



에너지 프레임 종류에 따른 변형에너지 프레임 충격시험장치의 충격속도

박승훈¹⁾ · 박준길¹⁾ · 트란투안키엣^{1,2)} · 김동주^{1)*}

¹⁾세종대학교 건설환경공학과 ²⁾Civil Engineering, Hochiminh University of Technology and Education

Effect of Different Energy Frames on the Impact Velocity of Strain Energy Frame Impact Machine

PARK Seung Hun,¹⁾ PARK Jun Ki,¹⁾ TRAN Tuan Kiet,^{1,2)} and KIM Dong Joo^{1)*}

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, 143-747, Republic of Korea

²⁾Department of Civil Engineering, Hochiminh City University of Technology and Education, Hochiminh, Vietnam

ABSTRACT This research investigated the effects of diameter and material of energy frame on the impact velocity or strain rate of Strain Energy Frame Impact Machine (SEFIM). The impact speed of SEFIM have been clearly affected by changing the diameter and material of the energy frame. The reduced diameter of the energy frame clearly increased the impact velocity owing to the higher strain at the moment of coupler breakage. And, titanium alloy energy frame produced the fastest speed of impact among three materials including steel, aluminum and titanium alloys because titanium alloy has faster wave velocity than steel. But, aluminium energy frame was broken during impact tests. In addition, the tensile stress versus strain response of high performance fiber reinforced cementitious composites at higher and wider strain rates between 10 and 72 /sec was successfully obtained by using four different energy frames.

Keywords : HPRFCCs, Tensile stress-strain curve, Elastic strain energy, Energy frame, Strain rate

1. 서 론

일반 콘크리트와 달리, 본 연구에서 조사된 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, HPRFCCs)는 직접인장하중 하에서 높은 인장강도, 연성도, 에너지 흡수능력, 그리고 다수의 미세균열 생성을 동반하는 변형경화 거동을 보인다.¹⁻⁵⁾ 이러한 HPRFCCs의 변형경화 거동에 기인한 높은 인장강도와 에너지 흡수능력은 사회기반 시설물이나 초고층 빌딩 등에 적용 시 지진, 충격 및 폭발 등의 극한 하중에 대한 저항성을 크게 향상시킬 수 있다고 기대된다.^{1,2,4,6-13)} 하지만, 현재까지 고속 변형률 선도에서의 HPRFCCs의 직접인장 응력-변형률 선도에 대한 정보는 아직까지 매우 제한적인 현실이다. 그 이유는 고속 변형률 속도를 발현하기 위한 대부분의 충격시험 장비들의 크기는 매우 크며 그 비용이 매우 고가이므로 세계적으로 몇몇의 연구소에서만 충격시험을 수행할 수 있기 때문이다. 또한 가장 큰 문제점으로는 HPRFCCs의 고속 변형률 속도에서

의 직접 인장거동을 평가하기 위한 표준인장 시험법이 아직까지 없기 때문이다.¹⁴⁾

현재 널리 사용되고 있는 충격시험장치는 높은 위치에서 낙하하는 낙하식 충격시험장치인 Drop Weight Method^{3,7,9,10,15,16)}와 Charpy Pendulum Method^{17,18)} 그리고 응력파를 이용하여 충격시험을 수행하는 Split Hopkinson Pressure bar Test Method (SHPB)^{19,20)}가 있다. 그리고 최근 개발된 변형에너지를 이용하는 충격시험장치인 Strain Energy Impact Test System (SEITS)⁴⁾와 SEITS를 개량한 변형에너지 프레임 충격시험장치인 Strain Energy Frame Impact Machine (SEFIM)이 사용되고 있다.^{12,13,21)}

낙하식 충격시험장치의 경우, 다양한 크기의 시험체를 사용할 수 있는 반면에, 큰 크기의 시험체를 대상으로 충격시험을 수행할 경우 매우 높은 낙하 높이와 무거운 무게의 낙하체를 필요로 하고, 또한 구현되는 변형률 속도가 제한적인 단점을 가지고 있다. 더욱이 낙하식 충격시험장치를 이용하여 고속 변형률 속도에서의 직접인장 시험은 사실상 불가능하다. 낙하식 충격시험장치를 이용한 실험 결과는 대부분 충격시의 재료 및 구조부재의 휨 인장 거동에 대하여 보고되었다. Namman and Gopalaratnam¹⁵⁾는 낙하식 충격시험장치로 강섬유 2%가 혼입된 처짐경화 거동을 보이는 FRC에 대한 낙하실험을 수행하였다.

*Corresponding author E-mail : djkim75@sejong.ac.kr
 Received November 11, 2014, Revised February 27, 2015,
 Accepted March 16, 2015
 ©2015 by Korea Concrete Institute

또한 류두열¹⁰⁾은 낙하식 충격실험장치를 이용하여 강섬유 보강 콘크리트(SFRC)에 대한 휨 인장 충격실험을 수행하였다. 실험에 사용한 시험체는 두께 50 mm, 폭 100 mm 그리고 길이 350 mm를 가지며, 12.962 kgf의 추를 1.045 m의 높이에서 낙하하여 부재의 중앙을 타격하였다. 실험결과 0.190~0.332 /sec의 변형률 속도를 보였으며, 변형률 속도는 시험체의 압축단과, 인장단에 설치된 스트레인 게이지로 부터 얻어진 변형률을 이용하여 산정하였다. 그리고 샤르피 충격실험장치는 무게추가 달린 봉이 회전 낙하하여 시험체에 충격을 주는 장비로써 충격실험을 위한 준비시간이 짧고 충격실험에 소비되는 시간 또한 짧다. 하지만 사용되는 시험체는 노치를 주어야 하며, 파괴에너지는 측정이 가능하지만 응력-변형률 선도를 측정할 수 없다는 단점을 가지고 있다¹⁷⁾.

마지막으로, 작은 크기의 금속시편의 충격실험에 주로 사용되어온 SHPB의 경우, 시멘트 복합재료의 충격실험에 사용할 경우, 실험장치의 전 길이가 10~15 m로 실험장치의 설치 공간을 구하는 데 어려운 점이 있다. Millon et al.¹⁹⁾은 SHPB를 이용하여 직경 75 mm 그리고 길이 250 mm의 노치된 시험체를 이용하여 HPFRCCs에 대한 직접인장 충격 실험을 수행한 결과 충격 시 최대인장강도가 39.12~51.57 MPa의 범위를 가진다고 보고하였다. 그리고 Cadoni et al.²⁰⁾은 SHPB를 이용해 노치가 있는 HPFRCCs 시험체에 직접인장 충격실험을 수행하였다. 시험체의 직경과 길이는 각각 20 mm이고 시험체 중간에 5 mm의 노치를 주었다. 실험결과 충격 시 12~16 MPa의 최대인장강도를 보인다고 보고하였다. 하지만, 노치된 시험편에 대한 충격실험 결과이므로 고속 변형률 속도에서의 인장응력 변형률 선도를 제시하지는 못하였다.

HPFRCCs의 인장응력 변형률 선도는 정적 변형률 속도에서부터 40 /sec 범위까지만 몇 개의 최근 문헌들을 통하여 보고된 바 있다(Fig. 1 참조).^{2,4,6,8,12,13)}

최근 Tran and Kim²¹⁾이 개발한 SEFIM은 기존 충격시

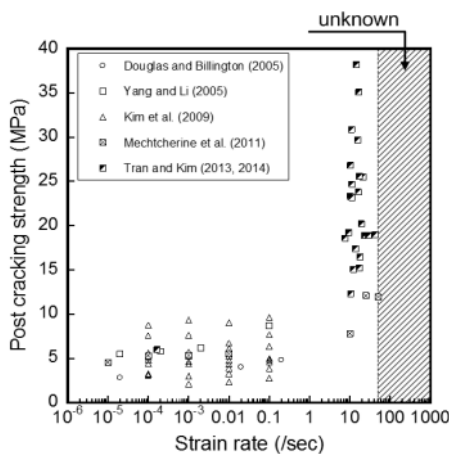
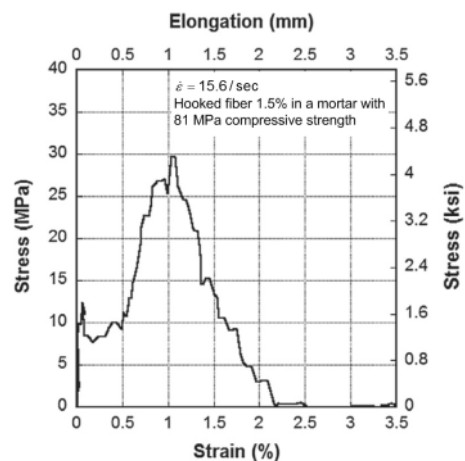


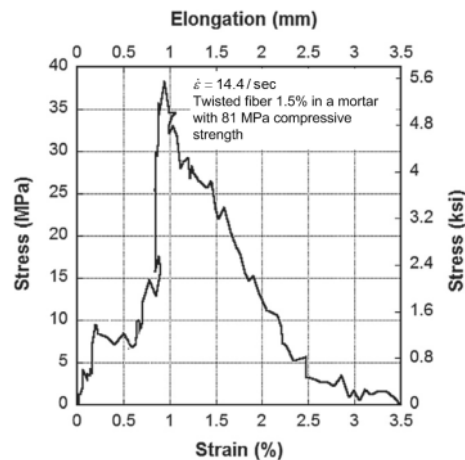
Fig. 1 Post cracking tensile strength of high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCCs) at various strain rates

험장치들, Drop Weight Method, Charpy Pendulum Method 그리고 SHPB와 비교하여 매우 작은 크기를 가짐에도 불구하고 정적 변형률 속도에서 사용된 시험체와 같은 시험체의 크기와 경계조건을 사용하여 고속 변형률 속도에서의 HPFRCCs의 직접 인장거동을 조사할 수 있다는 장점을 가진다. 최근 SEFIM을 이용하여 변형률 속도 10~40 /sec 사이의 고강도 강섬유를 사용한 HPFRCCs의 인장 응력 변형률 선도가 Tran and Kim¹³⁾에 의해 보고되었다. 압축강도 81 MPa를 가지는 모르타르에 부피 비로 흑크드 강섬유 1.5%를 혼입한 경우, 15.6 /sec 변형률 속도에서 29.7 MPa의 최종균열강도를 보였다. 또한 비틀림 강섬유 1.5%를 혼입한 경우, 14.4 /sec의 변형률 속도에서 최종균열강도 38.2 MPa를 보였다(Fig. 2 참조).

그리고 Mechtcherine et al.⁸⁾은 PVA 섬유를 보강한 HPFRCCs의 고속 변형률 속도에서의 인장 거동을 특별한 유압조절 밸브를 사용한 유압식 고속 만능재료시험기를 사용하여 조사한 바 있다. 변형률 속도가 10 /sec인 경우의 최종균열강도는 8 MPa이고, 25 /sec의 변형률 속도에서는 13 MPa의 최종균열강도, 그리고 50 /sec의 변형률 속



(a) Tensile stress versus strain (Hooked fiber)



(b) Tensile stress versus strain (Twisted fiber)

Fig. 2 Tensile stress versus strain responses of HPFRCCs with high strength steel fibers at high strain rate (Tran and Kim (2014))

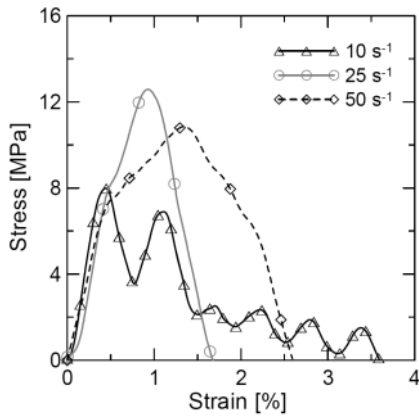


Fig. 3 Tensile stress versus strain responses of HPFRCCs with PVA fibers at high strain rates (Mechtcherine et al. (2011))

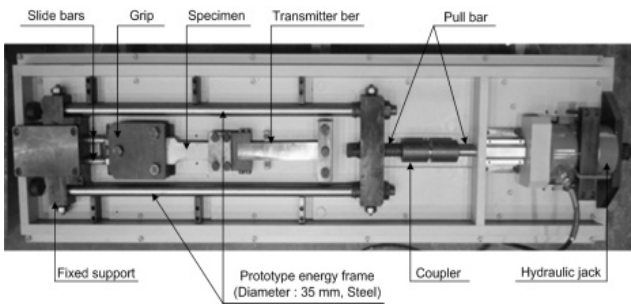


Fig. 4 Component of strain energy frame impact machine (SEFIM) (Tran and Kim (2014))

도에서는 11 MPa의 최종균열강도를 가진다고 보고하였다(Fig. 3 참조).

현재 상태의 SEFIM을 이용하여, 인장변형 측정범위의 길이 즉 계측길이가 100 mm인 HPFRCCs 시험편에 대한, 충격실험을 수행할 수 있는 HPFRCCs의 최대 최종 균열강도는 10~30 MPa의 범위이며, 구현되는 변형률 속도는 10~40 /sec에 국한되어 있다.¹³⁾

따라서, 본 연구에서는 현재 SEFIM의 변형률 속도를 향상시키기 위하여, 1) 현재 SEFIM의 에너지프레임 직경을 개선하여 변형률 속도에 미치는 영향을 평가하고, 2) 다른 파동속도 (C)와 변형률 (ϵ)을 가지는 에너지프레임의 재질 세 가지(강재, 알루미늄 그리고 티타늄)를 사용하여 동적 충격실험을 통해 변형률 속도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 탄성변형 에너지 충격시험장치를 이용한 응력파동의 속도

SEFIM은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 유압잭, 커플러, 당김봉, 트랜스미터 바, 그립, 슬라이드 바, 고정단 그리고 에너지 프레임으로 구성된다. 에너지 프레임을 이용하여 HPFRCCs의 시험체에 고속의 인장 응력파를 생성시키는 원리는 Kim et al.⁴⁾에 의해 개발된 변형에너지를

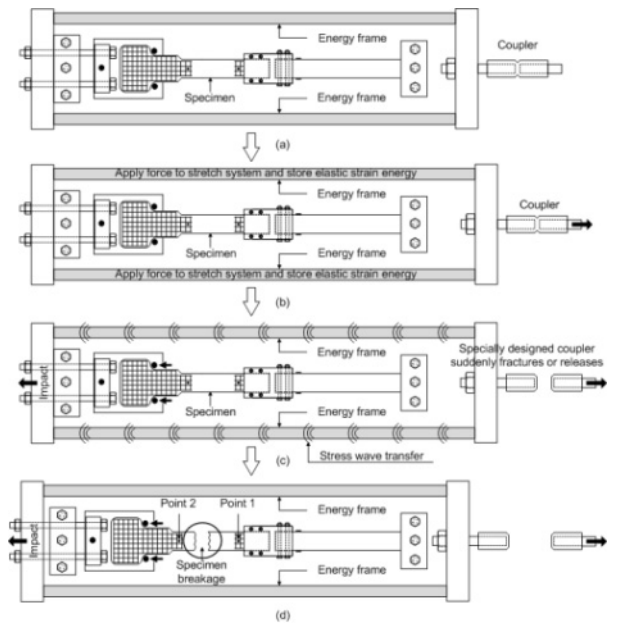


Fig. 5 Schematic illustration of the mechanism of SEFIM

이용하는 충격실험장치인 SEITS에 적용된 원리와 동일하며, Fig. 5에 그 발생 원리를 상세히 도식적으로 나타내었다. 우선, 시험체가 설치된 초기상태의 SEFIM에 (a) 당김봉을 유압잭을 이용하여 잡아 당기게 되면 당김봉과 연결된 에너지 프레임에 탄성변형 에너지가 저장되기 시작하고, (b) 당김봉을 지속적으로 계속하여 잡아당기게 되면 당김봉과 에너지 프레임 사이를 연결한 커플러에 작용되는 인장력의 크기가 일정 한도에 도달함과 동시에 순간적으로 파단되게 되어, (c) 에너지 프레임에 저장된 탄성변형에너지가 순간적으로 충격 인장 파동으로 전환되어, (d) 전환된 인장 응력파가 에너지 프레임과 슬라이드 바, 그립을 통하여 시험체에 고속의 인장 응력파를 전달하여 최종적으로 시험체를 인장파단 시키게 된다.

이러한, SEFIM을 이용한 충격실험 시 생성되는 변형률 속도는 식 (1)과 같이 시험체에 전달되는 충격속도 (V)와 시험체의 인장변위 측정범위의 길이(GL)의 함수이다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{GL} \quad (1)$$

식 (1)에 나타난 바와 같이, 변형률 속도를 증가시키기 위해서는 시험체에 작용하는 충격속도를 증가 시키거나 시험체의 계측길이를 감소시킬 수 있다. 하지만, HPFRCCs의 경우, 섬유 길이를 고려하여 시험체의 계측길이를 줄이는 데는 한계가 있다. 그 이유는 HPFRCCs는 미세 균열의 생성을 동반하는 변형경화 거동을 고속의 변형률에서 조사하기 위한 최소한의 필요 변위 측정길이를 가져야하기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 시험체의 변위 측정길이는 일

Table 1 Theoretical impact velocity and obtainable strain rate according to the different energy frame

	Unit	Energy frame (Length : 1500 mm)			
		Steel (Dia. 35 mm)	Steel (Dia. 25 mm)	Aluminium (Dia. 25 mm)	Titanium (Dia. 25 mm)
Coupler capacity	N	168730	168730	168730	168730
Area of a bar in the energy frame	mm ²	962	491	491	491
Stress of energy frame at the failure of coupler	MPa	86.7	169.9	169.9	169.9
Strain of energy frame at the failure of coupler	-	0.000433	0.000849	0.00243	0.00165
Wave velocity	m/sec	4993	4993	5092	4779
Theoretical impact velocity	m/sec	2.16	4.24	12.37	7.89
Gauge length	mm	100	100	100	100
Obtainable strain rate	sec ⁻¹	22	42	124	79

정하게 고정한 상태에서, 시험체에 전달되는 충격속도를 향상시키는 방안에 중점을 두었다. 에너지 프레임에 이용한 SEFIM의 충격속도는 아래의 식 (2)에 나타난 바와 같이, 커플러의 파단 시 에너지 프레임의 변형률(ϵ)과 에너지 프레임의 재질에 따른 탄성과 속도(C)의 함수이다.

$$V = C \times \epsilon \quad (2)$$

에너지 프레임의 직경과 재질을 변경하여 충격속도 (V)를 빠르게 할 수 있다. 우선, 동일한 용량의 커플러를 사용할 경우, 에너지 프레임 직경에 따라 다른 충격속도가 발생될 것으로 예상된다. 그 이유는, 에너지 프레임의 직경에 따라 동일한 용량의 커플러가 파단 시 에너지 프레임의 응력(σ)이 달라지게 되며, 에너지 프레임의 변형률(ϵ)도 달라지게 되므로 식 (2)에 나타난 바와 같이 다른 크기의 충격속도(V)를 가지게 된다.

또한, 에너지 프레임의 재질에 따라 에너지 프레임이 가지고 있는 본래의 성질인 탄성계수(E)와 밀도(ρ)가 다르므로 Hook's law에 의해 에너지 프레임이 가지는 변형률(ϵ)이 다르게 나타난다. 그리고 파동속도(C) 또한 다르기 때문에 커플러가 파단 될 경우에 다른 크기의 충격속도가 발생되게 된다(식 (3) 참조).

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

본 연구에서 사용된 네 가지 종류의 다른 에너지 프레임에 따른 발생 가능한 최대 이론적 충격속도와 변형률 속도를 상기의 식들 (1), (2)와 (3)을 이용하여 산정하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1에 나타난 바와 같이 커플러는 한 가지의 종류를 사용하였으며, 커플러의 용량은 168730 N이다. 따라서, 에너지 프레임 직경에 따라 커플러의 파단 시 에너지 프레임에 유발되는 인장응력과 변형률은 Table 1과 같이 다르게 된다. 또한 에너지 프레임에 사용되는 재질마다 본래 가지고 있는 탄성계수와 밀도가 다르므로 각

Table 2 Composition of matrix mixtures by weight ratio and compressive strength²²⁾

Cement (Type I)	Silica Fume	Silica Sand	Glass (Silica) Powder	Superpl asticizer	Water	f_c (MPa)
1.00	0.25	1.10	0.30	0.067	0.20	180-200

Table 3 Properties of fibers mix proportion

Fiber Type	Diameter, mm	Length, mm	Density, g/cc	Tensile strength, MPa	Elastic modulus, MPa
Long smooth (LS)	0.3	30	7.9	2580	200
Short smooth (SS)	0.2	13	7.9	2788	200

재질마다 다른 변형률과 파동속도를 가진다. 직경 35 mm 강재의 변형률 속도는 22 /sec, 직경 25 mm 강재의 변형률 속도는 42 /sec, 직경 25 mm 알루미늄의 변형률 속도는 124 /sec, 직경 25 mm 티타늄의 변형률 속도는 79 /sec (Table 1 참조).

3. 실험

3.1 재료 및 시험체 준비

정적 및 고속 변형률 속도에서의 인장거동을 조사하기 위한 시험체 제작에 사용된 매트릭스는 압축강도 200 MPa를 가지는 초고강도 콘크리트인 Ultra High Performance Concrete (UHPC)이며, UHPC의 배합비와 압축강도를 Table 2에 나타내었다. 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며, 잔골재는 입도 0.5 mm 이하의 고운 규사를 사용하였다. 또한 충전재의 평균입경은 10 μ m이며, 실리카폼과 고성능 감수제를 사용하였다. 강섬유는 길이가 30 mm

이고 직경이 0.3 mm인 장섬유(Long Smooth, LS)와 길이가 13 mm이고 직경이 0.2 mm인 단섬유(Short Smooth, SS) 섬유를 함께 각각 부피 비로 1% 씩 함께 매트릭스에 보강하였다. 사용된 강섬유의 재원을 Table 3에 상세히 나타내었다. 시험체 배합 시, 우선 절대 건조 상태의 시멘트, 실리카 폼, 잔골재 그리고 충전재를 10분 동안 충분히 건배합을 한 이후 물과 폴리카보산계 고성능 감수제를 천천히 첨가하였다. 첨가한 이후 2분 동안 계속하여 믹스를 진행하였다. UHPC의 유동성이 충분히 확보된 이후, 길이가 짧은 단섬유를 먼저 천천히 첨가한 이후에 길이가 긴 장섬유를 추가적으로 첨가하였다. 시험체 제작 시 사용된 몰드는 두께 25 mm, 폭 50 mm로 단섬유의 경우 길이 13 mm로 3차원 배열이 가능하지만, 장섬유의 경우 길이 30 mm로 1, 2차원 배열이 예상된다. 하지만 앞서 서론 부분에 설명했듯이 충격실험에 사용되는 기존 장치들을 보면 Drop Weight Method는 시험체의 크기를 키우게 되면 매우 높은 낙하높이와 무거운 무게의 낙하체를 필요로 하게 되며, 고속 변형률 속도에서의 직접인장 실험은 사실상 불가능하다. 또한 SHPB의 경우 본 논문에 사용되는 시험체의 크기와 비교하여 매우 작은 크기의 시험체를 사용함에도 불구하고 시멘트 복합재료의 충격실험에 사용할 경우 시험장치의 전 길이가 10~15 m로 시험장치의 설치 공간을 구하는데 매우 어려움이 있다. 이처럼 현재 HPRCCs를 이용하여 충격실험을 수행할 경우 강섬유가 3차원 분포가 가능한 큰 시험체를 사용하기는 어려움이 있다. 하지만 본 논문에 사용된 시험체의 경우 정적인장실험에 사용된 시험체와 같은 크기와 같은 형상을 가지는 장점이 있다.

강섬유가 함께 혼합된 배합을 준비된 몰드에 골고루

타설하였으며, 타설된 시험체를 플라스틱 시트로 덮어 상온에서 48시간 동안 보관하였다. 48시간 뒤, 타설된 시험체가 충분히 경화된 이후, 탈형된 시험체를 $90 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 고온에서 3일간 습윤양생 하였다. 고속 변형률 속도에서의 충격 시험체의 경우 정적 시험체와 같은 몰드를 이용하여 제작되었으며, 양생이 끝난 후 한쪽 단면을 일정하게 잘라내었다. 정적 인장실험과 충격 인장실험에 사용된 시험체의 형상을 각각 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다.

3.2 실험방법

Fig. 6에 정적 변형률 속도에서의 인장 시험체와 실험 장치를 나타내었다. 시험체의 단면은 25 mm × 50 mm인 덤벨형 시험체를 사용하였으며, 시험체의 신장량을 측정하기 위해 계측길이 100 mm의 범위에서 변위를 측정하였다. 정적 직접인장 실험 시 시험체 양단의 경계조건은 힌지-힌지를 사용하였으며, 시험체 양측에 설치된 두 개의 LVDT를 이용하여 신장량을 측정하였다. 직접인장실험장치에 설치된 로드셀로부터 인장 하중을 측정하였으며, 실험에 사용된 UTM의 기계변위 속도는 1 mm/min.를 적용하였다. 인장 변위 측정 시 범위는 100 mm로, 정적 변형률 속도는 0.000167 /sec가 적용되었다.

충격실험에 사용된 에너지 프레임은 다른 직경(35 mm와 25 mm)을 가지는 강재로 된 에너지 프레임 두 가지와 같은 직경(25 mm)의 다른 재질(알루미늄, 티타늄)을 가지는 에너지 프레임 두 가지 이다. 이와 같이 한 가지 재질의 다른 직경을 가지는 에너지 프레임과 같은 직경의 다른 성질을 가지는 재질로 된 에너지 프레임을 사용한 이유는 에너지 프레임의 직경에 따라 에너지 프레임이 가지는 응력과 변형률이 다르며, 에너지 프레임의 재질에 따라 에너지 프레임이 가지는 변형률과 파동속도가 다르기 때문이다(Table 1 참조).

고속 변형률 속도에서의 HPRCCs의 인장거동을 평가하는데 사용된 시험체의 형상과 실험장치를 Fig. 7에 나타내었다. 충격실험에 사용된 시험체는 정적실험에 사용된 시험체와 같은 단면을 가지며, 계측길이 그리고 경계조건 또한 정적실험에 사용된 경우와 같은 조건이 사용되었다. 정적실험에 사용된 힌지-힌지의 경계조건을 사용하면 강봉의 탄성계수나 직경이 동일한 재료임에도 강봉별로 가지는 미소한 차이로 인한 양쪽 강봉간 비균형적인 인장력이 발생 하더라도 시험체와 시험체를 고정하는 편이 자유롭게 움직이므로 두 개의 고정편이 시험체에 고정되기 전까지 모멘트의 발생을 방지할 수 있다.

시험체는 트랜스미터 바에 직접 연결되며 시험체의 끝단은 그립에 의해 슬라이드 바와 연결된다. SEFIM을 이용한 충격 실험 시 작용되는 원리는 Fig. 5에 상세히 나타내었다. 그리고, 앞서 언급한 바와 같이 네 가지 종류의 다른 에너지 프레임을 사용하여 충격실험을 수행

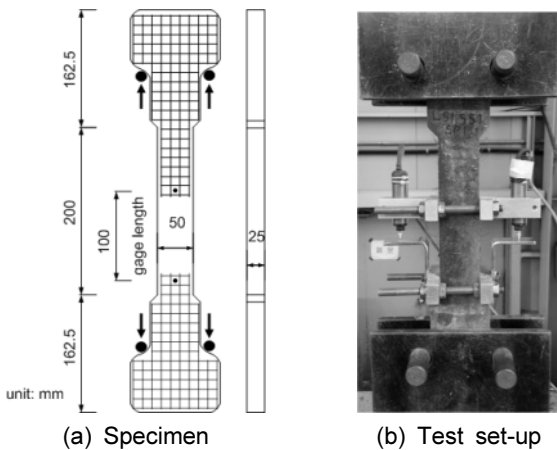


Fig. 6 Geometry of specimen and set-up for static test

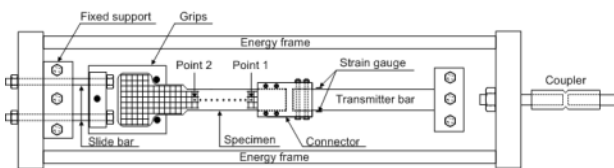


Fig. 7 Geometry of specimen and set-up for high rate tests

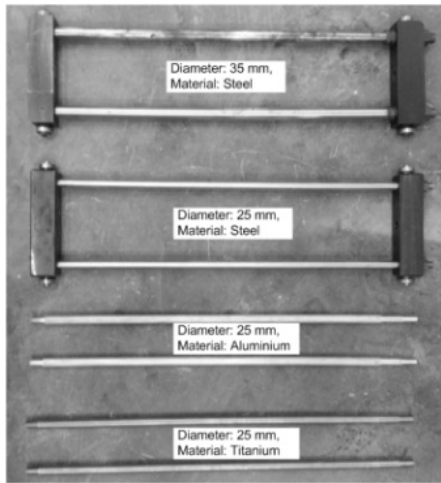


Fig. 8 Geometry of energy frames

하였다(Fig. 8 참조).

충격 실험 시 실험체의 인장응력은 트랜스미터 바의 양면에 부착된 두 개의 스트레인 게이지로부터 측정된 두 개의 응력이력을 평균하여 산정하였으며, 인장응력을 산정하기 위한 스트레인 게이지는 외부의 DAQ (Data Acquisition, PXI 4220) 시스템으로 연결되며, 측정 가능한 최대 데이터 샘플링 속도는 100 kS/s/ch이고, 본 연구에 사용된 데이터 샘플링 속도는 50 kS/s/ch가 사용되었다. 고속 변형률 속도에서의 인장 변형률은 고속카메라로부터 촬영된 영상이미지의 분석을 통하여 얻어진다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 시험체의 표면에 10 mm 간격으로 11개의 점을 표시한다. 이 11개 점들의 상대변위를 이미지의 영상 해석을 통하여 변형률을 산정하게 된다. 그리고, 응력과

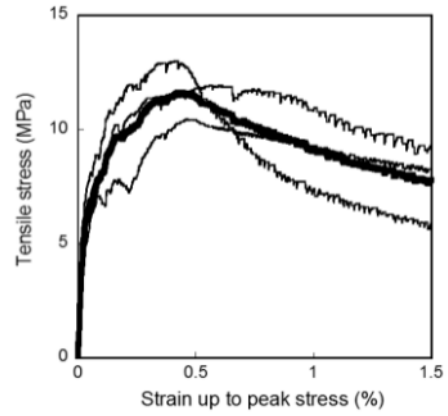


Fig. 9 Tensile stress versus strain reponse of HPFRCCs blending long smooth (LS) 1 % and short smooth (SS) 1 % steel fibers at static rate (0.000167 /sec)

변형률 이력의 시작 시간을 일치하도록 조정하여 고속 변형률 속도에서의 HPFRCCs의 인장응력 변형률 선도를 구하게 된다. Tran and Kim²¹⁾은 에너지 프레임 충격시험 장치를 이용하여 고속 변형률 속도에서 순수 HPFRCCs의 인장응력-변형률 선도를 얻는 방법에 대한 선행연구를 수행한바 있다. 그 결과 본 연구에서 사용한 장치와 동일하게 시험체의 단면과 동일한 단면을 가지는 트랜스미터 바를 사용하여 시험체 응력을 측정하는 것이 바람직하다고 보고한 바 있다.

4. 실험 결과

장섬유 1%와 단섬유 1%를 함께 혼입한 HPFRCCs의

Table 4 Test result

Test	Strain rate (s ⁻¹)	Specimen	Post cracking strength		Strain capacity		Number of cracks		Peak toughness		
			MPa	DIF	%	DIF	EA	DIF	kJ/m ³	DIF	
Static test	0.000167	SP1	11.9	-	0.6	-	10	-	59.7	-	
		SP2	13.0	-	0.4	-	12	-	45.8	-	
		SP3	10.4	-	0.5	-	6	-	37.6	-	
		Ave.	11.8	1	0.5	1	9	1	47.7	1	
Impact tests (different energy frames)	Steel Dia. 35 mm	23	SP1	32.0	2.7	1.7	3.4	5	0.8	253.0	5.3
		14	SP2	37.0	3.1	0.8	1.6	6	1.0	146.0	3.1
		22	SP3	32.0	2.7	3.3	6.6	7	0.8	394.3	8.3
	Steel Dia. 25 mm	39	SP1	20.0	1.7	4.2	8.4	8	1.3	357.9	7.5
		30	SP2	26.7	2.6	3.0	6.0	6	1.0	381.2	8.0
		19	SP3	46.5	4.0	1.7	3.4	10	1.7	338.9	7.1
	Aluminium Dia. 25 mm	36	SP1	46.5	4.0	1.7	3.4	7	1.2	476.7	10.0
		35	SP2	32.2	2.7	1.8	3.6	9	1.5	390.7	8.2
		51	SP3	40.1	3.4	1.5	3.0	6	1.0	261.6	5.5
	Titanium Dia. 25 mm	39	SP1	39.4	3.3	2.6	5.2	10	1.7	431.1	9.0
		55	SP2	47.5	4.0	2.4	4.8	8	1.3	523.7	11.0
		72	SP3	24.2	2.1	3.0	6.0	13	2.2	317.5	6.7

정적 변형률 속도에서의 인장응력 변형률 선도를 Fig. 9에 나타내었다. 우선, 모든 HPRCCs 시험편들이 직접 인장시험에서 다수의 미세균열(8~10개) 들을 동반하는 변형경화 거동을 나타내었고, 3개 인장응력 변형률 선도들을 평균한 인장응력 변형률 선도는 굽은 선으로 나타내었다.

정적실험 결과를 충격실험 결과들과 정량적으로 비교 분석 하기 위하여, 평가된 초고강도 섬유보강 콘크리트의 인장거동을 최종균열강도, 변형능력, 균열 수 그리고 에너지 흡수능력과 같은 인장거동인자들에 대하여 Table 4에 나타내었다. 정적 변형률 속도에서 본 연구에서 조

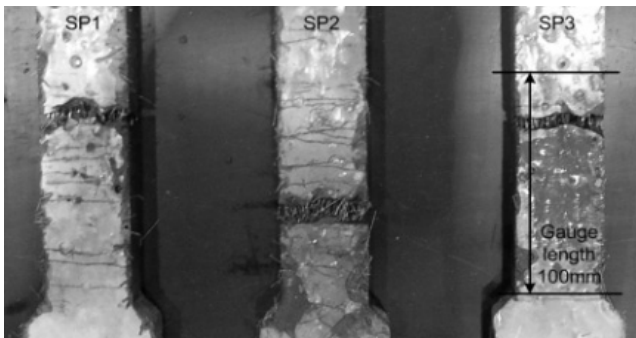
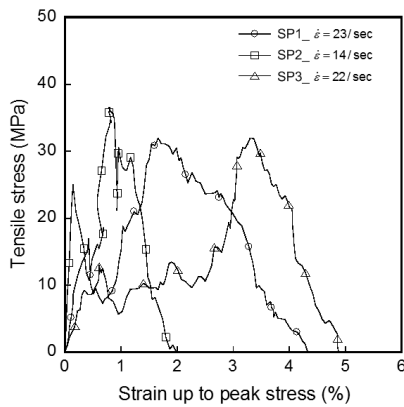


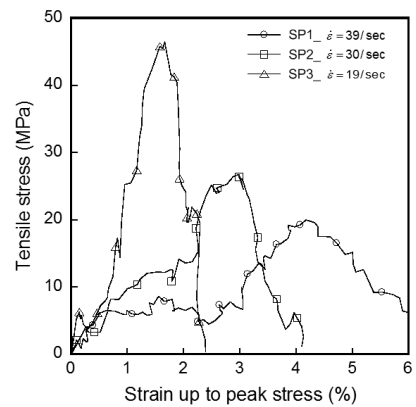
Fig. 10 Cracking behavior of HPRCCs, blending LS 1% and SS 1% steel fibers, tested at static rate

사한 장섬유 1%와 단섬유 1%를 함께 혼입한 초고강도 섬유보강 콘크리트의 최종균열강도는 11.8 MPa이다. 그리고, 변위 측정범위 이내에서 발생한 미세균열의 갯수는 평균 9개이고, 변형능력과 에너지 흡수능력은 각각 0.5%와 47.7 kJ/m³이다. 정적 변형률 속도에서의 UHPRCCs의 다수 균열생성과 시험체의 변위 측정범위 내에서의 파단현상을 나타내는 사진을 Fig. 10에 제시하였다. 시험체의 파단위치의 경우 SP1과 SP3는 같은 위치에서 파단되었으며, SP2의 경우 다른 위치에서 파단 되었으나, 모든 시험체가 변위 측정범위 100 mm 안에서 파단 되어 측정된 인장응력-변형률 선도에 미치는 영향은 미비한 것으로 판단된다.

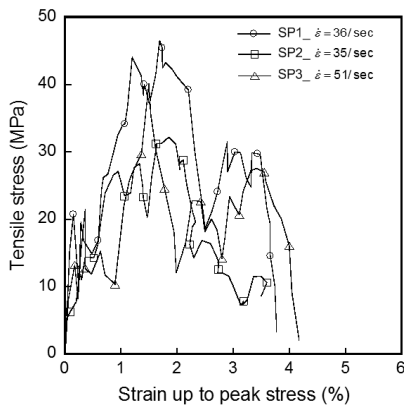
그리고, 앞서 설명한 SEFIM을 이용한 HPRCCs의 고속 변형률 속도에서의 인장응력-변형률 선도는 Fig. 11에 나타내었다. 에너지 프레임의 직경과 재질을 달리하여 충격 시 인장실험을 수행한 결과를 사용된 에너지 프레임에 따라 각각 Fig. 11(a)에서 Fig. 11(d)에 나타내었다. 에너지 프레임 재질이 강재인 경우, Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)에 프레임의 직경이 35 mm와 25 mm를 사용한 경우에 대해 각각 나타내었으며, 에너지 프레임의 재질이 알루미늄 그리고 티타늄인 경우 프레임의 직경이 25 mm 이고 Fig. 11(c)와 Fig. 11(d)에 나타내었다. 모든 시험체는 정적인장 실험에 사용된 시험체와 같이 동일한 변위



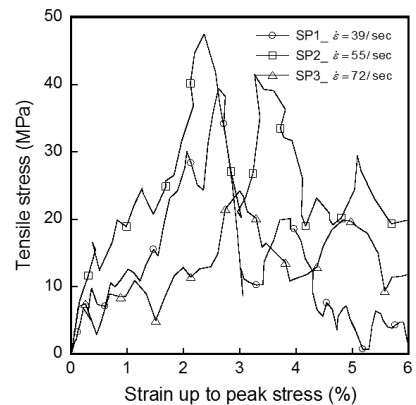
(a) Steel energy frame (Dia. = 35 mm)



(b) Steel energy frame (Dia. = 25 mm)



(c) Aluminium energy frame (Dia. = 25 mm)



(d) Titanium energy frame (Dia. = 25 mm)

Fig. 11 Tensile stress versus strain response of HPRCCs blending LS 1% and SS 1% steel fibers at high strain rate

측정범위 길이 100 mm를 사용하였다.

정적 인장실험에 사용된 시험체와 동일한 시험체를 사용하여 직경 35 mm의 강재로 된 에너지 프레임을 사용하여 충격실험을 수행한 결과를 Fig. 11(a)에 나타내었다. 고속 변형률 속도에서도 HPFRCCs 시험체들은 모두 변형경화 거동을 나타내었다. 정적인장 실험결과와 비교하여, 고속 변형률 속도에서 인장강도, 연성도 그리고 에너지 흡수능력이 모두 증가하는 경향을 보였으며, 에너지 흡수능력의 산정은 인장응력과 변형률의 그래프에서 최종 인장응력까지의 면적으로 산정되었다.¹²⁾ 또한 변형률의 경우 정적인장실험과 충격인장실험 모두 동일한 방법으로 산정되었다. 정적인장실험의 경우 Fig. 6에 나타낸바와 같이 Gauge Length 100 mm에 범위에 대한 신장량을 두 개의 LVDT로써 측정하여 Gauge Length로 나뉜중으로써 산정되며, 충격인장 실험의 경우 또한 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 시험체의 Gauge Length 100 mm 범위의 point 1과 point 2에서의 신장량을 고속카메라로부터 산정하여 Gauge Length로 나뉜중으로써 산정된다.

고속 변형률 속도에서의 HPFRCCs의 인장거동 인자들을 살펴보면 강재 직경 35 mm의 에너지 프레임을 사용한 경우 14~23 /sec의 변형률 속도에서 충격실험을 진행할 수 있었다. 이 변형률 속도에서 본 연구에서 조사된 HPFRCCs는 32~37 MPa의 최종균열강도를 보였고, 0.8~3.3%의 변형능력, 146~394.3 kJ/m³ 범위의 에너지 흡수능력을 나타내었다.

강재로 된 에너지 프레임의 직경을 25 mm로 줄인 경우, 19~39 /sec 변형률 속도를 나타내어, 35 mm 강재 에너지 프레임을 사용한 경우와 비교하여 충격속도가 빨라졌다. 실험을 통해 얻어진 인장응력-변형률 선도를 Fig.

11(b)에 나타내었다. 앞서 설명한 경우와 마찬가지로, 고속 변형률 속도에서 모든 HPFRCCs 시험체들이 모두 변형경화 거동을 보였으며 정적 인장거동과 비교하여 최종균열강도와 변형능력 그리고 에너지 흡수능력은 증가하는 경향을 보였다. 하지만, Fig. 11(b)에 나타낸 바와 같이 최종균열강도와 변형능력의 분산도가 상당히 크게 나타났다. 25 mm 강재 에너지 프레임을 이용하여 실험한 고속 변형률 속도에서의 HPFRCCs의 인장인자들의 경우 19~39 /sec의 변형률 속도에서 20.0~46.5 MPa의 최종균열강도, 1.7~4.2%의 변형능력, 그리고 338.9~381.2 kJ/m³의 에너지 흡수능력을 보였다.

한편, 직경이 25 mm인 알루미늄과 티타늄 에너지 프레임을 사용하여 얻은 고속 변형률 속도에서의 HPFRCCs의 인장응력-변형률 선도를 Fig. 11(c)와 11(d)에 각각 나타내었다. 두 경우 모두, 강재 에너지 프레임을 사용한 경우와 마찬가지로, 고속 변형률 속도에서 HPFRCCs가 모두 변형경화 거동을 나타내었다. 또한, HPFRCCs 시험편 모두, 정적 변형률 속도에서와 비교하여, 고속 변형률 속도에서 더 높은 최종균열강도, 변형능력 그리고 에너지 흡수능력을 나타내었다. 알루미늄 에너지 프레임을 사용한 경우, 조사된 변형률 속도의 범위는 35~51 /sec이고, 이때의 HPFRCCs 시험편들의 최종균열강도는 32.2~46.5 MPa, 변형능력은 1.5~1.8%, 그리고 에너지 흡수능력은 261.6~476.7 kJ/m³의 값을 나타내었다. 그러나 알루미늄 재질의 프레임의 경우 다른 재질의 에너지 프레임과 달리 에너지 프레임 자체가 파단되는 현상을 보였다 (Fig. 12 참조). 그리고, 티타늄 에너지 프레임을 사용한 경우, 39~72 /sec의 변형률 속도에서의 HPFRCCs의 인장응력 변형률-선도를 구할 수 있었다. 이 변형률 속도에서, HPFRCCs의 최종균열강도는 24.2~47.5 MPa, 변형능력은 2.4~3.0%, 그리고 에너지 흡수능력은 317.5~523.7 kJ/m³로 나타났다.

Fig. 13에 나타낸 바와 같이 강재 에너지 프레임의 직경이 35 mm에서 25 mm로 감소한 경우 변형률 속도가 향상되었고, 에너지 프레임의 재질을 강재에서 알루미늄과 티타늄으로 변경함에 따라서 변형률 속도가 크게 향상되었다.

그리고, 각 에너지 프레임을 사용하여 실험한 고속 변형률 속도에서의 HPFRCCs의 균열 거동을 각각의 사용된 에너지 프레임 별로 Fig. 14에 나타내었다. 모든 충격 시험편들의 최종 균열이 변위측정범위 100 mm안에서 발생하였다. 미세균열의 수는 변위측정범위 내에서만 산정하였으며, 시험체의 전면과 후면의 균열 수를 산정하여 그 평균값을 사용하였다. 강재 에너지 프레임의 직경 35 mm의 경우 균열갯수의 범위는 5~7개이며, 직경 25 mm의 강재 에너지 프레임을 사용한 경우 6~10개로 프레임의 직경이 작아짐으로써 균열 수가 증가하는 결과를 보였다. 또한 프레임의 세 가지 재질인 강재, 알루미늄 그리고 티타늄의 경우 각각 6~10개, 6~9개 그리고 8



Fig. 12 Breakage shape of energy frame (Aluminium)

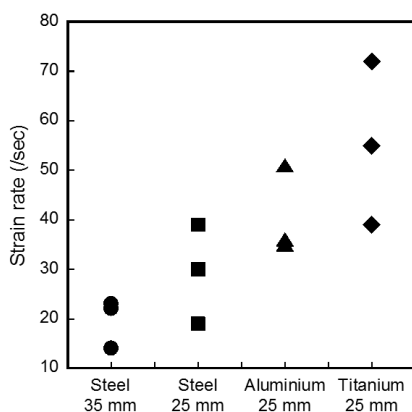
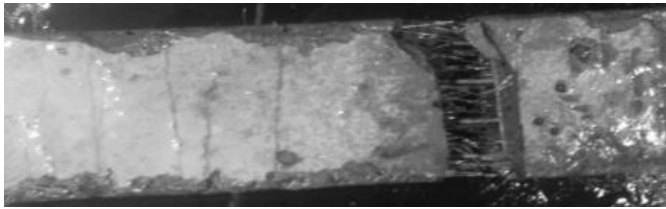
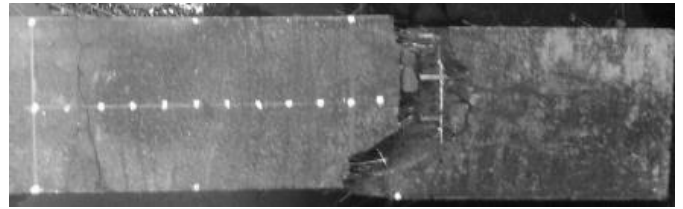


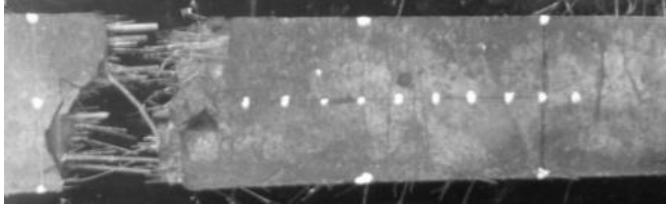
Fig. 13 Strain rates generated by using different energy frames



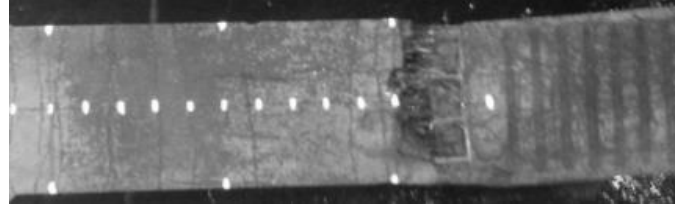
(a) Steel energy frame (Dia. = 35 mm)



(b) Steel energy frame (Dia. = 25 mm)



(c) Aluminium energy frame (Dia. = 25 mm)



(d) Titanium energy frame (Dia. = 25 mm)

Fig. 14 Cracking behavior of HPFRCCs, blending LS 1% and SS 1% steel fibers, at high strain rate (14-72 /sec) using different energy frames

~13개로 프레임의 재질 티타늄의 경우 다른 재질보다 많은 균열을 생성하였지만 강재와 알루미늄의 경우 균열 수는 동일하였다.

5. 고찰

5.1 에너지 프레임의 직경이 미치는 영향

강재 에너지 프레임의 직경을 35 mm에서 25 mm로 변경함에 따라서, 충격실험 시 얻어진 변형률 속도를 Table 4와 Fig. 13에 비교하여 나타내었다. 직경이 35 mm인 강재 에너지 프레임을 사용한 경우의 변형률 속도는 14~23 /sec 인데 비해, 직경이 25 mm 인 강재 에너지 프레임을 사용 시 19~39 /sec의 변형률 속도를 나타내었다. 따라서, 에너지 프레임의 직경이 감소할수록 변형률 속도가 증가하였다. 그 이유는 동일한 용량의 커플러를 사용할 경우, 에너지 프레임의 직경 변화가 에너지 프레임에 저장되는 탄성변형 에너지의 크기에 직접적인 영향을 미치는 것과 밀접한 관련이 있다.

SEFIM을 이용하여 충격실험을 수행 시, 에너지 프레임에 직접 연결된 당김봉을 긴장하게 되면 당김봉과 에너지 프레임 중간에 연결되어 있는 커플러가 파단 될때 까지 에너지 프레임에 탄성변형 에너지가 저장되게 된다. 동일한 용량의 커플러를 사용하는 경우, 에너지 프레임의 직경에 따라 저장되는 탄성변형 에너지가 다르게 나타난다. 에너지 프레임의 직경에 따라 저장되는 탄성 변형 에너지를 비교하기 위해, 실험에 사용된 것과 동일한 168.73 KN 용량의 커플러를 사용시, Fig. 15(a),에서 15(d)에 에너지 프레임의 직경 및 재질에 따른 에너지 프레임의 응력-변형률 그래프를 나타내었다.

실험에 사용된 커플러의 재질은 강재이며 항복강도는 930 MPa이다. 전체 외경은 65 mm이고 내경은 37 mm이다. 당김봉과 에너지 프레임에 연결하기 전 커플러의 중

간위치에서 12.5 mm의 노치를 주었다. 따라서, 커플러의 면적은 181.43 mm²이며 항복강도는 930 MPa 이므로 커플러에 저장되는 힘은 168.73 KN으로 산정된다. 그러므로 직경 35 mm와 25 mm의 강재 에너지 프레임에 저장되는 응력은 각각 86.7 MPa과 169.9 MPa이다. 그리고, 강재의 탄성계수는 200100 MPa 이므로 직경 35 mm와 25 mm의 강재 에너지 프레임의 변형률은 각각 0.0433%와 0.0849%이다. 따라서, Fig. 15(a)와 15(b)에 나타난 응력-변형률 선도의 면적에 에너지 프레임의 부피를 고려하면, 직경이 35 mm와 25 mm 인 강재 에너지 프레임에 저장되는 탄성변형 에너지는 각각 27 J와 53 J이다. 이처럼 에너지 프레임의 직경이 작게 개선됨으로써 더욱 많은 탄성변형 에너지가 저장되고 이로 인해 변형률 속도가 증가되었다.

5.2 에너지 프레임의 재질이 미치는 영향

직경 25 mm로 동일한 직경을 가지는 강재, 알루미늄 그리고 티타늄의 재질의 세 가지 에너지 프레임을 사용하여 실험한 HPFRCCs의 변형률 속도를 Table 4와 Fig. 13에 나타내었다. 직경 25 mm의 강재 에너지 프레임을 이용한 경우 19~39 /sec의 변형률 속도를 보였으며, 동일한 직경을 가지는 알루미늄 그리고 티타늄의 재질을 이용한 경우 각각 35~51 /sec와 39~72 /sec의 변형률 속도를 나타내어, 티타늄 에너지 프레임의 경우 가장 빠른 변형률 속도를 생성한 반면에 강재 에너지 프레임이 상대적으로 가장 느린 변형률 속도를 나타내었다. 이러한 변형률 속도의 차이는 에너지 프레임 재질 별로 가지고 있는 고유의 성질인 탄성과 속도가 다르고 또한 에너지 프레임에 저장되는 탄성변형 에너지의 차이에 기인한다고 판단된다. 앞서 언급한 바와 같이 동일한 용량 168.73 kN의 커플러를 사용한 경우, 직경 25 mm의 에너지 프레임에 저장되는 응력은 169.9 MPa이다. 에너지 프레임

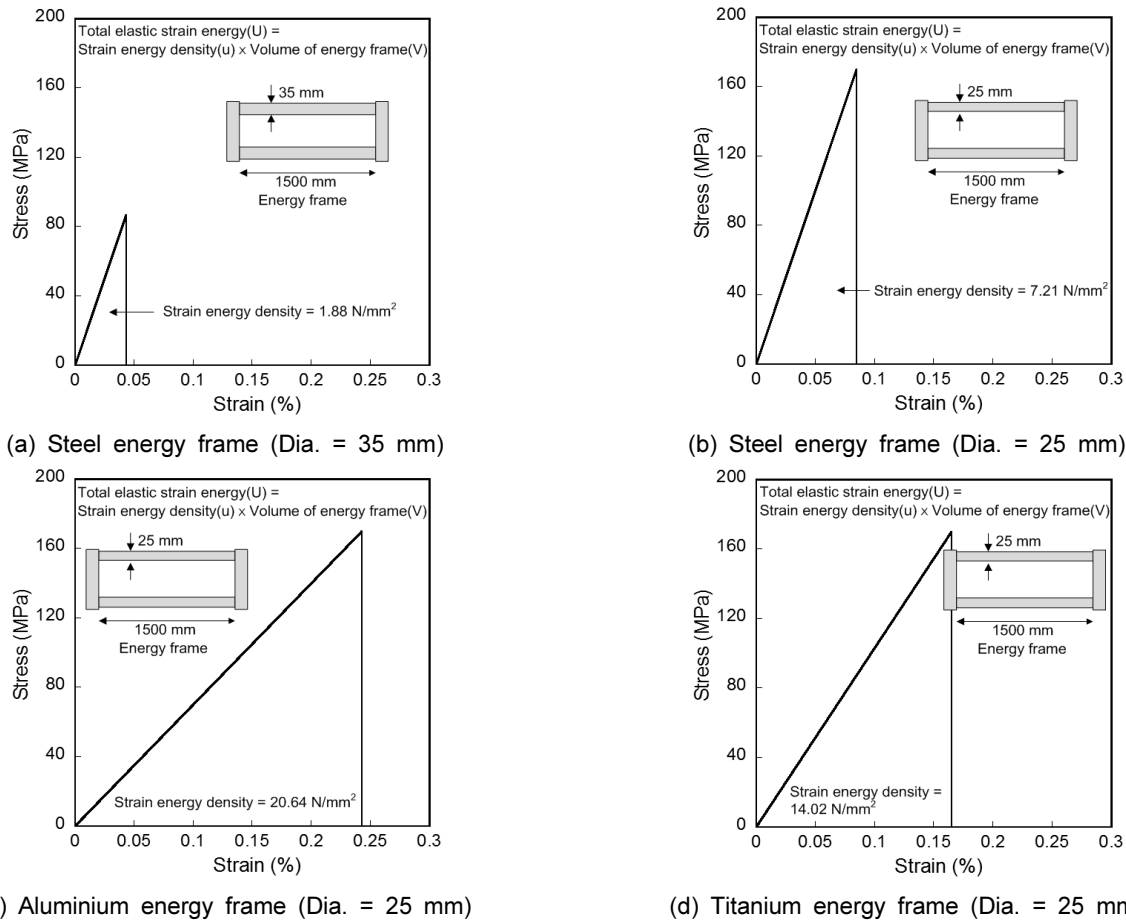


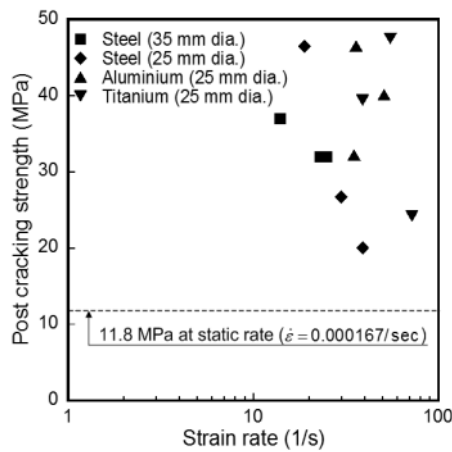
Fig. 15 Effect of different energy frames on the amount of stored elastic strain energy

에 사용된 강재, 알루미늄 그리고 티타늄의 재질은 각각 다른 탄성계수(200100 MPa, 115996 MPa 그리고 70000 MPa)를 가진다. 따라서, 커플러의 파단 시 각각의 강재, 알루미늄 그리고 티타늄 에너지 프레임의 변형률은 각각 0.0849%, 0.243% 그리고 0.165%이다. 따라서, Fig. 15(b)에서 15(d)에 나타난 바와 같이 강, 알루미늄 그리고 티타늄 에너지 프레임에 각각 53 J, 152 J 그리고 103 J의 탄성변형 에너지가 저장된다. 이처럼 에너지 프레임의 재질 별로 가지고 있는 다른 성질로 인해 에너지 프레임에 저장되는 탄성변형 에너지가 다르며, 에너지 프레임에 저장되는 탄성변형 에너지가 높을수록 빠른 변형률 속도를 생성하였다. 하지만 알루미늄 에너지 프레임의 경우 이론식에 의해 산정된 변형률 속도(Table 1)는 가장 빠른 경향을 보였으나 충격실험 결과는 티타늄 에너지 프레임을 사용한 경우보다 느린 변형률 속도를 보였다. 그 이유는 Fig. 12에 나타난바와 같이 알루미늄 에너지 프레임은 실험 중 에너지 프레임이 파단되는 현상을 보였다. 에너지 프레임이 파단 되었다는 것은 이미 에너지 프레임에 작용되었던 응력으로 인해 탄성영역을 벗어나 소성변형을 일으켰다는 것이며, 이로 인해 알루미늄 에너지 프레임의 경우 다른 재질의 에너지 프레임과 달리 본래 가지고 있던 성질을 발현하지 못한 것으로 판단된다.

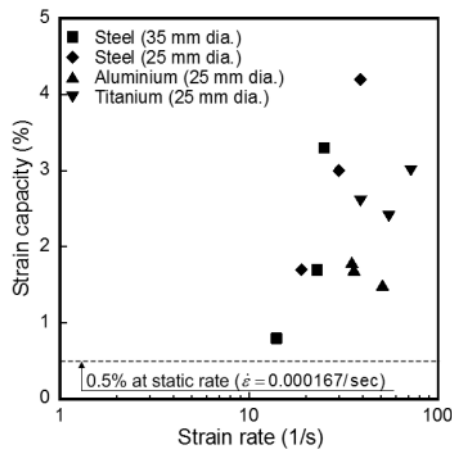
5.3 변형률 속도가 HPFRCCs의 인장인자에 미치는 영향

네 가지 종류의 다른 에너지 프레임을 사용하여, 고속 변형률 속도 14~72 /sec에서의 하이브리드형 HPFRCCs의 인장거동을 평가하였다. 다른 직경과 재질을 가지는 네 종류의 에너지 프레임을 함께 사용하여, 동일한 커플러 용량을 사용함에도 불구하고, 기존 결과보다 더 넓은 범위의 고속 변형률 속도에서의 HPFRCCs의 인장거동을 평가할 수 있었다. 변형률 속도가 HPFRCCs의 최종균열강도, 변형능력, 그리고 에너지 흡수능력에 미치는 영향을 Fig. 16(a), 16(b) 그리고 16(c)에 각각 나타내었다. 변형률 속도 민감도의 평가를 위해 동적증가계수(Dynamic Increase Factor, DIF)를 Table 4에 제시하였다.

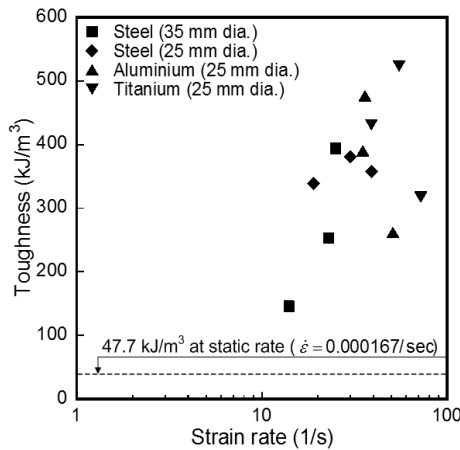
에너지프레임 네 가지 종류를 사용하여 산정된 최종 균열강도를 Fig. 16(a)에 나타내었다. 정적인장실험으로부터 산정된 최종균열강도는 11.8 MPa이며 점선으로 표시하였다. 변형률 속도 0.000167 /sec로 수행된 정적인장 실험 결과의 최종균열강도와 비교하여 높은 변형률 속도를 가지는 네 가지 종류의 에너지 프레임을 사용하여 산정된 최종균열강도가 월등히 높은 경향을 보였으며 최종균열강도의 DIF 수치를 보면 정적인장실험에 비해 1.7~4.0배 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) Post cracking strength



(b) Strain capacity



(c) Toughness

Fig. 16 Tensile parameters of HPRCCs, blending LS 1% and SS 1% steel fibers, at high strain rates (14-72 /sec)

또한 Fig. 13에 나타내었듯이 변형률 속도는 에너지 프레임의 직경과 재질에 직접적인 영향을 받으며, 변형률 속도의 증진 효과와 같이 Fig. 13(a)의 최종균열강도도 증가하는 경향을 보였다. 이처럼 변형률 속도에 의해 최종균열강도는 매우 민감한 반응을 보였다.

정적인장실험은 0.000167 /sec로 매우 느린 변형률 속

도로 실험이 수행된다. 그러므로 시험체에 인장하중이 작용하면 계측길이 범위에서 천천히 하중이 적용되고 가장 취약한 부분부터 균열이 발생하며, 파단되는 현상을 보인다. 예를 들면, 강섬유와 매트릭스의 부착력이 가장 취약한 부분, 재료의 뭉침 현상이 발생된 부분, 가장 큰 공극이 있는 부분 등 가장 취약한 부위에서부터 균열이 발생된다. 하지만 높은 변형률 속도를 가지는 충격실험의 경우 가장 취약한 부위에서 균열이 생성되기는 하지만, 정적인장 실험과 달리, 균열의 성장속도보다 응력의 전달 속도가 빨라서 시험체 전체에 걸쳐 많은 힘이 전달됨으로 높은 강도를 가진다.

정적 및 충격실험으로부터 산정된 변형능력은 Fig. 16(b)에 나타내었다. 점선으로 표시한 정적인장실험으로부터 산정된 변형능력은 0.5%이고, 네 가지 종류의 에너지 프레임을 사용하여 산정된 변형능력은 0.8~4.2%의 범위로 정적인장 실험결과에 비해 상승하는 경향을 보였으며, DIF의 수치를 보면 변형능력의 상승범위는 1.6~8.4배로 상승하는 경향을 보였다. 그리고 Fig. 16(b)에 나타내었듯이 변형률 속도 10~100 /sec 범위를 보면 변형률 속도가 증가되면서 변형능력 또한 증가하는 경향을 보였다.

HPFRCCs인자 중 에너지 흡수능력은 충격실험으로부터 산정된 응력-변형률 선도에서 최종균열강도까지의 면적으로 산출된다. 네 가지 종류의 에너지 프레임을 이용함으로써 산정된 에너지 흡수능력 DIF는 정적인장 실험에서 보인 47.7 kJ/m³과 비교하여 다른 직경(35 mm, 25 mm)의 강재로 된 에너지 프레임의 경우 각각 3.1~8.3 배와 7.1~8.0배로 증가하였으며, 같은 직경의 다른 재질(알루미늄, 티타늄)로 된 에너지 프레임의 경우 각각 5.5~10.0배 그리고 6.7~11.0배 증가하는 경향을 보였다. 또한 Fig. 16(c)에 나타낸 바와 같이 변형률 속도가 증가하면서 에너지 흡수능력이 증가하는 경향을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존 SEFIM의 충격속도(즉, 변형률 속도)를 향상시키기 위해 에너지 프레임의 직경과 재질을 달리하여 그 영향을 평가하였다. 또는 강섬유와 단섬유를 혼합한 하이브리드형 HPRCCs의 인장거동을 고속의 변형률 속도 14~72 /sec에서 평가하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

네 가지 종류의 에너지 프레임을 이용하여 보다 넓은 범위 14~72 /sec의 변형률 속도를 생성하였다. 우선, 네 가지 종류의 에너지 프레임을 이용하여 보다 넓은 범위의 고속 변형률 속도에서의 HPRCCs의 인장거동을 성공적으로 평가하였다. HPRCCs는 고속 변형률 속도에서도 변형경화 거동을 보였으며, 정적 변형률 속도 0.000167 /sec에서 산정된 인장인자들에 비해 최종균열강도는 1.7~4.0 배, 변형능력은 1.6~8.4배 그리고 에너지 흡수능력은 3.1~11.0배 증가 된 거동을 나타내었다. 한편, 동일한 용량의

커플러를 사용 시, 에너지 프레임의 직경을 작게 개선하여 커플러 파단 시 에너지 프레임의 변형률과 저장된 탄성변형 에너지의 양을 증대함으로써 변형률 속도를 향상시킬 수 있었다. 마지막으로, 에너지 프레임의 재질 중 가장 높은 탄성과 속도와 많은 크기의 탄성변형 에너지를 저장할 수 있는 티타늄 합금의 경우 강재, 알루미늄, 그리고 티타늄 중에서 가장 높은 변형률 속도 72 /sec 를 생성하였다.

감사의 글

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

References

- Li, V. C., Wang, S., and Wu, C., "Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)", *ACI Materials Journal*, Vol.98, 2001, pp.483-492.
- Yang, E. and Li, V.C., "Rate dependence in engineered cementitious composites", Proceedings, HPRCC-2005 international workshop. Honolulu, Hawaii, USA, 2005.
- Parant, E. P., et al., "Strain rate effect on bending behavior of new ultra-high-performance cement based composite", *ACI Materials Journal*, Vol.104, No.5, September, 2007.
- Kim, D. J., Tawil, S. E., and Naaman, A. E., "Rate-dependent tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites", *Materials and Structures*, Vol.42, 2009, pp.399-414.
- Wille, K., Tawil, S. E., and Naaman, A. E., "Strain Rate Dependent Tensile Behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete", High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6. Springer Netherlands, 2012, pp.381-387.
- Douglas, K. S. and Billington, S. L., "Rate dependence in high-performance fiber reinforced cementbased composites for seismic applications", Proceedings, HPRCC-2005 international workshop, Honolulu, Hawaii, USA, 2005.
- Kim, Y. W., et al., "Flexural and Impact Resisting Performance of HPRCCs Using Hybrid PVA Fibers", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.3, 2009, pp.705-712.
- Mechtcherine, V., et al., "Behaviour of strain-hardening cement-based composites under high strain rates", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.9, No.1, 2011, pp.51-62.
- Yoo, D. Y., et al., "Evaluating Impact Resistance of Externally Strengthened Steel Fiber Reinforced Concrete Slab with Fiber Reinforced Polymers", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.3, 2012, pp.293-303.
- Yoo, D. Y., et al., "Enhancement of Impact Resistance of Layered Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete Beam", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.4, 2012, pp.369-379.
- Nam, J. S., et al., "Evaluation on the Impact Resistant Performance of Fiber Reinforced Concrete by High-Velocity Projectile and Contacted Explosion", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.25, No.1, 2013, pp.107-114.
- Tran, K. T. and Kim, D. J., "Investigating direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites at high strain rates", *Cement and Concrete Research*, Vol.50, 2013, pp.62-73.
- Tran, K. T. and Kim, D. J., "High strain rate effects on direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 45, 2014, pp.186-200.
- Bindiganavile, V., Bantia, N., and Aarup, B., "Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite", *ACI Materials Journal*, Vol.99, No.6, November-December, 2002.
- Naaman, A. E. and Gopalratnam, V. S., "Impact properties of steel fibre reinforced concrete in bending", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol.5, No.4, 1983, pp.225-233.
- Habel, K. and Gauvreau, P., "Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) to impact and static loading", *Cement and Concrete Composites*, Vol.30, 2008, pp.938-946.
- Duell, J. M., "Impact Testing of Advanced Composites", *Advanced Topics in Characterization of Composites*, 97, 2004.
- Yu, R., Spiesz, P., and Brouwers, H. J. H., "Impact resistance capacity of a green Ultra-High Performance Hybrid Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC): Experimental and modeling study", *International Conference on Non-Traditional Cement and Concrete*, June 16-19, 2014.
- Millon, O., et al., "Fiber-reinforced ultra-high performance concrete under tensile loads", *DYMAT-International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*, Vol. 1, EDP Sciences, 2009.
- Cadoni, E., Meda, A., and Plizzari, G. A., "Tensile behaviour of FRC under high strain-rate", *Materials and Structures*, Vol.42, 2009, pp.1283-1294.
- Tran, T. K. and Kim, D. J., "Strain energy frame impact machine (SEFIM)", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 10, 2012, pp.126-136.
- Park, J. J., et al., "Influence of the ingredients on the compressive strength of UHPC as a fundamental study to optimize the mixing proportion", *Proceeding of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Germany, E. Fehling, M. Schmidt and S. Stürwald, Co-Editor, Kassel University, Germany, 2008, pp.105-112.

요약 본 연구에서는 탄성변형 에너지를 이용하는 충격실험장치인 변형에너지 충격시험장치(SEFIM)의 변형률 속도를 증가시키기 위하여, 탄성변형 에너지가 저장되는 에너지 프레임의 직경 및 재질을 다르게 하여 그 영향을 조사하였다. 현재 강재를 에너지 프레임의 재질로 사용한 SEFIM의 발현 가능한 변형률 속도범위는 10-40 /sec까지이지만, 에너지 프레임의 재질과 직경을 다르게 하여 충격 시 변형률 속도가 72 /sec까지 증가되었다. 충격실험에 사용된 HPRCCs는 장섬유 1%와 단섬유 1%를 함께 초고강도 콘크리트에 혼입하였다. 정적 변형률 속도에서 뿐만 아니라, 네 가지 종류의 에너지 프레임을 사용한 높은 변형률 속도(14-72 /sec)에서도 변형경화 거동을 나타내었다. 에너지 프레임의 직경을 기존의 35 mm에서 25 mm로 작게 변경함에 따라서 변형률 속도가 증가하였으며, 에너지 프레임 재질을 강재, 알루미늄 그리고 티타늄으로 변경함에 따라, 강재보다 높은 탄성과 속도를 가지고 많은 크기의 탄성변형 에너지를 저장할 수 있는 티타늄 합금을 사용한 경우 더욱 높은 변형률 속도(72 /sec)를 생성하였다. 알루미늄 재질의 에너지 프레임의 경우 충격실험 시 작용되었던 응력으로 인해 탄성영역을 벗어나 소성변형을 일으켜 파단되어 본래 가지고 있던 성질을 발현하지 못하였다.

핵심용어 : HPRCCs, 인장 응력-변형률 선도, 탄성변형 에너지, 에너지 프레임, 변형률 속도