# 탄소섬유 접착 보강공법의 환경변화에 따른 부착특성 평가

Evaluation of the Bonding Behavior of the Rehabilitation Method Applying Carbon Fiber Subjected to the Variation of Environmental Condition

한 천 구* 변 항 용** 박 용 규***

Han, Cheon Goo Byun, Hang Yong Park, Yong Kyu

**Abstract**

This paper provides the test results of bonding behavior of the interface between concrete substrate and carbon fiber in the rehabilitation method applying carbon fiber with epoxy based resin adhesive. The difference in each components was gradually increased subjected to the repetition of temperature variation, regardless of the strength of the substrate concrete, while the ultrasonic interface between each component occurred. An increase in difference of the temperature resulted in a decrease in bond strength of each component. Associated failure mode was shown to be interfacial failure and substrate concrete failure. No remarkable changes were found in the deformation and ultrasonic velocity of each component until the four cycles of the dry and moisture test. Hence, the moisture condition may not affect the bonding behavior of each component. After the repetition of dry and moisture test, corresponding bond strength was reduced to 40% of that before test. For the effect of freeze and thaw test, the cycle of freeze and thaw within 4 cycles resulted in debonding of each component.

**요 지**

본 연구에서는 탄소섬유접착보강공법의 박리와 연관한 부착특성에 대하여 검토하였다. 그 결과를 요약하면, 온도변화에 따른 변형 특성에서는 바탕 콘크리트의 강도에 관계없이 온도 변화에 따라서 각 재료들의 변형 폭도 커지는 것을 알 수 있었다. 초음파 전파 속도도 온도변화에 따라 작아지는 것으로 나타나 계면에서 박리가 발생하였음을 알 수 있었다. 부착강도는 온도 변화가 클수록 부착강도의 값은 작아지는 것으로 나타났는데, 파괴형태는 계면파괴와 모재파괴 형태로 나타났다. 건습 변화에 따라서는 4사이클까지 각 재료의 변형 및 초음파 전파 속도에서 큰 변화를 나타내지 않아 건습 자체의 반복에는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다. 단, 부착강도는 40%정도 저하하는 것으로 나타났지만 비교적 양호한 강도를 나타내었다. 동결융해 시험 결과는 온도변화 요인과 유사한 경향으로서 동결융해 작용을 받을 경우 4사이클 이내에 박리가 일어날 수 있는 것으로 분석되었다.

**Keywords :** Carbon fiber adhesive strengthening method, Dry and moisture test, Freeze and thaw test, High and low heating test

**핵심 용어 :** 탄소섬유 접착 보강 공법, 건조·습윤 시험, 동결융해 시험, 고온·저온 시험

* 정회원, 청주대학교 건축공학부 교수

** 정회원, (주) 고려 E&C 대표, 청주대학교 박사과정

*** 정회원, 청주대학교 석사과정

E-mail : cghan@cju.ac.kr 043-229-8480

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2008년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

내력이 부족한 철근 콘크리트(이하 RC) 구조물의 보수·보강공법에는 보강공법으로 단면증설공법, 치환공법, 접착공법이 있는데, 접착공법에는 강판접착공법과 탄소섬유 접착공법, 보강재를 감싸는 공법 및 프리스트레스 도입공법 등이 있고, 보수공법으로는 균열보수공법인 충전공법, 주입공법, 표면 도포 공법과 전기·화학적 보수공법인 전착공법, 재 알칼리화공법, 탈염공법 등이 있다.

그런데 이 중 탄소섬유 접착 보강공법은 콘크리트 구조물의 표면에 접착제로 접착시키는 것만으로도 충분한 보강효과를 얻을 수 있다는 큰 장점[1] 및 철보다 1/5정도로 경량이라는 점과 시공하는 공간에 제한이 없다는 장점 등으로 현재 가장 많이 사용되고 있다.

그러나, 탄소섬유 접착 보강공법이 도입 된 1990년대의 국내 사정은 보수·보강 기술에 대한 지침이 확립되지 않았고, 보수·보강재료의 선정에서는 이론적 뒷받침 없이 외국의 기술을 모방하거나 그대로 도입하여 기술자들의 경험에만 의존하였다. 그렇다보니 탄소섬유로 보강된 실 구조체에서 Photo 1과 같이 박리되는 사례가 발견되었는데,[2] 그 원인은 자연환경에 따른 재료의 물성 차이에 의한 것으로 추측된다.

따라서 탄소섬유 접착 보강공법의 박리 원인 구명을 위한 재료간 선팽창계수 등 물성 분석으로 박리 가능성을 제안한 전 연구[3]에 이어, 본 연구에서는 실 구조체를 상정한 Photo 2 및 Fig. 1과 같이 모의 시험

탄소섬유의 박리
(박리된 탄소섬유에 자가 삽입된 모습)

탄소섬유의 박리
(손쉽게 떨어지는 탄소섬유)

Photo 1 탄소섬유의 박리 사진[1]

Photo 2 모의 구조제 제작 사진

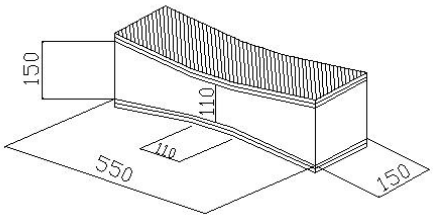


Fig. 1 시험체의 형상 및 치수

체를 제작하여 온·습도 변화 및 동결융해 등 자연환경 변화에 따른 박리 등 부착특성을 평가하여 박리의 원인을 구명하므로서 에폭시 수지에 의한 탄소섬유 접착 보강 공법의 부착특성을 평가하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2. 1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같다. 먼저, 실험요인으로는 물결합재비(이하 W/B) 25%인 고강도 콘크리트와 물시멘트비(이하 W/C) 60%인 일반강도 콘크리트 2수준의 바탕 콘크리트를 Photo 2 및 Fig. 1(크기 15×15×55cm)과 같이 제작하고, 보강재로 탄소섬유시트를 에폭시 수지를 이용하여 부착하는 것으로 실험 계획 하였다. 이때 접착제인 에폭시 수지는 일반 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 탄소섬유용 에폭시 수지를 사용하였다. 단, 시험체 갯수는 각 실험변수별 1개씩 제작하여 총 10개를 제작하였다.

Table 1 실험계획

| 실험요인 | | 실험 사항 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 수준수 | 내 용 | |
| 바탕 콘크리트의 구분 | | 2 | ·고강도 (W/B=25%) (슬럼프플로우:600mm, 공기량:3%) ·일반강도(W/C=60%) (슬럼프플로우:150mm, 공기량:4.5%) | |
| 부착 특성 | 부착재 조합* | 1 | - CO+EP+Ca*(Photo 2 참조) | |
| | 온도변화 | 3 | 20±0℃(4사이클) | -변형 특성 -초음파 전파 속도 -부착강도 |
| | | | 20±20℃(4사이클) | |
| | | | 20±40℃(4사이클) | |
| | 건습변화 | 1 | 4사이클 | |
| | 동결융해 | 1 | 4사이클 | |

* 기호 중 CO : 콘크리트, EP : 에폭시 수지, Ca : 탄소섬유를 의미함

실험사항으로는 바탕 콘크리트에 탄소섬유시트를 부착한 상태에서 고온·저온 반복 시험, 건조·습윤 반복 시험, 동결융해 반복 시험을 실시하고, 부착특성을 파악하기 위해 와이어 스트레인 게이지를 이용하여 실험 중 각 재료의 변형을 파악하며, 시험 전, 후에는 초음파 전파속도 및 부착강도를 측정하여 박리상태를 확인 하는 것으로 하였다. 또한, 본 실험은 바탕 콘크리트에 탄소섬유시트를 부착한 후 실내 실험실에서 6개월간 방치한 후 실시하였다.

## 2.2 사용재료

실험체의 제작에 사용된 바탕 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트, 강모래 및 최대치수가 25mm인 굵은 골재를 사용하였다. 바탕 콘크리트의 강도는 재령 28일에서 W/B 25%는 압축강도 62MPa, 인장강도 16MPa이었고, W/C 60%에서는 압축강도 24.5MPa, 인장강도 8.9MPa이였다. 이 때 콘크리트의 배합자료는 Table 2와 같다. 실험에 사용된 보강재로 탄소섬유시트는 1방향으로 구성되어 있으며, 접착재로 함침용(프라이머) 에폭시 수지와 접착용(적층용) 에폭시 수지는 탄소섬유용으로 지정된 2액형 레진을 사용하였는데, 각 재료의 물리적 성질은 Table 3, 4와 같다.

Table 2 바탕 콘크리트의 배합표

| W/B (%) | W (kg/㎥) | S/a (%) | SP/C (%) | AE/C (%) | 질량배합(kg/㎥) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | C | FA | SF | S | G |
| 25 | 165 | 43 | 2.5 | 0.003 | 462 | 132 | 66 | 528 | 733 |
| 60 | 170 | 46 | 1 | 0.003 | 283 | - | - | 799 | 983 |

* 기호중 W/B: 물결합재비, W: 단위수량, S/a:잔골재율, SP/C: 단위시멘트량에 대한 고성능 감수제 사용량의 중량비, AE/C: 단위시멘트량에 대한 AE제 사용량의 중량비, C: 시멘트, FA: 플라이애시, SF: 실리카퓸, S: 잔골재, G: 굵은골재를 의미함.

Table 3 탄소섬유의 물리적 성질

| 섬유 종류 | 질량 (g/㎡) | 밀도 (g/㎥) | 인장 강도 (N/cm폭) | 인장 탄성률 (N/cm폭) | 파단 신도 (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 고강도 탄소섬유 | 300 | 1.80 | 59 | 3,880 | 1.5 |

Table 4 에폭시의 물리적 성질

| 시험항목 | | 함침용 | 접착용 |
|---|---|---|---|
| 인장강도(MPa) | | 66 | 53 |
| 압축강도(MPa) | | 75 | 74 |
| 전단강도(MPa) | | 13.8 | 14.1 |
| 밀도(g/㎥) | 주제 | 1.15 | 1.14 |
| | 경화제 | 1.03 | 1.03 |
| | 혼합 | 1.12 | 1.11 |
| 점도(cps) | 주제 | 2,700 | 33,000 |
| | 경화제 | 235 | 352 |
| | 혼합 | 860 | 6,100 |

## 2.3 실험방법

콘크리트의 혼합은 강제식 팬 타입 믹서를 사용하여 KS F 2425에 의거하여 혼합하였고, 압축강도 및 인장강도는 KS F 2405, KS F 2423(할열시험)의 방법으로 실시하였다. 부착특성 실험으로 고온·저온 반복 시험은 20℃를 기준으로 ±20 혹은 40℃의 변화를 KS F 4912에 의거 실시하였고, 건조·습윤 반복 시험은 KS F 4923에 의거 실시하였으며, 동결융해 시험은 KS F 2456의 B법(기중동결, 수중융해)에 의거 실시하였다. 실험 중의 변형 측정은 콘크리트, 에폭시 수지, 탄소섬유의 각 표면에 와이어 스트레인 게이지를 붙여서 측정하는 것으로 하였으며, 초음파 전파 속도는 KS F 2731에 의거하여 직접법으로 총 13점에서 측정하였다. 부착강도는 KS F 4918의 규정에 의거 직접 인장 방법으로 실시하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 온도변화 요인

(1) 변형특성

Fig. 2는 온도변화의 요인으로서 고온·저온 반복에 따른 바탕재 변화(W/B)별 각 재료들의 변형 특성을 나타낸 것이다.

20±0℃의 경우는 W/B에 관계없이 거의 변형이 일어나지 않는 것으로 나타났다. 하지만 20±20℃ 및 20±40℃에서는 W/B 25%의 경우 바탕 콘크리트, 에폭시 수지 및 탄소섬유는 온도변화에 따라 1사이클까지는 거의 같은 양상을 보이는 변형을 나타냈으나 접착제인 에폭시 수지의 경우는 1사이클의 온도변화가 지난 후 약 500με 이상의 급격한 변형율의 증가를 보였으며, W/C 60%의 경우에서는 1사이클의 온도변화가 진행 중에서부터 에폭시 수지 부분이 콘크리트와 탄소섬유 보다 큰 변형을 나타내고 있다. 즉, 이와 같은 결과는 20℃에서 ±20℃이상 변화되는 온도 조건이면 $10\times10^{-6}$/℃전후의 선팽창 계수를 갖는 콘크리트보다 $40\sim50\times10^{-6}$/℃로 4~5배 큰 선팽창계수를 갖는 에폭시 수지의 팽창·수축 차이에 따른 전단응력으로 1사이클 이후부터 콘크리트 표면에서의 에폭시 수지가 박리되어지게 됨을 시사하는 그래프이다. 또한, W/B 차이에 따라서는 W/C 60%가 W/B 25%보다 좀 더 빠른 박리와 각 재료 사이에서의 변형 차이를 나타내고 있는데, 이는 큰 차이는 아닐지라도 바탕 콘크리트 강도의 영향에 의한 부착강도 차이인 것으로 사료된다.

(2) 초음파 전파 속도 특성

Fig. 3은 고온·저온 반복 시험에 따른 반복시험 전과후의 초음파 전파 속도를 비교한 것이다.

W/B 25%와 W/C 60% 모두 20±0℃에서는 중앙선 상하로 펴져 초음파 전파 속도의 변화가 거의 없었으나, 20±20℃ 및 20±40℃의 경우는 측정 값들이 모두 45°선의 아랫부분에 위치하여 고온·저온 반복 시험 후 초음파 전파 속도가 느려졌다는 것을 알 수 있다. 이는 온도 변화에 따라서 초음파의 전달 경로인 매질 중 일부 변화가 생겨서 초음파 전파시 영향을 받았기 때문으로 사료되는데, Fig. 2의 변형 특성과 연결해보면 콘크리트와 접착재인 에폭시 수지간의 계면 부분에서 박리가 발생된 것임을 입증하는 결과이다.

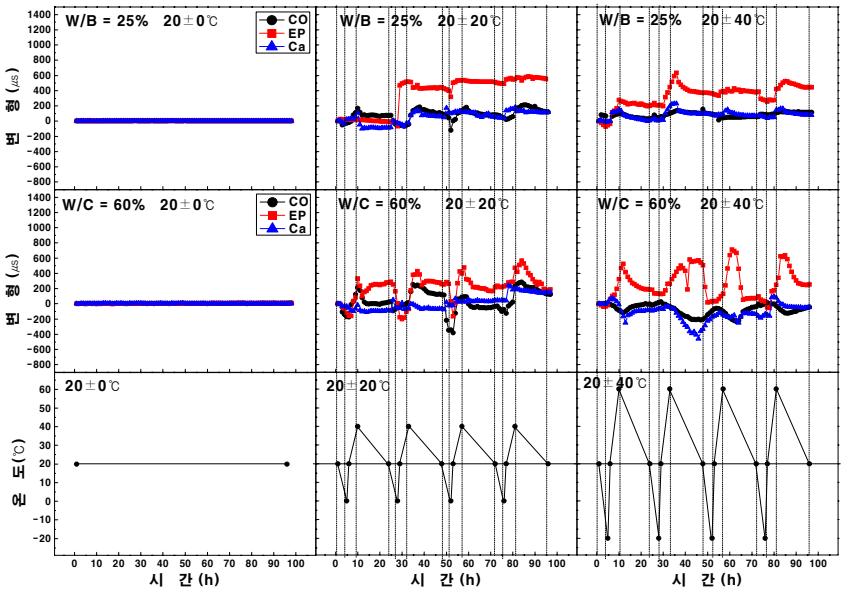


Fig. 2 고온·저온 반복 시험에 따른 재료의 변형 특성

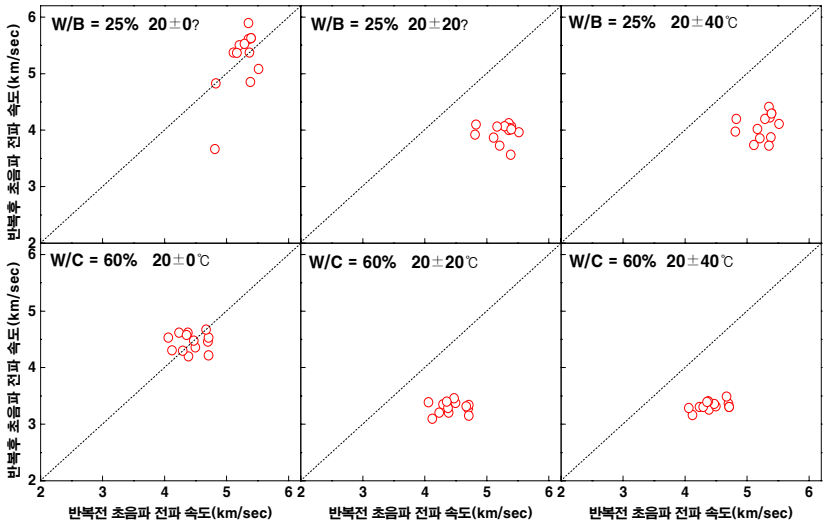


Fig. 3 고온·저온 반복 시험에 따른 초음파 전파 속도 비교

Table 5 온도변화에 따른 부착특성

| 종 류 | 고강도 바탕 (W/B 25%) | | 일반강도 바탕 (W/C 60%) | |
|---|---|---|---|---|
| | 부착강도 (MPa) | 파괴 형태 | 부착강도 (MPa) | 파괴 형태 |
| 20±0℃ | 5.40 | A | 2.89 | A |
| 20±20℃ | 2.34 | B-2 | 1.75 | A |
| 20±40℃ | 2.52 | B-2 | 0.96 | A |

(3) 부착강도 특성

Table 5는 고온·저온 반복 시험에 따른 부착 강도 및 파괴형태를 나타낸 것이며, Fig. 4는 시험체의 파괴 성상 모드를 나타낸 것이다.

각 조건에 따라서는 온도변화가 없는 20℃일정의 경우 W/B 25%에서 5.40MPa, W/C 60%에서 2.89MPa의 부착강도를 나타내었으며, 온도변화폭이 증가할수록 부착강도는 작아지는 것으로 나타났다.

파괴양상으로, 20±0℃에서는 전부 모재파괴가 일어났지만, W/B 25%에서는 온도 변화에 따라서 모든 수준에서 접착제와 바탕재 사이의 계면파괴 형태로 나타난 반면, W/C 60%에서는 모두 콘크리트의 모재가 파괴되는 형태로 나타났다. 즉, W/B 25% 경우는 에폭시 수지와 콘크리트의 접착계면이 온도 변화에 의해 부착성을 상실하여 박리된 것으로 사료되며, W/C 60%의 경우는 에폭시 수지의 강한 접착성에 의해 접착면에서의 모재파괴 형태가 일어난 것으로 분석된다.

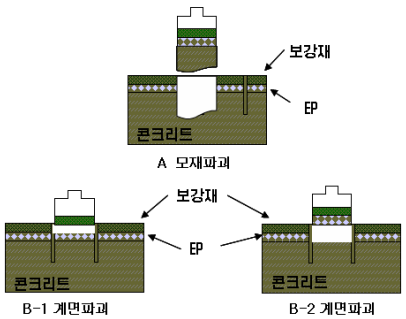


Fig. 4 시험편의 파괴 성상 모드

## 3.2 건습변화 요인

(1) 변형특성

Fig. 5는 건습변화 요인으로 건조·습윤 반복 시험에 따른 바탕재 변화(W/B)별 각 재료들의 변형 특성을 나타낸 것이다.

4사이클까지 건조·습윤을 반복 한 결과 각 재료의 변형율 차이는 크게 나타나지 않았고, 또한, 바탕재의 강도 차이에 따른 변형율의 차이도 거의 나타나지 않았다.

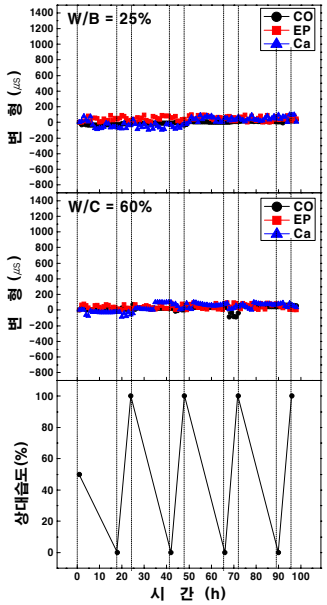


Fig. 5 건조・습윤 반복 시험에 따른 재료의 변형 특성

(2) 초음파 전파 속도

Fig. 6은 건조・습윤 반복 시험에 따른 초음파 전파 속도를 비교한 것이다.

건조・습윤 반복 시험 결과는 온도변화가 없는 20±0℃와 유사한 경향으로서, 측정 전후 큰 차이 없이 일정하게 나타났으며, 바탕 콘크리트의 차이에 따라서는 W/C 60%에서 초음파 전파 속도가 조금 더 늦은 경향이 있기는 하지만, 큰 차이는 아닌 것으로 분석된다.

(3) 부착강도 특성

Table 6은 건조・습윤 반복 시험에 따른 부착 강도

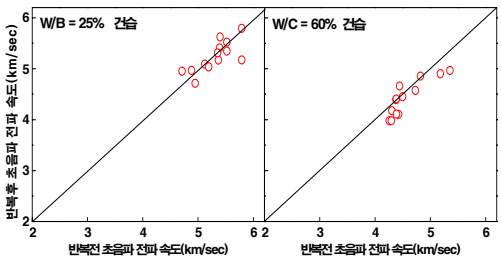


Fig. 6 건조・습윤 반복 시험 측정 전후간 초음파 전파 속도

Table 6 건조・습윤 반복 시험에 따른 부착특성

| 종 류 | 고강도 바탕 (W/B 25%) | | 일반강도 바탕 (W/C 60%) | |
|---|---|---|---|---|
| | 부착강도 (MPa) | 파괴 형태 | 부착강도 (MPa) | 파괴 형태 |
| 20±0℃ | 5.40 | A | 2.89 | A |
| 건 습 반복후 | 3.45 | B-2 | 2.75 | A |

및 파괴형태를 나타낸 것이다. W/B 25%인 경우, 건조・습윤 반복에 의해 40% 정도의 부착강도 저하는 나타났으나, 비교적 양호한 부착강도를 유지하는 것으로 분석된다. 파괴형태는 W/B 25%는 계면파괴(B-2), W/C 60%는 모재파괴의 형태로 나타났다.

## 3.3 동결융해 요인

(1) 변형특성

Fig. 7은 동결융해 시험에 따른 바탕재 변화(W/B)별 각 재료들의 변형 특성을 나타낸 것이다.

W/B 25%인 바탕 콘크리트의 경우는 4사이클까지 큰 변화가 없었으나, 단, 2사이클부터 콘크리트와 에

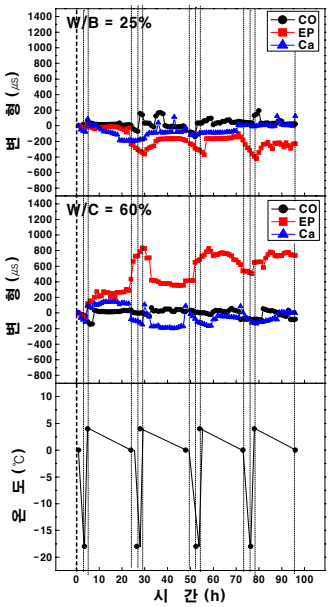


Fig. 7 동결 융해 시험에 따른 재료의 변형 특성

폭시 수지는 변형의 차이를 나타내고 있으며, 탄소섬유와 에폭시 수지는 3사이클까지 에폭시의 강한 접착력에 의해 양호한 적합성을 유지하면서 동일한 거동을 나타냈으나, 4사이클에서부터는 에폭시 수지와 탄소섬유가 서로 다른 거동을 하는 것으로 나타났다. 이는 에폭시 수지와 탄소섬유의 계면에서 서로 분리되면서 탄소섬유가 온도변화에 민감하게 변형하지 않는 그 자체의 특성을 나타낸 것으로 분석된다.

W/C 60%인 바탕 콘크리트의 경우는 1사이클까지는 에폭시 수지가 탄소섬유를 양호한 접착성으로 함께 변형을 보이고 있으나, 2사이클부터 에폭시 수지가 큰 팽창을 보이며 완전히 다른 거동을 하는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 에폭시 수지의 팽창은 에폭시 수지의 균열면으로 물이 침투하면서 동결에 의한 팽창이 일어난 것으로 사료되며, 이런 에폭시 수지의 큰 변형으로 인하여 바탕재와 에폭시 수지, 에폭시 수지와 탄소섬유 계면에서는 모두 박리 현상이 발생한 것으로 분석된다.

(2) 초음파 전파 속도

Fig. 8은 동결융해 시험에 따른 초음파 전파 속도를 비교한 것이다.

동결융해 시험 결과는 바탕재의 강도와는 상관없이 사이클이 진행될수록 초음파 전파 속도가 느려지고 있는 것을 알 수 있었는데, 특히 2사이클까지는 모두 중앙선 상하로 펴져 초음파 전파 속도의 변화가 거의 없었으나, 3사이클부터 초음파 전파 속도가 느려졌다는 것을 알 수 있었다. 이는 고온·저온 반복 시험과 유사하게 콘크리트와 접착부분인 에폭시 수지와의 변형율 차에 의해 계면부분에서 박리가 발생되어 나타난 현상으로 분석된다.

(3) 부착강도

Table 7은 동결융해 시험에 따른 부착강도 및 파괴형태를 나타낸 것이다.

각 보강재 조건에 따라서는 모두 지그 접착 후 확인 과정에서 박리 되어 부착강도 값을 구하지 못하였다.

파괴양상은 W/B 25%, W/C 60% 모두 계면파괴 형태를 나타내었다.

Table 7 동결융해 시험에 따른 부착특성

| 종 류 | 고강도 바탕 (W/B 25%) | | 일반강도 바탕 (W/C 60%) | |
|---|---|---|---|---|
| | 부착강도 (MPa) | 파괴 형태 | 강도 (MPa) | 파괴 형태 |
| 20±0℃ | 5.40 | A | 2.89 | A |
| 동결융해 | 접착 확인 중 박리 | | 접착 확인 중 박리 | |

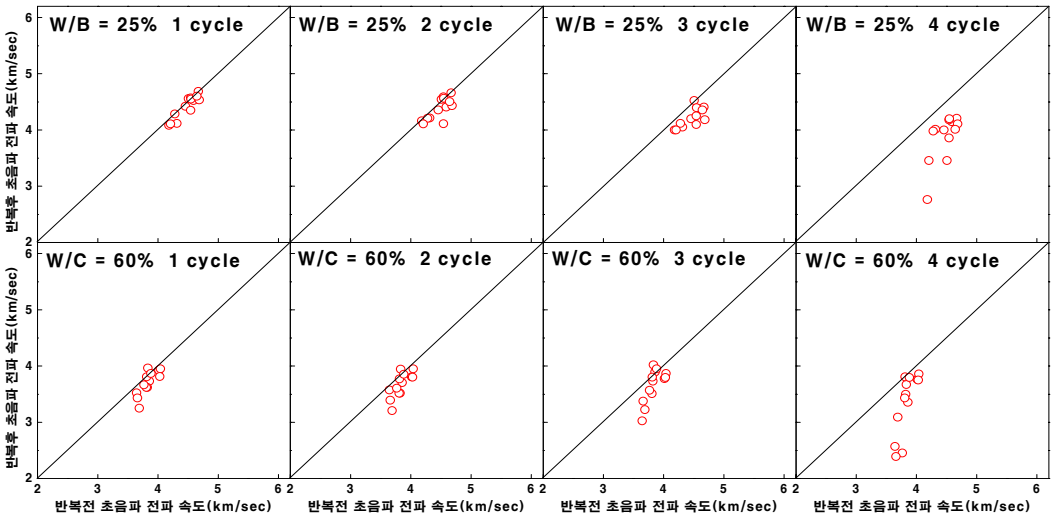


Fig. 8 동결융해 시험 따른 전후 간 초음파 전파 속도 비교

## 4. 결 론

본 연구에서는 온·습도 변화 및 동결융해 등 자연환경 변화에 따른 박리 등 부착특성을 평가하여 박리의 원인을 구명하기 위한 것으로 그 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 모재 및 보강재 보다 4~5배 큰 선팽창계수를 갖는 에폭시 수지는 20±20℃, 20±40℃의 온도요인이 변화함에 따라 신축율의 차이에 의하여 1사이클 이후부터 콘크리트 표면에서 에폭시 수지가 박리되어지는 경향을 나타냈다. 그에 따라 초음파 전파 속도 및 부착강도의 값도 작아지는 것으로 나타났는데, 지그의 파괴형태는 W/B 25%의 경우 모재파괴에서 계면파괴 형태로 변화하였고, W/C 60%의 경우는 모재 파괴의 형태를 나타내었다.
2) 상대습도 0~100%까지의 건습변화 요인은 변형특성 및 초음파 전파 속도에서 4사이클까지 큰 차이를 나타내지 않아 건습 자체의 반복으로는 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.
3) 한중환경 조건을 상정한 동결융해 시험의 결과는 재료 간 초기부터 변형의 차이를 보이고 있어, 동결융해 작용을 받기 쉬운 지역에서는 온도의 영향과 마찬가지로 탄소섬유로 보강 후 몇 개월 안에도 박리가 일어날 수 있는 것으로 분석 되었다.

## 참고문헌


1. 건설교통부, "건축구조물 보수·보강공법의 성능평가에 관한 연구 : 탄소섬유쉬트 보강공법을 중심으로", 2001.
2. 변항용, "수로교의 안전", 바른미디어, 2004. 1.
3. 박용규, 변항용, 한천구, "RC구조물 접착 보수·보강공법의 박리와 연관한 재료의 변형 거동 분석", 구조물 진단학회지, Vol. 11. No. 5, 2007. 9, pp. 89-98.
4. 김용성, 박용규, 이건철, 변항용, 우종완, 한천구. "에폭시 접착 보수·보강재의 박리 현상 분석", 대한건축학회 충북지회 추계 학술발표대회, Vol. 5, No. 2, 2005. 10, pp. 167-171.
5. 장봉석, "탄소섬유 보강 콘크리트의 박리 탐사 실험", 콘크리트학회 논문집, Vol. 19 No. 1, 2007, pp. 3-9.
6. 김융암, "탄소체 복합재료", 물리학과 첨단기술, 2003. 3, pp. 31-35.
7. 신성우, 이한승, "탄소섬유쉬트 보강공법에 사용되는 Epoxy 수지의 특성 및 국내외 동향", 구조물진단학회지, Vol. 2. No. 3, 1998. 7, pp. 24-36.
8. 한국 산업규격, "콘크리트 구조물 보수용 에폭시수지", KS F 4923, 2000.
9. 川上英男, "コンクリートの彈性係數に及ぼす骨材と界層の影響"、コンクリート工學年次論文集, 2000. 2, pp. 529-534.


(접수일자 : 2007년 6월 9일)