

# CFRP 스트립 표면매립공법으로 보강된 철근콘크리트 보의 전단거동 특성

## Characteristics of Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Strips

한 상 훈<sup>1)\*</sup>      홍 기 남<sup>2)</sup>      신 병 길<sup>3)</sup>      임 진 목<sup>4)</sup>      곽 소 신<sup>5)</sup>  
Han, Sang Hoon      Hong, Ki Nam      Shin, Byoung Gil      Lim, Jin Mook      Kwak, So Shin

### Abstract

Tests and analyses were performed in this study to assess the shear strength of Reinforced Concrete(RC) members strengthened by the Near Surface Mounted(NSM) technique in shear, which is drawing attention as an alternative to the Carbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP) bonding strengthening technique. Four-point bending tests were performed on 7 RC specimens without any shear reinforcement. The test variables such as the inclination of CFRP strip (45 degrees and 90 degrees), and the spacing of CFRP strip (250mm, 200mm, 150mm, 100mm) were considered. Through the testing scenarios, the effect of each test variable on the failure mode and the shear strength of the RC members strengthened by the NSM technique in shear were assessed. The test results show that the specimens with CFRP strips at 45 degrees go to failure as a result of the strip fracture, but the specimens with CFRP strips at 90 degrees go to failure as a result of the slip of strips. Strips at 45 degrees was the more effective than strips at 90 degrees, not only in terms of increasing beam shear resistance but also in assuring larger deformation capacity at beam failure. In addition, the RBSN analysis appropriately predicted the crack formation and the load-displacement response of the RC members strengthened by the NSM technique in shear.

**Keywords** : CFRP strip, NSM, Shear strengthening, RBSN, Reinforced concrete

### 1. 서론

철근콘크리트 구조물은 시간이 경과하면서 콘크리트 열화 및 철근부식에 의한 노후화가 진행되어 성능이 저하된다. 전국적으로 노후화된 철근콘크리트 구조물이 증가함에 따라 강판이나 FRP(fiber reinforced polymer)등을 이용한 구조물 보강사례가 증가하고 있어 전체 건설시장에서 보수·보강 분야의 비중은 빠른 속도로 커지고 있다. 특히 중량에 비해 뛰어난 역학적인 성질을 가지며 내부식성이 우수한 FRP 보강재가 기존의 강판대용으로 이용되면서 보수·보강 공사비용 및 유지관리 비용을 크게 절감할 수 있게 되었다(박상렬, 2001; 박중열 등, 2004; Wu etc., 2006). 일반적으로 전단저항력이 저하된 철근콘크리트 구조물은 급작스러운 취성과파괴가 발생될 가능

성이 크다. 이는 구조물 사용자들이 구조물 붕괴 시 대피할 수 있는 충분한 시간을 확보할 수 없기 때문에 충분한 전단보강을 통하여 휨 파괴를 유도해야만 한다. 최근까지 적용되고 있는 전단보강 공법으로는 전단 부위에 강판이나 FRP 판을 부착하는 공법이 주를 이루었지만, 부식 및 박리 등에 의한 문제점들이 제기되고 있다(Neale etc., 2005; 이재훈과 신성진, 2010). 이로 인해 국내·외적으로 FRP를 이용한 철근콘크리트 보의 전단보강과 관련된 연구가 다양한 방향으로 진행되고 있다(임동환과 남민희, 2008; Kishi etc., 2005). 특히 최근에는 FRP 보강재를 콘크리트 표면에 삽입하는 Near Surface Mounted(이하, NSM)공법이 국내·외에서 많은 관심을 끌고 있다. 국내 연구로 임동환과 권영순(2009)은 NSM과 외부부착으로 전단보강된 RC보에 대한 실험을 통해 각 공법의 보

1) 정회원, 충북대학교 토목공학부, 교수  
2) 정회원, 충북대학교 토목공학부, 조교수  
3) 정회원, 한국시설안전공단 시설안전연구소, 연구원  
4) 정회원, 아리산열, 과장  
5) 정회원, 충북대학교 토목공학과, 박사과정

\* Corresponding author : shhan@chungbuk.ac.kr 010-5467-4955  
• 본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

강효과를 분석하였다. 국외 연구로 Barros와 Dias(2006)는 외부부착(EBR: Externally bond reinforcing) 공법으로 전단 보강된 보와 NSM공법으로 전단 보강된 보를 실험적으로 비교하여 NSM 보강보의 전단저항능력에 대한 효용성을 규명하고, Nanni(2004) 모델식과 실험값을 비교하여 검증하였다. Rizzo와 De Lorenzis(2009)는 NSM 공법으로 보강간격과 보강방향을 변수로 전단실험을 실시하고 NSM 전단보강은 철근콘크리트 부재의 전단강성을 크게 향상시키며, 전단철근 외부에 측면피복이 분리되는 파괴양상을 나타낸다고 보고하였다. 또한 그들은 Nanni(2004) 모델식을 기초로 한 GIP(Generalized Ideally Plastic) 모델식을 제안하였다. Tanarlan(2011)은 전단스팬비 5.0의 캔틸레버보에 대한 NSM 전단보강 실험을 실시하고, ACI-440 규준과 De Lorenzis와 Nanni(2002)의 모델 적용성을 평가하였다. Dias와 Barros(2011)는 저장도 콘크리트를 사용한 T형보에 대한 NSM 전단보강 실험을 실시하고 전단보강 효과를 평가하였다. 그러나, 기존 NSM 전단보강 실험 연구는 Tanarlan(2011)의 연구를 제외하고 전단스팬비 2.0 내외의 깊은 보에 대해서만 주로 수행되어 왔으며, 해석적 연구는 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 NSM 공법으로 보강된 전단스팬비 2.8를 갖는 실험체에 대한 전단실험을 수행하고, 전단보강이 없는 실험체의 전단내력과의 비교를 통해 NSM 전단보강의 전단보강효과 및 파괴양상을 평가하였다. 본 실험 결과는 기존 전단내력이 부족한 RC 구조물에 대한 NSM 전단보강 설계시 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 그리고 불균질 취성재료의 손상 전개과정을 예측하기 위해 1978년 Kawai(1978)에 의해 개발된 RBSN 모델을 적용하여 NSM 전단보강 RC 보의 해석연구를 수행하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 사용재료

본 연구에서 실험체 제작을 위해 사용한 콘크리트의 배합설계는 Table 1과 같으며, 시멘트는 1종 보통 포틀랜드

Table 1 Shear Modulus of Masonry

Design strength (MPa)	Slump (cm)	Air content (%)	W/C (%)	S/a (%)	AD (%)
27.0	15.0±2.5	4.5±1.5	45.2	45.3	0.1

W: Water, C: Cement, S: Sand, G: Gravel, AD: Admixture

Table 2 Mechanical properties of steel

Bar size	Es (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)
D10	2×10 <sup>5</sup>	651	571
D22		646	511

Table 3 Mechanical properties of CFRP

	Modulus of elasticity (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Ultimate z strain (%)
S & P Laminate (150/2000)	165,000	2,700~3,000	1.4

Table 4 Mechanical properties of epoxy

	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Bonding strength (MPa)
Epoxy resin 220	80.3	42.2	3.0



Fig. 1 CFRP strip

드시멘트, 굵은 골재 최대치수는 25mm 이하를 사용하였다. 콘크리트의 목표강도는 27MPa로 설계하였으며, 압축강도 실험결과 이를 만족하는 32MPa로 나타났다. 인장철근과 압축철근은 KS D 3504의 이형철근으로 SD400을 사용하였다. 사용 철근의 역학적 특성은 Table 2와 같다.

실험에 사용한 CFRP 스트립은 Swiss사에서 개발한 Laminate 150/2000제품으로서 Fig. 1에 나타난 바와 같이 두께와 폭이 각각 2.8mm, 10mm이며, 역학적 특성은 Table 3과 같다. 에폭시는 CFRP 스트립과 콘크리트 사이의 전단응력을 전달하기 위한 매개체로서 Swiss사에서 CFRP 부착을 위해 생산하는 Epoxy Resin 220을 사용하였다. 에폭시는 주제와 경화제로 구성되어 있으며, 그 역학적 특성은 Table 4와 같다.

### 2.2 실험체 제작

본 연구의 모든 실험체 전장과 순지간은 각각 3,000mm, 2,600mm로 동일하며, 폭과 높이가 각각 250mm, 400mm

Table 5 Test programs

Specimens	Beam length (mm)	Shear span to depth ratio (a/d)	FRP	Dimension of RC beam b×h(mm)	Spacing of CFRP strip (mm)	Angle of CFRP strip (°)
Control	3,000	2.82	-	250×400	-	-
NS-AV-10			CFRP		100	90
NS-AV-15			CFRP		150	90
NS-AV-20			CFRP		200	90
NS-AV-25			CFRP		250	90
NS-AD-15			CFRP		150	45
NS-AD-25			CFRP		250	45

NS-AV-15

① ②

① : 보강각도 (AV=90°, AD=45°)

② : 보강간격 (25=250mm, 20=200mm, 15=150mm, 10=100mm)

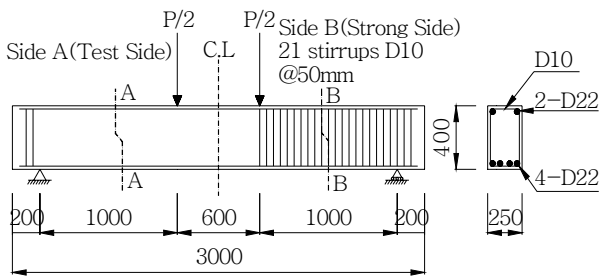
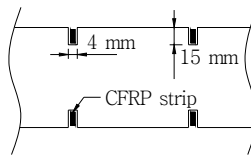


Fig. 2 Specimen geometry(unit:mm)

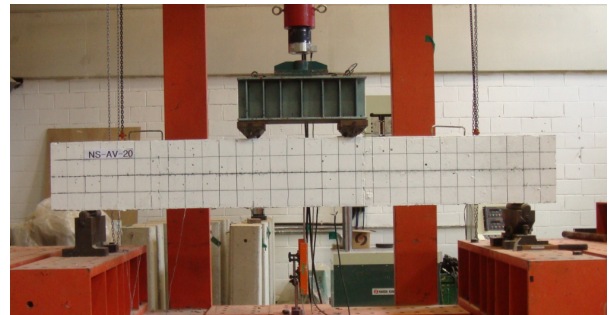


Fig. 3 Test setup

의 직사각형 단면을 갖는다. 모든 실험체의 전단스팬비 (a/d)는 2.82이고, 인장철근비( $\rho$ )는 0.0175이다. 기준 실험체를 제외한 모든 실험체는 측면에 홈을 내고, CFRP 스트립을 수직(90°)방향 또는 경사(45°)방향으로 전단 보강을 실시하였다. 수직 전단보강 실험체의 CFRP 스트립 보강간격은 100mm, 150mm, 200mm, 250mm이며, 경사 전단보강 실험체의 보강간격은 150mm, 250mm이다.

Table 5는 본 실험에서 채택한 실험체의 종류와 변수를 나타낸 것이고, Fig. 2는 실험체의 배근상태를 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 재하점에서부터 지점까지 1,000mm 구간인 Side A는 “Test side”로 지정하고, 이 부분에 CFRP 스트립을 보강하여 실험변수에 따라 전단파괴 거동을 분석하였다. 반면 Side B는 “Strong side”로서 전단철근을 50mm간격으로 배근하여 전단파괴가 이 구간에서 발생하지 않도록 확실하게 전단보강을 실시하였다.

CFRP 스트립을 삽입할 홈을 콘크리트용 홈파기를 이용하여 보강길이 및 간격에 따라 깊이와 폭이 각각 15mm, 4mm가 되도록 실험체의 양 측면에 형성하였다. 홈파기

작업과정에서 발생한 콘크리트 분진은 고압세척으로 완전히 제거하였다. 분진이 완전히 제거된 홈에 주재와 경화제를 4:1 비율로 혼합한 에폭시를 2회에 걸쳐 2/3정도 충전한 후에 CFRP 스트립을 홈에 삽입하였다. CFRP 스트립 삽입 작업시 CFRP 스트립은 Table 5에 타나낸 바와 같이 세로로 삽입하였으며, 양 측면의 에폭시 두께가 거의 동일하게 되도록 최대한 주의하였다. 전단보강 작업이 끝난 실험체들은 7일의 양생 기간 후에 파괴실험을 실시하였다.

### 2.3 실험 방법 및 장치

하중재하는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 500kN 용량의 유압잭을 통해 4점 재하 하였다. 하중은 예상 최대하중 80%까지는 하중제어, 그 이후부터는 변위제어 방식으로 작용시켰다. 각 하중단계에서 보 중앙부의 처짐을 측정하기 위해 최대 150mm의 변위까지 측정이 가능한 LVDT 2개를 설치하였다. 인장철근의 변형률을 측정하기 위해서

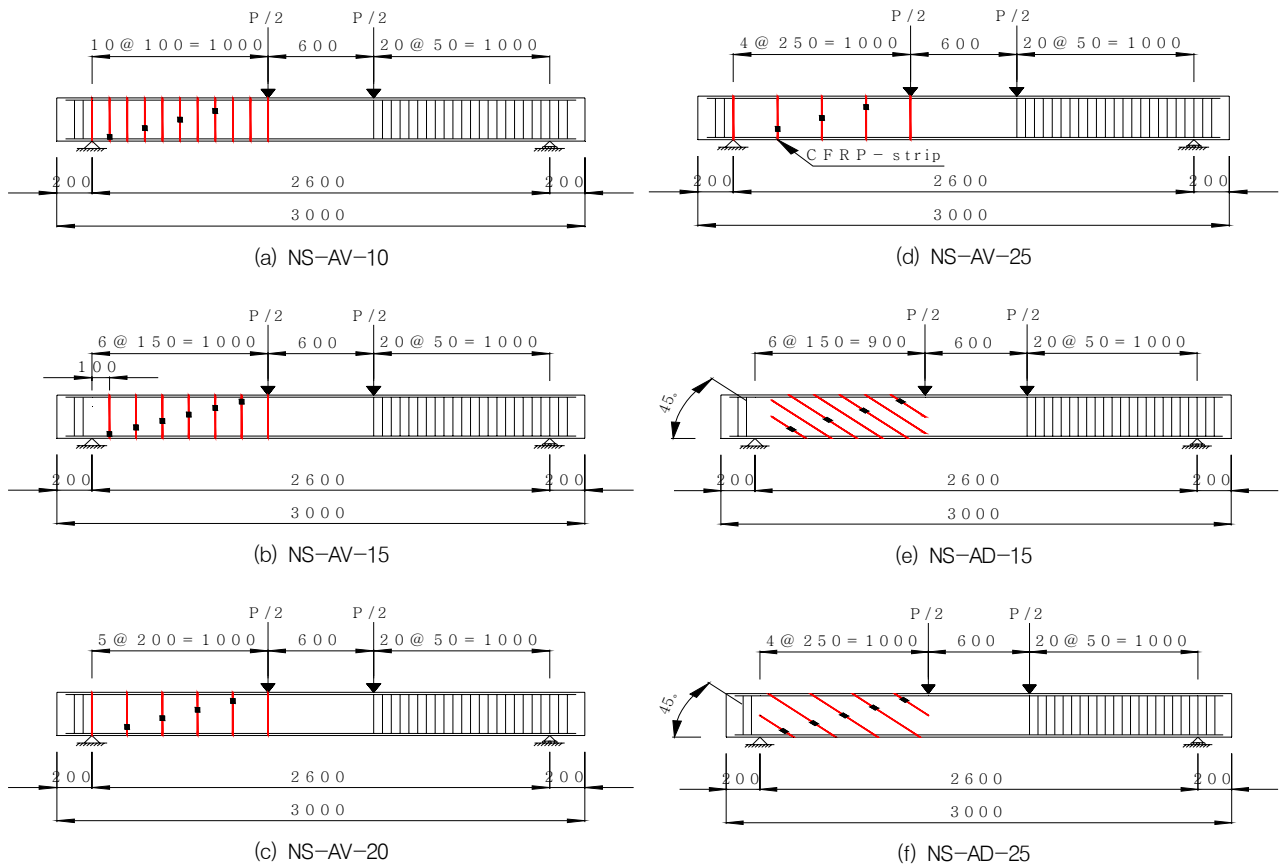


Fig. 4 Location of strain gauge (unit:mm)

Table 6 Results of shear test

Specimens	$P_u$ (kN)	$V_u$ (kN)	$V_u - V_{u, Con}$ (kN)	$(V_u - V_{u, Con})/V_{u, Con}$ (%)	$\delta_u$ (mm)	$(\delta_u - \delta_{u, Con})/\delta_{u, Con}$ (%)	Failure mode
Control	206.6	103.30	-	-	4.64	-	Shear
NS-AV-10	386.2	193.10	89.8	86.93	11.62	150.4	Shear
NS-AV-15	381.1	190.55	87.25	84.46	11.34	144.4	Shear
NS-AV-20	320.9	160.45	57.15	55.32	9.48	104.3	Shear
NS-AV-25	256.1	128.05	24.75	28.32	7.22	55.6	Shear
NS-AD-15	461.9	230.95	127.65	123.57	17.32	273.3	Flexural
NS-AD-25	437.8	218.90	115.6	119.91	14.09	203.4	Flexural-shear

는 보 중앙부의 인장철근에 2개의 변형률 게이지를 부착하였다.

CFRP 스트립의 변형률을 측정하기 위하여 Fig. 4에 나타난 바와 같이 각 CFRP 스트립마다 사인장 균열의 발생이 예상되는 위치에 변형률 게이지를 부착하였다. 각 하중단계별로 측정된 하중, 변위, 철근 및 스트립의 변형률은 데이터로거를 이용하여 실시간으로 저장하였다. 실험중에는 육안으로 실험체의 초기균열과 균열진행상황, CFRP 스트립의 탈락 및 파단 등을 확인하여 기록하였으며, 실

험 종료 후에는 파괴가 발생한 부분의 콘크리트를 햄머로 분쇄하여 내부 CFRP 스트립의 손상정도를 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

Table 6에 모든 실험체의 실험결과를 정리하여 나타내었다. Table 6에서  $V_{u, Con}$ ,  $\delta_{u, Con}$  은 각각 기준실험체 Control의 전단력( $V_u$ )와 최대변위( $\delta_u$ )를 의미한다. CFRP 스트립을 수직으로 매립한 NS-AV 시리즈 실험체의 전

단력( $V_u$ )은  $V_{u, Con}$  과 비교하여 28.32~86.93% 증가하였으며, 45° 경사로 매립한 NS-AD 시리즈 실험체의 전단력은 119.91~123.57% 증가하였다. 또한, CFRP 스트립을 수직으로 매립한 NS-AV 시리즈 실험체의 최대 변위( $\delta_u$ )는  $\delta_{u, Con}$  과 비교하여 55.6~150.4% 증가하였으며, 45° 경사로 매립한 NS-AD 시리즈 실험체의 최대 변위는 203.4~273.3% 증가하였다. 기준실험체 Control 및 NS-AV 시리즈 실험체는 사인장 균열에 의한 전단 파괴 모드를 나타낸 반면, NS-AD 시리즈 실험체는 인장철근이 항복한 이후 휨파괴와 휨-전단 파괴모드를 나타내었다.

### 3.1 파괴모드

Fig. 5는 CFRP 스트립으로 전단 보강한 실험체들의 파괴실험 이후의 모습을 나타내었다.

기준실험체 Control은 67kN의 하중에서 보의 중앙에 초기 휨균열이 발생하였으며, 하중이 증가함에 따라 점점 압축부로 균열이 성장하였다. 하중이 122kN에 도달했을 때 휨균열은 실험체의 복부까지 성장하였으며, 점차적으로 균열폭이 확장하였다. 하중이 206kN에 도달하는 순간 재하점과 지점에서 약 400mm 떨어진 지점을 연결하는 사인장 균열이 급작스럽게 발생하였다. 추가적으로 하중을 증가시키자 사인장 균열은 실험체를 완전히 관통하였으며, 인장철근을 따라 쪼갬파괴가 발생하여 실험을 종료하였다. Fig. 5(a)와 (b)는 각각 NS-AV-10과 NS-AV-15 실험체의 파괴모습이다. 이 실험체들은 초기 균열이 재하점 부근의 스트립을 따라 수직방향으로 형성되었다. 하중이 증가하면서 지점으로부터 500~600mm 지점에서 사인장 균열이 형성되기 시작하였으며, 이 균열이 성장하여 수직 방향으로 형성된 균열과 만나면서 전단파괴가 발생하였다. 사인장 균열이 실험체를 관통하는 순간 재하점에 근접하여 보강된 CFRP 스트립에 슬립이 발생하였다.

Fig. 5(c)와 (d)는 NS-AV-20과 NS-AV-25의 파괴실험 이후의 모습을 나타낸 것이다. 이 실험체들의 파괴거동은 기준실험체 Control과 큰 차이를 보이지 않았다. 최대하중에 도달하는 순간 재하점과 지점으로부터 400~500mm 떨어진 지점을 연결하는 사인장 균열이 급작스럽게 발생하면서 파괴가 발생하였다. 이 실험체들에서도 스트립이 미끄러지는 현상이 발생하였다. Fig. 5(e)와 (f)는 각각 NS-AD-15와 NS-AD-25 실험체에 발생한 균열형상 및 CFRP 스트립 손상을 보여주고 있다. CFRP

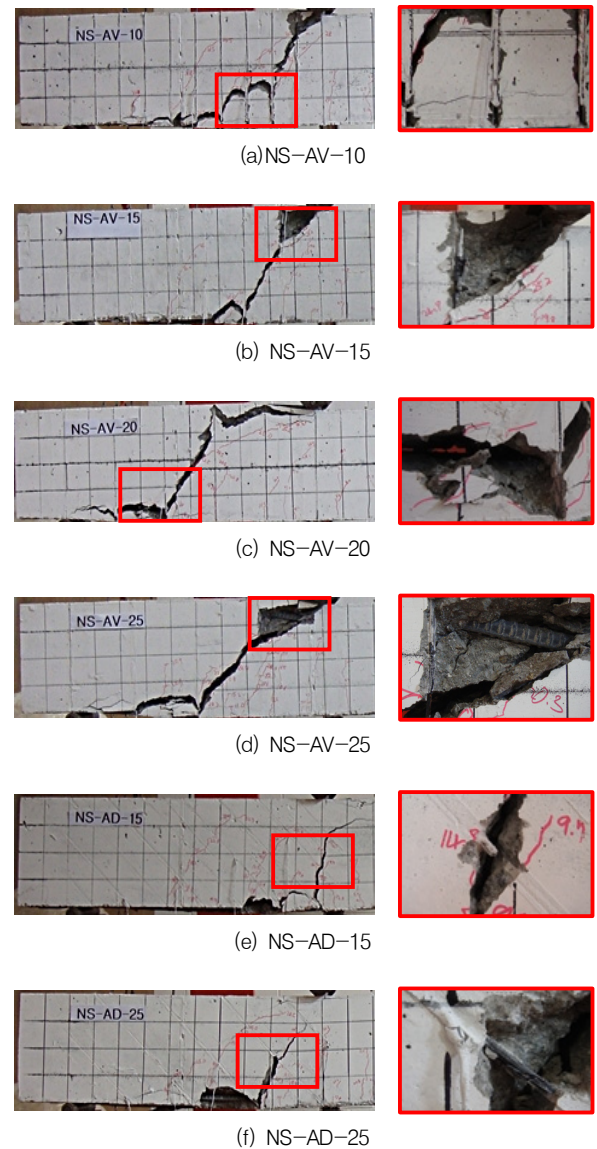


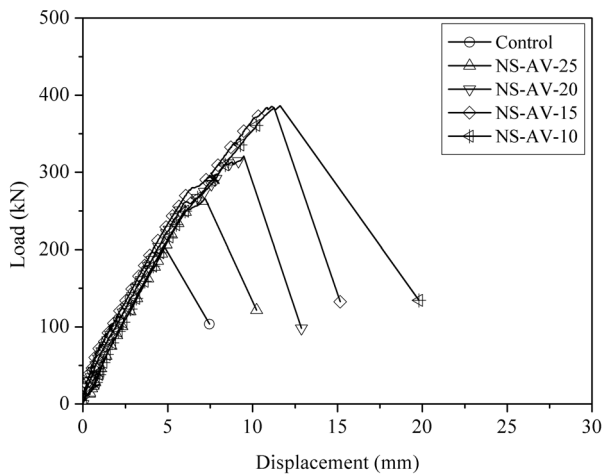
Fig. 5 Failure configuration after test

스트립을 45° 경사 보강한 NS-AD-15와 NS-AD-25 실험체들은 재하점 아래에 발생한 휨균열이 복부까지 성장할 때까지 균열폭은 크게 증가하지 않고 안정적으로 하중에 저항하였다. 하중이 증가하면서 스트립이 찢겨지는 소리가 들리기 시작하였으며, 순간적으로 스트립이 파단되면서 균열이 압축부까지 성장하여 파괴되었다.

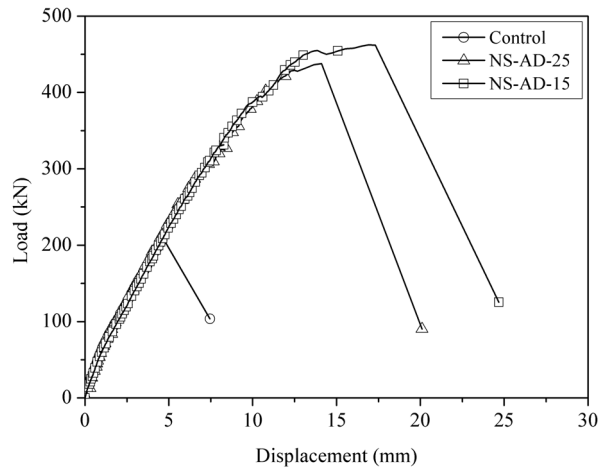
### 3.2 하중-처짐 관계

Fig. 6에 CFRP 스트립 매립간격을 변수로 설정한 실험체들의 하중-처짐 곡선을 비교하여 나타내었다. Fig. 6(a)는 NS-AV 시리즈 실험체들의 하중-처짐 곡선을 나타



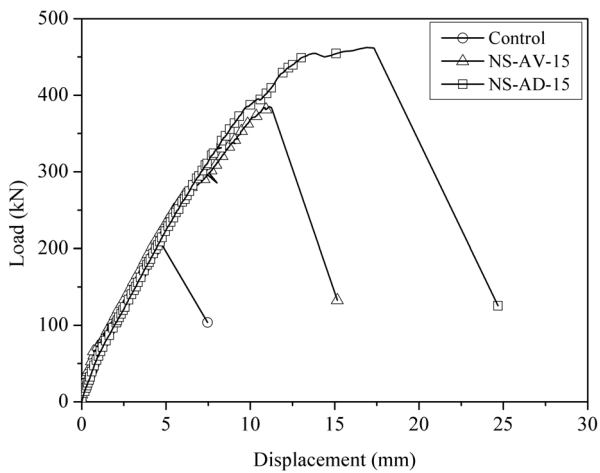


(a) 90°

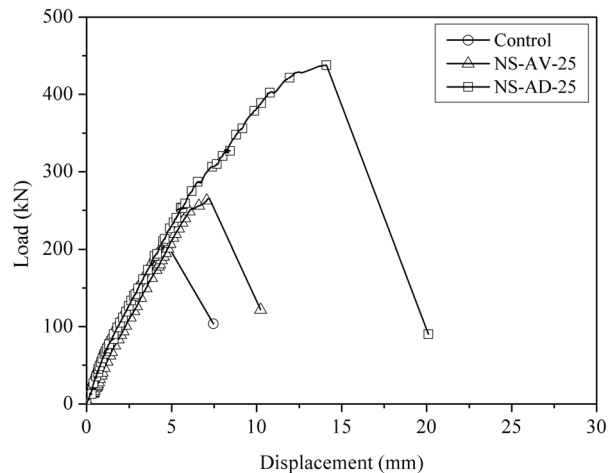


(b) 45°

Fig. 6 Comparison of load-displacement curves with respect to spacing of CFRP strips



(a) 150mm



(b) 250mm

Fig. 7 Comparison of load-displacement curves with respect to angle of CFRP strips

낸 것이다. 그림에서 수직으로 스트립을 전단 보강한 실험체들은 매립간격에 관계없이 탄성구간에서 급작스럽게 파괴가 발생하며, 강성이 거의 일정함을 보이고 있다. 최대하중은 매립간격이 감소할수록 거의 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다. NS-AV-25, NS-AV-20, 그리고 NS-AV-15의 최대하중은 각각 256.1kN, 320.9kN, 381.1kN으로 보강간격이 50mm씩 감소함에 따라 약 60kN씩 증가하였다. 그러나, NS-AV-15와 NS-AV-10의 최대하중의 차이는 약 5kN으로 보강간격이 150mm 이하로 감소하여도 하중증대 효과는 크지 않음을 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 NS-AV-10 실험체의 파괴가 CFRP 스트립의 파단에 의해 발생한 것이 아닌 슬립에 의해서 발생했기 때문이다. Fig. 6(b)은 스트립을

45° 경사로 매립한 NS-AD 시리즈 실험체의 하중-변위 관계를 보이고 있다. 그림을 통해서 스트립을 경사로 보강한 경우 최대하중 및 변형능력이 기준실험체 Control과 비교하여 크게 개선됨을 알 수 있다. NS-AD-15와 NS-AD-25 실험체의 최대하중은 각각 461.9kN과 437.8kN으로 보강간격이 100mm 감소하였음에도 약 20kN 정도밖에 최대하중의 차이가 발생하지 않았다. 한편, NS-AD-15와 NS-AD-25의 최대변위는 기준실험체 Control과 비교하여 각각 273%와 203%의 증가율을 보여, 매립간격 100mm 감소에 변위성능이 약 70%까지 증가하는 결과를 나타내었다.

Fig. 7에 CFRP 스트립의 보강각도에 따른 하중-변위 곡선의 비교를 나타내었다. Fig. 7(a)는 보강간격은 150mm

로 동일하지만 보강방법이 각각 수직보강과 경사보강인 NS-AV-15와 NS-AD-15 실험체의 하중-변위 곡선을 보이고 있다. NS-AV-15의 하중-변위 곡선은 거의 직선적인 거동을 하다가 취성적으로 파괴되었지만, NS-AD-15는 인장철근의 항복이후 처짐이 급격하게 증가하는 과정에 연성거동을 보이다가 최종파괴가 발생함을 보이고 있다. NS-AV-15에 비해 NS-AD-15의 최대하중과 최대변위가 각각 21%, 53% 크게 나타났다. Fig. 7(b)는 보강간격은 250mm로 동일하지만 보강방법이 각각 수직보강과 45도 경사보강인 NS-AV-25와 NS-AD-25 실험체의 하중-변위 곡선을 보이고 있다. NS-AV-25의 하중-변위 곡선은 거의 직선적인 거동을 보이다가 급작스럽게 파괴되었지만, NS-AD-25는 인장철근의 항복이후 파괴되는 거동을 보이고 있다. NS-AV-25에 비해 NS-AD-25는 최대하중 및 최대변위가 각각 71%, 95% 크게 나타났다. 즉, 동일한 보강간격으로 CFRP 스트립을 매립하더라도 수직으로 보강하는 것보다는 경사지게 보강하는 것이 전단강도 및 변형성능 개선효과가 더욱 크게 나타남을 확인할 수 있다.

### 3.3 하중-CFRP 변형률 관계

Fig. 8에 실험체의 하중-CFRP 변형률 곡선을 나타내었다. Fig. 8에는 CFRP 스트립에 부착한 변형률 게이지의 위치와 번호도 같이 나타내었다. Fig. 8(a)에는 NS-AV 시리즈 실험체들을 대표해서 NS-AV-25 실험체의 실험 결과를 나타내었다. 전단균열이 발생하기 이전까지 스트립의 변형률은 거의 발생하지 않았으며, 전단균열 발생과

함께 G3 게이지의 변형률이 6000 $\mu\epsilon$ 까지 급격하게 증가하는 것을 Fig. 8(a)을 통해 확인할 수 있다. 이 때 G1과 G2 게이지의 변형률은 1000 $\mu\epsilon$ 로 기여도가 매우 미비함을 보이고 있다. 다른 NS-AV시리즈 실험체들도 NS-AV-25와 유사하게 균열이 발생한 이후 그 균열이 지나는 스트립의 변형률만이 급격하게 증가하는 거동을 보였다. Fig. 8(b)에는 NS-AD 시리즈 실험체들을 대표해서 NS-AD-25 실험체의 하중-CFRP 스트립 변형률 관계를 나타내었다. NS-AD-25에 매립된 스트립의 변형률이 NS-AV-25보다 일찍 증가하기 시작하며, 하중 300kN에서 복부 전단균열이 발생하면서 거의 모든 스트립의 변형률이 급격하게 증가하는 거동을 Fig. 8(b)는 보이고 있다. 하중이 점점 증가하여 전단균열 폭이 확장되면서 게이지 G4의 변형률은 7500 $\mu\epsilon$ 까지 매우 크게 증가한 반면, G2게이지의 변형률은 조금씩 감소하는 snapback 현상이 발생하였다. 최종적으로 NS-AD-25 실험체의 파괴는 G4 게이지가 부착된 CFRP 스트립의 파단으로 발생하였다. 즉, CFRP 스트립을 경사로 매립하는 것이 수직으로 보강하는 것 보다 모든 스트립이 전단균열에 대해 저항할 수 있어 보강효율이 극대화될 수 있음을 알 수 있다.

## 4. RBSN 해석

### 4.1 RBSN 모델

일반적으로 불균질의 취성재료에 대한 균열 및 파괴위치 등 그 파괴기구를 명확히 규명하기는 쉽지 않다. FEM을 비롯한 많은 수치 해석방법들이 취성재료의 파괴거동

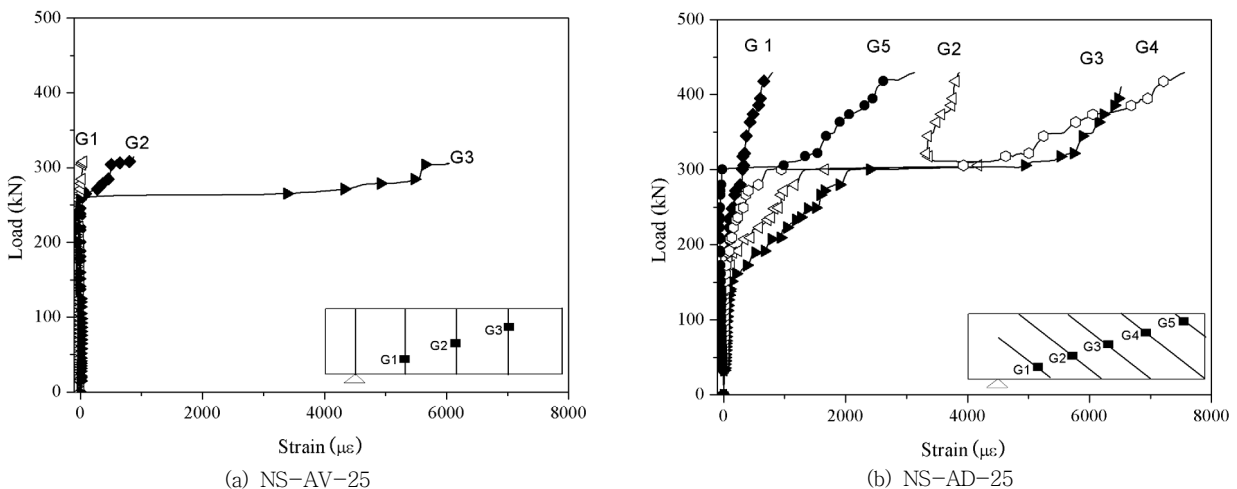


Fig. 8 Comparison of load-CFRP strain curves with respect to angle of CFRP strips

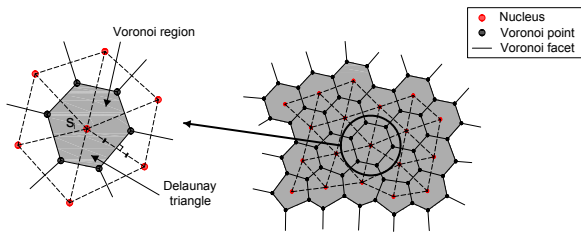


Fig. 9 Voronoi diagram(Bolander and Saito, 1998)

해석에 사용되었으나, 모델형성과 요소의존성 등의 문제점이 제기 되어있다.

RBSN(Rigid-Body-Spring-Network)모델은 개별요소법의 일종으로 체눈형성이 비교적 자유롭고 계산과정이 단순하며 파괴형상을 실제와 가깝게 묘사할 수 있는 장점이 있다. RBSN 모델은 Kawai(1978)에 의해 제안된 강체-스프링모델에 기초한다. 해석대상을 유한개의 강체로 분할하고 각 요소의 경계면을 길이가 0인 스프링들로 연결하여 스프링의 변형에 의해 내력을 전달하게 된다. 그러나 이들 강체들은 해석대상이 변형하여도 여전히 강체로 남아있게 된다. 해석대상의 변형은 각 셀들에 결합된 스프링에 의해서만 발생하며 외부하중의 증가에 따라 강체들은 분리되거나 겹쳐질 수 있다. 일반적으로 강체 형상은 Fig. 9에 나타난 Voronoi diagram에 의해 묘사되며 강체 자유도는 강체의 중심에서 정의된다(Bolander and Saito, 1998; Saito, 1999). Delaunay 삼각형의 무게중심을 연결하여 하나의 Voronoi 강체 요소가 형성된다. 따라서, 각 강체를 구성하는 절점은 임의의 개수를 가지는 강체요소를 구성할 수 있다. Delaunay 삼각망은 분할된 삼각 패치를 내각이 등각에 가까운 정삼각형 형태로 개선함으로써 전체적으로 삼각망을 균일하게 하는 특징이 있다. Fig. 10에 Voronoi영역을 구성하는 구성인자들을 나타내었다. 수직, 접선, 회전스프링들로 구성된 하나

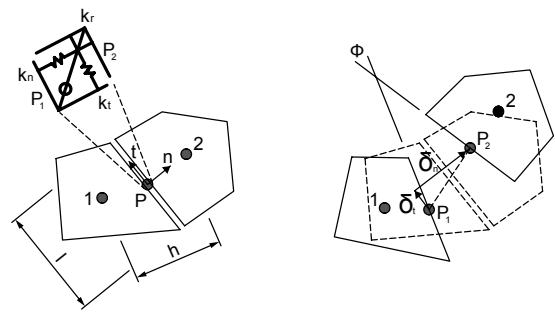


Fig. 10 RBSN model(Bolander and Saito, 1998)

의 스프링 집합은 수직강성( $k_n$ ), 접선강성( $k_t$ ), 회전강성( $k_\phi$ )등을 가지며 식 (1), 식 (2)와 같이 셀 중심간 거리( $h$ )와 셀 경계의 길이( $\ell$ )로 간단히 표현된다(Bolander and Saito, 1998; Saito, 1999).

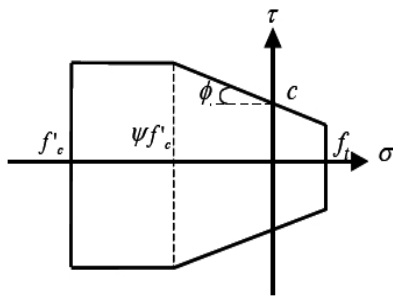
$$k_n = k_t = E t \ell / h \quad (1)$$

$$k_\phi = E \ell^2 / h \quad (2)$$

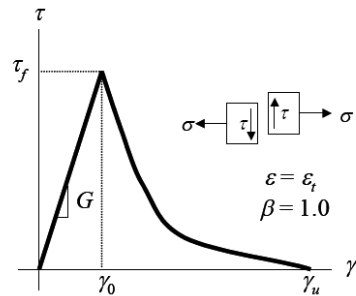
여기서,  $E$ 는 재료의 탄성계수,  $t$ 는 강체의 두께를 나타낸다.

#### 4.2 재료모델

강체 경계면상의 수직 및 전단 스프링에 대한 인장, 압축, 전단-슬립거동 등을 적절히 묘사하기 위해 다양한 재료모델들이 제안되어 있다. 본 해석에서는 압축모델로 2001년 Nakamura와 Higai(2001)가 제안한 재료모델을 적용하였다. 인장모델로는 취성재료에서 주로 채용하고 있는 bi-linear모델을 사용하였다. 접선방향의 전단스프링에 대해서는 Saito(1999)가 제안한 파괴기준을 적용하였다. Saito의 파괴기준은 Fig. 11(a)의 형상을 갖으



(a) Mohr-Coulomb criterion(18)



(b) Shear softening model

Fig. 11 Shear model of concrete



며, 전단균열면에서의 전단응력-변형률 관계는 Fig. 11 (b)에 나타난 전단연화모델을 적용하였다.

Fig. 11(a)에서  $f'_c$ 는 콘크리트의 압축강도,  $c$ 는 콘크리트의 점착력,  $\phi$ 는 내부마찰각,  $\psi$ 는 재료의 파괴에 관련된 특성값을 나타낸다. 또한, Fig. 11(b)에서  $G$ 는 전단강성,  $\lambda$ 는 손상정도를 나타내는 재료인자,  $\tau_f$ 는 재료의 전단강도,  $\gamma_0$ 는 전단강도 발현시의 전단변형률을 나타낸다. 철근의 재료모델은 Hsu(1993)가 제안한 모델을 적용하였으며, 전단 보강재로 사용된 CFRP 스트립은 항복 변형률 도달이후 즉시 파단되는 완전취성재료로 고려하였다. 또한, 철근과 보강재의 콘크리트와의 부착관계는 Shima와 Okamura(1987)에 의해서 제안된 부착모델을 적용하였다.

#### 4.3 NSM 전단보강 RC보 해석결과

Fig. 12에 실험결과와 RBSN 해석 결과를 비교하여 나타내었다. Control 실험체의 하중-변위곡선을 RBSN 해석은 비교적 정확하게 예측함을 알 수 있다. CFRP 스트립을 수직(90°), 200mm 간격으로 보강한 NS-AV-20에 대한 비교를 보면, RBSN해석은 보강재를 수직으로 보강한 실험체의 초기강성을 잘 예측하고 있으며, 최대하중을 비교적 정확하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 반면, CFRP 스트립을 수직(90°)으로 150mm와 100mm로 보강한 NS-AV-10 실험체의 해석결과는 실험결과를 매우 과대평가 하고 있음을 보이고 있다. NS-AV-15와 NS-AV-10 실험체 모두 최종파괴시 CFRP 스트립에 슬립이 발생한 실험체이다. 그러나 NS-AV-15 실험체는 복부에 사인장 균열이 발생한 이후 균열폭이 증가하는

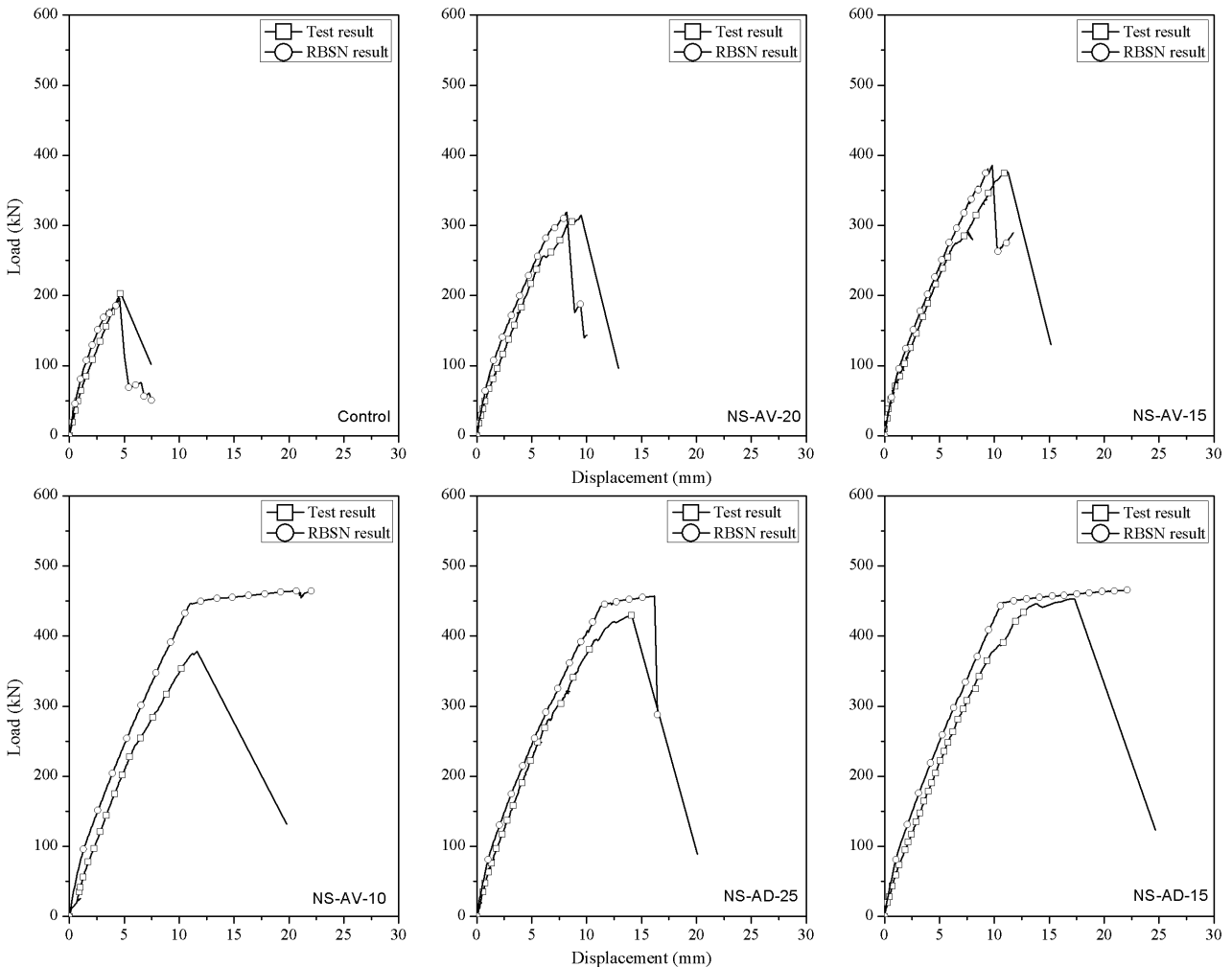


Fig. 12 Comparison of test results and RBSN analysis results

중에 슬립이 발생하였지만, NS-AV-10 실험체는 복부에 사인장 균열이 전혀 발생하지 않은 상태에서 급작스럽게 슬립이 발생하면서 복부에 사인장 균열이 형성되었다. 두 실험체의 슬립발생 시점의 차이는 거동에 큰 차이를 나타내지만 RBSN 해석은 부착-슬립 거동을 적절하게 예측하지 못하고 있다. 특히, NS-AV-10 실험체의 거동을 RBSN 해석은 인장철근의 항복이 선행되는 휨파괴 거동으로 예측하고 있다. 이러한 전단파괴를 적절하게 예측하기 위해서는 콘크리트에 매립된 CFRP 스트립의 부착-슬립거동을 정확하게 예측할 수 있는 부착모델의 개발이 선행되어야 할 것으로 사료된다.

45° 경사 CFRP 스트립을 250mm와 150mm 간격으로 보강한 NS-AD-25와 NS-AD-15 실험체에 대해 RBSN 해석은 강성 및 최대하중을 다소 과대평가하고 있지만 비교적 유사하게 하중-변위 거동을 예측하고 있다. 특히, NS-AD-25에 대해서는 인장철근이 항복한 이후 스트립의 파단으로 인한 전단파괴가 일어나는 것을 해석적으로 잘 묘사할 수 있음을 보이고 있다. NS-AD-15 실험체에 대한 RBSN 해석은 전단보강이 충분하여 인장철근 항복이후 휨파괴가 진행되는 것으로 예측하여 휨파괴 중에 CFRP 스트립이 파단되면서 전단파괴가 발생한 실험결과와 다소 차이를 보인다. 그러나 이 부분의 거동은 보강 설계 시 큰 의미가 없는 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서 시도한 RBSN모델을 적용한 해석은 유한요소법으로 해석하는데 많은 어려움이 있는 NSM보강 RC부재의 전단 보강 성능 예측에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 13은 실험종료 후의 실험체의 균열형상과 RBSN 해석을 통해 얻어진 균열형상을 비교한 것이다. 균열형상은 전단파괴가 발생한 Test side만을 나타내었다. Fig. 13에서 RBSN 해석은 Control, NS-AV-20, NS-AV-15 실험체의 전단균열에 의한 손상을 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 하지만 이 실험체들 모두에서 인장철근의 뽐힘으로 인한 쪼갬파괴를 RBSN 해석은 매우 과다평가 하는 것으로 나타났으며, 이에 대한 보완을 위해서는 적용한 철근의 부착-슬립 모델의 수정이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이 NS-AV-10 실험체의 경우 CFRP 스트립의 슬립으로 인한 급작스런 전단파괴가 발생하였으나, RBSN 해석은 이를 정확하게 예측하지 못하고 휨균열만이 발생한 결과를 나타내었다. 그러나 RBSN 해석은 부착-슬립에 관한 추가적인 연구가 선행된다면 CFRP 스트립을 매립하여 전단보강 한 실험체의 균열형상을 예측하는데 있어 매우 효과적으로 활용

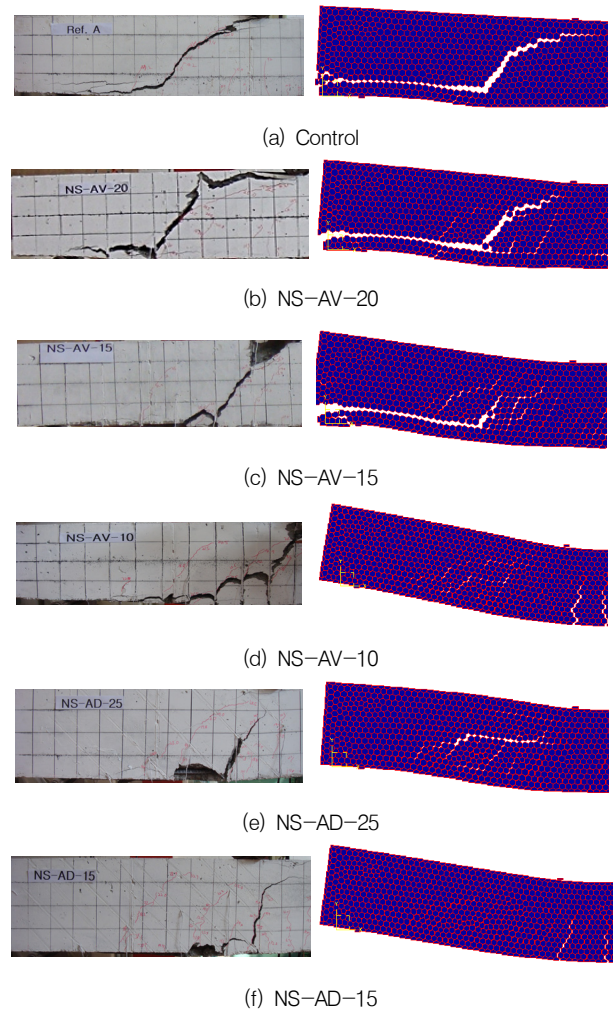


Fig. 13 Comparison of crack shape

될 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 CFRP 스트립을 NSM기법으로 전단 보강한 RC 보에 대한 파괴실험을 통해 전단보강효과를 규명하고, 그 결과와 RBSN 해석결과를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) CFRP 스트립을 수직으로 매립한 NS-AV 시리즈와 45° 경사로 매립한 NS-AD 시리즈 실험체의 전단력은 기준실험체와 비교하여 각각 28.32~86.93%, 119.91~123.57% 증가한 것으로 나타나, NSM 전단보강에서도 수직전단보강보다는 경사전단보강이 우수한 보강성능을 나타냄을 확인하였다.

- (2) CFRP 스트립을 수직으로 매립한 NS-AV 시리즈와 45° 경사로 매립한 NS-AD 시리즈 실험체 최대변위는 기준실험체와 비교하여 각각 55.6~150.4%, 203.4~273.3% 증가함을 보여, 경사보강이 변위성능 개선에도 수직보강보다 큰 효과가 발현됨을 확인하였다. 또한, 기준실험체 및 NS-AV 시리즈 실험체는 복부 사인장 균열에 의한 전단 파괴모드를 나타낸 반면, NS-AD 시리즈 실험체는 인장철근이 항복한 이후 CFRP strip의 파단에 의한 휨-전단 파괴모드를 나타내었다.
- (3) RBSN 해석은 NSM기법으로 전단 보강된 RC보의 전단거동 및 균열형상을 비교적 정확하게 예측하였으나, NS-AV-10과 같이 급작스럽게 CFRP 스트립에 슬립이 발생한 실험체에 대해서는 전단성능을 과대평가하는 경향을 나타내었다. 따라서 추후 철근 및 CFRP 스트립에 대한 부착모델이 개선된다면 NSM 기법으로 보강되는 구조물의 전단성능 평가에 매우 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of Chungbuk National University in 2009)

#### 참고문헌

- 박상렬, "탄소 FRP 슈트로 휨 보강된 R.C 보의 보강효과에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제21권 6A호, 2001, pp.997-1005.
- 박중열, 조홍동, 한상훈, "탄소섬유판으로 휨보강된 철근콘크리트 보의 비선형거동 예측", 대한토목학회논문집, 제24권 1-A호, 2004, pp.9-16.
- 이재훈, 신성진, "전단보강이 없는 FRP RC 보의 전단강도 예측", 한국콘크리트학회논문집, 제22권, 3호, 2010, pp.311-324.
- 임동환, 권영순, "표면매입 및 외부부착 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단 거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회논문집, 제21권 3호, 2009, pp.337-345.
- 임동환, 남민희, "탄소섬유판 (CFRP Strip)으로 보강된 철근 콘크리트 부재의 전단거동", 한국콘크리트학회논문집, 제20권 3호, 2008, pp.299-305.
- Barros, J. A. O., Dias S. J. E., "Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams", Cement and Concrete Composites, vol. 28, No. 3, 2006, pp.276-292.
- Bolander, J., Saito, S., "Fracture Analysis using Spring Networks with Random Geometry", Engineering Fracture Mechanics, vol. 61, 1998, pp.569-591.
- De Lorenzis L., Nanni A., "Bond between near-surface mounted FRP rods and concrete in structural strengthening", ACI Structural Journal, vol. 99, No. 2, 2002, pp.123-133.
- Dias, S. J. E., Barros, J. A. O., "Shear strengthening of RC T-section beams with low strength concrete using NSM CFRP laminates", Cement and Concrete Composites 33, 2011, pp.334-345.
- Hsu, T. T. C., "Unified Theory of Reinforced Concrete", CRC Press, 1993, pp. 205-217.
- Kawai, T., "New Discrete Models and Their Application to Seismic Response Analysis of structures", Nuclear Engineering and Design, vol. 48, 1978, pp.207-229.
- Kishi, N., Zhang G., Mikami, H., "Numerical Cracking and Debonding Analysis of RC Beams Reinforced with FRP Sheet", ASCE, 9:6, 2005, pp.498-507.
- Nanni, A., Di Ludovico, M. and Parretti, R., "Shear Strengthening of PC Bridge with NSM CFRP Rectangular Bars", Adv Struct Engr., vol. 7, No. 4, 2004, pp.97-109.
- Nakamura, H., Higai, T., "Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete", In: Modeling of inelastic behavior of RC structures under seismic load, ASCE, 2001, pp.471-487.
- Neale, K. W., Ebead, U. A., Abdel Baky, H. M., Elsayed, W. E. and Godat, A., "Modelling of Debonding Phenomena in FRP-Strengthened Concrete Beams and Slabs", International Institute for FRP in Construction, BBFS 2005.
- Rizzo, A., De Lorenzis, L., "Modeling of debonding failure for RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement", Construction and Building Materials, vol. 23, 2009, pp.1568-1577.
- Rizzo, A., De Lorenzis, L., "Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement", Construction and Building Materials, vol. 23, 2009, pp.1555-1567.
- Saito, S., "Fracture Analyses of Structural Concrete using Spring Network with Random Geometry", Doctoral Thesis, Department of Civil Engineering, Kyushu University, 1999.
- Shima, H., Okamura, H., "Bond-Slip-Strain Relationship of Deformed Bars Embedded in Massive Concrete", Proceeding of the Japan Society of Civil Engineers, JSCE, vol. 6, No. 378, 1987, pp.165-174.
- Tanarslan H. M., "The effects of NSM CFRP reinforcements for improving the shear capacity of RC beams", Construction and Building Materials, vol. 25, 2011, pp.2663-2673.
- Wu, Z., Li, W., Sakuma N., "Innovative externally bonded FRP/concrete hybrid flexural members", Composite Structures, 72, 2006, pp.289-300.

(접수일자 : 2011년 4월 21일)

(수정일자 : 2011년 6월 21일)

(심사완료일자 : 2011년 7월 2일)

---

## 요 지

본 연구에서는 CFRP 표면부착 공법의 대안으로 최근에 관심을 끌고 있는 NSM(Near Surface Mounted)기법으로 전단 보강된 RC 부재의 전단강도를 평가하기 위한 실험과 해석을 수행하였다. 전단철근이 없는 7개의 실험체에 대해 4점 휨실험을 실시하였다. 실험변수로는 CFRP 스트립의 경사(45°, 90°)와 스트립의 간격(250mm, 200mm, 150mm, 100mm)이 고려되었다. 실험적 연구를 통해 NSM공법으로 전단 보강된 RC 부재의 전단강도와 파괴모드에 대한 각 실험변수의 영향을 평가하였다. 실험결과는 45° 경사로 스트립을 보강한 실험체들은 스트립의 파단으로 파괴된 반면, 수직으로 스트립을 보강한 실험체들은 스트립의 슬립으로 파괴됨을 보였다. 또한, 45° 경사 스트립이 수직 스트립보다 전단저항력 증가시킬뿐만 아니라 파괴시의 처짐을 크게 증가시키는 것으로 나타났다. 추가적으로 RBSN 해석은 NSM기법으로 전단 보강된 RC 부재의 균열형상 및 하중-처짐관계를 적절하게 예측하였다.

**핵심 용어** : 탄소섬유, 표면매립공법, 전단보강, RBSN, 철근콘크리트

---