



압출성형 ECC 패널의 섬유분포 특성과 휨 성능

이방연¹⁾ · 한병찬²⁾ · 조창근³⁾ · 권영진²⁾ · 김윤용^{4)*}

¹⁾한국과학기술원 건설 및 환경공학과 ²⁾AMS엔지니어링 ³⁾조선대학교 건축학부 ⁴⁾충남대학교 토목공학과

Fiber Distribution Characteristics and Flexural Performance of Extruded ECC Panel

Bang-Yeon Lee,¹⁾ Byung-Chan Han,²⁾ Chang-Geun Cho,³⁾ Young-Jin Kwon,²⁾ and Yun-Yong Kim^{4)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

²⁾AMS Engineering, Daejeon 305-335, Korea

³⁾School of Architecture, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

⁴⁾Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT This paper presents the mix composition, production method, and curing condition applied to the extruded ECC(Engineered Cementitious Composite) panel which are able to exhibit multiple cracking and potential pseudo strain-hardening behavior. In addition to the production technique of extruded ECC panel, the effect of fiber distribution characteristics, which are uniquely created by applying extrusion process, on the flexural behavior of the panel is also focussed. In order to demonstrate fiber distribution, a series of experiments and analyses, including image processing/analysis and micro-mechanical analysis, was performed. The optimum mix composition of extruded ECC panel was determined in terms of water matrix ratio, the amount of cement, ECC powder, and silica powder. It was found that flexural behavior of extruded ECC panel was highly affected by the slight difference in mix composition of ECC panel. This is mainly because the difference in mix composition results in the change of micro-mechanical properties as well as fiber distribution characteristics, represented by fiber dispersion and orientation. In terms of the average fiber orientation, the fiber distribution was found to be similar to the assumption of two dimensional random distribution, irrespective of mix composition. In contrast, the probability density function for fiber orientation was measured to be quite different depending on the mix composition.

Keywords : extruded ECC panel, flexural performance, image processing, fiber distribution

1. 서 론

최근 활발히 연구되고 있는 고인성 시멘트 복합재료(Engineered Cementitious Composite; 이하 ECC)는 시멘트 복합체 내에 최초 균열이 발생하였을 때에 혼입된 보강용 단섬유가 발생된 균열에서 가교작용을 하면서 응력과 파괴에너지를 부담하여, 최초의 균열발생 후에도 즉시 파괴에 도달하지 않고, 2차 균열이 유도되도록 설계한 재료이다.¹⁻³⁾ 이러한 특성에 기인하여 ECC는 1축 인장 하에서 다수의 균열(multiple cracking)을 발생시키면서 변형을 경화거동과 유사한 수준의 높은 연성을 나타내는 변형경화형 시멘트 복합체이다. 현재까지 국내의 ECC 재료 연구는 단섬유를 3차원 방향으로 무작위로 분산 배합하여 제작하는 타설형 또는 뿔칠형으로만 초점이 맞추어져 왔으며,^{3,4)} 압출성형을 통한 프리캐스트화에 대

한 연구에는 큰 관심을 두지 않아 왔다.

압출성형 시멘트 복합재료 패널은 시멘트, 규산질 원료, 섬유 등을 사용하여 진공 압출성형하는 것으로 세피올라이트(sepiolite)등과 같은 천연광물과 보강용 섬유를 충분히 혼입하여 휨 강도 및 휨 강성을 증가하기 위하여 제작하는 제품이다.⁵⁾ 이러한 압출성형기법을 ECC에 적용함으로써 비례변형한도 내에서는 재료의 강도 및 탄성계수를 크게 향상시킬 수 있고, 비례변형한도 이후에는 높은 연성을 유지할 수 있도록 만들 수 있다. 또한 ECC와 같이 비교적 많은 양의 섬유가 혼입된 시멘트복합재료를 제작할 때 압출성형 기법을 사용하면, 섬유가 방향성을 의도적으로 부여할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 압출성형 기법으로 제조된 ECC의 경우, 균열면 가교작용을 하는 섬유의 방향을 인위적으로 균열면과 수직하게 배열함으로써 섬유의 방향성이 3차원 랜덤 분산되는 일반 타설 ECC에 비하여 높은 균열저항성을 부여할 수 있게 된다. 선진국에서는 Shao⁶⁾와 Stang 등⁷⁾이 ECC 압출성형을 구현하여 제품 제조에 관한 기초적 연구를 수행하였으며, 타카시마⁸⁾와 야마모토⁹⁾는 ECC 압출성형

*Corresponding author E-mail: yunkim@cnu.ac.kr

Received January 28, 2009, Revised June 19, 2009

Accepted July 2, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

제품을 개발하여 휨거동 특성 등을 보고한 바 있다. 그러나 압출성형된 ECC 패널의 조성물 특성이나, 혼입된 섬유 분산성, 배향각, 그리고 분포 특성이 패널의 성능에 미치는 영향에 관한 정량적인 연구는 보고된 바 없으며, 섬유분산의 방향성에 대한 정성적 유추만을 보고하여 왔다.

따라서 이 연구에서는 유사변형경화와 다수균열 특성을 갖는 압출성형 ECC 패널을 제작/생산하기 위하여 이론 및 실험 연구를 수행하였고, 압출성형 ECC 패널의 섬유 분포특성을 파악하여 휨성능에 미치는 섬유 분포의 영향에 관하여 정량적인 결과를 도출하였다.

2. 압출성형 ECC 패널의 제작

2.1 유사 변형률 경화거동을 위한 이론적 조건

압출성형 ECC와 같은 시멘트계 섬유복합재료가 유사 변형률 경화 특성을 발현하기 위해서는 안정상태 균열 발생의 필요조건을 만족시켜야 하며, 이 조건을 만족하면 인장 상태에서 다수의 미세균열이 발생하게 된다. 먼저, 안정상태의 균열을 발생시키기 위한 첫 번째 조건은 ECC의 균열면 응력과 균열 개구변위 관계로부터 계산되는 상보에너지(complementary energy, J'_b)가 시멘트 매트릭스 균열선단의 파괴인성(crack tip toughness, J_{tip})보다 커야 한다는 것이다.²⁾

$$J'_b = \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \quad (1a)$$

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_c} \quad (1b)$$

$$J_{tip} \ll J'_b \quad (2)$$

여기서 σ_0 는 δ_0 에 해당되는 최대 균열면 응력, K_m 은 시멘트 매트릭스의 파괴인성, E_c 는 매트릭스의 탄성계수를 나타낸다. 식 (2)에서 중요한 것은 초기결합(initial imper-

fection)이나 기타 외부 충격하중 등으로 인한 결함요인에 대하여 안정적인 균열 상태를 보일 수 있도록 J'_b 가 충분히 커야 한다는 것이며, 이 연구에서 압출성형된 ECC의 인성비(J'_b / J_{tip})는 유사변형률 경화거동을 얻기 위한 식 (3)의 조건¹⁰⁾을 충족시킴을 확인하였다(4.3절 참조).

$$J'_b / J_{tip} > 3.0 \quad (3)$$

2.2 ECC 압출성형 기법

2.2.1 사용 재료

압출성형된 ECC 패널 제조에 사용된 재료의 물리적/화학적 특성은 Table 1과 같다. 밀도 3.15 g/cm³의 보통 포틀랜드시멘트와 ECC 파우더를 결합재로 사용하였다. ECC 파우더는 시멘트 매트릭스 강도 보강, 압출성형을 할 때 형상 유지 및 생산성 향상, 그리고 부가적인 내화 성능 향상을 위한 분말재료로 구성되어 있다.¹¹⁾ 또한 밀도 2.66 g/cm³, 비표면적 3,793 cm²/g인 규사미분(silica powder: K사)과 밀도 2.64 g/cm³, 평균입경 0.2 mm인 규사(silica sand)를 골재로 사용하였다. 섬유는 고장력 PVA 섬유로 직경 39 μm길이 6~8 mm를 이용하였으며, 기계적/ 화학적 특성은 Table 2와 같다.

2.2.2 제조 방식에 관한 검토

압출성형 ECC 패널의 제조 방식 개요도는 Fig. 1과 같다. 옴니믹서를 이용하여 분체 재료와 섬유를 건비빔(dry-

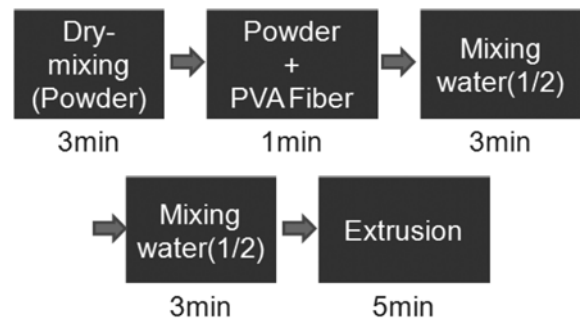


Fig. 1 Mixing sequence of extruded ECC panel

Table 1 Mechanical/chemical properties of materials

Types	Density (g/mm ³)	Fineness (cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.loss
OPC	3.15	3,630	22.73	5.93	3.37	61.73	2.53	1.97	1.74
Silica power	2.66	3793	95.5	1.95	0.76	-	-	-	1.79
Silica sand	2.64	0.2*	96.9	1.44	0.34	0.11	0.03	-	-

* Diameter (mm)

Table 2 Properties of fibers

Ingredient	Density (g/mm ³)	Length (mm)	Diameter (μm)	Surface treatment	Melting point (°C)	Thermal decomposition (°C)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)	Alkali resistance
Polyvinylalcohol (PVA)	1.3	6~8	39	Oiling agent	170	263	1,700	29.4	3~113	High

mixing)하고 니더믹서에서 배합수를 1/2씩 첨가하면서 각각 3분씩 습식 비빔(wet-mixing)을 한다. 마지막으로 압출성형하여 패널을 제조한다. 패널 제조 시간은 총 15분으로서 건비빔 4분, 습식비빔 6분, 압출성형 5분으로 구성되며, Fig. 2는 압출성형 ECC패널의 제조 과정을 사진으로 나타낸 것이다.

2.2.3 배합 조건에 관한 검토

배합 조건을 결정하기 위하여 물/결합재 비(W/B), 플라이애쉬(FA/B), 규사(S/B)를 각각 8~12%, 35%, 50%로 설정하여 예비실험을 수행하였다. 실험 결과 이 배합에서는 PVA 섬유를 0.5%만 혼입하여도 비빔 성능을 확보할 수 없었다. 비빔 성능을 확보하기 위하여 W/B를 증가시키면 강도 특성 및 압출성형 성능을 발현할 수 없기 때문에 섬유를 건비빔 과정에서 미리 분산시키는 대안을 고려하였다. 또한 증점제(메틸셀룰로오스계)의 양을 조절하면서 섬유의 분산성을 높이는 방안을 검토하여, 압출성형 제품의 경우 증점 성분이 다량 필요하다는 특성을 발견하였으며, 실험 결과 PVA섬유를 4%까지 혼입할 수 있음을 확인하였다. Table 3은 배합조건으로 결정된 4가지 종류의 배합 조건을 나타낸 것으로, 이 조건을 이용하여 휨 강도 특성을 평가하였다.

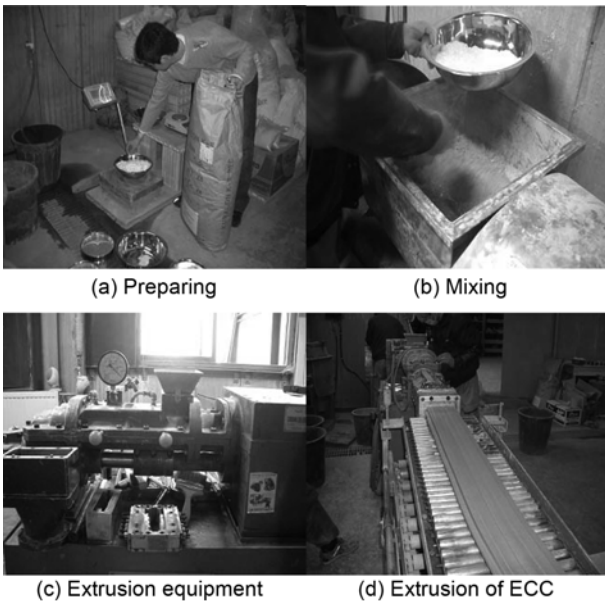


Fig. 2 Production of extruded ECC panel

2.2.4 양생 조건의 검토

양생 조건은 일반적인 압출성형 제품의 치수 안정성 및 빠른 생산라인 순환을 위하여 출하 이후 150°C 이상의 고온 고압에서 증기양생 과정을 거치는 방안을 고려하였으나 ECC의 경우, 180~200°C에서 용융하는 PVA 섬유를 다량 포함(2% 혼입률 이상)하고 있기 때문에 고온/고압 증기양생 동안 섬유 용융으로 인하여 휨 강도를 발현하지 못한다는 사실을 발견하였다. 이를 고려하여 이 제품은 압출성형 이후, 이송하여 4~5시간 전치양생을 거친 후 60°C에서 고온 양생하는 과정으로 양생 라인을 조절하였다. 초기 제품 야적 단계에서 3일 이상 양생을 하지 못하기 때문에 초기 재령 강도를 검토할 필요가 있었다. 평가 결과 초기 재령 3일에 압축강도는 30% 이상 발현하고 있어, 야적 및 양생 중 파손이나 변형이 발생하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 오토클레이브 양생을 실시하지 않고도 3일 내에 제품 생산을 완료할 수 있었으며, 오토클레이브 양생을 생략함으로써 보다 경제적인 제품을 생산할 수 있었다.

3. 실험

3.1 실험체 제작 및 실험 방법

압출성형 ECC 패널의 휨성능을 실험적으로 평가하기 위하여 KS F 2408 『콘크리트의 휨 강도 시험방법』에 준하여 3등분점 재하시험을 실시하였다. 실험체의 형상은 Fig. 3과 같다.

실험체는 압출성형된 폭 100 mm 두께 10 mm의 패널을 400 mm로 절단하여 제작하였다. 실험 변수는 Table 3의 배합조건으로 하여 각 변수별 2개씩 제작하였다. 휨 실험은 Fig. 4와 같이 KS F 2408에 따라 수행하였고, 처

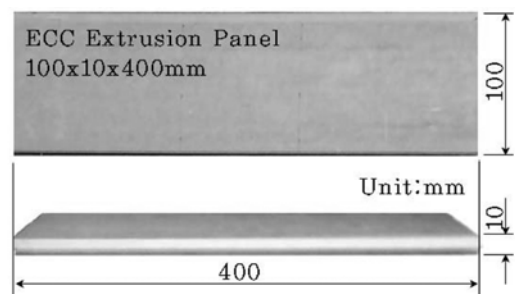


Fig. 3 Specimen geometry

Table 3 Mixing properties of extrusion ECC panels

Types	W/M* (wt. %)	OPC (wt. %)	ECC powder** (wt. %)	Silica powder (wt. %)	Silica sand (wt. %)	SP (wt. %)	HPMC (wt. %)	PVA (vol.%)
NO1	9.8	38	26	35.2	0	0.2	0.6	2
NO2	9.8	36	26	37.2	0	0.2	0.6	2
NO3	9.8	33	29	37.2	0	0.2	0.6	2
NO4	9.8	36	26	27.8	9.4	0.2	0.6	2

*M : matrix total weight

**ECC powder : BFS, sepiolite, Mg(OH)₂, CaCO₃, CSA, Al(OH)₃, CW150

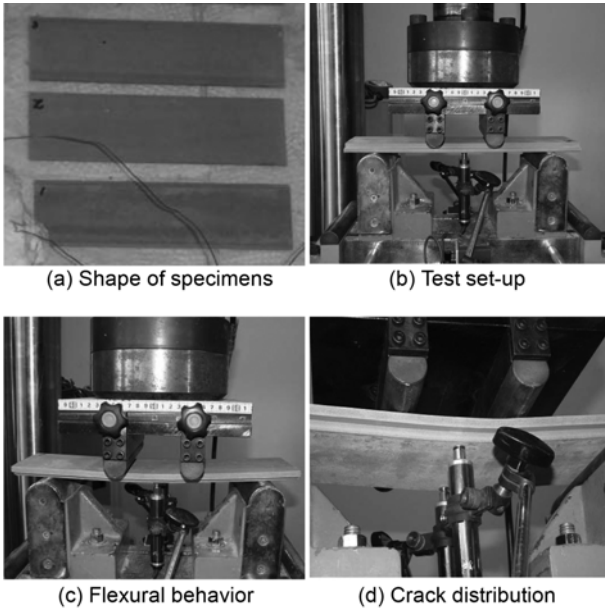


Fig. 4 Flexural test on extruded ECC panel

짐은 중앙부 양 측면에 LVDT를 설치하여 측정하였다 (Fig. 4). 휨 강도는 다음 수식과 같이 계산하였다.

$$F_b = \frac{P \times l}{b \times d^2} \quad (4)$$

여기서 F_b 는 휨 강도(MPa), P 는 최대하중(N), l 은 지간 거리(mm), b 와 d 는 각각 실험체의 폭 및 높이(mm)를 나타낸다.

3.2 섬유 분포 특성 평가 기법

3.2.1 섬유 이미지에서 섬유 검출

섬유의 분포 특성은 섬유를 매트릭스로부터 정확히 검출하고, 각 섬유의 위치와 단면에서 섬유 이미지의 형상에 따라 분포 특성을 나타낼 수 있는 값을 계산함으로써 정량적으로 나타낼 수 있다. 이 연구에서는 김윤용 등¹²⁾이 제시한 섬유 분류 및 검출 기법을 적용하였다. 이 방법은 세 가지 절차와 두 가지 이미지 프로세싱 과정으로 구성된다. 첫 번째 과정은 시편 준비로서 분석하고자 하는 부분의 ECC를 절단하고 선명한 이미지를 얻기 위하여 표면을 그라인더로 연마하여 시편을 만드는 것이다. 두 번째 과정은 CCD(Charged Couple Device)가 탑재된 형광 현미경을 사용하여 이미지를 획득하는 것이다. 마지막 과정은 앞서 얻은 섬유 이미지에서 섬유를 검출하고 수학적 처리 과정을 거쳐 섬유 분포 특성을 구하는 이미지 프로세싱이다.

섬유를 검출하는 이미지 프로세싱은 두 단계로 나뉘는데 1단계는 1차 검출된 섬유 이미지 중에서 정확히 검출된 이미지와 여러 개의 섬유가 하나로 잘못 검출된 이미지를 인공지능회로망을 사용하여 유형별로 분류하는

것이다. 2단계는 분수령 알고리즘¹³⁾과 형태학적 재구성 기법¹⁴⁾ 적용하여 1차 검출 알고리즘으로 잘못 검출된 섬유 이미지를 정확히 재검출하는 것이다. Fig. 5는 섬유 복합재료의 단면 영상에서 섬유 이미지를 검출하는 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 검출된 섬유 이미지는 3.2.2절에 기술된 섬유의 분포 특성을 나타내는 계수를 통하여 섬유의 분포 특성이 정량적으로 평가된다.

3.2.2 섬유 분포 특성 계수

검출된 섬유의 분산 정도는 식 (5)를 통하여 정량적으로 나타낼 수 있다.¹⁵⁾

$$\alpha_f = \exp \left[- \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2}{n} \right] \quad (5)$$

여기서 x_i 는 섬유가 균일하게 분포하였을 때 하나의 섬유가 차지하게 되는 i 번째 영역 안에 있는 섬유의 개수이며, n 은 섬유의 총 개수이다. 이 분산계수는 섬유가 이상적으로 균일하게 분포하였을 때 1의 값을 갖게 되며 섬유가 비균일하게 분포할수록 0에 가까운 값을 갖게 된다.

두 번째 계수는 단면에서 섬유가 기울어진 각도의 분포이다. 단면에서 섬유의 기울어진 각도는 식 (6)과 같이 장변과 단변의 길이비로 나타낼 수 있다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{l_s}{l} \right) \quad (6)$$

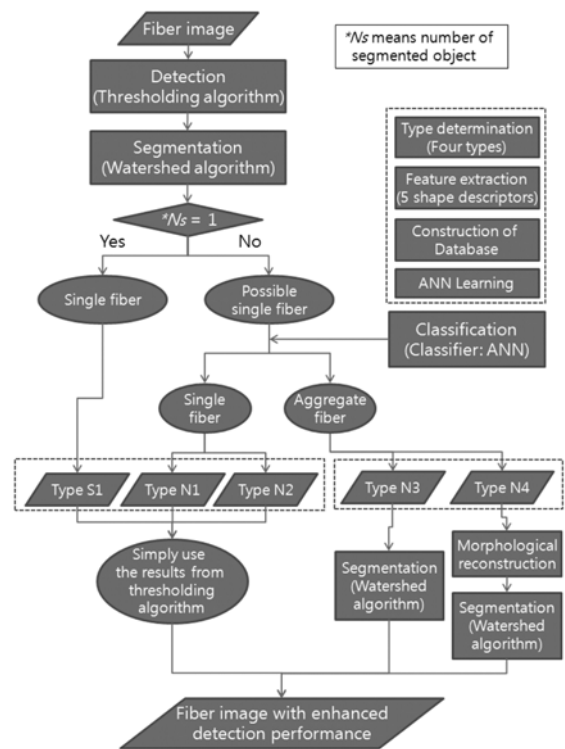


Fig. 5 Flow chart of enhanced detection algorithm¹²⁾

여기서 l_s 는 물체의 단변 길이를 나타내고, l_f 은 물체의 장변 길이를 나타낸다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 압출성형 변수에 따른 휨인장 거동 실험 결과

Table 4와 Fig. 6은 압출성형 ECC 패널의 휨인장 성능 실험 결과를 나타낸다. 압출성형 ECC 패널의 최대 휨 강도는 NO1 실험체가 약 50 MPa로써 가장 크게 나타났다. 반면, NO1 실험체는 높은 매트릭스 강도로 인하여 취성적 특성인 초기균열 이후의 급격한 응력 감소와 균열 분산 효과가 현격히 저하되는 낮은 변형 능력을 나타내었다.

한편, NO1 실험체를 제외한 다른 모든 실험체에서는 초기균열 이후 강도가 증가하는 특징을 보였다. 최대 휨 강도는 NO2 및 NO3 실험체가 35~38 MPa로 나타나 일반적인 ECC 패널(휨 강도 10~15 MPa)에 비하여 2~4배 높게 나타났다. 휨 강도에 해당하는 처짐 값과 초기 균열이 발생했을 때의 처짐 비를 분석해 보면, NO3시험체가 8.72~9.39로써 가장 높게 나타나 우수한 연성능력을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한 균열 개수를 통한 분석에 있어서도 NO3 실험체가 11~12개로써 가장 우수한 다수 균열 특성을 나타내었다. 압출성형 ECC 패널의 휨 강성

Table 4 Test results of specimens

Specimens	F_{bi} (MPa)	δ_{bi} (mm)	F_b (MPa)	δ_b (mm)	δ_b / δ_{bi}	Stiffness (kN/mm)
NO1	43.26	0.80	49.78	1.11	1.45	52.91
NO2	32.97	0.77	37.07	4.50	5.95	46.82
NO3	29.04	0.68	37.01	6.11	9.06	42.14
NO4	31.43	0.69	36.22	2.25	3.26	47.79

F_{bi} : Flexural stress at initial crack

δ_{bi} : Mid-span deflection at F_{bi}

F_b : Maximum flexural strength

δ_b : Mid-span deflection at F_b

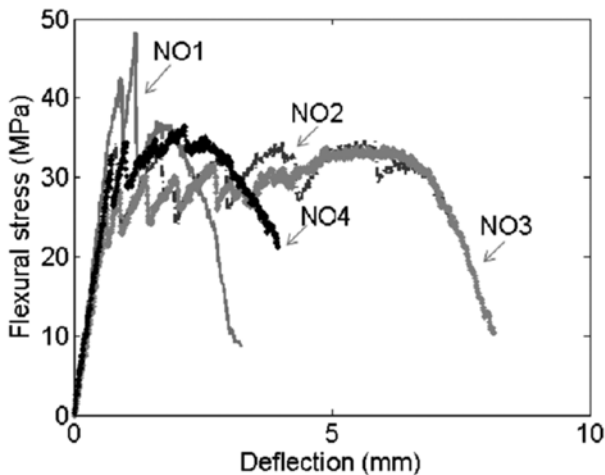


Fig. 6 Typical curves of flexural behavior

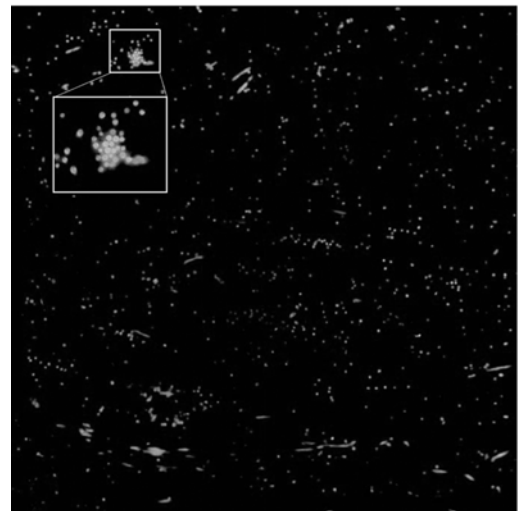
은 42.04~53.58 kN/mm로 나타났는데 휨 강도가 높은 순서로 휨 강성도 높게 나타났다. 이는 강성의 영향은 섬유가 보강되지 않은 매트릭스의 강도와 강성에 가장 큰 영향을 받는다는 일반적인 결과와 일치하는 실험 결과이다.

4.2 섬유 분포 특성 평가 결과

Table 5는 실험체별로 3곳을 임의로 선정하여 $8 \times 8 \text{ mm}^2$ 크기로 촬영하여 얻은 섬유 이미지를 3.2절에서 제시한 평가 기법을 적용하여 정량적으로 구한 섬유 분포 특성 계수들을 나타내고, Fig. 7은 휨성능에 차이가 가장 많이 발생하였던 NO1과 NO3 시편의 대표적인 섬유 사진이

Table 5 Test results of specimens

Specimens	α_f	$\theta(^{\circ})$	p	q
NO1	0.27 ± 0.037	45 ± 1.3	1.25	1.55
NO2	0.30 ± 0.041	44 ± 1.4	1.4	2.45
NO3	0.31 ± 0.045	44 ± 2.2	1.25	3.05
NO4	0.28 ± 0.048	45 ± 2.0	1.4	2.15



(a) NO1



(b) NO3

Fig. 7 Typical fiber images

다. Table 4와 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 섬유 분산성의 경우, NO3 실험체가 평균적으로 가장 우수하게 평가되었고, NO2, NO4, 그리고 NO1 실험체 순으로 좋은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 섬유의 분산성이 우수할수록 ECC의 인장 거동 특성이 개선된다는 기존의 연구 결과¹⁵⁾로부터 NO3, NO2, NO4, NO1 순으로 인장 성능이 좋을 것으로 예상할 수 있으며, 그러한 경향을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 섬유 방향성의 경우, 실험체 별로 크게 차이가 발생하지는 않았으나, NO2와 NO3 실험체는 평균적으로 촬영 단면 방향(휨인장 방향)과 43.5° 기울어진 것으로 평가된 반면, NO1과 NO4 실험체의 경우 평균 45° 기울어진 것으로 나타났다. 섬유의 분포를 임의의 3차원 배열이라고 가정할 경우 평균적인 섬유의 기울기가 57.3°이고 임의의 2차원 배열이라고 가정할 경우 45°인 점을 감안한다면 압출성형 ECC 패널의 섬유 방향성 분포는 3차원이 아닌 2차원 배열에 가깝다고 볼 수 있다. 그러나 임의의 2차원 배열이라고 가정하면 섬유 방향성에 대한 확률 밀도 함수가 일정한 값($2/\pi$)을 갖는 반면 실제 계측하여 구한 확률 밀도 함수는 이와는 매우 다른 양상을 보인다. 이는 섬유의 방향성을 임의의 3차원과 2차원으로 가정된 섬유 방향성에 대한 확률 밀도 함수와 이미지 프로세싱 기법을 이용하여 계측한 확률 밀도 함수, 이를 Xia 등¹⁶⁾이 제시한 섬유의 방향성 분포 함수로 최적화한 확률 밀도 함수를 나타내는 Fig. 8로

부터 확인할 수 있다. 확률 밀도 함수의 형상을 나타내는 매개변수는 Table 5에 제시되어 있다.

4.3 섬유 분포 특성과 휨인장 상관관계

4.1절과 4.2절에서 기술한 바와 같이 압출성형 ECC는 배합에 따라 휨거동 특성이 서로 상이하며, 섬유 분포 특성도 다르게 나타났다. 따라서 이 연구에서는 4종류의 배합 차이가 각각의 섬유 분포 특성으로 나타나고, 이 특성이 휨강도에 영향을 미친 주요 요인이라 보고 결과를 분석하였다.

Fig. 8에 나타낸 섬유 각도에 대한 확률 밀도 함수 차이에 따라 섬유 가교 곡선(fiber bridging curve)이 상이하게 계산된다(Fig. 9). 이때 섬유 가교 곡선을 구하기 위한 미시역학 변수값으로 섬유와 관련된 값은 Table 2에 제시된 값을 사용하였으며, 계면 특성 중에서 마찰부착력은 Kim et al.¹⁷⁾의 실험 결과를 바탕으로 결정된 2.9 MPa를 사용하였으며, 화학적 부착은 매트릭스 강도에 큰 영향이 없는 것으로 알려져 있기 때문에¹⁸⁾ 기존 실험 결과에서 얻어진 1.85 J/m²를 사용하였다. 2.1절에서 기술한 바와 같이 ECC의 거동 특성은 매트릭스의 파괴인성(J_{tip}), 강도(f_t), 그리고 섬유 가교 곡선의 영향을 받는다. 즉, 매트릭스 파괴인성과 강도가 낮을수록, 섬유 가교의 상보 에너지(J_b')와 최고 가교 응력(σ_0)이 클수록 유사 변형경

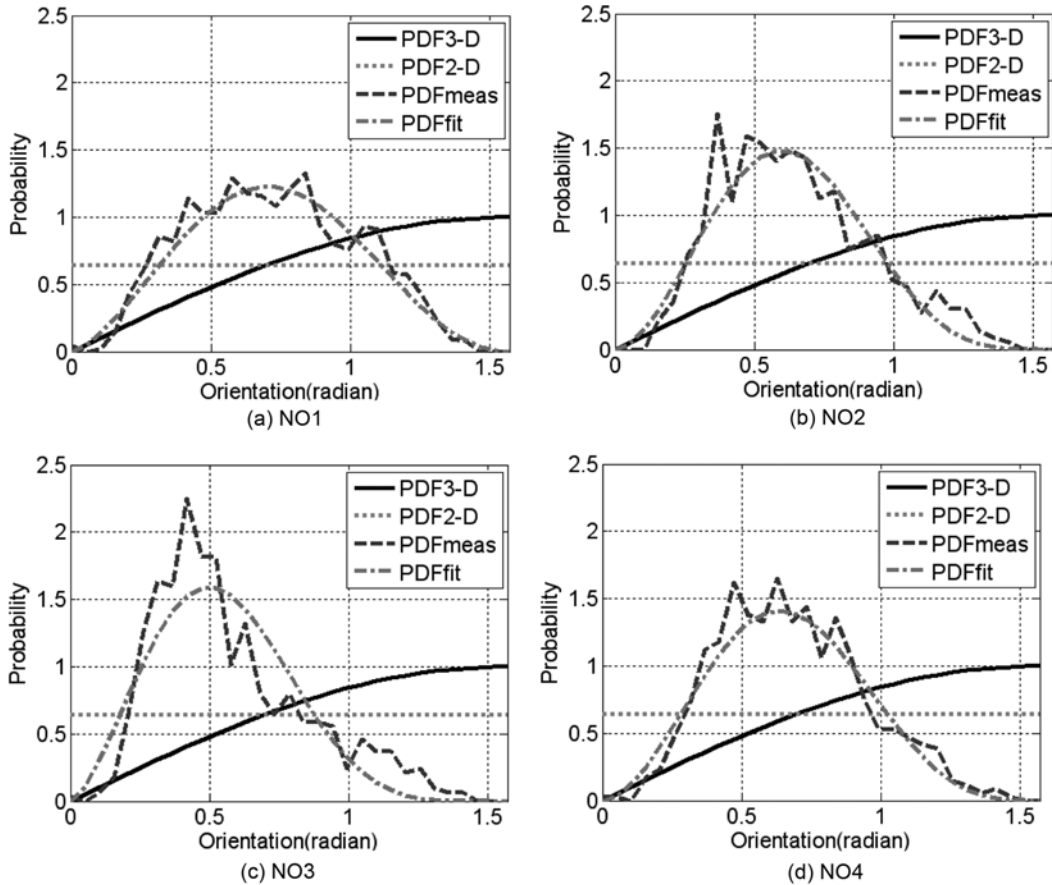


Fig. 8 Typical probability density function of fiber orientation

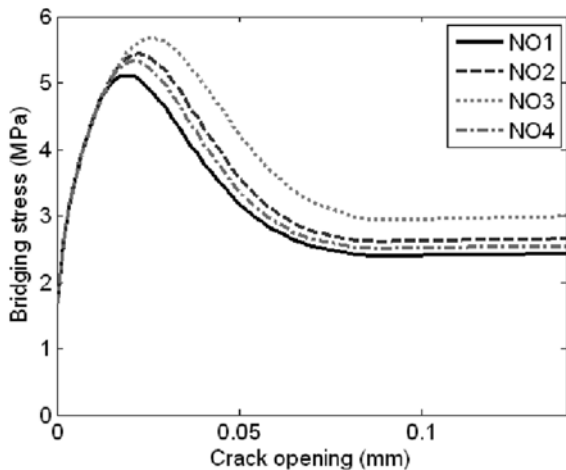


Fig. 9 Comparison of fiber bridging curves

화 특성이 나타날 확률이 높아진다. NO1 실험체는 타 실험체에 비하여 낮은 물/바인더 비를 갖고 있기 때문에 매트릭스의 J_{ip} 이 증가하는데, F_{bi} 의 크기를 기준으로 간접적으로 계산하면 NO3에 비하여 94.3% 높은 것으로 평가할 수 있다. 이와 같이 높은 J_{ip} 으로 인하여 다중 균열을 발생시킬 수 있는 포텐셜이 감소하게 된다.¹⁷⁾ 섬유 분산성 측면에서는 NO1 실험체가 NO3 실험체보다 약 14% 낮은 값을 나타내고 있어, 상대적으로 불량한 분산성을 보이고 있다. 또한 Fig. 9와 Table 6에서 확인할 수 있듯이 NO1 실험체는 가장 낮은 J'_b 와 σ_0 를 보이는데, NO3에 비하여 각각 40.9%와 9.98% 낮은 J'_b 과 σ_0 를 갖는 것으로 계산되었다. 이와 같은 원인에 의하여 NO1 실험체가 다른 실험체에 비하여 가장 낮은 휨변형 능력을 보인 것으로 판단된다.

NO4 실험체 역시 입경이 큰 활성규사를 넣음으로써 매트릭스의 J_{ip} 이 증가하는데, F_{bi} 의 크기를 기준으로 간접적으로 계산하면 NO3에 비하여 14.1% 높은 것으로 평가할 수 있다. 또한 상대적으로 큰 입경의 충전재를 매트릭스에 혼입함으로써 섬유 분산성을 저하시키는 결과가 나타나 α_f 값(Table 5)이 NO3에 비하여 약 11.0% 낮은 것으로 평가되었다. 이러한 2가지 이유에 기인하여 NO4 실험체가 NO2와 NO3 실험체에 비하여 상대적으로 낮은 연성능력을 보인 것으로 판단한다.

다중 균열에 의한 유사 변형을 경화거동을 보이기 위한 이론적 조건에서 기존 실험 결과¹⁹⁾를 토대로 J_{ip} 을 10 J/m^2 으로 산정하였을 경우, 4가지 배합에 대한 인성비(J'_b / J_{ip})는 Table 6과 같이 결정된다. ECC에 사용되는 매트릭스는 콘크리트에 비하여 선형탄성재료 가깝기 때문에 매트

Table 6 Micro-mechanical analysis

	NO1	NO2	NO3	NO4
σ_0	5.11	5.44	5.67	5.33
J'_b	70.6	99.3	119	89.5
J'_b / J_{ip}^*	7.06	9.93	11.9	8.95

* $J_{ip} = 10 \text{ J/m}^2$

릭스 파괴인성은 강도에 비례한다. 압출성형된 ECC의 휨강도가 일반적인 제조 방식에 의해 제조된 ECC에 비하여 약 3배 크게 나타났으므로 균열선단 파괴인성은 약 9배 증가하게 된다. 따라서 모든 배합에 대하여 2.1절에서 설정한 3.0 이상의 인성비 조건을 모두 만족한다.

한편 NO2와 NO3 실험체는 NO1과 NO4 실험체에 비하여 우수한 섬유 분산성과 높은 J'_b 과 σ_0 를 갖는 것으로 측정되어 유사 변형경화 특성을 나타내는 데에 유효히 유리한 것으로 나타났다. 다만, 물/매트릭스와 물/바인더의 비율이 동일한 NO2와 NO3 실험체에서 NO3의 변형 능력이 더 크게 나타난 이유는 NO3 실험체가 NO2에 비하여 약 6.3% 우수한 섬유 분산성을 갖고 있으며, 섬유들의 방향성 또한 휨인장 방향에 가깝게 배열되었기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 결과로부터 섬유의 분포 특성이 휨 거동에 미치는 영향이 있음을 확인하였다. 향후에는 섬유의 분포 특성과 ECC의 역학적 특성의 관계를 보다 정량적으로 구명할 수 있도록 마이크로역학에 근거한 상세한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

압출성형된 ECC를 제조하기 위한 이론적/실험적 연구 및 이러한 ECC 내부의 섬유의 분포 특성이 휨성능에 미치는 영향에 관한 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 안정상태 균열 이론에 의한 배합 결정, 섬유의 건식 분산 및 2차 배합, 오토클레이브 과정을 대체한 고온 양생 기법, PVA섬유 2% 혼입을 통하여 변형률 경화거동을 보이는 압출성형 ECC를 제조할 수 있다.
- 2) 물과 매트릭스의 비율이 9.8%이고 시멘트, ECC 파우더, 규사미분의 비율이 각각 33, 29, 37.2일 때 변형률 경화거동 및 인성 측면에서 가장 높은 성능을 보이는 것으로 나타났다.
- 3) 섬유 분산성의 경우 휨 인성이 큰 순서대로 좋은 것으로 나타났으며 이로부터 섬유 분산성이 좋을수록 휨 인성이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 섬유 방향성의 경우 실험체 별로 크게 차이가 발생하지 않았으나 약 44°로 나타났다. 이는 섬유의 분포를 임의의 3차원 배열이라고 가정할 경우에 비하여 약 23% 압출방향으로 배열되는 것이다. 섬유가 임의의 2차원 배열이라고 가정할 경우 45°인 점을 감안하면 압출성형 ECC 패널의 섬유 방향성 분포는 3차원이 아닌 2차원에 가깝다고 볼 수 있다. 그러나 섬유 방향성에 대한 확률 밀도 함수는 매우 다른 양상을 보이는 것으로 나타났다.
- 4) 동일한 압출성형 공정을 적용하더라도 매트릭스의 배합에 따라 섬유 분포 특성이 상이하게 나타났으며, 이러한 섬유 분포 특성에 의하여 ECC의 휨거동에 차이가 발생하였다. 따라서 원하는 성능(초기 균열 강도 및 인성)의 압출성형 ECC 패널을 제조

하기 위해서는 제조 공정과 함께 재료의 배합비와 결과적으로 나타나는 섬유 분포 특성을 함께 고려하는 것이 바람직하다.

감사의 글

이 논문은 (주)한화건설 기술연구소의 지원으로 일부 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 이 연구는 한국 과학재단 특정기초연구지원사업(R01-2008-000-11539-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Li, V. C., Wang, S., and Wu, C., "Tensile Strain-hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol-engineered Cementitious Composite(PVA-ECC)," *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 6, 2001, pp. 483-492.
2. 김윤용, 김정수, 김희신, 하기주, 김진근, "마이크로역학에 의하여 설계된 ECC(Engineered Cementitious Composite)의 역학적 특성," 콘크리트학회 논문집, 17권, 5호, 2005, pp. 709~716.
3. 김장호, 윤현도, 전에스더, "ECC의 재료설계, 특성 및 활용," 콘크리트학회지, 18권, 1호, 2006, pp. 28-35.
4. 김윤용, "습식스프레이공법으로 타설된 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 역학적 특성과 보수 성능," 콘크리트학회 논문집, 15권, 3호, 2003, pp. 462-469.
5. 정은혜, 강철, 김재원, 이정구, 최훈국, 김진만, "세피올라이트를 이용한 압출성형 콘크리트 패널의 휨강도 및 밀도 특성," 한국콘크리트학회 2006년도 봄 학술대회 논문집, 18권, 1호, 2006, pp. 49-52.
6. Shao, Y. and Shah, S. P., "Mechanical Properties of PVA Fiber Reinforced Cement Composites Fabricated by Extrusion Processing," *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 6, 1997, pp. 555-564.
7. Stang, H. and Li, V. C., "Extrusion of ECC-Material," in *Proc. of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3(HPFRCC 3)*, Ed. Reinhardt and A. Naaman, Chapman & Hull, 1999, pp. 203-212.
8. 高島博之, 宮外清貴, 橋田凌之, Li, V. C., "圧出成形にす

るポリプロポレン短繊維補強セメント系複合材料のマルチプルクラック発生条件に関する破壊力学的研究," *コンクリート工學論文集*, Vol. 13, No. 1, 2002, pp. 1-11.

9. 山本基由, 山田寛次, "オートクレーブ養生温度を変えたPP短繊維補強セメント材料の曲げ挙動," *コンクリート工學年次論文集*, Vol. 24, No. 1, 2002, pp. 231-236.
10. Kanda, T. and Li, V. C., "Practical Design Criteria for Saturated Pseudo Strain Hardening Behavior in ECC," *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 1, 2006, pp. 59-72.
11. 권영진, 김재환, 한병찬, "영구거푸집 및 내화패널 겸용의 고강도 고인성 패널을사용한 고강도콘크리트 부재의 내화공법," 특허 등록번호 10-0659457, 2006.
12. 김윤용, 이방연, 김진근, "PVA-ECC 단면 이미지의 섬유 분류 및 검출 기법," 콘크리트학회 논문집, 20권, 4호, 2008, pp. 513-522.
13. Vincent, L. and Soille, P., "Watersheds in Digital Spaces: An Efficient Algorithm Based on Immersion Simulations," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 6, 1991, pp. 583-598.
14. Vincent, L., "Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 2, No. 2, 1993, pp. 176-201.
15. Torigoe, S., Horikoshi, T., and Ogawa, A., "Study on Evaluation Method for PVA Fiber Distribution in Engineered Cementitious Composite," *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 3, 2003, pp. 265-268.
16. Xia, M., Hamada, H., and Maekawa, Z., "Flexural Stiffness of Injection Molded Glass Fiber Reinforced Thermoplastics," *International Polymer Processing*, Vol. 10, No. 1, 1995, pp. 74-81.
17. Kim, J. K., Kim, J. S., Ha, G. J., and Kim, Y. Y., "Tensile and Fiber Dispersion Performance of ECC Produced with Ground Granulated Blast Furnace Slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 7, 2007, pp. 1096-1105.
18. Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., and Saito, T., "Interface Tailoring for Strain-hardening PVA-ECC," *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 5, 2002, pp. 463-472.
19. 이방연, "이미지 프로세싱 기반 섬유 분포 특성 평가 및 섬유 분포 특성이 시멘트 복합체의 인장거동에 미치는 영향," KAIST, 박사학위논문, 2009, 139 pp.

요약 이 연구는 변형을 경화거동을 나타내기 위한 압출성형된 ECC를 제조하기 위하여 사용되는 조성물의 특성, 제조 방식, 배합 조건, 양생 조건에 관한 검토를 수행하였으며, 섬유의 분포 특성이 압출성형 ECC의 휨거동에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 이론적/실험적 연구를 수행하여 압출성형 ECC를 생산하기 위한 기본 배합 및 제조 공정을 제시하였으며, 이미지 프로세싱 기법을 이용하여 섬유 분포 특성을 파악하였다. 실험 결과, 최적의 압출성형 ECC 패널의 배합비를 물-매트릭스 비, 시멘트, ECC 파우더, 그리고 규사미분의 비율로 제시하였다. 또한 섬유 분포 특성은 배합에 따라 달라지며 이러한 섬유 분포 특성에 따라 휨거동에 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 섬유 분산성이 좋을수록, 상보에너지(J_b)와 최고 가오 응력(σ_0)이 클수록 휨 인성이 크게 나타났다. 이는 ECC 배합의 차이가 섬유 분포 특성에 차이를 줄 뿐만 아니라, 마이크로역학 특성에도 변화를 주기 때문이다. 섬유 방향성의 경우, 실험체 별로 크게 차이가 발생하지 않았으나 섬유의 분포가 3차원보다 2차원에 가깝게 배열되는 것으로 나타났다. 그러나 섬유 방향성에 대한 확률 밀도 함수는 2차원으로 가정한 경우와 매우 다른 양상을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 원하는 성능(초기균열 강도 및 인성)을 얻기 위해서는 배합과 섬유 분포 특성을 고려하여야 하는 것으로 나타났다.

핵심어 : 압출성형 ECC 패널, 휨성능, 이미지 프로세싱, 섬유 분포 특성