Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 19, No. 6, pp. 727~734, December, 2007

# 2방향 슬래브의 성능 향상을 위한 집중 배근된 FRP 바의 적용

이주하[1] · 양준모[1] · 윤영수[1]*

[1]고려대학교 건축사회환경공학과

# Application of Concentrated FRP Bars to Enhance the Capacity of Two-Way Slabs

**Joo-Ha Lee[1], Jun-Mo Yang[1], and Young-Soo Yoon[1]***

[1]Dept. of Civil Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**ABSTRACT** The influence of the differences in the physical and mechanical properties between fiber-reinforced polymer (FRP) and conventional steel, concentrated reinforcement in the immediate column region, as well as using steel fiber-reinforced concrete (SFRC) in the slab near the column faces, on the punching behavior of two-way slabs were investigated. The punching shear capacity, stiffness, ductility, strain distribution, and crack control were investigated. Concentrating of the slab reinforcement and the use of SFRC in the slab enhanced the punching behavior of the slabs reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars. In addition, the test results of the slabs with concentrated reinforcement were compared with various code equations and the predictions proposed in the literature specifically for FRP-reinforced slabs. An appropriate method for determining the reinforcement ratio of slabs with a banded distribution was also investigated to allow predictions to properly reflect the benefit of the slab reinforcement concentration.

**Keywords :** fiber reinforced polymers, concrete slabs, steel fibers, punching shear

## 1. 서 론

최근 fiber-reinforced polymer (FRP)의 부식에 대한 높은 저항성으로 인해 콘크리트 구조물의 보강재로서 수요가 급격히 증가하고 있다. 그러나 FRP는 기존의 철근과 물리적, 역학적으로 차이가 있어 FRP 보강재의 사용은 여전히 도전적인 분야로 남아 있다. 사실 일본 (JSCE 1997)[1], 캐나다(CSA 2002)[2] 그리고 미국 (ACI 2006)[3] 등과 같은 소수의 몇몇 나라만이 FRP를 이용한 콘크리트 구조물의 설계와 시공에 대한 기준이 마련되어 있으나, FRP의 실용적 활용에 대한 연구는 매우 미비한 실정이다. FRP로 보강된 콘크리트 휨부재에 대한 연구는 광범위하게 진행된 반면 FRP로 보강된 2방향 슬래브의 펀칭 전단에 대한 연구는 상대적으로 매우 저조하다. 이와 더불어 기둥 주변의 슬래브에 철근을 이용한 집중 배근 효과에 대한 소수의 연구가 진행되긴 했지만, FRP 바의 집중 배근에 대한 연구는 전무한 실정이다. 선행 연구자들 (Hawkins et al.,[4] Ghannoum[5], McHarg et al.,[6] 그리고 Yoon et al.[7])의 연구 결과, 집중 배근은 부재의 펀칭 전단강도를 증진시키는 것으로 확인되었다. 그러나 대부분의 설계기준들은 이러한 효과를 반영하지 못하고 있다. 단지 CSA[8]와 BS Standard[9]에서 이와 관련한 규준을 제안하고 있는데, 그 중 CSA Standard는 기둥면으로부터 슬래브 두께의 1.5배에 해당하는 슬래브 폭 이내에 상부 휨철근의 최소량을 집중 배근 시키도록 규준하고 있다. BS Standard에서는 펀칭 전단강도 예측식에 필요한 평균 휨철근비를 기둥면으로부터 슬래브 유효깊이의 1.5배인 곳까지에 대해 산정한다.

2방향 슬래브의 펀칭 전단 거동을 향상시켜주는 또 하나의 방법은 바로 강섬유 콘크리트 (SFRC)를 이용하는 것이다. 많은 연구자들의 연구를 통해 강섬유를 첨가하는 것이 인성 (toughness)과 충격 및 피로 하중에 대한 저항성을 향상시킨다는 것은 이미 밝혀져 있다. 하지만 FRP 보강 슬래브에 SFRC를 타설하여 그 효과를 확인한 연구 사례는 거의 없다. 단지 Banthia et al.[10]의 연구 논문에서 FRP 보강 슬래브에 SFRC를 사용하는 것이 최대 하중과 에너지 흡수율을 증진시켜 준다고 밝힌 바 있다.

본 연구에서는 일반 철근과 GFRP 바로 배근된 각각의 슬래브의 거동 비교, 슬래브 상부 휨보강재의 기둥 인접부 집중 배근 효과, 그리고 SFRC 사용 효과 등을 파악하였다. 또한 집중 배근한 시험체의 실험 결과를 다양한 설계기준 및 기존 연구 문헌의 펀칭 전단 예측식과 비교하였다. 이에 더하여 펀칭 전단 예측식이 집중 배근

*Corresponding author E-mail : ysyoon@korea.ac.kr
Received April 13, 2007, Accepted August 31, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

에 따른 이점을 반영할 수 있도록 집중 배근 슬래브의 적정한 철근비 산정법을 제안하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 시험체 상세

Fig. 1에 2방향 슬래브 시험체 설치 모습이 나타나있다. 시험체는 두께 150 mm의 2.3 m 정방형 슬래브와 슬래브 중앙의 상·하부로 길이 300 mm의 225 mm 정방형 기둥으로 구성된다. 시험체의 하부 기둥은 강재 블록에 의해 지지되었다. 또한 시험체에 등분포하중을 모사하기 위해 슬래브 외곽 8지점에 집중하중을 적용하였으며, 슬래브의 각 변에 인접한 750 mm의 하중 지점 사이로 하중 적용을 위해 슬래브 아래에 강재보 (steel distribution beam)가 설치되었다. 그리고 각 강재보와 연결된 4개의 강재봉 (steel rod)에 각각 유압잭을 설치한 후, 각 유압잭은 다시 하나의 유압 펌프에 연결되어 제어함으로써 모든 하중 지점에 동일한 하중이 작용하도록 하였다. 단조하중 (monotonic loading)을 천천히 가함과 동시에 하중, 처짐, 변형률을 자동으로 기록하였다. 또한 주요 하중 단계마다 균열의 형태와 균열폭을 기록하였다. 작용 하중은 각 유압잭에 설치되어 있는 로드셀을 통해 기록되었으며, 슬래브의 처짐은 8개의 하중 지점에 설치된 LVDT (linear voltage differential transformer)를 통해 측정되었다. 슬래브의 기둥에 대한 상대 처짐과 펀칭 전단파괴의 시작을 모니터하기 위해 슬래브 밑면의 기둥면 가까이에 추가로 4개의 LVDT를 설치하였다. 스트레인게이지는 슬래브 상부 철근의 변형률을 측정하기 위해 슬래브의 양방향으로 기둥면과 나란한 열을 따라 매설되었다 (Fig. 2).

Fig. 2는 슬래브 상부와 하부의 철근 배근 상세를 보여준다. 실험의 주요 변수는 슬래브 보강 재료, 기둥 인접부 슬래브에의 집중 배근, 그리고 강섬유콘크리트의 사용이다. 시험체는 보강 재료의 종류에 따라 일반 철근을 사용한 S series와 GFRP 바를 이용한 GF series로 나뉜다. 상부 철근은 균등한 간격으로 배근되거나 집중 배근되는 형태를 가졌다. 시편명에서 U와 B는 기둥 인접부

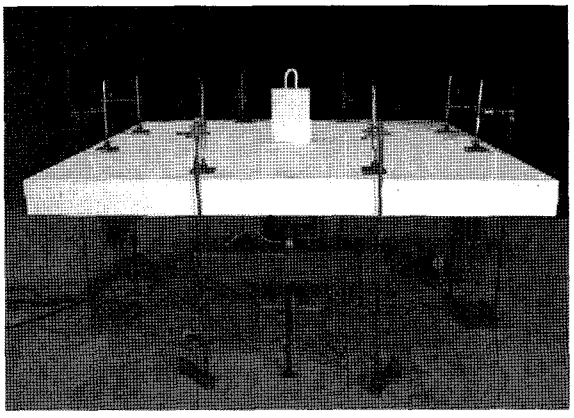


**Fig. 1** Test setup for punching shear test of slabs

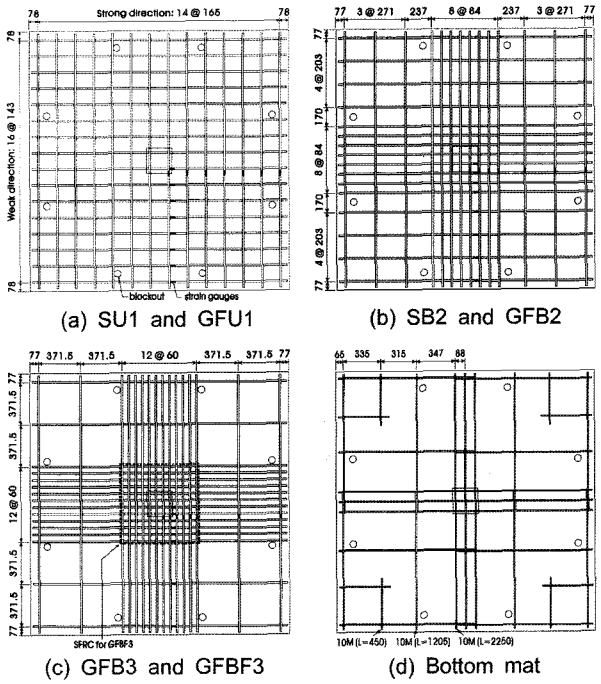



**Fig. 2** Reinforcement and strain gage layout

의 철근 배근 상태를 표시하는 것으로 U (uniform)는 균등 배근, B (banded)는 집중 배근되었음을 의미한다. 그리고 시험체에 부여된 숫자는 기둥으로부터 슬래브 두께의 1.5배인 지점까지의 철근비를 나타낸다. 예를 들어 SU1과 GFB3은 각각 약 1%의 철근비로 균등 배근된 일반 철근 보강 슬래브와 약 3%의 철근비로 집중 배근된 GFRP 보강 슬래브를 의미한다. Fig. 2 (c)에서 보는 바와 같이, GFBF3은 GFB3과 동일한 배근 형태를 가지나 SFRC가 기둥면부터 슬래브 유효깊이의 2배인 지점까지 부분 타설되었음을 나타낸다. 슬래브 상부에 보강근이 균등 배근된 시험체들 (SU1, GFU1)의 철근비는 0.0117이다. SB2와 GFB2는 슬래브 상부 보강근 중 8개가 집중 배근 폭에 배치된 것으로 철근비는 0.0214이다. GFB3과 GFBF3은 12개의GFRP 바가 집중배근된 것으로 철근비는 0.030이다. 휨철근비는 시험체의 휨파괴를 방지하면서 펀칭 전단에 의한 파괴를 유도할 수 있도록 결정되었다. 주목할 점은, 모든 시험체는 유사한 휨강도를 가지도록 설계하여 각 시험체의 펀칭 전단 거동의 객관적인 비교가 가능하도록 하였다. 모든 시험체의 슬래브 하부는 일반 철근을 사용한 동일한 배근 상세를 가진다 (Fig. 2 (d)). 모든 시험체의 슬래브 유효깊이는 110 mm 이다.

SU1과 SB2는 Ghannoum[5]에 의해 수행된 실험 결과를 이용하였다 (문헌상의 원 시편명: S1-U, S1-B). SU1과 SB2는 각각 GFU1과 GFB2와 동일한 배근 상세를 가진다. 그리고 SU1과 SB2에 사용된 슬래브 콘크리트 강도 역시 GFU1 및 GFB2의 강도와 유사하였다.

### 2.2 재료 특성

슬래브의 일반 강도 콘크리트는 150×300 mm, 기둥의

고강도콘크리트는 100×200 mm 공시체로 표준 압축강도 시험이 수행되었으며, 3등분점 재하 시험을 통해 휨강도를 구하였다. Table 1에 시편에 사용된 콘크리트의 물성이 나타나있다. 또한 본 실험에서는 GFBF3의 기둥 인접부 슬래브에 타설할 SFRC의 강섬유 혼입률을 체적당 0.5%로 선택하였다. 사용된 강섬유는 30 mm 길이의 갈고리형으로 지름 0.5 mm, 최대 인장강도 1,200 MPa이다. SFRC의 특성이 Table 1에 정리되어 있다. Table 2는 시험체에 사용된 일반 철근과 GFRP 바의 물성을 정리한 것이다. GFRP 바에 대해서는 공급 업체에서 제공하는 물성 자료를 이용하였다[11]. 부착력 증진을 위해 모래로 표면코팅 처리된 GFRP 바를 사용하였다 (Fig. 3).

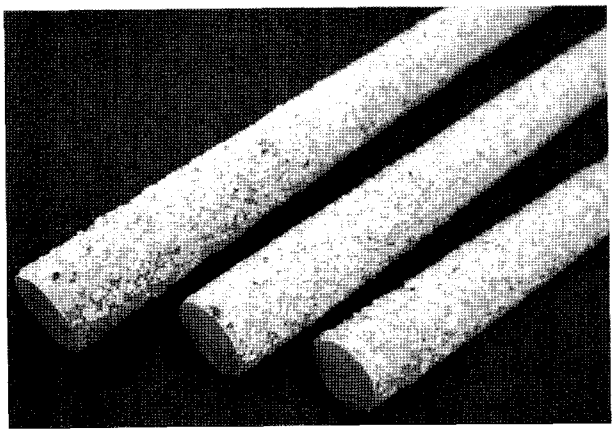


**Fig. 3** Glass FRP sand-coated reinforcing bars

## 3. 실험 결과 및 토의

### 3.1 하중-처짐 관계

Fig. 4는 총 전단력과 슬래브의 평균 처짐과의 관계를 나타낸 것이다. 총 하중은 8개의 하중 재하점의 하중과 사하중 (약 21 kN)을 더하여 구했다. 처짐량은 8개의 재하 지점에서 측정된 값의 평균치이다. Table 3은 최초 균열 발생시, 보강재의 최초 항복시 그리고 최대 하중 작용시의 총 전단력과 처짐량을 정리한 것이다. GFRP 바는 재료의 특성상 항복 구간이 없으므로 허용사용응력 하에서의 GFRP 바의 변형률 0.0045를 항복 상태로 간주하여 그때의 하중과 처짐을 기록하였다[2,12].

Table 3은 모든 시험체의 강성을 정리한 것이다. 하중-처짐 관계 곡선에서 최초 균열점과 최초 항복점을 이은 직선의 기울기가 균열 후 강성 (post cracking stiffness)을 나타낸다. Table 3과 Fig. 4를 통해 알 수 있듯이, 시험체의 강성은 보강근의 탄성계수와 기둥 주변의 철근비에 직접적인 영향을 받는다. 균열이 발생하기 전까지는 모든 슬래브가 동일한 거동을 보이나 균열발생 이후, GF series는 S series와 비교하여 강성이 현저히 저하된다. 휨보강근의 집중 배근이 슬래브의 강성을 증진시켜준다는 것은 GFB2와 GFB3의 강성이 GFU1 보다 각각 7, 23% 증가된 것을 통해 확인 할 수 있다. 뿐만 아니라 SB2 역시 SU1 보다 강성이 16% 증가되었다. 하지만 GFBF3과 GFB3의 하중-처짐 관계 곡선의 기울기를 보면 GFB3의 파괴시까지 거의 동일한 것으로 보아 SFRC의 사용이 강성 증진에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다 (Fig. 4). 일반적으로 시험체의 연성은 슬래브 휨철근의 최초 항복시 처짐에 대한 최대 하중에서의 처짐의 비로 정량화 할

**Table 1** Concrete properties

| Specimen | $f'_c$(MPa) | $\varepsilon'_c$ ($\mu\varepsilon$) | $f_r$ (MPa) |
|---|---|---|---|
| S series | 37.2 | 2248 | 3.5 |
| GF series (column) | 80.3 | 2490 | 8.9 |
| GF series (slab) | 36.3 | 1936 | 4.4 |
| SFRC | 33.8 | 1620 | 3.9 |

**Table 2** Properties of GFRP and steel bars

| Designation | Area ($mm^2$) | $E_r$ (GPa) | $f_y$ (MPa) | $f_{fu}$ or $f_{su}$ (MPa) | $\varepsilon_y$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| GFRP #5 | 198 | 48.2 | N/A | 683 | $\varepsilon_{fy}$ = 1.58 |
| Steel 10M | 100 | 200 | 454 | 676 | 0.25 |
| Steel 15M | 200 | 200 | 445 | 588 | 0.23 |

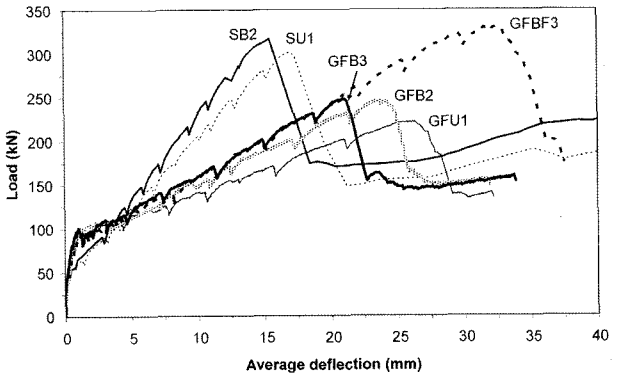



**Fig. 4** Load vs average deflection responses

**Table 3** Summary of test results

| Specimen | $\rho_{band}$ (%) | $P_{cr}$ (kN) | $P_y$* (kN) | $P_u$ (kN) | $\Delta_{cr}$ (mm) | $\Delta_y$* (mm) | $\Delta_c$ (mm) | Post cracking stiffness (kN/mm) | Ductility ($\Delta_u/\Delta_y$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SU1 | 1.18 | 56 | 203 | 301 | 0.75 | 9.82 | 16.95 | 16.21 | 1.73 |
| SB2 | 2.15 | 58 | 211 | 317 | 0.80 | 8.93 | 15.44 | 18.82 | 1.73 |
| GFU1 | 1.18 | 81 | 163 | 222 | 0.72 | 14.16 | 26.15 | 6.10 | 1.85 |
| GFB2 | 2.15 | 101 | 186 | 246 | 1.37 | 14.37 | 23.39 | 6.54 | 1.63 |
| GFB3 | 3.00 | 87 | 166 | 248 | 1.23 | 11.74 | 20.93 | 7.52 | 1.78 |
| GFBF3 | 3.00 | 95 | 169 | 330 | 1.36 | 11.13 | 32.43 | 7.57 | 2.91 |

* For the specimens reinforced with GFRP bars, the load and deflection at 0.0045 of the GFRP bar's strain were taken to correspond to the yield.

수 있다. 실험 결과 SFRC는 슬래브의 연성을 상당히 증진시킨다. 기둥 주변 구역에만 제한적으로 SFRC를 타설한 GFBF3의 경우, GFB3에 비해 63% 정도의 부재 연성이 증진되었다. 그러나 그 외의 실험 변수인 기둥 주변의 철근비나 보강재의 종류는 시험체의 연성에 뚜렷한 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 모든 시험체는 펀칭 전단에 의해 취성적인 파괴가 발생하였다. 이는 GFRP 바로 보강된 슬래브 하부에 설치한 LVDT에 의해 측정된 처짐과 하중과의 관계 곡선을 통해서도 분명히 나타난다 (Fig. 5). 모든 시험체가 동일한 휨강도를 가지도록 설계되었음에도 불구하고, GFRP 바를 사용한 경우에는 일반 철근을 사용한 경우보다 낮은 펀칭 전단강도를 보였다. 이는 GFRP 바의 낮은 탄성계수로 인해 콘크리트의 압축부가 작아짐에 기인한다. 게다가 GFRP의 낮은 탄성계수는 유효 단면 2차 모멘트를 감소시켜 상대적으로 더 큰 처짐량을 발생시킨다.

균등 배근된 시험체에 비해 집중 배근된 시험체의 펀칭 전단강도가 더 크게 나타났다. 집중 배근된 경우, 슬래브에 작용하는 휨모멘트에 더욱 효과적으로 저항할 수 있어서 더 작고 균일한 변형률을 유도한다. 그러나 GFB3의 경우 GFB2에 비해 더 밀집한 집중 배근이 되었지만, 두 시편은 유사한 극한하중을 보임에 주목할 필요가 있다. 즉, 등가 철근비 ($\rho E_f / E_s$) 0.5% 이상의 FRP 보강은 슬래브의 펀칭 전단강도 증진에 비효율적이다. 이러한 경향은 Matthys와 Taerwe의 실험 결과를 통해서도 확인할 수 있다[13]. 이는 FRP 보강 슬래브의 펀칭 전단강도 예측식에서 평균 휨철근비에 대해 한계값을 두는 것이 필요함을 내포한다. 현재 BS8110-97[9]과 JSCE[1]만이 평균 휨철근비에 대한 제한 규정을 가지고 있다.

강섬유의 첨가는 보강재의 집중 배근보다 펀칭 전단강도 증진에 더욱 효과적인 것으로 확인되었다. GFBF3은 GFB3에 비해 상당히 큰 펀칭 전단강도를 보였으며 심지어 일반 철근으로 집중 배근된 SB2 보다도 뛰어난 성능을 보였다. 이는 기존의 일반 철근을 대신하여 FRP 바를 사용할 경우 발생할 수 있는 문제점들에 대하여 SFRC의 사용이 그 해결책이 될 수 있음을 시사한다.

### 3.2 GFRP 바의 변형률 분포

Fig. 6은 슬래브의 유효깊이가 더 큰 강방향의 GFRP 바와 그 내측으로 배근된 약방향의 GFRP 바에 대한 최대하중에서의 변형률 분포를 나타내고 있다 (strain gage의 위치 상세는 Fig. 2 참고). 모든 슬래브의 기둥 인접 구역에서 약방향의 변형률이 강방향에 비해 더 높았다. 이는 약방향과 수직하게 발생한 균열의 폭이 일반적으로 더 컸던것과 일치하는 결과이다.

GFRP 바가 균등 배근된 GFU1는 기둥 인접 구역이 그 외곽부보다 더 큰 변형률이 관찰되었다. GFU1에서 두 구역의 변형률 차이가 상당히 컸는데, 이는 GFRP 바로 균등 배근한 시험체의 경우 슬래브의 2방향 작용으로 인해 작용 모멘트가 최대인 기둥면 근처에서 변형률이 국부적으로 집중되는 경향이 있음을 나타낸다. 이와 반대로 집중 배근을 실시한 시험체의 경우에는 일반적으로 슬래브의 전체 폭을 따라 더 균일한 변형률이 관찰되었다.

GFBF3에서 관측된 최대 변형률은 0.0068로 이는 GFRP 바의 인장파괴 변형률의 약 43%에 해당한다. 하지만 SFRC가 최대 하중에서 GFRP 바의 변형률에 미치는 효과는 미미한 것으로 판단된다.

### 3.3 균열 및 파괴 양상

Fig. 7은 최대 하중에서의 GF series의 균열 양상을 도시한 것이다. 모든 GF series에 대해, 최초 균열은 슬래브 상부 보강근 중 내측의 GFRP 바에 수직한 방향으로 슬래브-기둥 접합부에서 발생하였고 곧이어 이와 유사한 양상으로 외측의 GFRP 바에 수직한 방향으로 균열이 발생하였다. 그 후에 기둥 근처에서 방사형 균열이 발생하여 슬래브 가장자리로 진전되었다. 이와 동시에 기둥 근처에서는 방사 균열을 연결하는 원주형 균열이 발생하였다. SU1은 GF series와 유사한 균열양상을 보인 반면 SB2에서는 철근비와 휨응력이 더 작은 가장자리부터 균열이 발생되어 기둥 쪽으로 진전되는 양상을 보였다. GFRP 바가 집중 배근된 슬래브의 경우에는, 일반 철근으로 집중 배근된 SB2의 균열 양상과는 반대로 균열이 기둥으로부터 슬래브의 가장자리로 진전되는 양상을 보

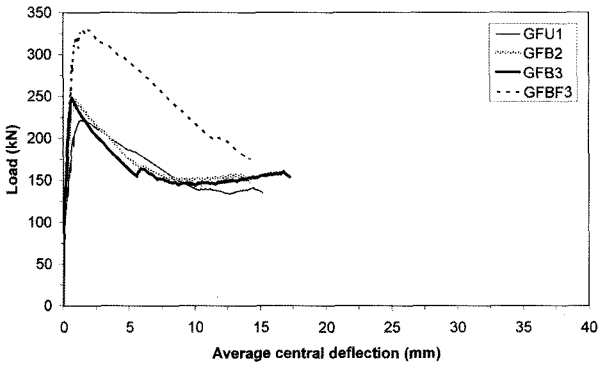



**Fig. 5** Load vs average central deflection responses

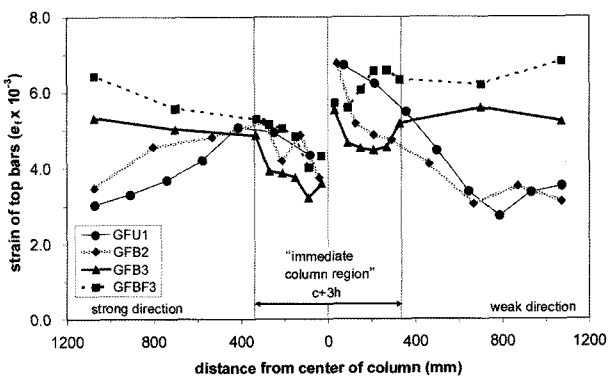



**Fig. 6** Strains in the reinforcing bars at peak load

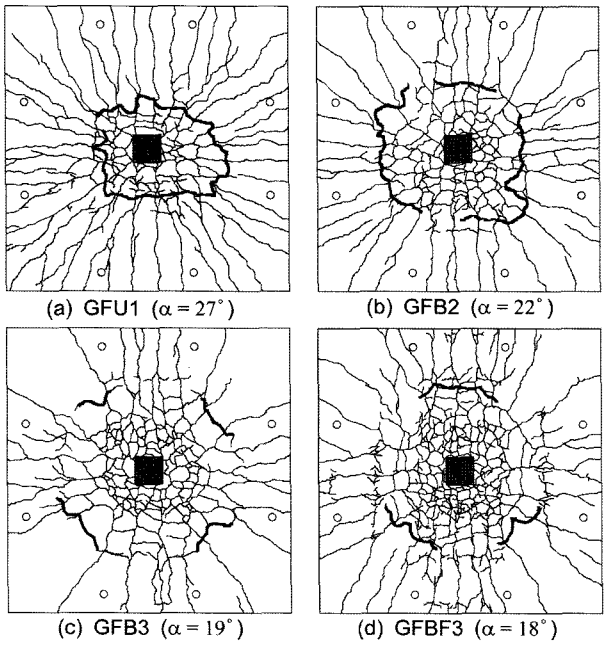



**Fig. 7** Crack patterns at peak load (α = punching crack inclination)

였다. 이러한 현상은 GFRP 바를 사용한 모든 시험체가 상대적으로 매우 낮은 등가 철근비를 가짐으로해서 강성이 저하되었기 때문이다.

Fig. 8는 기둥 인접부와 그 외곽부의 최대 균열폭 변화를 슬래브 처짐량에 따라 나타내고 있다. GF series가 S series와 비교할 때 기둥 인접 구역에서 더 많은 균열이 발생되었다. Figs. 7과 8(a)에서 볼 수 있듯이, 보강 재료의 종류에 상관없이 슬래브의 상부 휨보강근을 기둥 주변에 집중 배근한 경우 기둥 인접부에서 많은 수의 미세균열을 유도하여 양호한 균열 분포 양상을 보였다. 반대로, Fig. 8(b)와 같이, 기둥 인접 구역에 집중 배근된 시편의 경우 외곽부에서는 상대적으로 철근 배근 간격이 커서 넓은 균열 폭이 발생하였다.

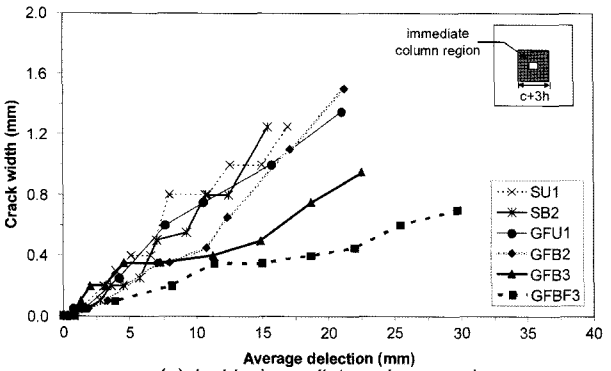
GFBF3은 기둥 인접부의 SFRC로 인해 균열폭이 작고 균열이 고르게 분포하는 등 훌륭한 균열 제어 효과를 보였다. 이는 콘크리트에 혼입된 강섬유가 하중 증가에 따른 균열의 진전을 억제하고 균열물림효과 (bridging of cracks)를 유발하기 때문이다.

휨보강근의 변형률에 따르면 정착파괴는 발생하지 않은 것으로 보인다. 또한 Fig. 9에서 보는 바와 같이, 실험 종료 후 GFRP 바의 표면 상태를 조사해 본 결과, 파괴 이후에도 GFRP 바의 표면을 따라 콘크리트가 박리된 현상은 관찰되지 않았다. 즉, 모래로 표면 처리가 된 GFRP 바의 경우 우수한 부착 성능을 보이며 정착 파괴 방지에 효과적임을 확인 할 수 있다.

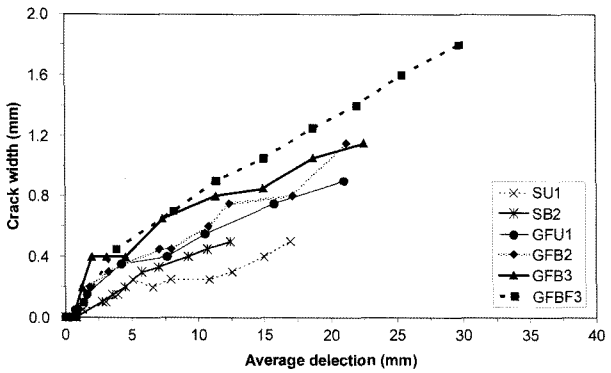
모든 슬래브는 전형적인 펀칭 파괴 양상을 보였다. 펀칭 파괴시 펀칭 콘 (cone)의 윤곽은 Fig. 7에서 굵은 선으로 나타냈다. 모든 시험체가 기둥면의 슬래브 압축부로부터 기둥에서 어느 정도 떨어진 지점의 슬래브 인장부까지 이어지는 경사진 파괴면을 보였다. 전단파괴면은 기둥근처의 휨보강근 집중 배근에 영향을 받았다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 집중 배근될수록 전단파괴면이 기둥에서 더 멀리 떨어진 곳에서 일어나 펀칭각이 작게 나타났다.

### 3.4 펀칭 전단강도 예측식 비교

Table 4에 집중 배근이 실시된 슬래브에 대한 실험값과 설계기준 및 문헌에서 제시한 공칭전단강도 예측값을 비교하였다. 이를 위해 GFB2와 GFB3의 실험 결과 외에도 Ghannoum[5] 및 McHarg et al.[6]의 실험 자료가 활용되었다. 이 때 타 연구자에 의해 수행된 시험체는 모두 일반 철근으로 보강되었으나, 슬래브 두께와 피복, 유효깊이, 그리고 기둥의 크기와 모양 등 시험체의 치수가 GF series와 동일하였다. 모든 시험체는 펀칭 파괴가 발




(a) Inside immediate column region




(b) Outside immediate column region

**Fig. 8** Crack width versus average deflection

**Fig. 9** Surface of GFRP bar after testing

**Table 4** Test-to-predicted ratios for slabs with concentration of reinforcements

(a) Reinforcement ratio in the banded region, $\rho_{band}$

| Slab | $f'_c$(MPa) | $\rho_{band}$ (%) | $V_{test}$ (kN) | ACI318&CSA A23.3[a] | ACI440 | BS8110[a] | EC2[a] | JSCE | Matthys (2000) | El-Ghandour (2003) | Ospina (2003) | El-Gamal (2005) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S1-B[b] | 37.2 | 2.15 | 317 | 1.07 | 1.05 | 1.09 | 0.83 | 0.91 | 0.72 | 1.07 | 0.50 | 0.79 |
| S2-B[b] | 57.1 | 2.15 | 447 | 1.22 | 1.30 | 1.53 | 1.02 | 1.47 | 0.88 | 1.22 | 0.62 | 0.90 |
| S3-B[b] | 67.1 | 2.15 | 485 | 1.22 | 1.34 | 1.67 | 1.05 | 1.60 | 0.90 | 1.22 | 0.63 | 0.90 |
| NB[c] | 30.0 | 2.15 | 349 | 1.31 | 1.24 | 1.24 | 0.99 | 1.09 | 0.85 | 1.31 | 0.60 | 0.97 |
| GFB2 | 36.3 | 2.15 | 246 | 0.84 | 1.46 | 0.84 | 0.65 | 1.13 | 0.90 | 1.35 | 0.80 | 1.00 |
| GFB3 | 36.3 | 3.03 | 248 | 0.85 | 1.28 | 0.76 | 0.66 | 1.02 | 0.81 | 1.36 | 0.72 | 0.90 |
| | | | Mean | 1.20 | 1.28 | 1.38 | 0.97 | 1.20 | 0.84 | 1.25 | 0.65 | 0.91 |
| | | | $\sigma$ | 0.100 | 0.135 | 0.265 | 0.095 | 0.273 | 0.071 | 0.110 | 0.104 | 0.072 |
| | | | Co.V. | 8.3 | 10.5 | 19.1 | 9.8 | 22.7 | 8.4 | 8.8 | 16.1 | 7.9 |

(b) Average reinforcement ratio, $\rho_{ave}$

| Slab | $f'_c$(MPa) | $\rho_{ave}$ (%) | $V_{test}$ (kN) | ACI318&CSA A23.3[a] | ACI440 | BS8110[a] | EC2[a] | JSCE | Matthys (2000) | El-Ghandour (2003) | Ospina (2003) | El-Gamal (2005) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S1-B[b] | 37.2 | 1.46 | 317 | 1.07 | 1.22 | 1.24 | 0.93 | 1.03 | 0.82 | 1.07 | 0.57 | 0.90 |
| S2-B[b] | 57.1 | 1.46 | 447 | 1.22 | 1.51 | 1.75 | 1.13 | 1.68 | 1.00 | 1.22 | 0.70 | 1.03 |
| S3-B[b] | 67.1 | 1.46 | 485 | 1.22 | 1.56 | 1.89 | 1.16 | 1.82 | 1.03 | 1.22 | 0.72 | 1.03 |
| NB[c] | 30.0 | 1.41 | 349 | 1.31 | 1.46 | 1.43 | 1.11 | 1.26 | 0.98 | 1.31 | 0.69 | 1.12 |
| GFB2 | 36.3 | 1.46 | 246 | 0.84 | 1.74 | 0.96 | 0.72 | 1.29 | 1.03 | 1.35 | 0.92 | 1.14 |
| GFB3 | 36.3 | 1.76 | 248 | 0.85 | 1.61 | 0.91 | 0.69 | 1.22 | 0.97 | 1.36 | 0.87 | 1.08 |
| | | | Mean | 1.20 | 1.52 | 1.58 | 1.08 | 1.38 | 0.97 | 1.25 | 0.74 | 1.05 |
| | | | $\sigma$ | 0.100 | 0.173 | 0.298 | 0.107 | 0.301 | 0.078 | 0.110 | 0.126 | 0.085 |
| | | | Co.V. | 8.3 | 11.4 | 18.9 | 9.9 | 21.8 | 8.1 | 8.8 | 16.9 | 8.1 |

[a] The means, standard deviations and coefficients of variation were calculated based on steel-reinforced slabs only.

[b] Specimens tested by Ghannoum. (1998)

[c] Specimen tested by McHarg et al. (2000)

생하였다. 전단강도 예측식 계산시 콘크리트 탄성계수와 정방형 공시체의 압축강도는 $E_c = 4{,}700\sqrt{f'_c}$, $f_{cu} = 1.2f'_c$로 각각 계산되었다. 설계기준 ACI 318[14], CSA A23.3[8], BS 8110[9], EC2[15]는 원래 FRP 보강 슬래브가 아닌 일반 철근 보강 슬래브의 전단강도를 예측하기 위한 것이므로, Table 4에서 위 설계기준들의 예측값에 대한 평균, 표준편차 및 변동계수는 일반 철근 보강 슬래브에 대한 값들만을 대상으로 산정됐다.

전단강도 예측식 계산시 집중 배근된 슬래브에 대해 동일한 철근량이 균등 배근된 슬래브의 철근비를 대입한다면 집중 배근에 따른 편칭 전단강도에 대한 이점을 고려할 수 없으며, 이는 곧 비경제적 설계로 이어질 수 있다. 따라서 Table 4에서는 각각 집중 배근 구역의 철근비 ($\rho_{band}$)와 평균 철근비 ($\rho_{ave}$)를 이용하여 편칭 전단강도를 예측하고 이를 정리하였다. 철근비 산정시 FRP 바의 경우 등가철근비 ($\rho E_f / E_s$)를 사용하였다. 먼저 Table 4(a)의 집중 배근 구역의 철근비 ($\rho_{band}$)를 사용한 경우를 살펴보면, 예측식들 중에 ACI 318, CSA A23.3 그리고 ACI 440이 대체적으로 양호한 예측값을 보였으나, ACI 318과 CSA A23.3는 BS 8110 및 EC2와 마찬가지로 일반 철근 보강 슬래브를 대상으로 한 식이어서 GFRP 보강 슬래브에 대해서는 과대평가하였다. 한편, Ospina et al.[16]의 예측식을 제외한 FRP 보강 슬래브의 거동 평가를 위해 개발된 예측식들은 모두 일반 철근 보강 슬래브에도 적용이 가능한 것으로 보여진다. ACI 440과 JSCE 모두 GFRP 보강 슬래브에 대해 보수적인 예측값을 보이며, ACI 440의 경우가 좀 더 보수적인 예측값을 제공한다. BS 8110과 JSCE는 고강도콘크리트 슬래브에 대해 과대평가하는 경향이 있으며, 다소 분산된 예측 결과를 보였다. El-Ghandour et al.[12]를 제외하고 타 연구자들에 의해 제안된 모든 식들은 집중 배근 구역의 철근비를 사용하였을 경우 편칭 전단강도를 과대평가하는 것으로 나타났다. El-Ghandour et al.에 의해 제한된 식은 ACI 318을 수정한 것으로 상당히 근사한 예측값을 제공하였다. 그러나 ACI 318과 El-Ghandour et al.에 의해 제안된 식은 철근비를 고려하지 않는 단점이 있다. 주목할 점은 El-Gamal et al.[17]의 식은 미소하게 과대평가하는 경향이 있긴 하지만 예측값에 대한 실측값의 비는 평균 0.91, 표준편차 0.072, 그리고 변동계수 7.9%로 나타나 상당히 고무적인 예측 결과를 보였다.

Table 4(b)는 평균 철근비($\rho_{ave}$)를 이용한 집중 보강 슬래브의 편칭 전단강도 예측값을 나타낸 것이고 평균철근

비는 아래 식(1)을 통해 구한다.

$$\rho_{ave} = \frac{(\rho_{band} + \rho_{outer})}{2} \quad (1)$$

여기서 $\rho_{outer}$는 집중 배근 구역 밖의 철근비를 의미한다. 위의 식을 사용하면 철근비는 Table 4(a)에서 사용된 $\rho_{band}$ 보다는 감소하나 균등 배근시의 철근비 보다는 여전히 큰 값을 가진다. ACI 318과 El-Ghandour et al.에 의한 예측식은 철근비를 고려하고 있지 않아 예측값에 변화가 없다. Matthys와 Taerwe[13]에 의한 제안식은 여전히 다소 과대평가하기는 하나, 일반 철근과 GFRP 보강 슬래브에 대해 평균 0.97, 표준편차 0.078 그리고 변동계수 8.1% 로 신뢰성 있는 예측을 제공한다. 모든 예측식 중에서 El-Gamal et al.에 의해 제안된 식이 가장 근사한 예측을 하였으며, 위 식 (1)의 평균 철근비 ($\rho_{ave}$)를 사용하였을 때 실측값/예측값 비의 평균이 1.05, 표준편차 0.085 그리고 변동계수는 8.1% 였다.

## 4. 결 론

GFRP와 일반 철근으로 보강된 2방향 슬래브의 실험을 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) GFRP 바의 낮은 탄성계수로 인해 GFRP 보강 슬래브는 동일한 휨강도를 가지는 일반 철근 보강 슬래브에 비해 상당히 낮은 펀칭 전단강도와 균열 후 강성 (post cracking stiffness) 그리고 큰 처짐량을 보였다. 그러나 기둥 인접부에서 발생되는 균열 수는 일반 철근 보강 슬래브 보다 많았다.
2) 모래로 표면 처리가 된 GFRP 바는 콘크리트와의 부착성능이 뛰어나 정착 파괴가 발생하지 않았다.
3) 기둥으로부터 1.5 h 범위 내에 상부 휨보강근을 집중 배근한 경우에는 동일한 양의 보강근을 균등 배근한 경우에 비해 펀칭 전단강도 및 균열 후 강성의 향상, 상부 보강근의 균일한 변형률 분포, 그리고 양호한 균열 분포 등이 확인되었다. 펀칭 전단파괴면 역시 기둥면으로부터 더 먼 곳에서 발생하였다.
4) 0.5% 이상의 등가철근비 ($\rho E_f / E_S$)는 FRP 보강 콘크리트 슬래브의 펀칭 전단강도 증진에 효율적이지 못하다.
5) 강섬유의 사용은 펀칭 전단강도의 증가와 균열 제어에 탁월한 효과를 보인다. 더욱이 보강재의 변화와 집중 배근은 부재의 연성 증진에 뚜렷한 효과를 보이지 못한 반면에 강섬유를 통해서는 연성을 상당히 향상시킬 수 있었다. 그러나 SFRC가 균열 후 강성이나 최대 하중에서의 GFRP의 변형률에 미치는 효과는 매우 작은 것으로 평가되었다. SFRC의 사용은 기존 철근을 대신하여 GFRP 바를 사용할 경우 발생할 수 있는 문제점을 해결하는데 도움이 될 것으로 판단된다.
6) 집중 배근된 슬래브의 펀칭 전단강도 예측을 위해 평균 철근비 ($\rho_{ave}$)의 개념이 소개되었으며 이를 이용할 경우 집중 배근시의 이점을 합리적으로 반영한 예측이 가능함을 확인하였다. 평균 철근비를 적용할 경우, El-Gamal et al.의 제안식은 실측값/예측값의 평균값이 1.05, 표준편차 0.085 그리고 변동계수 8.1% 로 매우 정확한 예측을 보였다.

## Notation

c = column width (mm)
$E_c$ = modulus of elasticity of concrete (MPa)
$E_f$ = modulus of elasticity of FRP (MPa)
$E_r$ = modulus of elasticity of reinforcement (MPa)
$E_s$ = modulus of elasticity of steel (MPa)
$f_{cu}$ = characteristic concrete cube strength (MPa)
$f_{fu}$ = ultimate tensile strength of FRP (MPa)
$f_r$ = modulus of rupture of concrete (MPa)
$f_{su}$ = tensile strength of steel reinforcement (MPa)
$f_y$ = yield strength of reinforcement (MPa)
$f_c'$ = specified compressive strength of concrete (MPa)
$h$ = overall thickness of slab (mm)
$P_{cr}$ = cracking load (kN)
$P_u$ = ultimate load (kN)
$P_y$ = yielding load (kN)
$V_{test}$ = punching shear strength experimentally obtained (N)
$\Delta_{cr}$ = deflection at cracking load (mm)
$\Delta_u$ = deflection at ultimate load (mm)
$\Delta_y$ = deflection at yielding load (mm)
$\alpha$ = punching crack inclination (deg)
$\varepsilon_f$ = strain in FRP reinforcement
$\varepsilon_{fu}$ = rupture strain of FRP reinforcement
$\varepsilon_y$ = reinforcement yield strain
$\varepsilon_c'$ = concrete strain corresponding to ($f_c'$)
$\rho$ = reinforcement ratio
$\rho_{ave}$ = average reinforcement ratio in and outside banded region
$\rho_{band}$ = reinforcement ratio in banded region
$\rho_{outer}$ = reinforcement ratio outside banded region
$\sigma$ = standard deviation

## 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업 (Center for Concrete Corea, 05-CCT-D11)의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

1. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), "Recommenda-

tion for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials", Concrete Engineering Series 23, A. Machida, ed., Tokyo, Japan, 1997, 325pp.
2. Canadian Standards Association (CSA), "Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers", CAN/CSA S806-02, Mississauga, Ont., Canada, 2002, 206pp.
3. American Concrete Institute, *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI 440.1R-06, Farmington Hill, Mich., 2006, 44pp.
4. Hawkins, N. M. and Mitchell, D., "Progressive Collapse of Flat Plate Structures", *ACI Struct. J.*, Vol.76, No.7, 1979, pp.775~808.
5. Ghannoum, C. M., *Effect of High-Strength Concrete on the Performance of Slab-Column Specimens*, M. Engrg. Thesis, Dept. of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill Univ., Montréal, Canada, 1998, 91pp.
6. McHarg, P. J., Cook, W. D., Mitchell, D., and Yoon, Y. S., "Benefits of Concentrated Slab Reinforcement and Steel Fibers on Performance of Slab-column Connections", *ACI Struct. J.*, Vol.97, No.2, 2000, pp.225~234.
7. Yoon, Y. S., Lee, J. H., Lee, S. H., and Mitchell, D., "Enhanced Transmission of Ultra-High-Strength Concrete Column Loads in Slab-Column Connection Using Steel Fibers", In: *Proceedings of the Third International Conference on Construction Materials-Performance, Innovations and Structural Implications, CONMAT '05*, Vancouver, Canada, 2005, CD Rom Paper 1, Session 68.
8. Canadian Standards Association (CSA), "Design of Concrete Structures", CSA A23.3-04, Mississauga, Ont., Canada, 2004, 258pp.
9. British Standard Institution (BSI), *Structural Use of Concrete*, Standard BS 8110, London, United Kingdom, 1997, 168pp.
10. Banthia, N., Al-Asaly, M., and Ma, S., "Behavior of Concrete Slabs Reinforced with Fiber-Reinforced Plastic Grid", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.7, No.4, 1995, pp.252~257.
11. *V-ROD Composite Reinforcing Rods Technical Data Sheet*, Pultrall Inc., Thetford Mines, Canada, 2003, 1pp.
12. El-Ghandour, A. W., Pilakoutas, K., and Waldron, P., "Punching Shear Behavior of Fiber Reinforced Polymers Reinforced Concrete Flat Slabs: Experimental Study", *Journal of Composites for Construction*, Vol.7, No.3, 2003, pp.258~265.
13. Matthys, S. and Taerwe, L., "Concrete Slabs Reinforced with FRP Grids. II: Punching Resistance", *Journal of Composites for Construction*, Vol.4, No.3, 2000, pp.154~161.
14. American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", *ACI 318-05 and ACI 318R-05*, Farmington Hill, Mich., 2005, 430pp.
15. European Standard, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures-Part 1: General Rules and Rules for Buildings*, prEN 1992-1-1, Final Draft, European Committee for Standardization, Brussels, 2003, 226pp.
16. Ospina, C. E., Alexander, S. D. B., and Roger Cheng, J. J., "Punching of Two-Way Concrete Slabs with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars or Grids", *ACI Struct. J.*, Vol.100, No.5, 2003, pp.589~598.
17. El-Gamal, S., El-Salakawy, E. F., and Benmokrane, B., "A New Punching Shear Equation for Two-Way Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars", *7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, SP-230, C. K. Shield et al., ed., American Concrete Institute, Farmington Hill, Mich., 2005, pp.877~894.

**요 약** 철근과 fiber-reinforced polymer (FRP)의 물리적, 역학적 특성의 차이 및 슬래브 상부 보강재의 기둥 인접부 집중 배근, 그리고 기둥 인접부 슬래브에 강섬유 콘크리트 (SFRC)의 타설 등에 따른 2방향 슬래브의 편칭 전단 거동에 대한 효과를 평가하였다. 편칭 전단강도, 강성, 연성, 변형률 분포 그리고 균열 제어 성능 등을 파악하였다. 실험 결과 기둥 인접부의 슬래브에 집중 배근을 하거나 SFRC를 타설하는 것은 glass fiber-reinforced polymer (GFRP) 바로 보강된 슬래브의 편칭 전단 거동을 향상시켰다. 기둥 인접 구역에 집중 배근된 슬래브의 실험 결과를 다양한 설계기준과 타 연구자에 의해 제안된 예측식과 비교하였으며, 집중 배근으로 인한 이점을 예측식에 반영할 수 있도록 집중 배근된 슬래브의 철근비를 산정하는 합리적인 방법도 제안하였다.

**핵심용어** : fiber-reinforced polymers, 콘크리트 슬래브, 강섬유, 편칭 전단