

04

변형경화형 시멘트 복합재료의 충격저항 성능

Impact Resistance of Strain Hardening Cementitious Composites

김동주 Dong Joo Kim 세종대학교 건설환경공학과 교수	김성욱 Sung-Wook Kim 한국건설기술연구원 구조융합연구소 선임연구위원	윤영수 Young-Soo Yoon 고려대학교 건축사회환경공학부 교수	박철우 Cheol-Woo Park 강원대학교 토목공학과 교수
--	---	--	--

1. 머리말

전세계적으로 테러, 지진 그리고 태풍 등의 자연재해로 인한 인명 및 자산의 피해가 늘어가고 있고, 특히 그로 인한 사회기반 시설물의 손상도 증가하고 있다. 이러한 충격 혹은 폭발 등의 하중 하에서 건물, 교량, 댐 그리고 지하철 등의 사회기반 시설물의 저항성을 증가하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다. 본 기사에서는 충격과 폭발 하중 하에서의 사회기반 시설물의 저항성을 증대하기 위한 한 가지 방안으로써 기존 콘크리트에 비해 매우 높은 인장강도와 에너지 흡수능력을 가지는 변형경화 섬유보강 시멘트 복합재료를 사회기반 시설물의 주요부재 또는 방호·방폭 구조물에 적용하는 것에 대하여 살펴보기로 한다.

변형경화 섬유보강 시멘트 복합재료(Strain Hardening fiber reinforced Cementitious Composites, SHCC)는 일반 콘크리트 또는 섬유보강 콘크리트와 달리 직접인장 하중 하에서 초기균열(σ_{cc})이 발생한 이후에 오히려 그 인장저항력이 증가하는 거동을 보임으로써 매우 높은 인장강도(σ_{pc})와 에너지 흡수능력(T_p)을 나타낸다고 보고되어 왔다^{1,2)}. <그림 1>에 나타난 바와 같이 T_p 는 σ_{pc} 뿐만 아니라 변형능력(ϵ_{pc})에 따라서도 크게 영향을 받게 된다. 그러나 <그림 1>에 나타난 인장거동을 일반적으로 정적 실험 결과에 근거하여 실제 이러한 SHCC를 충격 또는 폭발 하중과 같이 매우 빠른 변형률 속도에서의 거동에 대한 정보는 아직 부족한 현실이고, 실제 어떠한 재료 정보를 가지고 구조물에 반영할 지도 명확하지 않다.

2. 변형률 속도와 그 영향(국내외 연구동향)

지진, 충격 그리고 폭발하중과 같이 속도가 빠른 하중이 작용하는 경우 재료의 거동은 기존 정적 속도에서 측정된 응답과 다르게 된다. 대부분의 구조물에 작용하는 정적 변형률 속도(static strain rates)는 <그림 2>에 나타난 바와 같이 10^{-6} - 10^{-4} /s인데 반해 충격 및 폭발 하중이 작용할 경우에는 그 변형률 속도가 10^{-1} - 10^4 /s까지 매우 높아지게 된다. 이러한 고속 변형률 속도에서는 재료의 거동이 정적인

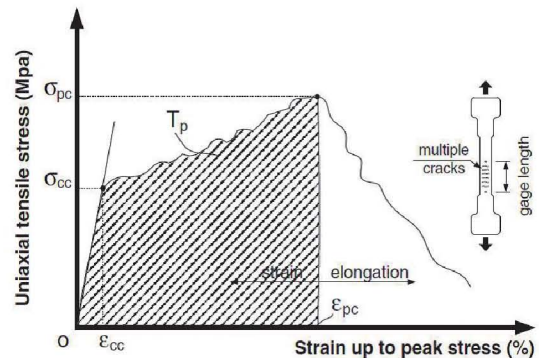


그림 1. 고인성시멘트 복합체의 정적인장거동¹⁴⁾

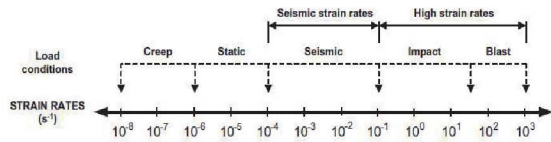
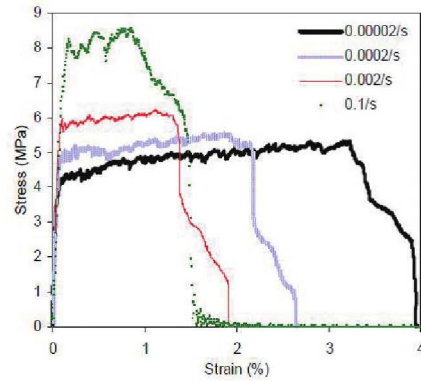


그림 2. 변형률 속도와 하중조건³⁾

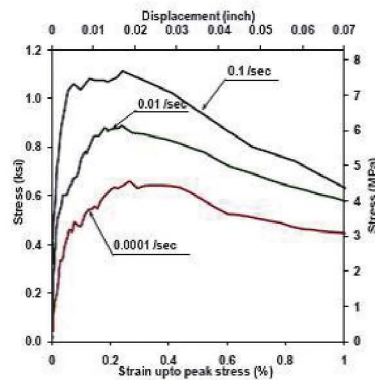
속도에서와 다르게 되는데, 시멘트 기반의 건설재료들 중 대표격인 콘크리트의 경우 변형률 속도가 증가함에 따라 압축 및 인장강도가 증가한다고 알려져 있지만^{4, 5)}, 취성적 파괴거동으로 에너지 흡수능력이 높지 않은 현실이다. 따라서 일반적인 변형연화 거동을 보이는 섬유 보강 콘크리트의 충격 저항성에 대한 연구들이 많이 조사되어 왔고^{6, 7)}, 최근에는 에너지 흡수능력이 매우 우수한 SHCC의 충격 거동에 대한 연구들이 활발하게 이루어지고 있다^{3, 8~14)}. 하지만, 본 기사에서 다루는 SHCC의 경우 고속의 변형률 속도에서의 거동 특히, 인장응력-변형률 선도에 대한 정보는 아직도 매우 제한적이다. 대부분의 연구들이 충격 하중이 작용할 경우와 정적 하중이 작용할 때의 휨 하중에 대한 저항성을 낙하식 충격시험기를 사용하여 평가하거나 슬래브 혹은 보 부재에 TNT를 이용한 폭발을 작용하여 그 저항성을 파괴된 시험체의 형상을 평가하고 있어 고속 변형률 속도에서 재료적인 특성을 평가하기에는 어려움이 있다.

Yang and Li¹⁵⁾와 Douglas and Billington¹⁷⁾은 Polyvinyl alcohol(PVA) fiber를 사용한 ECC의 직접 인장거동을 10^{-4} - 10^{-1} /s의 변형률 속도에서 조사하였는데, 변형률 속도가 10^{-1} /s까지 증가함에 따라 인장강도는 증가하는 반면 그 변형능력은 감소하는 경향을 나타낸다고 보고한 바 있다(그림 3-(a)). 하지만, Kim et al.¹⁶⁾은 고강도 강섬유를 사용한 변형경화 섬유보강 시멘트 복합재료의 경우 10^{-4} - 10^{-1} /s의 변형률 속도에서 변형률 속도가 증가함에 따라서 인장강도가 증가하지만 변형능력의 변화는 뚜렷하지 않다고 보고하였다(그림 3-(b)). 이처럼 변형률 속도가 인장거동의 변화에 미치는 영향이 사용된 섬유의 종류에 따라 매우 상이하다는 것을 알 수 있다.

지진 시의 변형률 속도 이상인 충격과 폭발하중이 작용하는 범위의 변형률 속도를 일반적으로 고속 변형률 속도 범위라고 하는데, 이 속도 범위에서의 거동에 대해서는 현재까지도 그 정보가 매우 제한적이다^{3,12,13,18)}. 우선 정적 변형률 속도에서 나타낸 다수의 미세균열 생성과 함



(a) ECC(PVA 섬유 2%)



(b) HPFRCC(Twisted fiber 1%)

그림 3. 정적에서 지진시 까지 변형률 속도의 변화가 SHCC의 인장거동에 미치는 영향^{15,16)}

께 높은 에너지 흡수능력을 가지게 하는 변형경화 거동이 충격과 폭발 하중과 같은 높은 변형률 속도에서도 유효한 지가 가장 중요한 정보라 할 수 있다. 또한, 변형률 속도의 증가에 따라 그 재료의 인장강도와 연성도 그리고 에너지 흡수능력이 어떻게 변화하는지에 대한 정보가 있어야 효과적이고 안전하게 그 재료의 성능을 구조부재 혹은 구조물에 적용할 수 있다. Mechtcherine et al.¹²⁾은 PVA 섬유를 사용한 SHCC에 대하여 고속의 유압식 시험기를 사용하여 고속 변형률 속도에서의 거동을 조사하였고, Caverzan et al.¹³⁾은 split Hopkinson pressure bar(SHPB) 충격시험기를 사용, 그리고 Tran and Kim³⁾은 strain energy frame impact machine(SEFIM)을 사용하여(그림 4) 강섬유 보강 SHCC의 10 - 10^2 /s 사이의 변형률 속도에서의 인장응력-변형률 선도를 보고하였다. 변형률 속도가 증가하여 10 - 10^2 /s 사이의 고속 변형률 속도에서도 변형경화 거동을 나타내었으며, 일반적으로 인장강도와 에너지 흡수능력이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 변형률 속도 민감성은 사용된 섬유의 종류, 보

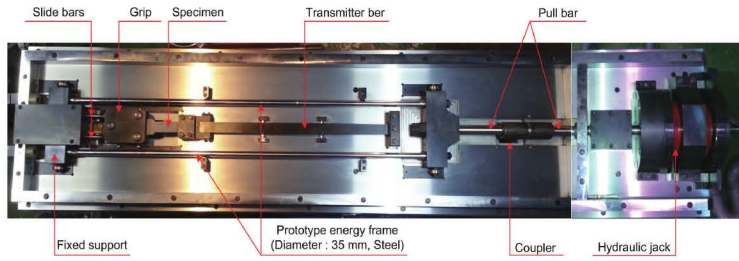
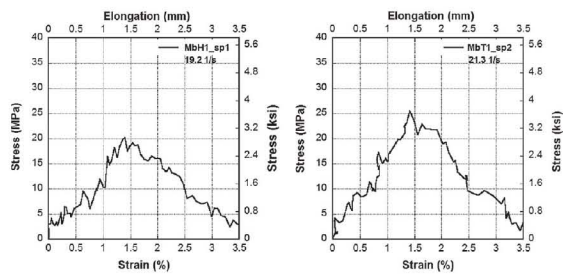


그림 4. 변형에너지 프레임 인장 충격시험기(세종대학교)



(a) Hooked 섬유 1% (b) Twisted 섬유 1%
그림 5. 고속 변형률 속도에서의 SHCC 인장거동³⁾

강량 그리고 매트릭스의 강도에 따라서 매우 상이하였다 (그림 5).

3. 충격 및 폭발하중 하의 SHCC의 저항성능

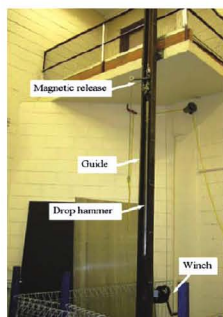
이러한 SHCC의 고속 변형률 속도에서 증진된 강도 및 에너지 흡수능력을 바탕으로 SHCC를 실제 기둥, 보

와 슬래브 같은 구조부재들에 적용하기 위한 충격 및 폭발하중에 대한 실험연구들이 최근에 많이 진행되고 있다^{19~24)}.

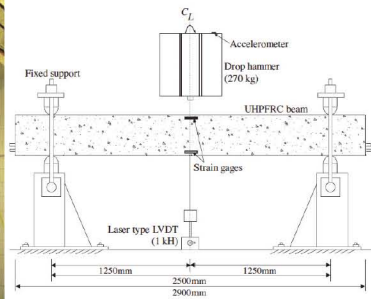
〈그림 6〉에 나타낸 바와 같이 최근 2010년도 이후부터 SHCC의 방탄, 방호 그리고 방폭 성능에 대한 다양한 실험들이 수행되고 있다. 특히, 현장에서 슬래브나 벽체의 방호 성능을 평가하기 위하여 실제로 TNT를 사용한 실험들도 수행되고 있다. 이러한 구조부재 혹은 구조물에 대한 직접적인 실험연구 결과들은 인장강도와 에너지 흡수능력이 우수한 SHCC의 방호·방폭 구조물에의 적용에 유용한 정보를 제공할 것으로 판단된다. 국내에서도 최근 2013년도부터 국토교통부 국가 R&D 건설기술연구사업의 일환으로 방호·방폭 연구단(주관 연구기관 한국건설기술연구원)이 SHCC의 충격 및 폭발하중하의 저항성 평가와 그 적용을 위한 연구를 수행하고 있다.

4. 맺음말

SHCC의 높은 인장강도와 에너지 흡수능력을 바탕으로 구조물에 적용하고자 하는 연구들이 최근 매우 활발하게 진행 중이다. 하지만 아직까지도 표준 충격 및 폭



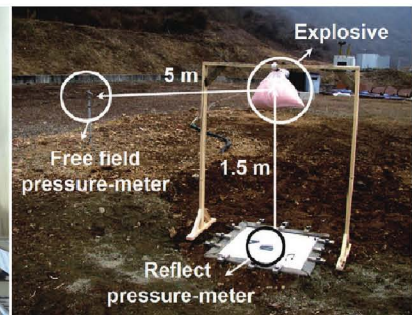
(a) Millard et al.¹⁹⁾ - 낙하시 충격시험기



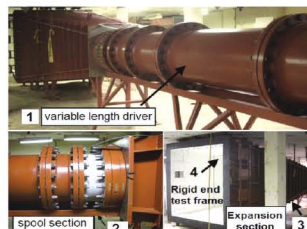
(b) Yoo et al.²²⁾ - 낙하시 충격시험기



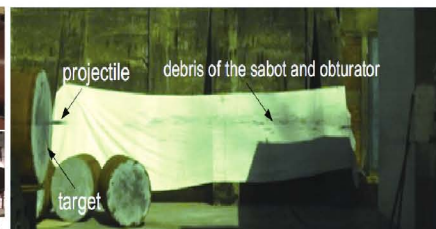
(c) 낙하시 충격시험기 (강원대학교)



(d) Yi et al.²⁰⁾ - 현장 폭발실험




(e) Aoude et al.²³⁾ - shocktube 실험



(f) Wu et al.²⁴⁾ - 관통실험



그림 6. 충격 및 폭발하중에 대한 저항성 평가실험

발 저항성 평가 방법이 정립되어 있지 않아 많은 어려움이 있다. 또한, 개발된 SHCC의 구조물 적용을 위한 규정이 마련되어 있지 않아 그 적용을 위한 많은 연구와 논의가 필요하다. 현재까지 여러 연구자들에 의해 보고된 연구결과를 바탕으로 SHCC는 높은 변형률 속도에서 더 증진된 인장강도와 에너지 흡수능력을 나타내었지만 사용된 섬유 종류, 보강량 그리고 매트릭스의 강도에 따라서 그 변형률 속도 민감성이 상이하였고, 실제 적용을 위해서는 표준 실험방법 및 사용 규정 등의 마련이 시급한 현실이다. 

담당 편집위원 : 신경준(충남대학교) kjshin@cnu.ac.kr

참고문헌

1. Naaman A. E., and Reinhardt H. W., "Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites", *Proceedings of 2nd International Workshop on HPRCC*, A. E. Naaman and H. W. Reinhardt, eds., RILEM, No. 31, 1996, pp. 1 ~ 24.
2. Naaman A. E. and Reinhardt H. W., "Proposed Classification of FRC Composites Based on their Tensile Response", *Materials and Structures*, Vol. 39, 2006, pp. 547 ~ 555.
3. Tran K. T., 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.
4. Ross C. A., Tedesco J. W. and Kuennen S. T., "Effects of Strain Rate on Concrete Strength", *ACI Materials Journal*, Vol. 92, 1995, pp. 37 ~ 47.
5. Grote D. L., Park S. W. and Zhou M., "Dynamic behavior of Concrete at High Strain Rates and Pressures: 1. Experimental Characterization", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, 2001, pp. 869 ~ 886.
6. Naaman A. E., Gopalaratnam V. S., "Impact Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete in Bending", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 5, 1983, pp.225 ~ 233.
7. Körmeling H. A. and Reinhardt H. W., "Strain Rate Effects on steel Fiber Concrete in Uniaxial Tension", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 9, 1987, pp. 197 ~ 204.
8. Bindiganavile V, Banthia N, and Aarap B, "Impact Response of Ultra-high Strength Fiber-reinforced Cement Composite", *ACI Materials Journal*, Vol. 99, 2002, pp. 543 ~ 548.

9. Maalej M, Quek S. T. and Zhang J, "Behavior of Hybrid Fiber Engineered Cementitious Composites Subjected to Dynamic Tensile Loading and Projectile Impact", *Journal of Civil Engineering Materials*, Vol. 17, 2005, pp. 143 ~ 152.
10. Habel K, 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.
11. Mechtcherine V, Millon O, Butler M, and Thoma K, "Mechanical behaviour of Strain Hardening Cement-based Composites under Impact Loading", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, 2011, pp. 1 ~ 11.
12. Mechtcherine V, Siva F. et al., "Behavior of Strain-hardening Cement-based Composites under High Strain Rates", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 9, 2011, pp. 51 ~ 62.
13. Caverzan A, Cadoni E, and Di Prisco M, "Tensile behaviour of High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites at High Strain Rates", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 45, 2012, pp. 28 ~ 38.
14. Tran K. T., 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.
15. Yang E, and Li VC, "Rate Dependence in Engineered Cementitious Composites", in *Proceedings of HPRCC-2005 International Workshop*, Honolulu, Hawaii, USA, 2005.
16. Kim D. J., El-Tawil S, and Naaman A. E., "Rate-dependent Tensile behavior of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites", *Materials and Structures*, Vol. 42, 2009, pp. 399 ~ 414.
17. Douglas K. S., and Billington S. L., "Rate Dependence in High-performance Fiber Reinforced Cementbased Composites for Seismic Applications", in *Proceedings of HPRCC-2005 International Workshop*, Honolulu, Hawaii, USA, 2005.
18. Ranade R, Li VC, and Heard W. F., "Tensile Rate Effects in High Strength-high Ductility Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 68, 2015, pp. 94 ~ 104.
19. Millard S. G., Molyneaux TCK, Barnett S. J. and GAO X, "Dynamic Enhancement of Blast-resistant Ultra High Performance Concrete under Flexural and Shear Loading", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, 2010, pp. 405 ~ 413.
20. Yi NH, Kim JHJ, Han T. S., Cho Y. G. and Lee J. H., "Blast-resistant Characteristics of Ultra-high Strength Concrete and Reactive Powder Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 28, 2012,

pp. 694 ~ 707.

21. Wu H, Fang Q, Chen X. W., Gong Z. M. and Liu J. Z, "Projectile Penetration of Ultra-high Performance Cement Based Composites at 510-1320 m/s", *Construction and Building Materials*, Vol. 54, 2015, pp. 188 ~ 200.
22. Yoo D. Y., Banthia N, Kim W. S. and Yoon Y. S, "Response of Ultra-high-performance Fiber-reinforced Concrete Beams with Continuous Steel Reinforcement Subjected to Low-velocity Impact Loading", *Composites Structures*, Vol. 126, 2015, pp. 233 ~ 245.
23. Aoude H, Dagenis F. P., Burrell R. P. and Saatcioglu, "Behavior of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete Columns under Blast Loading", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 80, 2015, pp. 185 ~ 202.
24. Lai J, Guo X, and Zhu Y, "Repeated Penetration and Different Depth Explosion of Ultra-high Performance Concrete", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 84, 2015, pp. 1 ~ 12.



김동주 교수는 미국 미시간 대학(The University of Michigan, Ann Arbor)에서 High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites에 대한 연구로 2009년 5월에 박사학위를 취득하였으며, 2009년부터 세종대학교 건설환경공학과에서 근무하고 있다. 주 관심 연구 분야는 시멘트 기반 복합재료의 충격 및 폭발하중에 대한 저항성 평가 및 개선이다.
djkim75@sejong.ac.kr



김성욱 선임연구위원은 동국대학교 토목공학과에서 콘크리트 크리프에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 1989년부터 한국건설기술연구원에서 콘크리트 재료분야 및 구조분야에 대한 연구를 수행하고 있으며, 2005 ~ 2006년 우리 학회에서 고성능콘크리트위원회 및 2011 ~ 2014년 섬유보강콘크리트위원회 위원장을 역임하였다. 2004년에는 호주 UNSW 대학의 Visiting Scholar를 겸임하였고, 주 관심 연구 분야는 고강도, 초고성능 및 해양콘크리트이며, 2013년부터 국토교통부 국가 R&D 방호·방폭 연구 단장을 맡고 있다.
swkim@kict.re.kr



윤영수 교수는 캐나다 맥길대학교(McGill University)에서 콘크리트 구조의 비틀림 거동에 관한 주제로 박사학위를 취득하였으며, 이후 삼성물산 건설부문 기술연구소 수석연구원을 역임하였다. 이후 1997년 고려대학교에 부임하였으며, 우리 학회 학술위원장과 이사를 역임하였다. 주 관심 연구 분야는 초고성능 콘크리트, FRP 복합재료, 구조물의 방호·방폭 성능 등이다.
ysyoon@korea.ac.kr



박철우 교수는 미국 일리노이 대학교(University of Illinois at Urbana-Champaign)에서 콘크리트 파괴역학 주제로 박사학위를 취득하였으며, 이후 동대학에서 Post-Doc과정을 마치고 미국 캘리포니아주의 도로교통국(Caltrans)에서 Office Leader로서 2년간 근무하였다. 2006년에 강원대학교에 부임하였으며, 현재 우리 학회 FRP 구조위원장을 담당하고 있다. 주 연구 주제는 콘크리트 구조 및 재료, FRP 구조 및 섬유보강콘크리트, 시설물 자산 관리 등이다.
tigerpark@kangwon.ac.kr