

초고성능 시멘트 복합재의 특성 및 활용 현황

Characteristics and Application of Ultra High Performance Cementitious Composite



김성욱*
Sung-Wook Kim



강수태**
Su-Tae Kang



한상묵***
Sang-Mook Han

1. 머리말

건설 산업에서 가장 많이 사용되는 콘크리트는 성형성, 강도 및 경제성이 우수한 재료이다. 그러나 취성이 강하고 상대적으로 에너지 흡수 능력 및 인성이 부족하여 콘크리트로 구조물을 건설할 때는 철근을 보강하여 사용하고 있다. 반면에 철근콘크리트 부재에서 철근이 감당하는 인장응력, 휨응력 및 전단응력 등을 콘크리트 복합재가 일부분을 감당하고, 콘크리트 복합재 자체가 균열저항성, 초고강도 및 초고내구성을 지닌다면 동일한 소요하중에 대하여 부재 단면을 크게 축소시킬 수 있고 균열 발생을 최소화할 수 있으며 내구성이 매우 우수한 콘크리트 구조물을 건설할 수 있을 것이다.

초고성능 콘크리트(ultra-high performance concrete, 이하 UHPC)는 콘크리트의 취성 거동을 연성 거동으로 변환하기 위하여 대부분 섬유를 사용한다. 사용되는 섬유의 종류는 강섬유, 유기섬유 및 천연섬유 등이 있으며 매트릭스의 구성에 따라 실용적으로 사용되는 압축강도의 범위도 60 MPa에서 200 MPa까지 다양하다. 섬유를 사용하는 대표적인 초고성능 콘크리트로는 RPC(reactive powder concrete), ECC(engineered cementitious composite), CRC(compact reinforced composite), SIFCON, SIMCON(slurry infiltrated fiber concrete, mat concrete) 등이 있는데 재료의 구성과 역학적인 성질 및 내구 특성이 다소 상이하다. 이 중에서 본 고에서는 압축강도가 120 MPa에서 200 MPa에 이르는 초고강도, 초내구성 및 인성 특성을 갖춘 RPC 모델의 UHPC의 기술 현황과 구성 재료와 미세 구조 및 역학 특성에 대하여 살펴보기로 한다.

2. UHPC 구성 재료

UHPC는 마이크로 균열, 공극과 같은 콘크리트의 결함들을 최소로 갖는 복합 재료로서 구성 재료의 결합력이 강하고 결합체의 결점이 최소화되면 극한하중과 내구성이 향상된다는 원리에 기초한다. UHPC를 개발하기 위해서는 첫째, 조골재를 사용하지 않음으로써 골재와 수화생성물 간의 계면 영향을 극소화하고 둘째, 복합재의 공극을 최소화하고 치밀한 혼합을 위해 0.5 μm에서 1 mm 이하의 미립자를 적당한 비율로 혼입하며 셋째, 경화 전후에 다짐을 실시하여 밀도를 향상시키며 넷째, 성형 후 열처리를 통해 미세 구조를 향상시키는 과정이 필요하다.

위의 과정을 통하여 형성된 초고강도, 초내구성의 시멘트 복합재는 매우 높은 압축강도를 지닌 구조체를 형성할 수 있다. 그러나 상대적으로 낮은 연성 능력을 향상시키기 위하여 섬유를 추가함으로써 압축강도 뿐 아니라 인장 및 휨인장강도가 향상된 연성 거동이 가능한 구조체를 제작할 수 있다.

2.1 섬유의 종류 및 특성

섬유는 예전부터 콘크리트 또는 모르타르의 보강재로 많이 사용되고 있으며, 그 종류 및 특성도 다양하다. <표 1>에 콘크리트 및 모르타르에 많이 사용되는 섬유의 종류 및 특성에 대해 정리하였다. 현재 고인성 섬유보강 시멘트 복합재에는 강섬유, PVA 섬유, 고강도 폴리에틸렌섬유 등이 주로 사용되고 있으며, 이런 섬유에 대한 특성은 다음과 같다.

2.1.1 PVA 섬유

PVA 섬유는 원료 폴리머인 폴리비닐알콜(PVA)을 물과 DMSO의 용매로 용해시켜 용액으로 만든 다음 이 용액을 고화시키는 방법에 따라 습식과 건식으로 분류된다. PVA 섬유는 시멘트와의 부착성 및 내구성 등이 우수하여 고인성 시멘트 복

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원
swkim@kicit.re.kr

** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

*** 정회원, 금오공과대학교 토목환경공학부 교수

표 1. 섬유 특성

종류	인장강도($\times 10$ N/mm ²)	인장탄성계수($\times 10^3$ N/mm ²)	파단 시 탄성률(%)	비중
강섬유	49~98	200	-	7.85
PVA 섬유	69~150	11~36	3~13	1.30
폴리에틸렌섬유	25~70	1.4~2.2	10~15	0.95
폴리프로필렌섬유	30~75	1.4~2.2	10~15	0.91
아크릴 섬유	20~39	2~11	25~45	1.18
아라미드 섬유	200~290	62~130	2~4	1.45
탄소섬유	PAN	250~360	1~2	1.9
	Pitch	76~290	1~2	2.0
고강도폴리에틸렌섬유	220~480	70~175	3~6	0.98
고강도PVA섬유	200~260	39~41	5~6	1.30

표 2. UHPCC의 매트릭스 특성

매트릭스 종류	밀도(kg/m ³)	탄성계수(GPa)	인장강도(MPa)	파괴 시 변형률($\times 10^{-6}$)
보통포틀랜드시멘트·페이스트	2000~2200	10~25	3~6	100~500
고알루미눔시멘트·페이스트	2100~2300	10~25	3~7	100~500
보통포틀랜드시멘트·모르타르	2200~2300	25~35	2~4	50~150
보통포틀랜드시멘트·콘크리트	2300~2400	30~40	1~4	50~150

합재에 많이 사용되고 있다. 또한 PVA 섬유는 친수성을 갖고 있기 때문에 콘크리트와 결합되었을 경우 내구성에 나쁜 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다.

2.1.2 고강도 폴리에틸렌섬유

고강도 폴리에틸렌섬유는 PVA 섬유와 유사하게 제조되지만, 중합도가 매우 높은 곁쇄성 폴리머를 적당한 용제에서 용해하여 고배율로 연신 가능한 겔 형태로 제조한다. 고강도 폴리에틸렌 섬유는 카본섬유 및 아라미드섬유에 비해 강도, 내피로성, 내충격성이 우수하고, 내약품성, 내수성 등도 높은 성능을 가지고 있다.

2.1.3 강섬유

강섬유는 제조 방법에 따라 절단강선, 전단섬유, 절삭섬유 및 ME섬유(melt extraction fiber)로 분류된다. 절단강선은 강선을 절단기로 소정의 길이로 절단하여 제조된 것으로 형상 치수가 안정되어 있고 인장강도도 비교적 높다. 고인성 섬유보강 시멘트 복합체에 사용되는 것은 고강도 재질로 만들어지며, 직경 0.2 ~ 0.3 mm, 길이는 10 ~ 20 mm 정도, 인장강도는 2 GPa 이상이다. 전단섬유는 냉간압연강판을 절단기로 섬유 형태로 전단 가공하여 제조된 것으로 단면이 정방형인 것이 많이 사용된다. 절삭섬유는 블록 형태의 강판을 이용하여 절삭한 것으로 제조되며, 고강도,凹凸이 있어 매트릭스와의 부착력이 높다. ME섬유는 스테인레스용 강에서 직접 섬유를 급랭 응고하여 추출함으로써 제조되는 것이다.

2.2 매트릭스 구성 재료 및 특성

UHPCC의 매트릭스는 양호한 워커빌리티의 확보, 재료 분리 저항성 및 양호한 섬유의 분산성 등이 요구된다. 또한 경화 후에는 강도 및 강성 등의 역학적 특성, 치수의 안정성 및 내구성뿐만 아니라 보강용 섬유와의 부착이 요구된다. 일반적으로 UHPCC에서는 보강용 섬유의 혼입량이 비교적 많고, 보다 균질한 섬유 분산, 워커빌리티의 확보를 목적으로 매트릭스가 시멘트와 물로 구성되는 시멘트페이스트 또는 시멘트, 물 및 모래로 구성되는 시멘트모르타르의 경우가 많다. <표 2>는 섬유보강 시멘트 복합체에 사용되는 대표적인 매트릭스의 특성을 나타내었다.

매트릭스의 구성 재료로서는 통상의 시멘트계 재료와 동일한 구성 재료를 사용하고 있다. 즉 시멘트는 주로 보통포틀랜드시멘트, 세골재로서는 쇄석 및 규사 등이 사용되고 있으며, 또한 필요에 따라서 실리카폼, 고로슬래그 및 플라이애쉬 등의 혼화재 및 고성능감수제, 증점제 등의 혼화제가 사용된다.

시멘트는 일반적으로 보통포틀랜드시멘트를 사용할 수 있지만, 매트릭스의 물-시멘트비가 작고 고강도인 경우에는 워커빌리티 측면에서 높은 규산염을, 낮은 인 함량의 시멘트가 유리하다. 그리고 세골재는 쇄석 및 천연사가 사용되고 있지만, 워커빌리티 측면에서 쇄석보다 천연사가 유리하고, 특히 강도 및 강성의 관점에서 석영사 및 보크사이트를 사용하는 경우도 있다.

혼화재로서 실리카폼의 사용은 거의 필수적이지만 국내에서는 고가이므로 그 함량을 줄이거나 다른 혼화재로 대체 사용하는 점도 고려할 수 있다. 포졸란 재료를 사용할 경우 시멘트 수화반응에 의해 생성되는 수산화칼슘을 포졸란반응에 의해 소비하므로 매트릭스가 치밀해지고 역학적 특성이 향상되고, 섬유와의 부착 특성도 향상된다. 감수제는 매트릭스의 유동성 향

표 3. 전형적인 UHPC 재료구성 예

구성성분	Fibers steel	Sand quartz	Cement HSR	Quartz flour	Silica fume	Super plasticizer	Water(total)
길이	13						
직경	200.0	310.0	10.0	2.0	0.2		
비중	7.79	2.65	3.17	2.65	2.27	1.21	
중량비	0.216	1.430	1.000	0.300	0.325	0.012	0.200
부피비	0.021	0.402	0.235	0.084	0.107	0.004	0.142
1 m ³ 당 구성중량	16	1066	746	224	9	142	

상을 위해 폴리칼폰산계 및 나프탈렌계 고성능감수제 등이 사용되며, 섬유의 분산성을 향상시키기 위하여 셀로오스계를 비롯한 기타 계열의 증점제가 사용된다.

3. UHPC 배합 특성

보통콘크리트 및 상용화된 고강도콘크리트는 시멘트, 굵은 골재, 잔골재, 혼화재료 및 배합수로 구성되어 있다. 보통콘크리트에서 균열이 발생하고 파괴되는 것은 크게 두 가지 현상으로 구분할 수 있다. 즉, 골재와 시멘트 수화물 사이의 계면 박리와 수화물 결정 사이의 층간 박리를 들 수 있다. 적절한 시멘트량을 사용하고 수화구조가 정상적인 콘크리트에서는 주로 골재와 수화물간의 계면 박리가 콘크리트 균열 및 파괴를 지배한다. UHPC에서는 골재와 시멘트 수화물 사이의 계면 확장의 영향을 최소화하고 섬유의 분리저항성을 향상시키기 위하여 굵은골재를 사용하지 않거나 골재의 최대치수를 작게 하고 분체량이 많은 부배합을 사용한다.

〈표 3〉은 UHPC의 일종인 RPC의 재료구성 예를 보여주며, 〈그림 1〉은 UHPC의 구성 체적비의 분포를 보여 준다.

4. UHPC의 수화 및 미세 구조 특성

보통콘크리트에서는 배합 후 약 20 °C, 48시간 후인 초기에는 시멘트의 전체 수화도는 약 50 % 정도에 이르게 되고 이때 굳은 페이스트 매트릭스 내의 모세관 공극률은 약 40 % (모세공극률 3.7 %, 모세관수 33.5 %) 정도에 이르게 된다. 그러나 같은 시기에 UHPC의 한 종류인 RPC인 경우에는 극히 낮은 물-결합재비로 인하여 전체 수화도는 약 20~26 % 정도에 이르고, 이 때 모세관 공극률은 전체 7%의 낮은 수준을 유지하게 된다. 즉, UHPC는 보통콘크리트보다 훨씬 낮은 모세관 공극률로 인해 치밀한 조적을 갖고 출발하게 된다. 이후 UHPC는 일반적인 공정과정으로 재령 24~48시간에 90 °C의 가열 양생 과정을 거치므로 약 1%의 모세관 공극률을 지니게 된다. 이것은 수화 과정에서 모세관수와 수화물 층간수(interlayer water)가 고온의 영향으로 증발하여 미수화된 시

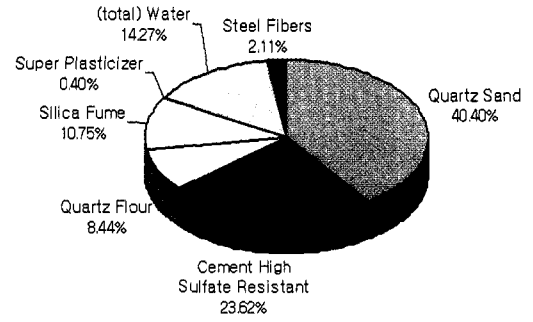


그림 1. 전형적인 UHPC의 체적 구성비 예

멘트 입자와 반응하게 되고, 실리카폼 등의 고분말 혼화재료의 포졸란반응이 활성화되어, 모세관 공극에 있던 수분이 제거됨과 동시에 고탄성의 포졸란 수화 물질인 실리케이트가 공극을 채우기 때문에 판단된다.

UHPC의 경우는 재료구성에서 굵은골재가 배제되고 결합재에 첨가된 실리카폼이 높은 분말도를 지니기 때문에 배합 과정에서 보통콘크리트보다 갇힌공기(entraped air)양이 기본적으로 적고, 여기에 앞의 수화 과정과 가열 공정에서 모세관 공극을 극히 줄임으로써 고강도, 고내구성을 지니게 된다. 한편 RPC의 미세 구조를 분석 단계로 구분하여 도식화하면 〈그림 2~4〉와 같다. 〈그림 2〉는 모세관 공극수와 층간수가 가열작용에 의해 삼출되기 전 단계로서 전체 수화도는 약 20 % 정도에 도달했을 때이며, 이때까지는 포졸란반응에 의한 수화 결정물(CSH crystallites)은 생성되기 전 단계이다. 여기서는 수화반응 초기에 형성되는 C₃S(알라이트)와 C₂S(벨라이트) 수화물 결정을 볼 수 있으며, 충전재인 잔골재와 quartz flour가 아직 완전한 포졸란 수화 반응체를 형성하지 못하고 있는 상태의 실리카폼들 사이에 자리하고 있는 것을 볼 수 있다.

〈그림 3〉은 부분적으로 포졸란반응을 한 실리카폼이 약 6×18×54 nm 크기의 CSH 결정질과 연결되고, 이 결정질은 약한 결합력을 갖는 분자형의 구조를 하고 있다. 그리고 CSH 결정질 사이에 희게 보이는 부분은 나노 공극으로서 결정간수(inter-crystallite water)로 차있다.

〈그림 4〉는 나노 스케일에서 CSH 결정질의 분자구조가 선명히 나타나기 시작하는 단계이며, 실리카폼과 CSH 결정질의

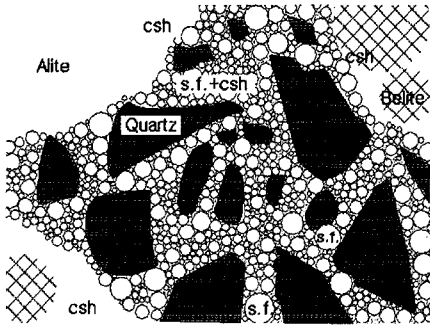


그림 2. Micrometer Scale에서의 UHPC 미세구조 모식도

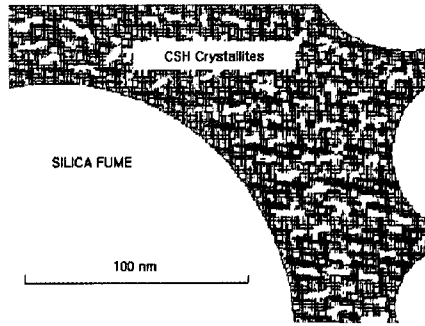


그림 3. 100 Nanometer Scale에서의 UHPC 미세구조 모식도

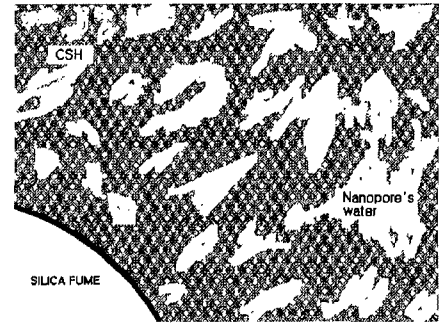


그림 4. CSH 결정질과 나노공극의 미세구조 모식도

결합이 확고해지는 단계로서 이들 결정체 간의 연결력이 극대화되면서 역학적인 성능이 충분히 발휘될 수 있는 높은 압축강도와 인장강도 특성을 나타낼 수 있는 단계이다.

5. UHPC의 역학적 특성

UHPC의 역학적 특성을 보통콘크리트 및 섬유보강 콘크리트와 비교하면 <표 4>와 같이 나타낼 수 있다. UHPC의 압축강도, 휨강도 등은 보통콘크리트와는 비교가 되지 않을 정도로 높은 역학적 물성을 지니며, 보통콘크리트가 취성이 강한 반면 UHPC는 역학적으로 우수한 연성 특성을 지닌다. UHPC는 FRC(Fiber Reinforced Concrete)와 마찬가지로 선형 응력 변형 한계 상태에 이른 후 FRC가 페이스트 매트릭스의 급격한 파괴로 단지 섬유만으로 파괴에너지를 감당하게 되어 응력-변형을 곡선이 급격히 감소하는 반면, UHPC는 다분산 균열(multiple cracking)을 형성하면서 극한 상태까지는 응력-변형을 곡선이 계속 증가한다. 단 초고강도 일 경우 이러한 변형연화 거동은 다소 감소되는 경향이 있으며 다분산 균열의 특성도 다소 떨어진다. 즉, UHPC는 기본

적으로 변형 경화 및 변형 연화 거동 특성을 지니며 섬유와 가교 작용에 의해 균열응력에 저항하면서 변형에너지를 상당량 흡수하는 고인성 특성을 지닌다. UHPC의 변형 경화 현상과 다분산균열(multiple cracking) 특성을 실현하기 위한 필수 조건은 균열 면에서 섬유에 의한 가교 작용으로 발생하는 힘이 매트릭스의 균열 시 발생하는 인장력을 상회할 수 있어야 하고, 그 비가 클수록 많은 균열이 발생하기 쉽고 인성능력이 향상된다. 이러한 가교 작용은 섬유의 강도, 매트릭스의 강도 및 섬유와 매트릭스의 부착강도, 섬유의 혼입률, 매트릭스의 공기량 등이 영향을 주로 받지만, 섬유의 분산성 및 시공성의 영향도 받는다.

6. UHPC의 내구 특성

콘크리트의 내구 특성은 각종 열화 인자에 대한 저항성으로 평가할 수 있다. 대부분의 열화인자에 대한 저항성은 콘크리트의 미세 구조 내의 공극 구조로 설명이 가능하며, 이것은 미세 구조 내의 투과성(permeability)과 밀접한 관계를 가진다.

<표 5>는 UHPC에 대하여 질소를 이용한 투기성 시험, 염

표 4. UHPC의 역학적 특성치

특성	보통콘크리트	섬유보강 콘크리트	초고강도 콘크리트
압축강도	21~27 MPa	30~50 MPa	50~400 MPa
휨강도	1~3 MPa	5~15 MPa	1560 MPa
탄성계수	21,000~35,000 MPa	30,000~40,000 MPa	< 50,000 MPa
파괴거동	Brittle	Quasi-Brittle	Ductility
균열패턴	Partial	Partial + Multiple	Multiple

표 5. UHPC의 내구적 특성

구분	UHPC		HPC	NSC
	20°C(28d)	20°C(2d)+90°C(2d)	20°C(28d)	20°C(28d)
양생방법	20°C(28d)	20°C(2d)+90°C(2d)	20°C(28d)	20°C(28d)
W/C	0.2	0.2	0.35	0.5
비건조/건조 시 투수성	1.0E-22<1E-20	1.0E-22<1.0-20	1.0E-195.0E-18	2.0E-183.5E-17
염소이온 확산계수(m ² /s)		2.0E-14	1.5E-12	1.8E-11
동결융해 표면박리저항성(g/cm ²)	7	7	900	>1000
중성화 깊이(mm)	0.05	0.04	2	10

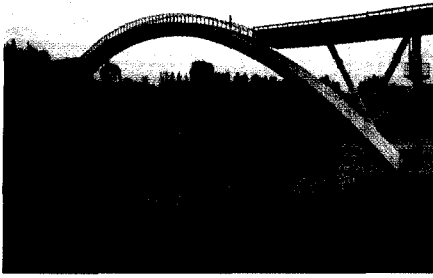
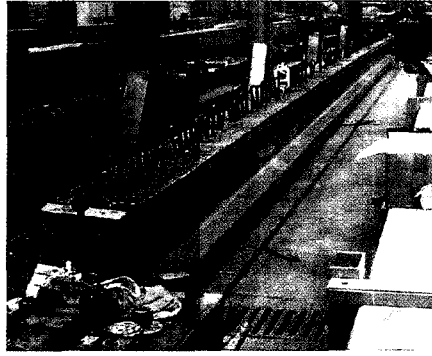
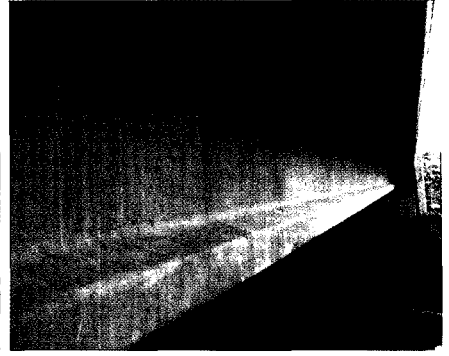


그림 5. UHPC로 시공한 서울 선유교



(a) 19.6 m의 I형 UHPC 거더



(b) Sherlly Creek 교량에 거치된 UHPC I형 거더

그림 6. UHPC의 적용

소이온의 확산계수 시험, 동결융해 시험 및 중성화 깊이를 측정한 시험 결과의 예이다. 표에서 보는 바와 같이 UHPC의 질소가스 투기성은 보통콘크리트에 비해 10^{-4} 정도로 작고, 염소이온의 확산계수는 10^{-4} 정도, 동결융해저항성 및 중성화에 대한 저항성 등도 보통콘크리트와 비교해 월등히 높은 내구성능을 나타낸다. 이것은 모세관공극이 UHPC의 경우 매우 단락되어 있기 때문이며, 침투한 물분자의 이동이 자유롭지 못하여 열화 인자가 동반된 이온의 이동이 극히 제한되기 때문이다. 또한 UHPC에서는 유체나 확산 이온 등이 나노스케일의 CSH 결정층을 통과하여야 하며, 이 CSH 결정층은 비틀려서 연결되어 있어서 이동 통로가 상당히 길어져, 결정체의 층을 돌아가야 하기 때문에 결국 통과 능력이 저하된다.

이상과 같이 UHPC의 경우 매트릭스와 골재 사이의 천이영역을 최대한 밀실하게 하고 모세관 공극의 연결을 최대한 단락시킬 수 있게 되어 있으므로 각종 열화 인자가 동반된 유체나 가스의 확산과 침투를 방해하기 때문에 우수한 내구성을 지닐 수 있다.

7. UHPC의 적용 현황

입자의 크기가 적으면 결합체의 강도가 강해진다는 세라믹 제조 개념에 바탕을 둔 UHPC는 초고강도, 유동성, 고내구성, 연성거동 등의 장점을 가지고 있으며 구조 부재로서의 사용예가 1997년 캐나다의 Sherbrook 보도 교량이 최초로 시공된 이후 증가하고 있다. 2002년 시공된 서울의 선유교는 <그림 5>와 같이 π 형 단면의 포스트텐션 도보 교량으로서 상부 슬래브 두께가 30 mm로 매우 단면적이 적은 상대적으로 긴 교량의 형태를 가지고 있다. 2000년 6월 일본의 태평양 시멘트 회사는 Ductal 사업추진실을 설치하였고, 2002년 10월 사카다미라이교를 완공하였다. 2003년 호주의 Sherlly Creek에 최초로 <그림 6 B>와 같은 차량교량이 단경간 19.6 m의 경간으

로 건설되었다.

2002년 이후 유럽과 미국에서 UHPC를 이용한 다양한 구조물의 시공되었고, 새로운 구조물에 대한 장기간의 모니터링을 동시에 실시하고 있으며, 이에 대한 설계기준을 마련하여 UHPC 구조물의 설계와 시공에 대한 기초적 토대를 제공하고 있다. 2002년 네델란드에서는 해수 유입을 막는 게이트의 뒷면 트러스를 UHPC로 제작하여 강재를 대체하는 구조물로 적용하였다¹⁾. RPC를 개발한 프랑스에서는 초기에 구조 부재보다는 방음벽과 같은 비구조 부재에 주로 적용하였으나 현재는 2개의 고속도로 교량을 UHPC로 시공하였다. 2004년 캐나다의 캘거리 경전철역을 UHPC를 이용하여 시공하였으며 <그림 7>에서 보는 바와 같이 종래의 콘크리트로서는 구현할 수 없는 형태의 날렵한 셸구조물을 시공하였다.

독일은 노후화된 44 m 2경간 콘크리트 박스거더 교량을 바닥판을 UHPC로, T형보는 고강도콘크리트로 합성된 교량으로 대체하는 작업을 2003년부터 기획하여 세부적 설계를 거쳐 2006년에 준공을 목표로 계획 중에 있다. 초고강도 콘크리트의 사용 목적은 초고강도로 인한 교량 단면의 축소보다는 초고강도 콘크리트가 가지는 고내구성 즉, 낮은 투수성, 화학적 침해와 기계적 마모에 대한 저항성, 탄산화 깊이의 감소, 염해에 대한 저항성 등의 장점에 무게를 두어 시공을 기획하였다²⁾.

UHPC가 프랑스에서 개발되었고 유럽과 캐나다에 먼저 보급된 관계로 미국에는 비교적 늦게 UHPC가 인식되었고 도입되었으나 현재 활발하게 UHPC 재료와 구조물에 대한 연구와 시공을 하고 있다. 미국의 McLean에 있는 미연방고속도로관리(FHWA)의 Turner-Fairbank 고속도로연구센터(TFHRC)는 이 새로운 재료인 UHPC의 적용성을 시험하고 있고, 주정부가 UHPC를 사용하여 교량시공을 할 수 있도록 도움을 주고 있다. TFHRC의 후원으로 Iowa주는 UHPC를 사용한 교량을 2005년 시공하였고, Virginia주는 UHPC 교량을 시공 중에 있다. 보통의 교량은 75년에서 100년 정도의 수명이 바람직한



그림 7. UHPC로 시공한 캐나다 캘거리의 경전철역

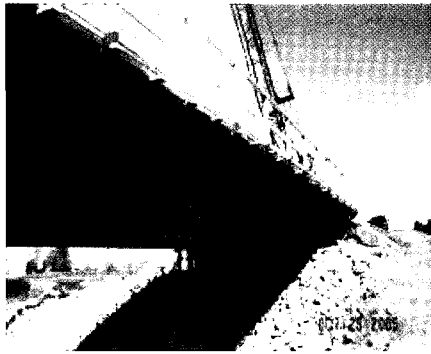


그림 8. Wapello의 UHPC 교량

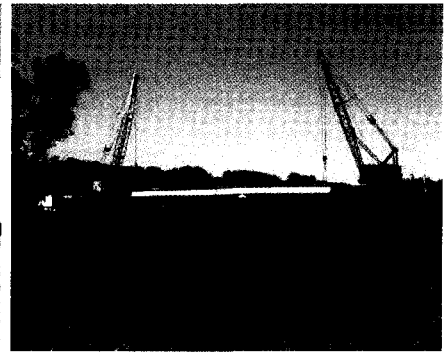


그림 9. Wapello 의 33 m UHPC 거더를 운반하는 모습

데 종래의 콘크리트로는 힘든 실정이다. 그러나 UHPC교량의 내구연한은 200년 정도라는 점이 가장 큰 장점으로 FHWA는 보고 있다. 또한 교량의 단면이 적고 슬림하여 재료의 사용량이 적고 프리캐스트 UHPC 거더는 가볍고 수송이 용이하여 시공 시간이 단축되고 노동력을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다고 보고 있다³⁾.

미국의 FHWA는 고속도로 교량에 UHPC를 사용하기 위해 제도적인 뒷받침을 하고 있다. FHWA 직원이나 관계자들에게 프리캐스트, 프리스트레스트콘크리트 학회의 2004년 국가 교량 컨퍼런스와 그 외의 컨퍼런스에서 FHWA의 UHPC에 대한 연구 결과를 교육하는 프로그램을 가졌다. 2005년에는 미국콘크리트학회, FHWA와 국가 콘크리트교량위원회의 후원으로 UHPC에 관한 세미나와 교육 프로그램이 개최되었다.

Iowa주의 Wapello County에 FHWA의 혁신적인 교량 연구와 시공 프로그램의 일환으로 미국내 최초의 UHPC교량을 시공하였다. 이 교량은 <그림 8>과 같이 9m의 폭과 33m의 단경간의 제원과 3개의 I형 UHPC거더로 이루어져 있으며 기존의 트러스 교량을 대체하여 시공되었으며 준공된 후 Iowa 대학에서 이 새로운 교량의 거동에 대한 모니터링을 하고 있다⁴⁾.

8. 결 론

초고강도 섬유보강 콘크리트는 단위 체적 당 콘크리트 제조 단가는 높지만 단면을 절약할 수 있고, 주철근 또는 프리스트레스 긴장재 외의 전단보강 철근과 보조철근을 제외시킬 수 있다는 점에서 시공 단가의 격차를 줄일 수 있다.

그러나 UHPC가 유럽과 미국 등 여러 나라에서 콘크리트 구조물의 재료로 채택되고 있는 이유는 뛰어난 내구성과 수명이 라는 점이다. 보통콘크리트 구조물의 수명은 길게 잡아도 75년에서 100년 정도로 볼 수 있지만 UHPC는 200년 정도의 수명을 목표로 구조물을 설계해도 큰 무리가 없다. 5% 이내의

공극과 작은 입자와 고온의 양생 과정에 따른 xonotlite 성분이 많은 수화반응 등으로 인해 동결융해, 중성화, 화학적 저항성, 염해저항성, 마소저항성 등에 대해 월등한 내구성을 가지고 있다.

초고강도 섬유보강 콘크리트는 1997년 처음 보도 교량이 시공된 후 유럽, 미국, 오스트레일리아 및 캐나다에서 교량 등에 많은 시공을 하였고, 건설 중인 교량도 상당수 있다. 미국의 FHWA, 독일의 FEHRL은 설계자 지침을 제정하여 교량을 시공하였고, 준공 후 UHPC 교량에 대한 모니터링을 지속적으로 수행하고 있다.

국내에서는 2002년 한불수교 100주년 기념사업으로 세계에서 두 번째 보도 교량인 선유교가 시공되었고, 이 후 UHPC에 대한 연구가 수행되고 있다. 그러나 국내의 전문가들에게 UHPC 재료에 대한 인식이 덜 확산되었고, 단위 재료에 대한 가격 상승 측면을 제기하는 상태에서 더 진전되지 못하고 있다. 전체적인 시공단가, 내구성, 수명, 교량의 경간대비 형고의 축소 등 종합적인 면에서 볼 때 간과할 수 없는 새로운 구조 재료라 할 수 있다. □

참고문헌

1. C. van der Veen and C.R. Braam, "Structrues in very high strength concrete", *Proceedings of ConMat'05 and Mindess Symposium*, 2005.
2. FEHRL, Road Research Meeting, *UHPRC for New Structures*, June 2005.
3. Washington State Technology Transfer, *Achieving the Promise of Ultra-High-Performance Concrete*, Issue 85, Winter 2005.
4. Dean Bierwagen, Ahmad Abu-Hawash, "Ultra High Performance Highway Bridge".