

# 탄소섬유 보강재로 표면매립에 의해 보강된 철근 콘크리트 보의 휨 보강성능

## Flexural Capacity of Concrete Beam Strengthened with Near-Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer

오 흥 섭\*  
Oh, Hong Seob

심 종 성\*\*  
Sim, Jong Sung

주 민 관\*\*\*  
Ju, Min Kwan

### Abstract

This study is to investigate the flexural performance of Near Surface Mounted (NSM) strengthening method using Fiber reinforced Polymer (FRP) materials to concrete structures. For this study, the inverse-shaped trapezoid CFRP composite material which has been registered as New Excellent Technology (NET) 351 was adopted to the concrete structure. In this study, two types of the CFRP types were considered; Type A (15×13×6mm) and Type B (4×3×10mm) with different strengthening ratio. In the result of the test, it was proved that NSM strengthened specimens had more flexural performance of 20-100% than that of the unstrengthened specimen. With this test result, the structural efficiency was investigated based on the coefficient of ductility and coefficient of crack resistance.

### 요 지

본 연구는 비부식성 및 고성능의 보강재로 많은 연구가 진행 중인 Fiber Reinforced Polymer(FRP)를 이용하여 표면매립 보강공법(Near Surface Mounted)을 통한 휨 구조거동을 분석, 보강형태에 따른 휨 성능을 규명하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 역사다리꼴 탄소막대를 이용하여 NSM 보강 보 구조물의 휨성능을 분석하였으며 Type A(15×13×6mm)와 Type B(4×3×10mm)의 2가지 보강재 형태로 각각 보강비를 달리 하여 실험을 수행하였다. 실험결과, 무보강 실험체인 Control 실험체보다 20~100%의 보강성능 향상을 나타내었으며, 이를 바탕으로 휨모멘트 성능해석 및 균열, 연성지수 평가를 통해 본 NSM 보강공법의 보강효율을 분석하였다.

**Keywords :** Flexural performance, Inverse-shaped CFRP, NSM strengthening method

**핵심 용어 :** 휨 성능, 역사다리꼴 탄소섬유보강재, 표면매립 보강공법

\* 정희원, 국립진주산업대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\*\* 정희원, 한양대학교 토목공학과 박사수료

E-mail: opera69@chol.com 055-751-3299

•본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2008년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

노후화된 콘크리트 구조물의 성능향상을 위한 보수 및 보강공법으로서 fiber-reinforced polymer(이하 FRP)를 이용한 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 특히, fiber sheet나 FRP plate를 이용한 외부부착공법은 콘크리트 beam이나 Slab의 휨·전단 성능향상 공법으로 많이 활용되어 왔다.<sup>(4)</sup> 그러나 기존의 외부부착공법의 경우 파괴 메카니즘 측면에서 최대 기대하중에 이르기 전에 보강판 또는 보강 Sheet와 모재 콘크리트 사이에서 계면박리, 단부탈락 등의 문제점을 안고 있다. 또한 응력전달시 외부 부착된 FRP 보강재의 외부환경 손상의 취약성에 의해 보강재의 부식, 화재에 대한 위험성 및 차량충돌에 의한 손상 등 여러 가지 문제점을 보여왔다.<sup>(2)</sup> FRP Rod의 경우에는 FRP-epoxy의 보강재와 콘크리트간의 조기탈락현상 발생이 연구에서 밝혀졌다.<sup>(3)(6)</sup>

따라서 본 연구에서는 FRP 보강재를 사용함으로써 외부부착 보강공법의 성능향상을 극대화 할 수 있는 효율적인 보강에 초점을 맞춰 표면 매립공법(Near Surface Mounted, 이하 NSM)이 가장 효율적인 외부부착 보강공법이라는 점을 고려하였다. 그러나, 기존 NSM 보강공법에 대한 분석결과, 보강재의 형태에 따라서 FRP Rod의 경우는, 지름 9.5 mm를 사용하여 휨실험을 수행하였을 때 무보강 실험체 대비 약 1.2~1.6배의 성능향상을 보였으며,<sup>(6)</sup> FRP Strip를 적용한 경우는 약 1.5~2.0배의 보강효율을 나타내었다.<sup>(2)</sup>

이에 본 논문에서는 원형 및 직사각형 단면형태가 개선된 역사다리꼴 보강재 단면형상을 제안하였다. 역사다리꼴 단면은 보강 후 휨 거동시 NSM 홈안에 충전된 충전재와 썩기작용에 의해 부착력 및 보강효율의 향상을 도모하였다. 따라서 본 연구에서는 역사다리꼴 탄소섬유 plate를 기존 NSM 보강공법에 적용함으로써, Beam 이나 Bridge deck 구조물의 성능향상 및 구조거동을 분석하고자 한다. 이를 위해 NSM 보강 보 실험체를 제작하여 보강재 type별 균열양상, 균열 및 연성지수 등의 보강효율을 분석하였다.

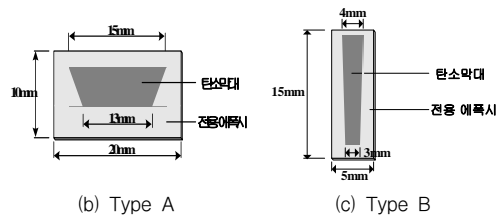
## 2. 구조실험

### 2.1 보강실험체 제작개요

본 연구에서 사용된 역사다리꼴 탄소섬유 보강재는 신기술에 등록된 재료로서, Fig. 1은 본 연구에서 사용된 역사다리꼴 탄소섬유 보강재의 재원 및 적용형식별 개요도를 나타내었다. 본 보강재의 특징은 보강 시 역사다리꼴 형상단면을 가짐으로써 휨 거동 시 모재와 매트릭스간의 소정의 썩기작용을 통한 부착성능 향상을 도모하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 재료 물성치를 나타낸 표이다. 콘크리트는 40MPa의 설계강도를 갖는 레미콘 제품을 사용하였으며, 기건상태에서 28일 양생 후 실험을 수행하였다.



(a) CFRP Plate



(b) Type A

(c) Type B

Fig. 1 The CFRP plate and strengthening type

Table 1 Material properties

Section	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)
Concrete	-	40	$2.3 \times 10^4$
Steel	400	-	$2.0 \times 10^5$
The CFRP Plate	2,370	-	$2.1 \times 10^5$

## 2.2 실험변수 및 실험방법

본 NSM 보강성능을 분석하고자 구성한 실험변수는 Table 2에 나타나 있다. 실험변수는 총 6개 NSM 보강실험체에 대해 2가지의 보강재형식(Type A, Type B)을 적용하였으며, Type A 및 Type B의 탄소막대 보강재에 대해 각각 보강개수를 변수로 하여 1A, 2A, 3A 및 1B, 2B, 3B로 구분하여 보강비를 변수로 실험체를 제작하였다. 보강길이는 모든 실험체에 대해 전경간보강(2.5m)을 적용하였다.

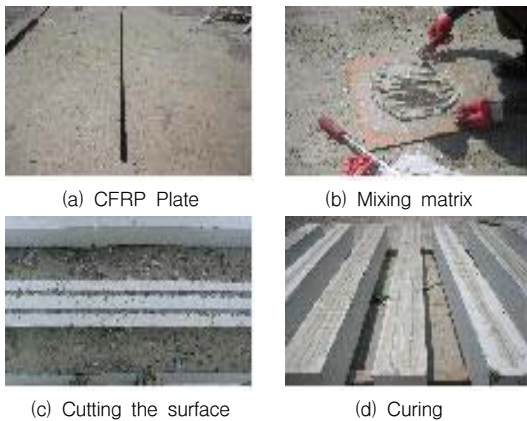


Fig. 2 Fabrication procedure of the strengthening specimen

전체보강비의 경우, 탄소판의 보강비를 탄성계수비를 이용하여 철근으로 환산한 보강비를 적용하였으며 이를 철근보강비와의 합으로 산정하였다.

Fig. 2는 NSM 보강제작과정을 나타낸다. 사진에서와 같이 홈 cutting 및 Chipping, 프라이머 도포, 보강재 삽입, 충전재 충진을 통하여 제작이 완료되며 보강 후 7일의 보강양생을 실시하였다. 또한 채움재의 재료는 시멘트계 모르타르 에폭시(C.E-33)를 사용하였으며 본 제품의 경우, 고점성으로 인해 대상구조물의 하부에서 보강 시 블리딩 현상이 없는 고강도의 충전성이 확보되는 제품이다. Fig. 3은 Control 및 보강실험체의 개요를 나타내고 있다. 실험체는 총길이 2.0m, 순경간 2.3m의 단순보 형식이며, 하중재하는 250kN 하중가력기를 사용하여 4점 휨 재하를 실시하였으며 이 때 1mm/min의 변위제어를 적용하였다. 무보강 시험체는 철근보강 시 저보강 거동을 하도록 설계하였으며, 전단철근의 경우, 전 지간에 걸쳐 100mm의 간격으로 배근하였다. 구조거동 예측의 경우, 하중에 따른 처짐량을 계측하기 위해 실험체 중앙 하부에 100mm 변위계(LVDT)를 설치하여 측정하였으며 가력기의 위치와 가력방향, 지지점과 가력점의 위치와 방향은 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

Table 2 Test variables

Specimens	Strengthening	No. of the CFRP Plate	Strengthening ratio	Strengthening length
1A2.5	Type A	1EA	0.0064	2.5 m
2A2.5		2EA	0.0075	
3A2.5		3EA	0.0087	
1B2.5	Type B	1EA	0.0057	
2B2.5		2EA	0.0062	
3B2.5		3EA	0.0066	

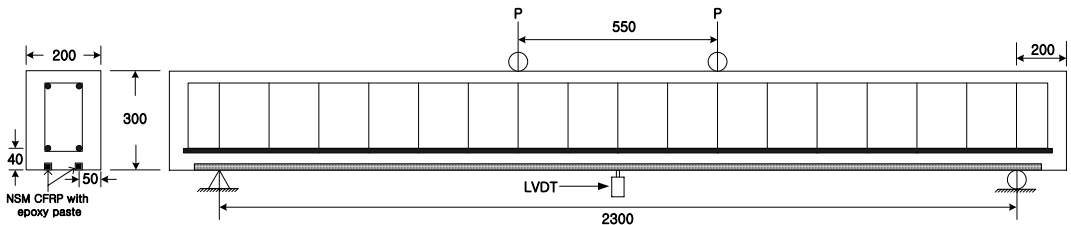


Fig. 3 Test setup

### 3. 실험결과 분석

#### 3.1 균열 및 파괴거동

Fig. 4는 Control 실험체의 파괴 시 균열양상을 나타낸 그림이다. 초기균열은 약 24.7kN에서 발생하였으며 전반적인 균열양상은 실험체 중앙부에 집중된 전형적인 휨 균열 양상을 나타내었다. 파괴 시 인장철근의 항복 후 압축부 콘크리트의 압괴가 다소 발생하였으나 최종파괴는 휨 파괴로 나타났다.

Fig 5는 1A2.5 실험체의 파괴형상을 나타낸 그림이다. 본 실험체는 Type A형 보강재 1가닥으로 NSM 보강된 실험체로서 파괴에 임박함에 따라 보강재 계면에서의 균열이 진전되는 양상을 나타내었다. 최종파괴 시 보강된 보강면이 기 타설된 콘크리트 부

분을 물고 떨어지는 파괴양상을 나타내었으며 최종파괴는 콘크리트 압괴 후 휨 파괴되었다. 2A2.5 실험체의 경우, 1A2.5 실험체와 유사한 파괴양상을 나타내었으나 1A2.5 실험체에 비해 최종파괴 시 보강면에서 콘크리트를 물고 떨어지는 파괴가 빈번하게 발생된 것으로 나타났다. 따라서 극한하중에 도달할 때 보강면에서의 박리파괴가 지배적으로 발생하였으나 보강매트릭스 및 보강재의 손상은 없었으며 최종파괴는 휨·압축파괴 되었다.



Fig. 4 Control specimen



Fig. 6 2A2.5 specimen

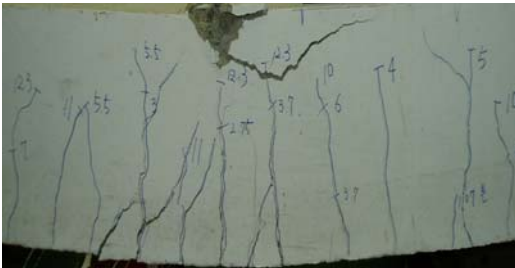


Fig. 5 1A2.5 specimen



Fig. 7 3A2.5 specimen

3A2.5 실험체의 경우, 1A2.5 및 2A2.5 실험체와는 달리 극한하중 도달 시 급격한 하중저하를 보이며 단부박리파괴(rip-off failure)로 최종파괴 되었으며 전반적으로 휨 균열양상을 나타내었다.

Fig. 6은 1B2.5의 파괴형상을 나타낸 그림이다. 1B2.5 실험체의 경우 1A2.5 실험체와는 달리 보강재의 인장파괴에 의해 최종적으로 휨 파괴되었으며 보강 매트릭스가 콘크리트를 물고 떨어지는 계면박리와 같은 파괴는 발생하지 않았다. 그러나 파괴면의 급격한 형성으로 인해 급격한 하중저하를 나타내었다.

2B2.5 실험체의 경우, 극한하중에 도달 시 보강재 면에서의 균열이 진전되는 양상을 보였으나 계면탈락과 같은 파괴는 발생하지 않았다. 파괴는 콘크리트 압괴 후 휨 파괴되는 양상을 나타내었으며 균열의 경우, 2A2.5 실험체의 비해 보강에 따른 균열진전의 효과적

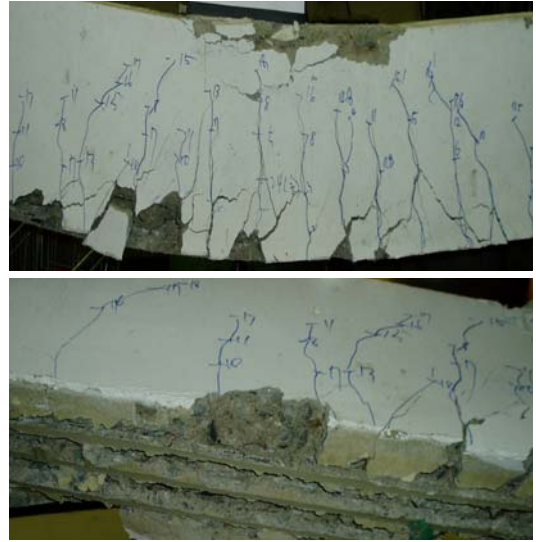


Fig. 10 3B2.5 specimen

인 응력분배가 이루어진 것으로 판단된다. 3B2.5 실험체의 경우, 효율적인 균열응력 분배작용을 바탕으로 2B2.5 실험체와 유사한 경향을 나타내었으나 극한하중 도달 시 보강면 주위의 콘크리트가 떨어져 나가는 박리파괴를 나타내었으며 이 때 보강재 탈락과 같은 파괴는 발생하지 않았다. 전반적인 거동은 극한처짐에 도달할 때 까지 다소 연성적인 거동을 보이는 것으로 나타났으며 콘크리트 압괴 후 최종 휨파괴되는 양상을 나타내었다.



Fig. 8 1B2.5 specimen

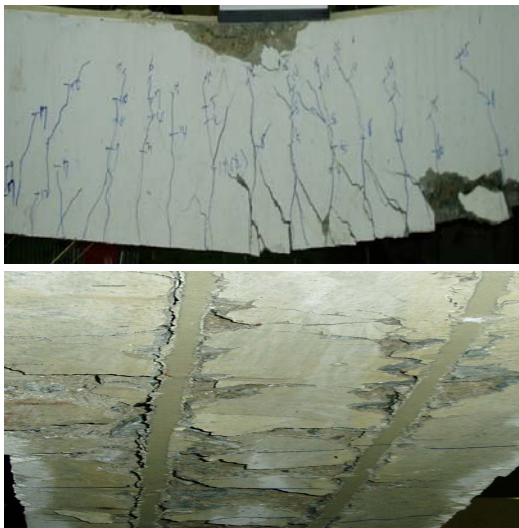


Fig. 9 2B2.5 specimen

### 3.2 구조거동 평가

Fig. 11은 Control 실험체의 하중-변위곡선을 나타내고 있는 그림이다. Table 3에서 보는 바와 같이 초기균열 하중은 24.7kN으로 나타났으며 99kN에서 철근의 항복변형률을 보이면서 소성거동을 나타낸 후, 105.5kN에서 최종 휨 파괴되었다. 지점단부에서의 국부파괴는 발생하지 않았으며 최종파괴 시 극한변위는 21.6mm를 나타내었다.

NSM 보강실험체의 휨 실험결과는 전체적으로 Control 실험체보다 다소 큰 극한강도의 향상효과를 나타내었다. 특히 보강재 개수의 증가로 인한 극한 강도의 향상을 명확히 확인할 수 있었으나 Fig. 12에서

보는바와 같이 3A2.5의 실험체의 경우, 다른 실험체들과는 달리 극한하중 도달 시 급격한 보강계면에서의 단부박리파괴가 발생하였으며 이는 보강재간의 유효간격의 미확보로 인하여 보강재의 충분한 성능을 발휘하기 전에 조기파괴가 발생된 것으로 판단된다.

또한 대부분의 NSM 보강실험체에서 급격한 하중저하 현상은 보이지 않았으며, 이는 보강길이의 충분한 확보로 인해 보강재의 구조성능이 효율적으로 발휘된 것으로 판단된다. Table 4는 본 구조실험 결과를 요약한 표이다. Type A와 Type B 보강재적용 시 실험체는 보강비의 증가에 따른 극한하중 또한 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 Type B 보강재적용 실험체의 경우, Type A 보강재에 비해 거의 절반에 가까운 보강비를 보유하고 있으나 Type A 보강재 형식에 비해 약 14~24%의 극한하중 차이만을 나타내고

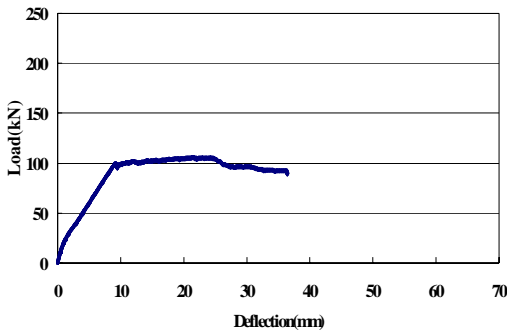


Fig. 11 Control Specimen

있으며, 극한변위 측면에서는 오히려 Type A 보강실험체에 비해 다소 우수한 구조거동을 발휘하는 것을 확인할 수 있다.

이는 보강비 변화에 따른 NSM 보강형식의 보강효율이 보강성능 향상측면에서 Type B 보강형식이 Type

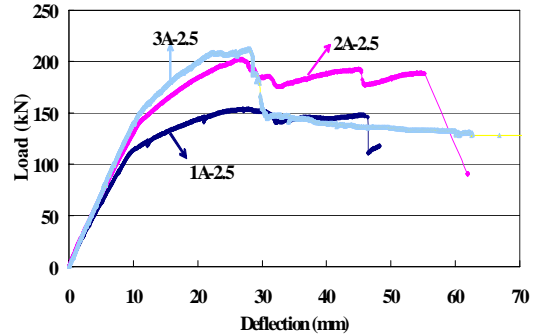


Fig. 12 A Type Specimen

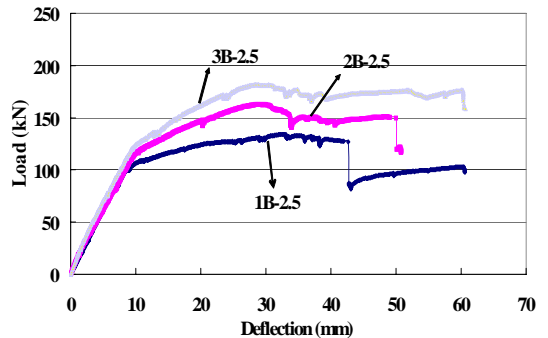


Fig. 13 B Type Specimen

Table 3 The summary of the test result

Specimens	Strengthening spacing (mm)	Strengthening ratio ( $\rho_f$ )	Yield load ( $P_y$ , kN)	Deflection at yield ( $\Delta_y$ , mm)	Ultimate load ( $P_u$ , kN)	Deflection at ultimate ( $\Delta_u$ , mm)	Failure Mode
control	-	-	99.0	9.3	105.5	21.6	Flexure
1A2.5	100	0.0014	112.4	9.7	153.0	27.6	Interfacial debonding
2A2.5	60	0.0028	143.0	11.3	202.0	26.4	Interfacial debonding
3A2.5	20	0.0042	156.3	11.8	212.2	27.8	Rip-off at the end span
1B2.5	100	0.0006	100.2	9.1	134.2	32.6	Interfacial debonding
2B2.5	80	0.0012	116.0	9.9	163.0	26.7	Interfacial debonding
3B2.5	45	0.0018	120.1	9.6	181.6	28.3	Concrete rip-off

A 보강형식에 비해 경제적이며 우수한 성능을 발휘할 수 있는 것으로 분석되었다.

또한 모든 보강실험체의 경우, Control 실험체에 비해 약 28~100 %의 성능향상 효과를 보이는 것으로 나타났으며 극한처짐거동 또한 우수한 것으로 평가되었다.

#### 4. 해석적 평가

##### 4.1 모멘트 성능평가

NSM 보강공법의 해석적 성능평가를 위해 극한평형 이론을 도입하여 극한모멘트를 산정하여 실험값과 이론값을 비교·분석하였다. Fig. 14는 NSM 적용보강 단면에 대한 극한평형이론을 나타내고 있으며 식(1)은 해석을 위한 각각의 전개이론을 나타낸다. 철근보강근과 NSM 보강근에 대한 휨이론을 전개한 후 중첩하는 방식을 적용하였다. Moon(2007)은 FRP 보강재가 삽입된 단면증설된 콘크리트 보에 대한 휨모멘트 산정식 제안하였으며, 식(1)에 제시되어 있다. 따라서 본 연구에서는 식(1)을 사용하여 휨모멘트 강도를 이론적으로 산정한 후, Table 4에서 실험값과 비교분석하였다.

$$M_u = A_s f_y \left( d - \frac{A_s \cdot f_y + A_{FRP} \cdot \phi_{FRP} \cdot f_{FRP}}{1.7 f_{ck} b} \right) + A_{FRP} \cdot \phi_{FRP} \cdot f_{FRP} \left( h - \frac{A_s \cdot f_y + A_{FRP} \cdot \phi_{FRP} \cdot f_{FRP}}{1.7 f_{ck} b} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\phi = 0.8$

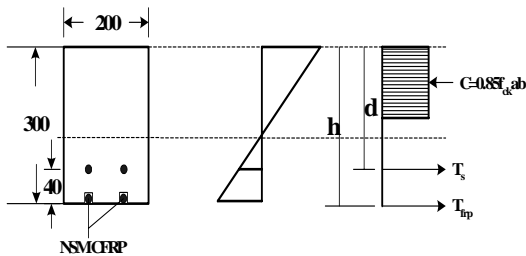


Fig. 14 Ultimate equilibrium theory

Table 4 The summary of result of the flexural moment for each specimen

Specimen	Analytical Model (kN · m)	Experiment (kN · m)
1A2.5	57.4	67.0
2A2.5	88.7	88.4
3A2.5	117.9	92.8
1B2.5	42.4	58.7
2B2.5	60.4	71.3
3B2.5	77.7	79.5

다음 Table 4은 본 극한평형이론을 적용하여 각 실험체에 대한 휨모멘트를 평가한 표이다. 전반적으로 모멘트 평가 이론값은 전경간 보강에 대한 실험값에 대한 모멘트값과 유사한 결과를 나타내었다. 이 중 3A2.5 실험체의 경우, 앞에서 언급한 유효간격의 미확보로 인한 콘크리트와 보강계면을 둘러싸고 있는 보강부분의 조기탈락현상으로 인해 보강재의 충분한 성능을 발휘하지 못한 것으로 파악된다. Type B 보강재의 경우도 마찬가지로 실험값과 이론값이 유사한 경향을 나타내었다. 극한평형이론에 대한 모멘트 평가결과, 전반적으로는 유사한 결과값을 보였으나 이는 전경간 보강에 따른 보강효과로 판단되며 최적의 NSM 보강 길이에 대한 추가적인 실험적 연구를 통해 보강간격의 산정, 보강계면의 조기탈락에 따른 부착메커니즘 규명 등에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

##### 4.2 에너지 개념에 의한 구조거동 분석

NSM 보강구조물의 효율적인 구조거동 분석을 위하여 각 보강실험체에 대해 에너지 개념에 의한 연성지수 및 균열저항계수를 분석하였다.

에너지 개념을 통하여 구조물의 거동을 분석하면 Fig. 15와 같다. 이때  $E_{total}$ 은 총 흡수에너지로서 부재의 하중-변위 곡선 또는 단면의 모멘트-곡률 곡선에서 극한상태까지의 총 면적으로 계산되며,  $E_{elastic}$ 은 탄성에너지로 총 에너지 중 소모되지 않고 저장되는 변형에너지를 의미한다. 즉, Fig. 15의 (a)와 같은 하중-변위관계를 갖는 구조물에서 총 흡수에너지는 (b)와 같이 나타난다. 이때, 탄성에너지는 (c)와 같이  $\Delta$

OAA'의 면적으로 계산된다. 따라서, 균열저항 에너지는 (d)와 같다.<sup>(1)</sup>

$$E_{total} = E_{elastic} + E_{crack} \quad (2)$$

$$\text{where, } E_{total} = \int_0^{\Delta} P d\Delta$$

= Total energy of external work

$$E_{elastic} = \frac{1}{2} P\Delta$$

= Energy of elastic transformation

$E_{crack}$  = Emitting energy at crack surface

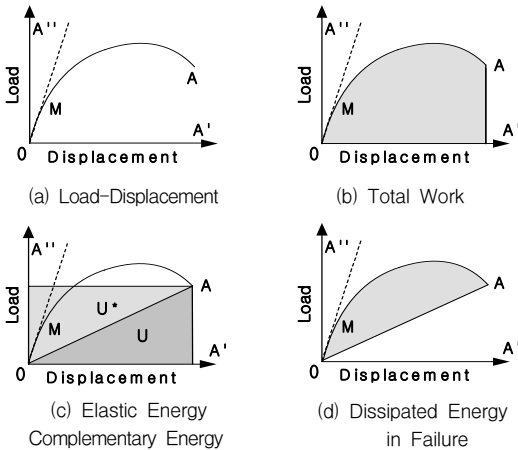


Fig. 15 Crack resistance energy based on the energy theory

### ① 연성지수 평가식

식(3)은 ACI에서 제안하고 있는 연성지수 평가식을 나타내고 있다.

$$\mu = \frac{1}{2} \left( \frac{E_{total}}{E_{elastic}} + 1 \right) \quad (3)$$

### ② 균열저항지수 평가제안식

식(4)는 균열거동에 대한 균열 저항지수 제안식을 나타내고 있다.

$$\Pi_E = \frac{E_{crack}}{E_{total}} = \frac{E_{crack}}{E_{elastic} + E_{crack}} \quad (4)$$

where,  $\Pi_E$  = Coefficient of crack resistance

Table 5 Coefficient of ductility and crack resistance

Specimen	Coefficient of ductility ( $\mu$ )	Coefficient of crack resistance ( $\Pi_E$ )
CONTROL	1.28	0.36
1A2.5	1.22	0.31
2A2.5	1.16	0.25
3A2.5	1.19	0.28
1B2.5	1.27	0.35
2B2.5	1.20	0.29
3B2.5	1.19	0.28

Table 5는 Type A 및 B 보강재로 보강된 NSM 보강실험체의 연성지수 및 균열저항지수를 분석한 표이다. 표에서 나타나듯이 모든 실험체가 Control 실험체에 비해 연성 및 균열저항지수가 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 특히 연성지수의 경우, 보강비가 증가할수록 과보강에 의해 연성지수가 저하되는 결과를 보였으며, 균열저항지수의 경우도 하중-변위곡선에서 균열방출에너지의 저하로 인하여 모든 보강실험체가 Control 실험체에 비해 다소 낮은 균열저항지수값을 나타내었다. 따라서 연성과 균열저항지수를 동시에 확보할 수 있는 효율적인 NSM 보강기법의 적용이 필요하며 이를 위해 적정 보강길이, 보강비, 보강간격, 보강시공법 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

앞에서 언급된 실험값들과 이론식에 의한 저항모멘트의 비교를 통하여 역사다리꼴 탄소막대 보강재를 이용한 표면매립공법(NSM)은 뚜렷한 성능향상을 보인 것으로 판단되어지고 또한 차후의 연구진행을 다음과 같이 나열하였다.

- 1) 역사다리꼴 탄소막대 보강재를 사용하여 표면매립공법(NSM) 실험결과, 약 28%~100%의 극한강도의 향상을 보였으며 충분한 성능향상을 보유했던 것으로 분석되었다. 보강형식별로 분석해보면, Type B 보강형식이 Type A 보강형식보다 절반의 보강비 수준에도 불구하고 경제적이며 효율적인 보강성능 및 구조거동을 보이는 것으로 분석되었다.



- 2) 연성지수 및 균열저항지수에 대한 구조거동 분석결과, 모든 실험체가 Control 실험체에 비해 낮은 성능지수를 보이는 것으로 나타났다. 이는 탄소섬유막대 보강형식이 극한하중 측면에서는 우수하나 구조거동 시 보유한 에너지측면에서는 개선시킬 점으로 분석되었다. 따라서 추가적인 NSM 보강변수 연구를 통해 연성 및 균열지수를 합리적으로 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구는 NSM 보강 시 전경간 보강에 대한 연구로서 충분한 보강성능이 확보됨을 검증하였다. 하지만 본 NSM 보강공법의 효율적이며 최적의 보강성능을 확보하기 위해 보강간격, 보강재, 보강길이 등의 추가적인 실험적·해석적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 건설교통부 보수 보강된 콘크리트 교량의 성능평가/개선 기술개발 및 원격관리시스템 구축사업(C105B1030001-05B0303-000)의 지원으로 수행되었으며, 본 연구수행에 지원을 해주신 (주)한보엔지니어링의 연구지원에 감사드리는 바입니다.

#### 참고문헌

1. 정상모, "FRP 긴장재를 이용한 콘크리트 보의 연성지

수 평가," 대한토목학회 학술발표회논문집(I), 1998, pp. 237-240.

2. Hassan, T. and Rizakalla, S., "Investigation of Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber reinforced Polymer Strips", ASCE Journal of Composites for Construction, Vol. 7, No. 3, 2003, pp. 248-257.
3. Lorenzis, L. D., Rizzo, A. and Tegola, A. L., "A modified pull-out test of bond of near-surface mounted FRP rods in concrete", Composites part B : engineering, Vol. 33, 2002, pp. 589-603.
4. Lorenzis, L. D. and Teng J. G., "Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures, Composites Part B: Engineering, Vol. 38, No. 2, 2007, pp. 119-143.
5. Moon, D. Y., Sim, J. S. and Oh, H. S., "Detailing considerations on RC beams strengthened with CFRP bars embedded in mortar overlay", Construction and Building Materials, Vol. 21, 2007, pp. 1636-1646.
6. Raafat E. H. and Sami, H. R., "Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Flexural Strengthening of Concrete Structures", ACI Structural Journal, Vol. 101, No. 5, 2004, pp. 717-726.

(접수일자 : 2007년 5월 3일)