

# 동결융해 및 부착재료 변화에 따른 GFRP-구조물 경계면의 최대 부착강도 및 유효부착길이 평가

## Investigation of Maximum Strength and Effective Bonding Length at the Interface Between Structure and GFRP Material Under Freeze-thaw Cycles and Applied Different Bonding Materials

최 현 규<sup>1)</sup>                      정 우 영<sup>2)\*</sup>                      안 미 경<sup>3)</sup>  
Choi, Hyun Kyu                      Jung, Woo Young                      Ahn, Mi Kyoung

### Abstract

This research studies the behavior of the FRP-concrete interface subjected to two environmental substances. First is to investigate the behavior by the application of different bonding materials at the interface between FRP and concrete, second is to understand a long-term performance at the interface by Freeze-thaw actions. The parameters considered in this research are the maximum bonding strength and the effective bonding length at the FRP-concrete interface. In the first experimental phase, three types of specimens are fabricated and tested considering the number of applied bonding materials and the Freeze-thaw tests are performed to evaluate the behavior of the interface in the cycle range of 0 to 300 cycles. Finally, it is known that there is a 5~7% difference of the effective bonding length between applied bonding materials and the values for the maximum stress and the effective length under Freeze-thaw action are varied randomly as the freeze-thaw cycle is increased even though initial reduction of their capacities are occurred.

**Keywords** : Interface between FRP-concrete, Freezing and thawing, Effective bonding length, Bond strength

### 1. 서론

철근콘크리트는 현재 토목·건축 구조물에서 가장 많이 사용되는 경제성 및 내구성을 갖춘 재료임에도 불구하고 시간이 경과함에 따라 자연적인 노후화와 하중, 진동, 피로 등의 인위적인 요인과 주변 환경의 변화 등에 의해 구조물이 점진적으로 손상되어 안정상의 문제를 발생시키게 된다. 따라서 구조물의 열화에 따른 철근콘크리트 구조물의 내구력 향상을 위한 적절한 보수·보강 방법이 필요하다.

손상된 철근콘크리트 구조물의 보강 공법에는 일반적으로 강판부착공법, 단면증설공법, 외부 프리스트레싱 보강 공법 등을 사용하였지만 현재 새롭게 널리 사용되는 방법은 유리섬유, 탄소섬유 등의 복합재료를 활용하여 구조물의 외부에 부착하는 공법이다. FRP 재료는 고강도,

경량성, 부식 저항성 및 시공의 용이성이 우수하여 많은 보수 및 보강현장에서 그 활용성이 증가되고 있지만 기존 재래식 재료를 활용한 공법에 비하여 보다 경험적이고 세부적인 시공 기준이 필요한 것 또한 사실이다. 따라서 현장 실무자들에 보다 정확한 보강효과와 안전에 대한 신뢰 확보를 위하여 현재 FRP로 보강된 철근콘크리트 부재의 보강효과에 대한 국내·외에 많은 연구가 진행, 보고되고 있다. 강판 또는 FRP와 콘크리트 접착부에 관한 부착강도에 대한 주요연구로는 Taljsten(1994), Chajes et al.(1995), Bizindavyi and Neale(1999) 등에 의하여 제시된 일면전단에 의한 부착실험 연구와 Van Gemert (1980), Swamy et al.(1986), Brosens and van Gemert(1997), Fukuzawa et al.(1997) 등에 의하여 제시된 보다 개선된 부착거동 모델, 그리고 Holzenkampfer (1994)와 Yuan et al.(2001)에 의하여 수행된 파괴학적

1) 학생회원 청석엔지니어링 구조부  
2) 정희원, 강릉원주대학교 부교수  
3) 강릉원주대학교 석사과정

\* Corresponding author : woojung@gwnu.ac.kr 033-640-2421

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2011년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

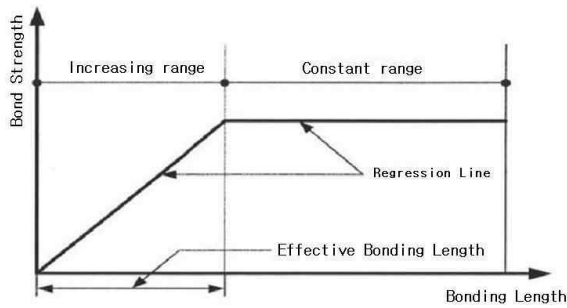


Fig. 1 The determination of the effective bonding length by Adhesive Load between Concrete and FRP

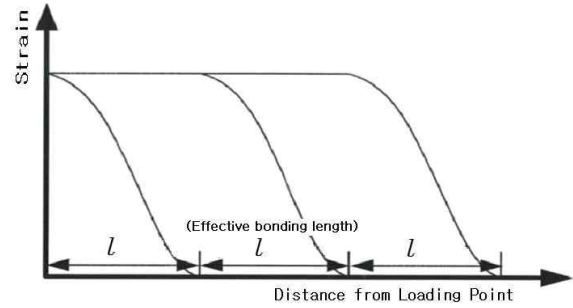


Fig. 2 The determination of effective bonding length by the strain distribution

해석연구 등이 있다.

본 연구에서는 동결융해에 따른 부착거동 변화를 실험적으로 평가하기 위하여 기존의 FRP와 콘크리트 경계면 거동실험 및 부착강도 예측모델을 통하여 주요 거동특성을 조사하고 실제 부착에 적용된 부착용 에폭시의 종류 및 동결융해에 의한 부착강도와 유효부착길이 변화에 따른 FRP-콘크리트 부착면의 거동특성에 대하여 평가하였다.

## 2. FRP 외부 접착의 유효부착길이 산정법

### 2.1 부착하중에 의한 유효부착길이 산정법

단순인장상태 시 콘크리트와 FRP 보강재와의 부착강도에 대한 기존 연구결과에 따르면, 부착길이가 증가하면 부착강도도 증가하지만 부착길이가 일정길이 이상이 될 경우 더 이상 부착하중이 증가하지 않는 것으로 보고되고 있다. 이러한 연구결과를 기초로 건축구조물 보수보강 공법의 성능평가에 관한 연구(2001)와 철근콘크리트 건축물 보강공법의 개발 및 성능평가(2003)에서는 최대하중이 증가하지 않는 어느 일정범위의 부착길이를 유효부착길이로 정의하고, 이때의 부착강도를 기초로 예상 부착강도 및 부착길이를 산정하고 있다. 부착하중에 의한 유효부착길이 산정방법의 경우 부착하중이 증가하는 영역의 실험결과와 부착길이가 증가하여도 부착하중이 일정한 값에 수렴하는 2개의 직선을 회귀분석하여 그 교차점까지의 길이로 그 값을 산정, 평가하는 방법으로서 Fig. 1과 같다.

### 2.2 변형률 분포에 의한 유효부착길이 산정법

본 연구와 관련된 선행연구(Maeda, 1997)에 의하면 한 개의 시험체에서 하중단계별 변형률 분포는 하중 초기

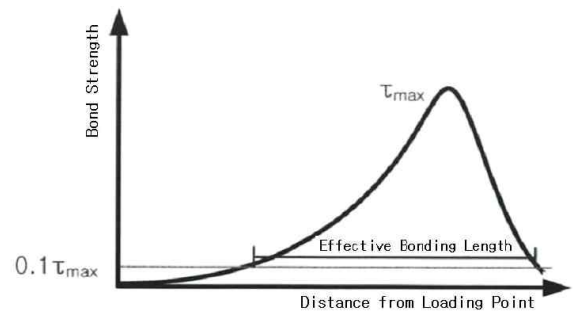


Fig. 3 The determination of the effective bonding length by stress distribution

시 가력단 쪽의 보강재의 변형률이 일정한 기울기와 강도를 가지고 증가하다가 보강재와 콘크리트 시험체의 부착면에서 균열이 발생하기 시작하면서 변형률은 일정한 기울기를 유지하며 가력단 끝단 쪽으로 이동해 간다고 보고되고 있다. 따라서 초기균열 발생 시 부착하중은 Fig. 2와 같이 더 이상 증가하지 않고 변형률은 일정한 기울기를 갖는 부분과 변형률이 발생하지 않는 부분으로 구분되어 거동되어 진다. 이때 하중을 지속적으로 가력하면 균열이 진전되면서 변형률은 보강재 단부 쪽으로 계속 이동하여 가지만 이때 기울기와 변형률의 최대값은 변하지 않고, 일정한 기울기가 존재하는 구간이 발생하는데 이를 유효부착길이로 정의 할 수 있다.

### 2.3 응력 분포에 의한 유효부착길이 산정법

Kasumassa Nakaba(2001)에서 제안한 방법의 경우 보강재에 스트레인 게이지를 부착하여 실험 후 Fig. 3과 같이 보강재의 변형률에서 응력을 계산한 후 최고하중 단계의 응력분포 그래프를 그렸을 때 응력이 발생하는 길이중 최고점의 10%까지를 유효부착길이라고 산정하고 있다.

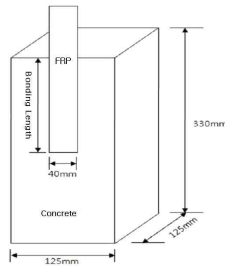


Fig. 4 The Configuration of the first test specimen

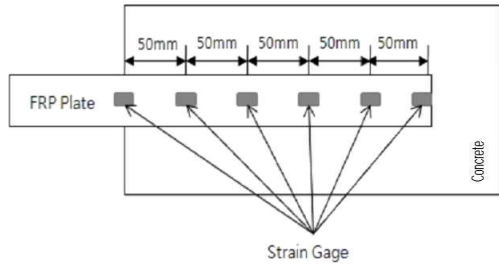


Fig. 5 The Applied strain gages at first test specimen

### 3. 실험계획 및 방법

본 연구에서는 FRP 보강재와 구조물의 경계면 거동에 관한 실험을 크게 다음 2가지로 나누어 수행하였다. 첫째는 FRP-구조물 부착면에 사용되어지는 에폭시 종류에 따라서 FRP 부착면의 길이를 다르게 하여 전단 실험을 수행, 그 거동을 조사하였고 둘째는 첫 번째 실험을 통하여 도출된 결과를 토대로 보다 효과적인 부착재료를 이용, 개선된 게이지 위치선정을 통하여 동결융해 작용 시 FRP-콘크리트 경계면 거동을 조사하였다. 모든 부착실험의 경우 1면 전단 실험을 통하여 수행하였고 유효부착강도 및 변형률 산정을 위하여 얇은 FRP에 부착된 변형률 게이지 값을 이용하여 최대 부착강도 및 변형률 분포를 분석, 시험체의 거동 특성을 파악하였다.

#### 3.1 실험시편 설계 및 제작

FRP-콘크리트 부착면의 에폭시 종류에 따른 FRP-콘크리트 경계면 유효부착길이 산정을 위한 실험체 형상은 Fig. 4와 같다. FRP 보강재가 부착되는 콘크리트 모체의 크기는 125×125×330mm의 직육면체로 제작하였으며 섬유판의 부착폭은 40mm, 부착 길이는 시험체의 종류 및 유효부착길이 크기에 따라 각각 50mm, 100mm, 150mm, 200mm 그리고 250mm로 제작하였다. Fig. 5는 부착 에폭시 재료변화에 따른 유효부착길이 산정실험

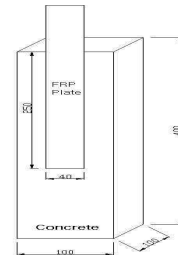


Fig. 6 The Configuration of the freeze-thaw test specimen

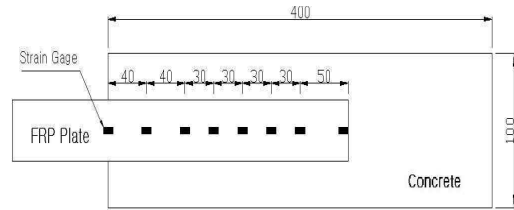


Fig. 7 The attaching points of the strain gages on the freeze-thaw test

에 고려된 측정게이지 부착형상으로서 FRP Plate에 50mm 간격으로 부착하여 전단-슬립에 따른 FRP 변형률을 측정하였다.

Fig. 6은 동결융해에 따른 콘크리트-FRP 경계면 유효부착길이 산정실험을 위하여 고려된 시험체의 설계도이다. 본 실험에서는 이전실험을 통하여 얻은 보다 효율적인 측정게이지 위치 개선 결과를 바탕으로 실제 많은 시간이 소요되는 동결융해 과정을 고려, 동결융해 시험기의 재원을 고려하여 시험체를 설계하였다. 고려된 콘크리트 모체의 크기는 100×100×400mm의 직육면체로 제작하였으며, 섬유판 폭은 40mm, 부착길이는 250mm 길이로 부착하였다. 동결융해 주기는 1cycle당 3~4시간을 반복하여, 0cycle, 50cycle, 100cycle, 150cycle, 200cycle, 300cycle로 각각 시험체를 순환시켜 실험하였으며 각 cycle 당 시험체는 2개씩 제작하였다. Fig. 7은 동결융해 FRP-구조물 경계면의 전단-슬립 실험에 사용된 측정게이지를 부착한 형상으로서 이전 실험 등을 토대로 예상 유효부착길이 구간 내에 게이지 간격을 30mm로 비교적 좁게 배치하였다. Table 1은 제작된 실험체의 기호 및 설명을 나타낸다.

#### 3.2 사용재료 및 물성치

본 연구에서 콘크리트의 압축강도는 FRP Plate와 콘크리트 경계면 거동해석 시 제안되는 bond-slip model의

Table 1 Parameters of test specimens

| Specimen Name | Bonding Length | Freeze-thaw Cycles | Epoxy Types    |
|---------------|----------------|--------------------|----------------|
| I-50          | 50mm           |                    | Epoxy Type-I   |
| I-100         | 100mm          |                    |                |
| I-150         | 150mm          |                    |                |
| I-200         | 200mm          |                    |                |
| I-250         | 250mm          |                    |                |
| II-50         | 50mm           |                    | Epoxy Type-II  |
| II-100        | 100mm          |                    |                |
| II-150        | 150mm          |                    |                |
| II-200        | 200mm          |                    |                |
| II-250        | 250mm          |                    |                |
| III-50        | 50mm           |                    | Epoxy Type-III |
| III-100       | 100mm          |                    |                |
| III-150       | 150mm          |                    |                |
| III-200       | 200mm          |                    |                |
| III-250       | 250mm          |                    |                |
| 0-cycle       | 250mm          | 0cycle             | Epoxy Type-II  |
| 50-cycle      | 250mm          | 50cycle            |                |
| 100-cycle-1   | 250mm          | 100cycle           |                |
| 100-cycle-2   |                |                    |                |
| 150-cycle-1   | 250mm          | 150cycle           |                |
| 150-cycle-2   |                |                    |                |
| 200-cycle-1   | 250mm          | 200cycle           |                |
| 200-cycle-2   |                |                    |                |
| 300-cycle-2   | 250mm          | 300cycle           |                |
| 300-cycle-2   |                |                    |                |

Table 2 Concrete mix proportion

| $f_{ck}$ (MPa) | Aggre. max. (mm) | W/C(%) | S/a (%) | Unit weight (kg/m <sup>3</sup> ) |     |           |             |     |
|----------------|------------------|--------|---------|----------------------------------|-----|-----------|-------------|-----|
|                |                  |        |         | W                                | C   | Fine agg. | Coarse agg. | AE  |
| 40             | 25               | 37     | 42      | 170                              | 460 | 661       | 920         | 1.4 |

면적에 해당하는 파괴에너지를 구성하는 중요 변수로서 28일 설계압축강도 40MPa를 기준으로 하였으며, 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 시험체 제작에 사용된 콘크리트는 사용한 배합표는 Table 2와 같다. 콘크리트 강도는 28일간 수중 양생 후 UTM 장비를 이용하여 압축 강도를 측정된 결과 42.4MPa로 나타났다.

보강재로 활용된 FRP 플레이트의 경우, Fig. 8과 같이 (주)SK케미칼에서 현장용으로 제작, 판매하고 있는 탄소 섬유 상용제품을 이용하였다. 본 제품은 에폭시 수지를 이용하여 경화한 제품으로 함침된 수지의 양이 일정하여 제품의 품질이 균일한 특징을 갖고 있다. 본 연구에서 사용된 FRP 플레이트의 물성치는 Table 3, 4와 같다.

Table 3 The properties of the FRP plate

| Types         | Thickness | Stress(Tension) | Elastic Modulus |
|---------------|-----------|-----------------|-----------------|
| (SK-CPS 0512) | 1.4 mm    | 3000 MPa        | 165000 MPa      |

Table 4 The properties of the epoxy

| Epoxy Types | Stress(Tension) (N/mm <sup>2</sup> ) | Bonding Stress (Tension-Shear) (N/mm <sup>2</sup> ) |
|-------------|--------------------------------------|---|
| Type-I      | 23                                   | 6.2   |
| Type-II     | 39.9                                 | 15  |
| Type-III    | 32.95                                | 5.55  |

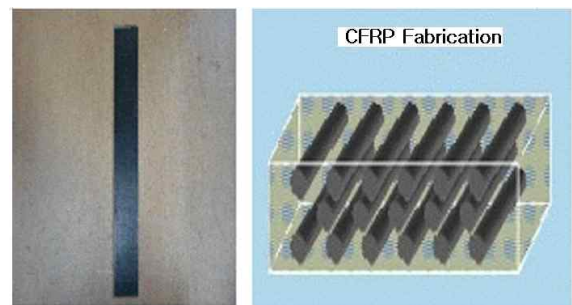


Fig. 8 CFRP Plate and fiber, resin impregnation method

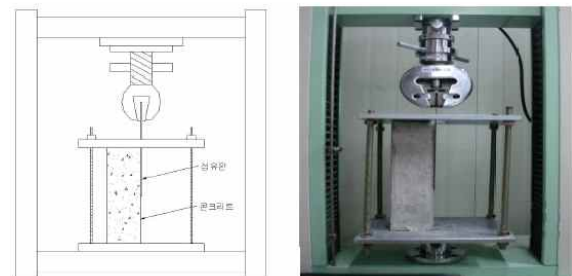


Fig. 9 The experiment method of the attaching strength

### 3.3 실험 방법

콘크리트-FRP 경계면 부착강도를 측정하기 위하여 최대 5000KN의 만능재료시험기를 사용하였으며, 콘크리트에 부착된 FRP 보강재에 독립적으로 인장력을 작용시키기 위하여 Fig. 9에서 보여지는바와 같이 특수 정착지거를 자체적으로 제작, 사용하였다. 각 단계별 실험을 위한 하중가력속도는 JSCE-E 543-2000 [Test Method For Bond Properties of Continuous Fiber Sheets to Concrete]기준에 의한 변위제어 방법을 고려하여 0.5mm/min의 속도로 부착이 완전히 파괴될 때까지 하중을 재하하였다.

Table 5 The test results of the specimens bonded with different epoxy materials between concrete and FRP

| Specimen Name | Tension (N/mm <sup>2</sup> ) | Bonding Length (mm) | Initial Cracking Load (N) | Maximum Load (N) |
|---------------|------------------------------|---------------------|---------------------------|------------------|
| I-50          | 23                           | 50                  | 3390                      | 3390             |
| I-100         | 23                           | 100                 | 4080                      | 4080             |
| I-150         | 23                           | 150                 | 9385                      | 9385             |
| I-200         | 23                           | 200                 | 10000                     | 10765            |
| I-250         | 23                           | 250                 | 12000                     | 12000            |
| II-50         | 39.9                         | 50                  | 7500                      | 7500             |
| II-100        | 39.9                         | 100                 | 10895                     | 10895            |
| II-150        | 39.9                         | 150                 | 22700                     | 22700            |
| II-200        | 39.9                         | 200                 | 21000                     | 21000            |
| II-250        | 39.9                         | 250                 | 17380                     | 17380            |
| III-50        | 32.95                        | 50                  | 6180                      | 6180             |
| III-100       | 32.95                        | 100                 | 8500                      | 8500             |
| III-150       | 32.95                        | 150                 | 14225                     | 14225            |
| III-200       | 32.95                        | 200                 | 12280                     | 12280            |
| III-250       | 32.95                        | 250                 | 12840                     | 12840            |

#### 4. 실험결과 및 고찰

콘크리트 구조물 내 활용되는 FRP 보강재의 다양한 부착거동 변수 중 본 연구에서는 적용 부착재료와 동결융해 시 발생하는 유효부착거동 변화에 대하여 각각 실험을 수행하여 그 거동을 조사하였다.

##### 4.1 부착용 에폭시 특성에 따른 거동 평가

부착용 에폭시의 종류에 따른 각기 다른 부착길이를 가진 시험체의 실험결과를 Table 5와 같다. 실험 결과를 살펴보면 부착길이가 증가함에 따라 부착하중 또한 같이 증가하지만 일정한 길이 이상에서는 하중의 증가가 없는 상태를 확인 할 수가 있는데 이는 기존의 유효부착강도 모델이 제시하고 있는 개념을 확인할 수 있는 결과이다. 부착실험 시 초기균열하중은 실제적으로 그 정확한 값을 측정하기가 어려워 실험 시 초기단계에서 하중변화가 발생하는 시점에서 측정하였고 최대하중의 경우 부착과파가 발생과 함께 실험이 종료되는 시점에서 측정하였는데 Table 5에서 보여지듯 초기균열하중에 대한 최대하중의 비율을 살펴보면 I-200 시험체를 제외한 나머지 시험체 모두에서 초기균열하중이 최대하중으로 결정되었다. 이는 초기균열 발생 이후 큰 하중의 변화 없이 균열이 진전되다가 바로 부착과파가 일어난 현상으로 볼 수 있다.

Table 6 The effective bonding length of test specimens bonded with different epoxy materials between concrete and FRP

| Epoxy Types | Tension (N/mm <sup>2</sup> ) | Effective Bonding Length (mm) |                            |                            | Average value (mm) |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|
|             |                              | Bond strength Method          | Strain distribution Method | Stress distribution Method |                    |
| I           | 23                           | 170                           | 147                        | 157                        | 158                |
| II          | 39.9                         | 160                           | 155                        | 183                        | 166                |
| III         | 32.95                        | 150                           | 140                        | 173                        | 154.3              |

Fig. 10은 부착용 에폭시 종류에 따른 부착길이별 인장강도 변화와 최대하중 값을 보여준다. 실험결과에서 나타나는 부착길이가 50, 100mm 시험체의 인장강도의 경우 인장강도가 증가할수록 최대하중도 거의 일정한 기울기를 가지고 증가하는 것을 볼 수가 있으나 150, 200, 250mm 시험체의 경우 인장강도가 각각 23, 32.95N/mm<sup>2</sup>으로서 I, III 부착용 에폭시 사용에서는 일정한 기울기로 증가하고 있으나 이후 32.95 N/mm<sup>2</sup>에서 39.9 N/mm<sup>2</sup>까지는 급격한 증가현상을 보이고 있다. 이와 같이 부착 길이별로 인장강도의 변화 및 최대강도의 변화가 다른 이유는 부착길이가 작은 시험체는 에폭시의 적용 부착면적이 작으므로 강도에 대한 에폭시의 영향이 적으나 부착길이가 큰 시험체의 경우 적용 부착면적이 증가하므로 부착용 에폭시의 인장강도에 대한 영향은 상대적으로 크기 때문으로 판단된다.

적용된 부착용 에폭시 종류에 따른 유효부착 길이 평가는 앞에서 설명한바와 같이 부착하중에 의한 유효부착길이 평가, 변형률 분포에 의한 유효부착길이 평가, 응력분포에 의한 유효부착길이 등 각각의 3가지 평가방법을 이용하여 그 결과들을 정리, 산정하였다. Table 6은 본 실험을 통하여 얻어진 데이터들을 각각 정리하여 제시한 종합결과로서 실제 많은 데이터 분석을 통하여 조사한 결과 단일 방법으로는 변형률분포에 의한 방법이 본 연구에서는 가장 효율적인 것으로 평가되었다. Fig. 11, Fig. 12 그리고 Fig. 13은 본 연구의 실험에서 얻어진 데이터들을 토대로 변형률분포에 의한 방법을 이용, 실제 유효부착길이를 산정한 예를 보여주고 있는데 I 부착용 에폭시 시험체의 경우, 유효부착길이의 평균값이 147mm 이고, II 부착용 에폭시 시험체의 경우 155mm, III 부착용 에폭시 시험체의 경우 140mm 로 각각 조사되었다. 응력분포를 이용한 유효부착길이 평가에서는 부착재료의 인장강도가 증가할수록 유효부착길이도 증가하는 양상을 보였는데

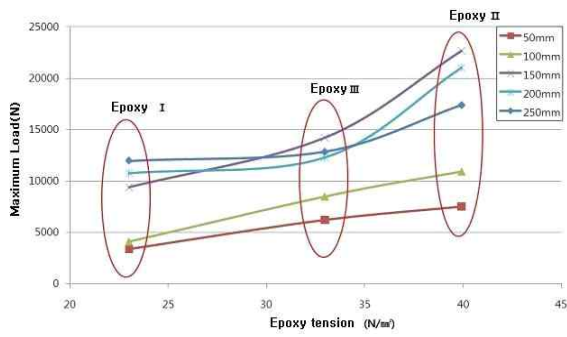


Fig. 10 The maximum bonding strength with different bonding materials in the tests

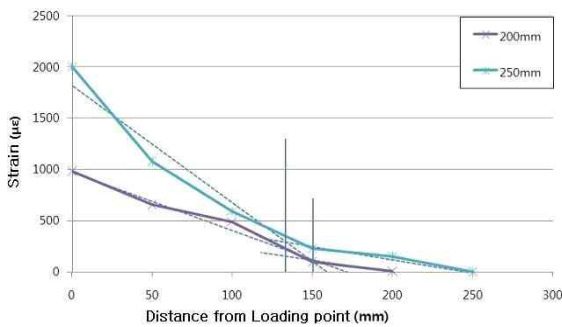


Fig. 11 The strain distribution of the specimen(epoxy I)

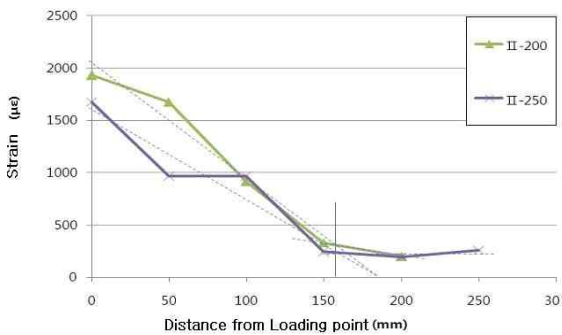


Fig. 12 The strain distribution of the specimen(epoxy II)

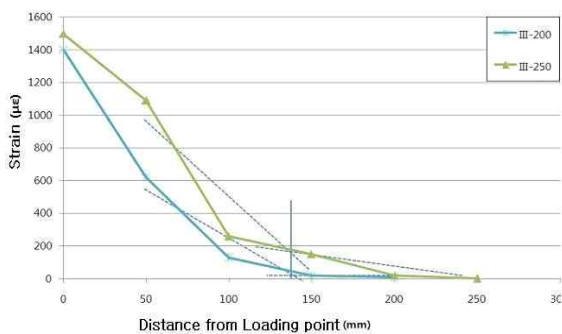


Fig. 13 The strain distribution of the specimen(epoxy III)

이는 FRP에 작용하는 응력이 부착용 에폭시의 인장강도의 영향을 받는 것으로 파악된다.

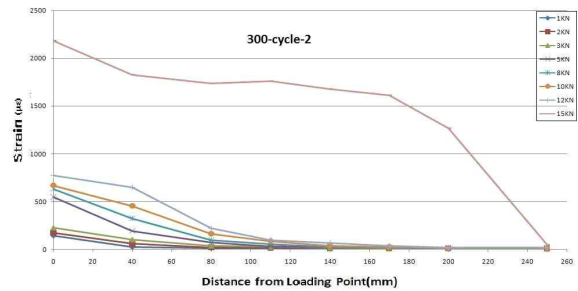
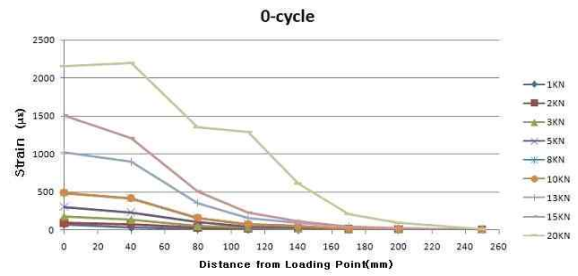


Fig. 14 Effective bonding length of the specimen by strain distribution method(0 cycle and 300 cycle)

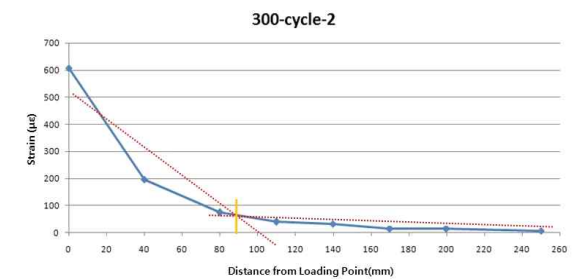
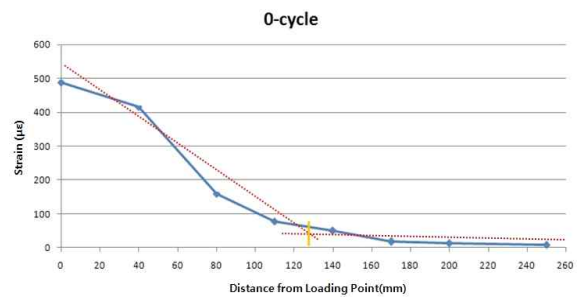


Fig. 15 Effective bonding length of the specimen by Strain Distribution method under initial loading condition(0 cycle and 300 cycle)

#### 4.2 동결융해 주기변화에 따른 거동 평가

동결융해에 따른 콘크리트-FRP 부착면 거동변화를 알아보기 위하여 총 10 여개의 시험체를 제작, 동결융해에 따른 장기거동 실험을 수행하였다. 고려된 동결융해 주기는 3~4시간/cycle을 주기적으로 반복하여, 0cycle에서 300cycle 까지 각각 시험체를 순환시켜 실험하였다. 동결융해에 의한 유효부착길이 변화를 보다 정확하게 조사

Table 7 Effective bonding length of the specimens under the increase of freeze-thaw cycles

| Specimen Name | Effective bonding length A(mm) | Average(mm) | Effective bonding length B(mm) | Average(mm) |
|---------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| 0-cycle       | 110                            | 110         | 128                            | 128         |
| 50-cycle-1    | 110                            | 110         | 126                            | 126         |
| 100-cycle-1   | 110                            | 110         | 122                            | 119.5       |
| 100-cycle-2   | 110                            |             | 117                            |             |
| 150-cycle-1   | 80                             | 80          | 126                            | 121         |
| 150-cycle-2   | 80                             |             | 116                            |             |
| 200-cycle-1   | 80                             | 95          | 90                             | 99.5        |
| 200-cycle-2   | 110                            |             | 106                            |             |
| 300-cycle-1   | 80                             | 80          | 96                             | 92.5        |
| 300-cycle-2   | 80                             |             | 89                             |             |

하기 위하여 본 연구에서는 변형률 분포에 의한 유효부착길이 산정법(A)과 초기하중시 변형률 분포 유효부착길이 산정법(B) 2가지를 이용하여 실험결과를 분석하였으며 그 결과는 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. 실험 결과, 각각의 시험체의 파괴 양상 및 변형률의 거동은 각각 다른 형태를 나타내었다. 이는 FRP-구조물 경계면 부착을 위한 제작 시 에폭시 삽입체에 의한 에폭시 두께 및 표면의 고르기 오차로 인한 것으로 예상된다. 하지만 사용된 에폭시의 양은 한 시험체당 5g으로 동일한 양을 사용하여 표면에 골고루 분포하여 부착하였다.

(A)방법을 이용한 유효부착길이 평가는 0 cycle ~ 100 cycle까지 유사한 값의 유효부착길이 값을 나타내었으며 150 cycle이후로 점차 유효부착 길이가 감소하는 추세를 나타냈고 (B)산정법의 경우 0 cycle에서 150 cycle까지는 거의 미비하게 변화하고 200 cycle 이후로는 유효부착길이가 감소하는 특성을 나타내었다. 결과 분석에 있어 변형률 분포에 의한 유효부착길이 산정방법(A)는 유효부착길이의 범위 정도를 예상 할 수 있는 방법으로 정확한 값을 산정하기에는 어려움이 있지만 초기하중 변형률 분포 유효부착길이 산정법(B)을 사용하는 경우는 보다 정확한 길이를 예상할 수 있으므로 본 연구의 경우 (B)방법에 의하여 산정된 유효부착길이 결과가 좀 더 적절한 것으로 생각된다.

결과적으로 본 동결융해 실험에 따른 유효부착길이 변화는 각각의 산정방법에 대한 값의 차이는 있으나 산정방법(A)와 (B) 모두에게서 동결융해 주기가 증가 할수록 점차 부착특성 및 성능이 변화하는 경향이 나타나므로 것으로 어느 일정기준의 기간이 소요된 후 콘크리트-FRP

Table 8 Maximum strength of the freeze-thaw cycles specimen

| Specimen Name | Bonding length (mm) | Freeze-thaw cycles | Maximum Load (N) |
|---------------|---------------------|--------------------|------------------|
| 0-cycle       | 250                 | 0                  | 20034.5          |
| 50-cycle      | 250                 | 50                 | 12373.5          |
| 100-cycle-1   | 250                 | 100                | 11828            |
| 100-cycle-2   | 250                 | 100                | 12794.5          |
| 150-cycle-1   | 250                 | 150                | 10753            |
| 150-cycle-2   | 250                 | 150                | 13426            |
| 200-cycle-1   | 250                 | 200                | 12561.5          |
| 200-cycle-2   | 250                 | 200                | 14151            |
| 300-cycle-1   | 250                 | 300                | 14622            |
| 300-cycle-2   | 250                 | 300                | 16721.5          |

경계면 부착구조물의 부착성능 저감이 예상되므로 이에 대한 장기적인 점검과 보강대책이 필요한 것으로 판단된다. Table 7은 동결융해 시 유효부착길이 변화에 대한 최종적인 결과들을 요약해 보여주고 있다.

0cycle 에서 300cycle까지 전체적인 동결융해 주기구간에 따른 거동을 살펴보면 최대 부착하중이 0cycle에서 50cycle까지는 초기과정에서 최대부착하중 감소가 다소 두드러지게 나타났다. 이는 최초로 동결융해의 영향을 받았을 때의 구조물의 상태변화를 보여 주는 것으로써 최대 부착하중이 약 39%감소하는 것으로 나타났다. 실험 시 발생하는 오차를 고려하더라도 부착 후 초반부 경계면 상태는 구조물에 내구성에 상당한 영향을 미칠 것으로 생각된다. 이후 계속적인 동결융해에 의하여 지속적으로 최대 부착하중의 변화가 나타나지만 그 값은 미미한 상태이며 후에 200cycle 이후로부터는 오히려 최대부착하중이 증가하였는데 이는 FRP-구조물 경계면에 사용된 에폭시의 특성변화, 부착두께의 정밀성 및 유효부착길이 감소로 인한 부착면적의 확대에 의한 것으로 판단된다. 하지만 초기상태인 0 cycle과 비교하였을때 300 cycle 후 시험체의 부착강도는 전체적으로 약 22% 여전히 감소한 값을 나타내고 있는데 결론적으로 콘크리트-FRP 부착면이 외부 환경에 노출되어 동결융해의 영향을 받는 경우 부착강도 저감이 명확하게 발생하며 이는 초반부에 그 현상이 두드러지는 것을 알 수 있었고 향후 장기적 측면에서 성능저감이 명확한 발생함을 확인할 수 있었다. 본 실험을 통하여 얻어진 시험체들의 최대부착하중 변화는 Fig. 16와 같이 나타났으며 Table 8은 동결융해 주기 별 부착강도 변화를 나타낸다.

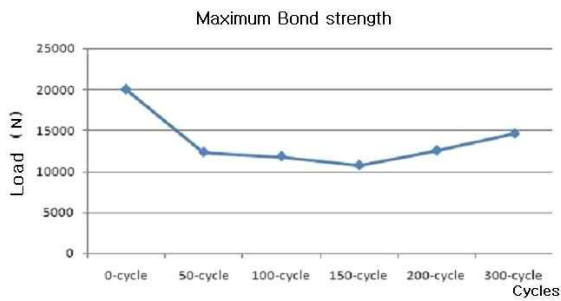


Fig. 16 Maximum strength of the specimens under the increase of freeze-thaw cycles

## 5. 결론

본 연구는 FRP와 콘크리트의 부착에 있어 부착용 에폭시의 재료성질 변화 및 동결융해에 따라 FRP-콘크리트 경계면 사이의 유효부착길이와 부착강도 변화의 차이점을 살펴보았으며 실험결과를 바탕으로 부착용 에폭시의 인장강도를 변수로 보다 정밀한 유효부착길이를 산정하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 물성치가 다른 3가지 부착용 에폭시를 사용하여 부착강도 전단시험결과, 부착용 에폭시의 인장강도의 증가에 따라 최대하중도 증가되는 결과가 나타났다. 이는 부착용 에폭시의 인장강도가 FRP-Concrete 부착강도와 밀접한 관련이 있는 이론적인 개념을 실험적으로 증명된 결과로서 본 연구의 경우 부착재료의 종류에 따라 최대 유효부착길이는 5~7% 차이가 있는 것으로 조사되었다.
- 2) 동결융해 작용으로 인한 부착 성능에 대한 실험 결과 동결융해 주기의 증가로 최대 부착강도는 150cycle까지는 감소하는 것으로 나타났고, 150 cycle이후로는 최대부착강도가 어느 정도 증가하지만, 300cycle 시험체는 0cycle 시험체에 비교하여 22% 낮은 값을 나타내었다. 동결융해 주기에 따라 최대부착강도는 감소하지만 일정하게 계속해서 감소되지 않으며, 중간 삽입제 에폭시의 재료적 특성 거동이 달라지는 것으로 사료된다.
- 3) 동결융해의 영향을 받은 시험체의 유효부착길이 평가방법 2가지를 이용하여 유효부착길이를 산정한 결과 동결융해 주기가 증가할수록 점진적으로 유효부착길이가 점차 감소하는 경향을 나타내었으며 부착강도의 경우 초기에 성능감소가 두드러지게 나타

났다. 이는 동결융해의 영향을 받은 구조물의 이론적 개념을 실험적으로 증명한 결과로 동결융해가 진행됨에 따라 보강효과가 점차 감소하는 실제적인 예를 잘 보여준 것으로 생각된다.

## 감사의 글

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-521-D00472).

## 참고문헌

1. 고경택, 김도겸, 조명석, 송영철, "동결융해 작용을 받는 콘크리트 구조물의 내구성능 저하 예측 방법에 관한 연구", 한국구조물진단학회 논문집, 제 5권, 제 1호, 2001, pp.131-140.
2. 광운대학교, "FRP와 콘크리트의 부착 성능에 관한 실험적 연구", 2006.
3. 연세대학교, "탄소섬유시트로 보강된 콘크리트 구조물의 경계면 부착거동 해석", 2006.
4. Brant Olderhaw, "Combined effects of freeze-thaw and sustained loads on reinforced concrete beams strengthened with FRPs", Queen's University, 2008.
5. C. Mazzotti, M. Savoia, B. Ferracuti, "An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete", Construction and Building Materials Journal, Vol. 22, 2008, pp.1409-1421.
6. Kolluru V. Subramaniam, Mohamad Ali-Ahmad, Michel Guosn, "Freeze-thaw degradation of FRP-concrete interface: Impact on cohesive fracture response", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 75, 2008, pp.3924-3940.
7. Manuel A.G. Silva, Hugo Biscaia, "Degradation of bond between FRP and RC beams", Composite Structure, Vol. 82, 2008, pp.164-174.
8. X. Z. Lu, J. G. Teng, L. P. Ye, J. J. Jiang, "Meso-scale finite element model for FRP sheet/plates bonded to concrete", Engineering Structure, Vol. 27, 2005, pp.564-575.
9. X. Z. Lu, J. J. Jiang, J. G. Teng, L. P. Ye, "Finite element simulation of debonding in FRP-to-concrete bonded joints", Construction and Building Materials Journal, Vol. 20, 2006, pp.412-424.

(접수일자 : 2010년 10월 1일)

(수정일자 : 2010년 12월 29일)

(심사완료일자 : 2011년 1월 5일)



---

## 요 지

본 연구는 부착재료의 변화 및 동결융해에 따른 FRP-콘크리트구조물 경계면의 거동을 조사하였다. 실험 시 고려된 연구변수로는 부착경계면의 부착강도, 경계면 유효부착길이 등을 조사하였다. 경계면 부착재료에 따른 거동변화 실험체의 경우 FRP-구조물 부착경계면에 사용되는 에폭시의 종류를 각각 3가지로 분류하며 FRP-콘크리트간 다양한 부착길이를 고려하여 시편을 제작하였으며 동결융해에 따른 경계면 거동조사의 경우 0 cycle에서 300cycle까지 계속적으로 증가되는 주기에 대하여 실험체들을 제작, 장기거동 부착실험을 수행하였다. 본 실험결과, 적용 부착재료의 종류에 따라 최대 유효부착길이는 5~7% 차이가 있었으며 동결융해 주기증가에 따른 최대부착하중 및 유효부착길이의 경우 초기에 나타난 급격한 거동변화 이후 상대적으로 불규칙한 변화를 장기적으로 나타내었다.

핵심 용어 : FRP 경계면, 동결융해, 유효부착길이, 부착강도

---