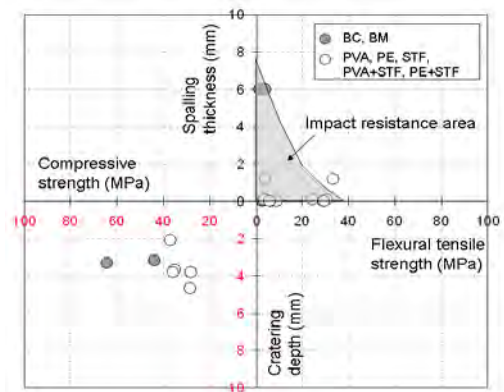


Fig. 14 Correlation between the mechanical properties and impact test results

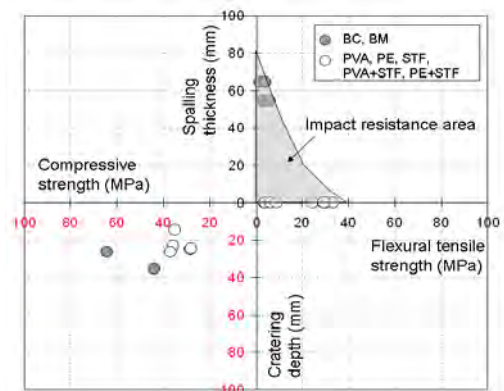


Fig. 15 Correlation between the mechanical properties and blast test results

실험 결과에서 얻어진 상관성을 검토한 것이다. 표면에 전달되는 충격력은 콘크리트 시험체의 압축강도와 관계가 있으며, 시험체 배면파괴 성상은 휨인장강도 및 변형률과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

압축강도 및 휨인장강도가 시험체의 파괴성상에 미치는 영향은 표면관입깊이의 발생 정도에 비하여 배면박리를 억제하는 휨인장강도의 영향이 지배적인 것을 알 수 있었다. 섬유보강에 의한 휨인장성능의 향상은 충격하중 작용 이후, 압축변형에서 인장변형측으로 전달되는 충격력의 소산능력을 증가시키고 이는 시험체 배면의 변형을 제어한 것으로 판단되며, 이상의 결과와 같이 섬유혼입률 2.0vol.%범위에서 내충격 성능의 향상이 가능하였다.

3.5 고속비상체의 충돌과 접촉폭발의 상관성

Fig. 16은 고속비상체의 충돌과 접촉폭발에 의한 시험체 파괴특성의 상관성을 나타낸 것으로 배면파괴 및 관통파괴가 발생한 경우인 PM시험체를 대상으로 시험체 표면에 발생하는 관입깊이 및 관입폭과 배면에 발생하는 박리두께 및 박리폭의 관계를 분석하였다. 그 결과, 고속충돌 및 접촉폭발에 의한 PM시험체의 관입 및 박리폭의 비는 각각 0.51 및 0.54로 나타났으며, 관입깊이와 박리두께비는 각각 0.53 및 0.55로 나타나 고속충돌 및 접촉폭발에 의한 파괴 폭 및 파괴두께는 거의 유사한 비율로 파괴가 발생하는 것을 알 수 있었으며, 파괴폭과 파괴두께비 또한 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것을 확인하였다.

한편, Fig. 17은 Autodyn 프로그램에 의한 고속충돌 및 접촉폭발 상황에 대한 이 연구범위에서의 시뮬레이션 결

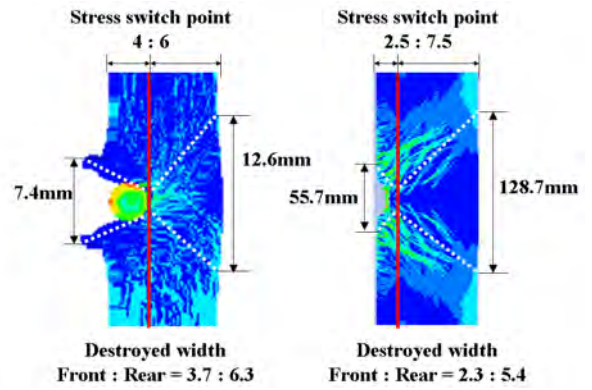


Fig. 17 Correlation between the destroyed properties of impact and blast analysis

과를 나타낸 것으로 표면파괴와 배면파괴 폭비는 고속비상체의 충돌에 의한 내충격 성능 평가 결과에 비하여 접촉폭발에 의한 평가 결과에서 배면파괴 폭이 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 콘크리트 시험체가 고속충돌 및 접촉폭발에 대하여 저항하는 작용응력 위치의 경우, 압축응력에서 인장응력으로 변환되는 시점이 고속비상체의 충돌에 의한 응력작용은 실제 실험 결과와 유사한 경향으로 나타났으나, 접촉폭발 시뮬레이션 결과는 압축측에서 인장측으로 넘어가는 시점이 더 빠른 것으로 나타났다. 이는 실제 실험 결과에서 배면파괴 발생시 그 파괴폭이 고속비상체의 충돌에 의한 결과에 비하여 크게 되는 이유로 판단된다. 표면관입깊이의 경우, 고속비상체의 충돌에 의해 발생하는 관입깊이비가 다소 크게 나타났다. 이는 비상체는 일방향으로 계속적인 충격에너지를 가한 반면, 접촉폭발의 경우, 충격에너지가 공기중으로 일부 소산되기 때문인 것으로 판단된다.

섬유보강에 의해 배면박리가 발생하지 않은 조건을 제외하고 배면박리가 크게 발생한 섬유무보강 시험체의 파괴깊이비와 폭비는 충격 및 폭발조건에서 약 4:6, 3.7:6.3 및 2.5:7.5, 2.3:5.4로 파괴깊이와 폭비의 상관성을 확인할 수 있었다. 또한 시험체 형상 및 치수를 고려한다면, 고속충돌시험에 의한 데이터를 활용하여 접촉폭발시의 시험체 파괴패턴에 대한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

고속비상체 충돌 및 접촉폭발에 의한 섬유보강 콘크리트의 내충격 성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 섬유혼입률 2.0vol.%의 범위에서 섬유종류와 관계 없이 섬유를 보강하지 않은 시험체에 비하여 압축강도는 저하하였지만, 휨인장성능을 향상시킬 수 있었다.
- 2) 고속비상체의 충돌 및 에멀전폭약에 의한 접촉폭발 실험 결과, 섬유혼입률 2.0vol.%의 범위에서 배면박리가 억제되었다.

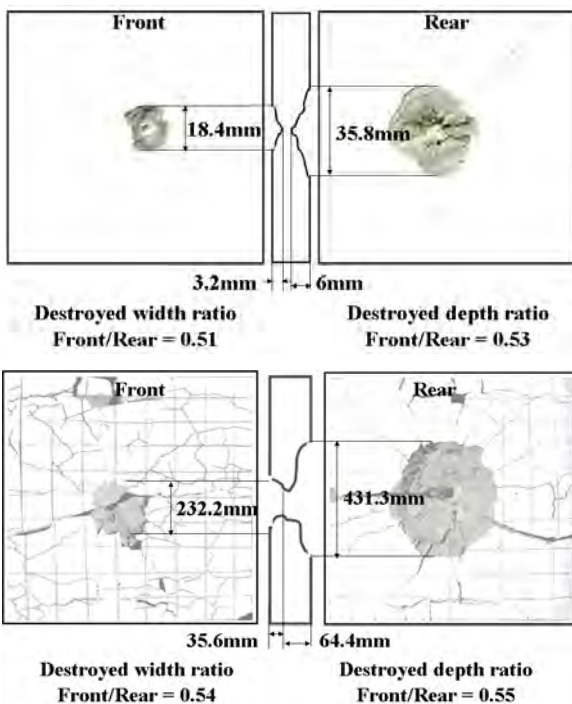


Fig. 16 Correlation between the destroyed properties of impact and blast test results

- 3) 고속충격 및 접촉폭발실험에 의한 콘크리트 시험체의 파괴거동의 경우, 압축강도는 표면관입깊이에 영향을 미치며, 휨인장성능의 증가는 배면파괴억제에 영향을 미치는 것으로 나타나 고속충격 및 접촉폭발실험의 상관성이 높은 것으로 판단된다.
- 4) 고속비상체의 충돌 및 폭약의 접촉폭발에 의해 발생하는 콘크리트 시험체의 파괴폭 및 파괴두께비는 각각 0.51 및 0.54, 0.53 및 0.55로 매우 유사한 패턴으로 파괴가 진행되는 것을 알 수 있었다.
- 5) 시험체 형상 및 치수를 고려한다면, 고속충격시험에 의한 데이터를 활용하여 접촉폭발시의 시험체 파괴패턴에 대한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2010년도 한국연구재단 중견연구자 지원사업(No.2010-0014723)의 지원을 받아 수행된 연구이며, 연구자(의 일부)는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chen, X. W. and Li, Q. M., "Deep Penetration of a Non-Deformable Projectile with Different Geometrical Characteristics," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, 2002, pp. 619-637. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00005-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00005-2))
2. Vossoughi, F., Ostertag, C. P., Monterio, P. J. M., and Johnson, G. C., "Resistance of Concrete Protected by Fabric to Projectile Impact," *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, Issue 1, 2007, pp. 96-106.
3. Yankelevsky, D. Z., "Local Response of Concrete Slabs to Low Velocity Missile Impact," *Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, Issue 4, 1997, pp. 331-343. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0734-743X\(96\)00041-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0734-743X(96)00041-3))

4. 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, Issue 7, 2005, pp. 825-841. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.04.009>)
5. Leppänen, J., "Concrete Subjected to Projectile and Fragment Impacts: Modelling of Crack Softening and Strain Rate Dependency in Tension," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, Issue 11, 2006, pp. 1828-1841. (doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.06.005>)
6. 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, Issue 12, 2008, pp. 1419-1426. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.07.021>)
7. Ohkubo, K., Beppu, M., Ohno, T., and Satoh, K., "Experimental Study on the Effectiveness of Fiber Sheet Reinforcement on the Explosive-Resistant Performance of Concrete Plates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, Issue 12, 2008, pp. 1702-1708. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.07.022>)
8. Li, Q. M. and Tong, D. J., "Perforation Thickness and Ballistic Limit of Concrete Target Subjected to Rigid Projectile Impact," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 129, Issue 9, 2003, pp. 1083-1091. (doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2003)129:9(1083))
9. Kim, Y. W., Min, K. H., Yang, J. M., and Yoon, Y. S., "Flexural and Impact Resisting Performance of HPFRCCs Using Hybrid PVA Fibers," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 6, 2009, pp. 705-712.
10. Kim, H. J., Nam, J. W., Kim, S. B., Kim, J. H., and Byun, K. J., "Analytical Evaluations of the Retrofit Performances of Concrete Wall Structures Subjected to Blast Load," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 2, 2007, pp. 241-250.

요 약 이 연구는 고속비상체의 충돌 및 에멀전 폭약에 의한 폭발조건에서 섬유보강 콘크리트의 내충격 성능을 실험적으로 평가하는 것으로 목적으로 하였으며, 고속 충격시험은 비상체의 충돌속도는 약 350 m/s이며, 폭발실험은 시험체 표면에 폭약을 접촉시킨 상태에서 실시하였다. 그 결과, PVA, PE 및 강섬유의 혼입에 의한 섬유보강 콘크리트 시험체의 휨인장성능 증가는 고속충격 및 접촉폭발에 의한 배면파괴를 억제시켰다. 콘크리트의 내충격 성능에 있어서 배면파괴 억제는 압축강도에 비하여 휨인장성능의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 또한, 고속충돌 및 접촉폭발에 의해 발생하는 콘크리트 시험체의 파괴패턴은 매우 유사한 것을 알 수 있었으며, 고속비상체에 의한 충돌실험을 통해 접촉폭발상황에 대한 시험체의 파괴패턴의 유추가 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 섬유보강, 내충격 성능, 고속 비상체, 폭발, 국부손상