혼화재료 및 양생조건에 따른 폴리에틸렌 섬유보강 시멘트 복합재료의 에너지흡수성능 강화

Enhancement of Energy Absorption Capacity of Polyethylene Fiber-Reinforced Cementitious Composites According to Admixtures and Curing Conditions

김민재* · 최홍준** · 전부기*** · 신원식**** · 류두열*****

Kim, Min-Jae*, Choi, Hong-Joon**, Chun, Booki***, Shin, Wonsik****, and Yoo, Doo-Yeol*****

Abstract

This study aims to enhance the energy absorption capacity of cementitious composites with 2 vol.% of polyethylene fibers, by adjusting mixing ingredients and curing conditions. Ground blast furnace slag, cement kiln dust, limestone powder, and silica fume were incorporated, and two different curing conditions were applied: 72 h of curing at 90 °C and 120 h of curing at 40 °C. Compressive strength test and direct tensile test were performed on 6 mixtures and the test results were compared with those of ultra-high-performance concrete and engineered cementitious composite specimens. The maximum compressive strength of the 6 mixtures was measured to be approximately 117 MPa. The higher cement replacement ratio of the other components resulted in a decrease in the compressive strength of the specimens cured at 90 °C. In the direct tensile test, the specimens cured at 40 °C exhibited lower tensile strength than those cured at 90 °C, but the strain capacity was increased by approximately 305% and reached 7.7%. This also resulted in an enhancement of the energy absorption capacity from 80%–292% because of the differences in micro-cracking and fracturing behaviors, such as an increase in the number of micro-cracks and decrease in crack width.

Key words : Cementitious Composite, Mixture Property, Curing Condition, Polyethylene Fiber, Energy Absorption Capacity

요 지

본 연구에서는 시멘트 복합재료의 혼화재료 및 양생조건을 조정하여 체적비 2%의 폴리에틸렌 섬유를 혼입한 시멘트 복합재료의 에너지흡수성능을 향상시켰다. 사용된 혼화재료는 고로슬래그, 시멘트 킬른 더스트, 석회석 분말, 실리카퐁이고 시멘트 복합재료의 양생조건은 90 °C, 72시간과 40 °C, 120시간으로 두 가지이다. 혼화재료의 시멘트 대체율을 기준으로 총 6가지 배합에 대하여 압축강도와 직접인장실험을 수행한 후 초고성능 콘크리트 및 ECC의 실험결과와 비교되었다. 실험결과에 따르면 90 °C 양생기준 최고 압축강도는 117 MPa이고 혼화재료의 시멘트 대체율이 증가함에 따라서 시편의 압축강도가 감소하는 것으로 확인되었다. 직접인장 실험의 경우 40 °C 양생 시편의 인장강도가 90 °C 양생 시편들에 비해서 다소 낮았으나, 인장변형능이 최대 305%의 증가율을 보이며 7.7%를 기록하였다. 이에 따라서 에너지흡수성능이 80% - 292% 사이의 증가율을 보였다. 또한 미세균열의 수가 크게 증가하고 미세균열의 폭이 감소하는 등 시편들의 균열 및 파괴양상에서도 명확한 차이가 관측되었다.

핵심용어 : 시멘트 복합재료, 배합특성, 양생조건, 폴리에틸렌 섬유, 에너지흡수성능

*정회원, 한양대학교 건축공학부 박사과정(E-mail: mandufa345@hanyang.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

**정회원, 한양대학교 건축공학부 석사과정

Member, Master's Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

***정회원, 한양대학교 건축공학부 박사과정

Member, Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

****정회원, 한양대학교 건축공학부 석사과정

Member, Master's Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

*****교신저자, 정회원, 한양대학교 건축공학부 조교수(Tel: +82-2-2220-2373 Fax: +82-2-2220-1945, E-mail: dyoo@hanyang.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

1. 서 론

과거로부터 국내외에서는 전쟁, 테러, 지진, 태풍 등과 관련된 인적·자연적 재난의 발생과 그로 인한 위협이 지속적으로 대두되고 있다. 최근 북한의 미사일 도발은 물론이고 미국, 중국, 일본, 러시아 등의 강대국들의 힘겨루기가 계속되고 있고, 이에 더하여 전 세계에서는 계속해서 테러가 발생하고 있다. 다른 한편으로는 경남지역을 비롯한 여러 지역에서 주기적으로 보고되고 있는 지진과 태풍, 폭우, 산사태 등으로 인한 피해 사례들 또한 끊임없이 발생하고 있다. 이와 같은 상황에서 현대 사회에 대한 가장 큰 위협요인 가운데 하나는 상기된 재난 상황들에 의해서 유발될 수 있는 건축물과 사회인프라의 파손과 붕괴이다.

앞서 언급된 재해들과 그로 인한 건축물 및 사회인프라의 파괴 위험을 방지하기 위해서는 건설물의 우수한 기계적 강도와 연성에 기반한 에너지흡수성능(Energy absorption capacity)이 주요한 안전성 평가의 지표로 활용된다. 건설물의 우수한 에너지흡수성능은 정·동적 하중 및 반복하중 등과 같이 다양한 조건에 대한 우수한 저항성을 바탕으로 재난 안전성 확보에 직접적인 영향을 미친다. 이에 따라서 건설재료의 연구에 있어서 에너지흡수성능의 발전을 위한 많은 노력이 요구되고 있다.

이러한 가운데 현재 콘크리트와 시멘트 모르타르 등을 비롯한 시멘트 복합재료는 우수한 역학적 성능, 내구성, 시공성, 경제성 등을 기반으로 전 세계에서 가장 많이 사용되고 있는 건설재료이며, 현존하는 건축물 중에서 가장 높은 비율을 점유하고 있다. 따라서 시멘트 복합재료의 에너지흡수성능의 발전을 위한 연구의 필요성과 가치는 매우 크다고 할 수 있다. 이러한 가운데 시멘트 복합재료의 성능은 재료의 사용처와 용도에 따라서 다양하게 조정이 가능하며 최근에는 일반콘크리트를 넘어서 강섬유와 폴리머 섬유, 보강 혹은 배합의 조정을 통한 Ultra high performance concrete (UHPC)와 Engineered cementitious composite (ECC) 등의 고성능 시멘트 복합재료의 개발 및 발전을 위한 다양한 연구

가 진행되어 왔다(Naaman, 1998; Li et al., 2001; Li et al., 2002; Kim et al., 2009; Wille et al., 2011; Yoo et al., 2017; Kim et al., 2018; Kim et al., 2019; Yoo and Kim, 2019).

일반적으로 UHPC는 압축강도 150 MPa 이상, 설계인장강도 8 MPa, 인장변형성능 0.5% 이상을 보유하는 한편(Naaman, 1998; Kim et al., 2009; Wille et al., 2011; Yoo et al., 2017; Kim et al., 2018; Yoo and Kim, 2019), ECC는 압축강도 20-60 MPa, 인장강도 3-5 MPa, 인장변형성능 4.0-5.0%에 달하는 성능을 보인다(Li et al., 2001; Li et al., 2002; Kim et al., 2019). 두 재료 모두 일반콘크리트에 비하여 우수한 성능을 보유하고 있으나, 높은 강도와 연성을 동시에 확보할 수 없어 고효율 에너지흡수용 건설 및 보수·보강 재료로서의 직접적인 활용이 제한되고 있다. 그러므로 본 연구는 시멘트 복합재료의 에너지흡수성능을 향상시키기 위한 방안으로 Polyethylene (PE) 섬유를 혼입함과 동시에, PE 섬유의 보강효율 강화를 위하여 시멘트 및 혼화재의 혼입률 조정과 양생조건의 변경을 통해 도출되는 배합의 역학적 특성을 분석하였다.

2. 실험 계획

2.1 시멘트 복합재료 배합 및 제작

Table 1에는 일반적으로 사용되는 UHPC 배합과 함께 본 연구에서 추가적으로 적용된 6 조합의 시멘트 복합재료 배합의 상세가 혼입된 시멘트에 대한 중량비로 정리되어 있다. 본 연구의 #1-6 배합에는 1종 보통포틀랜드시멘트, 3종 고로슬래그미분말(KS F 2563, GBFS), Limestone powder (LP), cement kiln dust (CKD), silica sand (호주산)가 사용되었다. 또한 굵은 골재가 포함되지 않은 다량의 분말재료들로 구성된 배합의 유동성을 확보하기 위해서 폴리카르복실계 고성능 감수제가 사용되었다. Table 2에는 본 연구의 #1-6 배합 제작에 사용된 재료들의 화학성분과 물리적 특성이 요약되어 있다. 시멘트, GBFS, LP, CKD, SF의 분말도는 각각 3,350, 6,000, 8,200, 200,000 cm²/g이다. 본 연구에서

Table 1. Mixture Proportions of UHPC and #1-6 Matrices

Type	Supplementary Cementitious Materials				Filler	Sand	SCM	W/B	W	SP/B	C
	GBFS	LP	CKD	SF	Flour						
UHPC	0	0	0	0.25	0.3	1.1	0.25	0.2	0.2	0.057	1
#1	0.25	0.25	0.15	0.2	-	0.7	0.85	0.2	0.359	0.02	
#2	0.5	0.25	0.15	0.2		0.7	1.1	0.2	0.411	0.01	
#3	0.75	0.25	0.15	0.2		0.7	1.35	0.135	0.384	0.03	
#4	0.75	0.25	0.3	0.2		0.7	1.5	0.135	0.414	0.03	
#5	1	0.15	0	0.2		0.75	1.35	0.15	0.461	0.01	
#6	1	0.15	0.15	0.2		0.7	1.5	0.15	0.479	0.03	

Note: C: ordinary Portland cement, LP: limestone powder, SF: silica fume, CKD: cement kiln dust

SP: Super plasticizer consists of 70% liquid and 30% solid

Table 2. Chemical Composition and Physical Properties of Mixing Ingredients

Type	Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)	Chemical composition							
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
C	3.15	3,350	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.30	-	-
GBFS	2.90	6,000	33.00	14.00	0.50	42.00	6.00	-	-	-
LP	2.69	5,109	2.74	1.71	0.87	93.10	0.73	0.05	0.38	0.01
CKD	2.67	8,200	9.65	3.70	1.54	43.60	1.40	0.77	0.35	0.06
SF	2.20	200,000	96.00	0.25	0.12	0.38	0.10	-	-	-
Sand	2.65	-	99.50	0.08	0.02	0.02	0.02	-	-	-

Note: C: ordinary Portland cement, LP: limestone powder, SF: silica fume, CKD: cement kiln dust

사용된 PE 섬유는 인장강도 3,030 MPa, 길이 18 mm, 직경 0.03 μ m, 밀도 0.97 (g/cm³)의 초고분자량 PE 섬유가 사용되었고, PE 섬유의 혼입률은 시멘트복합재료 배합에 대한 체적비 2%로 설정하였다.

시편의 제작 순서는 먼저 결합재, 잔골재, 충전재를 비롯한 견재료들을 믹서에 투입하고 5분 동안 혼합한 후 계량된 물과 고성능감수제를 동시에 투입하고 계속해서 혼합한다. 이후 5분 이내에 배합이 유동성과 점성을 갖추기 시작하면 PE 섬유의 뭉침 방지를 위하여 흩뿌리면서 투입하며, 투입된 섬유의 분산성을 충분히 확보하기 위해 5분 동안 추가적으로 혼합한다. 시멘트 복합재료의 배합이 완료되면 준비된 몰드에 섬유의 방향성을 고려하여 종방향으로 타설하고, 타설이 완료된 시편은 진동대에서 다진 후 플라스틱 비닐을 덮어 급격한 수분의 증발을 방지하였다. 이후 시편들은 온도 20 $^{\circ}$ C, 상대습도 60% 조건의 항온·항습 챔버에서 48시간 동안 양생된 후 몰드에서 탈형되어 72시간 동안 90 $^{\circ}$ C 수조에서 양생되었다. 여기에서 양생온도에 따른 PE 섬유 혼입 시멘트복합재료의 인장거동을 비교하기 위해 일부 배합(#2-4)의 시편들이 추가로 제작되어 40 $^{\circ}$ C 수조에서 120 시간동안 양생되었다. 이때 120시간의 40 $^{\circ}$ C 수중양생은 72시간의 90 $^{\circ}$ C 수중양생이 적용된 UHPC 시편과의 압축강도를 기준으로 산출된 시멘트복합재료의 등가재령을 고려하여 설정되었다(Park et al., 2015).

2.2 실험 방법

압축강도 실험은 ASTM C 109 권장 기준에 따라 시행되었으며 해당 기준에 따라 모든 시편은 50 $\times$ 50 $\times$ 50 mm³ 규격의 큐브 형태로 제작되었다. 만능시험기(Universal testing machine, UTM)가 사용되었으며 시험기의 최대 부하 용량은 3000 kN이다. 실험이 진행되는 동안 가력속도는 변위제어 방식으로 0.1 mm/min으로 유지되었다. 압축강도 시편의 개수는 각 배합별 3개씩으로 설정되었고, 획득한 강도 값을 평균하여 각 배합의 압축강도를 산출하였다.

직접인장실험은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 JSCE (2008) 기준에 따라 시행되었다. 시편은 Dog-bone 형태로 제작되었고, 측정 영역의 단면적과 높이는 13 $\times$ 30 mm²와 80 mm로

설정되었다. 또한 실험 중 측정영역 내에서 발생한 시편의 변위를 측정하기 위해서 2개의 선형변위센서(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)가 설치되었다. 직접인장실험에는 300 kN 용량의 만능시험기가 사용되었으며, 가력속도는 변위제어 속도 0.4 mm/min로 진행되었다. 또한, 시편에 작용하는 편심을 최소화하기 위해 지그의 상단은 핀, 하단은 고정단으로 설정되었고, 시편과 지그의 정렬 여부를 확인한 후 실험을 수행하였다. 직접인장실험에는 각 배합별 5개의 시편이 제작되어 수행되었고, 최소 3개 시편 이상의 실험결과를 평균하여 각 배합의 실험결과로 산출 및 분석하였다.

Fig. 1. Direct Tensile Test Setup and Specimen Detail

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축강도 실험결과

Fig. 2에는 앞서 제시된 5가지 배합들에 대하여 수행된 압축강도 실험의 결과가 나타나 있다. 압축강도 실험은 90 $^{\circ}$ C 양생 시편들에 대해서만 수행되었다. 먼저 Kim et al. (2019)의 연구에서는 체적비 2%의 강섬유를 혼입했을 시에 187.6 MPa의 압축강도를 보이는 UHPC 배합이 길이 18 mm의 PE 섬유를 체적비 2%만큼 혼입하였을 때 압축강도가 135 MPa로 감소했다고 보고된 바 있다. 이와 같은 현상은 경화된 시멘트 복합재료 배합 내에서 뭉쳐있는 PE 섬유들이 압축응력이 가해졌을 때 공극으로 작용하며 파괴를 촉진시키기 때문인

것으로 판단된다(Kim et al., 2019). 한편 본 연구의 실험결과에서는 #2 배합이 117 MPa로 가장 높은 압축강도를 보였고, 그 뒤를 이어서 #1 배합이 101 MPa, 나머지 #3-6 배합은 94-97 MPa의 범위 내에서 측정되었다. 본 연구의 압축강도 실험 결과에 따르면 #2 배합을 제외하고는 90 °C, 72시간의 수중양생 조건에서 GBFS, LP, CKD의 시멘트 대체율이 증가함에 따라서 압축강도가 감소하는 것으로 관측되었다.

Fig. 2. Compressive Strength Test Result of Specimens Cured at 90 °C

3.2 양생온도에 따른 인장강도 실험 결과

3.2.1 90 °C, 72시간 수중양생 조건

Fig. 3에 제시된 UHPC 시편의 실험결과 (Kim et al., 2019)의 연구에서 인용된 것으로 길이 13 mm의 강섬유를 체적비 2% 만큼 함유하고 있다. 또한 제시된 ECC 시편은 Li et al. (2002)의 연구에서 인용된 결과로 체적비 2%의 PVC 섬유를 함유하였다.

Fig. 3에서 UHPC 시편은 14 MPa의 우수한 인장강도를 확보하였으나 0.6%의 다소 낮은 인장변형성능을 발현한 이후에 급격한 응력의 감소를 보였다. 반면에 ECC 시편의 경우는 일반적으로 4-5 MPa의 낮은 인장강도를 보이지만 4.5% 수준의 인장변형성능을 확보하여 높은 수준의 에너지 흡수성능을 확보하였다. 이어서 본 연구의 #1-6 배합은 UHPC 및 ECC 시편에 비하여 분석하였을 때 중간 수준의 인장강도와 변형성능을 발현하는 것으로 관측되었다.

Fig. 3. Tensile Stress-strain Curves of Specimens Cured at 90 °C

Fig. 4에는 인장실험을 통해 확인된 각 배합 별 시편들의 평균 인장강도와 인장변형성능이 나타나 있다. 한편, 본 연구에서 제작된 #1-6 배합의 시멘트 복합재료들은 기존의 UHPC 및 ECC의 인장거동과는 확연한 차이를 보였다. 우선 0.5% 수준의 인장변형성능을 보이는 UHPC와 비교하였을 때, #1-6 모든 배합들의 연성이 비교적 우수한 것을 확인할 수 있었다. 세부적으로 분석하면 #2 배합의 경우를 제외한 배합들에서 GBFS와 CKD의 혼입률이 증가함에 따라서 인장변형성능이 증가하는 양상이 확인되었다. GBFS의 혼입률이 시멘트 중량비의 25%인 #1 배합에서 1.8%에 그쳤던 인장변형성능은 GBFS 혼입률이 50%, 75%, 100% (#2, #3, #6 배합)로 상승함에 따라서 2.7%, 1.9%, 3.2%로 모두 증가하였다. 또한 #3-4 배합과 #5-6 배합은 각각 CKD 혼입률에서 시멘트 중량비 15%의 차이를 지니고 있는데, 두 경우 모두에 대해서 CKD 혼입률이 증가함에 따라 인장변형성능이 0.1%, 0.6% 만큼씩 증가하였고, 결과적으로 #4와 #6 배합은 각각 2.0%와 3.8%의 인장변형성능을 보였다.

Fig. 4. Tensile Strength and Strain Capacity of Specimens Cured at 90 °C

한편, Fig. 4에 나타나 있듯이 #1-6 배합의 인장강도는 7.0-9.0 MPa로 UHPC의 인장강도 14 MPa에 비해서는 낮지만 ECC의 인장강도 4 MPa에 비해서는 높은 것으로 확인되었다. 또한 #1 시편과 비교하였을 때에는 타 재료들의 시멘트 대체율이 높을수록 인장강도가 향상되었으나, 인장변형성능의 경우와 같은 시멘트 대체율 변화에 따른 인장강도에 대한 명확한 연관성은 확인되지 않았다.

종합적으로 본 연구의 90 °C 양생된 #1-6 배합들의 인장변형성능은 ECC에 비해 다소 낮은 양상을 보이기는 했으나, 더욱 우수한 강도를 보유한 상태에서 유사 수준의 인장변형성능을 발현했다는 사실에 주목할 필요가 있다고 판단된다.

Fig 5는 90 °C 양생된 각 배합들의 변형경화거동이 종료되는 최대응력 지점까지 측정된 에너지흡수성능을 보여준다. 에너지흡수성능은 인장강도와 인장변형성능의 영향을 받으므로 GBFS와 CKD의 시멘트 대체율의 증가에 따라서 증가하고 있음을 확인할 수 있다. #1 배합은 111 kJ/m³의 에너지흡수성능을 보인 반면에 #2-6 배합은 각각 229, 136, 127, 226, 267 kJ/m³의 에너지흡수성능을 보였다. 여기서 GBFS와

CKD의 시멘트 중량비의 100%와 15%로 혼합된 #6 배합이 가장 높은 에너지흡수능을 보였음을 알 수 있다. Kim et al. (2019)의 연구에 의하면 길이 13 mm 강섬유를 체적비 2%만큼 혼합한 UHPC 배합의 에너지흡수능은 68 kJ/m³이며, 본 연구의 90 °C 양생 배합들이 더 많은 양의 에너지를 흡수한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5. Energy Absorption Capacity of Specimens Cured at 90 °C

3.2.2 40 °C, 120시간 수중양생 조건

본 연구에서는 시멘트 복합재료에 대한 PE 섬유 보강 시에 양생온도에 따른 인장성능 보강효율을 비교하기 위하여 앞의 절에서 소개된 바 있는 #2,4 배합에 대해 120 시간의 40 °C 수중양생을 적용하였다. Figs. 6과 7은 40 °C 수조에서 120시간 동안 양생된 #2,4 배합의 인장응력-변형률의 그래프와 실험배합들의 인장강도 및 인장변형성능을 각각 보여 준다. 우선 Fig 7에 나타난 바와 같이 90 °C 양생을 적용했을 때에 비해서 40 °C 양생을 적용할 경우 #2, #3, #4 배합에 대해서 인장강도가 각각 1.3 (14%), 0, 0.2 (2.7%) MPa 만큼 감소하는 것으로 확인되었다.

반면에 인장변형성능의 경우 40 °C 양생조건 적용에 따라서 #2, #3, #4 배합에 대해서 각각 2.7%, 1.9%, 2.0%에서 5.9%, 7.7%, 5.5%로 크게 증가하며 110%, 305%, 175%의 증가율을 보였다. 이와 같이 인장변형성능이 큰 폭으로 증가한 현상은 시멘트 및 반응성 포졸란 물질들이 90 °C의 고온에서 고속으로 수화할 때보다 비교적 저온인 40 °C에서 보다 느리게 수화할 때 배합 내에서 폴리머섬유의 인발 저항이 더 길게 지속되었음을 의미한다. 이는 시멘트 몰탈 내의 수화물의 확산 및 분산성과 공극의 분포도가 수화온도가 증가함에 따라서 감소하는 현상에서 기인한 것으로 판단된다(Kjellsen et al., 1991).

이어서 Fig 8에서는 양생온도에 따라 발생된 #2,4 배합들의 에너지흡수능의 차이를 확인할 수 있다. 앞서 언급된 바와 같이 인장변형성능이 큰 폭으로 증가한 영향으로 40 °C 양생 시편들의 에너지흡수능이 크게 증가하였음을 확인할 수 있다. 양생온도가 90 °C에서 40 °C로 낮아짐에 따라 #2,4 배합의 에너지흡수능은 229, 136, 127 kJ/m³에서

412, 533, 346 kJ/m³으로 크게 증가하며 각각 80%, 292%, 172%의 증가율을 보였다.

Fig. 6. Tensile Stress-strain Curves of Specimens Cured at 40 °C

Fig. 7. Tensile Strength and Strain Capacity Depending on Curing Conditions

Fig. 8. Energy Absorption Capacity Depending on Curing Conditions

앞서 제시된 Fig. 6에서 확인할 수 있는 또 한 가지의 특징은 인장응력-변형률 곡선들이 상하로 진동하는 양상이 90 °C 양생 시편들에 비해서 40 °C 양생 시편들에서 더욱 빈번하게 발생했다는 것과 그 폭 또한 좁아졌다는 것이다. 이는 Fig 9에 보이는 각 시편들의 미세균열거동 및 파괴양상과 연관될 수 있다. 먼저 90 °C 수조에서 72시간 동안 양생된 #1-6 배합 시편들의 미세균열거동과 파괴 유형을 보면, UHPC 배합과 동일한 양생조건을 적용하였음에도 발생한 미세균열의 수가 더 많은 것을 확인할 수 있다. 하지만 ECC

Fig. 9. Micro-cracking and Specimen Fracturing Behaviors Depending on Curing Conditions

시편에 비해서는 그 수가 더 적은 것을 확연하게 구분할 수 있다. 반면에 40 °C 양생 시편들의 미세균열 양상을 보면 90 °C 양생 시편들과 심지어는 ECC 시편에 비교하였을 때에도 미세균열의 수가 더 많고 균열들이 촘촘하게 발생한 것을 확인할 수 있다. 계속해서 40 °C 양생 시편들의 경우에는 미세균열 개개의 폭 또한 UHPC 및 ECC 시편들에 비해서 작다는 것을 확인할 수 있다. 앞서 언급되었던 90 °C 양생 시편들의 경우 인장응력이 증가함에 따라 매트릭스에 미세균열이 발생할 때 큰 낙차와 소음을 보인 반면에, 40 °C 양생된 시편들의 경우에는 낙차와 소음이 비교적 작았다. 이는 곧 미세균열의 집중과 그로 인한 파괴의 집중으로 응력경화현상의 중단 시기를 결정하는 주요 원인으로 작용한다. 결과적으로 40 °C 양생 시편들에서 응력과 미세균열의 전이가 90 °C 양생 시편들에 비해서 보다 원활하게 이뤄졌고, 그로 인하여 더욱 오랫동안 지속되는 응력경화현상과 그에 상응하는 더욱 우수한 인장변형성능 및 에너지흡수성능을 확보할 수 있었던 것으로 확인되었다.

4. 결 론

- (1) 90 °C 72시간 양생조건에서 가장 높은 압축강도는 #2 배합에서 117 MPa로 측정되었고, GBFS, CKD, LP의 시멘트 대체 비율이 증가함에 따라서 압축강도는 94 MPa 까지 감소하는 것으로 관측되었다.
- (2) 90 °C 양생 시편들의 경우 7.9 MPa의 인장강도와 1.8% - 3.8% 사이의 인장변형성능을 보이는 것으로 관측되었다. 인장변형성능의 경우에는 GBFS, CKD, LP, SF

등의 시멘트 대체 비율이 증가함에 따라서 확연하게 증가하는 것으로 나타났으나, 인장강도의 경우 명확한 영향이 확인되지 않았다.

- (3) 90 °C 수중양생된 시편들에 비하여 40 °C 수중양생된 시편들의 인장강도가 최대 14.4% 만큼 감소하는 경우도 있었으나, 인장변형성능이 110% - 305% 정도로 크게 증가하며 #3 배합에서 최대 7.7%로 기록되었다.
- (4) 90 °C 양생 시편들에 비하여 40 °C 양생 시편들의 에너지흡수성능이 80% - 292% 사이의 증가율을 보이며 최대 533 kJ/m³로 측정되었으며, 동시에 미세균열의 수가 크게 증가하고 미세균열의 폭이 감소하는 등 시편들의 균열 및 파괴양상에서도 명확한 차이를 보였다.
- (5) 우수한 에너지흡수성능을 보유한 시멘트 복합재료를 건설물을 활용하여 지진, 폭격, 폭발 등의 재난에 대한 건설물의 저항성능과 안전성을 강화할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 신진연구지원사업(NRF-2017R1C1B2007589)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Japan Society of Civil Engineers (JSCE). (2008). *Recommendations*

- for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC). Concrete Engineering Series 82: Testing Method 6-10. JSCE, Tokyo, Japan.
- Kim, D.-J., Naaman, A.E., and El-Tawil, S. (2009). High performance fiber reinforced cement composites with innovative slip hardening twisted steel fibers. *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, Vol. 3, No. 2, pp. 119-126.
- Kim, M.J., Kim, S., and Yoo, D.Y. (2018). Hybrid effect of twisted steel and polyethylene fibers on the tensile performance of ultra-high-performance cementitious composites. *Polymers* (Basel), Vol. 10, No. 8, 879. doi:10.3390/polym10080879
- Kim, M.J., Yoo, D.Y., and Yoon, Y.S. (2019). Effects of geometry and hybrid ratio of steel and polyethylene fibers on the mechanical performance of ultra-high-performance fiber-reinforced cementitious composites. *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 8, No. 2, pp. 1835-1848.
- Kjellsen, K.O., Detwiler, R.J., and Gjorv, O.E. (1991). Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures. *Cem. Concr. Res.*, Vol. 21, No. 1, pp. 179-189.
- Li, V.C., Wang, S., and Wu, C. (2001). Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Mater. J.*, Vol. 98, No. 6, pp. 483-492.
- Li, V.C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., and Saito, T. (2002). Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC). *ACI Mater. J.*, Vol. 99, No. 5, pp. 463-472.
- Naaman, A.E. (1998). New fiber technology (Cement, ceramic, and polymeric Composites). *Concrete International*, Vol. 20, No. 7, pp. 57-62.
- Park, J.-S., Kim, Y.J., Cho, J.-R., and Jeon, S.-J. (2015). Early-age strength of ultra-high performance concrete in various curing conditions. *Materials* (Basel), Vol. 8, No. 8, pp. 5537-5553.
- Wille, K., Kim, D.J., and Naaman, A.E. (2011). Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Mater. Struct.*, Vol. 44, pp. 583-598.
- Yoo, D.Y., and Kim, M.J. (2019). High energy absorbent ultra-high-performance concrete with hybrid steel and polyethylene fibers. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 209, pp. 354-363.
- Yoo, D.Y., Kim, S., Park, G.J., Park, J.J., and Kim, S.W. (2017). Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites. *Compos. Struct.*, Vol. 174, pp. 375-388.

Received	December 26, 2019
Revised	January 3, 2020
Accepted	January 10, 2020