

CFRP 판으로 전단 보강된 이후 동결융해에 노출된 철근콘크리트 보의 보강성능 및 파괴특성

Strengthening Performance and Failure Characteristics of Reinforced Concrete Beams Exposed to Freezing-and-thawing Cycles after Shear Strengthening with CFRP Plate

윤현도* · 김선우** · 전에스더** · 이민정***

Yun, Hyun Do · Kim, Sun Woo · Jeon, Esther · Kim, Yun Su · Ji, Sang Kyu · Lee, Min Jung

Abstract

CFRP plates has been established as an effective method for rehabilitation and strengthening of concrete structures. The CFRP reinforcements are bonded to beams and slabs using structural adhesives. Adhesive strength can be affected by environmental exposure. During freezing-and-thawing cycling, temperature-induced stresses in the adhesive layer, due to differential thermal expansion between the CFRP and the substrate concrete, may lead to bond damage and contribute to or cause premature CFRP composite separation. This paper presents the results of experimental program undertaken to investigate the effects of freeze-thaw cycling (from -18 to 4°C) on the behavior and failure characteristics of RC beams strengthened in shear with CFRP plate using acoustic emission (AE) technique.

key words : Freezing-and-thawing, Shear strengthening, CFRP, Failure

1. 서 론

국내에서도 많은 연구자들에 의해 지난 십여년 동안 CFRP에 의한 RC 부재의 보강성능이 검증되어 콘크리트 설계기준에도 반영되어 실무자들이 설계에 직접 활용할 수 있도록 하는 시점에 이르렀다. 강판 등과 같은 보강재료에 비하여 CFRP가 기존 구조물의 보강재로 폭 넓게 사용될 수 있었던 것은 CFRP가 가볍고, 내구적이며 부식에 대한 저항성이 우수하며 높은 강성과 탄성계수를 확보하고 있기 때문이라 할 수 있다. 또한 RC 구조부재의 외부에 부착하여 전단 및 휨강도를 효과적으로 증진할 수 있어 앞으로도 보강재로써 CFRP의 활용은 점차 증가될 것으로 예상된다.

그러나 기존 구조물의 보수 및 보강분야에서 CFRP의 활용이 보다 폭 넓게 지속되도록 하기 위해서는 보강효과에 영향을 끼칠 수 있는 다양한 환경조건에 노출된 이후 CFRP에 의한 보강성능 및 건전성 평가를 위한 모니터링 기술에 대한 개발이 요구된다.

2. 연구범위 및 목적

본 연구에서는 CFRP로 보강된 RC 구조물의 내구성능 평가 및 건전성 평가기법을 개발하기 위한 연구의 일환으로 CFRP 판으로 전단 보강된 RC 보의 동결융해 이후 보강성능을 평가하고 아울러 동결융해 열화조건에 따른 파괴특성을 평가하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 음향방출(Acoustic emission, AE)기법을

* 정회원 충남대학교 건축공학과 · 교수 · E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr
** 충남대학교 건축공학과 · 박사과정
*** 충남대학교 건축공학과 · 석사과정

활용하여 재료의 미시적인 손상시 내부에서 방출되는 AE 신호를 계측하였다.

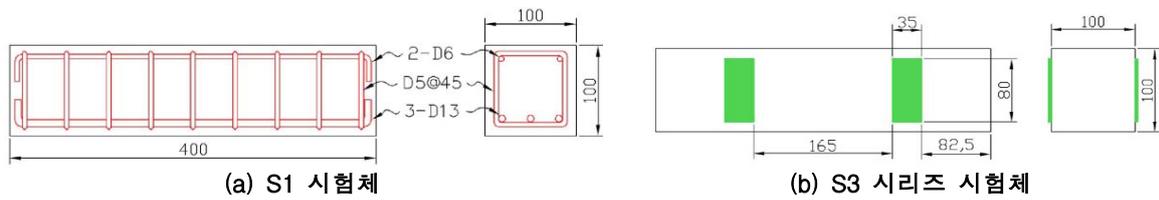


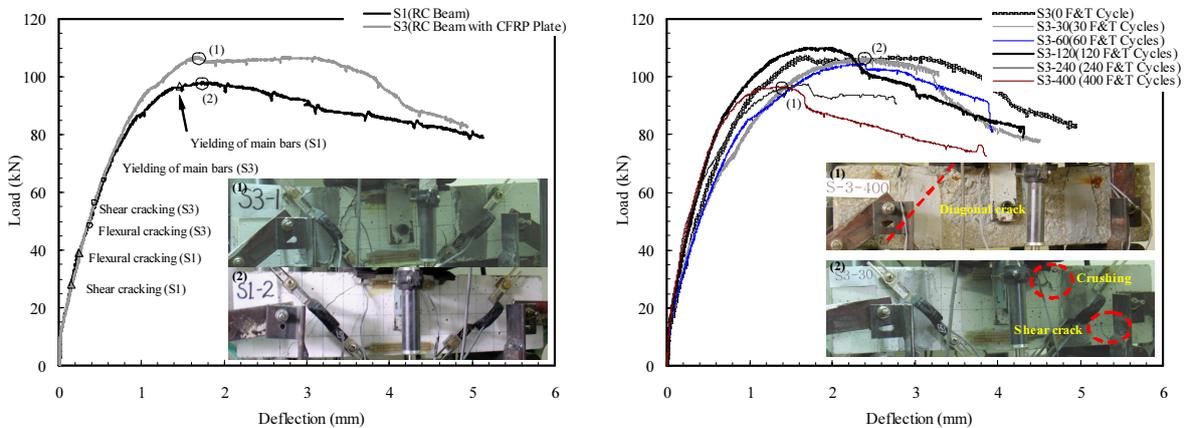
그림1. 시험체의 보강상세 (단위 : mm)

3. 실험계획 및 방법

본 연구에서 그림 1과 같은 형상과 배근상세를 갖는 총 7개의 시험체가 제작되었으며 S1 시험체는 CFRP 판으로 전단 보강되지 않고 동결융해를 경험하지 않은 표준 시험체이며, S3 시험체는 S1과 동일한 조건하에서 CFRP 판으로 전단 보강된 시험체이다. S3-30 시험체는 S3과 동일한 조건에서 30 사이클의 동결융해를 경험한 시험체이며 시험체 명은 노출된 동결융해 사이클 수에 따라 S3-60, 120, 240 및 400으로 명명되었다. 사용된 콘크리트의 28일 압축강도는 33MPa, 주근인 D13 철근의 항복강도 및 변형률은 각각 255MPa 및 2,130 μ , 전단보강근 및 압축철근인 D6의 항복강도 및 변형률은 각각 290MPa 및 1,920 μ 로 나타났다. CFRP 판(두께 1.2mm, S사 CarboDur S512)의 최저 인장강도 및 변형률은 각각 2,800MPa 및 1.7%로 나타났다. 콘크리트 타설 8일 경과 후 CFRP 판이 부착될 전단경간 중앙부는 바탕처리 되었고 바탕 처리면에 에폭시 접착제(Sikadur-330)를 도포 후 CFRP 판을 부착하여 그 위에 다시 접착용 에폭시 수지 모르타르로 마감하는 방식으로 보강하였다. 보강 완료이후 20일 동안 기건 양생 후 각 시험체별로 그림 2와 같은 동결융해 장치(KC 6000)내에서 30, 60, 120, 250 및 400 사이클의 수중 동결융해에 노출 시킨 후 다시 상온에서 2일 동안 안정화한 후 파괴시까지 4점 재하 하였다. 동결융해 1 사이클은 6시간에 걸쳐 4 $^{\circ}$ C에서 -18 $^{\circ}$ C범위의 온도변화로 설정되었다. 가력은 그림 3과 같은 200kN 용량의 UTM(MTS 사)에 의해 0.1mm/s 속도로 일정하게 변위 제어 하였다. 또한 균열 및 CFRP 판의 계면탈락과 같이 RC 보의 손상발생에 따른 AE 신호 특성을 계측하기 위하여 그림 3과 같이 보 측면에 AE 센서를 4개 설치하여 실험 종료시까지 AE 신호를 계측하였다. 사용된 AE 센서(SE900, DECI 사)는 100~900 kHz의 광대역 센서이고 이를 프리앰프(20dB, Vallen system)에 연결하여 상용 AE 장비(Vallen AMSY4)와 디지털 오실로스코프(PM3384B)를 사용하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 하중-변위 관계



(a) 보강유무 (b) 동결융해 사이클
그림4. 각 시험체의 전형적인 하중-변위 관계 곡선의 비교

그림 4는 CFRP 판에 의한 RC 보의 전단보강 유무 및 동결융해 사이클 수에 따른 전형적인 하중-변위 관계 곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 4(a)에 나타난 바와 같이 CFRP 판으로 RC 보의 전단경간 중앙부를 전단 보강함에 따라 사인장 균열의 발생에 따른 최대내력 이후 다소 급격한 강도저하를 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 그림 4(b)에 나타난 바와 같이 CFRP 판으로 전단 보강된 이후 120 사이클 이내의 동결융해 환경에 노출된 RC 보의 내력 및 변형능력도 S3 시험체와 대등하게 나타났으나 240 사이클을 초과하는 동결융해 환경에 노출된 RC 보의 경우 S3 시험체에 비하여 다소 저하되는 경향을 보였다.

4.2 균열 및 파괴양상

각 시험체의 하중단계별 균열진전 현황은 CFRP 판의 보강유무에 따라 다소 차이를 보이고 있으나 동결융해 유무 및 사이클 수에 따라 큰 차이는 보이지 않았다. 그림 4(a)에 나타난 바와 같이 표준 시험체(S1)은 최대내력의 약 12%(12kN)에 이르러 중앙부에 초기 휨 균열이 발생된 이후 재하하중이 최대내력의 약 30%(29kN)에 이르러 보 받침부와 가력점을 연결하는 대각선 방향의 전단균열이 발생되었다. 이후 최대내력에 이를 때까지 새로운 균열의 발생과 함께 이미 발생된 사인장 균열 폭이 증가되며 최종 파괴되었다. 반면 S3 시험체에서는 표준 시험체에 비하여 보 중앙부에 휨 균열이 다수 발생되었다. 이후 하중이 증가됨에 따라 CFRP 판 경계부와 가력점을 연결하는 사인장 균열이 시작되었으며 이러한 사인장 균열 폭이 증가되며 최종 파괴되는 양상을 보였다. 그림 4(b)는 CFRP 판으로 전단 보강된 이후 30 및 400 사이클의 동결융해를 경험한 시험체의 최종 파괴양상을 나타낸 것으로 S3-400 시험체의 최종 파괴양상은 받침부와 CFRP 판을 관통하여 가력점을 연결하는 사인장 균열에 의해 최종 파괴되었다.

4.3 음향방출특성

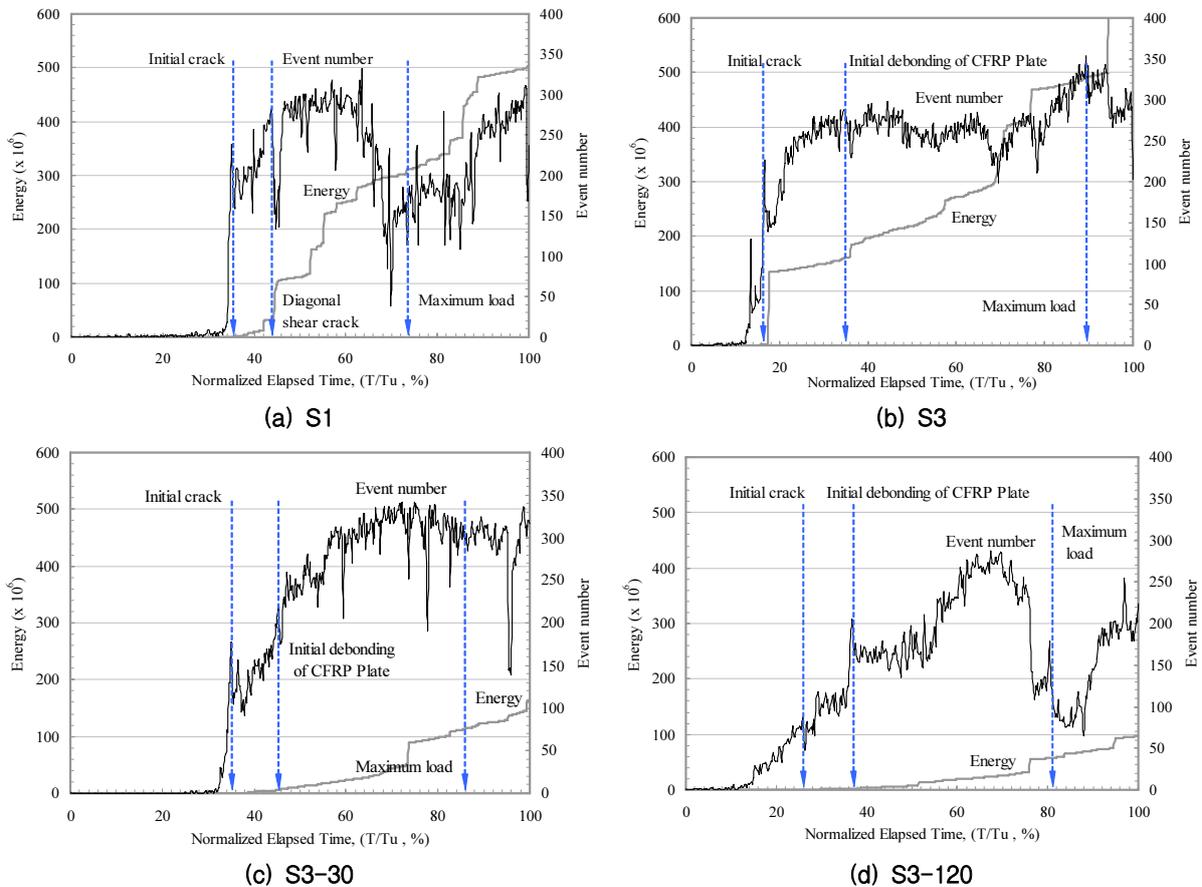


그림5. AE 사상수와 에너지 관계

그림 3과 같이 설치된 AE 센서를 통하여 재하단계별로 측정된 AE 신호를 근거로 파괴(최대하중 이후 최대하중의

20% 강도저하)시점(T_u)으로 무차원화한 재하 시간비($T/T_u \times 100$, %)에 따른 S1, S3, S3-30 및 S3-120 시험체의 AE 사상수 및 에너지의 변화를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a) 및 (b)는 CFRP 판의 전단보강 유무에 따른 사상수 및 에너지 특성을 비교하기 위한 것으로 두 시험체 모두 초기 휨 균열이 발생시점에서 급격한 사상수 증가를 보이고 있다. 초기 휨균열 발생이전까지 시험체 외부에서 균열이나 다른 손상은 시각적으로 발견되지 않았으나 콘크리트 내부에 존재하고 있는 기공 또는 공극 등 매트릭스(Matrix)의 결함부에서 발생하는 미세한 균열(Micro-crack)의 발생에 따라 어느 정도의 사상수를 나타냈다. S1 시험체의 경우 초기 휨균열 발생이후 사상수는 다소 완만하게 증가되고 있으나 동일한 조건에서 보의 측면에 CFRP 판으로 전단 보강된 S3 시험체의 경우 초기 휨균열 발생이후에도 지속적으로 사상수가 급격히 증가되는 경향을 보였다. 이는 그림 5(a) 및 (b)의 비교로부터 판단하여 볼 때 CFRP 판과 모재 콘크리트 계면의 에폭시 접착제 손상에 따른 것으로 사료된다. 재하 시간비의 약 44% 및 36%에 이르러 S1 및 S3 시험체에 각각 사균열 및 CFRP 판의 부착상실이 나타났으며 이러한 시점에서 사상수는 급격하게 감소되었고 이러한 경향은 S1 시험체에서 현저하게 나타났다. S1 시험체는 사균열 발생이후에도 인접부에 다수의 균열이 발생됨에 따라 사균열 발생시점에서 사상수가 급감한 후 다시 증가되어 재하 시간비의 64% 시점에 이를 때까지 증가되었다. 이후 사균열 폭이 점진적으로 증가되다가 초기에 발생된 사균열 폭이 급격히 증가되며 최대하중에 이르렀으며 이러한 결과로 최대하중에 인접한 시점에서는 새로운 균열의 발생보다는 기존 균열폭의 증가에 따라 사상수는 이전 단계에 비하여 오히려 감소되는 경향을 보였다. 최대하중이후 급격한 처짐량의 증가에 따라 균열의 진전 및 압축축의 압괴로 인하여 사상수가 다시 증가되는 경향을 보였다. 반면 S3 시험체에서는 CFRP 판의 부착력 상실 시점에서부터 최대하중에 도달되기 직전까지 사상수에 있어서 큰 변화를 보이지 않고 있으나 재하 시간비 약 75%에 이르러 사상수는 다소 감소하였다. 최대하중에 이르러 CFRP 판을 관통하는 사균열이 발생됨에 따라 최대하중 시점에 이르러 사상수가 급격하게 증가되었다. AE 에너지량은 S1 시험체 있어서 사균열 발생시점에서 급격히 증가된 이후 상대적으로 S3 시험체에 비하여 다소 급격하게 증가되는 경향을 보였으나 파괴시점에 이르러 S3 시험체의 경우 급격히 증가되었다.

그림 5(c) 및 (d)은 S3-30 및 S3-120 시험체의 재하시간비에 따른 사상수 및 AE 에너지 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 동결융해를 경험한 시험체들의 재하시간비에 따른 사상수 변화 추이는 S3 시험체와 상이한 특성을 보이고 있다. S3 시험체의 경우 대체로 재하 초기단계에서 높은 사상수가 나타나지 않았으나 동결융해를 경험한 시험체의 경우 재하초기부터 사상수가 점진적으로 증가되기 시작하여 최대하중에 이를 때까지 증가되는 경향을 보이고 있다. 이는 동결융해 환경에 노출됨에 따라 보의 모재 콘크리트의 조직이 약화되어 콘크리트내 및 CFRP 판과 모재 콘크리트의 부착면에서 유발되는 손상에 따른 것으로 판단된다. AE 에너지량은 동결융해 사이클이 증가 진행됨에 따라 점진적으로 감소되는 경향을 보이고 있다.

5. 결 론

- 1) CFRP 판으로 전단 보강된 이후 4℃에서 -18℃범위 온도변화를 갖는 120 사이클 이내의 동결융해 환경에 노출된 RC 보의 전단보강 성능은 동결융해를 경험하지 않은 시험체와 대등하게 나타났다. 그러나 240 사이클 이상의 동결융해를 경험한 RC 보의 경우 동결융해를 경험하지 않은 시험체에 비하여 10% 내외의 강도저하를 보였다. 모든 시험체는 사인장 균열에 의한 전단파괴 양상을 보였으며 특히 240 사이클 이상의 동결융해를 경험한 RC 보에 있어서 동결융해에 의한 모재 콘크리트 및 CFRP 판 접합면의 표면 열화에 따라 전단 보강되지 않은 표준 시험체와 같이 받침부와 가력점을 연결하는 사인장 균열에 의해 최종 파괴되었다.
- 2) CFRP 판으로 전단 보강된 이후 동결융해 환경에 노출된 RC 보의 초기 및 사이장 균열의 발생, CFRP 판의 탈락 및 압괴 등과 같은 주요한 손상단계에서 음향방출(AE) 특성값은 급격한 증가를 보였다. 이러한 AE 특성값 중 손상수준에 따른 AE 신호의 진폭 및 진동수의 분포는 RC 보의 손상수준과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 향후 다양한 조건의 실험결과가 축적된다면 AE 기법에 의해 CFRP로 보강된 구조물의 건전성 평가 및 미시적인 손상기구 규명 등에 활용 가능성이 높은 것으로 평가된다.

감사의 글

본 논문에 참여한 연구자(의 일부)는 『2단계 BK21 사업』의 지원비를 받았으며, 본 연구는 건설교통부 연구비(04핵심기술 C02-02)지원에 의한 연구의 일부임.