

전단보강철근이 없는 RC보에 대한 에폭시 모르타르 패널의 전단보강에 관한 연구

Regarding a Shear Strengthening of an Epoxy Mortar Panel for
RC Beam Without Shear Strengthening Reinforcing Bar.

이 상 호*

Lee, Sang-Ho

조 민 수**

Cho, Min-Su

허 재 상***

Heo, Jae-Sang

Abstract

In this study, the effect of epoxy mortar panel as the shear strengthening material of reinforced concrete beam is investigated by loading test. The main variables are the kind of strengthening material, the amount of reinforcement and the spacing of CFS(Carbon Fiber Sheet) stirrups. The design method to use epoxy mortar panel as shear strengthening of reinforced concrete beam took the shear capacity as the form of the sum of V_c , V_s , V_{sheet} and V_p . By making a comparison between the values calculated by the proposed shear strength prediction formula and those from the loading test results, the mean value was 1.10 and the standard deviation was 8.16%.

요 지

본 연구에서는 에폭시 모르타르 패널을 철근콘크리트 보부재의 전단 보강재로 사용하기 위하여 보강재의 종류와 보강량, 탄소섬유시트의 간격을 변수로 가력실험을 수행하고 부재의 구조적 성능을 파악하였다. 이를 바탕으로 에폭시 모르타르 패널을 철근콘크리트 보부재의 전단 보강재로 사용하기 위한 설계 방법은 V_c , V_s , V_{sheet} , V_p 의 합으로 전단강도를 가정하였으며, 연구결과에 대한 실험값/제안값의 평균값은 1.10, 표준편차는 8.16%로 나타났다.

Keywords : CFS, Epoxy Mortar Panel, Reinforced Concrete Beam, Shear Strengthening

핵심 용어 : 탄소섬유시트, 에폭시 모르타르 패널, 철근콘크리트 보부재, 전단보강

* 정회원, 부산대학교 공과대학 건축학부 교수, 공학박사

** 학생회원, 부산대학교 대학원 건축공학과, 공학석사

*** 학생회원, 부산대학교 대학원 건축공학과 석사과정

E-mail : sangho@pusan.ac.kr 051-510-2359

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

1. 서 론

최근 철근콘크리트 구조물은 노후화, 시공 중의 설계변경, 환경변화, 설계하중의 증대 및 시간의 경과에 따른 내력이나 내구성 저하로 인해 사용성에 문제가 제기되고 있다. 그러므로 구조적 손상의 발생 또는 손상이 예상되는 기존 구조물에 대해 내력 및 내구성을 향상시켜 잔존수명의 연장과 구조물의 기능을 발휘할 수 있는 효율적인 보수·보강 방법이 요구되고 있다.

최근 국내에서는 탄소, 아라미드, 유리 등의 신소재를 섬유형태로 가공한 경량이면서 부식저항에 우수한 섬유시트 부착공법의 적용 사례가 증가하고 있다. 이 중에서 탄소섬유시트(CFS, Carbon Fiber Sheet) 부착공법은 강재와 유사한 재료적 성질을 가지고 있으면서도 전기화학적 부식에 대한 저항성이 뛰어난 특성이 있어 경량성, 시공성 등이 우수한 보강공법으로 주목을 받고 있다. 하지만 기존의 연구결과⁽¹⁾를 살펴보면, 탄소섬유시트 부착공법은 설계 및 시공에 있어 피복 콘크리트를 물고 떨어지는 계면박리파괴의 발생 가능성으로 인하여 국내·외의 탄소섬유시트의 보강 기준과 설계지침 등에서는 보강 형태에 따른 부착성능 등을 영향 인자로 반영하는 설계 방법을 적용하고 있다.

이러한 구조적 문제점을 해결하기 위하여, 선행 연구^{(2)~(4)}에서는 탄소섬유시트의 계면박리파괴 방지 및 에폭시의 보수 효과를 증대시키기 위하여 탄소섬유시트와 에폭시, 규사를 사용하여 보강제로써의 시공 및 구조적 성능이 우수한 탄소섬유시트가 매입된 에폭시 모르타르(E.M.S, Epoxy Mortar including fiber Sheet) 패넬을 개발하고, 이를 철근콘크리트 보부재에 휨 및 전단으로 보강한 다음, 가력실험을 통하여 휨 및 전단 보강성능을 파악하였으며, 휨 보강의 설계 방법에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 에폭시 모르타르 패넬을 철근콘크리트 보부재의 전단 보강제로 사용하기 위하여, 보강재의 종류와 보강량, 탄소섬유시트의 간격을 실험변수로서 가력실험을 수행하고, 그 결과를 비교·분석하여 철근콘크리트 보부재에 대한 에폭시 모르타르 패넬의 전단보강 설계방법을 제안하는 것을 본 연구의 주된 목적으로 한다.

2. 시험체 계획 및 사용재료

2.1 시험체의 계획

본 연구에 사용된 시험체의 배근 상세를 Fig. 1에 나타내었다. 시험체의 크기는 실물 크기의 1/2정도로 축소 제작된 것으로, 총길이 2200mm, 순지간 1840mm, 단면크기 250×400mm²인 장방형 단면의 복근 보로 시험체를 계획하였다. 인장철근은 계획한 단면에 휨파괴를 방지하고 전단파괴를 유도하기 위해 최대철근비의 약 125%에 해당하는 4-D25로 과다 배근하였고, 압축철근은 시공상 편의를 위해 2-D10를 시험체 단면 상부에 배근하였다.

시험체의 시험 구간에는 패넬로 전단보강된 부재의 전단내력을 파악하기 위해서 부재의 시험구간에는 전단보강근을 미배근하여 이 구간에서의 전단파괴를 유도하였고, 비시험구간에서는 전단보강근을 다소 과다하게 배근하여 전단파괴가 발생되지 않도록 전단보강철근을 D10@80으로 배근하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 콘크리트

본 시험체의 제작에 사용된 콘크리트는 설계강도가 21MPa인 저강도의 레미콘 제품을 사용하였다. 콘크리트의 특성을 파악하기 위하여 한국산업규격이 정한 KS F 2405⁽⁵⁾에 따라 높이 200mm, 지름 100mm의 실린더형 몰드를 사용하여 총 12개를 제작하였으며, 전단 보강된 보부재의 가력실험 시작 전과 끝난 후의 각 시점에서 2000kN 용량의 UTM을 사용하여 압축강도 공시체 3개, 활열 인장강도 공시체 3개를 시험 측정하고, 그 결과의 평균값을 Table 1에 나타내었다.

2.2.2 철근

본 시험체의 제작에 사용된 주근은 4-D25, 압축철근은 2-D10, 전단 보강근은 D10@80으로 배근하였으며, 사용된 철근의 특성을 파악하기 위해 500kN 용량의 UTM을 사용하여 한국산업규격이 정한 KS B

0802⁽⁶⁾에 따라 각 철근의 인장시편 3개를 실험하고 그 결과의 평균값을 Table 2에 나타내었다.

2.2.3 탄소섬유시트

본 연구에 사용된 탄소섬유시트는 국내 H사에서 제조한 일방향 고강도 탄소섬유시트로서, 재료의 물리적 특성은 Table 3에 나타내었다.

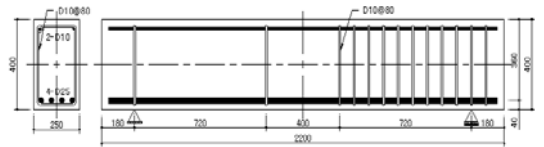
2.2.4 에폭시 모르타르

본 연구의 에폭시 모르타르는 선행 연구⁽²⁾의 결과를 참고하여 에폭시의 주재와 경화제의 중량비를 4:1로, 혼합골재는 규사 4호와 7호의 중량비를 3:1로, 에폭시와 혼합골재의 중량비를 1:4로 배합하여 제작하였다. 재료시험은 한국산업규격이 정한 KS F 2405⁽⁵⁾에 따라 높이 200mm, 지름 100mm의 실린더형 몰드를 사용하여 총 6개를 제작하고, 2000kN 용량의 UTM을 사용하여 압축강도 공시체 3개, 활열 인장강도 공시체 3개를 실험하고, 그 결과의 평균값을 Table 4에 나타내었다.

2.2.5 에폭시 모르타르 패널

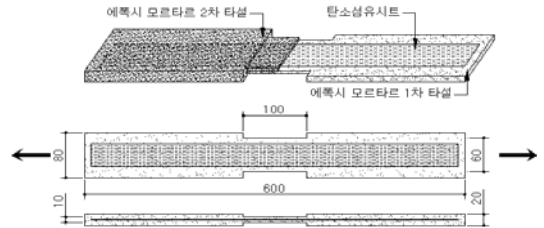
본 연구에서는 에폭시 모르타르 패널 내부에 탄소섬유시트가 매입된 인장시편을 Fig. 2와 같은 형상으로 제작하였고, 에폭시 모르타르의 인장강도(Table 4를 참고하여 10.6MPa로 가정)의 240%가 되도록 탄소섬유시트의 폭을 40mm로 매입하여 인장시편을 5개 제작 후 인장 시험한 결과의 평균값을 Table 5에 나타내었다.

에폭시 모르타르 패널의 강도특성 산정시, 단면적을 일관적으로 적용하는 것이 원칙이나 본 연구에서의 균열강도는 인장 균열하중을 실험구간의 에폭시 모르타르 패널 단면적(10×60mm²)으로 나누어 계산한 값이며, 탄소섬유시트의 파단강도는 에폭시 모르타르 패널에 인장 균열이 발생한 후의 최대강도를 탄소섬유시트의 설계용 두께(0.11mm)로 나누어 계산한 값이다. 에폭시 모르타르 패널은 에폭시 모르타르가 균열된 후에도 탄소섬유시트가 인발되지 않고 탄소섬유시트와 에폭시 모르타르간의 부착성능을 유지한 상태에서 최종적으로 탄소섬유시트가 파손되었다.



(단위 : mm)

Fig. 1 시험체의 배근상세



(단위 : mm)

Fig. 2 에폭시 모르타르 패널의 인장시편 형상

Table 1 콘크리트의 특성

설계강도 (MPa)	압축강도 (MPa)	활열인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
21.0	19.5	2.0	2.33×10 ⁴

Table 2 철근의 특성

종류	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	항복시 변형률 (%)
D10	425	575	1.82×10 ⁵	0.26
D25	475	593	2.05×10 ⁵	0.23

Table 3 탄소섬유시트의 특성

종류	섬유 중량 (g/m ²)	섬유 밀도 (g/cm ³)	설계 두께 (mm)	설계 강도 (MPa)	탄성 계수 (MPa)	파단시 변형률 (%)
고강도	200	1.82	0.11	3550	1.7×10 ⁵	2.1

Table 4 에폭시 모르타르의 특성

압축강도 (MPa)	활열인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
76.5	10.6	3.51×10 ⁴

Table 5 에폭시 모르타르 패널의 특성

시험체 폭 (mm)	시트 폭 (mm)	패널의 균열강도 (MPa)	시트의 파단강도 (MPa)
60	40	9.2	3000

2.3 시험체의 보강

시험체의 시험 구간에는, 첫째 E.M.S 패널에 탄소 섬유시트를 제외한 에폭시 모르타르(E.M, Epoxy Mortar) 패널의 전단내력 성능을 평가하기 위해 보강 패널의 두께를 5mm, 10mm, 15mm로 보강하였으며, 둘째 탄소섬유시트를 매입한 에폭시 모르타르(E.M.S) 패널 두께 5mm, 10mm에 탄소섬유시트의 영향을 평가하기 위해 시트의 보강량과 섬유간격을 달리하여 매입하였다.

여기서, 보강량은 ACI 규준식⁽⁸⁾에 의해 계산된 무보강 시험체의 전단내력 25%, 50%에 해당하는 탄소 섬유시트량을 의미하며, 보강량의 산정에 필요한 탄소 섬유시트의 인장강도는 패널의 인장강도 실험결과를 이용하였다. 또한, 에폭시 모르타르 패널에 전단 균열이 발생한 이후에는 패널과 매입된 탄소섬유시트가 전단력에 저항하는 것으로 가정하고 보강 시험체에 대한 최대 전단강도를 계산하여 보강량을 산정하였다.

$$V_n = V_c + \frac{A_v f_y d}{s}$$

$$V_c = \left[0.16 \sqrt{f_{ck}} + 17.6 \rho_w \left(\frac{V \cdot d}{M} \right) \right] b_w \cdot d$$

여기서,

s : 전단보강근의 간격

A_v : 전단보강근의 간격(s)내에 전단보강근 단면적

f_y : 전단보강근의 항복강도

Table 6 시험체 일람표

시험체명	보강재	패널두께 (mm)	탄소섬유시트의 보강량(%)	섬유 간격	섬유폭 (mm)
N-0	-	-	-	-	-
NP-1	E.M Panel	5	-	-	-
NP-2		10			
NP-3		15			
NPS-1	E.M. S Panel	5	50	d/2	4×30.84
NPS-2				d/4	8×15.42
NPS-3		10		d/2	4×30.84
NPS-4				d/4	8×15.42
NPS-5				25	d/2

※ 시험체 표기법 :

NP-1

└ 패널두께, 보강량, 섬유간격

└ 전단 보강재의 종류 : NP(E.M 패널 보강)

NPS(E.M.S 패널 보강)

d : 보의 유효깊이

ρ_w : 주인장철근비

b_w : 보의 폭

Table 7 에폭시 모르타르 패널 보강의 형태

시험체명	보강재	보강량	탄소섬유시트 매입 형태 (단위 : mm)
NP-1	E.M Panel	5	
		10	
		15	
NPS-1	E.M. S Panel	5	
		5	
		5	
		10	
		10	

보강섬유시트의 간격은 선행 연구⁽⁴⁾에서 탄소섬유시트 간격을 좁게 하는 것이 전단보강 효과가 클 것으로 판단되어 탄소섬유시트 간격을 유효층(d)의 $d/2$, $d/4$ 로 매입하였으며, 보강량을 동일하게 하기 위해 탄소섬유시트 폭을 산정하여 에폭시 모르타르 패널 내부에 매입하였다. 각 변수에 따른 시험체 일람표를 Table 6에, 에폭시 모르타르 패널 보강의 종류별 형태를 Table 7에 나타내었다.

에폭시 모르타르 패널은 대칭성을 고려하여 시험체의 양측면에 에폭시를 주입하여 부착하였으며, 보강 후 보강재의 종류에 따른 대표적인 시험체의 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 참고로, 보강재와 콘크리트 모재와의 접착에 사용된 에폭시 수지는 국내 D사의 접착전용인 2액형 상온경화용 에폭시를 사용하였으며, 물성치는 Table 8에 나타내었다.

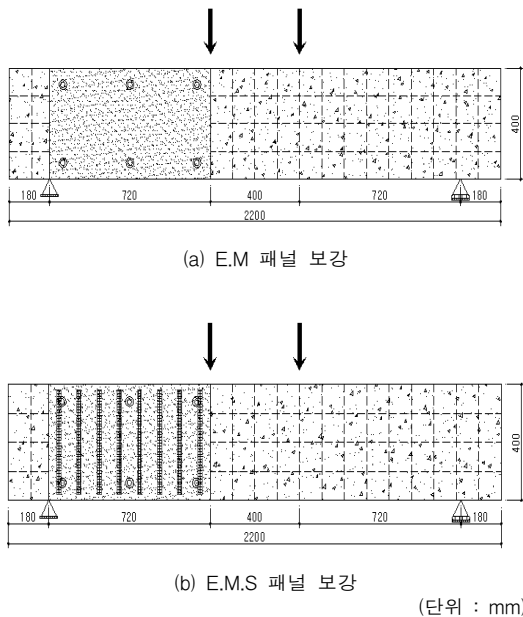


Fig. 3 보강재별 대표적인 전단 보강 형상

Table 8 접착용 에폭시의 특성

압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	휨강도 (MPa)	연신율 (%)	인장탄성계수 (MPa)	포화송비
90.5	60.6	97.0	2.38	3.86×10^2	0.37

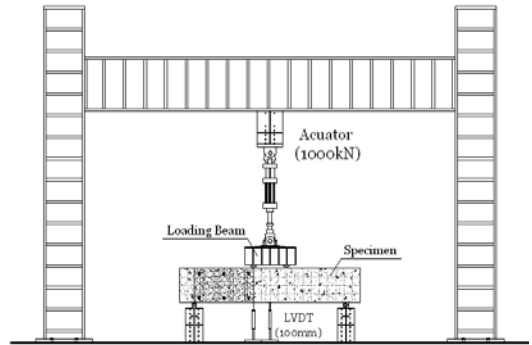


Fig. 4 가력장치 및 시험체 설치상황

3. 시험체에 대한 가력실험

3.1 가력 및 측정방법

본 연구에서 사용된 가력장치 및 변위계(LVDT)의 설치 상황은 Fig. 4와 같다. 시험체의 가력은 지점과 가력점과의 거리가 720mm, 지점간 거리가 1840mm로 단순 지지된 시험체에 대하여 1000kN 용량의 가력기(Actuator)에 가력점 사이의 거리가 400mm인 가력보(Load beam)를 설치하여 2점 가력하였다. 초기에는 하중을 제어하는 방식으로 10kN/min의 속도로 시험체의 예상 최대하중의 70%까지 하중을 재하하였고, 이 후에는 1mm/min의 속도로 변위를 제어하는 방식으로 재하하였다.

보부재에 작용하는 하중은 가력기에 부착된 하중계(Load cell)에 의하여 측정하였으며, 시험체의 처짐은 부재의 중앙점과 가력점 위치에 100mm의 LVDT를 설치하여 측정하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 균열 및 파괴형태

각 시험체의 실험결과, 나타난 최종적인 시험체 옆면과 밑면의 균열형태를 Fig. 5에 나타내었다.

기준 시험체인 무보강 시험체(N-0)는 가력초기에 부재의 중앙하부에서 초기 휨균열이 발생하여 상부보다 소 진행되다가 시험구간에 전단 균열 후 취성적인 전단파괴가 발생하였다.

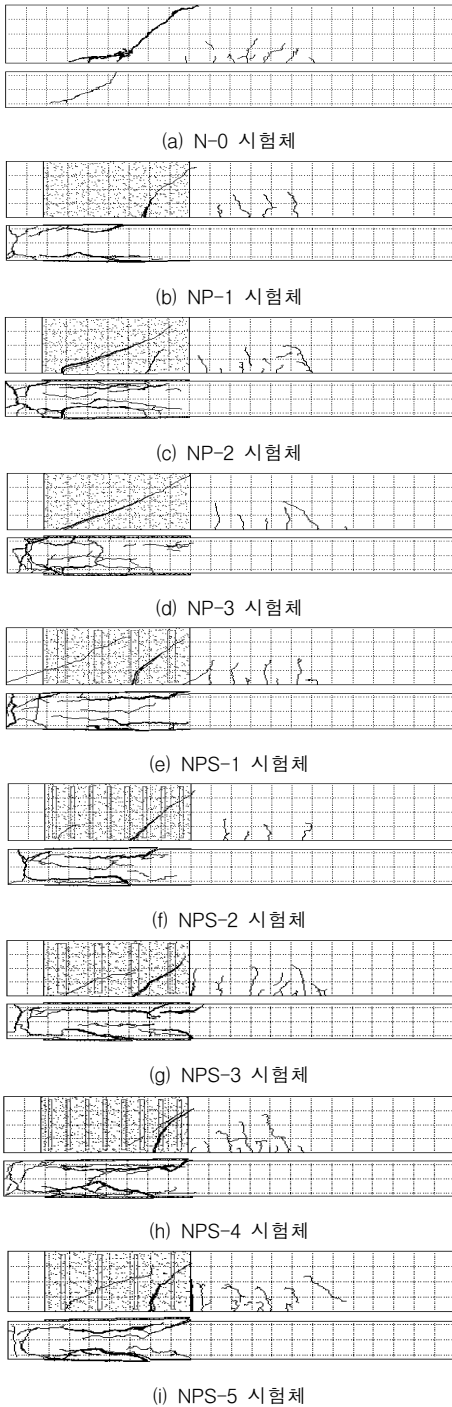


Fig. 5 시험체의 최종 파괴형태

E.M 패널로 전단 보강된 시험체(NP시리즈)는 E.M 패널이 부착된 시험구간에서 사인장(Diagonal tension) 균열이 발생하였고, 취성적인 전단파괴를 나타낸 후 하중이 감소하였다. 하지만 기준 시험체와는 달리, 하부 파괴형상은 양측면에 보강된 패널 주위로 피복 콘크리트를 몰고 떨어지는 쪼갬파괴(Splitting failure)가 발생하였다.

E.M.S 패널로 전단 보강된 시험체(NPS시리즈)의 파괴형태는 취성적인 전단파괴를 보인 E.M 패널로 전단 보강된 시험체와는 달리 에폭시 모르타르 패널의 사인장 균열 발생 후 패널에 매입된 탄소섬유시트의 파단이 발생하였다. E.M.S 패널로 전단 보강된 시험체의 파괴형상은 강도에 따라 파괴 정도는 달라지지만, E.M 패널로 전단 보강된 시험체와 마찬가지로 양측면에 보강된 패널 주위로 피복 콘크리트를 몰고 떨어지는 쪼갬파괴가 발생하였다.

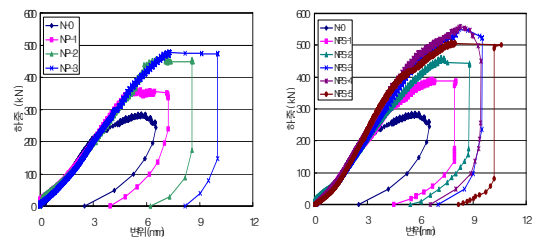
본 시험체에 대한 가력실험의 최종적인 파괴형상으로 볼 때, 시험체 콘크리트와 전단 보강용 에폭시 모르타르 패널간의 부착성능은 우수한 것으로 판단된다.

3.2.2 최대하중 및 보강효과

(1) 하중-변위 관계

각 시험체에 대한 보강재의 종류, 보강 형태에 따른 하중-변위 관계는 Fig. 6에 나타내었으며, 최대하중 및 최대하중시의 변위를 Table 9에 나타내었다.

전 시험체에 대한 하중-변위 관계곡선의 경향을 살펴보면 보강 패널의 두께가 증가할수록, 그리고 탄소섬유시트의 보강량이 증가할수록 최대 전단강도는 증가하였으며, 강도의 증가로 인한 최대하중시의 변위 또한 증가하였다.



(a) E.M 패널 보강 시험체 (b) E.M.S 패널 보강 시험체
Fig. 6 시험체의 하중-변위 관계

Table 9 최대하중 및 최대하중시의 변위

시험 체명	최대 하중 (kN)	변위 (mm)	내력 증가율 (%)	변위 증가율 (%)	시험구간의 파괴형태
N-0	286.74	5.71	-	-	·콘크리트 전단(사인장)파괴
NP-1	360.46	6.25	126	109	·EM패널 전단(사인장)파괴
NP-2	457.26	7.22	159	126	·EM패널 전단(사인장)파괴
NP-3	480.00	7.78	167	136	·EM패널 전단(사인장)파괴
NPS-1	391.34	6.78	136	119	·EMS 패널 전단(사인장)파괴
NPS-2	462.70	7.48	161	131	·EMS 패널 전단(사인장)파괴
NPS-3	549.78	8.20	192	144	·EMS 패널 전단(사인장)파괴
NPS-4	558.40	8.28	195	145	·EMS 패널 전단(사인장)파괴
NPS-5	510.32	7.75	178	136	·EMS 패널 전단(사인장)파괴

(2) 보강재 두께의 영향

에폭시 모르타르 패널 보강재의 두께에 따른 시험체의 최대내력 및 최대내력시 변위 증가율을 Fig. 7에 나타내었다. NP시리즈의 최대내력을 무보강 시험체(N-0)와 비교하면 NP-1, NP-2, NP-3의 내력 증가율은 각 126%, 159%, 167%로, 보강재의 두께에 따른 E.M 패널의 보강효과는 뚜렷하게 나타났다. NPS시리즈 중, 탄소섬유시트의 보강량이 50%로 같고 동일한 섬유간격으로 매입된 에폭시 모르타르 패널 두께의 최대내력을 무보강 시험체와 비교해 보면 NPS-1과 NPS-3의 내력 증가율은 136%와 192%, NPS-2와 NPS-4의 내력 증가율은 161%와 195%로 두께에 따른 E.MS 패널의 보강성능 증가가 나타났다. 최대내력시의 변위 증가율을 살펴보면, 동일한 두께의 E.M 패널 보다 E.MS 패널 보강이 변위 증가율이 크므로 E.MS 패널의 변형 능력이 보다 우수함을 알 수 있다.

(3) 탄소섬유시트 간격의 영향

선행 연구⁽⁴⁾에서 탄소섬유시트의 보강량이 동일한 경우 섬유간격을 좁게 하는 것이 보강효과가 우수한 것으로 판단되어, 이를 정량적으로 분석하기 위해 동일한 보강량에 시트의 간격을 변수한 최대내력 및 최대내력시의 변위 증가율을 Fig. 8에 나타내었다. 무보강 시험체에 대한 NPS-1과 NPS-2의 내력 증가율은 136%와 161%이고, 변위 증가율은 119%와 131%로 보강효과가 나타났지만, NPS-3와 NPS-4의 내력

증가율은 192%와 195%이고, 변위 증가율은 144%와 145%로 보강효과가 미비하였으므로 보강재의 간격에 대한 평가는 추후에 보다 상세한 검토가 필요하다.

(4) 탄소섬유시트 보강량의 영향

탄소섬유시트 보강량에 따른 시험체 NPS-5와 NPS-3의 최대내력 및 최대내력시의 변위 증가율을 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 보강량은 탄소섬유시트를 동일한 간격인 $d/2$ 로 매입하고 무보강 시험체 최대내력의 25%, 50%에 해당하는 보강량을 탄소섬유시트 폭으로 조절하여 매입하였다. NPS-5와 NPS-3의 내력 증가율은 178%와 192%이었고, 변위 증가율은 136%와 144%로, 보강량에 따른 뚜렷한 보강효과가 나타났다. 여기서, 탄소섬유시트의 보강 성능을 정량적으로 분석하기 위해 E.MS 패널 보강 시험체에서 동일한 두께를 가진 E.M 패널 보강 시험체를 제외한 실험값과 시트 보강량의 계산값을 비교하여 Table 10에 나타내었다. 참고로, 시트의 내력 계산값은 전단보강근의 내력 계산 방법과 동일하게 계산하였으며, 이 때의 값은 시험결과를 이용하였다. 실험값/계산값의 결과, 평균값 1.06, 표준편차 34.63%로 오차가 크지만, 에폭시 모르타르를 거꾸집에 타설하는 과정에서 밀실하게 다져넣지 못한 것으로 판단되는 NPS-1을 제외하면, 평균값이 1.23, 표준편차가 6.09%로 오차는 크지 않다.

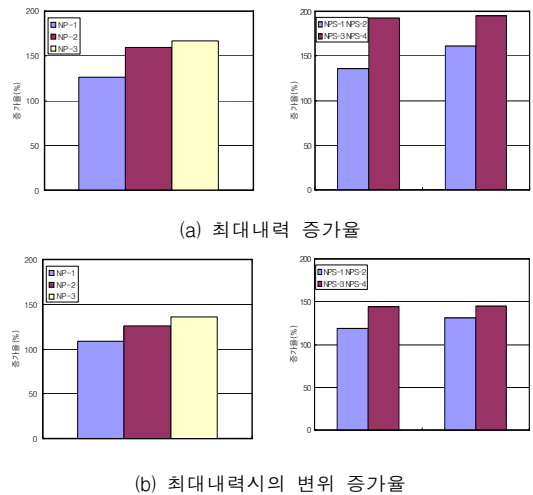
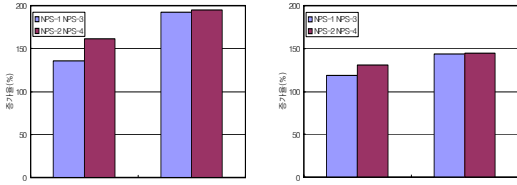
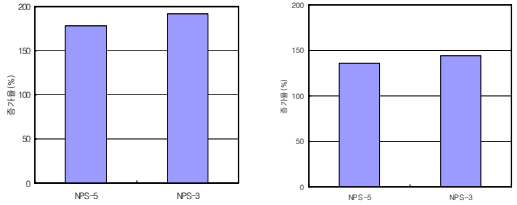


Fig. 7 보강재의 두께에 따른 최대내력 및 변위 증가율



(a) 최대내력 증가율 (b) 최대내력시의 변위 증가율
Fig. 8 탄소섬유시트 간격 따른 최대내력 및 변위 증가율



(a) 최대내력 증가율 (b) 최대내력시의 변위 증가율
Fig. 9 탄소섬유시트 보강량에 따른 최대내력 및 변위 증가율

Table 10 탄소섬유시트의 보강량에 따른 영향

시험 체명	최대 내력 (kN)	패널 두께 (mm)	시트 보강량 (%)	시트 내력 실험값 (kN)	시트 내력 계산값 (kN)	실험값 /계산값
NP-1	180.23	5	-	-	-	-
NP-2	228.63	10	-	-	-	-
NPS-1	195.67	5	50	15.44	40.71	0.38
NPS-2	231.35			51.12		1.26
NPS-3	274.89	10	50	46.26	40.71	1.14
NPS-4	279.20			50.57		1.24
NPS-5	255.16			25		26.53

4. 전단강도식의 제안

4.1 전단강도식의 개요

본 연구에서는 에폭시 모르타르 패널로 전단 보강된 철근콘크리트 보부재의 설계 방법에 대하여, 주요변수들을 고려한 전단강도식을 제안하고자 한다. 여기에 사용된 실험데이터는 Table 11과 같으며, 철근콘크리트 기준⁽⁷⁾의 방법을 참고하여 전단강도식(V_n)의 기본 구성 요소를 식(1)과 같이 가정하였다.

$$V_n = V_c + (V_s) + V_{sheet} + V_p \quad (1)$$

여기서, V_c : 콘크리트에 의한 전단강도(kN)
 V_s : 철근에 의한 전단강도(kN)
 V_{sheet} : 탄소섬유시트에 의한 전단강도(kN)
 V_p : 에폭시 모르타르 패널에 의한 전단강도(kN)

4.2 전단강도식의 유도

4.2.1 콘크리트의 분담분(V_c)

식(1)에서 V_c 에 대한 평가 방법은 연구자에 따라 여러 제안식이 존재하지만, 대표적으로 ACI 기준식⁽⁸⁾과 Zsutty의 제안 식(10)으로 평가해보고자 하며, 무보강 시험체인 N-0와 S-0의 최대 내력을 비교하여 Table 12에 나타내었다.

ACI 기준식에 따른 계산값을 실험값과 비교한 결과, 평균값은 1.59, 표준편차는 17.33%로 상당한 분산을 보이고 있는 반면, Zsutty의 제안식인 식(2)에 따른 계산값과 실험값을 비교한 결과, 평균값이 1.04, 표준편차가 5.05%로 적절하게 예측하고 있다. 이는 이용택 외⁽¹⁾에서 "전단내력 평가시 ACI식보다 Zsutty의 제안식을 이용하는 것이 안정적인 것으로 나타났다"는 결과와 동일한 경향을 나타내고 있으며, 본 연구에서도 아래와 같은 Zsutty의 제안식을 이용하고자 한다.

$$V_c = 2.13 \left(f_{ck} \cdot \rho_w \frac{d}{a} \right)^{1/3} b_w \cdot d \quad (a/d \geq 2.5) \quad (2)$$

$$V_c = 2.13 \left(f_{ck} \cdot \rho_w \frac{d}{a} \right)^{1/3} \left(\frac{2.5}{a/d} \right) b_w \cdot d \quad (1.5 < a/d < 2.5)$$

여기서, f_{ck} : 콘크리트 압축강도 (MPa)
 ρ_w : 주인장 철근비
 b_w : 보의 폭 (mm)
 d : 보의 유효깊이 (mm)
 a/d : 전단 경간비

Table 11 전단강도 제안식에 사용된 실험 데이터

시험체명	f_{ck} (MPa)	a/d	ρ_w	b_w (mm)	d (mm)	f_p (MPa)	t (mm)	사트의 보강량 (%)	f_{fe} (MPa)	섬유 간격
본 연구	N-0	19.5	2.0	0.023	250	360	-	-	-	-
	NP-1						5	-	-	-
	NP-2						10	-	-	-
	NP-3						15	-	-	-
	NPS-1						5	50	3000	$d/2$
	NPS-2									$d/4$
	NPS-3									$d/2$
	NPS-4									$d/4$
	NPS-5									$d/2$
	선행 연구						S-0	23.5	2.5	0.017
SP-1		10	70	2600	$d/2$					
SP-2					$d/2$					
SP-3					$d/4$					
SP-4					$d/4$					

*SP-2는 비시험구간 파괴

Table 12 무보강 시험체의 전단내력

시험체명	실험값 (kN)	ACI 기준식		Zsutty의 제안식	
		계산값 (kN)	실험값 /계산값	계산값 (kN)	실험값 /계산값
N-0	143.37	81.42	1.76	144.56	0.99
S-0	114.13	80.70	1.41	104.44	1.09

4.2.2 탄소섬유시트의 부담분 (V_f)

탄소섬유시트로 전단 보강된 보부재의 파괴는 주로 콘크리트와 보강재의 계면에서 발생하는 콘크리트의 탈락 현상으로, 보강재와 완전 합성으로 가정하여 계산된 하중보다 작은 응력상태에서 파괴가 발생하는 현상이 나타난다. 그러므로 ACI 기준식⁽⁹⁾에서는 위와 같은 현상을 고려하여 철근콘크리트 보부재의 극한하중에서 탄소섬유시트가 부담하는 전단내력은 강도저감 계수(ψ)를 두어 구하고 있다. 하지만 본 연구에서는 에폭시 모르타르 패넬과 콘크리트 모재와의 부착이 충분하다고 가정하여 식(3)과 같은 형태로 나타내었다. 참고로, 탄소섬유시트의 파단강도는 에폭시 모르타르 패넬의 인장시험에서 구한 값을 사용하기로 한다.

$$V_f = \frac{A_{fe} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} \quad (3)$$

여기서, A_{fe} : 탄소섬유시트의 양($=2nt_f w_f$)

f_{fe} : 탄소섬유시트의 파단강도($=\epsilon_{fe} E_f$)

α : 탄소섬유시트와 길이방향 부재의 경사각

s_f : 전단 보강된 탄소섬유시트의 간격

4.2.3 에폭시 모르타르 패넬의 부담분 (V_p)

지금까지는 에폭시 모르타르 패넬로 전단 보강된 철근콘크리트 보부재의 전단강도식에 대한 명확한 기준이 없으므로, 본 연구에서는 실험결과를 바탕으로 에폭시 모르타르 패넬의 부담분을 식(4)와 같이 산정하며, 또한 본 연구와 선행연구에서는 에폭시 모르타르 압축강도와 a/d 가 다르므로, 이에 따른 영향을 고려하고자 한다. 여기서 사용된 에폭시 모르타르 패넬의 부담분에 대한 분석결과는 Table 13에 나타내었다.

$$V_p = V_n - V_c - V_{sheet} \quad (4)$$

참고로, SP-2는 비시험구간 파괴로 인하여 실험결과에서 제외하였으며, 시험체 NPS-1과 SP-1은 패넬 제작시 에폭시 모르타르를 거꾸집에 타설하는 과정에서 에폭시 모르타르를 밀실하게 다져넣지 못한 것으로 판단되어 본 분석결과에서는 제외하였다.

Table 13 에폭시 모르타르 패넬 부담분의 분석결과

시험체명	실험값 (kN)	콘크리트 -Zsutty의 제안식 (kN)	탄소섬유시트 보강량 -제안식 (kN)	에폭시 모르타르 패넬 (kN)
본 연구	N-0	143.37	144.56	-
	NP-1	180.23		-
	NP-2	228.63		-
	NP-3	240.00		-
	NPS-1	195.67		40.71
	NPS-2	231.35		40.71
	NPS-3	274.89		40.71
	NPS-4	279.20		40.71
	NPS-5	255.16		20.36
선행 연구	S-0	114.13	104.44	-
	SP-1	169.20		56.49
	SP-2	186.51		56.49
	SP-3	198.20		56.49
	SP-4	239.09		56.49

*SP-2는 비시험구간 파괴

(1) 에폭시 모르타르의 압축강도 영향

에폭시 모르타르의 압축강도에 따른 영향을 알아보기 위하여 에폭시 모르타르 강도에 지수의 곱 형태로 분석하였으며, 계산되어진 에폭시 모르타르 패널의 분담분을 동일한 조건에서의 영향을 판단하기 위하여 두께와 보의 유효깊이로 나누어 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림에서, 에폭시 모르타르의 압축강도가 패널 분담분에 미치는 영향은 비슷한 것으로 나타났으며, 이는 잔골재와 에폭시의 4:1의 배합비⁽²⁾에 따라 설계되어 80MPa내외로 일정한 강도이므로 에폭시 모르타르 압축강도에 따른 영향의 차이는 비슷하다고 판단된다.

(2) a/d에 따른 영향

a/d에 따른 에폭시 모르타르 패널의 영향을 알아보기 위하여 a/d를 구분하여 에폭시 모르타르 패널의 내력 분담분을 Fig. 11에 나타내었다.

본 연구에서의 에폭시 모르타르의 압축강도가 선행 연구에서의 에폭시 모르타르 압축강도보다 낮음에도 불구하고, a/d의 차이로 인하여 선행 연구에서의 에폭시 모르타르 패널 강도가 낮게 나옴을 알 수 있다. 그러므로 에폭시 모르타르 패널의 전단내력 평가에서는 a/d의 영향을 고려함이 보다 바람직하다고 판단된다.

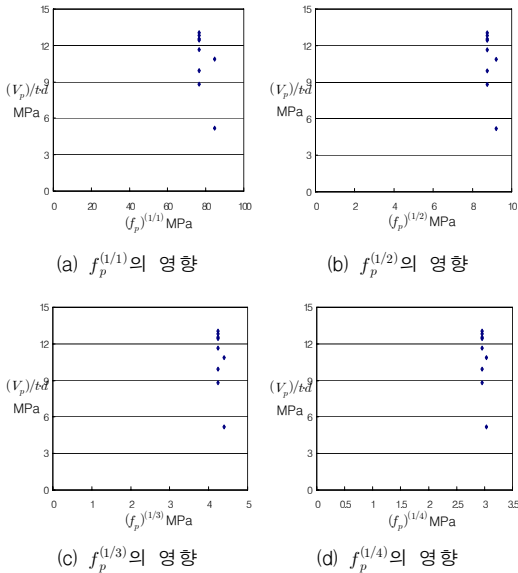


Fig. 10 패널에 대한 에폭시 모르타르의 압축강도 영향

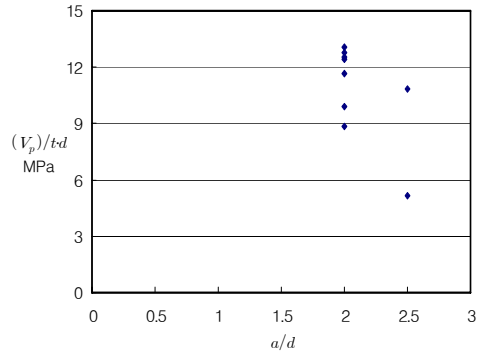


Fig. 11 a/d에 따른 에폭시 모르타르 패널의 영향

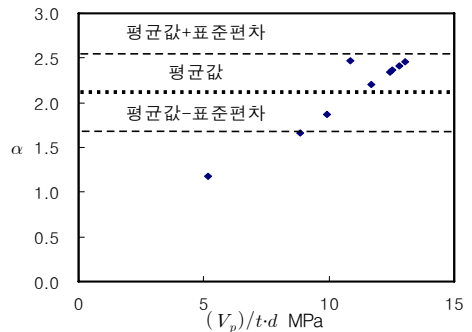


Fig. 12 에폭시 모르타르 패널의 분석

(3) 에폭시 모르타르 패널의 제안식

에폭시 모르타르 패널은 에폭시 모르타르의 압축강도의 지수에는 큰 차이가 없고, a/d에 따른 영향을 고려함이 바람직하였으므로, 콘크리트에 대한 Zsutty의 제안식을 바탕으로 식(5)와 같이 가정하였다.

$$V_p = \alpha \cdot (f_p)^{(1/3)} \cdot t \cdot d \quad (a/d \geq 2.5)$$

$$V_p = \alpha \cdot (f_p)^{(1/3)} \cdot t \cdot d \cdot \left(\frac{2.5}{a/d}\right) \quad (1.5 < a/d < 2.5) \quad (5)$$

여기서, α : 전단내력 분담계수

f_p : 에폭시 모르타르의 압축강도 (MPa)

t : 에폭시 모르타르 패널의 두께 (mm)

Table 13에서와 같이 산출되어진 콘크리트 및 탄소섬유시트의 분담 전단내력을 실험값과 함께 식(1)에

대입하고, 식(5)에 따른 에폭시 모르타르 패넬의 변수별 영향을 대입하여 전단내력 분담계수 α 를 구해 이에 대한 회귀분석을 실시한 결과, Fig. 12와 같이 α 의 평균값은 2.10, 표준편차는 0.42로 나타났다.

4.3 전단강도 제안식의 평가

철근콘크리트 보부재에 에폭시 모르타르 패넬을 외부에 전단 보강하는 경우에 있어서의 전단강도는 V_c , V_s , V_f , V_p 의 합으로 가정하며, 참고로 에폭시 모르타르 패넬의 전단 내력식은 다음 식(6)과 같다.

$$V_p = 2.1 \cdot (f_p)^{(1/3)} \cdot t \cdot d \quad (a/d \geq 25)$$

$$V_p = 2.1 \cdot (f_p)^{(1/3)} \cdot t \cdot d \cdot \left(\frac{2.5}{a/d} \right) \quad (15 < a/d < 25) \quad (6)$$

본 연구에서 제안된 에폭시 모르타르 패넬로 전단 보강된 철근콘크리트 보부재의 전단강도 제안식(1)을 이용하여 본 연구와 선행 연구의 실험값과 비교한 결과를 Fig. 13에 나타내었으며, 실험값/제안값의 평균값이 1.10, 표준편차가 8.16%로, 제안값이 실험값을 근접하게 예측하고 있음을 보여주고 있다.

한편, 본 연구에서 가정된 전단내력에 대한 제안식은 본 실험결과에 대한 전단강도를 어느 정도 평가할 수 있으나, 향후 충분한 실험결과를 토대로 보다 정확한 평가식의 제안이 필요할 것으로 사료된다.

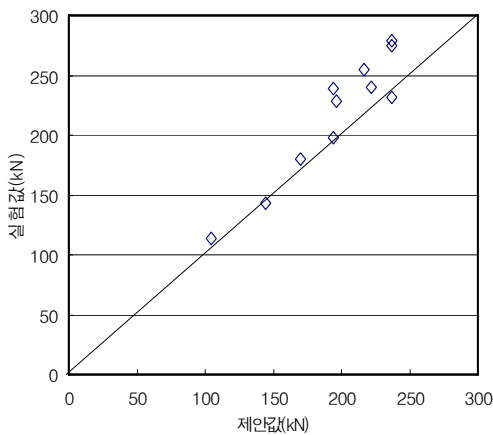


Fig. 13 전단강도 제안식에 대한 실험값/제안값 비교

5. 결론

본 연구에서는 에폭시 모르타르 패넬을 철근콘크리트 보부재의 전단 보강재로 사용하기 위하여, 보강재의 종류와 보강량, 탄소섬유시트의 간격을 변수로 가력실험을 수행하여 부재의 구조적 성능을 파악하였으며, 실험결과를 비교·분석하여 철근콘크리트 보부재에 대한 에폭시 모르타르 패넬의 전단보강 설계방법에 대한 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 가력실험 결과, 에폭시 모르타르 패넬로 전단 보강된 철근콘크리트 보부재의 파괴형상으로 판단할 때 에폭시 모르타르 패넬과 시형체 콘크리트와의 부착 성능은 매우 우수하다.
- 2) 가력실험 결과, 에폭시 모르타르 패넬의 두께 및 매입된 탄소섬유시트의 보강량 증가에 따라서 전단 내력이 증대하였으며, 패넬 내에 매입된 탄소섬유시트의 보강량이 동일할 경우의 간격에 대한 영향은 비교적 적은 것으로 나타났다.
- 3) 기존의 철근콘크리트 보부재에 에폭시 모르타르 패넬을 외부로 전단 보강하는 경우에 있어서의 전단강도를 V_c , V_s , V_f , V_p 의 합으로 가정하여 계산한 결과, 실험값과 계산값의 비에 대한 평균값이 1.10, 표준편차가 8.16%로 나타나, 본 연구에서 제안된 방법으로 평가하면 비교적 정확하게 전단강도를 예측할 수 있다.

참고문헌

1. 이용택, 이리형, “탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트보의 전단강도에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집(구조계), 16권, 1호, 2000, pp. 11-17.
2. 장지현, 이상호, “섬유시트가 매입된 에폭시 패넬로 보강한 철근콘크리트 부재의 휨거동에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집(구조계), 21권 7호, 2005, pp. 27-35.
3. 이상호, 한상훈, 이철호, “E.M.S 패넬로 보강된 RC 휨 부재의 구조성능에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집(구조계), 22권, 3호, 2006, pp. 45-52.
4. 한상훈, 이철호, 이상호, “E.M.S 패넬로 전단 보강한 철근콘크리트 보의 구조적 성능에 관한 실험적 연구”,

-
- 대한건축학회지회연합논문집, 8권, 3호, 2006, pp. 67-74.
5. 한국산업규격, “KS F 2405-콘크리트의 압축강도 시험방법”, 2005.
 6. 한국산업규격, “KS B 0802-금속 재료 인장 시험 방법”, 2003.
 7. 대한건축학회, “콘크리트 구조설계기준 건축구조물 설계예제집”, 2004.
 8. ACI, Building Code Requirements For Structural Concrete, Aci 318-151, 2005.
 9. ACI, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-25, 2005.
 10. T. C. Zsutty, “Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests”, ACI, Vol. 60, No. 2, 1963, pp. 183-207.
 11. Triantafillou T. C., “Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites”, ACI Structural Journal, Vol. 95, No. 2, 1998, pp. 107-115.
- (접수일자 : 2007년 8월 14일)