초저온에 노출된 초고성능 섬유보강 콘크리트의 역학적 성능 및 자기치유 성능 평가

Evaluation of Mechanical Property and Self-healing Capacity of Ultra-high-performance Fiber-reinforced Concrete Under the Cryogenic Condition

김민재* · 김순호** · 류두열*** · 벤티아 네쿰마****

Kim, Min-Jae*, Kim, Soonho**, Yoo, Doo-Yeol***, and Banthia, Nemkumar****

Abstract

Herein we investigate the mechanical and self-healing properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) at cryogenic temperatures. To this end, a comparative analysis was conducted on the effects of two types of reinforcing fibers, medium-length straight with a length of 19.5 mm and twisted fiber with a length of 30 mm, on the mechanical properties and resistance to cryogenic temperature. Then, the properties were compared with those of normal concrete (NC). In addition, the self-healing property of UHPFRC along with its micro-cracking behavior was examined. It was found that the UHPFRCs demonstrated better mechanical performance regardless of the temperature conditions: ambient, cryogenic, and recovered ambient temperatures. Furthermore, following exposure to cryogenic temperatures, no cracks were observed in the UHPFRC specimens, whereas several very tiny cracks were observed in the NC specimens. The self-healing process of UHPFRC by the formation of CaCO_3 was observed by scanning electron microscopy.

Key words : UHPFRC, Cryogenic Temperature, Mechanical Performance, Self-healing

요 지

본 연구는 초저온 상태에서의 초고성능 섬유보강 콘크리트(ultra-high-performance fiber-reinforced concrete, UHPFRC)의 역학적 성능 및 자기치유 성능을 파악 및 개선하는 것을 목적으로 한다. 따라서 두 종류의 보강 섬유 유형(직선형 19.5 mm: MS, 비틀림형 30 mm: T)에 따른 초저온 노출 시와 노출 후에 발생하는 역학적 성능의 변화와 초저온 노출에 대한 저항성이 일반콘크리트(normal concrete, NC)와 비교분석 되었다. 또한 UHPFRC의 미세균열거동 특성에 따른 균열면 자기치유 성능 실험이 추가적으로 실행되었다. 실험 결과에 의하면 NC에 비해 UHPFRC의 역학적 성능이 상온, 초저온, 상온 회복 조건 모두에서 우수했으며, 초저온 노출 시 균열이 발생한 NC와 다르게 UHPFRC는 균열이 발생하지 않았다. 자기치유 성능의 경우 UHPFRC 시편에 대해 인위적인 미세균열 유발 후, 시편의 수중양생 과정 동안에 탄산칼슘(CaCO_3)이 균열면 내에 형성되며 균열이 치유되는 과정이 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 통해 관측되었다.

핵심용어 : 초고성능 섬유보강 콘크리트, 초저온, 역학적 성능, 자기치유

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

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

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

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: dyyoo@hanyang.ac.kr)

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

****브리티시컬럼비아대학교 토목공학과 교수

Professor, Department of Civil Engineering, University of British Columbia

1. 서 론

액화천연가스(Liquefied natural gas, LNG)는 천연가스의 체적을 600배 이상 압축 및 액화시킨 높은 효율의 에너지원으로써, 도시가스, 화력발전, 자동차연료 등의 광범위한 산업분야에서 사용되고 있다. 하지만 대용량의 LNG를 각지에서 사용하기 위해 효율적이고 안정적인 저장탱크 건설이 필요시 되었고, 이에 따른 많은 연구가 수행되었다(ACI 376-11, 2011; Hjortset et al., 2013; Liu et al., 2009). 그 중에서 완전방호식 9% Ni형 저장탱크가 국내외에서 가장 보편적으로 사용되고 있다. 상기 형식은 벽체를 기준으로 9% Ni강 내조, 단열재 및 PSC 외조 벽체로 구성되어 LNG의 유출을 이중으로 방지하는 형식이다. 하지만 그럼에도 불구하고 1940년대부터 고농축·고에너지 상태의 인화성 물질인 LNG의 유출로 초래되는 대규모 폭발에 의한 치명적인 인적·재산적 피해로 직결된 사례들이 몇 차례 보고된 바 있다. 비록 LNG 유출 및 폭발 사고의 빈도는 높지 않지만, 사고로 발생하는 심각한 피해 규모를 고려하였을 때, 내·외조 이중 구조의 구조적 성능과 수밀성 및 내구성 등에 대한 신중한 검토가 선행되어야만 한다.

현재 LNG 산업에서 주로 사용되는 구조 설계 기준은 미국, 유럽, 일본 등의 국가에서 제정된 것들이며, 그 중 유럽의 EN14620 기준은 저장탱크의 내조로 강재를 사용하도록 제정되어 있다. 하지만 최근 미국 ACI 376-11 code(ACI 376-11, 2011) 에서 LNG 저장탱크 내부 구조물 축조에 콘크리트를 사용하는 규정을 발표하였고, 160,000 m³ 규격의 콘크리트 내외조 LNG 저장탱크 구조 형식이 개발 및 상용화되었다(Hjortset et al., 2013). 상기 내외조 이중 콘크리트 탱크(Composite Concrete Cryogenic Tank, C³T)를 상용화 단계까지 발전시킨 미국 Chevron사에 의하면 콘크리트를 LNG 저장탱크 내조 시공에 사용함에 따라 기존 9% Ni강 형식에 비해 약 10-15%의 공사비를 절감하고 6-8개월의 공기를 단축시킬 수 있다. 앞의 C³T의 구성은 탱크 내부 구조체로 포스트텐션 프리캐스트 콘크리트를 사용하며, LNG 유출 완전차단을 위해 얇은 두께의 탄소강(carbon steel) 혹은 니켈강(nickel steel)을 용접 설치한다. 또한, 초저온 상태의 LNG에 직접적으로 노출되는 콘크리트 벽체에는 외부에 포스트텐션을 가함으로써 극심한 내외부 온도차이로 인해 발생하는 인장응력과 그로 인한 균열을 억제해 LNG 유출을 차단한다.

현재로서는 국외의 LNG 저장탱크 관련 선진 규정과 형식의 개발에 대응해 국내 기업의 가스 산업 경쟁력 강화를 위한 대책이 필요한 상황이다. 하지만, 단순히 상기 C³T 구조 설계 방안과 같은 선진 기술을 수입 혹은 답습하는 것이 아닌, 독자적인 선진 기술 개발을 통한 산업 전반에 대한 주도권 확보가 바람직하다. 여기서 자체적으로 개발하는 선진 기술은 보다 높은 효율과 안전성을 확보할 수 있어야

한다. 이와 같은 목적에서 C³T 구조설계 규정을 다시 분석해 보면, 경제성 향상의 관점에서 가장 큰 강점이었던 포스트텐션 프리캐스트 콘크리트는 안전성 측면에서 역으로 취약점이 될 수 있다. 콘크리트는 압축강도 대비 인장강도의 크기가 현저히 작고 공극률과 비균질성이 높은 재료로 널리 알려져 있다(Ma et al., 2004; Orgass and Klug, 2004; Richard and Cehyrezzy, 1995). 이에 더하여 콘크리트에 가해지는 응력이 파괴 강도를 넘어설 때 매우 취성적인 파괴 거동을 보이는 것 또한 잘 알려져 있는 사실이다. 콘크리트의 취성적 거동을 보강하기 위해 사용되는 철근은 부재에 가해지는 대부분의 인장응력을 지지하며, 재료의 높은 연신율을 바탕으로 부재의 연성을 크게 향상시키도록 설계된다. 하지만 유의할 것은 철근콘크리트 부재에 가해지는 인장 응력이 철근과 콘크리트간의 부착력에 의해 철근으로 전달된다는 것이다. 하지만 이와 같은 응력 전달 과정에서 철근과 콘크리트의 부착 계면 주위의 콘크리트에 많은 수의 균열들이 발생해 기밀성이 크게 감소하게 된다. LNG 저장탱크 구조물의 경우 구조체 자중, 가스 압력 등의 지속 하중에 더하여 지진 및 폭격 등의 동적 하중이 가해질 경우 재료에 대한 균열발생 및 파괴로 인한 LNG 유출과 대규모 폭발로 이어져 큰 피해를 유발할 수 있다. 따라서 신진 형식의 LNG 저장탱크 개발을 위해 C³T 형식 대비 시공성 및 경제성에서 뒤처지지 않는 동시에, 보다 우수한 인장성능, 균열 저항성능, 기밀성 등을 바탕으로 높은 안정성을 확보할 수 있는 재료의 개발이 우선시된다.

초고성능 섬유보강 콘크리트(Ultra-high performance fiber-reinforced concrete, UHPFRC)는 일반적인 콘크리트와 비교했을 때 재료 배합에서 굵은 골재를 배제하고 잔골재 및 다양한 미립분말 형태의 재료들을 혼합해 제작된 매트리스에 역학적 성능 보강을 위해 보강섬유를 혼입한 재료이다. UHPFRC는 150 MPa 이상의 압축강도, 8 MPa의 설계기준 인장강도, 및 변형 경화(Strain-hardening) 현상을 보이며 높은 에너지 소산 능력(Toughness)을 보유한 재료이다. 또한 재료 전체에 고르게 분산된 보강 섬유들은 재료에 가해지는 인장 응력을 효과적으로 분산시켜 응력과 균열의 집중을 방지하는 동시에 재료의 파괴 시에 방사되는 파편의 수와 에너지를 크게 감소시킨다. 이와 같은 특성들을 지닌 UHPFRC가 LNG 저장탱크 축조에 사용될 경우 C³T 유형 대비 시공성을 크게 감소시키지 않으며, 안전성능을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

하지만 현재까지 초저온에서 UHPFRC의 역학적 성능과 초저온 노출에 의한 균열 거동 및 자기치유 거동을 분석한 사례가 없었다. 이에 따라 본 연구에서는 UHPFRC의 LNG 저장탱크 내외조 구조체 적용 적합성을 재료적 차원에서 분석하는 것을 목표로 초저온 노출로 인한 역학적 성능 변화, 균열 발생 여부, 미세균열 발생 후 자기치유 거동 등이 분석되었다.

2. 실험계획

2.1 UHPFRC 혼합물 제작

본 연구에서 사용된 UHPFRC 배합은 Table 1에 정리되어 있다. 먼저, 앞서 언급된 바와 같이 굵은 골재가 배합에서 배제되었음을 알 수 있다, 굵은 골재는 압축강도를 크게 감소시키지 않으면서 콘크리트의 수축량 억제, 유동성 향상 및 혼합 소요시간 축소 등의 이점들을 제공하는 것으로 널리 알려져 있다(Ma et al., 2004; Orgass and Klug, 2004). 하지만, 굵은 골재가 포함된 콘크리트에 압축력이 가해졌을 때 골재와의 계면에서 발생하는 균열의 크기가 골재의 직경에 비례하며 재료의 비균질성을 높인다(Richard and Cheyrez, 1995). 또한 Collepardi 등(Collepardi et al., 1997)은 강섬유가 보강된 매트리스에 굵은 골재가 포함되었을 경우 매트리스의 수축량을 제한하고, 매트리스와 강섬유의 부착 응력을 약화시켜 재료의 전체적인 휨 성능을 떨어뜨린다고 보고한 바 있다. 위와 같은 굵은 골재에 의해 유발되는 결합적인 요인들을 배제하기 위해 굵은 골재가 본 연구의 배합에서 제외되었다. 이어서 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 실리카 폼이 시멘트계열 재료로 사용되었으며, 두 재료의 화학적 구성과 물리적 특성은 Table 2에 나타나 있다. 시멘트와 실리카 폼의 비체적은 각각 $3,413 \text{ cm}^3/\text{g}$ 및 $15,064 \text{ cm}^3/\text{g}$ 이고 밀도는 각각 3.15 g/cm^3 및 2.50 g/cm^3 이다. 또한, 직경 0.2-0.3 mm의 규사와 직경 10 μm 의 실리카 플로워가 각각 잔골재와 충전재로 사용되었다. 또한 우수한 역학적 성능 발현을 위해 0.2의 낮은 물-결합재 비를 유지하는 동시에, ASTM C1437(ASTM C1437, 2007)을 기준으로 240-250 mm의 적정 흐름 값을 확보하고 보강 섬유의 침하 및 재료 분리를 방지하는 목적으로 폴리카르본산계 고성능 감수제

가 사용되었다. 재료의 구성 및 배합은 앞서 언급되었던 북미에서 상용화된 UHPFRC의 배합과 비교하여 실리카폼의 구성 성분만을 제외하고 매우 유사하다(Graybeal, 2008). 본 연구에서는 매트리스 유동성 향상에 높은 효율을 보이는 지르코늄 실리카 폼을 사용하였다. 초고성능 콘크리트의 역학적 성능을 보완하기 위해 체적비 2%의 강섬유를 혼입하였는데, 본 연구에서 사용된 강섬유의 유형은 앞서 언급된 바와 같이 길이 19.5 mm의 직선형 강섬유와 길이 30 mm의 비틀림 강섬유로 총 두 가지이다. 이어서 같은 변수의 시편에 대해 상온(Ambient temperature, A), 초저온(Cryogenic temperature, C) -162°C , 상온 회복(Recovered ambient temperature, RA)의 세 온도 조건이 적용되었다. 본 논문에서 길이 19.5 mm의 직선형 강섬유는 MS(medium-length straight) 섬유로, 그리고 비틀림 강섬유는 T(twisted) 섬유로 지칭되며, 시편의 명명은 섬유 유형과 해당 온도 조건으로 구분된다. 예를 들어 길이 19.5mm 직선형 강섬유가 보강된 시편을 상온에서 실험했을 경우 해당 시편은 'MS-A'로 지칭한다. 본 연구에서는 보다 정확한 실험 결과를 얻기 위해 각각의 변수에 대해 총 5개의 샘플들을 실험해 획득한 결과를 평균하여 대푯값으로 사용하였다.

UHPFRC의 제작 과정은 다음과 같다. 먼저 시멘트, 실리카 폼, 규사 및 실리카 플로워 등의 건재료들을 믹서에서 10분간 혼합한다. 이어서 물과 고성능 감수제를 투입한 뒤 10분간 추가로 혼합한다. 이어서 혼합물이 충분한 유동성과 점성을 갖추게 되면 강섬유가 고르게 분산될 수 있도록 천천히 투입한 뒤 마지막으로 5분을 추가 혼합한다. 이후 혼합물은 시편 제작 몰드에 타설되어 24시간 동안의 상온 양생 과정을 거친 후, 탈형되어 72시간 동안 90°C 에서 증기 양생된다.

Table 1. Mixture Proportions of UHPFRC (Graybeal, 2003)

W/B	Unit weight (kg/m^3)					
	Water	Cement	Zirconium SF	Silica sand	Silica flour	Superplasticizer
0.20	160.3	788.5	197.1	867.4	236.6	52.6

Table 2. Chemical Compositions and Physical Properties of Cement and Zirconium Silica Fume

Composition	Cement	Zr SF
CaO	61.33	0.04
Al_2O_3	6.40	0.43
SiO_2	21.01	94.3
Fe_2O_3	3.12	0.01
MgO	3.02	-
SO_3	2.30	-
Specific area (cm^2/g)	3,413	15,064
Density (g/cm)	3.15	2.50

2.2 압축실험 셋업

압축실험은 ASTM C 39(ASTM C39 2012) 기준을 따라 수행되었다. 300톤 용량의 만능시험기(Universal testing machine)이 사용되었으며, 자세한 실험 셋업은 Fig. 1에 나타나 있다. $\varnothing 100 \times 200$ mm 시편의 초저온 냉각을 위해 -192°C 의 액화질소(LN_2)가 사용되었는데, 실험자의 안전 및 실험 장비의 보호를 위해 Fig. 1a에 보이듯이 액화질소 용기를 이용해 시편의 중앙부만 국부적으로 냉각시켰다. 또한 시편의 파단을 중앙부로 유도하기 위해 높이 5 mm 길이 25 mm의 노치가 Fig. 1b와 같이 가해졌다. 가력속도는 변위제어 방식을 적용해 0.4 mm/min로 유지되었다.

Fig. 1. Compressive Test: (a) test setup and (b) geometry of specimen

2.3 인장실험 셋업

인장실험에는 300 kN 만능시험기(Universal testing machine)가 사용되었고 1.0 mm/min의 변위제어 형식의 가력속도로 실험이 진행되었다. 인장 시편도 압축 시편과 마찬가지로 중앙부에 가해진 노치 부분의 인장응력 및 균열선단 개구변위(crack mouth opening displacement, CMOD)를 측정하였다. 상온에서의 CMOD 값은 Fig. 2a에 나타난 바와

Fig. 2. Tensile Test: (a) test setup and (b) geometry of specimen

같이 노치 부에 설치된 클립게이지를 활용해 측정되었다. 하지만 초저온 실험 조건에서는 액화질소 용기가 시편 둘레에 설치되어 클립게이지를 사용할 수 없었다. 따라서 본 연구에서 측정된 모든 시편의 Stroke-CMOD 관계를 비선형 회귀분석을 활용해 대표적인 관계식을 도출한 후 초저온 시편들의 CMOD 값을 추정하였다.

2.4 초저온 냉각 및 자기치유 실험 셋업

시편의 LN 냉각시간은 사전 냉각 실험 결과에 기초해 진행되었다. 사전 실험에서 표면이 액화질소에 노출된 $\varnothing 100 \times 200$ mm 실린더 시편 중앙부의 온도가 -162°C 까지 떨어지는데 10분이 소요되었고, 이후의 온도변화는 점진적인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 25 mm의 노치가 가해진 실린더 압축 시편은 5분, 폭 25 mm와 길이 100 mm 인장 시편은 3분 동안 LN 노출에 의해 냉각된 후 역학적 성능 실험에 사용되었다.

앞서 언급된 바와 같이 LNG 저장탱크 내조 구조체의 초저온 노출에 의한 극심한 내외부 온도차는 부재에 심각한 모멘트를 유발해 균열 발생을 초래할 수 있다. 따라서 일반콘크리트(NC)와 UHPFRC의 초저온 노출과 열 변형 구조에 의한 균열 저항성을 분석하기 위해 Fig. 3에 보이는 엣지 타입의 시편이 제작되었다. 시편 양단에 위치한 매스에 연결된 얇은 플레이트 부위를 액화질소에 직접 노출시켜 국부적인 온도수축을 발생시키는 동시에, 양단부 구조에 의한 인장응력과 균열이 유도되었다. Fig. 3에 시편 규격 및 상세를 나타내었다. 시편의 중앙부에 아크릴 재질의 간이 수조를 볼트 결합을 활용해 설치한 후, 틈새에 실리콘을 도포해 LN_2 의 유실을 방지했다. 시편은 초저온(-192°C)에 20분간 노출된 후, 상온에서 점진적으로 온도를 회복하였다. 균열 거동 분석은 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 사용해 수행되었다.

Fig. 3. Edge-type Specimen for Cracking Test Under Cryogenic Temperature

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축 강도

압축강도 실험 결과는 Fig. 4에 정리되어 있다. NC, MS,

T 시편에 대해 압축강도는 초저온 노출에 따라 향상된 강도는 각각 97%, 46%, 47%로 상당히 높은 증가율을 보였다. 이와 같은 강도 증가 현상은 콘크리트 내부에 존재하는 수화물, 공극수 등의 여러 형태로 존재하는 수분의 동결에 의한 것이다. 이는 동결된 수분들이 재료 내에서 하중을 지지할 수 있게 되기 때문이다. 하지만 수분은 동결함에 따라 결정형 구조를 가지며 부피가 크게 팽창하게 되는데, 이는 재료에 큰 압력을 유발하게 되어 다수의 동결-융해 작용이 반복될 경우 미세구조에 손상을 가하는 것으로 알려져 있다(Marshall, 1982). 하지만 본 연구에서 시편들에 적용된 1회의 동결-융해 과정은 NC와 UHPFRC 시편의 압축강도를 크게 감소시키지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 4. Compressive Strength Ratios Depending on Temperature Conditions

3.2 인장성능 및 섬유 인발 특성

인장성능 평가 실험 결과는 Fig. 5에 정리되어 있다. 먼저 Fig. 5a에 나타난 바와 같이 NC의 경우 초저온 노출에 따라 인장강도는 증가하지 않는 것으로 나타났다. 하지만 최대 응력점에서의 CMOD 값이 크게 줄어들며 매우 취성적인 거동을 보였다. 또한 상온 회복 조건에서 인장강도의 큰 감소는 없었다. 하지만 탄성계수가 감소하고 최대 극한 CMOD 값이 크게 증가했다. 이는 동결-융해 과정에 따른 결과인 것으로 판단된다. Fig. 5b를 보면 MS 시편의 인장강도와 그에 상응하는 CMOD 값이 상온에서 약 18 MPa 및 0.3 mm로 측정되었던 반면에, 초저온 상태에서는 각각 24

MPa 및 1.7 mm로 크게 상승한 것을 확인할 수 있다. 반면에 Fig. 5c에서 T 시편은 초저온 노출 시에 MS 시편이 보인 거동과 상이한 양상을 보였다.

상온에서 MS 시편과 거의 동일한 인장 강도와 극한 CMOD 값을 보였던 T 시편은 초저온 노출 시에 37 MPa에 달하는 매우 높은 인장 강도를 보였으나, 0.5 mm로 비교적 낮은 극한 CMOD 값을 보였다. 게다가 최대 강도 이후에도 점진적으로 응력이 감소했던 MS-C 시편과 다르게, T-C 시편은 최대 응력점 이후 상당히 급격한 인장 응력의 감소 및 파괴 양상을 보였다. 마지막으로 상온 회복 조건에서 MS와 T의 UHPFRC 시편들은 초저온 노출에 의한 동결-융해 과정에 의해 인장 거동이 변화한 NC 시편과 다르게 상온 조건의 시편과 거의 유사한 인장 거동을 보였다. 먼저 UHPFRC의 인장강도가 초저온 노출에 따라 크게 증가했던 이유는 온도 변화에 따라 강섬유의 인발거동이 변화했기 때문이다. 일반적으로 상온에서 시멘트 매트릭스에 묻힌 강섬유를 인발할 경우, 매트릭스와 강섬유의 결합이 파괴되고 매트릭스로부터 떨어져 나온 미세한 입자들이 두 재료의 계면에 위치하게 된다. 이러한 입자들은 강섬유 인발에 대해 마찰 저항을 발생시키며 추가적인 인발 저항력을 유발하지만, 강섬유의 표면 경도에 비해 상대적으로 작은 경도를 지닌 상기 입자들은 쉽게 으스러져 그 저항력에 한계를 보인다. 하지만 앞서 소개된 바와 같이 시멘트 매트릭스가 초저온에 노출될 경우 내부 미세 공극수 동결에 의해 계면의 입자들이 경화하게 된다. 이에 따라 초저온 상태에서 인발되는 강섬유들은 강력한 인발 저항을 받게 되고 Figs. 6a 및 b에 보이는 것처럼 표면이 상온 인발 강섬유에 비해 많은 손상을 입게 된다. 이에 더하여 T 섬유의 경우 앞서 언급되었던 바와 같이 삼각형의 단면이 30 mm의 길이 방향을 따라 3회 비틀려 인발 시에 기계적인 인발 저항을 발휘하도록 설계되었다. 그러나 이러한 역비틀림 과정에서 T 섬유는 매트릭스에 조금 균열을 유발해 MS 시편에 비해 급격한 인장 파괴 양상을 보였다(Yoo et al., 2017). 하지만 앞서 언급된 바와 같이 초저온에 노출된 매트릭스의 강도가 크게 증가하였고, T 섬유는 상기의 역비틀림 작용에 있어 매트릭스로부터 매우 강력한 저항을 받게 된다. 이는 곧 38 MPa의

Fig. 5. Tensile Stress-CMOD Curves Measured at A, C, and RA Conditions: (a) NC, (b) MS, and (c) T specimen

인장 강도로 연결되었으나, 지나치게 높은 인발 저항력에 의해 T 섬유들이 Fig. 5c에 보이는 바와 같이 파단되었고, 급격한 응력의 감소를 보였던 것이다. 이러한 과정에서 T 섬유 표면에 발생한 사선 방향의 상흔들과 파단된 섬유의 모습들이 Figs. 6b와 7b에 각각 나타나 있다(Kim et al., 2018).

Fig. 6. SEM Images on Surface Damage of (a) MS and (b) T fibers pulled out at ambient and cryogenic temperatures

Fig. 7. SEM Images at the end of MS and T Fibers Pulled out at Ambient and Cryogenic Temperatures (Kim et al., 2018)

초저온 노출 시 앞서 소개된 바와 같이 콘크리트 내부 공극수는 동결해 부피가 팽창하고 재료에 압력을 유발한다. 또한 다양한 혼합 재료들의 각기 다른 열팽창 계수들의 차이로 인해 복합체 내부에 추가적인 압력도 발생하게 된다. 이와 같은 원인들에 의해 발생하는 압력들은 UHPFRC에 비하여 낮은 인장강도와 높은 물-시멘트비 및 다량의 굵은 골재가 함유된 NC에 보다 큰 피해를 유발할 수 있다. 반면에

UHPFRC는 비교적 낮은 물-결합제비와 작은 입자들로 구성되어 초저온 노출에 따라 재료 내에 발생하는 압력과 손상이 적을 것으로 판단된다. 또한 재료 전반에 분산된 강섬유들이 인장응력을 효과적으로 전달해 균열의 발생과 확장을 억제해 결합 발생 확률을 크게 감소시킨다.

이와 같은 이유로 상온 회복 조건에서 UHPFRC 시편들의 인장성능이 상온에서 실험된 시편과 동일한 거동을 보이게 된 것이다.

3.3 초저온 노출 시 균열 거동 분석 및 자기치유 성능 평가

2.3절에서 간략히 소개된 바와 같이, NC 및 UHPFRC로 제작된 Fig. 3에 보이는 엇지 타입의 시편의 중앙부를 LN₂에 20분간 노출시켰다. 따라서 시편 중앙부의 국부적인 급속한 온도 감소로 인한 수축과 이를 구속하는 양단으로부터의 구속력이 시편에 인장응력을 유발하였고, 그로 인한 균열 발생 여부가 광학현미경을 활용해 관측되었다. 관측 결과는 Fig. 8에 정리되어 있는데, 여기에서 초저온 노출에 따라 NC에서 9.5 μ m-22.5 μ m 폭의 균열들이 발생했음을 알 수 있다. 반면에 UHPFRC에서는 균열이 발생하지 않았는데, 이러한 이유는 NC에 비하여 UHPFRC의 인장강도와 균질성이 높기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 강섬유가 혼입된 시멘트 매트릭스는 강섬유의 응력 전달로 인해 극한 인장 강도 뿐만 아니라 초기 균열 강도 또한 증가하게 된다. 이에 더하여 균열이 확장되는 것을 균열 생성 초기부터 효과적으로 억제할 수 있어 초저온 노출 저항성에서 NC에 비해 우수한 결과를 보인 것으로 판단된다.

Fig. 8. Cracking Behavior of NC Specimen Exposed to Cryogenic Temperature

Edvardsen (1999)은 균열 내부에서 탄산칼슘(CaCO_3)의 형성은 자기치유 현상이 유일한 원인이라고 보고하였고, 다음과 같이 탄산칼슘이 물과 반응하여 형성되는 화학 반응을 제시하였다.

우선 대기중의 이산화탄소가 물에 녹으면 탄산염과 탄산수소염이 형성되며, 자유 칼슘 이온은 균열면을 따라 분포하는 수산화칼슘에서 발생한다. 이러한 탄산염과 탄산수소염이 물속의 자유 칼슘 이온과 반응해 형성된 탄산칼슘이 균열을 채우게 된다. 이에 따라 본 연구에서 UHPFRC의 미세균열을 유발한 후, 수분을 접촉시켜 균열면 치유 작용을 유도하는 실험을 수행하였다. 실험의 결과는 Figs. 9a, b, c, d에서 20℃ 수중양생을 통한 균열 치유 과정으로 0, 3, 7, 28일 차에 각기 촬영된 SEM 이미지들을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 9. Self-healing Process After (a) 0, (b) 3, (c) 7, and (d) 28 days of curing

초기 균열은 0일차의 사진에서 보이는 바와 같이 30-90 µm 정도의 폭으로 발생하였다. 3일 간의 수중양생을 거친 후 소량의 CaCO_3 결정들이 균열면에 형성되기 시작했다. 계속해서 양생 7일, 28일 차의 이미지를 보면, 많은 수의 CaCO_3 결정들이 형성되며 균열을 완전히 채우는 모습을 확인할 수 있다. 따라서 수중양생을 통해 생성된 CaCO_3 입자들에 의해 미세균열들이 채워지며 자기치유가 가능한 것으로 밝혀졌다. 구체적인 성능에 대한 후속 연구가 수행되어야 하겠지만, 이와 같은 결과에 의하면 LNG 저장탱크의 누출 및, 충격 하중, 혹은 오랜 사용으로 인한 미세 균열 발생 시에 간단한 수중양생을 통해 보수할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 UHPFRC를 LNG 저장탱크 건설에 적용하는

것의 적합성 평가를 목적으로 진행되었다. 이를 위해 상온, 초저온, 상온회복 조건에서 압축 및 인장 실험이 수행되었고, 이어서 초저온 노출에 의한 균열거동 평가와 미세균열 거동이 NC와 비교 분석되었다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다:

- (1) NC와 UHPFRC의 경우 초저온 노출 시에 압축강도가 40-100% 정도로 큰 폭 증가하였고, 1회의 초저온 동결-융해 과정에 의한 압축강도의 감소는 관측되지 않았다.
- (2) NC의 경우 초저온 노출 시에 인장강도가 증가하지 않았고, 보다 취성적인 파괴 형태를 보였다.
- (3) MS 시편의 경우 초저온 노출 시에 인장 강도와 극한상태의 CMOD 값이 각각 50% 및 250% 정도의 상당한 증가율을 보였다. 반면 T 시편은 초저온 노출 시에 90% 정도의 인장강도 증가율을 보였으나, 섬유와 파단으로 매우 급격한 파괴 양상을 보였다.
- (4) 초저온 노출에 의한 국부적인 온도수축과 구속에 의해 NC 시편에서 균열이 발생한 반면에, UHPFRC 시편에서는 균열이 관측되지 않았다. 또한 사전에 유도된 UHPFRC 시편의 미세균열이 28일 간의 수중양생 기간 동안 탄산칼슘 결정들에 의해 완전히 채워지는 것으로 나타났다.
- (5) UHPFRC 시편은 초저온 노출 시에 압축 및 인장 성능이 확연히 증가하며, 동결-융해 작용에 대한 저항 성능 또한 NC에 비해 우수한 것으로 밝혀졌다. 그러므로 28일간의 수중양생에서 관측된 미세균열의 자기치유 성능까지 고려하였을 때, UHPFRC를 LNG 저장탱크 건설용 재료로 적용하는 것이 NC에 비해 보다 효과적일 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

- ACI 376-11. (2011). *Code requirements for design and construction of concrete structures for the containment of refrigerated liquefied gases and commentary*. ACI Standard, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- ASTM C1437. (2007). *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*. ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 1-2.
- ASTM C39/39M-12a. (2012). *Standard test method for*

- compressive strength of cylindrical concrete specimens.* ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 1-7.
- Collepari, S., Coppola, L., Troli, R., and Collepari, M. (1997). *Mechanical properties of modified reactive powder concrete.* ACI Spec. Publ. 173, pp. 1-22.
- Edvardsen C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Mater. J.*, Vol. 96, No. 4, pp. 448-454.
- Graybeal, B.A. (2008). Flexural behavior of an ultrahigh-performance concrete I-girder. *J. Bridge Eng.*, Vol. 13, No. 6, pp. 602-610.
- Hjortset, K., Wernli, M., LaNier, M.W., Hoyle, K.A., and Oliver, W.H. (2013). Development of large-scale precast, prestressed concrete liquefied natural gas storage tanks. *PCI Journal*, Vol. 58, No. 4, pp. 40-54.
- Kim, M.J., Yoo, D.Y., Kim, S., Shin, M., and Banthia, N. (2018). Effects of fiber geometry and cryogenic condition on mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Cem. Concr. Res.*, Vol. 107, pp. 30-40.
- Liu, D.F., Yang, X.L., Hou, L.F., Cui, T.X., Hu, Y.T., and Wei, Y.H. (2009). Research and application of ultralow temperature 9Ni steel for LNG storage tank. *Journal of Iron and Steel Research*, Vol. 21, No. 9, pp. 1-5.
- Ma, J., Orgass, M., Dehn, F., Schmidt, D., and Tue, N.V. (2004). Comparative investigations on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates. *Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kessel, Germany, pp. 205-212.
- Marshall, A.L. (1982). Cryogenic concrete. *Cryogenics*, Vol. 22 No. 11, pp. 555-565.
- Orgass, M., and Klug, Y. (2004). Fibre reinforced ultra-high strength concretes. *Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kessel, Germany, pp. 637-647.
- Richard, P., and Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cem. Concr. Res.*, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511.
- 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.

<i>Received</i>	March 21, 2018
<i>Revised</i>	March 26, 2018
<i>Accepted</i>	April 6, 2018