



PVA-ECC에 의해 피복 보강된 RC보의 비틀림 거동에 대한 연구

정영석¹ · 권민호² · 서현수³ · 김진섭³ · 김기영⁴

경상대학교 토목공학과 석사¹, 경상대학교 토목공학과 교수²,
 경상대학교 토목공학과 박사과정³, 텍사스알링턴주립대학교 연구원⁴,
 한국수자원공사 수석연구원⁵

Torsional Behavior of Beams Retrofitted by PVA-ECC

Jeong, Yeong-Seok¹ · Kwon, Min-Ho² · Seo, Hyeon-Soo³ · Kim, Jin-Sup⁴ · Kim, Gi-Yeong⁵

¹Master, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

²Professor, Department of Civil Engineering, ERI, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

³Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

⁴Department of Civil Engineering, University of Texas at Arlington, Arlington, TX 76019, USA

⁵Head Researcher, Korea water Resources Corporation, Daejeon, Korea

Abstract: The need to consider torsion in the design of members of a structure has recently been increasing; therefore, many studies on torsion have been carried out. Recent research was focused on the torsional performance of concrete according to the reinforcing materials used. Of particular interest, are torsion studies of beams made of SFRC(steel fiber reinforced concrete), and there has been increasing use of SFRC at construction sites. In contrast, research on the composite PVA-ECC (polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite) has only covered its mechanical performance, though it exhibits excellent tensile-strain performance (better than SFRC). Therefore, research on the torsion of concrete beams retrofitted using PVA-ECC is lacking. In this study, the behavior characteristics and performance of reinforced-concrete beams retrofitted by PVA-ECC was investigated experimentally. The experimental results show that the resistance to torsional cracking is increased by PVA-ECC. In addition, the strain on the rebar of the specimen was found to be reduced.

Key Words: Torsional behavior, High performance cementitious composites, Fiber reinforced, PVA-ECC

1. 서론

최근 부재의 설계에서 비틀림 효과를 고려할 필요성이 증대되었으며, 또한 보강철근을 배치하여 비틀림 강도를 증가시켜야 할 필요가 높아졌다. 이러한 변화는 크게 두 가지의 배경을 갖고 있다. 첫 번째로, 현대 대부분의 구조물에 적용하는 강도설계법은 해석과 설계가 크게 개선되어 정확해짐에 따라 여유안전율이 작아지고 단면의 크기가 작아지기 때문이며, 두 번째로, 곡선형교량, 편심하중을 받는 상자형 교량 및 나선형 계단과 같이 비틀림이 거동을 주로 지배하는 구조물의 사용이 증가하는 추세이기 때문이다.(Nilson,

2005; Won et al., 2012)

이러한 배경에 따라 여러 비틀림 관련 연구가 이루어지고 있으며 고성능 콘크리트 재료에 대한 보의 비틀림 연구는 주로 강섬유 보강 콘크리트(SFRC)의 실험 및 해석적 연구가 진행되어 왔다. Narayanan and Kareem-Palanjian (1986), Rao and Seshu (2005), Thomas and Ramaswamy (2006)는 보의 비틀림 거동에 대한 강섬유 보강 콘크리트의 영향에 대한 연구를 수행하였으며, Mansur et al.(1989), Chalioris and Karayannis (2009)는 강섬유 보강 콘크리트의 비틀림 거동 특성을 연구하였다. 이들의 연구 결과는 강섬유의 혼입에 의해 콘크리트의 비틀림 성능이 향상되는 것을 나타낸다. 또한, Karayannis (1995), Karayannis

주요어: 비틀림, 고인성 시멘트, 섬유보강, PVA-ECC

Corresponding author: Kwon, Min-Ho

Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, 900 Gajwa-dong, Jinju 660-701, Korea.
 Tel: +82-55-772-1796, Fax: +82-55-772-1799, E-mail: kwonm@gnu.ac.kr

Received February 17, 2015 / Revised February 26, 2015 / Accepted February 26, 2015

Table 1. Properties of Specimens

| Specimens | Core | Cover | Longitudinal reinforcement | | | Transverse reinforcement | | | |
|-----------|-------|---------|----------------------------|----------|----------------|--------------------------|----------|----------------|--------|
| | | | Bar | ρ_l | f_{ly} (MPa) | Bar | ρ_t | f_{ty} (MPa) | s (mm) |
| N21 | 21MPa | | 4-D16 | 0.0022 | 400 | D10 | 0.0042 | 400 | 150 |
| N40 | 40MPa | | | | | | | | |
| ECC | 21MPa | PVA-ECC | | | | | | | |

$\rho_l = A_l/A_c$, f_{ly} : yield strength of longitudinal reinforcement, $\rho_t = A_t p_h / (A_c s)$, f_{ty} : yield strength of transverse reinforcement

and Chalioris (2000)는 강섬유 보강 콘크리트 보의 비틀림 거동 특성을 파악하기 위한 비선형 수치해석 기법을 제안하였다.

지난 수십 년간 각종 신소재 섬유를 이용한 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete; FRC)는 끊임 없는 발전을 이루어 왔다. 특히 최근에는 1축 인장 상태에서 인장변형을 경화거동을 나타낼 수 있는 고인성 섬유보강 시멘트 복합재(Engineered Cementitious Composite; ECC)가 개발되었다.(Li and Wu, 1992) ECC는 시멘트 페이스트 또는 모르타 매트릭스 내에 고성능의 합성섬유를 혼입함으로써 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 인장응력 및 휨 모멘트 작용하에 있어서 복수의 미세균열인 다중균열을 발달시키고, 섬유의 가교작용에 의해 균열 발생 후에도 변형의 증대에 따라 응력이 증가하는 변형 경화 특성을 가지며, 수 %의 인장변형 능력을 가진 시멘트계 복합재료로 최근 건설재료의 활용이 기대되고 있다. 이러한 ECC는 종래의 콘크리트가 가지는 인장응력하에서의 취성적인 성질을 극복함으로써 구조물의 구조성능을 크게 향상시킬 수 있다. ECC는 인장부로의 활용 및 에너지 흡수재, 보수·보강재 등 다양한 분야에서의 적용가능성을 가지고 있으며, 여러 방면으로의 활용을 위한 기술개발이 활발히 진행되고 있다.(Kim et al., 2003) 국내에서는 ECC 재료와 그 활용 등에 관해서 Jeon et al. (2004)에 의해 소개된 바 있고, Park et al. (2006)에 의해 ECC의 설계기법 및 기술개발 사례에 대하여 소개 되었으며 실험적으로 ECC의 적용에 대한 연구

또한 활발히 이루어지고 있다. 하지만 대부분의 연구가 ECC의 인장특성을 이용한 휨 성능에 대한 실험적 연구가 주를 이루고 있으며 비틀림을 받는 구조물에 ECC를 사용한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 PVA-ECC를 사용하여 피복 보강된 ECC 시험체와 N21, N40 시험체의 비틀림 실험을 통하여, PVA-ECC로 피복 보강된 철근 콘크리트 보의 거동특성과 적용성에 대해 고찰하였다.

2. 실험설계 및 비틀림 실험 방법

2.1 실험설계

비틀림을 받는 철근 콘크리트 구조물의 PVA-ECC 피복 보강에 따른 비틀림 거동의 변화를 연구하기 위하여 Fig. 2과 같이 정사각형 단면의 보를 설계하였다. 모든 시험체는 양단 250 mm에 125 mm간격으로 스트립 2개를 배치하였다. 나머지 2400 mm 부분은 스트립 간격 150 mm로 하여 제작하였으며, 2400 mm의 실험구간을 3등분하여 각각 PL구간, PM구간, PR구간으로 나누어 분석하였다. 시험체의 철근은 모두 SD400을 사용하였고, 철근의 변형을 분포를 판단하기

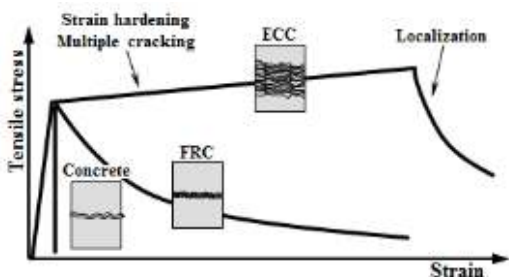


Fig. 1 Tensile Stress-Strain Relation for Cementitious Materials (Kim et al., 2003)

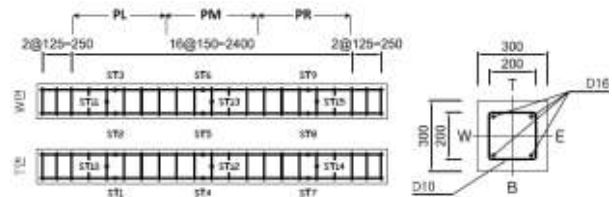


Fig. 2 Cross Section and Reinforcement Arrangement of Specimens

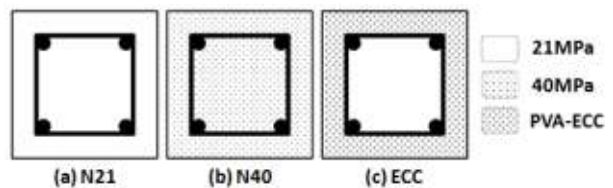


Fig. 3 Cross Section of Specimens

Table 2. PVA-ECC Mixture Proportion

| W/B | SS/B | 단위량 (kg/m ³) | | | | | | | | |
|------|------|--------------------------|-------|---------|---------|---------|------|-------|----------|-----------------------|
| | | W | C | Slag | FA | SS | PCSP | HPMC | Defoamer | PVA fiber (by volume) |
| 0.45 | 0.71 | 375 | 500.5 | 166.675 | 166.675 | 591.679 | 2.5 | 1.667 | 0.833 | 39.0 (2.0%) |

Table 3. PVA Fiber Properties

| Density (g/cm ³) | Length (mm) | Diameter (mm) | Aspect ratio | Tensile strength (MPa) | Elastic modulus (MPa) |
|------------------------------|-------------|---------------|--------------|------------------------|-----------------------|
| 1.3 | 12 | 0.015 | 800 | 1269 | 27640 |

Table 4. Compressive Strength of Concrete

| Design strength | Compressive strength (MPa) | | | Average strength (MPa) |
|-----------------|----------------------------|------|------|------------------------|
| | N0.1 | N0.2 | N0.3 | |
| 21MPa | 18.7 | 22.7 | 23.5 | 21.6 |
| 40MPa | 41.4 | 40.5 | 41.7 | 41.2 |
| PVA-ECC | 40.7 | 39.5 | 41.1 | 40.4 |

Table 5. Splitting Tensile Strength of Concrete

| Design strength | Splitting tensile strength (MPa) | | | Average strength (MPa) |
|-----------------|----------------------------------|------|------|------------------------|
| | N0.1 | N0.2 | N0.3 | |
| 21MPa | 2.62 | 1.76 | 2.00 | 2.1 |
| 40MPa | 3.37 | 3.23 | 3.40 | 3.3 |
| PVA-ECC | 4.42 | 4.75 | 4.51 | 4.6 |

Table 6. Yield Strength of Steel Rebar

| Bar | Type | Yield strength (MPa) | Yield strain |
|-----|-------|----------------------|--------------|
| D13 | SD400 | 405 | 0.0023 |
| D16 | | 425 | 0.0025 |

위하여 Fig. 2에 나타난 ST1~15의 위치에 변형률 게이지를 부착 하였다. 타설은 각각 강도 21 MPa과 40 MPa의 콘크리트를 사용하여 시험체 N21과 N40을 Fig. 3(a), (b)와 같이 제작하였다. 그리고 ECC 시험체는 21 MPa의 콘크리트로 코어부를 200 mm × 200 mm 사이즈로 제작하고 양생 후, 다시 외부 피복 50 mm를 PVA-ECC로 타설하여 ECC 시험체를 Fig. 3(c)와 같이 제작하였다. 상세한 시험체의 제원은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

2.1.1 PVA-ECC의 배합

ECC 시험체에 사용된 PVA-ECC의 배합은 시멘트 (C), 슬래그(Slag), 플라이 애쉬(FA)의 단위량의 합(B)

에 대해 W/B는 0.45이고, 규사(SS)를 잔골재로 사용하여 SS/B를 0.71로 배합하여 사용하였다. 그리고 PVA섬유의 혼입은 체적에 대한 부피비 2.0%로 하고, 단위중량을 이용하여 해당 양만큼 배합하였다. 또한, PVA-ECC의 유동성을 증가시키고 배합 시 섬유를 분산을 원활하게 하기 위해서 유동화제(PCSP)를 사용하였으며, 배합 시 재료 분리를 방지하기 위해서 증점제(HPMC)를 사용하였다. 이를 정리하여 Table 2에 PVA-ECC 배합표로 작성하였고, Table 3에 PVA-ECC의 배합에 사용된 PVA섬유의 물성치를 나타내었다.

2.2 재료시험

2.2.1 콘크리트 및 PVA-ECC의 압축강도

21 MPa과 40 MPa의 콘크리트에 대한 재료시험은 KS F 2403의 규정에 따라 공시체를 제작하여, KS F 2405의 규정에 따라 재령일수 28일에 콘크리트의 압축강도 시험을 수행 하였다. 그리고, PVA-ECC의 압축강도 시험은 KS L 5105에 따라 50mm × 50mm × 50mm의 큐빅 몰드를 사용하여 시편을 제작하고, 재령일수 28일에 KS규정에 따라 PVA-ECC의 압축강도 시험을 수행하였다. 그에 대한 결과는 Table 4에 정리하여 나타내었다.

2.2.2 콘크리트 및 PVA-ECC의 쪼갬 인장강도

콘크리트와 PVA-ECC의 쪼갬 인장강도 시험은 KS F 2423에 준하여 Ø100 mm × 200 mm의 실린더형 몰드를 사용하여 시험체를 제작하였다. 각각의 재료에 대한 쪼갬 인장강도용 공시체를 재령일수 28일에 KS 규정에 따라 쪼갬 인장강도 시험을 수행하였다. 그에 대한 결과는 Table 5에 정리하여 나타내었다.

2.2.3 철근의 인장강도

시험체 제작에 사용된 철근의 인장 시험은 KS B 0801(금속재료인장시험편 규정)에 따라 SD400의 D10 이형철근과 D16 이형철근의 시편을 제작하고 KS B 0802의 금속재료 인장시험방법에 따라 시험을 실시하였다. 그에 대한 결과는 Table 6과 같다.

2.3 가력 및 측정

시험 장치와 시험체의 설치등 선행 연구자들의 연

구(Hsu TTC, 1968; gunneswara et al., 2006; Narayanan et al., 1979; Mansur et al., 1985; Kim, Y. H. and Kim, H. S. 2012)를 바탕으로 Fig. 4에 따라 제작 설치하였다. 시험체의 회전을 위한 부분은 회전반경 550 mm의 곡면 따라서 회전하게 장치하고, 곡면에 의한 회전축과 시험체 정면 중심이 일치 하게 설치하였다. 비틀림의 가력은 시험체를 고정한 가력부(Torsional arm)의 회전축에서 630 mm 떨어진 위치에 가력장치를 설치하여 Fig. 4에 표시된 화살표 방향으로 10 mm/min의 수직 변위하중(Vertical load)을 작용시켜 비틀림을 발생시켰다.

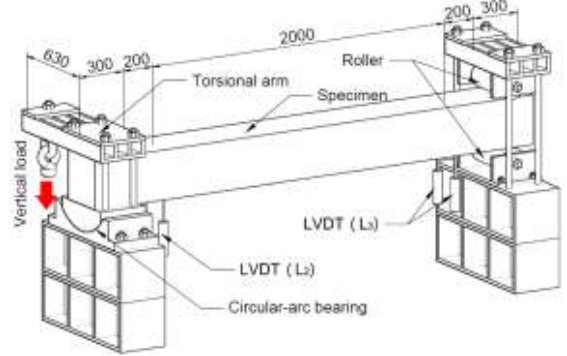


Fig. 4 Test Setup for Pure Torsion

비틀림 모멘트와 비틀림 각의 관계를 파악하기 위하여 LVDT를 양단 지점부에서 200 mm의 간격을 두어 L2, L3 지점에 각각 2개를 200 mm 간격으로 설치하여 양단 LVDT간 간격을 2000 mm가 되도록 설치하였다. 이 4개의 변위를 이용하여 양단 측정 간격 2000 mm에 대한 비틀림 각을 계산하여 비틀림 모멘트와 비틀림 각에 대한 경향을 파악 하고자 하였다. 비틀림 각의 계산은 Xiao-Ning Peng et al. (2011)에 의해 제안된 식을 사용하였고, 그 식은 (1)과 같다.

$$\theta = \left[\arctan\left(\frac{L_{3i} - L_{3j}}{b}\right) - \arctan\left(\frac{L_{2i} - L_{2j}}{b}\right) \right] / h \quad (1)$$

여기서, b 는 L_2, L_3 지점 각각의 두 LVDT 사이의 간격, h 는 L_2, L_3 두 지점 사이의 거리, 그리고 $L_{2i}, L_{2j}, L_{3i}, L_{3j}$ 은 각 지점에서 관측된 변위의 값이다.

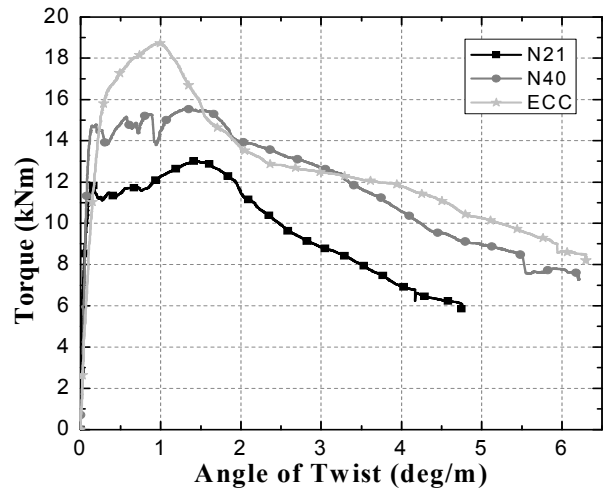


Fig. 5 Torque-twist Relation for Specimens

3. 실험 결과 및 분석

3.1 비틀림 모멘트 - 비틀림 각

각 시험체의 비틀림 모멘트 - 비틀림 각 관계는 Fig. 5에 나타내었고, 초기균열 발생점과 최대 비틀림 모멘트 점의 비틀림 모멘트와 비틀림 각을 정리하여 Table 7에 나타내었다.

Fig. 5의 각 시험체의 초기 선형구간의 기울기에서 N21 시험체보다 ECC 시험체가 낮은 기울기로 증가하는 양상을 보였다. ECC 시험체가 일반 콘크리트 시험체보다 낮은 비틀림 모멘트 증가 기울기를 보이는 이유는 Table 8에 나타난 재료의 압축강도와 탄성계수와의 관계에서 알 수 있듯이 PVA-ECC가 동일 강도의 일반 콘크리트 보다 낮은 탄성계수를 가지기 때문인 것으로 판단된다. Table 8에 나타난 일반 콘크리트(Normal concrete)의 탄성계수는 식(2)에 의해 계산된 값이고, 그 이외의 값은 본 연구와 유사한 재료를 사용한 Jeong (2010)의 논문에서 수행된 재료시험 결과를 나타낸 것이다.

Table 7. Experimental Results

| Specimens | At cracking | | At ultimate | |
|-----------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|
| | Torque (kN·m) | Angle of Twist (deg/m) | Torque (kN·m) | Angle of Twist (deg/m) |
| N21 | 11.08 | 0.104 | 13.02 | 1.435 |
| N40 | 11.32 | 0.076 | 15.56 | 1.384 |
| ECC | 15.79 | 0.288 | 18.73 | 0.993 |

Table 8. Compressive Strength of Concrete (Jeong J. S., 2010)

| Name | Compressive strength (MPa) | Young's modulus (GPa) |
|-----------------|----------------------------|-----------------------|
| Normal concrete | 21 | 26 |
| | 40 | 31 |
| PE-ECC | 65 | 23 |
| PVA-ECC | 56 | 18 |
| PE-HPFRCC | 51 | 19 |
| PVA-HPFRCC | 34 | 14 |

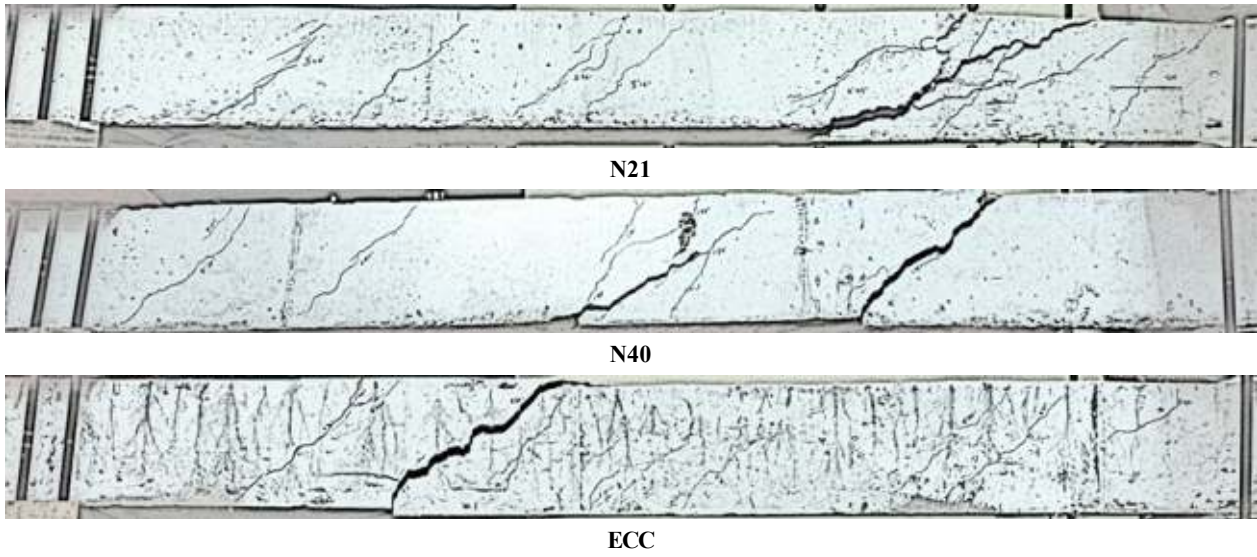


Fig. 6 Final crack distribution of specimens (E-face)

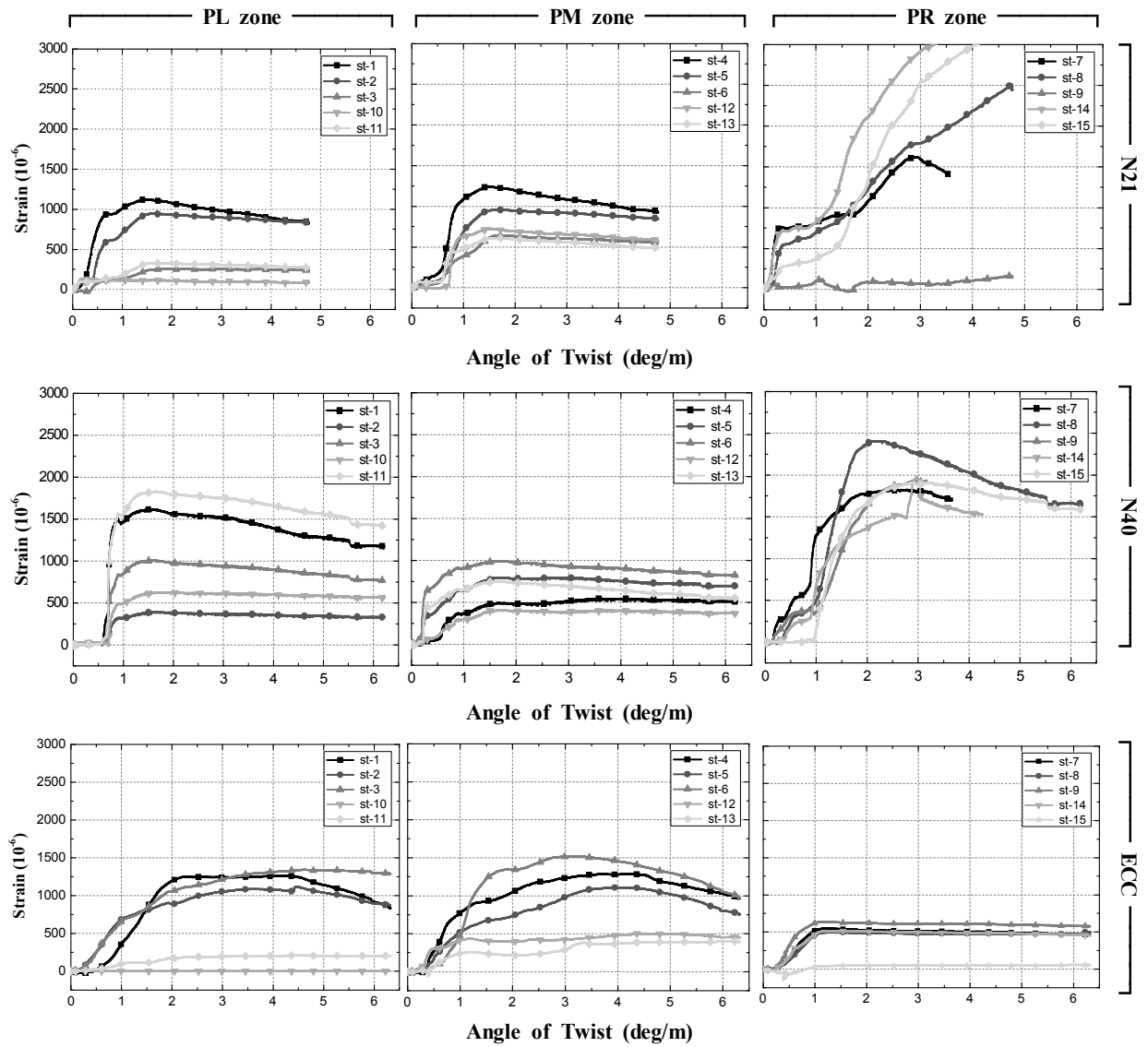


Fig. 7 Strain-Twist Relation for Specimens

$$E_c = 8500 \times \sqrt[3]{F_{ck} + 8} \quad (2)$$

여기서, F_{ck} 는 콘크리트의 공칭압축강도이다.

Table 7의 초기균열이 관찰된 점에서의 비틀림 모멘트와 비틀림 각에 대하여 ECC 시험체가 큰 비틀림 모멘트와 비틀림 각을 보이는 것으로 나타났다. 여기서 일반 콘크리트 시험체의 평균값에 대한 ECC 시험체의 비틀림 모멘트는 1.4배, 이때의 비틀림 각은 2.5배로 계산되었고, 이러한 결과는 초기균열까지의 거동에서 PVA-ECC로 피복 보강된 ECC 시험체가 균열에 대한 저항성이 우수함을 나타낸다.

초기 균열 발생 이후의 최대 비틀림 모멘트까지의 거동에서 일반 콘크리트 시험체는 비틀림 각의 증가에 따라 균열이 발달하며, 그에 따른 영향으로 비틀림 모멘트가 증감을 반복하며 증가하는 경향의 거동을 보였고 고강도 콘크리트가 사용된 N40 시험체에서 더욱 뚜렷하게 증감이 나타났다. 반면 ECC 시험체의 경우 초기균열 발생 이후 증가 기울기가 감소하는 포물선 형태의 비틀림 모멘트 증가를 보였다. 이를 통해 PVA-ECC의 피복 보강을 통해서 고강도 콘크리트의 문제점인 취성적 거동을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

최대 비틀림 모멘트의 경우 N21 시험체는 비틀림 각 1.435 deg/m에서 13.02 KN·m으로, N40 시험체는 비틀림 각 1.384 deg/m에서 15.56 KN·m으로 나타났고, ECC 시험체는 비틀림 각 0.993 deg/m에서 18.73 KN·m으로 나타났다. 최대 비틀림 모멘트의 비는 N21 시험체를 기준으로 N40 시험체가 1.20배, ECC 시험체가 1.44배로 계산되어 ECC 시험체가 동일한 압축강도를 가지는 N40 시험체 보다 뛰어난 비틀림 저항 성능을 보여주었다. 반면, 최대비틀림 모멘트 발생 시의 비틀림 각에 대해서는 동일한 N21 시험체를 기준으로 N40 시험체가 0.96배, ECC 시험체가 0.69배로 나타나 ECC 시험체가 상대적으로 낮은 비틀림 각에서 균열에 의해 파괴되는 것으로 나타났다. 이는 균열 이후의 거동에서 ECC 시험체가 균열의 성장에 따라 균열의 폭이 확장되었고 이에 따라서 높은 비틀림 모멘트에서 ECC 시험체의 심부콘크리트가 분담하는 균열 저항능력(인장능력)의 손실에 의해 피복 PVA-ECC의 비틀림 모멘트에 대한 부담이 커지면서 급격하게 비틀림 모멘트가 감소하는 경향을 보인 것으로 판단된다.

ECC 시험체가 상대적으로 낮은 비틀림 각에서 비틀림 모멘트에 대한 저항성을 잃고 급격한 비틀림 모멘트의 감소를 보였으나 비틀림 저항성을 회복하고, 전체적으로 N40 시험체 보다 높거나 유사한 거동을 보였다./

3.2 철근 변형률 - 비틀림 각

철근의 변형률과 비틀림 각의 상관관계를 분석하기 위하여 각 시험체 E면의 균열사진을 Fig. 6에 정리하여 나타내었고, 시험체의 주철근과 스트립의 철근 변형률 - 비틀림 각 관계곡선을 각 구간별로 정리하여 Fig. 7에 나타내었다.

일반 콘크리트 시험체의 경우 균열의 발생위치와 균열의 성장과 발달에 따라 철근의 변형률이 급격하게 수직 변화하는 형태를 보인다. 반면 ECC 시험체의 경우 일반 콘크리트 시험체와 달리 변형률이 비틀림 각의 증가에 따라 완만한 기울기로 증가하는 양상이 보였다. 이는 ECC의 특징인 균열 억제와 섬유유리 균열에 대한 가교 역할에 의해 시험체에 작용하는 비틀림 모멘트가 균열부에 집중되는 것을 막아주는 효과에 의한 것으로 판단된다.

주철근에서 발생한 최대변형률이 N21 시험체의 경우 PR구간에 위치한 변형률 게이지 st-8에서 2502×10^{-6} 로, N40 시험체의 경우 PR구간에 위치한 변형률 게이지 st-8에서 2404×10^{-6} 로 나타났고, ECC 시험체의 경우 PM구간에 위치한 변형률 게이지 st-6에서 1516×10^{-6} 로 나타나 주철근이 항복 변형률에 도달하지 않은 것으로 나타났다. 그리고 스트립에서 발생한 최대변형률이 N21 시험체의 경우 PR구간에 위치한 변형률 게이지 st-14에서 3725×10^{-6} 로, N40 시험체의 경우 PR구간에 위치한 변형률 게이지 st-14에서 1970×10^{-6} 로 나타났고, ECC 시험체의 경우 PM구간에 위치한 변형률 게이지 st-12에서 503×10^{-6} 로 나타났다.

위의 결과를 바탕으로 ECC로 피복 보강된 경우 주철근과 스트립에서 부담하게 되는 시험체의 인장응력을 우수한 인장특성을 가진 피복의 ECC가 일부 분담하여 철근에 작용하게 되는 변형률을 저감시키고 분산시키는 효과를 보이는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 동일한 사이즈와 철근상세를 가지는 철근 콘크리트 보에 대하여 PVA-ECC로 피복 보강된 경우의 철근 콘크리트 보의 비틀림 거동 특성에 대하여 실험적으로 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 초기균열이 관찰된 점에서 ECC 시험체는 일반 콘크리트 시험체의 평균값에 대하여 비틀림 모멘트는 1.4배, 비틀림 각은 2.5배로 나타났다. 이를 통해서 PVA-ECC로 피복 보강된 ECC 시험체가 균열에 대한 저항성이 우수함을 알 수 있다.

2) 초기균열 발생 이후의 거동에서 ECC 시험체는

일반 콘크리트 시험체 달리 완만한 증가곡선을 보였다. 따라서 PVA-ECC의 피복 보강을 통해서 고강도 콘크리트의 문제점인 취성적 거동을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

3) ECC 시험체가 상대적으로 낮은 비틀림 각에서 비틀림 모멘트에 대한 저항성을 잃고 급격한 비틀림 모멘트의 감소를 보였으나 비틀림 저항성을 회복하고, 전체적으로 N40 시험체 보다 높거나 비슷한 거동을 보였다.

4) 섬유유 균열에 대한 가교 역할에 의해 시험체에 작용하는 비틀림 모멘트가 균열부에 집중되는 것을 막아주는 효과에 의한 것으로 판단되며, 다중균열특성으로 인해 철근에 작용하게 되는 변형률을 저감시키고 분산시키는 효과를 보이는 것으로 판단된다.

본 연구는 PVA-ECC로 피복 보강된 RC보에 비틀림 거동에 대한 기초적 연구로서 위의 결론은 본 연구의 제한된 실험조건에서 성립하는 것이다. 따라서 앞으로 PVA섬유의 배합비, 스트립의 간격, 심부 콘크리트의 강도 등의 추가적인 변수에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(14SCIP-B065985-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- American Concrete Institute (2012), *Building Code Requirements for Reinforced Concrete* (ACI 318), Farmington Hills, Michigan, USA
- Arthur H. Nilson, David D., Charles W. D. (2005), *Design of Concrete Structures*, McGraw-Hill, New York, pp. 231-232.
- Chalioris, C. E., Karayannis, C. G. (2009), Effectiveness of the Use of Steel Fibres on the Torsional Behaviour of Flanged Concrete Beams, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, No. 1, pp. 331-341.
- Carl Redon, Victor C. Li, Fellow, ASCE, Cynthia Wu, Hideki Hoshiro, Tadashi Saito, Atsuhisa Ogawa (2001), Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix, *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 13, No. 6, pp. 99-406.
- Fang, L. K., Shiau, J. K. (2004), Torsional Behavior of Normal- and High-Strength Concrete, *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 3, pp. 304-313.
- Fischer G., Victor C. Li (2003), Deformation behavior of fiber-reinforced polymer reinforced Engineered Cementitious Composite (ECC) flexural members under reversed cyclic loading conditions. *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 1, pp. 25-35.
- Fischer G., Victor C. Li (2002), Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel-reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions. *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 6, pp. 781-790.
- Hsu T. T. C. (1968), Torsion of structural concrete-interaction surface for combined torsion, shear and bending in beams without stirrups, *ACI Journal*, Vol. 65, No. 1, pp. 51-60.
- Hsu T. T. C. (1968), Torsion of structural concrete -behavior of reinforced concrete rectangular member. *Am Concr Inst, SP*, Vol. 18, pp. 261-306.
- Jeong, J. S. (2010), *An Experimental Study on the Mechanical and Fire Resistance Properties of ECC Fire Resistance Column Panel*
- Jeon, S. E., Park, H. G., Kang, J. O., Lee, M. S. (2004), A Review of the Material and Its Applications on Engineered Cementitious Composites(ECC), *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 8, No. 2, pp. 106-111.
- Karayannis, C. G., Chalioris, C. E. (2000), Experimental Validation of Smeared Analysis for Plain Concrete in Torsion, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 6, pp. 646-653.
- Karayannis, C. G. (1995), A Numerical Approach to Steel Fibre Reinforced Concrete under Torsion, *Structural Engineering Review*, Vol. 7, No. 2, pp. 83-91.
- Kim, Y. H., Kim, H. S. (2012), Experimental Study for Evaluating Structural Behavior of RC Beams Strengthened by Tapered Ended CFRP Sheets, *J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc.*, Vol. 3, No. 4, pp. 38-44.
- Kim Y. Y., Fischer G., Victor C. Li (2004), Performance of bridge deck link slabs designed with ductile Engineered Cementitious Composite (ECC), *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 6, pp. 792-801.
- Kim, J. H., Kim, Y. D., Kim, K. S., Cho, B. S., Jang, j. H., Kim, M. H. (2003), An Experimental Study on Mechanical Properties os Half Precast Concrete Complex Using PVA-ECC, *Architectural Institute of Korea*, Vol. 23, No. 2, pp. 419-422.
- Li, V. C. (1993), From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, *Journal of Structural Mechanics and Earthquake*,

Vol. 1-24, No. 417

- Li, V. C. (1992), Post-crack scaling relations for fiber reinforced cementitious composites, *ASCE Journal. Mater. Civil Eng*, Vol. 4, No. 1, pp. 41-57.
- Li, V. C., Wu H. C. (1992), Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites, *Applied Mechanics Review*, Vol. 45, No. 8, pp. 390-398.
- Mansur, M. A., Nagataki, S. H., Lee, S. H., Oosumimoto, Y. (1989), Torsional Response of Reinforced Fibrous Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 11, pp. 36-44.
- Mansur M. A., Paramasivam P. (1985), Fiber reinforced concrete beams in torsion, bending, and shear, *ACI Journal*, Vol. 82, No. 1, pp. 33-39.
- Narayanan, R., Kareem-Palanjian, A. S. (1986), Torsion in Beams Reinforced with Bars and Fibers, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112, No. 1, pp. 53-66.
- Narayanan R., Toorani-Goloosalar Z. (1979), Fibre reinforced concrete in pure torsion and combined bending and torsion, *Proc Inst Civil Eng Part 2*, pp. 987-1001.
- Peng, X. N., Wong, Y. L. (2011), Behavior of reinforced concrete walls subjected to monotonic pure torsion-An experimental study, *Engineering Structural*, Vol. 33, No. 9, pp. 2495-2508.
- Park, S. B., Kim, Y. Y., Victor C. Li (2006), Methodology and Example of High Ductile ECC Design, *KSMI*, Vol. 10, No. 5, pp. 3-11.
- Rao, T. D. G., Seshu, D. R. (2005), Analytical Model for the Response of Steel Fiber Reinforced Concrete Members under Pure Torsion, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 4, pp. 493-501.
- Thomas, J., Ramaswamy (2006), Shear Strength of Prestressed Concrete T-Beams with Steel Fibers over Partial/Full Depth, *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 3, pp. 427-435.
- Won, D. H., Han, T. H., Kim, J. H., Choi, J. H., Kang, Y. J. (2012), A Parametric Study on Seismic Performance of Internally Confined Hollow RC Columns, *J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc.*, Vol. 3, No. 2, pp. 28-35.