

# NSM보강 RC보의 보강 상세에 대한 해석

## Analytical Investigation on Strengthening Details of RC Beams Strengthened with NSMR

강재윤\*      박영환\*\*      박종섭\*      유영준\*\*\*      정우태\*\*\*  
Kang, Jae Yoon      Park, Young Hwan      Park, Jong Sup      You, Young Jun      Jung, Woo Tai

### ABSTRACT

To investigate the strengthening efficiency of the Near Surface Mounted Reinforcement (NSMR) technique analytically, a structural model for the finite element method (FEM) able to simulate accurately the experimental results was determined. Applying the finite element model, parametric analysis was performed considering the groove depth and spacing of CFRP laminates. Analytical study on the groove depth revealed the existence of a critical depth beyond which the increase of the ultimate load becomes imperceptible. Analytical results regard to the spacing of the CFRP laminates showed that comparatively smooth fluctuations of the ultimate load were produced by the variation of the spacing and the presence of an optimal spacing range for which relatively better strengthening efficiency can be obtained. Particularly, a spacing preventing the interference between adjacent CFRP laminates and the influence of the concrete cover at the edges as well as allowing the CFRP laminates to behave independently was derived.

### 1. 서론

표면매립보강공법(Near Surface Mounted Reinforcement, NSMR)은 콘크리트 부재에 일정 폭과 깊이의 홈을 만들어 에폭시를 충전하고 탄소판을 매립하여 보강하는 방법으로서, 콘크리트 부재와 에폭시 사이의 계면 부착력이 주부재와 보강재 사이의 응력전달 기구로 작용하도록 하는 콘크리트 부재 보강공법이다(Hassan and Rizkalla 2003; Lorenzis and Nanni 2002). 이 공법의 보강성능은 CFRP판의 보강량, 매립깊이 및 보강재 매립 간격에 따라서 달라질 수 있으며, 표면매립공법을 이용한 보강 설계를 할 때는 이들 매개변수에 따른 보강성능 변화 및 내력 증가를 고려할 필요가 있다. 특히 보강재의 매립 깊이 및 배치간격은 보강효율 뿐만 아니라 시공성 및 경제성을 결정하는 요인이 되므로, 경제적으로 최대의 보강 효과를 얻을 수 있는 최적 매립 위치 및 최적 보강량을 결정할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 보강재 매립 깊이 및 간격 변수에 대한 보강성능 변화를 실험적으로 검토하고, 실험에서 나타난 거동을 모사할 수 있는 유한요소해석 모델을 결정하였다. 결정된 유한요소모델을 이용하여 FRP판의 매립 깊이 및 배치 간격 변화 등의 매개변수에 대한 보강성능을 평가하고, 보강효율을 극대화할 수 있는 매립깊이 및 배치간격의 범위를 도출하였다.

\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원  
\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원  
\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

## 2. 유한요소 모델 검증을 위한 예비해석

NSM공법으로 보강된 RC보의 유한요소해석모델 검증을 위하여 그림 1의 실험체를 대상으로 한 4점재하 휨실험 결과와 해석결과를 비교하였다. 해석모델에서 콘크리트 요소, 에폭시 블록 요소 및 탄소판 요소는 8절점 솔리드 요소를 사용하였고, 철근은 2절점 3차원 트러스 요소로 모델링하였다. 탄소판 요소와 철근 요소는 각각 에폭시 요소 및 콘크리트 요소 내에 매립되는 embedded element로 적용하였다. 콘크리트와 에폭시사이의 부착은 완전부착으로 가정하였고, 해석에 사용된 재료물성은 그림 2에 보인 바와 같다. CFRP판의 탄성계수는 167.3 GPa이고, 인장강도는 2482.5 MPa로 하였다. 그림 3은 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타낸 것으로서, 유한요소해석에서 나타난 최대하중이 실험결과에 대해 약 4~8%의 오차를 보임으로써 보강보의 거동을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 것으로 평가되었다.

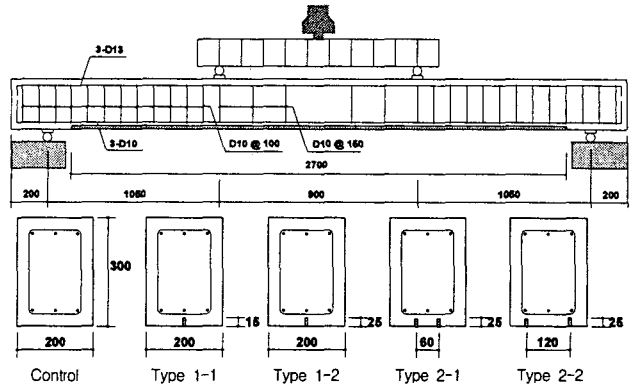
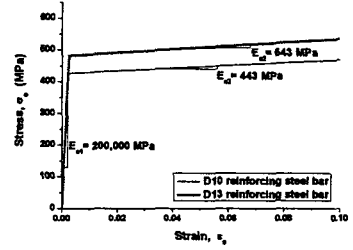
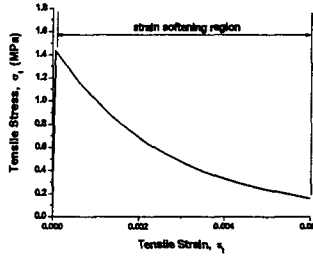
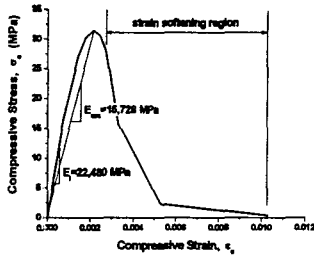


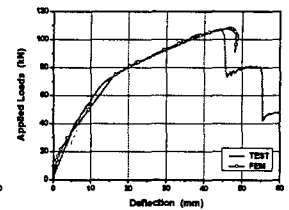
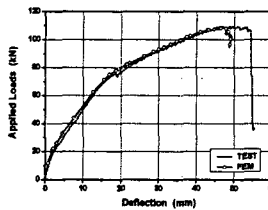
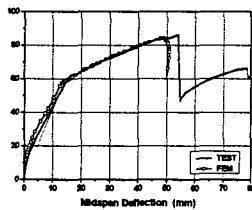
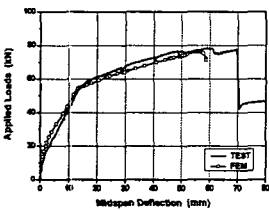
그림 1. 예비해석을 위한 보강실험체 종류

그림 2에 보인 바와 같다. CFRP판의 탄성계수는 167.3 GPa이고, 인장강도는 2482.5 MPa로 하였다. 그림 3은 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타낸 것으로서, 유한요소해석에서 나타난 최대하중이 실험결과에 대해 약 4~8%의 오차를 보임으로써 보강보의 거동을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 것으로 평가되었다.



(a) 콘크리트 압축응력-변형을 관계 (b) 콘크리트 인장응력-변형을 관계 (c) 철근의 응력-변형을 관계

그림 2. 재료 물성치



(a) TYPE 1-1

(b) TYPE 1-2

(c) TYPE 2-1

(d) TYPE 2-2

그림 3. 해석결과와 실험결과와의 비교

## 3. 매개변수해석

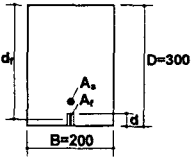
철근 콘크리트 보를 표면매립 공법으로 보강하는 경우, 보강재 매립 깊이가 증가함에 따라 보강 단면적이 증가하므로 부재 내력과 보강 효율도 증가하는 것으로 기대할 수 있으나, 재하실험 결과에서는 보강재 매립깊이에 따라 보강효과가 비례적으로 나타나지 않는 것으로 나타났다. 본 해석에서는 보 중앙에 하나의 보강재를 배치하는 경우에 대해서 보강재 매립 깊이 변화에 대한 내력 변화를 해석적으로 검토하고, 효과적인 보강설계를 위한 매립깊이 제한치를 도출하였다. 표 1은 매립 깊이에 대한 보

강보의 내력증가비를 나타낸 것으로서, 보강재 깊이 변화 또는 보강량 변화는 항복하중의 증가에는 큰 영향을 미치지 못하지만, 항복 이후의 최대하중 증가에는 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그림 4는 매립깊이 변화에 대한 최대하중 증가율을 나타낸 것으로서, 일정 매립깊이 이상에서는 최대내력의 증가율이 둔화되어 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다. 본 해석모델의 경우에는, 매립깊이 35mm 까지는 보강효과를 얻게 되어 내력이 증가하는 경향을 보이지만, 그 이상의 매립깊이에 대해서는 보강효율이 점차 감소하였으며, 무보강보 내력의 약 1.6 정도가 NSM보강을 통해 확보할 수 있는 한계내력인 것으로 나타났다.

보강재를 2열 배치하는 경우, 보강재 간격 변화에 대한 해석결과를 표 2에 나타내었다. 보강재를 25mm 매립한 경우, 간격변화에 따라 최대하중 증가율이 65~98%의 변동폭을 보였고, 15mm 매립한 경우에는 최대하중 증가율이 52~75%의 변동폭을 보였다. 최대 보강효과를 얻을 수 있는 간격은 80mm로 나타났으며, 이를 기준으로 간격이 좁아지거나 넓어지면 보강효과가 감소함을 알 수 있었다. 해석결과로부터 최대 보강효과를 얻을 수 있는 최적 간격 범위를 도출하기 위하여 그림 5에 두 경우의 해석결과를 중첩하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 보강재 간격이 80~120mm 인 경우에 보강 효과가 가장 크다고 할 수 있고, 매립깊이 15mm인 경우에 대해서는 내력 증가율의 한계치가 약 65%이고, 매립깊이 25mm인 경우에는 약 95%가 내력증가율의 한계치라고 할 수 있다. 또한, 보강재 간격이 40mm 이내로 좁아지거나, 간격이 지나치게 커서 단부 모서리까지의 거리가 40mm 이 내가 되면 보강 효율이 상대적으로 감소함을 알 수 있었다. 이는 보강재간의 간섭 또는 단부 모서리 영향인 것으로 추측된다. 따라서, 보강재가 서로 간섭하지 않기 위해서는 그림 6에 보인 바와 같이 최소 40mm 이상의 간격이 확보되어야 하고, 모서리 영향을 배제하기 위해서 단부로부터 최소 40mm 이상 떨어져 있어야 하며, 이 두 가지 사항이 2열 이상의 보강재 매립 위치를 결정할 때의 전제조건이라고 판단된다.

표 1. 매립깊이 변화에 대한 최대하중 비교

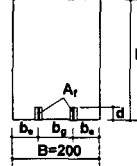
d (mm)	Dimension of CFRP laminate	A <sub>v</sub> (mm <sup>2</sup> )	d <sub>r</sub> (mm)	ρ <sub>r</sub> (×10 <sup>3</sup> )	ρ <sub>r</sub> /ρ <sub>s</sub>	P <sub>y</sub> / P <sub>y(control)</sub>	P <sub>u</sub> / P <sub>u(control)</sub>
5	1.2×5	6	297.5	0.101	0.0245	1.047	1.051
10	1.2×10	12	295.0	0.203	0.0494	1.104	1.237
15	1.2×15	18	292.5	0.308	0.0748	1.156	1.358
17.5	1.2×17.5	21	291.3	0.361	0.0876	1.173	1.393
20	1.2×20	24	290.0	0.414	0.1006	1.185	1.434
25	1.2×25	30	287.5	0.522	0.1268	1.217	1.501
27.5	1.2×27.5	33	286.3	0.576	0.1401	1.245	1.541
30	1.2×30	36	285.0	0.632	0.1535	1.265	1.507
35	1.2×35	42	282.5	0.743	0.1806	1.293	1.597



d : 매립깊이  
 A<sub>v</sub> : 보강재 단면적  
 ρ<sub>r</sub> (=A<sub>v</sub>/Bd) : 보강비  
 ρ<sub>s</sub> (=A<sub>s</sub>/BD) : 철근비  
 P<sub>y</sub> : 항복하중  
 P<sub>u</sub> : 최대하중

표 2. 매립깊이 및 간격 변화에 대한 최대하중 비교

d (mm)	A <sub>v</sub> (mm <sup>2</sup> )	b <sub>0</sub> (mm)	b <sub>e</sub> (mm)	b <sub>0</sub> /B	P <sub>y</sub> (kN)	P <sub>u</sub> (kN)	P <sub>y</sub> / P <sub>y(control)</sub>	P <sub>u</sub> / P <sub>u(control)</sub>
0	0	0	0	0	46.69	56.19		
25	30	20	90	0.1	72.25	97.89	1.55	1.74
		40	80	0.2	73.24	98.06	1.57	1.75
		50	75	0.25	73.91	103.31	1.58	1.84
		60	70	0.3	72.61	108.43	1.56	1.93
		80	60	0.4	72.93	111.19	1.56	1.98
		100	50	0.5	71.62	106.51	1.53	1.90
		120	40	0.6	72.64	107.89	1.56	1.92
		140	30	0.7	71.27	103.77	1.53	1.85
		160	20	0.8	71.63	105.05	1.53	1.87
		180	10	0.9	72.61	92.44	1.56	1.65
15	18	20	90	0.1	59.12	88.59	1.27	1.58
		40	80	0.2	59.02	86.17	1.26	1.53
		60	70	0.3	59.43	87.51	1.27	1.56
		80	60	0.4	58.14	98.41	1.25	1.75
		100	50	0.5	58.14	89.06	1.25	1.58
		120	40	0.6	57.12	95.25	1.22	1.70
		140	30	0.7	56.8	89.79	1.22	1.60
		160	20	0.8	57.47	90.01	1.23	1.60
		180	10	0.9	57.47	85.56	1.23	1.52



d : 매립깊이  
 A<sub>v</sub> : 보강재 단면적  
 b<sub>0</sub> : 보강재 간격  
 b<sub>e</sub> : 단부거리  
 P<sub>y</sub> : 항복하중  
 P<sub>u</sub> : 최대하중

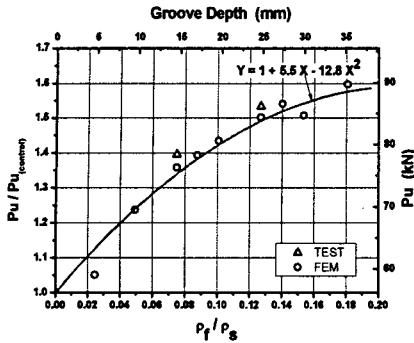


그림 4. 보강비-내력증가량 관계

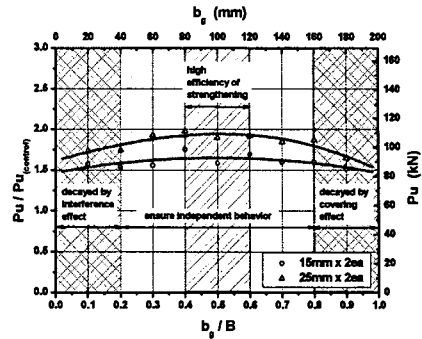


그림 5. 간격비-내력증가량 관계

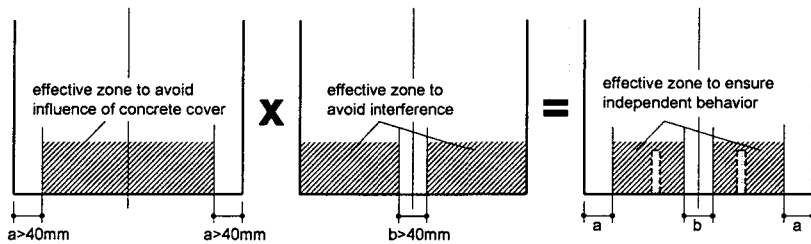


그림 6. 보강판의 독립거동을 위한 배치 조건

#### 4. 결론

본 연구에서는 CFRP 판으로 표면매립보강된 RC 보의 보강성능 및 거동 특성을 규명하기 위하여, CFRP판의 매립깊이 및 배치간격 변화에 대한 매개변수 해석을 수행하였으며, 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 매립 깊이에 대한 최대내력 관계를 해석적으로 검토한 결과, 일정 매립깊이 이상에서는 내력 증가가 둔화되는 한계깊이가 존재함을 알 수 있었으며, 바꾸어 말하면 매립 깊이를 증가시켜도 일정 수준 이상의 보강효과를 얻을 수 없는 한계 내력이 존재함을 알 수 있었다. 본 매개변수 연구에서 적용한 실험체 제원에 대해서는 한계 깊이가 35mm 이었으며, 무보강보 최대 내력의 약 1.6배가 NSM보강으로 확보할 수 있는 한계 내력인 것으로 나타났다.

(2) 보강재 배치간격 변수에 대한 해석 결과, 상대적으로 큰 보강효율을 얻을 수 있는 최적 간격 범위가 존재함을 알 수 있었다. 특히, 보강재 서로간의 간섭을 피하기 위해서 확보되어야 할 보강재간 최소간격과 보의 모서리 근처에서 콘크리트 덮개의 영향을 피하기 위한 최소 단부거리가 존재하는 것으로 나타났으며, 배치간격 및 단부거리를 40 mm 이상 확보하여야 보강재가 독립적인 거동을 하여 효과적인 보강성능을 발휘할 수 있는 것으로 분석되었다. 이러한 특징은 단면 제원과 상관없이 발생할 수 있는 현상이며, 2개 이상의 보강재를 배치하는 경우에 반드시 확보되어야 할 전제조건으로 판단된다.

#### 참고문헌

- Hassan, T. and Rizkalla, S., 2003, "Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips," Journal of Composites for Construction, Vol. 7, No. 3, pp.248-257.
- Lorenzis, L.D. and Nanni, A., 2002, "Bond Between Near Surface Mounted FRP Rods and Concrete in Structural Strengthening," ACI Structures Journal, Vol. 99, No. 2, pp. 123-133.