

SHPB 시험 및 영상분석을 통한 고변형률 속도 하의 시멘트 복합체 물성 변화 평가

Evaluation of Material Properties Variations of Cementitious Composites under High Strain Rate by SHPB Test and Image Analysis

조 현 우¹⁾ 이 장 화²⁾ 민 지 영³⁾ 박 정 준⁴⁾ 문 재 흠^{4)*}
Hyun-Woo Cho Jang-Hwa Lee Ji-Young Min Jung-Jun Park Jae-Heum Moon

Abstract

Under impact or blast loads, concrete behaves with different mechanical properties comparing to the static loading conditions. In other words, with high strain rate, mechanical properties of concrete vary significantly. To evaluate the compressive characteristics of concrete with high strain rate, SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) test is typically used. However, because SHPB test method has been developed for metallic materials, it is necessary to verify the applicability of SHPB for brittle materials such as concrete. Also, there have been little researches on the evaluations of mechanical characteristics of UHPC under high strain rate conditions. This study has been performed to evaluate and analyse the compressive characteristics of plain concrete and UHPC with SHPB test apparatus. Also, to verify the applicability of SHPB test for concrete, direct displacement image analysis with high speed camera was performed for the comparisons with analytical solutions for SHPB test.

Keywords : Impact, Blast, High strain rate, SHPB, UHPC, High speed camera

1. 서론

일반적으로, 건설산업 분야에 사용되는 금속 및 콘크리트를 포함한 모든 재료는 역학적 물성이 일정하다고 가정하여 설계 및 시공에 적용되어지고 있다. 그러나 모든 재료는 온도 및 습도 등과 같은 환경적 조건 이외에도 작용하는 하중의 속도에 따라 재료적 특성치의 변화가 발생하게 된다. 특히, 충돌 또는 폭발과 같은 순간적인 하중이 작용하게 되면, 재료는 매우 높은 변형률 속도환경에 처하게 되며, 이러한 환경 하에서 가지는 재료의 물성은 일반적인 정적 하중조건과는 매우 다른 특성을 가지게 된다(Bischoff P.H. et al., 1991).

이러한 충돌 또는 폭발하중과 같은 고변형률 속도 하의 재료물성 특성치를 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 금속

재료 분야에서는 Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 시험방법을 적용하고 있으며, 국외의 경우 콘크리트 재료분야에 있어서도 해당 시험방법을 적용한 다양한 연구가 수행되어지고 있다(Grote D.L. et al., 2001).

그러나, 콘크리트는 금속과 달리 취성재료이기 때문에 SHPB Test의 적용 적정성에 대한 검토가 필요하며, 대다수의 연구

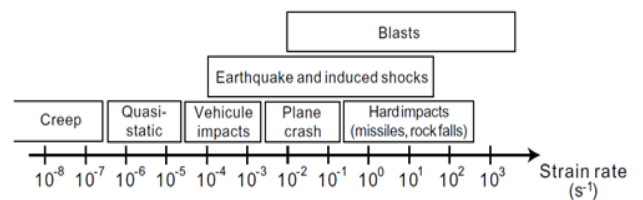


Fig. 1 Type of loads versus Strain rate (Bischoff et al., 1991)

1) 정회원, 한국건설기술연구원 석사후연구원
2) 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구위원
3) 정회원, 한국건설기술연구원 전임연구원
4) 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원
5) 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원, 교신저자

* Corresponding author : mjh4190@kict.re.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2015년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2015년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

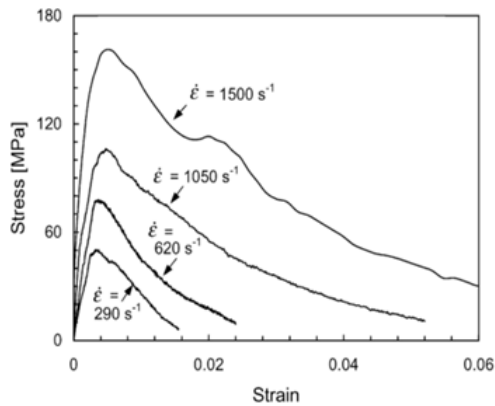


Fig. 2 Strain rate dependent Strain-Stress Curves (Grote et al., 2001)

가 일반강도 수준의 콘크리트에 대한 것으로서, UHPC (Ultra High Performance Concrete)와 같이 초고강도이면서 섬유가 혼입된 재료에 대한 연구는 매우 미미한 상황이다.(Lai, J. and Sun, W., 2008, Rong, Z. et al., 2010)

이에 본 연구에서는 일반 콘크리트 및 고성능 섬유보강 콘크리트 재료에 대한 SHPB 시험을 수행함과 동시에, 초고속 영상촬영장비를 사용한 영상분석기법을 활용하여 고변형률 속도 하의 시험체의 파괴거동을 분석, SHPB Test의 콘크리트 시험체에의 적용 적정성을 파악하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 콘크리트 시험체 제작

2.1.1 사용재료

본 연구에 사용된 콘크리트는 재령 28일 압축강도 60 MPa 급 일반 콘크리트와, 200 MPa급 강섬유보강 초고성능콘크리트(Ultra high performance concrete, UHPC) 2종류로서, 기본 배합정보는 다음 Table 1 및 2와 같다.

여기서 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를, 일반 콘크리트용 잔골재는 밀도 2.6 g/cm³, 조립율 2.43을 갖는 강모래를, 굵은골재는 최대치수 25 mm, 밀도 2.65 g/cm³의 쇄석을 이용하였으며, UHPC 배합에는 입경 0.5 mm 이하의 잔골재, 96% 이상의 SiO₂를 포함하고 평균입径이 2 μm인 충전재, 분말도 200,000 cm²/g의 노르웨이산 실리카폼(SF)을 사용하였다.

한편, UHPC에 사용된 강섬유의 물리적 특성치는 Table 3에 정리하였다.

Table 1 Mixture proportions of Normal concrete (kg/m³)

W/B (%)	S/a (%)	C	W	BS ¹⁾	Gravel	Sand	SP (B×%)	AE (B×%)
44.2	48	304	168	76	898	839	1.2	0.003

Note. 1) BS : Blast-furnace slag powder

Table 2 Specified mix of UHPC (weight ratio to C)

W/B (%)	C	Silica-fume	Sand	Filler	SP (B×%)	Steel Fiber (V _i , %)
20	1	0.25	1.1	0.3	0.018	2%

Table 3 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	7.8	2,500	13	65

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

2.1.2 시험체 제작

SHPB Test용 시험체는 직경 45 mm, 길이 45 mm를 기준 값으로 가진 원통형으로서, 시험체의 제작방식에 따른 측정 결과의 변동 가능성을 검토하기 위하여 몰드 제작방식과 코어링 제작방식 두 가지를 병행하였다.

일반콘크리트는 굵은 골재 최대치수가 25 mm 이므로, 몰드 제작방식으로 제작할 경우에는 균일한 실험결과를 얻을 수 없을 것으로 판단하고 코어링 제작방식만 제시하였다.

한편, SHPB 시험 특성상 시험체 형상의 높은 정밀도가 요구되기 때문에, 시험체 재하 면과 모선 사이의 각도는 90°±0.5°, 하중 작용방향 진직도 0.5 mm 이내로 제작하였다. Fig. 3 및 4는 코어링 시험체 제작 과정에 투입된 장비 및 제작된 시험체를 보여주고 있다.

시험체의 실제 제작에 있어서 UHPC는 섬유의 방향성이 시험결과에 영향을 미칠 수 있다는 가정 하에, 코어링 방식 시험체 제작시에는 섬유의 방향성을 고려, 충격하중의 직교 방향과 수평방향으로 섬유가 배치되도록 시험체를 구분하여 제작하였다. 즉 본 연구에서는 일반 콘크리트 코어제작(Plain), UHPC 코어제작 및 하중방향 대비 섬유 직교배열(UHPC(Core-V)), UHPC 코어제작 및 하중방향 대비 섬유 수평배열(UHPC(Core-H)), UHPC 몰드제작(UHPC(Mold)), 총 4가지 시험체에 대하여 시험평가를 수행하였다.

2.2 SHPB 시험장비

SHPB 시험은 충격봉(striker), 입력봉(Incident bar), 출력



Fig. 3 Manufacturing process of testing specimen



Fig. 4 Specimens for SHPB test

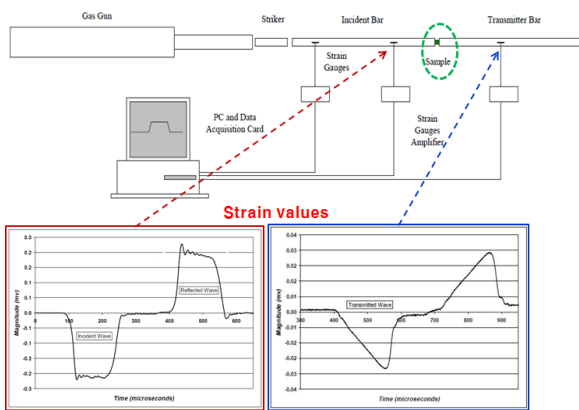


Fig. 5 Schematic diagram of SHPB (Marais S.T. et al., 1991)

봉(Transmitter bar), 충격봉 발사를 위한 Air gun 및 데이터 계측용 센서, 모니터링 시스템으로 구성되어 있다(Lee, Ouk Sub et al., 2004). Fig. 5는 SHPB 장비 구성 개요도로써, 충격봉이 입력봉에 가하게 되는 충격파에 의해 시험체가 파괴되며, 시험체의 파괴 시 발생하게 되는 반사파와 투과파를 각각 입력봉 및 출력봉에 부착한 스트레인게이지로 측정, 다음 이론식에 의해 변형률 속도와 응력-변형률 관계, 파괴시의 강

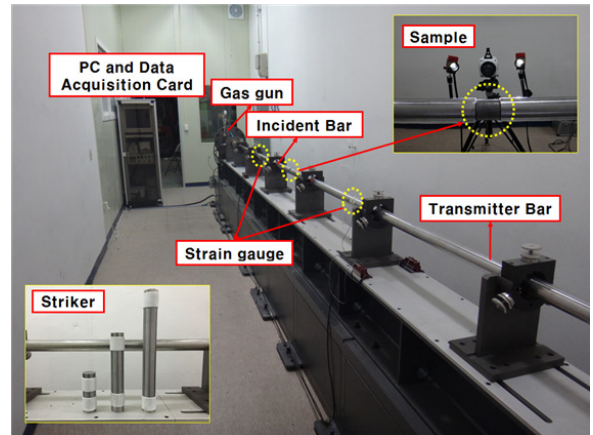


Fig. 6 SHPB testing equipments

도 값을 구하게 된다.(Seo, Song Won et al., 1998, Lindholm, U.S., 1964)

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{-2C_0}{L_s} \varepsilon_R(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{-2C_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = E_0 \frac{A_0}{A_s} \varepsilon_T(t) \quad (3)$$

여기서, $C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ (입력봉 및 출력봉의 탄성계수, 밀도 비의 제곱근값), L_s =시험체 길이, $\varepsilon_R(t)$ =입력봉에서 측정된 반사와 변형률, $\varepsilon_T(t)$ =출력봉 측정 변형률, A_0 =봉의 단면적, A_s =시험체 단면적이다.

본 연구에 사용된 장비는 Fig. 6과 같이 최대직경 50 mm의 시험체 적용이 가능한 장비로서, 최대 공기압 7 Bar, 입력봉 및 출력봉 길이는 각각 3 m로서, 콘크리트와 같은 구조물용 복합재료의 시험평가를 위하여 제작된 SHPB 장비이다. 입력봉과 출력봉에 부착된 변형률 게이지는 중앙부의 시험체로부터 각각 1,200 mm 씩 떨어진 위치에 부착하였다.

2.3 영상분석 시스템

본 연구에서는 SHPB 시험을 수행함과 동시에, 시험체 파괴시의 거동을 실제로 영상촬영하여 발생변위 및 변형률 산출의 가능성을 판단하고자 하였으며, 이를 위한 초고속 영상

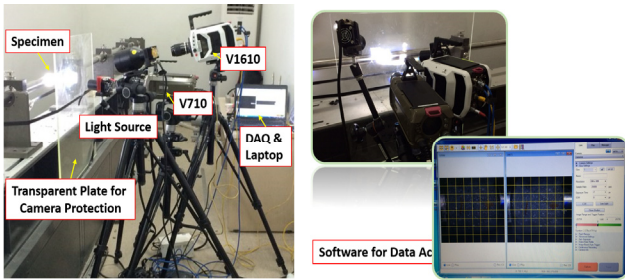


Fig. 7 Setup of high speed camera for SHPB Test

촬영 카메라를 사용하였다.

SHPB 시험의 특성상 충격파가 시험체에 도달된 후 파괴 시까지 100 μ s 이내 구간에서 모든 현상 및 계측이 완료되기 때문에, 해당 계측시간 동안 충분한 분석용 영상데이터의 획득이 가능하여야 한다. (Kang, Myoung Soo et al., 2012)

또한, 일반적으로 초고속카메라의 경우, 해상도를 높일 경우 초당 프레임 수(FPS)는 낮아지게 되는 문제점이 있기 때문에 촬영 목적에 따라 FPS, 해상도, 촬영영역을 모두 고려하여야 한다. (Kang, Myoung Soo et al., 2012, Chung, Dong Teak et al., 2013).

이에, 본 연구에서는 초고속카메라의 요구성능 확인을 위해 해상도 128 \times 32 CMOS 기준 685,800, 840,000 및 1,000,000 FPS 성능을 각각 가진 VRI사의 Phantom V710, V1610 및 V2010을 사용하여 사전검토 실험을 수행하였으며, 본 연구에서는 V2010을 사용하여 촬영된 영상을 분석한 결과만 나타내었다.

2.4 시험평가 수행 결과

2.4.1 SHPB 시험 결과

Fig. 8은 SHPB Test 수행 시 입력봉 및 출력봉에 부착된 스트레인게이지에 의해 측정된 값 중 한 예를 보이고 있다. 계산식에 사용되는 데이터는, 입력봉의 경우 시험체로부터 반사되어 돌아온 두 번째 피크치와 출력봉에서 계측된 최초 피크치이다. 이 때, 각 봉에 부착된 스트레인게이지의 위치에 따라, 신호가 발생된 시간대에 차이가 발생하였으며, 본 연구에서는 출력봉에 신호가 감지된 시점에 맞추어서 출력봉의 반사파 구간을 시간보정하여 계산을 수행하였다.

Fig. 9는 SHPB Test를 통한 각 시험체별, 식 (1)에 의거하여 계산된 변형률속도 및 식 (3)에 의한 최대응력 계산값을 보이고 있다. Plain, UHPC(Core-V), UHPC(Core-H) 및 UHPC(Mold)의 정적 압축강도는 Fig. 9에 표기한 바와 같이 각각

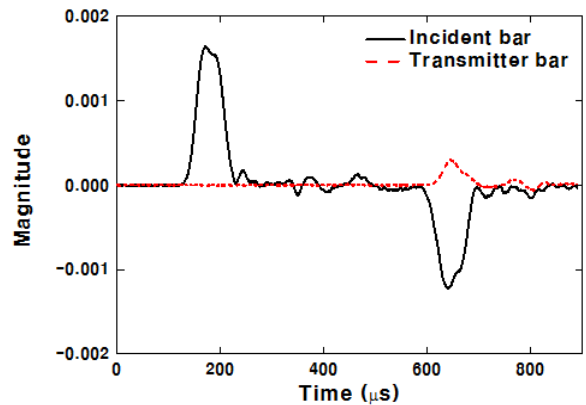


Fig. 8 Strains of incident and transmitted bars

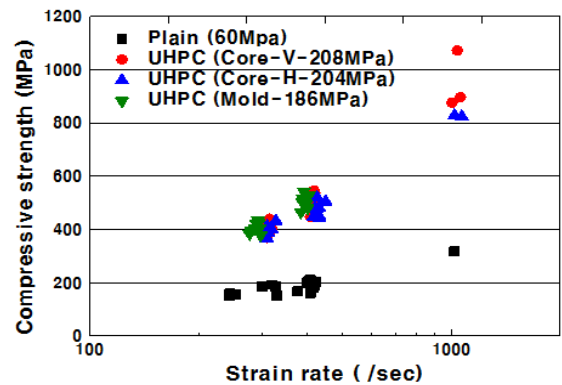


Fig. 9 Test results of SHPB Test

60, 208, 204, 186 MPa 이었으며, UHPC의 경우 몰드제작 방식의 시험체가 코어제작방식의 시험체보다 약 10%정도 낮은 정적 압축강도를 보였다.

한편, UHPC(Mold) 시험체를 제외하고는 모든 시험체에 대해 10³ /s 수준까지 변형률속도를 증가시켜 실험을 수행하였다.

Fig. 9에 보이는 바와 같이, 변형률속도 증가에 따른 강도 증가 기울기는 UHPC의 경우가 Plain 콘크리트보다 높음을 유추할 수 있었으며, 200~500 /s 변형률속도 구간에서는 UHPC의 섬유방향성 및 시험체 제작방식에 따른 차이가 크지 않음을 확인하였다.

한편, 이러한 고변형율 하의 정적 압축강도 대비 동적증가 계수(Dynamic Increase Factor, DIF)와 관련해서는 ACI-349 및 CEB가 제시한 경험식에 기반한 모델식이 존재하며, 모델식은 식(4)와 같이 변형률속도(SR)를 변수로 한다.

$$DIF = 0.9 + 0.1(\log SR + 5.0) \quad (4)$$

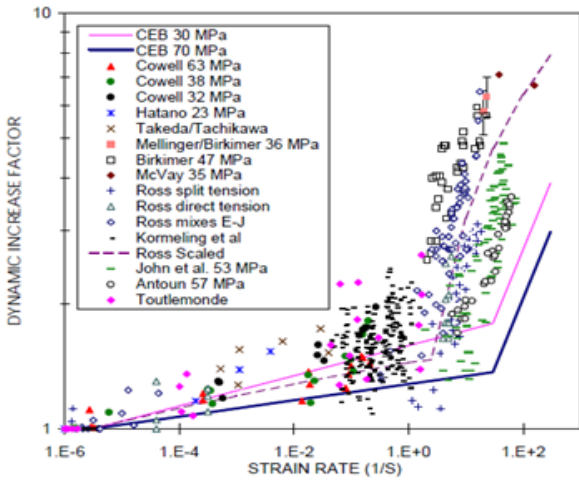


Fig. 10 Strain rate dependent Dynamic Increase Factor (L.J. Malvar et al., 1998)

ACI 349에서는 압축강도 28~42 MPa인 보통강도 콘크리트의 실제 실험결과로부터 구하여진 경험식으로서, 단순히

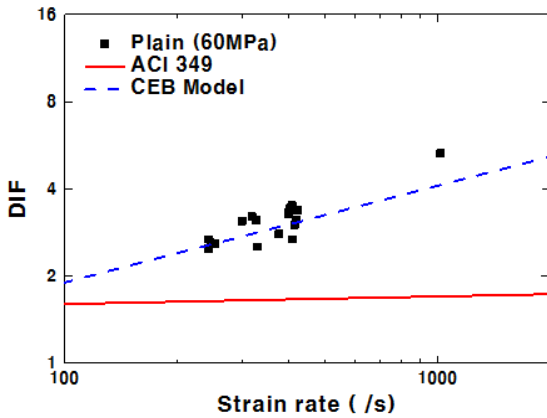
변형률속도만을 변수로 하고 있기 때문에, UHPC와 같이 재료의 강도범주 및 재료 특성이 다를 경우에는 적용하기 어렵다는 문제가 있다.

한편, CEB 모델의 경우에 있어서는 변형률속도 이외에도 정적강도 특성을 동시에 변수로 주어주고 있으며, 변형률속도 30 /s를 기점으로 Bilinear 공식을 제안하고 있으며, 식 (5~6)와 같다.

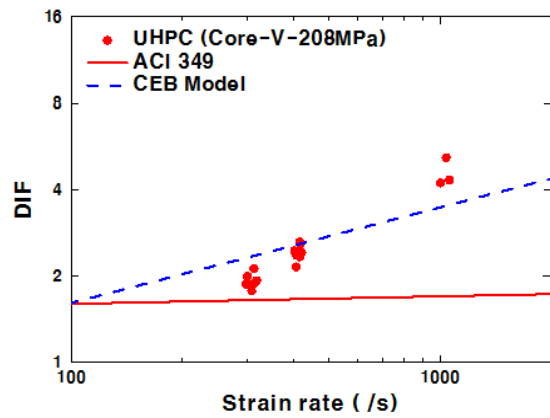
$$DIF = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_s} \right)^{1.026\alpha_s} \quad \text{For } \dot{\epsilon} \leq 30s^{-1} \quad (5)$$

$$DIF = \gamma_s \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_s} \right)^{1/3} \quad \text{For } \dot{\epsilon} > 30s^{-1} \quad (6)$$

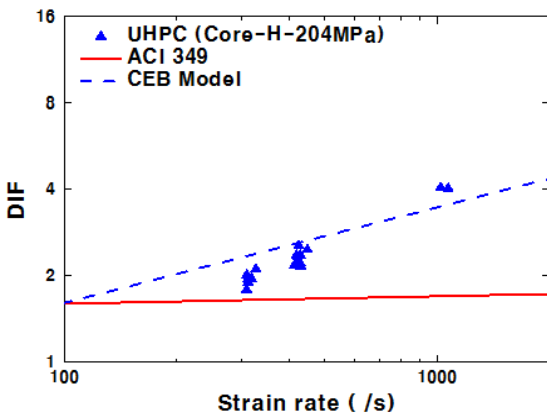
여기서, $\dot{\epsilon} = 30 \times 10^{-6} s^{-1}$, $\gamma_s = 10^{(6.156\alpha_s - 2.0)}$, $\alpha_s = 1/(5 + 9f_{cs}/10)$ 이다.



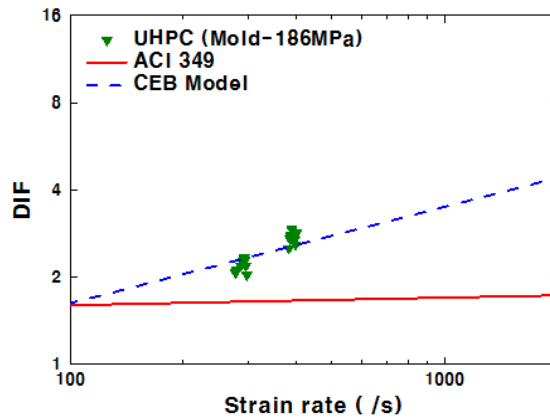
(a) Plain



(b) UHPC (Core-V)



(c) UHPC (Core-H)



(d) UHPC (Mold)

Fig. 11 Strain rate vs. DIF

다음 그래프는 각 시험체별 실험결과와 ACI 349 및 CEB 모델식을 비교한 것으로, X축은 변형률속도를, Y축은 DIF를 나타낸다.

Fig. 11에 보이는 바와 같이, 모든 시험체의 실험결과는 CEB 모델과 유사한 경향을 보였으며, 비록 CEB 모델이 일반강도 콘크리트를 기반으로 한 경험식임에도 불구하고, UHPC의 경우에도 유사한 예측결과를 가짐을 확인할 수 있었다.

그러나, 본 연구에서는 일부 한정된 변형률속도구간만을 확인하였으며, 실험데이터가 충분하지 않은 관계로 모델식의 검증에는 추가적인 검토가 필요하다고 판단된다.

2.4.2 초고속 영상촬영 분석 결과

본 연구에 적용된 초고속 영상 카메라의 적용 시 시·공간 분해능은 130,232 fps, 해상도 384×304로서, 100 μ s 시간에 13개의 이미지를 확보하여 분석을 수행하였다. 또한, 적용된 해상도의 픽셀 당 실제 크기는 0.06×0.06 mm를 적용하였다.

Fig. 12 및 Fig. 13은 Plain 콘크리트와 UHPC 시험체의 200~300/s 변형률속도구간에 해당되는 충격과 적용 시 측정

된 시간에 따른 파괴성상을 보여주고 있다. Plain 시험체의 경우는 초기균열 발생 이후 시험체 전체에 걸쳐 완전 취성과 파괴의 형태를 보여주었으며, UHPC의 경우에는 국부적인 양단부 파괴가 시험체 전체로 전달되지는 않음을 확인하였다.

이는 취성재료인 Plain 콘크리트와 달리, UHPC는 매우 높은 고강도 재료이며, 섬유가 혼입됨에 따라 파괴인성이 높기 때문에 초기균열의 진행이 억제된 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 14는 각 시험체별 초고속 영상 촬영 데이터로부터 구하여진 시간에 따른 발생 변위 계측치로서, Plain 콘크리트가 UHPC의 경우보다 큰 변위값을 나타내었다. 이는 충격하중조건 하에서 Plain 콘크리트 시험체가 전체적으로 완전히 파괴되는 반면, UHPC는 국부파괴만 발생하였기 때문에 Plain 시험체의 경우, 보다 큰 변위가 발생하였다고 판단된다. 한편, UHPC의 경우에는 최대변위 발생 후 일부 변위회복이 발생되었으며, 이는 UHPC 시험체의 파괴부위 외의 영역에서 일부 탄성회복 거동을 보인 것으로 판단된다.

Fig. 15 및 Fig. 16은 SHPB Test 수행 시 입력봉에 부착된 스트레인게이지의 측정치와 초고속카메라로 측정된 변위 발생 계측치를 비교한 것이다. 그래프에서 보이는 바와 같이, 계측 변형률을 나타내는 입력봉의 반사파 최대 피크치 발생 이전에 영상분석을 통한 변위발생 최초 피크치가 존재함을 확인하였으며, Plain 시험체는 변위증가 구간 중에, UHPC는 최대변위 발생시점에서 초기균열이 발생함을 확인하였다.

이러한 경향은 시험체에 따라, 시험에 따라 어느정도 변동성이 존재함을 확인하였으며, 보다 명확한 상관성을 검토하기 위해 추가적인 연구가 필요하다고 판단되나, 계측 변형률과 영상측정 변위거동의 상이성은 SHPB Test 자체가 가지는 계측방식의 한계성이 주요 원인 중 하나라고 판단된다.

즉, SHPB Test의 특성 상, 간접적인 신호분석을 통한 시험체의 변형률을 계산하는 방식이 콘크리트와 같은 취성재료에 직접 적용하는 데에는 어느정도 한계가 있기 때문으로 판단된다. 이는 금속과 같이 충분한 인성과 연성을 가진 재

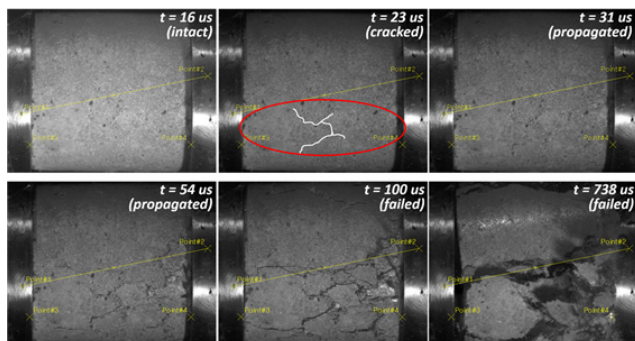


Fig. 12 Failure of Plain concrete by SHPB Test

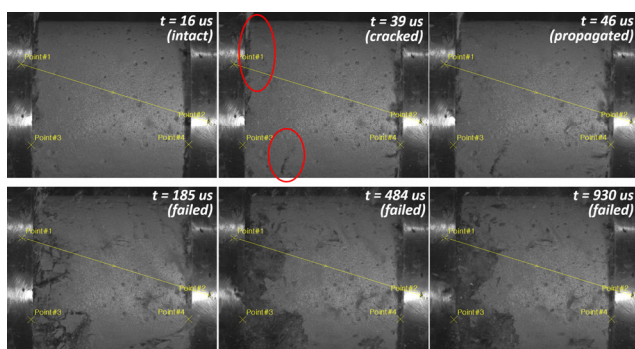


Fig. 13 Failure of UHPC by SHPB Test (Red circle: Initial cracking zone)

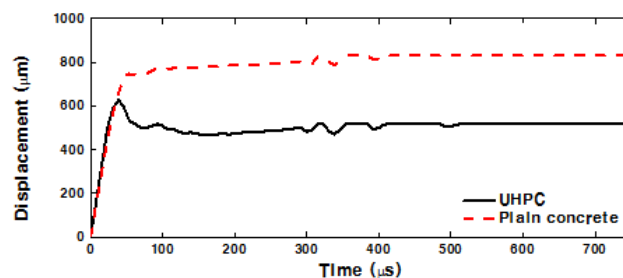


Fig. 14 Time vs. Displacement by image analysis

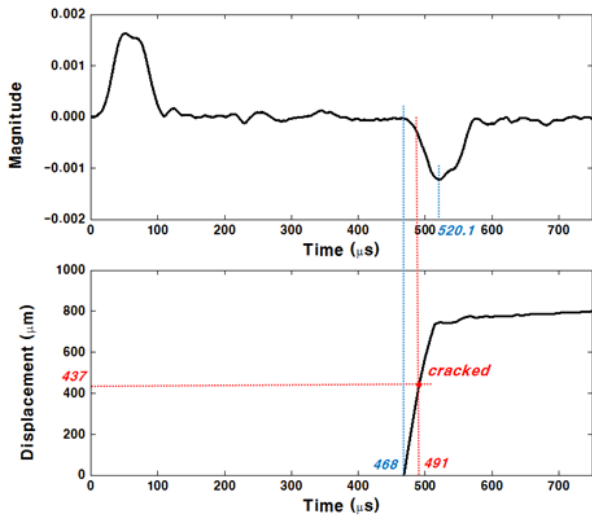


Fig. 15 Reflected strain (Incident bar) vs. Displacement (High-speed camera) (Plain concrete)

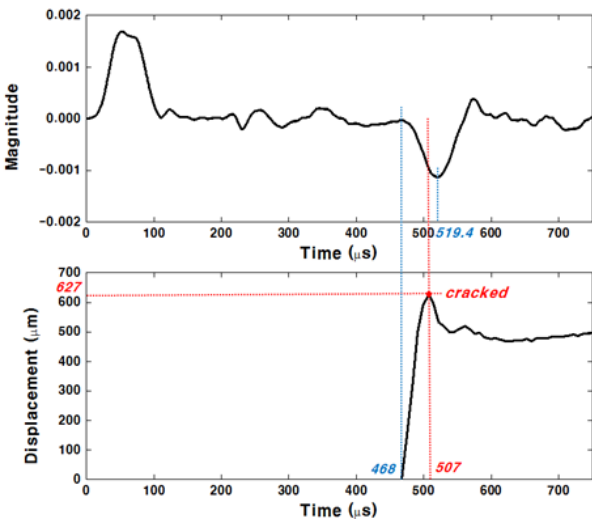


Fig. 16 Reflected strain (Incident bar) vs. Displacement (High-speed camera) (UHPC)

료에 있어서는 충격하중 전달 시 재료 자체의 파괴에 의해 소산되는 에너지가 적기 때문에, 큰 에너지의 손실 없이 입력봉의 반사파 및 출력봉의 전달파로 에너지가 전달되기 때문에 시험체의 물성을 간접 파악하는데 무리가 없는 반면, 콘크리트와 같은 취성재료의 경우에는 충격파에 의한 시험체 파괴시의 소산에너지가 크기 때문에, 입력봉 및 출력봉에서 측정되는 값과 실제 시험체의 거동에는 차이가 있을 수 있다고 사료되며, 이에 대한 보다 심도 깊은 연구가 후속되어야 한다고 판단된다.

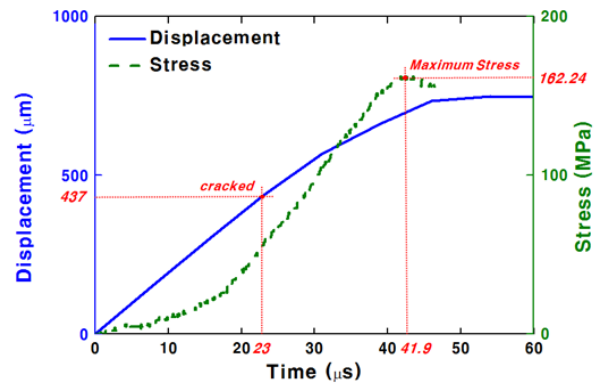


Fig. 17 Stress vs. Displacement (Plain concrete)

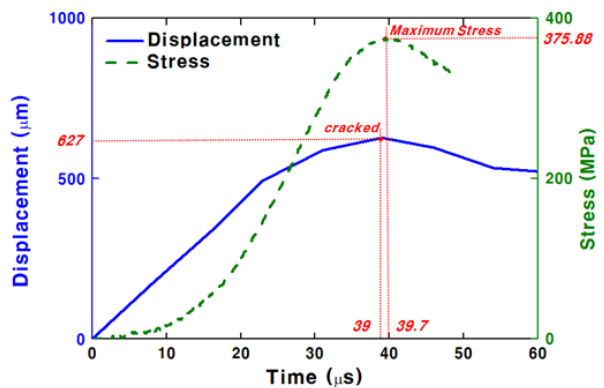


Fig. 18 Stress vs. Displacement (UHPC)

Fig. 17 및 Fig. 18은 영상측정 변위와 출력봉의 스트레인 게이지에서 측정된 변형률을 식 (3)에 대입하여 구해진 응력 값을 비교한 그래프로서, 최대응력 발생시점과 영상측정 변위 초기 피크치가 거의 유사한 시점에서 발생되었음을 확인할 수 있었다.

즉, 영상측정 변위 측정 결과와 응력 거동의 유사성을 볼 때 SHPB Test의 간접 측정방식에 대한 충분한 검증시험 방법으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

다만, 앞에서 밝힌 바와 같이, 영상측정 방식의 경우, SHPB Test의 매우 짧은 측정시간을 고려할 때, 획득 가능한 초당 프레임 수 및 해상도에 따라 결과값에 영향을 미치기 때문에, 충분한 시·공간 분해능을 적용할 필요성이 있다.

또한, SHPB Test의 콘크리트에의 적용에 있어서 입력봉 반사파로부터 구하게 되는 변형률 계산치의 불분명성은 출력봉 전달파로부터 구하여지는 응력 계산치에 있어서도 동일하게 발생될 수 있기 때문에, 이에 대한 향후 추가적인 연구도 필요하다고 판단된다.

3. 결론

감사의 글

본 연구에서는 충격 또는 폭발하중 하의 고변형률 환경 하에서 일반 60 MPa급 Plain 콘크리트와 200 MPa급 초고성능 섬유보강 콘크리트의 압축 동적증가계수를 SHPB Test를 통해 시험평가 하였다. 또한, 초고속카메라를 이용하여 SHPB Test 수행 시 실제 변위를 측정, 변형률 계산 이론식 결과와 비교검토를 수행하였다. 이에 대한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호·방폭 연구단 (과제번호: 13건설연구S02)의 연구지원에 의해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

- (1) Plain 및 UHPC 모두 ACI 349 모델식과는 다른 거동을 보였으며, 이는 ACI 349 모델식이 변형률속도만을 변수로 가진 일반 콘크리트에 대한 경험식이기 때문이다. 한편 CEB 모델식은 비록 일반 콘크리트에 대한 변형률속도 및 정적 압축강도를 변수로 가진 경험식임에도 불구하고, Plain 및 UHPC 모두 유사한 경향을 보임을 확인하였다.
- (2) SHPB Test 수행 시 Plain 콘크리트는 시험체가 완전히 파괴되었으며, UHPC의 경우에는 국부파괴만 발생되었음을 확인하였다. 이는 UHPC의 높은 강도대와 더불어 섬유의 보강효과로 인성이 강화되었기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 초고속카메라 영상분석 결과, Plain 콘크리트가 UHPC보다 큰 변위가 발생되었음을 확인하였으며, UHPC의 경우에는 최대변위 발생 후 일부 변위회복 현상이 발생함을 확인하였다. 이는 UHPC 시험체에서 파괴가 발생하지 않은 건전부위에서 일부 탄성회복 거동을 가진 것으로 판단된다.
- (4) SHPB Test 수행 시 입력봉의 반사파로부터 구하여진 시험체 변형률과 영상분석 변위 간에 뚜렷한 상관성을 파악하지 못하였다. 이는 콘크리트와 같은 취성재료의 파괴 시 시험체 자체에서 손실되는 에너지가 크기 때문에, 시험체로부터 입력봉으로 전달된 반사파가 충분히 해당 재료의 물성을 보여주는데 문제가 있을 수 있음을 보인다고 사료되며, 추가적인 연구가 필요한 부분이라고 판단된다.
- (5) 영상분석 변위와 SHPB Test에서 출력봉 스트레인계이지로부터 구하여진 응력발현과 거동의 유사성은 확인되었으나 SHPB Test 방식의 간접적인 변형률, 응력 계산방식의 적정성에 대하여서는 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

1. Chung, S. T., Park, C. Y., Jin, D. H., Kim, T. Y., Lee, J. Y., Rhee, I. S. (2013), "Development of Intelligent Multiple Camera System for High-Speed Impact Experiment", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A.*, 37(9), pp.1093-1098.
2. Kang, M. S., Kang, H. M., Kim, S. K., Cheon, D. S., Kaneko, K., Cho, S. H. (2012), "Experimental Study on Deformation and Failure Behavior of Limestones under Dynamic Loadings", *Tunnel and Underground Space*, 22(5), pp.339-345
3. Lee, O. S., Lee, J. W., Kim, K. J. (2004), "Dynamic deformation behavior of rubber and ethylene copolymer under high strain rate compressive loading", *Journal of The Society of Precision Engineering*, 21(6), pp. 122-130.
4. Seo, S. W. and min, O. K. (1998), "Size effect of aluminum compression specimen in SHPB test", *The Korean Society of Mechanical Engineering*, A, pp. 339-343
5. Bischoff, P.H. and Perry, S.H. (1991), "Compressive behaviour of concrete at high strain rates", *Journal of Materials and Structures*, 24(6), pp.425-450.
6. Grote, D.L., Park, S.W., Zhou, M. (2001), "Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization", *International Journal of Impact Engineering*, 25(9) pp.869-886.
7. Lai, J. and Sun, W. (2008), "Dynamic Mechanical Behaviour of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concretes", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, 23(6), pp.938-945.
8. Lindholm, U.S. (1964) "Seom experiments with the split hopkinson pressure bar", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.12, pp. 317-335.
9. Malvar, L.J., and Crawford, J.E. (1998), "Dynamic increase factors for concrete", *Twenty-Eighth DDESB Seminar*, Orlando, USA, pp.1-17.
10. Marais, S.T., Tait, R.B., Cloete T.J. and Nurick, G.N. (2004), "Material testing at high strain rate using the split Hopkinson pressure bar", *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol.1, pp.319-339.
11. Rong, Z., Sun, W., Zhang Y. (2010), "Dynamic compression behavior of ultra-high performance cement based composites", *International Journal of Impact Engineering*, 37(5), pp. 515-520.
12. ACI 349-06, (2006), *Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures*, American Concrete Institute
13. CEB, (1993), *CEB-FIP Model Code 1990*, Redwood Books, Trowbridge, Wiltshire, UK

Received : 04/27/2015
Revised : 06/09/2015
Accepted : 06/16/2015

요 지

충돌 또는 폭발 하중 하의 콘크리트는 정적 하중에서 가지는 재료물성과 다른 거동을 보이게 된다. 즉, 고변형율 하의 콘크리트의 재료 물성은 크게 변화하게 되며, 이를 시험평가하기 위한 방법 중 압축강도와 관련된 시험법으로는 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) Test가 있다. 그러나, SHPB Test는 금속과 같은 인성재료를 위해 개발된 시험방법으로서 취성재료인 콘크리트에 적용이 가능한지에 대한 검토가 추가적으로 필요하며, UHPC와 같은 섬유보강 초고성능 콘크리트에 대한 연구는 미미한 실정이다.

이에 본 연구에서는 콘크리트 시험체를 위해 제작된 SHPB Test 장비를 사용하여 일반 콘크리트 및 UHPC 시험체에 대한 시험평가를 수행하였으며, SHPB Test의 적용 적정성을 파악하기 위하여 초고속카메라를 활용한 변위영상 분석을 통한 검증을 수행하였다.

핵심 용어 : Impact, blast, high strain rate, SHPB, UHPC, high speed camera
