

# 이방성 섬유강화폴리머 보강근의 콘크리트 피복두께에 대한 해석적 연구

이성태<sup>1\*</sup>

## Analytical Study on Concrete Cover Thickness of Anisotropic FRP Bar

Seong-Tae Yi<sup>1\*</sup>

**Abstract:** In this study, to examine the effect of the transverse thermal expansion behavior of FRP reinforcing bars and concrete on the concrete cover thickness, based on 20°C, when the temperature changes from -70°C to 80°C, the behavior of concrete was studied theoretically and numerically. Theoretical elastic analysis and nonlinear finite element analysis were performed on FRP reinforced concrete with different diameters and cover thicknesses of FRP reinforcement. As a result, at a negative temperature difference, concrete was compressed, and the theoretical strain result and the finite element result were similar, but at a positive temperature difference, tensile stress and further cracks occurred in the concrete, which was 1.2 to 1.4 times larger than the theoretical result. The ratio of the diameter of the FRP reinforcing bar to the thickness of the concrete cover ( $c/db$ ) is closely related to the occurrence of cracks. Since the transverse thermal expansion coefficient of FRP reinforcing bars is three times greater than that of concrete, it is necessary to consider this in design.

**Keywords:** FRP reinforcing bars, Transverse thermal expansion coefficient, Finite element method, Concrete cover thickness

### 1. 서론

섬유강화폴리머(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP) 보강근은 철근과 비교하여 우수한 인장강도와 상대적으로 적은 밀도를 가져 구조물을 경량화시킬 수 있으며 염화물로 인한 부식이 없고 화재와 같은 고온에서도 강성을 유지하는 내화 성능을 가지는 장점이 있다(Seo et al., 2007; Park et al., 2009; Choi et al., 2009; Cho et al., 2011; Lee et al., 2018).

FRP 보강근은 길이 방향의 섬유 다발을 합성 수지 계열의 바인더로 결합하여 보강근의 형태로 제조한 복합체로 이를 사용한 부재가 거동 시에는 방향성을 가진다. 즉, FRP 보강근은 방향성을 가지는 이방성 재료로 길이 방향의 탄성계수는 횡방향 탄성계수의 약 1/6~1/10이다. 보강근의 주된 목적은 적절한 배근을 통해 보강근이 콘크리트의 인장력을 분담하고 균열 발생을 제어하는 것이며, 길이 방향으로 역학적 거동을 하도록 제조된 FRP 보강근은 철근의 대체재로 사용할 수 있다. 현재까지 FRP 보강근을 구조물에 적용하기 위해 다양한 연구가 수행되었으며, ACI 440.1R-15(2015) 등 구조설계기준이 보급되고 있다(Lee and Son, 2021). 또한, 현재까지도

FRP 보강근의 활용을 위한 다양한 연구가 수행되었지만, 열적 거동과 관련된 연구는 정규화된 시험의 부재 및 실험에 존재하는 다양한 제약 등의 이유로 단편적인 연구가 일부 수행되었다(Moon and Oh, 2011).

콘크리트와 철근의 열팽창계수는 매우 유사하므로 온도변화에 따른 수축 및 팽창 거동 시 이들은 일체 거동을 하게 되며, 변형에 대한 구속이 거의 없기 때문에 철근과 콘크리트 접촉 계면에는 응력이 거의 발생하지 않는다. FRP 보강근 중 유리섬유의 횡방향 열팽창계수는 길이방향 열팽창계수와 거의 유사한 반면, 횡방향 열팽창계수가 콘크리트 열팽창계수의 약 4배 정도라고 알려져 있다. 이러한 열팽창에 대한 이방성 특성은 온도 변화 시 콘크리트와 보강근의 계면에서 인장응력을 유발 시키게 되고, 피복두께가 부족할 경우 예기치 못한 균열이 발생하여 사용성을 저하시킬 수 있다(Matthy et al., 1996; Aiello et al., 2001).

따라서 온도변화에 따른 FRP 보강근 및 콘크리트의 횡방향 거동에 관한 실험 및 해석 등 다양한 연구가 필요하다. 이에 대한 해석적 연구는 Rahman et al.(1995)에 의해 처음 수행되었다. 그리고 Aiello et al.(2001), Masmoudi et al.(2005) 등은 탄성해석을 기반으로 FRP 보강근 콘크리트의 횡방향 열팽창 거동에 대한 이론 해석과 실험적 거동의 비교/분석하는 연구를 수행하였다. 하지만 이들 또한 제한된 재료 및 공시체에 대한 연구이며 이에 대한 추가적인 연구는 더 필요한 실정이다.

이 연구에서는 FRP 콘크리트의 피복두께 결정에 관한 기초

<sup>1</sup>정회원, 인하공업전문대학 교수, 교신저자

\*Corresponding author: yist@inhac.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon 22212, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

연구를 위하여, 콘크리트 재료의 비선형 거동과 FRP 보강근의 횡방향 물성을 고려한 유한요소법을 사용하여 공시체의 2차원 해석모형을 구성하였고, 보강근의 지름과 피복두께를 변화시켜가며 해석적으로 평가하였다. 그리고 이 해석방법의 유효성을 평가하기 위해 기존의 실험결과(Masmoudi et al., 2005)의 경향과 이 연구에서 구한 해석결과를 비교/분석하였다.

## 2. 탄성해석 모형

Fig. 1은 FRP 보강근과 철근의 횡방향 열팽창계수 차이로 인해, 보강근과 콘크리트의 접촉 계면에서 발생하는 압력  $P$ 와 콘크리트의 원주방향 및 반경방향의 응력을 도시한 것이다. 이에 대한 이론적 해석에서는 탄성론(Timoshenko and Goodier, 1970)을 기반으로 원통좌표계에 대하여 모형을 원통 내부에서 반경방향의 압력을 받는 원통으로 간주할 수 있다. FRP 보강 콘크리트의 횡방향 열거동에 대한 해석적 모형은 Rahman et al.(1995), Aiello et al.(1999)의 연구에서 제안되었고, 다음과 같은 가정을 기반으로 유도되었다.

- 콘크리트와 FRP 보강근 사이는 완전히 결합된 연속체이다.
- 콘크리트 및 FRP 보강근은 선형 탄성거동을 한다.
- 콘크리트 원통 단면은 변형 후에도 평면을 유지한다.
- 콘크리트 인장응력에 대응하기 위한 원주방향으로 별도의 보강은 없다.

### 2.1 계면에서의 압력 및 콘크리트의 열 응력

온도변화  $\Delta T$ 에 따른 FRP 철근/콘크리트 경계면에서 콘크리트에 가해지는 반경 방향의 압력  $P$ 는 변형 적합성 해석을 사용하는 경우 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

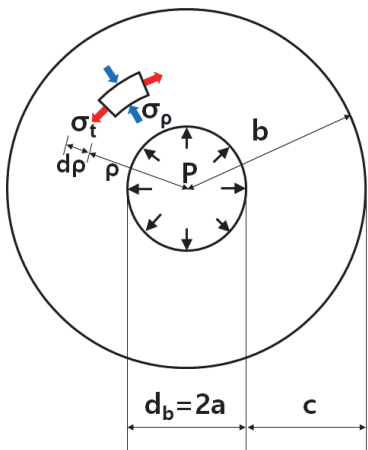


Fig. 1 Concrete cylinder with FRP bar at the center for transverse thermal expansion

$$P = \frac{(\alpha_t - \alpha_c)\Delta T}{\frac{1}{E_c} \left( \frac{r^2 + 1}{r^2 - 1} + \nu_c \right) + \frac{1}{E_t} (1 - \nu_{tt})} \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 온도변화  $\Delta T$ 에 대한 FRP 보강근과 콘크리트 계면에서 발생하는 반경 방향 압력,  $r (= b/a)$ 은 FRP 보강근과 콘크리트의 반경 비,  $\alpha_c$ 는 콘크리트의 열팽창계수,  $\alpha_t$ 는 FRP 보강근의 횡방향 열팽창계수,  $E_c$ 는 콘크리트 탄성계수,  $E_t$ 는 FRP 보강근의 횡방향 탄성계수,  $\nu_c$ 는 콘크리트 포아송비,  $\nu_{tt}$ 는 FRP 보강근의 횡방향 포아송비,  $a, b$ 는 각각 보강근의 내경과 외경이다.

FRP 철근이 팽창하여 주변 콘크리트에 가하는 반경 방향 압력  $P$ 로 인해 콘크리트 원통의 중심에서 반경  $\rho$ 에 위치한 콘크리트 임의의 요소에서 원주방향 응력  $\sigma_t$  및 반경 방향 응력  $\sigma_\rho$ 는 다음 식 (2) 및 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_t = \frac{P}{r^2 - 1} \left( 1 + \frac{b^2}{\rho^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_\rho = \frac{P}{r^2 - 1} \left( 1 - \frac{b^2}{\rho^2} \right) \quad (3)$$

그리고  $\rho = a$ 인 경우에, FRP 보강근과 콘크리트 계면에서 원주방향으로 식 (4)와 같은 최대 응력이 발생한다.

$$\sigma_{t\max} = \frac{r^2 + 1}{r^2 - 1} P \quad (4)$$

### 2.2 열 변형률

$\rho = a$ 일 때, 온도변화  $\Delta T$ 에 대한 FRP 철근/콘크리트 경계면에서 콘크리트에 가해지는 반경 방향의 압력  $P$ 에 의하여 콘크리트 및 보강근의 원주방향 변형률은 다음 식 (5) 및 식 (6)과 같다.

$$\varepsilon_{ct}(a) = \frac{P}{E_c} \left( \frac{r^2 + 1}{r^2 - 1} + \nu_c \right) + \alpha_c \Delta T \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ft}(a) = \alpha_c \Delta T - \frac{(1 - \nu_{tt})}{E_t} P \quad (6)$$

$\rho = b$ 일 때, 온도변화  $\Delta T$ 에 대한 FRP 철근/콘크리트 경계면에서 콘크리트에 가해지는 반경 방향의 압력  $P$ 로 인하여 콘크리트 외피에서 발생하는 원주방향 변형률은 다음 식 (7)과 같다.

$$\varepsilon_{ct}(b) = \frac{2P}{E_c(r^2 - 1)} + \alpha_c \Delta T \quad (7)$$

### 2.3 균열 온도 하중

FRP 보강근과 콘크리트 계면에서 원주방향 인장응력  $\sigma_{t_{max}}$  이 콘크리트의 인장강도  $f_{ct}$  에 도달하면 방사형 균열이 FRP 철근/콘크리트 경계면 콘크리트에서 발생하기 시작한다. 식 (4)에 최대 인장응력  $\sigma_{t_{max}}$  를 콘크리트의 인장강도  $f_{ct}$  로 하고 압력  $P$ 에 대한 식 (1)을 식 (4)에 대입한 이후,  $\Delta T$ 에 대하여 정리하면 콘크리트의 방사형 균열을 생성하는 온도 하중  $\Delta T_{cr}$  을 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_{cr} = \frac{f_d}{(\alpha_t - \alpha_c)} \left[ \frac{1}{E_c} + \frac{r^2 - 1}{r^2 + 1} \left( \frac{\nu_c}{E_c} + \frac{1 - \nu_{tt}}{E_t} \right) \right] \quad (8)$$

여기서,  $f_{ct}$  는 콘크리트의 인장강도이다.

### 3. 유한요소해석 모형

Masmoudi et al.(2005)는 실험을 통해 기준온도 20°C를 기준으로 온도가 상승하는 상태에서는 이론적 탄성해석의 결과와 실험결과가 잘 일치하지 않음을 확인하였다. 이는 FRP 보강근과 콘크리트 계면에 균열이 발생하여 진전되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 FRP 보강근을 사용한 콘크리트의 고온 범위에서의 균열 거동을 해석적으로 살펴보기 위해 범용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus를 사용하였다. 이 장에서는 유한요소 해석 모형을 구축 및 검증하는 과정에 대하여 논하였다.

#### 3.1 해석모형의 형상 및 요소

본 연구에서는 기존의 실험적 연구에서 얻어진 연구결과와의 비교를 위해서 Masmoudi et al.(2005)의 실내실험에서 고려한 크기와 형상의 공시체를 해석 대상으로 선정하였다(Fig. 2). Masmoudi et al.(2005)는 길이 380mm의 실린더형태의 시편을 Table 1과 같은 콘크리트 피복두께와 보강근의 지름을 가지도록 제작하였고, 보강근 및 콘크리트 표면에서의 변형률을 계측하였다. Table 1은 Masmoudi et al.(2005)의 공시체에 대한 상세를 나타낸 것이다.

횡방향 거동이 주 관심이므로 유한요소해석 시에는 2차원 평면응력으로 모형화하였다. 콘크리트와 보강근의 요소에는 비정형성 유한요소망을 구성하여 균열의 방향을 모사하였고, 삼각형 요소를 사용할 경우 전단잠금을 회피할 수 있다고 알려져 CPS3을 사용하였다(Rhee & Kim 2006). 그리고 요소의 크기는 Gang & Kawk(2017)의 연구를 참조하여 한번의 길이를 Fig. 3과 같이 1 mm로 결정하였다.

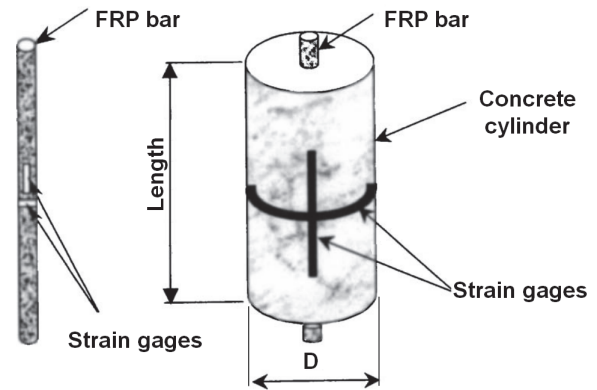


Fig. 2 Specimen geometry and instrumentation(Masmoudi et al., 2005)

Table 1 Specimen details(Masmoudi et al., 2005)

Specimen	Bar diameter $db$ (mm)	Concrete cover $c$ (mm)	$c/db$	Specimen length $L$ (mm)
C-10-20	9.5	20	2.1	380
C-10-34	9.5	34	3.6	380
C-13-19	12.7	19	1.5	380
C-13-32	12.7	32	2.5	380
C-16-23	15.9	23	1.5	380
C-16-30	15.9	30	1.9	380
C-19-22	19.1	22	1.2	380
C-19-29	19.1	29	1.5	380
C-25-19	25.4	19	0.8	380
C-25-25	25.4	25	1.0	380

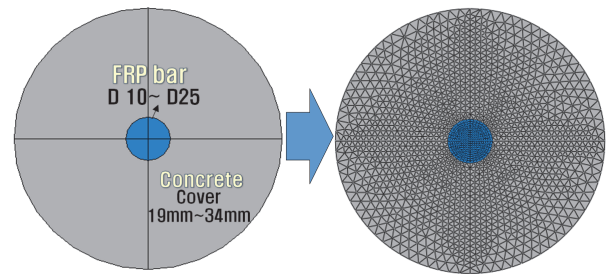


Fig. 3 2D plane stress FE model of the specimen

#### 3.2 재료물성

##### 3.2.1 콘크리트

Concrete-damaged-plasticity(CDP) 모델을 적용하여 FRP 보강근 콘크리트의 횡방향 열변형에 대한 재료 비선형 해석을 수행했다. Masmoudi et al.(2005)의 시험은 일축압축강도 40 MPa 강도에 해당하는 콘크리트이며, 이를 근거로 콘크리트구조설계기준(KCI, 2021)의 식 (9)에 따라 탄성계수를

30,272 MPa로 결정하였다. 또한, 포아송비는 0.17로 그리고 콘크리트의 열팽창계수는  $1.0 \times 10^{-6}$ 으로 가정하였다.

$$E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt{f_{cu}}, \text{ MPa} \quad (9)$$

여기서,  $f_{cu}$ 는 콘크리트의 평균압축강도(MPa),  $m_c$ 는 콘크리트의 단위질량( $\text{kg/m}^3$ )이다.

콘크리트의 압축응력-변형률 관계는 다음 식 (10)과 같이 Carreira and Chu(1985)가 제안한 모델을 사용하였다.

$$\frac{\sigma_c}{f'_c} = \frac{\beta(\varepsilon/\varepsilon'_c)}{\beta - 1 + (\varepsilon/\varepsilon'_c)^\beta} \quad (10)$$

여기서,  $\sigma_c$ 는 압축응력,  $\varepsilon$ 는 압축변형률,  $f'_c$ 는 압축강도,  $\varepsilon'_c$ 는 압축강도 시의 변형률로 다음 식 (11)과 같고, 그리고  $\beta$ 는 모형계수로 식 (12)와 같으며  $E_{it}$ 는 식 (13)과 같다.

$$\varepsilon'_c = (1,680 + 7.1f'_c) \times 10^{-6} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{1}{1 - \left( \frac{f'_c}{\varepsilon'_c E_{it}} \right)} \quad (12)$$

$$E_{it} = \frac{f'_c}{\varepsilon'_c} \left( \frac{24.82}{f'_c} + 0.92 \right) \quad (13)$$

콘크리트 인장거동에 관한 인장응력( $\sigma_t$ )-균열 개구변위( $w$ )의 관계는 Hordijk(1992)에 의해 정의된 다음 식 (14)를 사용하였다.

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left[ 1 + \left( 3.0 \frac{w}{w_0} \right)^3 \right] e^{-6.93 \frac{w}{w_0}} - 10 \frac{w}{w_0} e^{-6.93} \quad (14)$$

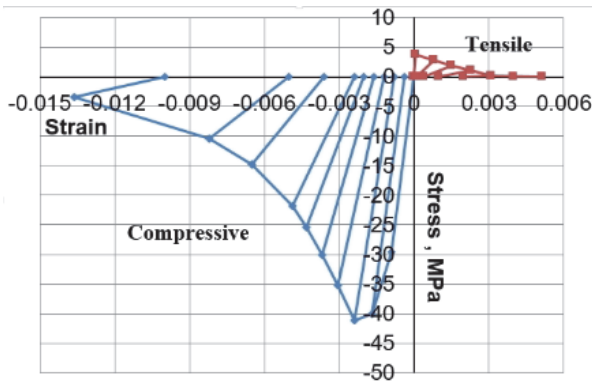


Fig. 4 Stress-strain-damage relationship of the concrete

여기서,  $f_t$ 는 인장강도,  $w_0$ 는 인장응력이 0일 때의 균열개구 변위로 다음 식 (15)와 같다.

$$w_0 = 5.4 \frac{G_f}{f_t} \quad (15)$$

여기서, 콘크리트 파괴에너지  $G_f$ 는 0.04 N/mm로 가정하였다 (López et al., 2008; Grassl et al., 2008)

응력-변형률과-손상에 대한 관계는 Jankowiak and Lodygowski (2005)의 반복재하에 대한 연구와 Kim & Adu Al-Rub(2011)의 연구를 참고하여 결정하였다(Fig. 4). Concrete-damaged-plasticity 모델의 소성관련 매개변수로는 Prakash et al.(2011)의 연구를 참고하여 Table 2에 나타낸 값을 사용하였다.

### 3.2.2 FRP 보강근

FRP 보강근은 섬유와 바인더로 이루어진 복합체로 길이방향과 횡방향의 물성이 상이한 이방성 특징을 가지고 있다. 본 해석에서는 2차원 모형으로 횡방향의 거동만을 해석하기 위해 이방성 특성은 별도로 정의하지 않았으며 횡방향 탄성계수와 횡방향 포아송비 그리고 횡방향 열팽창계수는 Masmoudi et al.(2005)의 연구를 참조하였다(Table 3). 또한, FRP 보강근의 항복응력은 본 해석의 범위에 해당하지 않기 때문에 FRP 보강근은 선형 탄성재료로 가정하였다.

Table 2 Parameters of the concrete plastic model

Parameters	Input value
Dilation angle	15.0
Eccentricity	0.1
K*	0.667
Viscosity Parameter	0.005
Ratio of the ultimate biaxial compressive stress to the ultimate uniaxial compressive stress	1.12
Ratio of the uniaxial tensile to the uniaxial compressive strength	0.1

\*Ratio of second stress invariant on the tensile meridian to that on compression meridian at the initial yield for any given value of the pressure invariant

Table 3 Properties of FRP rebar

Rebar material	Transverse elastic modulus, $E_t$ (MPa)	Transverse poisson's ratio $\nu_{tt}$	Transverse expansion coefficient $\alpha_t (\times 10^{-6})$
GFRP	7,100	0.38	3.3

### 3.3 경계조건 및 해석방법

공시체는 Fig. 3과 같이 2차원 평면응력으로 모델링하였고, 경계조건으로는 원주공시체 중앙부(보강근 중앙부)의 수직과 수평방향 변위 모두를 구속하였다. 온도 하중은 초기 온도를 20 °C로 하고 이를 기준으로 양의 온도차(+ $\Delta T$ )로 60 °C를 주었고, 음의 온도차(- $\Delta T$ )로 -50 °C를 주어 열팽창 및 열수축 거동을 하도록 정의하였다. 이 때 FRP 보강근과 콘크리트 접촉 계면에서의 원주방향 변형률과 콘크리트 외피 부분의 원주방향 변형률을 확인하였고, 이를 이론해와 비교하였다.

본 연구의 목적은 콘크리트의 손상을 고려하는 재료 비선형 문제를 해석하는 것이므로 해의 정확도 부분에서는 다소 불완전하지만 수렴성이 우수한 Explicit 방법(Smith, 2009)으로 수치해석을 수행하였고, Anti-aliasing filter를 적용하여 결과 값의 경향을 보다 뚜렷하게 확인할 수 있도록 하였다.

## 4. 해석 결과

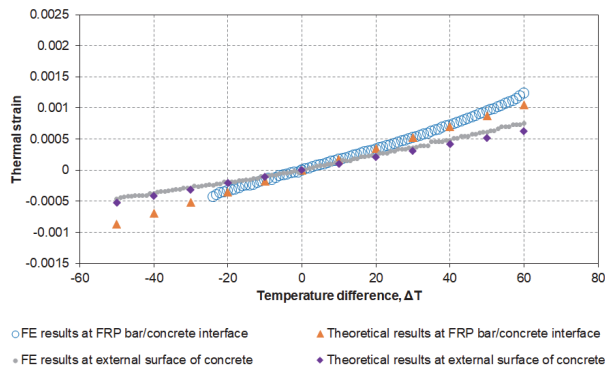
### 4.1 열 변형률 해석결과

Masmoudi et al.(2005)는 실내실험 결과로부터  $c/db$ 가 1.5

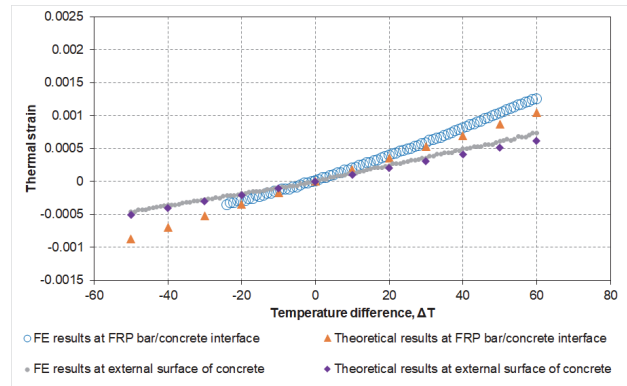
이하인 경우에 공시체 외피에 균열이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 이 논문에서는 공시체의  $c/db$  1.5를 기준으로 해석결과를 살펴보았다.

#### 4.1.1 $c/db$ 가 1.5를 초과하는 경우

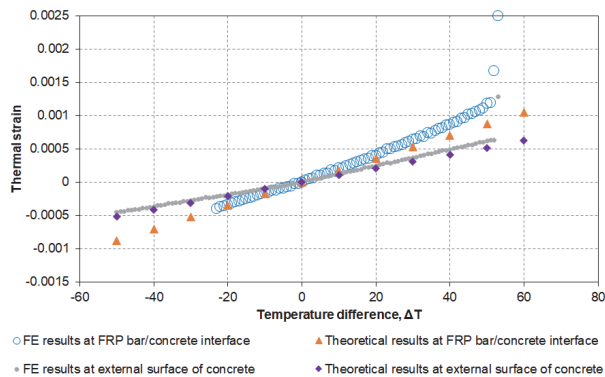
Fig. 5(a)~Fig. 5(d)는  $c/db$ 가 1.5를 초과하는 경우, 온도변화에 따른 원주방향의 열 변형률을 나타낸 것으로 유한요소 해석 결과와 탄성해석 결과를 같이 도시하였다. 탄성해석 결과와 같이 유한요소해석의 결과도 온도 차이에 따른 계면에서의 원주방향 변형률이 콘크리트 외측면의 변형률 보다 크게 나타났다. 음의 온도 차에서는 온도 차의 크기가 변화함에 따라 발생하는 변형률이 탄성해석과 유한요소해석의 결과가 거의 유사한 수준으로 나타났지만, 양의 온도 차에서는 온도 차 크기가 변화함에 따라 유한요소해석의 변형률이 탄성해석 변형률보다 크게 나타났다. 이는 양의 온도차가 발생할 경우 FRP 보강근과 콘크리트 계면에 인장응력이 발생하며 콘크리트의 균열 및 손상이 발생하여 탄성해석보다 추가적인 변형률이 발생하는 비탄성 거동을 하였기 때문이다. 이러한 현상은 Masmoudi et al.(2005)는 실험에서도 확연하게 나타났으



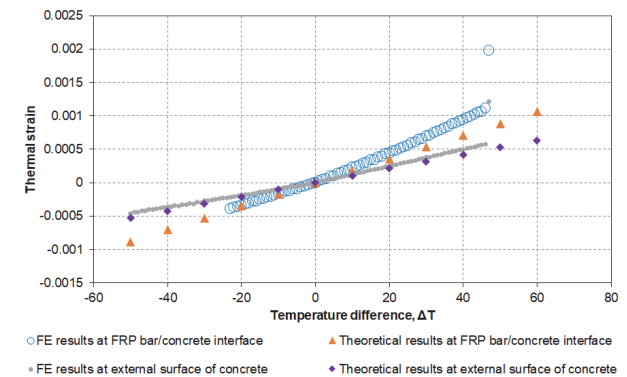
(a) C-10-20 ( $c/db=2.1$ )



(b) C-10-34 ( $c/db=3.6$ )



(c) C-13-32 ( $c/db=2.5$ )



(d) C-16-30 ( $c/db=1.9$ )

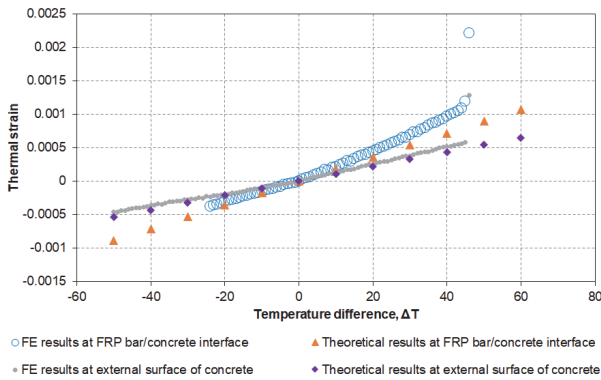
Fig. 5 Thermal strain for  $c/db > 1.5$

며 대략 이론해보다 1.2~1.4배 정도 더 큰 수준을 나타냈고 유한요소해석결과도 유사하게 평균 1.3배 정도 탄성해석 결과보다 큰 수준을 나타내었다.

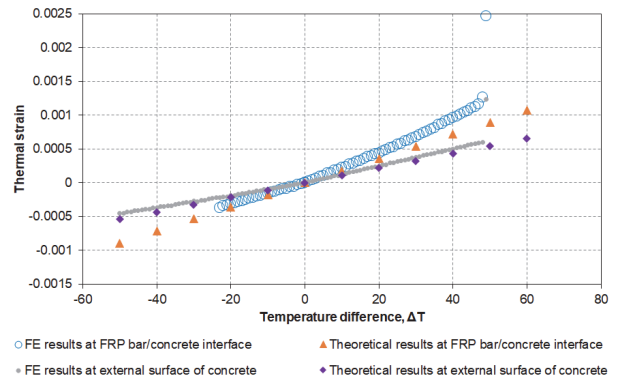
Masmoudi et al.(2005)의 실험은  $c/db$ 가 1.5를 초과하는 경우, 계측으로는 균열이 검출되지 않았지만 유한요소해석에서는 지름이 9.5 mm인 경우를 제외하고 나머지 경우에는 균열이 발생하였다. 이는 실내실험에서 변형률 게이지를 위치한 곳에서 균열이 발생하지 않았거나, 아주 국부적으로 발생하여 검출이 되지 않았을 것으로 사료된다.

#### 4.1.2 $c/db$ 가 1.5를 이하인 경우

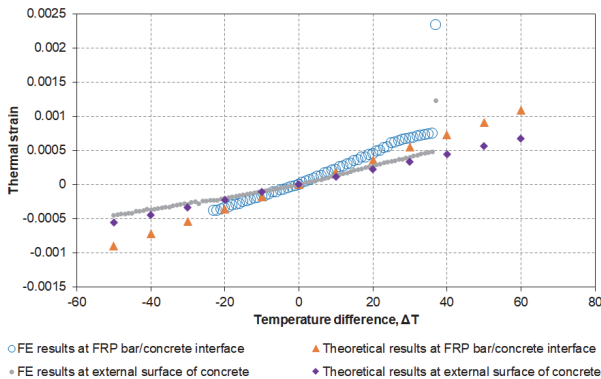
Fig. 6(a)~Fig. 6(f)는  $c/db$ 가 1.5 이하인 경우에 대하여 온도변화에 따른 원주방향의 열 변형률을 나타낸 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 음의 온도 차에서는 온도 차의 크기가 변화함에 따라 발생하는 변형률이 탄성해석과 유한요소해석의 결과가 거의 유사한 수준으로 나타났지만, 양의 온도 차에서는 온도 차의 크기가 변화함에 따라 유한요소해석의 변형률이 탄성해석 변형률 보다 크게 나타났고, 그 경향은  $c/db$ 가 1.5 이하에서 더 뚜렷하였다. Masmoudi et al.(2005) 실험에서는



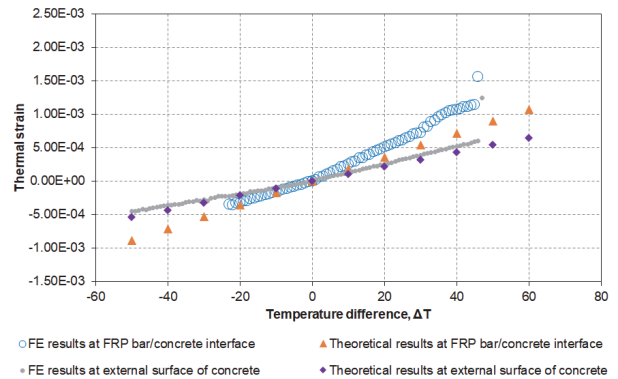
(a) C-13-19 ( $c/db=1.5$ )



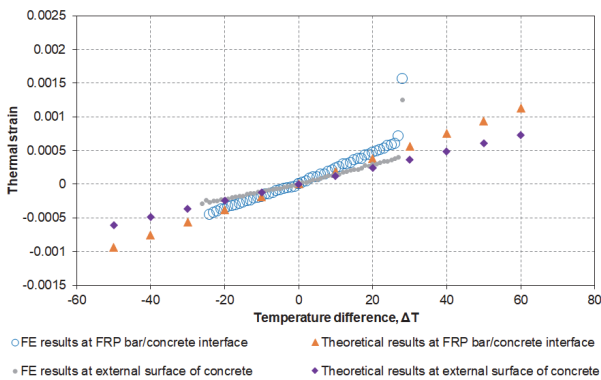
(b) C-16-23 ( $c/db=1.5$ )



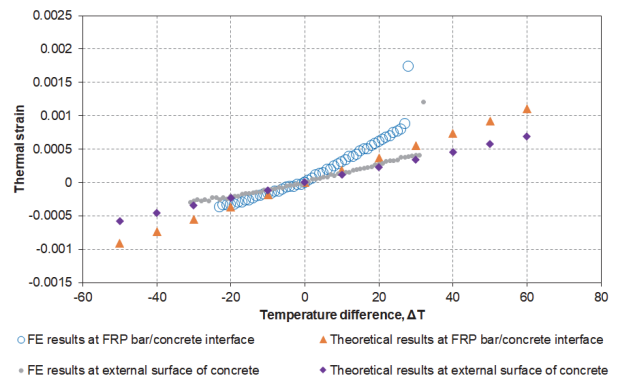
(c) C-19-22 ( $c/db=1.2$ )



(d) C-19-29 ( $c/db=1.5$ )



(e) C-25-19 ( $c/db=0.8$ )



(f) C-25-25 ( $c/db=1.0$ )

Fig. 6 Thermal strain for  $c/db \leq 1.5$

대략 이론해보다 1.3~1.5배 정도 더 큰 수준으로 나타났고, 유한요소해석 결과도 유사하게 1.3~1.4배 탄성해석 결과보다 큰 수준을 나타내었다. 이는 선행 연구결과와도 유사한 수준으로 이를 통해 유한요소해석으로 FRP 보강근 콘크리트의 비탄성 거동을 적절한 수준으로 모사 가능함을 유추할 수 있다.

#### 4.2 균열의 발생 및 진전

Table 4는 계면에서 발생하는 균열에 대한 온도차와 콘크리트 표면에서 발생하는 균열에 대한 온도차를 나타낸 것이다.

계면에서 발생하는 균열에 대한 온도차는 균열 발생 시점까지 선형탄성 거동에 가깝기 때문에 탄성해석 결과와 유한요소해석 결과가 거의 일치하게 나타났다. 계면에서의 균열 발생은 탄성해석과 유한요소해석 모두 대략 온도차 20 °C를 전후로 시작되었으며 탄성해석으로도 이에 대한 평가가 가능할 것으로 판단된다. 계면에서의 균열 발생 시점 이후로 콘크리트 표면에서의 균열 발생 시 온도차는 해석의 경우 FRP 보강근 지름에 대한 피복 두께에  $c/db$ 가 작아질수록 낮은 온도차에서 표면에 균열이 발생하는 것을 알 수 있다. 해석결과를 살펴보면, 콘크리트 변형률이 급격하게 변하는 구간은 콘크리트의 피복에 관통 균열이 발생한 구간이다. 이때 균열부의 손상도가 1이 되면서 요소의 강성이 0에 가까워지면서 변형률이 급격하게 변화하였다. Masmoudi et al.(2005) 실험의 결과도 해석에 비하여 명확하게 나타나지는 않았지만, 대체로  $c/db$ 가 작아질수록 낮은 온도차에서 균열이 발생하는 것으로 관찰되었다.

Fig. 7은 온도 차이 60 °C에서의 균열 분포를 콘크리트의 인장 손상도의 분포로 나타낸 것으로 각 FRP 보강근의 지름 별로 도시하였다. 앞서 언급한 것처럼 20 °C를 전·후로 하

여 계면에서 균열 발생이 시작되지만, 지름이 10 mm인 경우에는 방사방향으로 진전되지 않음을 확인할 수 있다. 지름이 10 mm인 경우를 제외하고 모든 해석 공시체에서 균열이 발생하였다. 방사 방향으로 진전되는 균열의 개수는  $c/db$ 가 작을수록 계면에서 원주방향으로 다수의 균열이 진전됨을 확인할 수 있다. 본 연구에서 검토한 GFRP 보강근의 경우 적어도

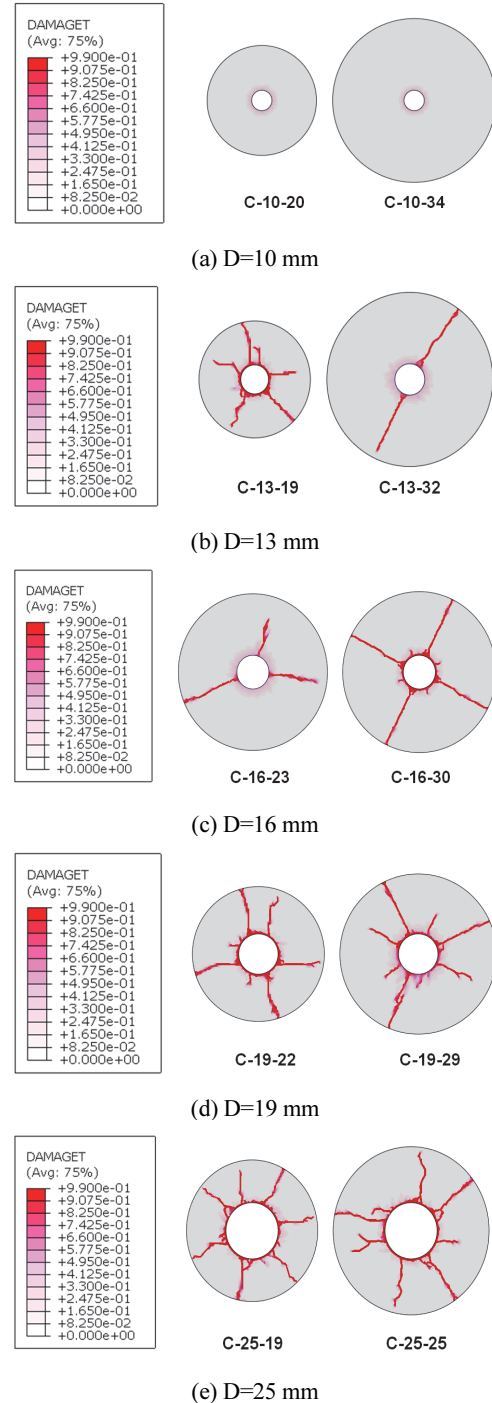


Fig. 7 Crack distribution at  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$

Table 4 Cracking temperature difference

Specimen	$c/db$	Cracking $\Delta T$ (°C)			
		FRP bar/concrete interface		External surface of concrete	
		Analysis results	FE results	Test results	FE results
C-10-20	2.1	21	20	-	-
C-10-34	3.6	22	21	-	-
C-13-19	1.5	20	19	30	45
C-13-32	2.5	21	21	-	52
C-16-23	1.5	20	20	40	47
C-16-30	1.9	21	21	-	46
C-19-22	1.2	19	19	30	36
C-19-29	1.5	20	19	30	45
C-25-19	0.8	18	18	30	27
C-25-25	1.0	19	19	30	27

$c/db$ 가 3.0 이상의 피복두께를 확보해야 횡방향 열팽창에 대한 균열을 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 콘크리트의 보강근으로 이방성 재료 특성을 가지는 FRP 보강근을 사용할 경우에 온도로 인한 균열의 특성을 고려하여 적절한 피복두께를 선정하기 위한 선행 연구로서 탄성해석 및 유한요소해석을 수행하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 선행 및 본 연구결과로부터 FRP 보강근 콘크리트는 온도가 하강하여 음의 온도차가 발생하는 경우에는 탄성 거동을 하지만, 온도가 상승하여 양의 온도차가 발생할 경우 계면에 균열을 유발하는 응력이 발생하고 비탄성 거동을 함을 확인하였다.
- 2) 비선형 유한요소해석 결과 양의 온도 차이가 발생하는 경우 탄성해석의 변형률 보다 대략 1.2 배~1.4 배 크게 나타났으며 이는 선행 연구결과와도 유사한 수준이었다. 이를 통해 유한요소해석으로 FRP 보강근 콘크리트의 비탄성 거동을 적절한 수준으로 모사 가능함을 유추할 수 있다.
- 3) 계면에서의 균열 발생은 대략 온도차 20 °C를 전후로 시작되었으며, 이 시점까지는 탄성거동을 하므로 탄성해석으로도 이에 대한 평가가 가능할 것으로 판단된다.
- 4) 선행 연구결과와 유사하게 보강근 지름에 대한 콘크리트 피복의 두께 비인  $c/db$ 가 균열 발생에 밀접한 연관이 있으며, 보강근 지름에 비하여 두께가 부족할 경우 균열 발생을 가속화 시킨다.
- 5) 추후 본 연구에서 수행한 유한요소법으로 유리섬유 보강근 이외에도 다양한 섬유보강근에 대한 해석적 평가가 가능하다고 판단된다. 향후 다양한 콘크리트 강도,  $c/db$ , 보강근 재료 물성에 대한 추가적인 해석과 이를 검증하는 실험을 통하여 FRP 보강근 콘크리트의 적절한 피복 두께를 제안할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2021년도 인하공업전문대학 학술연구사업 지원에 의하여 연구되었음.

## References

1. ACI 440.1R-15 (2015), Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, American

Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

2. Aiello, M. A., Focacci, F., and Nanni, A. (2001). Effects of Thermal Loads on Concrete Cover of Fiber Reinforced Polymer Reinforced Elements: Theoretical and experimental analysis. *ACI Materials Journal*, 98(4), 332-339.

3. Carreira, D. J. and Chu, K. H. (1985) Stress-strain Relationship for Plain Concrete in Compression. *ACI Journal*, American Concrete Institute, 82(6), 797-804.

4. Cho J. S., Kim M. S., Lee Y. H., and Kim H. C. (2011) Experimental Study on Shear Strength of Concrete Deep Beam Reinforced FRP Bars. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 24(1), 23-32 (in Korean)

5. Choi D. U., Chun S. C., and Ha S. S. (2009) Splice Length of GFRP Rebars based on Flexural Tests of Unconfined RC Members. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(1), 65-74 (in Korean)

6. Gang, H. G. and Kwak, H. G. (2017) A Strain Rate Dependent Orthotropic Concrete Material Model. *International Journal of Impact Engineering*, 103(1), 211-224

7. Grassl, P. and Rempling, R. (2008) A Damage-plasticity Interface Approach to the Meso-scale Modelling of Concrete Subjected to Cyclic Compressive Loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(16), 4804-4818.

8. Hordijk D. A. (1992) Tensile and Tensile Fatigue Behaviour of Concrete; Experiments, Modelling and Analyses. *Heron*, 37(1), 1-79.

9. Jankowiak, T. and Lodygowski, T. (2005) Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model. *Foundation of civil and environmental engineering*, No. 6, Poznan university of technology, Poland, 53-69.

10. Kim S. M. and Abu Al-Rub R. K. (2011) Meso-scale Computational Modeling of the Plastic-damage Response of Cementitious Composites. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 339-358.

11. Korea Concrete Institute(KCI) (2021) The Korean Concrete Structure Design Code, Korea Concrete Institute, Korea (in Korean)

12. Lee S. Y. and Son, B. J., (2021) Study of Design of Concrete Beam Reinforced with FRP Bars. *Journal of Korea Society of Advanced Composite Structure*, 12(5), 44-53 (in Korean)

13. Lee, H. J., Moon J. H., Yang K. H., and Kim, S. J. (2018) Flexural Behavior of Beams Reinforced with Longitudinal GFRP Bars in Exterior Beam-column Connection. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 31(3), 211-220

14. López, C. M., Carol, I., and Aguado, A. (2008) Meso-structural Study of Concrete Fracture using Interface Elements. II: Compression, Biaxial and Brazilian Test. *Materials and Structures*, 41(3), 601-620.

15. Masmoudi, R., Zaidi A., and Gerard, P. (2005) Transverse Thermal Expansion of FRP Bars Embedded in Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 9(5), 377-387

16. Matthy, S., De Shutter, G., and Taerwe, L. (1996) Influence of Transverse Thermal Expansion of FRP Reinforcement on the Critical Concrete Cover. 2nd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, ACMBMS-II, Montreal, 665-672.



17. Moon D. Y. and Oh H. S. (2011) The Combined Effect of Concrete Environment and High Temperature on Interlaminar Shear Strength of FRP Reinforcement. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(6), 749-746 (in Korean)
18. Park C. G., Won J. P., and Cha, S. S. (2009) Bond Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymer Rebar in Fiber Reinforced High Strength Concrete with Surface Treatment Methods of Reinforcing Fibers. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(3), 275-282 (in Korean)
19. Prakash, A., Anandavalli, N., Madheswaran, C. K., Rajasankar, J., and Lakshmanan, N. (2011) Three Dimensional FE Model of Stud Connected Steel-concrete Composite Girders subjected to Monotonic Loading. *International Journal of Mechanics and Applications*, 1(1), 1-11.
20. Smith, M. (2009). ABAQUS/Explicit User's Manual, Version 6.9. Dassault Systèmes Simulia Corp.
21. Rahman, H. A., Kingsley, C. Y., and Taylor, D. A. (1995) Thermal Stress in FRP Reinforced Concrete. *Proceeding Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, CSCE, Ottawa*, 605-614.
22. Rhee I. K. and Kim W (2006) Effects of numerical modeling on concrete heterogeneity. *Journal of Korea Concrete Institute*, 18(2), 189-198 (in Korean).
23. Seo, D. W., Han, B. S., and Shin, S. W. (2007) Behaviour of One-way Concrete Slabs Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(6), 763-771(in Korean)
24. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N. (1970) *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York.

Received : 12/08/2021

Revised : 12/15/2021

Accepted : 12/23/2021

---

**요 지 :** 이 연구에서는 FRP 보강근과 콘크리트의 횡방향 열팽창 거동이 콘크리트 피복두께에 미치는 영향을 살펴보기 위해 온도 20℃를 기준으로 -70℃~80℃까지 변화시켜가며, 콘크리트의 거동을 해석적으로 검토하였다. 이를 위해 서로 다른 FRP 보강근의 지름과 피복 두께를 가지는 FRP 보강근 콘크리트를 대상으로 이론적 탄성해석과 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과, 음의 온도차이에서는 콘크리트가 압축을 받아 이론적 변형을 결과와 유한요소결과가 유사하였지만, 양의 온도차이에서는 콘크리트에 인장응력이 발생하고 더 나아가 균열이 발생하여 이론적 결과보다 1.2~1.4 배 큰 변형을 나타내었다. 또한 FRP 보강근의 지름과 콘크리트의 피복두께 비(c/db)가 균열의 발생과 밀접한 연관이 있으며, 보강근의 지름에 비하여 피복두께가 부족할 경우 균열이 발생하여 구조물의 사용성이 저하되었다. FRP 보강근의 횡방향 열팽창계수는 콘크리트보다 3배 이상 크기 때문에, 설계 시 이에 대한 고려가 필요하다고 판단되었다.

**핵심용어 :** FRP 보강근, 횡방향 열팽창 계수, 유한요소법, 콘크리트 피복두께

---