

고속 비상체 충돌에 대한 고성능 섬유보강 시멘트 복합체의 방호성능 평가

문재흠¹, 박정준^{1*}, 박기준¹, 조현우¹, 김성욱¹, 이장화¹
¹한국건설기술연구원 구조융합연구소

Evaluation of impact resistance of high performance fiber reinforced cementitious composites under high-speed projectile crash

Jae-Heum Moon¹, Jung-Jun Park^{1*}, Gi-Joon Park¹, Hyun-Woo Cho¹,
Sung-Wook Kim¹, Jang-Hwa Lee¹

¹Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 공공시설물의 대형화 및 도심지로의 인구 밀집화에 따라 충돌 또는 폭발과 같은 하중조건 하에서의 구조물 방호성능의 중요성이 대두되고 있다. 그러나, 구조물의 방호설계 및 시공에 있어서 필수적이라 할 수 있는 구조재료 또는 자재에 대한 기술개발은 제대로 이루어지고 있지 않은 실정이다. 이에, 본 연구에서는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료의 기본적인 방호성능 및 방호용 자재로서의 적용 가능성을 파악하고자 40 mm 가스건을 사용한 충격 파괴시험을 수행하였다. 실험 수행 결과, 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료에 있어서 시멘트 매트릭스의 강도 및 보강섬유가 방호성능 향상에 도움이 됨을 확인할 수 있었다.

Abstract The importance of public infrastructures' protection against crash or blast loads has been emerging issue as structures are becoming bigger and population densities in downtown cities are growing up. However, there exists no sufficient study which considers the developments of protective building materials, that are essential for protective design and construction. To assess the protection performance and the applicability as protective materials of high performance fiber reinforced cementitious composites(HPFRCC), this study performed the impact tests with 40 mm gas-gun propelled projectile crash machine. From this study, it has observed that both high compressive strength of cement matrix and fiber reinforcement are beneficial for the improvement of impact resistance.

Keywords : Impact resistance, HPFRCC, Projectile crash, Protection, Gas-gun

1. 서론

콘크리트는 경제성이 우수하여 오랫동안 현대사회의 인프라를 구축한 주요 건설재료로 이용되어 지고 있다 [1]. 한편, 최근 주요 도심으로의 인구 밀집화와 건축물 및 시설물의 대형화 추세와 함께, 충돌 및 폭발과 관련된 사고 혹은 테러에 대한 콘크리트 구조물의 안전성 확보

문제가 전 세계적으로 대두되고 있다[2].

특히, 이러한 예기치 못한 사고로 인하여 콘크리트 구조물은 비산물에 의한 충격이나 순간적인 폭발하중 등에 의한 저항을 받게 되는 경우가 생긴다. 이러한 경우 정적인 상태에서의 거동과 다른 국부적인 파괴거동현상이 나타나게 된다. 취성재료인 콘크리트의 외부 비상체에 의한 충격파괴거동은 Fig. 1에서와 같이 충격접촉면에서

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호·방폭 연구단(과제번호 : 13건설연구SO2) 방호·방폭용 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료 및 성능평가 기술 개발의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Jung-Jun Park (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-9100-105 email: jjpark@kict.re.kr

Received May 28, 2015

Revised July 2, 2015

Accepted July 16, 2015

Published July 31, 2015

벽면관입(Penetration)이 발생하면서 콘크리트 배면에 휨변형(Bending Deflection)과 함께 전단 및 인장충격과가 전달된다. 만일 충격력이 클 경우, 콘크리트 전면에서 스포링(Spalling) 현상과 배면부위의 스캐빙(Scabbing)이 발생하거나 더 심할 경우에 있어서는 벽면관입(Perforation)이 발생하는 것으로 알려져 있다[3,4].

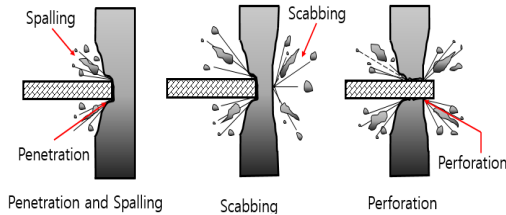


Fig. 1. Concrete failure pattern by impact

그러므로 안전성이 높게 요구되는 구조물에 있어서는 비산물에 의한 충격이나 순간적인 폭발하중 등에 충분히 저항할 수 있는 구조물의 설계 또는 재료의 사용이 필요하다. 재료적인 측면에서 시멘트 복합체에 섬유를 보강함으로써, 콘크리트를 고인성 재료화 하여 사용하는 것도 하나의 방법이 될 수 있다. 콘크리트 분야에 있어서 고인성 재료화 연구로는 압축강도가 현저히 높으면서도 연성거동을 갖는 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite, 이하 HPFRCC)를 들 수 있다. HPFRCC는 일반적인 콘크리트에 비해 물-결합재비(W/B)가 상당히 낮고 굵은 골재를 사용하지 않으며, 고분말의 혼화재료를 혼입하고 강섬유를 사용하기 때문에 내구성과 연성이 우수하고 강도발현이 뛰어나다[5]. 이러한 HPFRCC는 일반적인 정적하중에 대응하는 구조부재에 있어서, 동일 하중에 대응할 수 있는 부재의 단면을 감소시켜 자중을 크게 줄일 수 있기 때문에 그 중요성이 증대되고 있다 [6,7,8]. 마찬가지로, 방호부재의 적용에 있어서도 HPFRCC를 사용함으로써 부재의 치수 증가를 최소화 하면서 부재 자체의 방호성능을 향상시킬 수 있는 방안이 될 수 있다.

이에 본 연구에서는 100 MPa 및 180 MPa 압축강도

수준을 갖는 강섬유를 사용한 HPFRCC의 충격하중에 대한 방호성능을 평가하고자 하였다. 먼저 압축강도에 따른 휨거동특성을 포함한 정적 역학 특성을 평가하고 40 mm Gas-gun 장비를 활용하여 비상체 충격에 대한 강도대별 HPFRCC 자재의 파괴거동에 대해 평가하였다.

2. 실험방법 및 내용

2.1 사용재료 및 시험체 제작 방법

본 실험에는 1종 포틀랜드 시멘트 및 입경 0.5 mm 이하의 잔골재, 98%의 SiO₂를 포함한 충전재(Filler), 노르웨이산 실리카폼(SF), 국내산 플라이애시(class F), 1.06 g/cm³의 밀도를 가진 폴리칼본산계 고성능감수제를 사용하였다. 배합에 사용된 재료들의 화학적 구성성분은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical properties of materials

Composition % (mass)	Cement	Silica fume(SF)	Fly-ash (FA)
CaO	61.33	0.38	-
Al ₂ O ₃	6.40	0.25	16.60
SiO ₂	21.01	96.00	3.80
Fe ₂ O ₃	3.12	0.12	5.58
MgO	3.02	0.10	0.82
SO ₃	2.30	-	0.51
Specific surface (cm ² /g)	3,413	200,000	3,117
Loss ignition (%)	1.40	1.50	3.82
Density (g/cm ³)	3.15	2.10	2.98

Table 2. Properties of steel fiber

Type of fiber	Density (kg/cm ³)	Tensile strength (MPa)	l_f ¹⁾ (mm)	l_f/d_f ²⁾ (mm/mm)
Straight fiber	7.8	2,500	13	65

Note, 1) l_f : length of fiber, 2) d_f : diameter of fiber

압축강도에 따른 HPFRCC의 특성을 파악하기 위해 압축강도 100 MPa 및 180 MPa 수준을 발현할 수 있도록

Table 3. Mix proportions of HPFRCC (ratio in weight)

Nomenclature	W/B	Cement	SF	FA	Filler	Sand	Superplasticizer	Steel fiber	Flow [mm]
HPF 180	0.2	1	0.25	0	0.30 (4 μm)	1.10	0.02	V _f ¹⁾ =2%	220
HPF 100	0.3	1	0.1	0.2	0.30 (14 μm)	1.20	0.005	V _f =2%	245

Note, V_f = Volume fraction of fiber

록 물-결합재비를 변화시키고, 사용되는 충전재와 모래를 변경시켜 제조하였다. 먼저 180 MPa 배합에서는 물-결합재비(W/B)를 20 %로 하고 사용된 재료중 모래는 호주산 모래(SiO₂ 98 %)와 평균입경 4 μm인 충전재를 사용하였다. 100 MPa는 물-결합재비(W/B)를 30 %로 증가시키고 국내산 모래(SiO₂ 90 %), 평균입경 14 μm인 충전재를 사용하여 압축강도를 낮게 하였다. 또한 HPRCC의 인성을 향상시키기 위하여 전체 부피의 2 %에 해당하는 강섬유를 혼입하였고 물리적 성질은 Table 2와 같다

이들 재료를 제외한 나머지 사용된 재료는 모든 배합에서 동일하며 시험체 제작에 사용된 배합표를 Table 3에 나타내었다.

HPRCC를 배합하기 위하여 사용된 믹서는 120리터 용량을 지니고 100 rpm의 속도를 발휘할 수 있는 팬타입의 실험실 믹서를 사용하여 제조하였다.

배합된 HPRCC는 자기충전(self-leveling)이 될 정도의 유동성을 나타내기 때문에 별도의 다짐작업 없이 시험체를 제작하였다. 제작된 시험체는 온도 20℃, 상대습도 65%가 되는 조건에서 습윤양생을 1일간 실시한 후 공시체를 탈형한 뒤, 온도 90 ± 2℃의 고온증기양생 72시간 동안 실시한 후 20℃에서 상대습도 65% 유지된 상태에서 3일간 양생 후 시험평가를 실시하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 유동성 및 압축강도 실험

굳지 않은 HPRCC의 유동성을 평가하기 위하여, 플로우 테스트(flow table test)를 KS L 5105에서 제시된 시험기구를 이용하여 플로우치로 측정하였다. 압축강도(KS F 2405)는 φ 100 x 200 mm인 원주형 공시체를 변수별로 제작하고 최대용량 3,000 kN의 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 Fig. 2와 같이 측정하였다. 또한 120° 간격으로 총 3개의 LVDT를 설치하여 하중재하에 따른 변위를 측정하였고 이를 토대로 HPRCC의 탄성계수를 KS F 2438에서 제시한 식으로 계산하였다.

2.2.2 휨인장강도

휨인장강도는 Fig. 3과 같이 KS F 2566에 따라 100×100×400 mm 크기의 직육면체 시편을 사용하여 4점 휨실험(four point bending test)을 수행하였다. 이 실험

에서는 최대하중용량 200 kN를 갖는 UTM을 사용하였으며, 시험체 3개에 대한 평균값을 강도측정값으로 사용하였다.

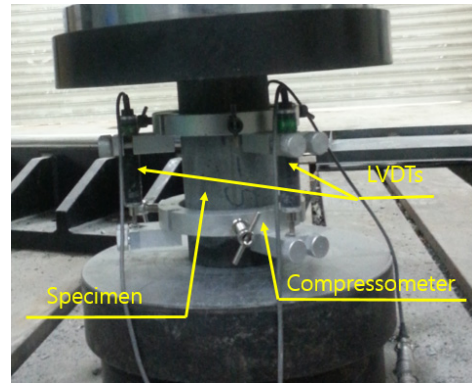


Fig. 2. Test Method for Compressive Strength

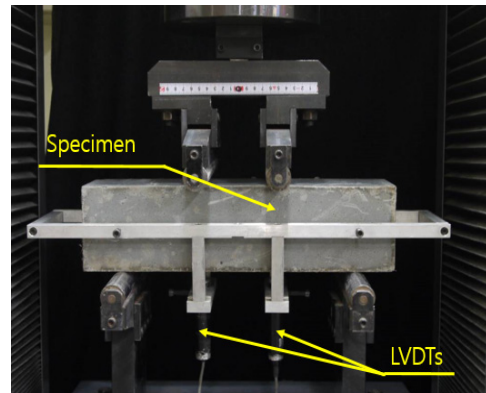


Fig. 3. Test Method for Flexural Tensile Strength

2.2.3 섬유인발강도

HPRCC 강도수준에 따른 straight 강섬유의 부착거동 특성을 파악하기 위하여 단일섬유 인발시험을 Fig. 4와 같이 수행하였다[9]. 등가 부착강도는 섬유의 물힘길이 전체에서 부착강도의 크기가 동일한 마찰에 의한 부착강도만 있다는 가정하에 계산되는데 본 연구에서는 강섬유(φ = 0.2 mm / L = 13 mm) 길이의 절반 물힘길이(embedded length) (L_f = 6.5 mm)를 갖도록 하였다.

또한, 섬유 고정 장치와 시험체 상단 사이의 간격을 최소화하여 강섬유의 신장에 의한 영향을 감소시키는 방식으로 시험을 수행하였다. 변위 측정을 위한 LVDT는 하중이 적용하는 방향과 정확히 수직이 되도록 맞추고,

시험의 진행속도는 1 mm/min으로 고정하였다. 인발 시험을 통하여 섬유와 등가 부착강도(equivalent bond strength(τ_{eq}))를 구하였으며, 식[1]에 의해 계산하였다[9].

$$\tau_{eq} = \frac{8 \times Pullout\ Work}{\pi d_f L_f^2} \quad [1]$$

여기서, τ_{eq} 는 등가 부착강도, *Pullout Work*는 섬유의 인발시 소요되는 총 인발 에너지로 하중과 미끄럼(Slip)에 대한 면적, d_f 는 섬유의 직경, L_f 는 섬유의 매입길이이다.

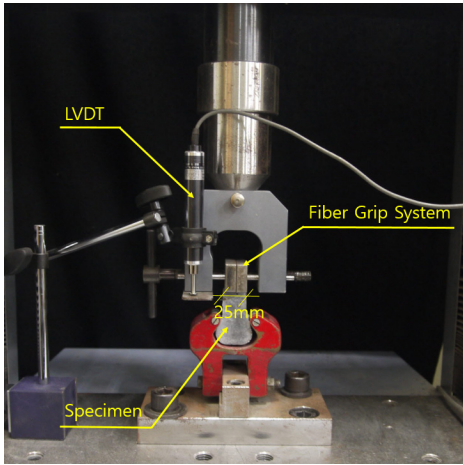


Fig. 4. Single Fiber pullout specimen and setup

2.2.4 비상체 고속충격 파괴시험

고속충격 파괴시험은 Fig. 5와 같이 내경 40 mm Taylor 타입 Gas-gun 발사체 장비를 사용하였다. 해당 Gas-gun은 50~3,000 g의 발사체에 대하여 50~480 m/s 속도의 고속 충격 시험이 가능한 장비로 국내 대전 소재 국방과학연구소(Agency for Defense Development, ADD)가 보유중인 장비를 활용하였다.

본 실험에서 사용한 발사체는 Fig. 6과 같이 직경 36 mm, 두께 15 mm, 중량 125 g의 원통형 알루미늄계 탄도이다. 외부는 폴리프로필렌(PP)계 슬리브가 감싸고 있는 형태이고 발사 후 슬리브가 분리되면서 알루미늄계 탄도가 구조체에 충격하중을 가하는 방식이다. 이 실험에서는 점(point) 충격하중이 아닌 면(area) 충격하중을 모사하기 위하여 전면부가 편평한 탄도를 적용하여 실험을 진행하였으며, 발사체 속도는 200m/s를 적용하였다.

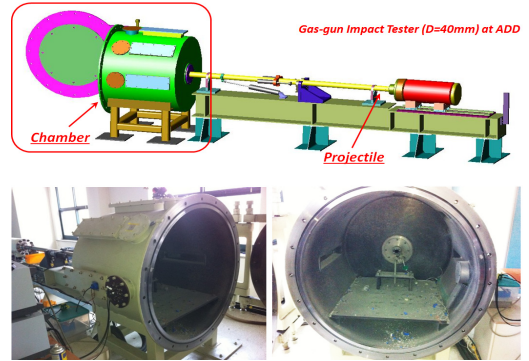


Fig. 5. Gas-gun equipment



Fig. 6. Projectile for impact test

한편, 시험체가 거치되는 챔버 내부는 시험 수행 시 충격파에 의한 챔버 내부 공기압 간섭 방지 및 충격 파괴 시 발생하는 소음 저감을 위하여 진공펌프를 이용하여 0.5기압 수준의 진공상태를 유지하도록 하였다.

Gas-Gun에 의한 충격 파괴시험을 위하여 강도별로 300×300 mm 단면에 두께 50 mm인 슬래브 타입의 시험체를 준비하였다. 한편, 충격하중 방향으로 시험체를 완전히 구속할 수 있도록 20 mm 두께의 MC45C 강판으로 지지구조물을 설계·제작하였으며, 지지구조물 및 시험체 거치 후 모습을 Fig. 7에 나타내었다.

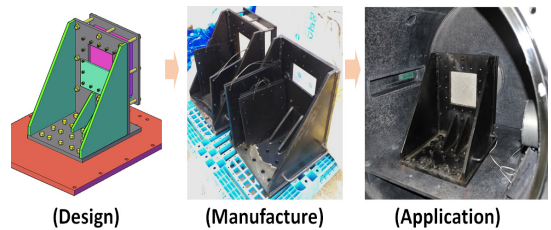


Fig. 7. Rigid steel frame for impact test

한편, 충격 파괴수행시의 계측에 있어서는 시험체 배

면에 정적 실험에 사용되는 콘크리트용 변형률계이지 (Showa사 PFL-20-11-1L)와 스프링 복귀방식의 변위계 (LVDT, KTR series 50) 및 가속도계(PCB사 350B50, 최대 10,000 g)를 부착하였으며, 다음 그림은 각 계측기의 설치 위치를 보여주고 있다.

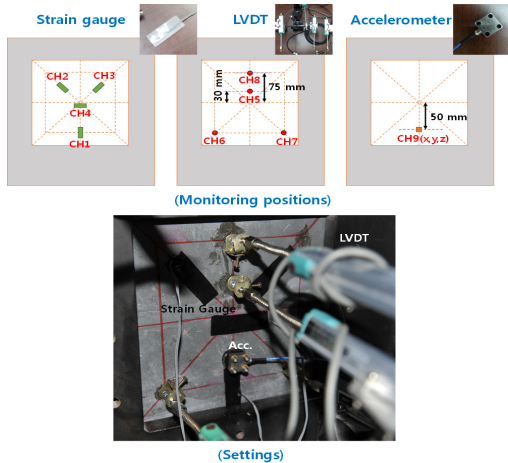


Fig. 8. Monitoring systems for impact test

LVDT의 거치에 있어서는 단순 집지방식으로 거치할 경우, 순간 충격파에 의해 LVDT가 시험체로부터 분리되어 실제 시험체에 발생되는 변위보다 더 크게 거동할 수 있기 때문에, LVDT의 끝단을 Fig. 8에 보이는 바와 같이 시험체에 완전히 고정하는 방식으로 거치하였다.

각 계측기는 시험챔버 외부의 DAQ 시스템으로 연결하였으며, 사용된 DAQ 장비는 IMC사의 CRONOS Flex 400-I 모델로서, 실험 수행 시 데이터 샘플링 속도는 50 kHz를 적용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 HPCRCC의 정적특성

3.1.1 압축특성

각 배합별 유동성 시험결과는 Table 3에 나타난 바와 같다. HPF 100 배합은 HPF 180 배합에 비해 물-결합제비가 높기 때문에 상대적으로 물의 사용량이 많아져 적은 SP의 사용량에도 유동성이 향상되었다.

압축강도와 탄성계수는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 HPF 180은 197.8 MPa, 47.1 GPa, HPF 100은 110.6

MPa, 35.9 GPa를 각각 나타내었고 HPCRCC의 압축강도가 낮아짐에 따라 탄성계수도 낮아지는 경향을 나타내었다.

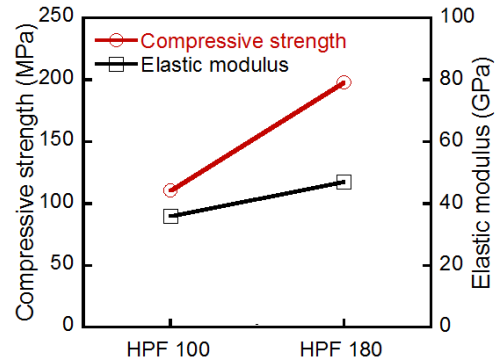


Fig. 9. Compressive strength and elastic modulus of HPCRCC

3.1.2 휨인장강도

HPCRCC는 강섬유를 혼입하였기 때문에 일반 콘크리트에 비해 우수한 변형률 경화거동을 보이고 인성이 향상된 모습을 나타낸다[5]. 본 실험에서 HPF 100의 휨인장강도는 Fig. 10과 같이 20.7 MPa, HPF 180은 32.7 MPa로 나타났다. 두 배합 모두 동일한 강섬유 혼입율을 갖는 배합임에도 휨인장 강도가 다른 이유는 HPF 180에 비해 압축강도가 낮은 HPF 100의 경우 휨강도 실험 시 시멘트 매트릭스의 초기균열강도가 낮기 때문에 균열 이후 섬유에 의한 변형률 강화현상이 나타나더라도 최종 휨강도 값은 낮아지는 것으로 판단된다.

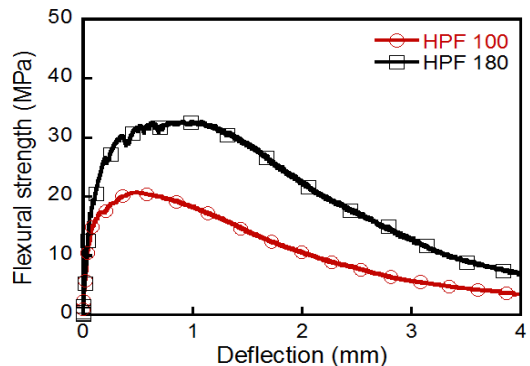


Fig. 10. Flexural tensile strength of HPCRCC

3.1.3 인발거동

압축강도 따른 HPFRCC의 매트릭스에 매입된 straight steel fiber의 인발거동을 Fig. 11에 나타내었다. 이 값은 각각 조건별로 시험체 10개를 실험한 평균값이다.

HPF 100의 최대 인발하중은 28.9 N이며, 이때의 등가 부착강도(τ_{eq})는 약 6.7 MPa로 나타났다(table 4 참조). 반면 HPF 180의 최대 인장하중은 44.9 N으로 HPF 100에 비해 약 55% 증가하였으며, 등가 부착강도는 9.7 MPa로 약 45% 증가한 것으로 나타났다. 이것은 HPFRCC 매트릭스 압축강도 수준이 증가함에 따라 인발 저항성능이 증가한다는 것을 의미한다. 또한 두 배합 조건에서 초기 인발하중은 크게 차이가 나고 있지만 섬유 길이 증가할수록 그 차이는 감소하여 점점 비슷한 거동을 보이고 있다. 이것은 직선형 강섬유의 표면이 매끈한 면을 갖기 때문에 인발저항시 형상에 따른 물리적 저항이 존재하지 않고, 오로지 면에서 작용하는 마찰 저항만이 존재한다는 기존연구 [9]와 동일한 경향을 나타내었다.

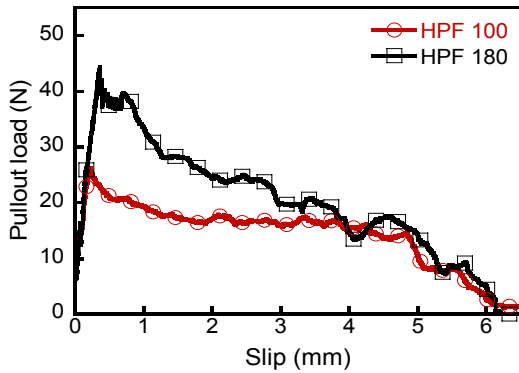


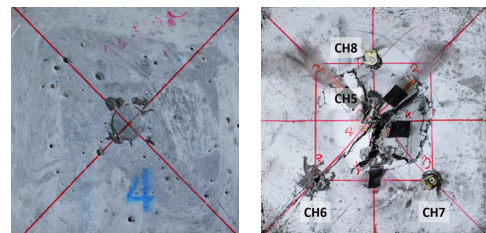
Fig. 11. Pullout behavior of straight steel fiber embedded in HPFRCC matrix

3.2 HPFRCC의 충격 파괴시험

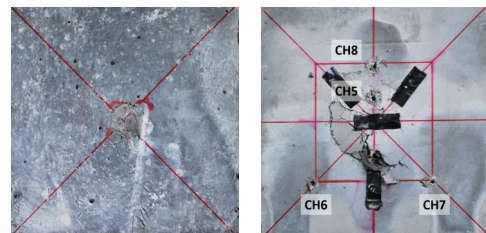
3.2.1 육안 분석 결과

Fig. 12 및 Fig. 13은 충격 파괴시험 후 각 시험체에

발생된 파괴형상으로서, HPF 100 시험체와 HPF 180 시험체 모두 전면부 중앙에 발사체로 인한 관입부 발생 및 배면 중앙부의 균열파괴 및 Swelling 현상이 발생하였으나, 관통파괴 및 Scabbing 현상은 발생하지 않았다. Scabbing이 발생하지 않은 가장 큰 이유는 각 시험체에 함유된 강섬유 보강효과로 판단되며, 보강섬유는 일반적인 정적 파괴 뿐 만 아니라, 충격에 의한 동적 파괴거동에 있어서도 저항력을 높이는데 매우 유효한 기능을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한, 배면부에 발생한 Swelling 정도는 HPF 100 시험체는 22.26 mm, HPF 180 시험체는 9.16mm로서, HPF 180 시험체가 2배 이상의 균열파괴 변위 거동을 가졌음을 확인하였다.

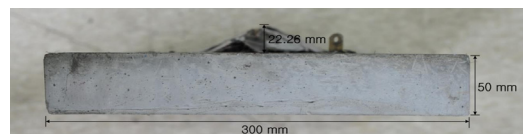


(a) HPF 100



(b) HPF 180

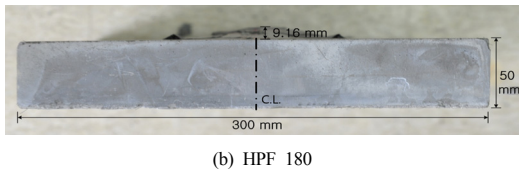
Fig. 12. Failure characteristics of HPFRCC (Left: front, Right: Rear)



(a) HPF 100

Table 4. Summary of the Single fiber pullout behavior test of HPFRCC

Nomenclature	Slip at max. pullout load (mm)	Max. pullout load (N)	Max. pullout stress (MPa)	Pullout energy (N-mm)	τ_{eq} (MPa)
HPF 100	0.14	28.9	918.8	88.9	6.7
HPF 180	0.29	44.9	1429.8	129.2	9.7

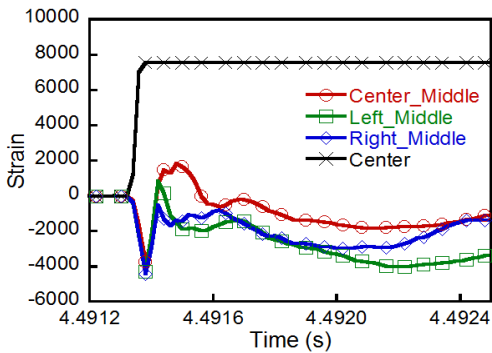


(b) HPF 180

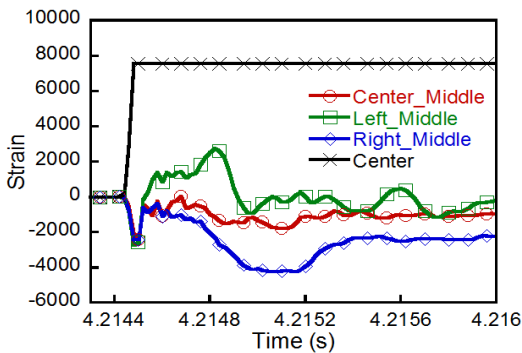
Fig. 13. Permanent deformation after impact failure (Rear side)

3.2.2 스트레인게이지 측정 결과

Fig. 14는 비상체 충격에 의해 각 시험체 배면에서 측정된 초기 변형률 거동을 보이고 있다. 그래프에서 보이는 바와 같이, 시험체 배면 중앙부에 위치한 변형률센서는 충격 직후에 발생한 배면 균열파괴의 영향으로 스트레인게이지가 인장 파손되어 측정이 이루어지지 않았음을 확인할 수 있었다.



(a) HPF 100



(b) HPF 180

Fig. 14. Initial strains on the rear side

한편, 시험체 배면 정중앙부가 아닌 주변에 부착시킨 스트레인게이지에서는 초기 충격하중 발생 시 압축변형률이 발생하였음을 알 수 있으며, 이는 배면 중앙부의 균

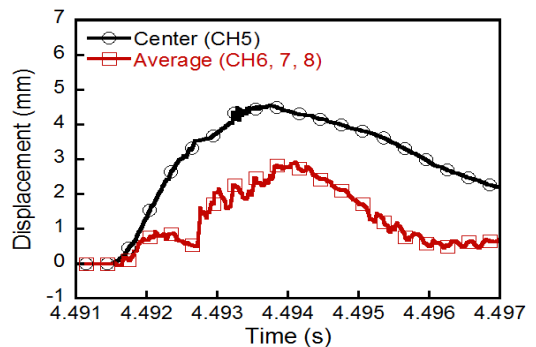
열 swelling 파괴에 의해, 주변부에는 압축력이 작용하였기 때문으로 판단된다. 이러한 압축변형률에 있어서 HPF 100은 평균 약 4,500 수준의 최대 압축변형률이 발생한 후, 후속거동이 발생한 반면, HPF 180의 경우는 HPF의 66% 수준인 약 3,000 수준의 최대 변형률이 발생하였다. 이는, 시험수행 후 육안검사에서 확인한 바와 같이, HPF 100의 균열파괴 규모가 HPF 180보다 더 크게 발생하였기 때문이다.

또한, 변형률 측정결과에서 보이는 바와 같이, 각 시험체에 있어서 배면 정 중앙부를 제외하고는 최대 압축 변형률 발생 후, 변형률이 복귀되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 순간 충격력에 의한 최대변형률 발생 후 일부 탄성회복 및 진동 거동을 가졌음을 알 수 있었다. 이러한 탄성회복 거동에는 시험체에 포함된 강섬유가 일정 이상의 영향을 미쳤으리라 판단되며, 보다 추가적인 연구가 필요한 부분이라고 사료된다.

3.2.3 변위계 (LVDT) 측정 결과

Fig. 14는 시험체 배면에서 측정된 각 지점별 초기 발생변위를 보이고 있다. 그래프에서 보이는 바와 같이, 초기 충격하중에 의한 최대변위 발생 후 변위회복 거동을 가짐을 확인할 수 있었다.

그러나, Fig. 12 및 Fig. 13에서 육안으로 확인한 각 시험체별 발생 최대변위와 시험체 배면 중앙부 LVDT의 측정 결과와는 다른값을 보였다. 이는 충격하중에 의해 시험체 배면 중앙부에서 균열파괴가 불규칙하게 발생하였기 때문에 배면 중앙 파괴부위에 위치한 LVDT의 측정값이 대표성을 가지기 어렵기 때문이었다. 이러한 이유로 Fig. 15에 보이는 바와 같이 HPF 100의 중앙부 LVDT 측정 최대변위값이 HPF 180보다 낮게 측정된 결과를 보여주고 있다.



(a) HPF 100

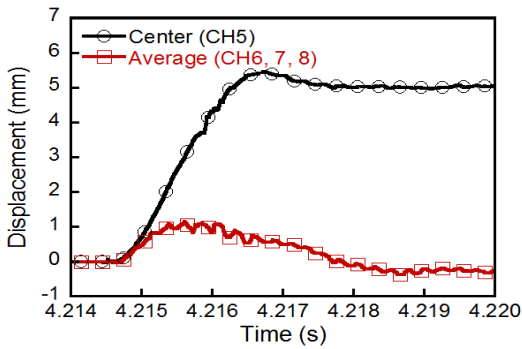


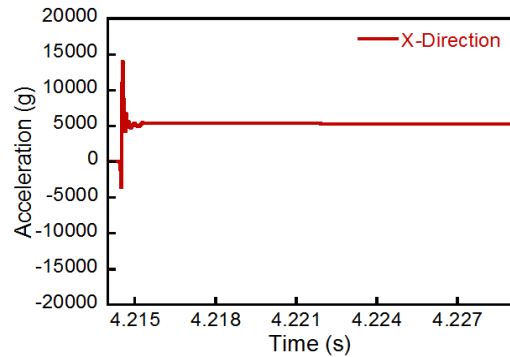
Fig. 15. Initial failure displacement on the rear side (Load direction)

이에 반하여, 시험체 중앙 균열파괴부위 외측에 존재한 LVDT에서 계측된 결과는 보다 신뢰할 수 있는 값을 제시하였다. 즉, Fig. 15의 (a) 및 (b)에서 보이고 있는 시험체 중앙 외측 LVDT 평균치를 볼 때, HPF 100 시험체는 최대 약 3 mm의 변위 발생 후, 탄성회복 거동을 가짐을 확인하였으며, HPF 180 시험체는 약 1 mm의 최대변위를 보여주었다. 또한, HPF 100 시험체는 HPF 180 시험체와 비교할 때, 보다 큰 배면 중앙부 파괴면적을 가짐과 동시에, 중앙 외측으로의 균열이 발생하였기 때문에 HPF 180의 경우보다 불규칙한 변위증가 및 탄성회복 거동을 보였음을 알 수 있었다.

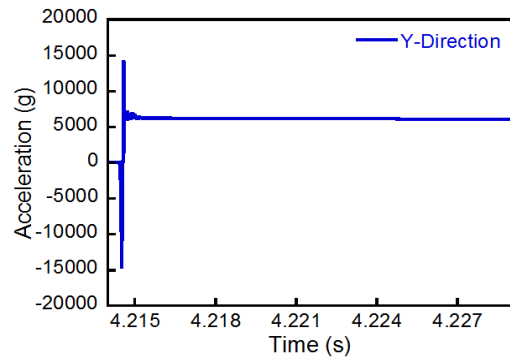
3.2.4 가속도 계측 결과

본 연구에서는 최대 10,000 g까지 계측이 가능한 3축 가속도센서를 사용하여, 충격하중 작용 시, 시험체에 발생하는 가속도를 측정하고자 하였다. 그러나, Fig. 16의 HPF 100 충격 시험 결과와 같이, 3축 방향 모두에서 10,000 g 이상의 순간충격력이 발생하였음을 확인하였으며, HPF 180 또한 유사한 거동을 보여준 바, 가속도센서에서 계측된 값은 유의미한 수치로 볼 수 없음을 확인하였다. 즉, 본 연구에 적용한 방식의 고속 충격 파괴시험에 있어서 올바른 가속도 계측을 위해서는 보다 큰 용량의 가속도센서의 사용이 필요함을 확인하였다.

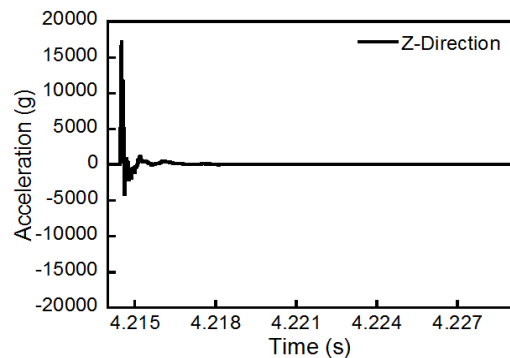
이상과 같이, 강섬유를 혼입한 압축강도 100 MPa 및 180 MPa급 HPFRCC에 있어서 고속 비상체 충격에 의한 내충격 성능을 평가한 결과, 우수한 보강섬유 혼입효과, 즉 배면 파괴 시 파편발생 억제력을 확인하였으며, 동일한 보강섬유 혼입량에 있어서도 시멘트 결합재 매트릭스의 강도가 증가함에 따라 방호성능, 즉 충격 파괴 저항성도 크게 증진시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.



(a) x-direction



(b) y-direction



(c) z-direction (Impact load direction)

Fig. 16. Acceleration on the rear side (HPF 100)

4. 결론

이 논문에서는 압축강도에 따른 HPFRCC의 역학적 특성 평가와 고속충격 평가를 수행하여 HPFRCC의 파괴거동에 미치는 영향을 분석한 것으로 결론은 다음과 같다.

1. 압축강도에 따른 HPRCC의 역학적 특성을 평가하기 위해 제조된 시험체는 정적 압축강도와 탄성계수는 HPF 180의 경우, 197.8 MPa, 47.1 GPa, HPF 100은 110.6 MPa, 35.9 GPa를 각각 나타내었으며, 압축강도가 낮아짐에 따라 탄성계수도 낮아지는 경향을 나타내었다. 휨인장강도의 경우, HPF 100은 20.7 MPa, HPF 180은 32.7 MPa로 나타났는데 이것은 압축강도가 낮은 HPRCC는 초기균열강도 차이에 따라 균열이후 섬유에 의한 변형률 강화현상이 나타나더라도 최종 휨강도 값은 낮아지기 때문인 것으로 판단된다.
2. HPRCC의 인발거동을 분석한 결과, HPF 100의 최대 인발하중은 28.9 N이며, 이때의 등가 부착강도(τ_{eq})는 약 6.7 MPa로 나타났다. 이에 비해 HPF 180의 최대 인장하중은 44.9 N으로 HPF 100에 비해 약 55% 증가하였으며, 등가 부착강도는 9.7 MPa로 약 45% 증가한 것으로 나타났다. 이것은 HPRCC 매트릭스 압축강도 수준이 증가함에 따라 인발 저항성능이 증가한다는 것을 확인하였다.
3. 300×300×50 mm 시험체에 직경 36 mm, 중량 125g의 평면을 가진 발사체를 200 m/s로 발사하여 충격 파괴시험을 수행한 결과, HPF 100 시험체는 배면에 약 22.26 mm, HPF 180 시험체는 약 9.16 mm의 최대 파괴변위가 발생, HPF 100 시험체가 HPF 180보다 2배 이상의 배면파괴 거동을 가짐을 확인하였다. 또한, HPRCC에 함유된 보강섬유의 효과로, 배면 균열파괴 시, 비산물이 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.
4. 충격 파괴시험 수행 시, 시험체 배면에서 수행한 계측 결과에 있어서도, HPF 180 시험체가 HPF 100 보다 우수한 방호성능을 보였으며, 이는 정적 물성평가의 경우와 마찬가지로, 충격하중 환경 하에서도 매트릭스 강도가 방호성능에 미치는 영향이 클 수 있음을 나타낸 결과로 판단되었다.
5. HPRCC의 방호용 건설자재로서의 적용 가능성에 있어서는 HPRCC의 특징 중 하나인 보강섬유 사용에 따른 인성 증가 효과에 기인한 비산물 발생

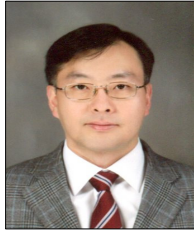
억제력과, 매트릭스의 고강도화에 따른 파괴 저항성 증가 결과를 볼 때, 충분히 그 가능성을 확인하였으며, 추후 일반 콘크리트와의 성능 비교검토 및 경제성 파악 연구 수행을 통해 보다 방호성능에 특화된 재료를 개발할 필요성이 있다고 사료된다.

References

- [1] P. C. Aitcin, "Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1349-1359, 2000.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3)
- [2] S. B. Kim, J. H. Ha, Y. G. Cho, N. H. Yi, "Retrofit Materials for Improving Blast Resistance of Structures", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 23(2), 42-46, 2011.(in Korean)
- [3] R. P. Kennedy, "A Review of Procedures for the analysis and design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects", *Nuclear Engineering and Design* 37, pp. 183-203, 1976.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493\(76\)90015-7](http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493(76)90015-7)
- [4] D. J. Kim, D. Y. Kim, "Fiber Reinforced Cement Composites fo Nuclear Power Plant Containment Building", ISBN 978-89-87573-11-3.
- [5] P. Richard and M. H. Cheyreyzy, "Composition of Reactive Powder Concrete," *Cement and Concrete research*, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- [6] KICT, Development of Technology to improve the Durability of Concrete Bridges, Report No. KICT 2006-89, Korea Institute of Construction Technology, Korea, 2006.(in Korean)
- [7] S. W. Kim, S. T. Kang and S. M. Han, "Characteristics and Application of Ultra High Performance Cementitious Composite," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 1, pp. 16-21, 2006.(in Korean)
- [8] A. Kamen, E. Denarié, H. Sadouki and E. Brühwiler, "UHPRCC ARC Tensile Creep at Early Age," *Materials and Structures*, Vol. 42, No. 1, pp. 113-122, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-008-9371-0>
- [9] D. J. Kim, S. E. Tawil, and A. E. Naaman, "Loading rate effect on pullout behavior of deformed steel fibers", *ACI Material Journal*, Vol. 105, No. 6, pp. 576-584, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.14359/20199>

문 재 흠(Jae-Heum Moon)

[정회원]



- 2000년 2월 : 한양대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2006년 5월 : Purdue University, School of Civil Engineering (공학박사)
- 2007년 2월 ~ 2011년 12월 : 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원

• 2011년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

토목공학, 건설재료

조 현 우(Hyun-Woo Cho)

[정회원]



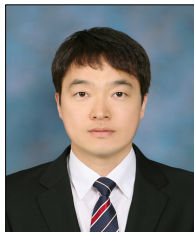
- 2009년 2월 : 충남대학교 공과대학 토목공학과 (공학학사)
- 2011년 2월 : 충남대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2011년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구원

<관심분야>

방호·방폭용 콘크리트 및 동적충격 압축물성 평가

박 정 준(Jung-Jun Park)

[정회원]



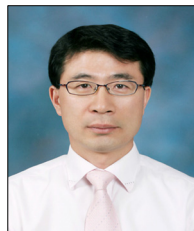
- 1998년 2월 : 계명대학교 토목공학과(공학사)
- 2000년 2월 : 계명대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 대학원 건축사회환경공학과(공학박사)
- 2000년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

방호·방폭용 콘크리트 및 고성능 섬유보강 시멘트 복합체

김 성 욱(Sung-Wook Kim)

[정회원]



- 1984년 2월 : 영남대학교 토목공학과(공학사)
- 1986년 2월 : 영남대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 1998년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 2003년 12월 ~ 2004년 12월 : 호주 UNSW 객원연구원

• 1989년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 선임연구위원

<관심분야>

방호·방폭용 콘크리트 및 고성능 섬유보강 시멘트 복합체

박 기 준(Gi-Joon Park)

[정회원]



- 2013년 2월 : 세종대학교 공과대학 건설환경공학과 (공학학사)
- 2015년 2월 : 세종대학교 일반대학원 건설환경공학과 (공학석사)
- 2015년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구원

<관심분야>

방호·방폭용 콘크리트 및 고성능 섬유보강 시멘트 복합체

이 장 화(Jang-Hwa Lee)

[정회원]



- 1983년 8월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1995년 8월 : 연세대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1984년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 선임연구위원
- 1998년 9월 ~ 1999년 9월 : 미국 NIST 객원과학자

<관심분야>

방호·방폭용 콘크리트, 원전 콘크리트 품질 및 내구성