

# 콘크리트와 FRP사이의 부착거동에 대한 유한요소해석

## A Finite Element Analysis for the Bond Behavior between FRP and Concrete

서 수 연\*  
Seo, Soo-Yeon

### Abstract

The purpose of this study is to propose a finite element analysis method using MIDAS FEA program to find an appropriate analysis method for the bond behavior between concrete and FRP. For evaluating the accuracy of the method, a bond test of FRP bonded to concrete was performed and the test results were compared to the analytical results. In modeling the interface between concrete and FRP, the bond-slip model between concrete and FRP was used. From the study, it was found that the bond behavior between concrete and FRP can be properly simulated by using the cubic function model for bond strength - slip relationship considering the information of the surface condition of FRP and concrete, and the shear deformation characteristics of epoxy. In addition, the proper shear slip coefficient values for both externally bonded FRP and near-surface-mounted FRP were suggested for performing FE analysis.

키워드 : 유한요소해석, 부착거동, 부착실험, 부착-미끄러짐 모델, 표면부착, 표면매립

Keywords : Finite element analysis, Bond behavior, Bond test, Bond-slip model, Near-Surface-Mounted (NSM), Externally Bonded (EB)

### 1. 서 론

#### 1.1 연구의 배경

철근콘크리트 건축물은 내구성이 우수 하지만, 설계상의 오류, 리모델링, 증축 등 인위적인 요인과 건축물의 노후화, 지진, 태풍 등과 같은 자연적인 요인으로 인해 과도한 처짐, 강도 저하와 같은 문제들이 발생할 수 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 건축물의 안전을 유지하고자 보수, 보강이 많이 이루어지고 있다. 보강에 있어서 가장 널리 사용되는 방법은 FRP (Fiber Reinforced Polymer)를 이용한 보강공법이다. 최근에 사용되는 FRP 보강공법은 에폭시를 사용하여 FRP를 부착 또는 매립하는 보강공법이다. FRP를 이용한 보강공법은 기존 강관공법에 비해 중량이 적고 시공이 용이하며 재료의 높은 인장강도로 인해 구조물에 적용할 경우 보강효과가 우수하다. FRP 보강은 시공 방법에 따라 표면부착 공법 (Externally-Bonded-Retrofit)과 표면매립 공법

(Near-Surface-Mounted Retrofit)이 있다. 표면부착 공법은 시공이 용이 하지만, 보강재가 노출됨으로 인하여 외부 환경변화에 민감하여 부착손실이 발생하기 쉽다. 이에 따라 FRP 보강재의 성능을 충분히 발휘하지 못하는 경우가 많다. 표면부착공법에 비해 표면매립공법은 부착성능이 우수하고 외부환경에 노출이 적어 내구성이 상대적으로 높다. FRP를 이용한 철근콘크리트 구조부재의 보강에서, 가장 중요한 것은 FRP와 콘크리트의 부착특성이다. 설계에서 권장되는 것은 두 부재가 접촉된 계면에서 충분한 부착강도를 확보하여 설계에서 요구되는 FRP의 인장강도가 발현되도록 하는 것이다. 이에 대해서는 국내외에서 일련의 실험연구 (Seo et al., 2011a 2011b)가 수행되어, 여러 가지 영향요소에 따른 설계방법이 제시되어 있다.

FRP의 거동을 이해하기 위해서는 이와 같은 실험 연구와 더불어 FRP와 콘크리트 사이의 계면특성을 반영한 해석적인 접근이 또한 필요하다. 적절한 해석방법을 구축함으로써, 다양한 조건에서의 FRP의 부착거동을 예측할 수 있기 때문이다.

이에 따라 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 MIDAS FEA3)를 사용하여 콘크리트와 FRP 사이의 부착 거동에 대한 해석방법을 연구하고자 한다. 특히 콘크리트에 도포된 에폭시와 FRP사이의 부착강도 실험을 실시하고 그 결과를 유한요소 해석결과와 비교하여 FRP 보강공법의 해석 방향을 제시하고자 한다.

\* 한국교통대 건축공학과 교수, 공학박사  
(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, syseo@ut.ac.kr)

이 연구는 한국연구재단 기초연구실사업의 지원을 받아 수행되었습니다 (RS-2024-00408370).

1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구에서는 FRP로 보강된 RC 보에 대한 해석을 통하여 실제 부재내에 열전달을 규명하고자 한다. 연구 방법은 기존 연구에서 FRP로 보강된 RC보의 가열실험 통해 얻은 데이터 값을 해석 프로그램인 MIDAS FEA (Finite Element Analysis)의 해석값과 비교하여 해석을 통하여 규명한 결과와 실험을 통하여 얻은 결과와의 상관성을 분석하여 해석적 연구의 적절성을 평가한다.

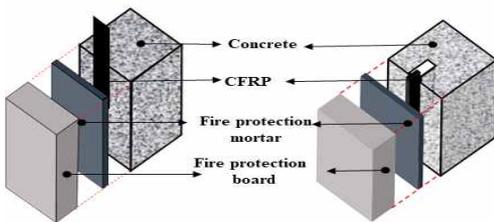
2. MIDAS FEA 프로그램의 소개 및 모델링

2.1 해석 프로그램 소개

구조부재에 대한 유한요소 해석이란 부재를 유한개의 요소로 모델링하고 외력작용시 이들 요소간의 응력전달과 변형특성을 고려함으로써, 실험으로부터 관찰하지 못하는 경우를 예측할 수 있는 방법을 말한다. FRP로 표면 부착 또는 표면매립으로 보강된 철근콘크리트 부재에서 FRP와 콘크리트 사이의 부착성능을 해석적으로 묘사하기 위하여 MIDAS FEA 프로그램 (Midas IT, 2012)을 사용할 수 있다. 본 연구에서 사용하는 MIDAS FEA 프로그램은 선형해석, 재료/기하 비선형해석, 수화열, 접촉, 균열, 피로해석 등 건설 분야 고급 상세해석 및 비선형해석을 위한 프로그램이다.

2.2 FRP-콘크리트 부착계면의 모델링

본 연구에서 대상으로 하고 있는 표면부착과 표면매립의 두 가지 공법에 대한 시공순서와 그에 따른 특성은 다음과 같다. 표면부착공법은 보강할 부재에 에폭시를 도포 후 FRP를 보강부재의 표면에 부착하여 보강하는 공법이다. 내화단열을 할 경우에는 그 위에 내화모르타르를 도포하고 내화보드로 FRP가 화재에 노출되는 것을 방지한다. 표면매립 공법은 부재에 일정한 홈을 내고 그 홈 내부에 에폭시를 도포 후 FRP를 삽입한다. 마찬가지로



(a) External bonding (b) Near-Surface-Mounting  
Figure 1. strengthening concept with FRP reinforcement

내화단열을 할 경우에는 내화 모르타르를 도포하고 내화 보드를 부착시켜 마무리한다. Figure 1은 표면부착 공법과 표면매립 공법의 보강개념을 나타낸다.

FRP가 부착된 부분에서의 비선형 거동을 묘사하기 위한 부착계면의 모델링과 관련하여 MIDAS FEA를 이용한 모델링의 순서는 다음과 같다.

- ① Geometry기능을 이용하여 모델의 윤곽을 그린다.
- ② 모델에 mesh를 나눈다. mesh는 Auto mesh와 Map mesh 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. Auto mesh는 면 안에서 자동으로 요소를 생성하고 Map mesh는 직접 요소 크기를 조절할 수 있으며 특정부분의 해석 값을 자세히 볼 수 있도록 보다 정밀하게 나눌 수 있는 방법이다.
- ③ 선택한 mesh의 재료 물성값을 기입하고 해석 시 사용되는 함수값을 정해준다.
- ④ 경계조건과 작용하중을 지정해준 후 Analysis Case 기능을 통해 해석단계를 설정한다. 마지막으로 Solve기능을 이용하여 해석을 진행한다.

모델링에서 콘크리트와 FRP는 Solid 요소기능을 이용해 윤곽을 만든다. 계면을 보다 정확히 확인하기 위해 Map mesh를 사용하여 FRP가 부착되는 면적을 조밀하게 나눌 수 있다. 콘크리트 모델로서 가장 많이 사용되는 것은 Total Strain Crack 모델이다. FRP는 탄성거동을 하는 것으로 가정하여 Elastic 모델을 사용할 수 있다. Total Strain Crack의 압축모델은 보통 Figure 2(a)와 같이 Thorenfeldt가 제시한 모델을 사용하지만, 이 모델을 적용한 결과 콘크리트가 최대강도에 도달한 뒤 해석이 종료되기 때문에 그 이후의 거동을 관찰하기 어렵다. 따라서 비선형 거동을 관찰하기 위해서는 Figure 2(b)와 같은 Constant모델을 사용할 수 있다. 통상 인장 모델과 전단모델은 압축모델과 같은 Constant를 사용할 수 있다.

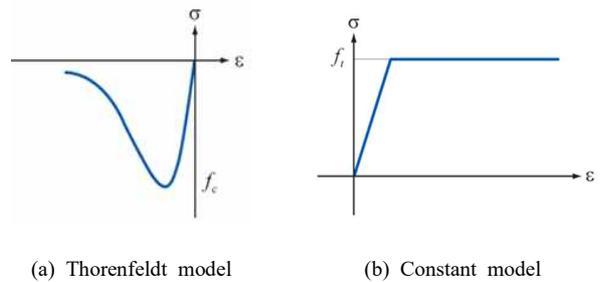


Figure 2. Concrete model

콘크리트와 FRP 사이의 부착역할을 하는 에폭시를 묘사하기 위해 Figure 3과 같이 Interface 기능을 이용할 수 있다. 실제 해석에서는 Figure 3(a)와 같이 콘크리트와-에폭시, 에폭시-FRP와 같이 두 개의 계면을 고려하거나 Figure 3(b)와 같이 콘크리트-FRP와 같이 한 개의 계면을 고려할 수 있다. Interface는 이산균열, 균열팽창, 부착-슬립, 쿨롱마찰, 등 MIDAS FEA에서는 계면간의 여러 가지 함수를 제공하고 있다. 이들 요소 중 FRP와 콘크리트 사이의 부착특성을 묘사하기에 적절한 모델은 부착-슬립 모

델로 알려져 있다. 또한 Interface기능 이외에도 콘크리트-에폭시, 에폭시-FRP 사이를 단순 접합인 Contact로 모델링을 할 수 있다.

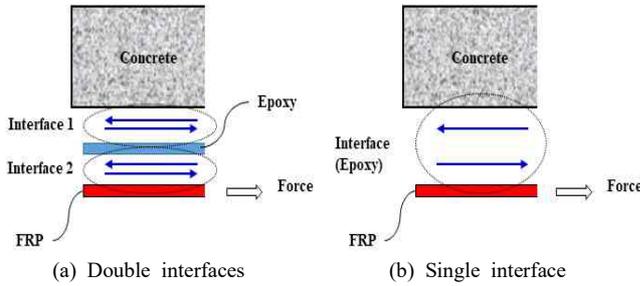


Figure 3. Interface model between concrete and FRP reinforcement

### 2.3 FRP-콘크리트 사이의 부착-슬립 메커니즘

콘크리트와 FRP사이의 계면을 부착-슬립 모델로 모델링 할 경우, 계면에서의 거동을 지배하는 요소를 결정하는 것이 가장 중요하다. 통상 콘크리트-FRP계면의 부착거동 묘사를 위해 사용하는 모델은 콘크리트와 FRP사이에 에폭시가 도포되어 있고 계면거동은 이차 중, 횡 방향 균열에 지배된다. 이러한 거동은 부착 슬립으로써 규정할 수 있다. Figure 4는 MIDAS FEA에 제시되어 있는 부착-슬립 모델 중 입방함수 (Cubic Function)모델 곡선이며, 전단응력과 슬립과의 관계에 의해 정의된다.

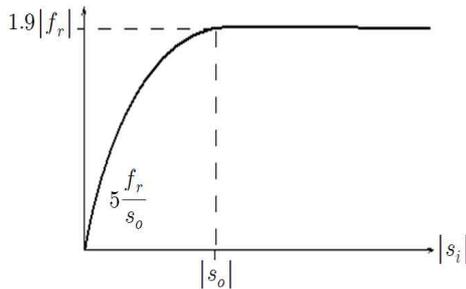


Figure 4. Bond-Slip cubic model

$$f_t = \begin{cases} c \left( 5 \left( \frac{s_i}{s_o} \right) - 4.5 \left( \frac{s_i}{s_o} \right)^2 + \left( \frac{s_i}{s_o} \right)^3 \right) & \text{if } 0 \leq s_i \leq s_o \\ 1.9c & \text{if } s_i \geq s_o \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $c$ 는 부착강도 계수이며  $s_o$ 는 최대 부착강도 도달시의 미끄러짐 변형을 나타낸다.

Eq. (1)에서  $1.9c$ 는 계면에서의 최대 부착강도이다. 해석 시 부착-슬립에서의 실험상수  $c$ 값과 최대 부착강도 도달시의 미끄러짐  $s_o$ 에 따라 부착-슬립 거동이 변화된다.  $1.9c$ 는 전단응력 즉 부착응력을 나타내고 기존 연구자들이 제안한 식들을 사용하여 산정할 수 있다.

전단 미끄러짐은 Figure 3에 나타난 바와 같이, 콘크리트-에폭시, 에폭시-FRP와 같이 두 개의 계면에서의 발생한 미끄러짐 변형이 합쳐서 나타나게 된다. FRP와 콘크리트의 표면 상태에 대한 정보와 에폭시의 전단변형특성을 고려하여 모델링 할 수 있다.

### 3. 해석방법의 유효성 검증을 위한 실험

#### 3.1 실험계획

전술한 해석방법의 유효성을 평가하기 위하여 표면부착 공법과 표면매립보강 공법으로 보강된 FRP에 응력을 작용시켜 부착계면에서 파괴되도록 실험을 실시하였다. 실험체는 콘크리트 블록을 제작하고 이 블록에 FRP를 Figure 5에 나타난 바와 같이 보강하여 제작하였다. 콘크리트 블록의 크기는 100mm×100mm×200mm로 제작하였고 표면부착 공법으로 보강한 FRP는 폭 34mm, 두께 1.2mm, 길이 500mm로 제작하여 콘크리트 블록표면에 에폭시도포 후 부착하였다. 표면매립 공법 또한 표면부착 공법과 부착면적이 동일조건을 가지도록 FRP 폭 17mm, 두께 1.2mm, 길이 500mm로 제작하였으며 콘크리트 블록 표면에 깊이 20mm, 길이 100mm의 홈을 내고 에폭시 충전 후 FRP를 매립시켰다. 콘크리트 블록의 28일 양생 후 압축강도는 18MPa이다. 표 1은 실험체 일람을 나타내고 Table 2와 3은 FRP와 에폭시의 재료특성을 나타내며 이들은 제조사에서 제공된 값이다.

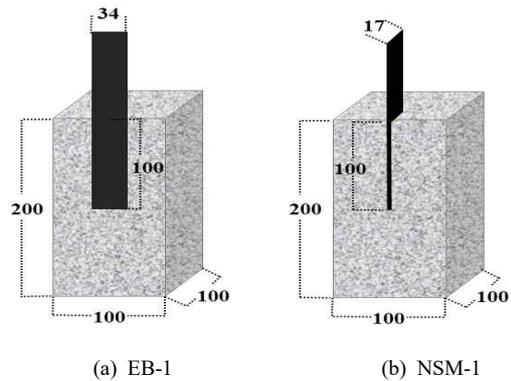


Figure 5. Shape of specimens

Table 1. Specimen list

Name	Method	Size of block (mm)	Dimension of FRP reinforcement		Bonded length of FRP (mm)
			Thickness (mm)	width (mm)	
150-50	EB	200 × 200 × 400	1.2	50	150
200-50					200
300-50					300
150-1	NSM	200 × 200 × 400	3.6	16	150
200-1					200
300-1					300

Table 2. Mechanical properties of CFRP

Thickness (mm)	Width (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic module (MPa)
1.2	50	2,800	160,000

Table 3. Mechanical properties of epoxy

Type	Compression strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Shear strength (MPa)	Elastic module (MPa)
Sikadur-30	70	28	18	128,000

콘크리트와 FRP 사이의 부착강도를 확인하기 위한 실험은 2000kN UTM을 사용하여 변위제어로 진행하였다. ACI 440R (2011)에 기술되어 있는 실험 방법 중에서 Figure 6과 같이 Beam-end test method을 응용하여 실험환경 조건에 맞게 실험체를 계획하였다. 콘크리트 블록 상부와 하부에 철물을 고정시키고 FRP와 상단과 하단의 축을 일치시켜 실험체의 편심이 생기는 것을 방지하였고 가력 시 실험체의 하중과 변위 데이터를 확인하기 위해 TDS-602와 변위계를 사용하였다. Figure 7은 실험체의 설치 개념 및 모습을 나타낸다.

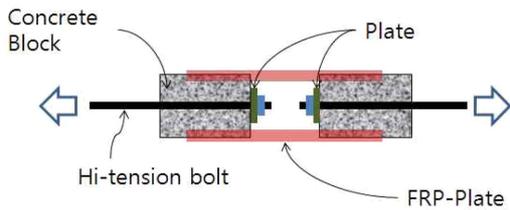


Figure 6. Beam-end test method

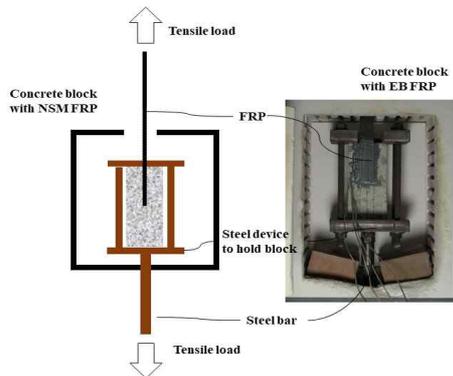


Figure 7. Test set-up

3.2 실험 결과

인장가력 실험을 진행한 결과 Figure 8과 같이 EB-1은 파괴양상은 에폭시 전단파괴가 발생하였고 NSM-1은 콘

크리트 할렬파괴가 발생하였다. Figure 9는 실험체의 하중 변위곡선으로서 EB-1 실험체의 최대하중은 15.33kN이며 이때의 변위는 3.58mm이다. NSM-1 실험체의 최대하중은 22.79kN이며 변위는 5.81mm로 나타났다. 표면매립 공법으로 보강한 NSM-1실험체의 내력이 표면부착 공법으로 보강한 EB-1의 실험체보다 1.48배 높다. 이로 부터 표면매립공법을 활용한 FRP보강공법이 표면부착공법보다 우수한 것을 알 수 있다.

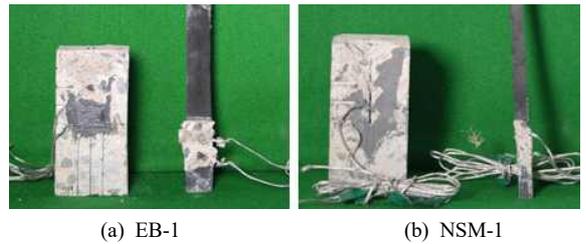


Figure 8. Bond-failure shape of specimen

각 실험체의 부착응력은 Eq. (2)를 이용하여 구할 수 있다. 최대 부착 강도는 유효길이를 고려한 부착면적을 부착강도에 곱한 값으로 다음과 같이 정의된다. 계산 결과 EB-1의 부착응력은 5.64MPa, NSM-1의 부착응력은 8.38MPa이다.

$$\mu \sum_0 = A_f f_f = P_n \tag{2}$$

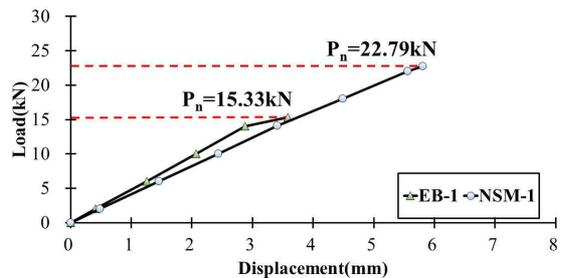


Figure 9. load-displacement curves

4. 비선형 유한요소해석 및 결과의 비교 분석

비선형 유한요소 해석을 위하여 실험체들의 콘크리트와 FRP를 Soild 요소로 만들고 계면을 Interface로 지정하여 에폭시를 표현하였다. Table 5는 해석을 위한 콘크리트와 FRP 모델링에 필요한 추가적인 물성값을 나타낸다.

Table 5. Mechanical properties for analysis

	Compression strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Shear lag coefficient	Elastic module (MPa)
Concrete	21	2.1	0.2	
FRP plate		2,800		160,000

표면부착 경우 Interface는 FRP가 부착되는 한 면이 생성되고, 표면매립인 경우 Interface는 부착 되는 모든 방향에서 생긴다. Interface는 이산균열, 균열팽창, 부착-슬립, 쿨롱마찰, 등 MIDAS FEA에서는 계면간의 여러 가지 함수를 제공하지만 본 연구에서는 부착-슬립 모델을 사용한다. 부착강도는 Seo et al.(2011a)에 의해 제안된 부착과괴 시 파단 형식에 따른 다음 식을 사용하였다. 부착강도는 이들 계산결과 중 가장 작은 값이 된다.

- FRP의 인장파단 강도:  $T_{f1} = A_f f_f$  (3)

- 에폭시의 전단파괴 강도:  $T_{f2} = \lambda \tau_e (2b_f l_d)$  (4)

- 콘크리트 할렬파괴 강도:  $T_{f3} = 0.57\beta \sqrt{f_{ck}} A_{fr}$  (5)

여기서,  $A_f$ 는 FRP의 단면적( $mm^2$ ),  $f_f$ 는 FRP의 인장강도(MPa),  $\lambda$ 는 에폭시의 부착강도감소계수,  $\tau_e$ 는 에폭시의 전단강도(MPa),  $b_f$ 와  $l_d$ 는 각각 부착된 FRP의 폭과 부착 길이(mm),  $\beta$ 는 콘크리트 할렬파괴계수,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도(MPa),  $A_{fr}$ 는 콘크리트의 할렬파괴면적 ( $mm^2$ )이다.

해석 시 표면부착 공법을 이용한 모델은 c값을 도출하기 위해 각 파괴기구에 대한 강도를 산정한 결과, Eq. (3)의 에폭시 계면에서의 파단으로 내력이 결정되었다. 여기서  $\lambda$ 는 0.41,  $\tau_e$ 은 제조사에서 제공한 값으로 10MPa이다. 계산결과 에폭시 계면에서의 부착강도  $T_{f2}$ 값은 13.94kN으로 나타났다.

표면매립 공법을 이용한 모델은 c값을 도출하기 위해 각 파괴기구에 대한 강도를 산정한 결과, Eq. (5)의 콘크리트 할렬파괴로 내력이 결정되었다. 여기서  $\beta$ 는 실험상수로서 0.9,  $f_{ck}$ 는 18MPa,  $A_{fr}$ 은 10,064 $mm^2$ 이다. 계산 결과, 콘크리트 할렬파괴시 부착강도  $T_{f3}$ 값은 21.9kN이 된다. 앞서 구한  $T_{f2}$ 과  $T_{f3}$ 의 값을 이용해 1.9c(부착응력)의 값을 구하면 표면부착 보강 시 내력은 5.12MPa, 표면매립 보강시 내력은 8.05MPa 값이 된다. 이들 값은 실험결과로부터 Eq. (2)를 이용하여 산정한 부착응력과 매우 유사함을 알 수 있다. 이 결과를 통해 c값을 도출해보면 표면부착공법일 때 2.69MPa, 표면매립일 때 4.24MPa이 된다. 최대강도에 도달할 때의 전단 미끄러짐은 표면부착일 때 2mm, 3mm, 4mm, 5mm 로 해석을 진행하고 표면매립일 때 5mm, 6mm, 7mm, 8mm 값을 넣어 해석을 진행하였다. 이들 값은 Kim (2013)에 의한 기존 연구결과를 반영한 값이다.

본 해석에서는 콘크리트 모델의 상부에 철물의 실제 모양(ㄷ)과 같이 이동 지점을 두었고 해석 시 편심을 방지하기 위하여 콘크리트 하부가 면외방향으로 구속되도록 하였다. FRP의 상단에 인장 방향으로 변위를 점증시켜 해석을 진행하였다. Figure 10은 실험체와 동일한 규격으로 모델링을 한 모습을 나타낸다.

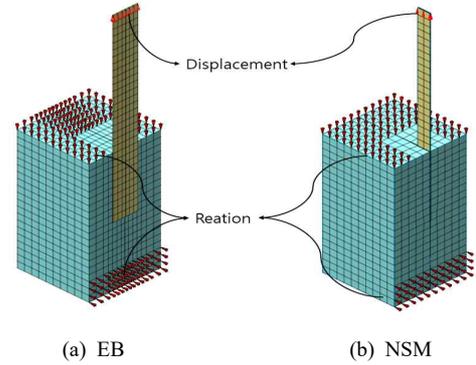


Figure 10. Modeled specimens

Figure 11과 12는 전술한 바와 같이 c값을 도출하여 해석한 결과와 실험결과를 비교한 그래프이다. Figure 11의 표면부착 공법에 대한 해석과 실험결과를 비교를 보면, 본 연구에서 계산한 c값을 적용할 경우 실험결과에 비하여 해석결과의 최대 내력이 다소 높게 묘사됨을 알 수 있다. 최대강도 시 계면에서의  $s_o$ 가 5mm인 경우가 실험결과와 가장 유사한 모양을 보이고 있다.

Figure 12는 표면매립 보강된 실험체의 해석결과를 실험결과와 함께 나타낸 그림이다. 본 연구에서 계산한 c값을 적용할 경우 실험결과에 비하여 해석결과의 최대 내력이 유사하게 묘사됨을 알 수 있다. 그리고 최대강도 시 계면에서의  $s_o$ 는 6mm인 경우, 가장 실험결과와 해석결과가 유사한 양상을 보이고 있다.

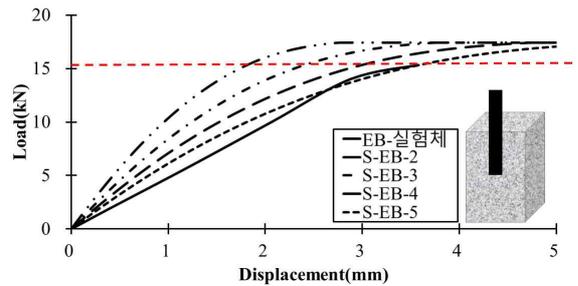


Figure 11. Comparison of load-displacement curves between test and analysis results for EB specimen

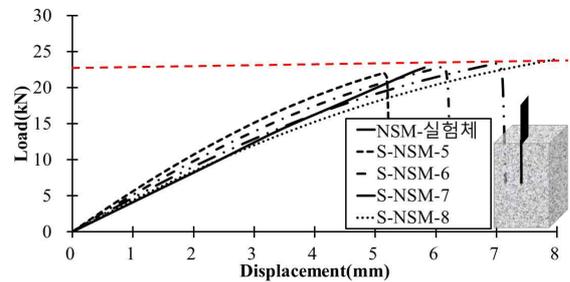


Figure 11. Comparison of load-displacement curves between test and analysis results for NSM specimen

이상의 결과로부터 표면부착과 표면매립 공법 모두에 대하여 계면의 파괴기구를 고려한 부착강도계수  $c$ 를 산정하고 최대내력시의 전단미끄러짐계수  $s_0$ 값을 표면부착에 대해서는  $5mm$ 와 표면매립에 대해서는  $6mm$ 로 모델링 하면 FRP로 보강된 계면의 거동을 적절히 묘사할 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트와 FRP 사이의 부착거동에 대한 적절한 해석방법을 찾기 위하여 MIDAS FEA프로그램을 이용한 유한요소 해석방법을 제시하고 콘크리트에 도포된 에폭시와 FRP사이의 부착강도 실험을 실시한 뒤 결과를 서로 비교하여 FRP 보강공법의 해석 방향을 제시하고자 하였다. 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 콘크리트와 FRP사이의 계면을 부착-슬립 모델로 모델링 할 경우, 계면에서의 거동을 지배하는 요소를 결정하는 것이 가장 중요하다. MIDAS FEA에 제시되어 있는 부착-슬립 모델 중 입방함수(Cubic Function)모델 곡선을 이용하고 FRP와 콘크리트의 표면 상태에 대한 정보와 에폭시의 전단변형특성을 고려하여 FRP가 부착 또는 매립된 콘크리트 계면의 거동을 적절하게 모델링 할 수 있는 것으로 나타났다.

2) 표면부착과 표면매립 공법 모두에 대하여 계면의 파괴기구를 고려한 부착강도계수  $c$ 를 산정하고 최대내력시의 전단미끄러짐계수  $s_0$ 값을 표면부착에 대해서는  $5mm$ 와 표면매립에 대해서는  $6mm$ 로 모델링 하면 FRP로 보강된 계면의 거동이 실험결과와 매우 유사하게 묘사될 수 있는 것으로 나타났다.

3) 부착면적이 동일한 표면부착 보강 (EB-1)과 표면매립 보강된 FRP (NSM-1)에 대한 부착강도 실험결과 EB-1은 에폭시 전단파괴가 발생하였고 NSM-1은 콘크리트 할렬파괴에 의해서 최종 파괴되었다. 최대내력은 NSM-1실험체의 내력이 EB-1의 실험체보다 1.48배 높게 나타나 표면매립 보강된 FRP의 보강효과가 상대적으로 우수한 것을 알 수 있다.

4) 추후 연구로서, 보다 많은 실험체들에 대한 해석을 실시하고 그 결과를 비교분석하여 본 연구에서의 해석모델링의 적합성을 비교한 뒤 고온노출과 같은 다양한 환경 조건에서의 FRP 부착거동을 묘사할 수 있는 해석적 연구가 필요한 것으로 사료된다.

### REFERENCES

1. Seo, S.-Y., Yoon, S.-J., Kwon, Y.-S. & Choi, K.-B. (2011a). Bond Behavior between Near-Surface-Mounted Fiber Reinforced Polymer Plates and Concrete in Structural Strengthening. Journal of the Korea Concrete Institute, 23(5), 675-682.

2. Seo, S.-Y., Oh, J.-G., & Choi, K.-B. (2011b). Bond Capacity of Concrete Member Strengthened by Various Methods Using FRP Plate Journal of Architectural Institute of Korea, 27(8), 55-63.

3. Midas IT (2012), MIDAS FEA Ver. 3.4.0 Manual

4. Kim, J.-H. (2013). Bond Capacity of Concrete Member Strengthened by CFRP under Various Temperatures, Master's thesis, Korea National University of Transportation.

5. ACI's 2011 Manual of Concrete Practice, "Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures(ACI 440R-63)", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2011.