

균열제어형 DFRCC를 사용한 RC 구조물 보수공법

Repair Method of RC Structures Using Crack Control Type of DFRCC



한병찬*
Byung-Chan Han



김재환*
Jae-Hwan Kim



임승찬*
Seung-Chan Im



森井直治**
Naoharu Mori



권영진***
Young-Jin Kwan

1. 서 언

최근, 국내에서도 노후된 철근콘크리트(RC) 구조물의 보수보강 시장이 급격히 확대됨에 따라 RC 구조물의 유지보수 기술이 고도화 되고 있으며, 더불어 다양한 종류의 보수·보강재료 및 공법이 개발되어 각종 보수공사에 적용되고 있다. 그러나, 보수·보강이 실시된 RC 구조물이 공용 후 수년 내에 보수 부위의 재균열 또는 철근의 재부식 등 다양한 형태의 재열화현상이 자주 발생되고 있어, 사회간접자본시설의 대부분을 차지하고 있는 RC 구조물의 유지관리 비용 절감 및 장수명화를 도모하기 위해서는 보다 내구성 및 균열저항성이 우수한 새로운 보수재료 및 공법의 개발이 시급히 요구되고 있다¹⁾.

한편, 최근 시멘트(또는 모르타르)계 매트릭스에 고장력 마이크로 단섬유를 적정량 첨가하여 제조하는 고인성 시멘트복합체(ductile fiber reinforced cementitious composite, 이하 DFRCC라 함)가 개발되어 각종 건설재료로서의 활용이 기대되고 있다. 이러한 DFRCC는 기존의 시멘트계 재료(폴리머시멘트계 보수재료 포함)와는 달리 휨하중 작용 하에서 초기균열이 발생한 후에도 응력이 저하하지 않고 변형의 증가와 함께 응력이 지속적으로 증대되는 변형경화 특성(displacement hardening behavior)과 이 과정에서 균열폭이 일정하게 제어된 복수의 미세균열인 멀티플크랙(multiple crack) 특성을 발휘할 수 있어, 보수·보강재료, 에너지 흡수재, 지수재 등으로의 활용이 시도되고 있다²⁾.

이에 본고에서는 균열제어성능이 우수하여 구조체 표면에 발생하는 매크로크랙을 마이크로크랙으로 제어함으로써 모체 콘크리트로 외부 열화인자의 침입을 근본적으로 억제할 수 있으

면서 구조물의 보강성능도 동시에 향상시킬 수 있는 새로운 보수재료·공법인 균열제어형 DFRCC를 이용한 노후 RC 구조물의 보수공법을 소개하고자 한다.

2. DFRCC의 개요

DFRCC란 <그림 1>에 나타낸 바와 같이 시멘트계 재료를 단섬유에 의해 보강한 복합재료(섬유보강 시멘트 복합재료, FRCC : fiber reinforced cementitious composite)에 속하는 것으로, 휨응력 하에 있어서 변형경화 특성 및 멀티플크랙 특성을 나타내어 우수한 균열제어 성능과 변형 성능을 발휘하는 재료로 정의된다. 이러한 DFRCC의 특성을 발현하기 위해 일반적으로 직경이 수 ~ 수십 마이크로인 PVA 섬유 및 고장력 PE섬유가 체적으로 1.0 ~ 2.0% 정도 함유된다.

2.1 고인성 시멘트 복합재료(DFRCC)

시멘트계 재료를 섬유로 보강한 복합재료이며, 휨응력 하에 있어서 복수균열 특성을 나타내고, 휨, 인장, 압축파괴시의 인성이 대폭적으로 향상된 재료이다. 이러한 DFRCC 중에는 1축 인장응력 하에 있어서 복수균열 특성과 변형경화 특성을 나타내는 재료인 HPRCC(high performance fiber reinforced cementitious composite)가 있으며, 이 재료는 금속과 같은 연성과 파괴에너지가 기록되고 있다.

2.2 고성능 시멘트 복합재료(HPRCC)

A. E. Naaman과 H. W. Reinhardt에 의해 정의된 HPRCC는 1축 인장응력 하에 있어서 복수균열 특성과 변형경화 특성을 나타내는 섬유보강 시멘트 복합재료이다. 한편, DFRCC는 HPRCC를 포함하며, 보다 광범위한 재료를 대상으로 하고 있다. DFRCC

* 정회원, (주) AMS엔지니어링 공학박사
kjh0999@empal.com

** 정회원, 일본 (주)DEROS 대표이사

*** 정회원, 호서대학교 소방방재학과 교수

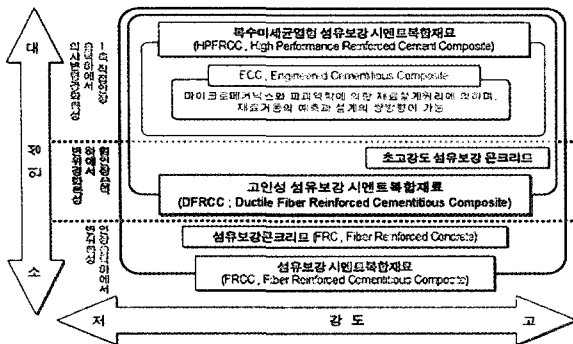


그림 1. 섬유보강 시멘트 복합재료 (FRCC) 의 분류

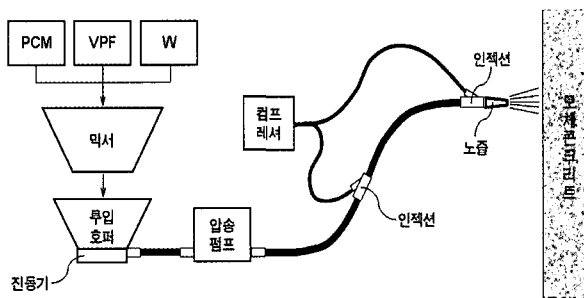


그림 2. 균열제어형 DFRCC (DU-모르타르) 의 시공법 일례

의 Ductile은 재료의 파괴인성뿐만 아니라 구조물에 적용될 때 인성 및 연성의 향상도 포함한 의미를 가진 것이다.

2.3 섬유보강 시멘트계 재료(FRCC)

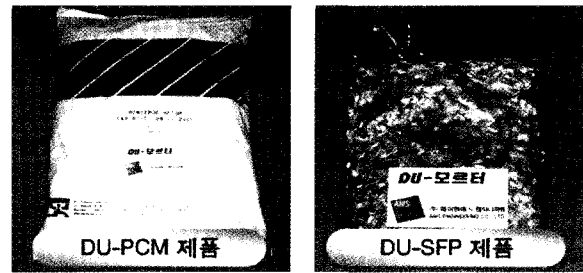
시멘트계 재료를 섬유로 보강한 복합재료 전체를 나타낸다. DFRCC에 더하여 상기의 DFRCC에 해당되지 않는 재료, 예를 들면, 섬유보강 콘크리트(fiber reinforced concrete, FRC)나 섬유보강 모르타르 등도 포함된다.

3. 균열제어형 DFRCC를 이용한 보수공법

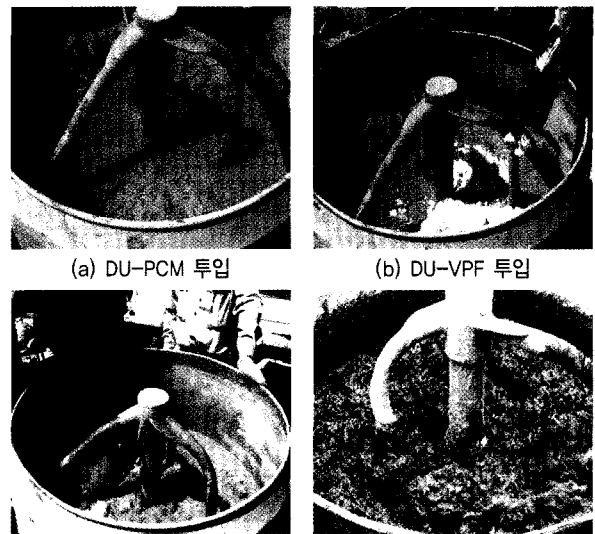
3.1 보수공법의 개요

균열제어형 DFRCC를 이용한 RC 구조물의 보수공법은 크게 라이닝공법, 단면복구공법 및 단면보강공법으로 구분되며, 이들 공법 중에서 라이닝재 또는 단면복구재로 사용되는 균열제어형 DFRCC(DU-모르타르™)는 <사진 1>에 나타난 특수 배합된 프리믹스형 폴리머시멘트모르타르(DU-PCM), 마이크로 단섬유와 기능성 첨가제로 구성된 비닐팩 포장의 단섬유 제품(DU-VPF) 및 물로 이루어진다.

3.2 보수재료(DU-모르타르™) 의 제조·시공법



(a) 매트릭스 (b) 단섬유 (PVA)
사진 1. 균열제어형 DFRCC 제조용 재료



(a) 물투입 (b) 비빔된 DU-모르타르

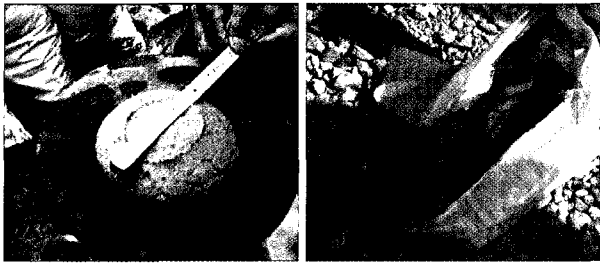
사진 2. DU-모르타르의 제조 순서

DU-모르타르는 <사진 2>에 나타난 바와 같이 현장에서 별도의 계량공정 없이 포대단위로 별도 포장된 각 재료(DU-PCM 및 DU-VPF)를 믹서에 투입하여 용이하게 제조할 수 있으며, 마이크로 단섬유가 별도로 포장되어 있어 현장의 요구 성능에 따라 섬유혼입률을 자유롭게 조정하는 것이 가능하다. 더욱이, DU-모르타르는 특수하게 배합 조정된 PCM을 사용하고 있어 다량의 섬유가 혼합되어도 비빔시 화이버볼(fiber ball)현상이 발생하지 않고 섬유의 분산성이 우수하다.

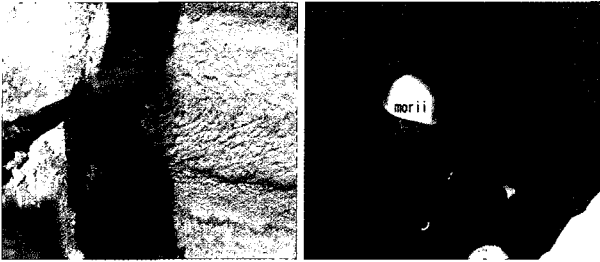
이와 같이 제조된 DU-모르타르는 모체 콘크리트의 바탕처리 후 기존의 보수재료와 같이 흡수이나 뿔칠장비에 의해 시공되며, 특히 뿔칠시공법에서는 <그림 3>와 같이 압송호스의 중간부에 압축공기를 공급할 수 있는 인젝션을 설치함으로써 장거리까지 혼합물의 운송도 가능하다.

3.3 보수재료의 각종 성능

<표 1>은 노후 RC 구조물의 보수공사에 사용되는 균열제어형 DFRCC인 DU-모르타르의 품질규격을 나타낸 것이다.



(a) DU-모르타르의 플로우 (b) 노즐에서의 토출 상황



(c) 뽀칠시공 상황 (d) 미장시공 상황

사진 3. DU-모르타르의 시공성



(a) DU-모르타르의 플로우 (b) 노즐에서의 토출 상황

사진 4. DU-모르타르의 뽀칠두께

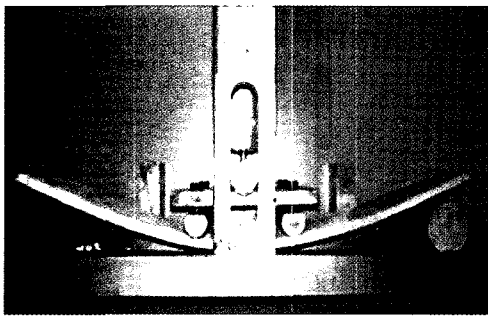


사진 5. DU-모르타르의 변형 능력

표 1. DU-모르타르의 품질규격

평가 항목	품질규격	시험 방법
압축강도	35.0 MPa 이상	KS F 4042
휨강도	8.0 MPa 이상	KS F 4042
부착 강도	표준조건 1.5 MPa 이상 온냉반복 1.5 MPa 이상	KS F 4042
온냉반복	1.5 MPa 이상	KS F 4042
인장강도	3.0 MPa 이상	직접인장
경화수축률	0.05 % 이하	KS F 4042
열팽창계수	$2.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 이하	KS F 4042
탄산화저항성	2.0 mm 이하	KS F 4042
염화물이온침투저항성	1,000 Coulombs 이하	KS F 4042

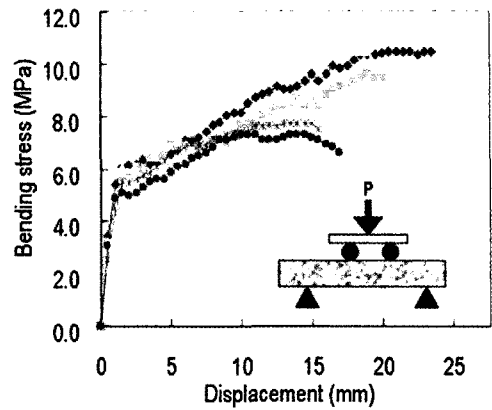


그림 3. DU-모르타르의 휨실험 결과

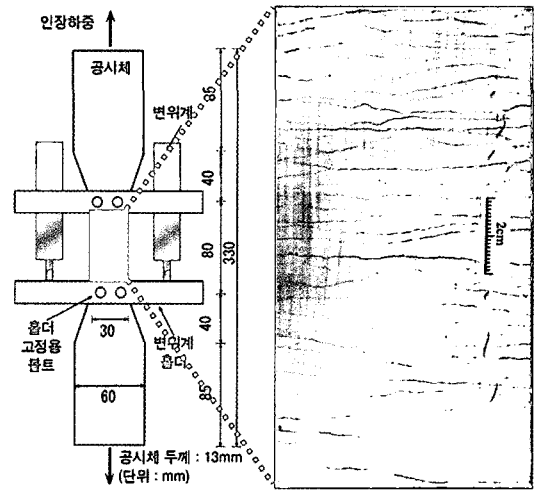


그림 4. DU-모르타르의 인장시험 개요 및 멀티플랙

3.3.1 시공 성능

DU-모르타르는 뽀칠시공 시 압송능력을 확보하기 위해 물/모르타르비(W/M)는 17 ~ 23 wt.%, 테이블 플로우치는 약 130 ~ 150 mm로 설계하는 것이 바람직하며, <사진 3(a)>는 실시공에 사용된 DU-모르타르의 플로우 측정 일례를 나타낸 것이다.

또한, DU-모르타르는 <사진 3(b)>와 같이 매트릭스로서 특수 배합 조정된 폴리머시멘트모르타르를 사용하고 있어 다량의 섬유를 함유하고 있음에도 불구하고 펌프압송시 섬유에 의한 압송호스의 폐색이나 섬유의 분리현상이 발생하지 않으며, 더욱이 압송호스의 중간부에 인접선을 설치함으로써 장거리(수평거리 약 50 m, 수직거리 약 25 m)까지 운반할 수 있다.

한편, DU-모르타르는 현장조건에 따라 뽀칠시공<사진 3(c)> 및 미장시공<사진 3(d)>이 가능하며, 다량의 섬유혼입 및 높은 점성에 의해 뽀칠시공 시 기존의 보수재료에 비해 1회 뽀칠두께(벽면: 약 100 mm, 천정면: 약 80 mm)를 대폭적으로 증대시킬 수 있고<사진 4>, 더욱이 리바운드율을 크게 저감시킬 수 있다.

3.3.2 역학적 성능

〈사진 5〉 및 〈그림 3〉은 PVA 섬유혼입률 (V_f) 1.9%인 DU-모르타르의 휨시험시 변형 능력 및 휨응력-변형곡선의 일례를 나타낸 것이다. 사진에서 보는 바와 같이 휨하중 작용 하에서 우수한 변형 성능을 나타내고 있으며, 〈그림 3〉에 나타낸 바와 같이 초기균열이 발생한 후에도 응력의 저하 없이 변형의 증가와 함께 응력이 다시 증가하는 변위경화 특성을 보이고 있다. 또한, 〈그림 4〉는 DU-모르타르 (PVA, $V_f = 1.9\%$)의 직접인장시험의 개요 및 시험 후 균열 발생 상황의 일례를 나타낸 것으로, 직접인장시험 시 일정한 간격으로 미세균열이 다수 발생하는 멀티플크랙 특성을 뚜렷하게 발현하는 것을 알 수 있다.

3.3.3 내구성 성능

〈그림 5〉는 $\phi 9\text{mm}$ 철근이 보강된 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 시험체를 제작한 후 휨시험을 실시하여 인위적으로 시험체 하부에 균열을 발생시킨 일반 폴리머시멘트모르타르(PCM) 시험체와 DU-모르타르(PVA, $V_f = 1.9\%$) 시험체의 축진중성화 (CO_2 5%, RH $60 \pm 5\%$) 실험 결과의 일례를 나타낸 것이다. 그 결과, 현재 단면복구재로 보편적으로 사용되고 있는 일반 PCM 시험체는 휨시험 시 동일 변위량에서 1.0mm 이상의 유해균열이 발생되었고, 이 유해균열로 CO_2 가 용이하게 침투되었음을 알 수 있다. 반면, DU-모르타르 시험체는 휨시험 시 평균 $60\mu\text{m}$ 이하의 미세균열이 일정한 간격으로 다수 발생

하였고, 축진 중성화 실험을 실시하여도 균열폭이 미세하게 제어되어 CO_2 의 침입이 억제되는 것을 확인할 수 있었다.

〈그림 6〉은 DU-모르타르(PVA, $V_f = 1.9\%$)의 KS F 2456에 의한 급속 동결융해 시험 결과의 일례를 나타낸 것으로, 300 사이클에 있어서도 상대동탄성계수는 100% 이상을 확보하고 있으며, 고내구성 콘크리트의 요구성능인 85% 이상을 크게 상회하고 있어 우수한 내구성을 확인할 수 있었다.

4. DU-모르타르의 적용 사례

4.1 라이닝공법

4.1.1 개요

균열제어형 DFRCC를 사용한 라이닝공법(이하, DU-모르타르 라이닝공법)은 마이크로 단섬유를 일정량 혼입하여 건조수축량을 대폭 저감시킬 뿐만 아니라 휨인장응력 하에서의 인성 및 변형 성능을 크게 향상시켜 유해균열의 발생을 근본적으로 억제하여 방수 성능이 우수한 무기계 라이닝공법이다.

4.1.2 구성 및 시공법

〈그림 7 및 8〉은 DU-모르타르 라이닝공법의 구성 및 시공 순서를 나타낸 것으로, 모체 콘크리트의 표면을 바탕처리한 후 현장에서 제조된 DU-모르타르를 약 5~30mm 정도 흠손이

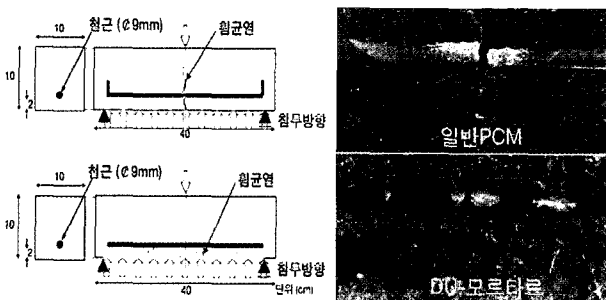


그림 5. DU-모르타르의 탄산화저항성

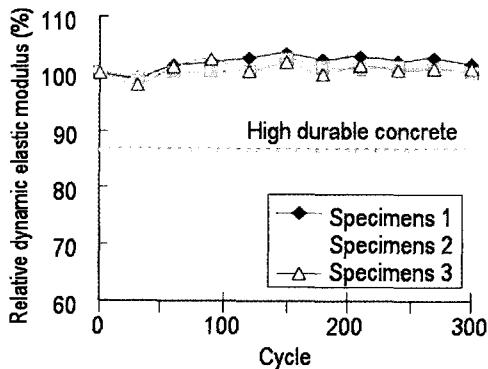
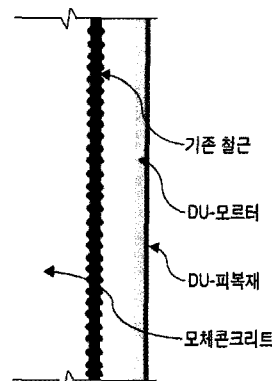
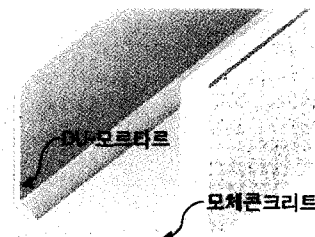


그림 6. DU-모르타르의 동결융해저항성(A법)



(a) 단면 구성도



(b) 적용 개념도

그림 7. 라이닝공법의 개요

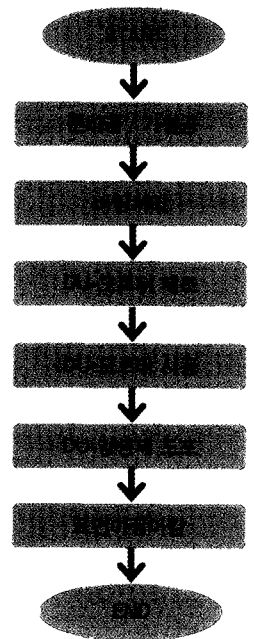


그림 8. 시공 순서

나 뿔칠시공에 의해 시공하고, 이후 피막양생제를 도포하면서 흠손으로 표면을 마감하여 완성하게 된다.

특히, DU-모르타르 시공 후 표면마감 시 피막양생제(DU-양생제)를 도포하면서 표면을 마감함으로써 표면의 마감성이 크게 향상될 뿐만 아니라 <사진 6>와 같이 표면에 얇은 수밀층이 형성되어 경화 과정에서 모르타르 내부의 수분증발을 방지하고, 더욱이 경화 후에는 외부열화인자의 침입을 억제하며, 유수 등에 대한 마모저항성을 크게 향상시킬 수 있다.

4.1.3 적용 사례

<사진 7>는 DU-모르타르 라이닝공법을 농수로 보수공사에 적용한 사례를 나타낸 것이다. 대상 농수로는 1.1×1.5m의 단면을 가지며, 표면의 모르타르 부분이 유수에 의해 마모되어 단면 전체에 굽은골재가 노출되었고, 일부 개소에서는 단면 결손도 확인되었다. 또한, 폭 1mm 정도의 중방향 균열이 약 1

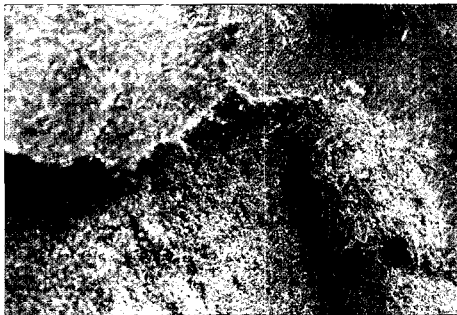


사진 6. 피막양생제에 의한 수밀층 형성(30분과 후)



사진 7. DU-모르타르 라이닝 공법의 적용사례(농수로)

m의 간격으로 발생된 농수로 구조물이다.

본 보수공사에 사용된 DU-모르타르는 PVA 섬유혼입률이 1.5 vol.%, 28일 압축강도가 35MPa이며, 라이닝제(DU-모르타르)의 시공두께는 측벽의 경우 6mm, 유수에 의한 마모량이 비교적 큰 밑면은 10mm로 설계하였다. 또한, 기존의 보수공법과 비교하기 위해 종래의 폴리머시멘트모르타르와 초고강도 폴리머시멘트모르타르도 동일한 조건에서 시공하여 비교·평가하였으며, 그 결과는 <표 2>에 나타난 바와 같다.

즉, 시공 후 6개월까지 모니터링한 결과, DU-모르타르 라이닝공법에서는 균열 및 외관 변화 등 결함이 전혀 발생하지 않았으나, 종래의 폴리머시멘트모르타르공법에서는 횡방향의 균열이 약 0.5M의 간격으로 발생하였고, 초고강도 폴리머시멘트모르타르공법에서는 2개소에서 균열이 발생하였으며, 발생된 균열의 폭은 약 0.05mm 정도였다. 반면, 시공 후 6개월까지 외관 변화는 모든 공법에서 발생하지 않았다.

4.2 단면복구공법

4.2.1 개요

균열제어형 DFRCC를 사용한 단면복구공법(이하, DU-모르타르 단면복구공법)은 기존의 단면복구공법에 있어서 단면복구재를 폴리머시멘트모르타르 대신에 DU-모르타르를 사용한 공법으로, 마이크로 섬유의 가교작용에 의해 얇은 대단면을 시공

표 2. DU-모르타르와 타 공법의 비교 사례

구분	DU-모르타르 라이닝공법	기존 PCM	초고강도 PCM
시공 직후			
6개월 경과 후			
배합 특성	<ul style="list-style-type: none"> · V_f = 1.5% · PVA 섬유 	<ul style="list-style-type: none"> · V_f = 0.3% · 유리섬유 	<ul style="list-style-type: none"> · V_f = 0.6% · 탄소섬유
기초 물성	<ul style="list-style-type: none"> · F_{c28} : 35MPa · 마모감량 : 1.3g · 부착강도 : 2.99 MPa(1개월) 	<ul style="list-style-type: none"> · F_{c28} : 28MPa · 마모감량 : 2.2g · 부착강도 : 2.00 MPa(1개월) 	<ul style="list-style-type: none"> · F_{c28} : 50MPa · 마모감량 : 0.7g · 부착강도 : 3.26 MPa(1개월)
검토 결과	<ul style="list-style-type: none"> · 외관 변화 등이 발생하지 않음 · 균열 발생 무 	<ul style="list-style-type: none"> · 외관 변화 등이 발생하지 않음 · 균열 발생(디수) - 0.5 M 간격 	<ul style="list-style-type: none"> · 외관 변화 등이 발생하지 않음 · 균열 발생(일부) - 2개소

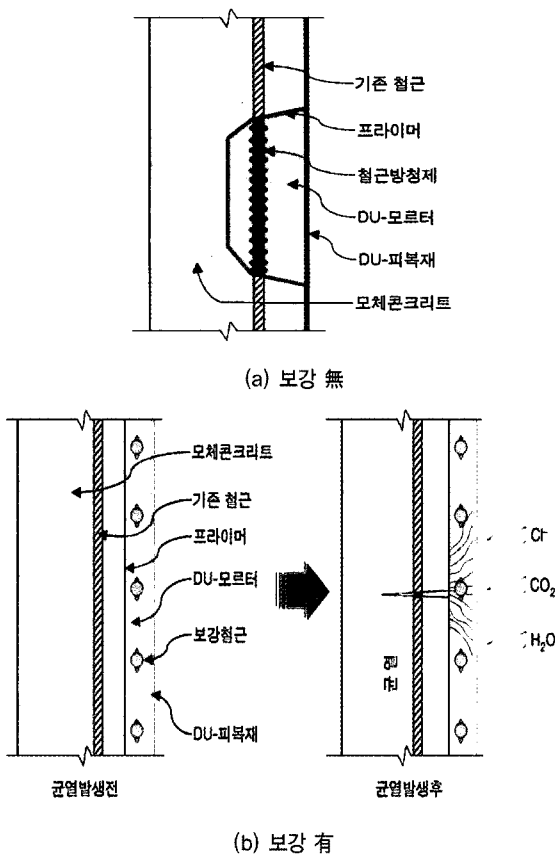


그림 9. 단면복구공법의 개요

할 경우에도 건조수축에 의한 균열을 억제할 수 있을 뿐만 아니라, 보수 후 모체 콘크리트에 재균열이 발생하거나 철근의 재부식이 발생하여도 우수한 변형추종성 및 균열제어성능에 의해 균열을 미세하게 분산시켜 CO₂, Cl⁻, H₂O 등 외부열화인자의 침입을 완전히 방지함으로써 구조물의 내구성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 단면보수공법이다.

4.2.2 구성 및 시공법

〈그림 9〉는 DU-모르타르 단면복구공법의 단면 구성을 나타낸 것으로, (a)는 모체 콘크리트의 열화부를 제거한 후 별도의 보강을 실시하지 않고 단면복구를 실시하는 공법(단면보수), (b)는 모체 콘크리트의 표면을 처리하고 보강을 실시한 후 단면을 복구 또는 수복하는 공법(단면보강)을 각각 나타낸다.

4.2.3 적용 사례

〈사진 8〉은 DU-모르타르 단면복구공법을 열화된 RC 교각의 단면보수공사에 적용한 사례를 나타낸다. 대상 구조물은 약 35년이 경과된 RC 구조물로 교각의 피복 콘크리트가 진동 및 동결융해에 의해 심하게 열화된 상태이다.



사진 8. DU-모르타르 단면복구공법의 적용사례(교각)

본 단면보수공사에 사용된 DU-모르타르는 PVA 섬유혼입률이 1.9 vol.%, 28일 압축강도가 35 MPa이며, 뿔칠시공을 실시하였고, 시공두께는 50 mm로 설계하였다. 시공 결과, 1회의 뿔칠에 의해 시공이 가능하였으며, 리바운드율도 10% 이하로 제어할 수 있었다. 더욱이, 1년간의 모니터링 결과, 외관 변화 및 균열 등의 결함은 전혀 발생하지 않았다.

5. 맺음말

본고에서는 고인성 시멘트 복합재료의 일종인 균열제어형 DFRCC를 사용한 노후 RC 구조물의 보수공법에 대하여 간략히 소개하였다. 즉, 본 보수공법은 우수한 시공성과 탁월한 균열제어성능 및 변형추종성에 의해 구조물의 내구성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 공법으로 향후 RC 구조물의 보수공사에 적극적인 활용이 기대된다. □

참고문헌

1. <http://www.eng-ams.com>
2. 複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用, 土木學會, 2005. 7, pp.28~32.