

## 論文

### 섬유 보강 시멘트계 복합재료의 단면 이미지에서 섬유 검출을 위한 섬유 형광 특성 분석

이방연\*, 박준형\*\*, 김윤용\*\*\*+

### Fluorescence Characteristic Analysis for Fiber Detection in Sectional Image of Fiber Reinforced Cementitious Composite

Bang Yeon Lee\*, Jun-Hyung Park\*\*, and Yun Yong Kim\*\*\*+

#### ABSTRACT

It is important to detect fibers in the sectional image of fiber reinforced cementitious composites (FRCC), since the fiber distribution is a crucial factor to predict or evaluate the mechanical performance of FRCC. In this paper, we investigated the fluorescence characteristics of Polyvinyl Alcohol (PVA) fibers, Polyethylene Terephthalate (PET) fibers, Polyethylene (PE) fibers, and Polypropylene (PP) fibers used in Engineered Cementitious Composites (ECC), which is a special kind of FRCC that incorporates synthetic fibers and exhibits extremely ductile behavior in uniaxial tension, to detect each fiber according to its type. Furthermore, optimum excitation and emission wavelengths were proposed on the basis of maximum difference of Relative Fluorescence Intensity (RFI) between two types of fibers used in the hybrid ECC. Optimum threshold values to discriminate two types of fibers using statistical tools were also proposed. Finally, images of four types of fibers obtained using a fluorescence microscope are compared.

#### 초 록

섬유 보강 시멘트계 복합재료의 성능 예측 및 평가에 있어서 중요한 영향을 미치는 섬유 분포 특성을 정량적으로 평가하기 위해서는 복합재료의 단면 이미지에서 섬유를 정확히 검출하여야 한다. 이 논문은 형광원리를 이용하여 합성섬유를 매트릭스로부터 개별적으로 검출하기 위한 기초 연구로써 섬유 보강 시멘트계 복합재료 중의 하나인 ECC에 일반적으로 사용되는 PVA 섬유, PET 섬유, PE 섬유, 그리고 PP 섬유의 형광특성을 분석하였다. 또한 하이브리드 된 경우 합성섬유들 간의 상대 형광 광도값의 차이를 비교하여 종류별로 구분하기 위한 최적의 파장대를 선정하였으며, 그 파장대에서 두 분류대상을 구별할 수 있는 최적의 경계값을 통계적 방법을 이용하여 산출하였다. 또한 형광 현미경을 이용하여 각 섬유를 촬영하여 상대적인 밝기값을 비교하였다.

**Key Words :** 시멘트계 복합재료(Cementitious Composite), ECC(Engineered Cementitious Composite), 합성섬유(Synthetic Fiber), 하이브리드(Hybrid), 형광특성(Fluorescence Characteristic)

#### 1. 서 론

국내외에서 활발히 연구 및 개발되어지고 있는 건설용 고인성 시멘트계 복합재료는 기존의 콘크리트에 비하여 역학적으로 많은

장점을 갖고 있어, 점차 활용 범위가 넓어지고 있는 추세이다 [1]-[3]. 특히 취성파괴 성질을 가진 콘크리트의 단점을 개선하기 위한 목적으로 개발된 건설용 복합재료 중의 하나인 ECC (Engineered Cementitious Composite)는 시멘트 복합체 내에 체적비

\* University of Michigan 토목공학과 박사후연구원

\*\* 충남대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\*+ 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자(E-mail:yunkim@cnu.ac.kr)

2% 정도의 합성섬유를 혼입함으로써 뚜렷한 인장변형률을 경화거동과 높은 연성을 Fig. 1)을 가지며[4], 기존의 섬유 보강 시멘트계 복합재료(FRCC)보다 성능이 우수함을 Fig. 2를 통해 알 수 있다. 이러한 우수한 인장 거동 특성은 시멘트 복합체 내에서 최초 균열이 발생하였을 때 혼입된 보강용 합성섬유가 발생된 균열 면에서 가교작용을 함으로써 발현된다. 합성섬유의 가교작용은 균열 면에서 응력과 파괴에너지를 부담하여, 최초의 균열 발생 후에도 즉시 파괴에 도달하지 않고 2차 균열을 유도하여 미세한 다중 균열을 발생시킴으로써 취성적인 재료(매트릭스, 합성섬유)로 구성된 시멘트 복합체에 높은 연성을 효과적으로 부여할 수 있다. 따라서 ECC의 인장거동을 예측하거나 평가하기 위해서는 섬유 가교 거동을 정확히 분석하여야 한다.

섬유 가교 거동에 영향을 주는 역학적인 요소로는 섬유, 매트릭스, 그리고 섬유와 매트릭스의 계면 특성 등이 있다. 섬유의 특성으로는 섬유의 길이, 직경, 탄성계수, 강도, 그리고 함유량이며, 매트릭스의 특성은 강도와 탄성계수이다. 계면 특성은 화학적 부착, 마찰 부착, 그리고 미끌림 경화 특성이 있다. 이러한 역학적 특성 이외에 섬유 분포 특성 역시 복합재료의 인장 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다[5]. 따라서 ECC의 섬유 분포 특성을 정량적으로 평가할 수 있게 되면, 보다 정확히 섬유 가교 거동을 분석할 수 있고, 결국 ECC의 인장 거동을 보다 정확히 예측/평가할 수 있다.

섬유의 분포 특성을 평가하는 방법으로는 섬유의 종류와 섬유의 검출 방법에 따라 다양하며, 이미지 분석 방법, X-ray 투과 방법 등이 있으나, 현재 ECC에 일반적으로 사용되는 합성섬유의 경우 매트릭스와 섬유의 명암비가 낮기 때문에 광학현미경 등을 사용하여 서로를 구별하기는 쉽지 않다[6]. 특히 최근 성능 개선이나 환경친화성을 높이기 위하여 두 개 이상의 합성섬유를 혼입하는 하이브리드 형태의 시멘트계 복합재료를 설계 및 제조하는 연구가 이루어지고 있는데[7]~[9], 이러한 하이브리드 시멘트계 복합재료의 섬유 분포 특성을 정량적으로 평가하기 위해서는 각 합성섬유를 종류별로 구분하여 검출하여야 한다.

김윤용 등[6]은 형광현미경(Fluorescence Microscope)을 이용하여 PVA-ECC의 섬유 분포 특성을 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 제시하였다. 다만, 이 기법은 PVA 섬유를 사용한 경우에 적용할 수 있는 방법으로서 다른 합성섬유에 적용하기 위해서는 섬유의 형광특성에 대한 연구가 필요하다. 이를 통해 기존의 형광원리를 활용한 방법과 동일한 방법으로 섬유를 검출할 수 있을 뿐만 아니라 섬유 검출을 위한 시편 제조 및 촬영 방법 역시 기존 연구자들이 제시한 방법을 그대로 적용 할 수 있다[10]~[11].

형광원리를 활용하면 명암비가 낮은 복합재료에서 형광물질만을 쉽게 검출할 수 있는데, 이러한 기술의 응용은 바이오시스템을 다루는 타 분야에서 활발히 다루어져 왔다. Kim 등[12]과 조병관 등[13]은 이물질에 존재하는 유기물을 검출하기 위하여 관련 유기물에 대한 형광특성을 분석한 바 있다. 따라서 ECC의 단면 이미지에서 합성섬유를 정확히 검출하여 섬유의 분포 특성을 평가하기 위해서는 매트릭스 및 각 합성섬유의 형광특성

을 분석하고, 섬유 검출을 위한 최적의 조사광 및 방사 파장대를 조사할 필요가 있다.

최적의 파장대 내에서 합성섬유를 검출하게 될 경우, 섬유의 검출에 대한 정확도가 향상되어 섬유 가교 거동의 정확한 분석을 위한 섬유 분포 특성을 정량적으로 평가할 수 있게 되며, 이에 따라 ECC의 인장 거동을 보다 정확히 예측 및 평가할 수 있다.

이 연구에서는 ECC 제조에 일반적으로 사용되는 합성섬유인 Polyvinyl Alcohol(PVA) 섬유, Polyethylene Terephthalate (PET) 섬유, Polyethylene(PE) 섬유, 그리고 Polypropylene(PP) 섬유를 매트릭스로부터 효과적으로 검출하고, 합성섬유들이 혼합되어 혼입된 하이브리드 ECC의 경우 섬유를 개별적으로 검출하기 위하여 각 합성섬유의 형광특성을 분석하고자 한다. 합성섬유의 형광특성은 초분광 형광 영상장비를 사용해서 측정하고, 측정된 결과를 분석함으로써 최적의 조사광 및 방사파장대를 제시하고자 한다.

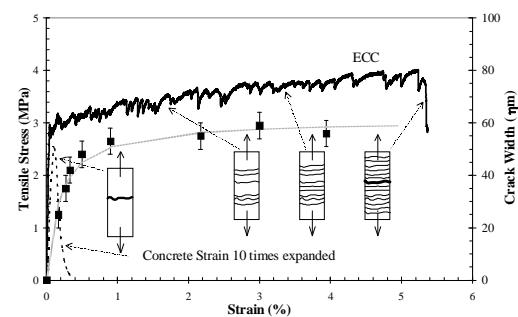


Fig. 1 Crack width vs. strain relationship of ECC along with tensile stress vs. strain curve

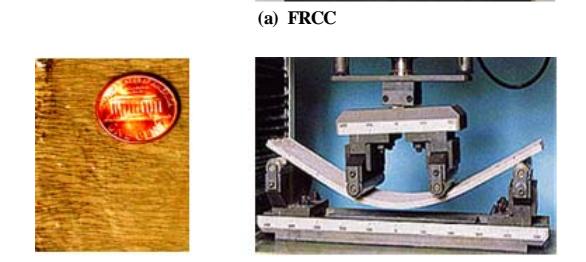


Fig. 2 Comparison of fiber bridging and flexural ductility with FRCC and ECC

## 2. 형광특성 실험 및 분석

### 2.1 실험 원리 및 장치

형광 광도계는 시료에 특정 파장대의 빛을 조사하여 시료의 형광특성에 따라 특정 파장대의 빛이 방출되는 원리를 이용하여 물질의 형광특성을 파악하는 장비이다. 이는 물질이 빛을 흡수하면 진동과 회전전위의 변화를 수반하는 전자전위의 변화 즉, 원자나 분자의 전자배열이 기저상태(ground state)에서 들뜬상태(excited state)로 바뀌게 되어, 불안정하게 된 원자나 분자가 흡수한 빛에너지를 열의 형태로 방출하거나 또는 다른 파장대의 빛으로써 재방출하여 원래의 기저상태로 되돌아가는 현상을 이용하는 것이다. 이와 같이 빛을 흡수한 어떤 물질이 기저상태로 되돌아가면서 재방출하는 빛을 형광이라 하며, 이와 같은 성질을 지니는 물질을 형광물질이라고 한다.

Fig. 3은 형광 광도계의 개념도를 나타낸다.

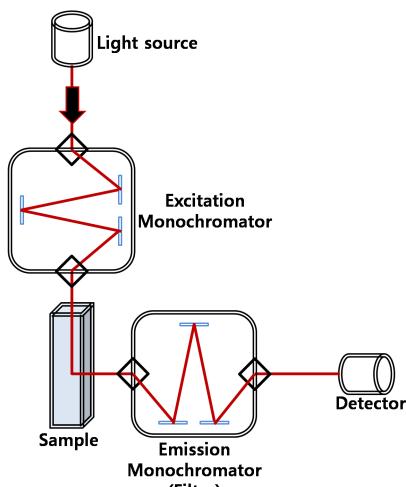


Fig. 3 Diagram of spectrofluorometer.

빛을 조사하게 되면 조사용 단색기(Excitation Monochromator)를 통해 특정 파장대의 빛이 샘플로 조사된다. 특정 파장대의 빛이 샘플에 조사되면 샘플의 형광특성에 따라 특정 파장대의 빛이 방출된다. 방출된 빛은 다시 방사용 단색기(Emission Monochromator) 또는 필터(Filter)를 통해 특정 파장대의 빛만 통과된다. 통과된 빛은 PMT(Photomultiplier Tube)에 의해 형광 광도값을 얻을 수 있다.

### 2.2 실험 재료

최근 활발히 연구되고 있는 하이브리드 ECC에 사용되는 대표적인 합성섬유들의 형광특성을 분석하기 위하여 일본 K사에서 제작된 PVA 섬유, 국내 C사의 PET 섬유, 일본 K사의 PE

섬유, 그리고 국내 S사의 PP 섬유의 적당량을 형광특성 조사용 큐벳(Fisher scientific, Fluorescence Cells)에 넣어 형광특성을 측정하였다(Fig. 4). 각 섬유의 특성은 Table 1과 같다.

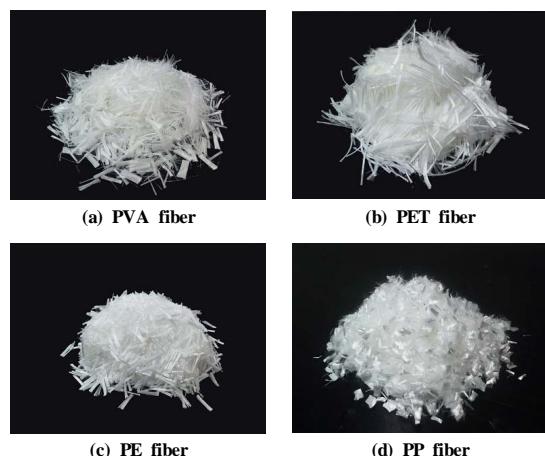


Fig. 4 Synthetic fibers.

Table 1 Properties of PVA, PET, PE and PP fibers

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Diameter (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
PVA fiber	1.3	0.039	12	1600	40
PET fiber	1.37	0.033	10	900~1000	10~12
PE fiber	0.97	0.012	15	2500	75
PP fiber	0.91	0.042	12	300~600	3~5

### 2.3 합성섬유의 형광특성 분석

합성섬유의 형광특성 측정은 Horiba사의 형광 광도계(FluoroMax-4, Horiba Industries, Edison, NJ, USA)를 사용하였으며, 광원은 250 nm에서 500 nm까지 5 nm 간격으로 시료에 조사한 후 발광된 형광은 300 nm에서 650 nm까지 1 nm 간격으로 측정하였다. 측정된 조사광 및 방사 파장대는 형광 광도값과 함께 3차원 그레프로 나타낼 수 있다. 이 연구에서 형광 광도값은 PMT로 유입된 광자의 수를 측정한 절대 형광 광도값이 아니라 PMT를 통해 증폭된 후 검출된 광자의 수를 측정한 상대 형광 광도값(Relative Fluorescence Intensity, RFI)이다. Fig. 5는 PVA 섬유의 형광특성을 나타내는 3차원 그래프이다.

### 2.4 최적의 파장대 및 경계값 선정

이 연구에서는 하이브리드 ECC 단면 이미지에서 합성섬유들을 매트릭스로부터 효과적으로 검출하고, 섬유들을 종류별로 검출하기 위한 최적의 조사광 및 방사 파장대를 선정하기 위

하여 형광특성을 비교하여 상대 형광 광도값의 차이가 가장 큰 파장대를 조사하였다. 예비 실험 결과 매트릭스는 형광특성이 거의 없는 것으로 나타났으므로 구별하고자 하는 합성섬유들에 대해서만 상대 형광 광도값의 차이를 조사하였다. PVA 섬유, PET 섬유, PE 섬유, 그리고 PP 섬유의 형광특성이 나타나는 모든 조사광과 방사 파장대에서의 상대 형광 광도값을 비교하여 동일한 파장대에서 상대 형광 광도값의 차이가 가장 큰 조사광과 방사 파장대를 최적의 파장대로 선정하였다.

또한, 합성섬유들을 개별적으로 검출하기 위해서는 최적의 파장대를 선정한 후에 그 파장대에서 두 분류대상을 구별할 수 있는 최적의 경계값을 선정하여야 한다. 최적의 경계값을 산출하기 위한 분류기준으로는 상대 형광 광도값의 차이를 이용하였으며, 식 (1)을 통하여 구하였다. 평균과 표준편차는 최적 조사광 및 방사 파장대에서 합성섬유의 양을 달리하여 상대 형광 광도값을 10회 측정하여 구하였다(Fig. 6).

$$\text{separation value} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} m_1 + \frac{\sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2} m_2 \quad (1)$$

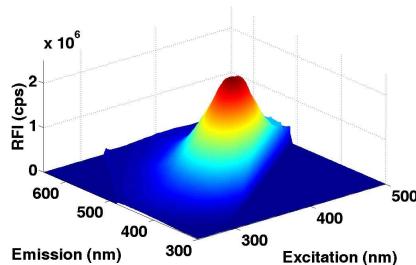


Fig. 5 Representative fluorescence excitation and emission characteristics of PVA fiber.

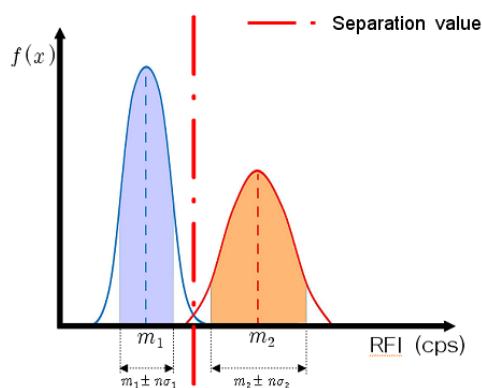


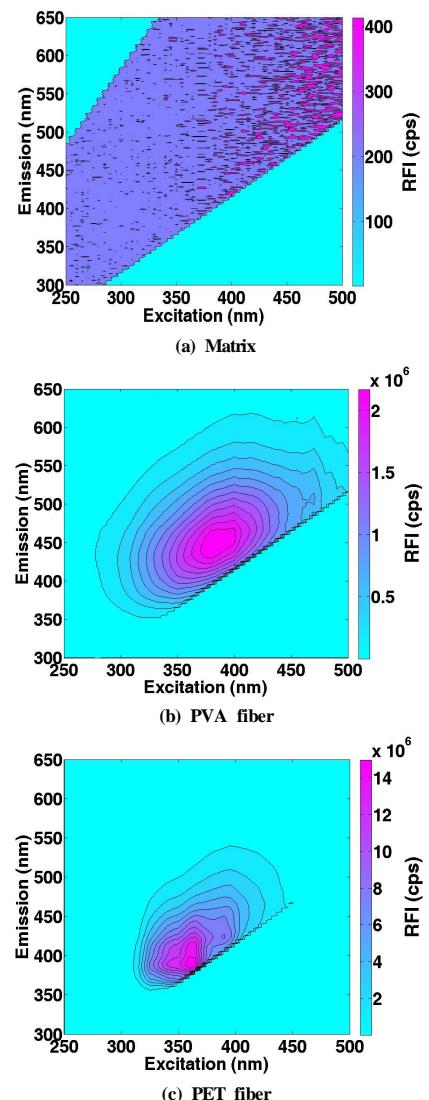
Fig. 6 Illustration of the method used to determine the separation values.

여기서  $m_i$ 와  $\sigma_i$ 는 각각  $i$ 번째 섬유의 형광 광도값의 평균과 표준편차이다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 합성섬유의 형광특성 분석 결과

Fig. 7은 매트릭스 및 ECC의 제조에 사용된 PVA 섬유, PET 섬유, PE 섬유, 그리고 PP 섬유에 대하여 조사광에 따른 형광 특성을 등고선 형태인 2차원 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 매트릭스는 합성섬유에 비해 형광특성이 거의 나타나지 않는 것을 발견할 수 있었다. 이에 반하여 현재 하이 브리드 ECC에서 일반적으로 사용되는 합성섬유인 PVA 섬유, PET 섬유, PE 섬유, 및 PP 섬유는 뚜렷한 피크를 가지는 형광 특성을 가지고 있음을 발견할 수 있다.



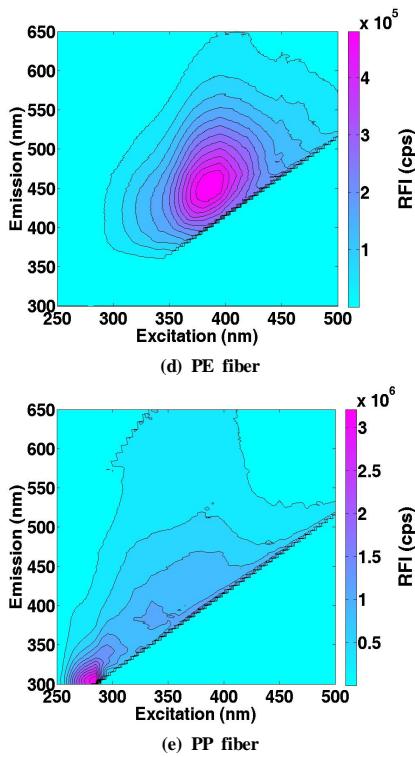


Fig. 7 Representative contour plots of fluorescence ExEm matrices of samples.

Table 2 Fluorescence excitation and emission bands for the most high RFI of samples

	Excitation (nm)	Emission (nm)	RFI (cps)
Matrix	-	-	620
PVA fiber	380	447	2,350,970
PET fiber	360	390	16,235,400
PE fiber	385	449	519,930
PP fiber	285	305	3,478,830

Table 2는 매트릭스 및 각각의 합성섬유에서 가장 높은 상대 형광 광도값을 보이는 조사광과 방사 파장대를 나타낸 것이다.

매트릭스를 제외한 합성섬유들 간의 형광특성을 비교해 보면 PVA 섬유는 조사광 380 nm일 때 방사 파장대 447 nm 부근에서 가장 높은 상대 형광 광도값을 나타내었으며, 이는 조사광 385 nm일 때 449 nm의 방사 파장대에서 가장 높은 상대 형광 광도값을 가지는 PE 섬유와 상당히 유사한 형태의 형광특성을 보이며, Fig. 5를 통해서도 알 수 있다. 형광 원리를 이용함에 있어서 형광특성의 차이가 상대적으로 가장

작은 PVA 섬유와 PE 섬유를 혼합한 하이브리드 ECC의 단면 이미지에서 개별적으로 한 섬유만을 검출하기란 쉽지 않을 것으로 사료된다.

PE 섬유를 제외한 나머지 합성섬유들은 PVA 섬유와 가장 높은 상대 형광 광도값을 보이는 조사광과 방사파장대가 다르기 때문에 동일한 파장대에서 상대 형광 광도값의 차이는 더욱 커질 것이며, 이러한 상대 형광 광도값 차이를 이용하여 섬유를 종류별로 구분할 경우 상대적으로 용이할 것이다.

합성섬유들 중에서 가장 높은 상대 형광 광도값이 나타나는 PET 섬유는 다른 섬유들에 비해서 가장 높은 상대 형광 광도값이 약 5배에서 30배 정도 높음을 알 수 있다. 또한, 360 nm의 광을 조사하였을 때 390 nm 파장대 부근에서 가장 높은 상대 형광 광도값을 보이며, 이와 유사한 형태의 형광특성을 보이는 섬유가 없다. 따라서 동일한 파장대에서 상대 형광 광도값의 차이가 더욱 커지기 때문에 다른 합성섬유들과 구별하기 용이할 것으로 판단된다. 특히 가장 작은 차이를 보이는 합성섬유는 PP 섬유이며, 이 섬유는 가장 높은 상대 형광 광도값을 보이는 조사광과 방사 파장대가 각각 285 nm와 305 nm 부근으로 PET 섬유와는 조사광 및 방사파장대에서 확연한 차이를 보이기 때문에 실질적인 상대 형광 광도값의 차이는 더욱 커질 것으로 판단된다.

PE 섬유는 합성섬유들 중에서 가장 낮은 상대 형광 광도값을 나타내며 형광특성의 형태는 PVA 섬유와 유사하다는 것을 알 수 있다. 매트릭스를 제외할 경우 가장 낮은 상대 형광 광도값을 나타내며, PET 섬유와의 상대 형광 광도값의 차이는 약 40배 정도가 된다. 따라서 PE 섬유와 PET 섬유를 혼합한 하이브리드 ECC를 제조할 경우 다른 합성섬유를 혼합한 하이브리드 ECC보다 단면 이미지에서 섬유를 종류별로 구분하여 검출하기 용이하며 동시에 정확도도 높을 것으로 사료된다.

PP 섬유의 형광특성은 다른 합성섬유의 형광특성과 상당히 다른 형태를 나타내고 있다. 가장 높은 상대 형광 광도값을 보이는 조사광과 방사 파장대도 다른 합성섬유와는 확연하게 차이를 보이기 때문에 형광기법을 이용하여 섬유를 구분하는데 용이 할 것으로 판단된다.

### 3.2 최적의 파장대 및 경계값 선정

하이브리드 ECC 단면 이미지에서 합성섬유들을 매트릭스로부터 효과적으로 검출하고, 섬유들을 종류별로 검출하기 위한 최적의 파장대 및 경계값을 선정하기 위하여 앞 절에서 분석한 결과를 토대로 총 여섯 가지의 조합에 대하여 형광특성을 비교하였다. 최적의 파장대는 합성섬유들 간의 상대 형광 광도값의 차이가 가장 큰 조사광 및 방사 파장대로 선정하였으며, 통계적 방법을 이용하여 최적의 경계값을 산출하였다(Table 3).

**Table 3 Absolute difference value of RFI and optimum separation value in optimal fluorescence excitation and emission bands**

	Excitation (nm)	Emission (nm)	Absolute difference value (cps)	Separation value (cps)
PVA-PET	360	389	15,208,790	1,969,438
PVA-PE	380	446	1,841,880	785,876
PVA-PP	285	305	3,467,950	60,814
PET-PE	360	390	16,056,410	956,764
PET-PP	360	390	15,199,840	1,191,081
PE-PP	285	305	3,477,340	26,877

상대 형광 광도값의 차이를 비교해 보면 PET 섬유와 다른 합성섬유를 혼합한 조합이 PET 섬유를 제외한 다른 조합들보다 동일한 파장대에서 상대 형광 광도값의 차이가 상대적으로 크게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 형광특성에서도 알 수 있듯이 PET 섬유는 다른 합성섬유들보다 상대 형광 광도값이 상당히 높으며 유사한 형광특성을 보이는 섬유도 없기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 상대 형광 광도값의 차이가 가장 큰 파장대인 조사광 360 nm, 방사 파장대 390 nm을 PET 섬유를 다른 섬유와 구별하기 위한 최적의 파장대로 선정하였다.

상대 형광 광도값의 크기에서 상대적인 차이를 보이는 PET 섬유와는 달리 형광특성의 형태에서 다른 합성섬유와 뚜렷한 차이를 보이는 PP 섬유를 다른 섬유와 혼합한 조합을 보게 되면 PET 섬유와 PP 섬유를 혼합한 조합을 제외하고는 285 nm의 광을 조사하였을 때 305 nm 파장대에서 상대 형광 광도값의 차이가 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 형광특성을 나타내는 Fig. 5를 보면 확인할 수 있다. 즉 이 파장대에서 PP 섬유는 가장 높은 상대 형광 광도값을 보이는 반면 다른 합성섬유들은 거의 형광특성을 보이지 않기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 PP 섬유를 PVA 섬유나 PE 섬유와 구별하여 검출하기 위한 최적의 파장대는 조사광 285 nm와 방사 파장대 305 nm로 선정하였다.

Table 3에서 상대 형광 광도값의 차이가 가장 크게 나타나는 조합은 PVA 섬유와 PE 섬유가 혼합된 경우이다. 다른 조합과 비교해 보면 상대적으로 두 합성섬유는 형광특성의 형태가 상당히 유사할 뿐만 아니라 가장 높은 상대 형광 광도값을 보이는 파장대도 거의 동일하다. 다만, 상대 형광 광도값 크기에서 약 4배 정도의 차이를 보이므로 동일한 파장대에서 상대 형광 광도값의 차이를 조사한 결과, 조사광과 방사 파장대가 각각 380 nm와 446 nm에서 가장 크게 나타났다. 따라서 이 파장대를 최적의 파장대로 선정하였다.

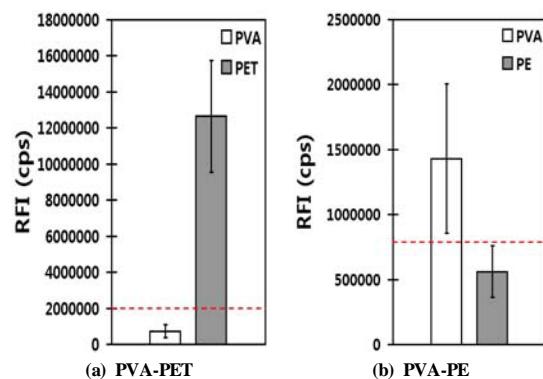
통계적 방법을 이용하여 최적의 파장대 내에서 최적의 경계값을 산출하였으며 그 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

최적의 경계값을 산출한 결과 PVA 섬유와 PE 섬유가 혼합된 조합을 제외하고, 최적의 파장대에서 합성섬유를 개별적으로 정확히 검출할 수 있을 것으로 판단된다. PVA 섬유와 PE

섬유를 혼합한 조합에서는 상대 형광 광도값에서 상대적인 차이를 보이는 하나 두 합성섬유의 표준편차를 고려할 경우 상대 형광 광도값의 차이는 훨씬 작아지며, 최적의 경계값을 분류 기준으로 이용하더라도 개별적인 섬유 검출에 있어서 정확도는 낮을 것으로 사료된다.

#### 4. 결 증

일반적으로 ECC에서 단일섬유로 가장 많이 사용되는 PVA 섬유 같은 경우 조사광이 수은등(Mercury Lamp) (파장대: 365 nm)이며, GFP (Green Fluorescent Protein) (파장대: 510 nm) 필터가 장착된 형광현미경을 통해 검출이 가능하다[6]. 실제 Fig. 9는 PVA-ECC의 단면 이미지를 형광현미경으로 촬영한 형광이미지로서 매트릭스와 PVA 섬유가 확연히 구분된다는 사실을 확인할 수 있으며, 이와 같이 합성섬유의 형광특성에 맞는 조사광과 필터를 사용할 경우 섬유를 개별적으로 검출하는데 용이하다. 그러나 실질적으로 형광현미경을 통해 최적의 파장대를 구현하기란 어려운 실정이며, 따라서 이 연구에서는 형광현미경보다 다양한 파장대를 구현하여 형광물질을 관찰할 수 있는 공초점 레이저 현미경(Confocal Laser Scan Microscope)을 통해 실제 섬유의 형광이미지를 관찰하였다. 상대적인 밝기값을 비교하기 위해 동일한 조건인 405 nm의 광원을 조사하였을 때 방사 파장대 500~525 nm 구간의 형광 광도값을 측정할 수 있는 필터를 통해 각 섬유의 형광이미지를 촬영하였다. Fig. 10은 공초점 레이저 현미경으로 촬영한 PVA 섬유, PET 섬유, PE 섬유, 그리고 PP 섬유의 형광이미지를 나타내며, Fig. 11은 405 nm의 조사광과 500~525 nm 필터에 해당되는 상대 형광 광도값을 나타낸다. Fig. 10과 Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 공초점 레이저 현미경으로 촬영한 섬유의 상대적인 밝기 순서는 이 연구에서 조사한 섬유의 형광특성 결과와 일치하는 것으로 나타났다. 다만, 공초점 레이저 현미경으로 구현할 수 있는 파장대에서는 상대적으로 밝기값이 높은 그룹(PVA 섬유, PET 섬유)과 밝기값이 낮은 그룹(PE 섬유, PP 섬유)간에만 구분이 가능하였다.



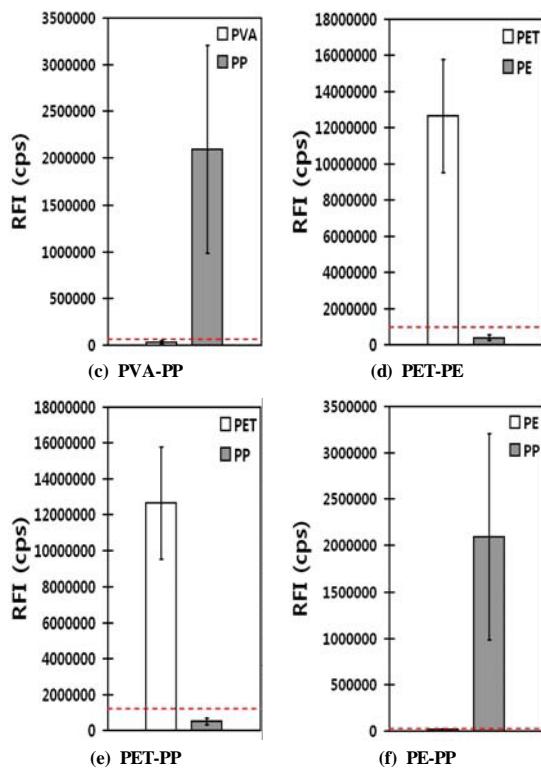


Fig. 8 Mean RFI of optimal fluorescence excitation and emission bands. Error bars indicate standard deviations.

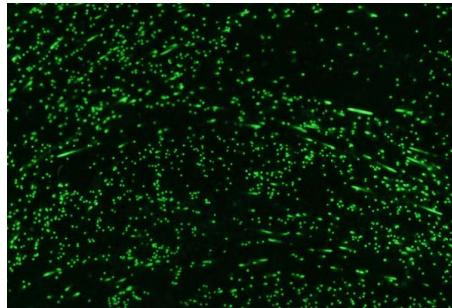


Fig. 9 Fluorescence sectional image of PVA-ECC[11].

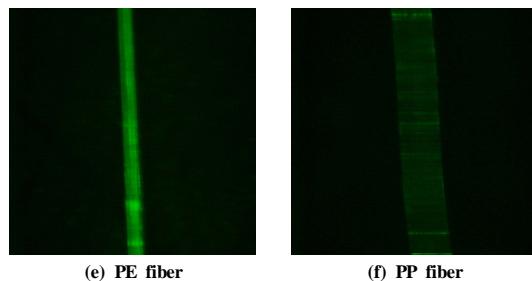
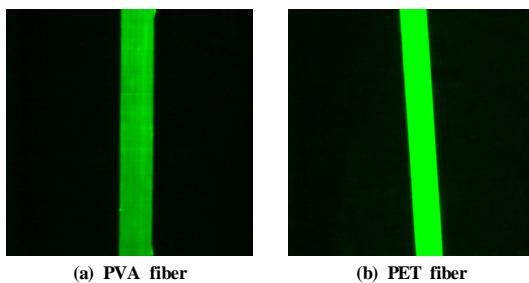


Fig. 10 Fluorescence images of PVA fiber, PET fiber, PE fibers, and PP fibers.

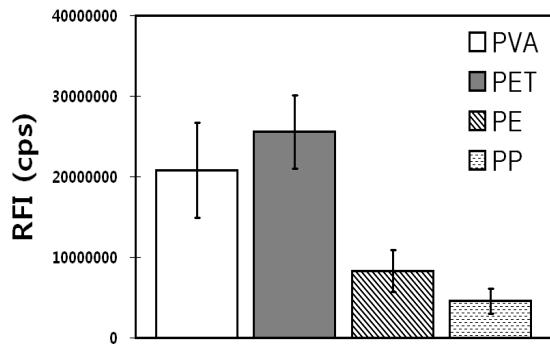


Fig. 11 Mean RFI of excitation 405 nm and emission bands 500~525 nm. Error bars indicate standard deviations.

## 5. 결론

이 연구에서는 섬유 보강 시멘트계 복합재료 중의 하나인 ECC의 섬유 분포 특성을 관찰하기 위하여 시멘트계 매트릭스로부터 섬유를 검출하고 섬유들이 혼합되어 혼입된 경우 섬유 종류별로 검출하기 위하여 형광 광도계를 사용하여 PVA, PET, PE, 그리고 PP 섬유의 형광특성을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 매트릭스의 경우 형광특성이 거의 없는 것으로 나타났다. PVA 섬유, PET 섬유, PE 섬유, 그리고 PP 섬유의 최대 형광 광도값이 나오는 조사광과 방사 파장대는 각각 400~432 nm, 350~410 nm, 400~449 nm, 그리고 285~305 nm로 나타났다.
- 2) PVA 섬유, PET 섬유, PP 섬유의 상대 형광 광도값은 PE 섬유를 기준으로 약 4배, 30배, 7배로 각각 나타났다.
- 3) 두 종류의 섬유를 구분하는데 있어서 상대 형광 광도값의 차이값이 최대가 되는 최적의 조사광과 방사 파장대는 PET-PVA, PET-PE, PET-PP 섬유 조합인 경우 360~390 nm이며, PVA-PP와 PE-PP 섬유 조합인 경우 285~305 nm 인 것으로 나타났다. 마지막으로 PVA-PE 섬유 조합인 경우 380~446 nm로 나타났다.

- 4) 섬유를 종류별로 구분할 수 있는 최적의 경계값을 산출한 결과 PVA 섬유와 PE 섬유가 혼합된 조합을 제외하고는 최적의 파장대 내에서 합성섬유를 개별적으로 검출할 때 상당히 정확한 검출이 가능하리라 판단된다.

## 후기

이 연구는 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2008-314-D00421)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Kim Y.Y., Fischer G., Lim Y.M., and Li V.C., "Mechanical Performance of Sprayed Engineered Cementitious Composite Using Wet-mix Shotcreting Process for Repair Applications," *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No. 1, 2004, pp. 42-49.
- 2) 홍건호, 김기수, 한복규, "건설분야의 섬유강화 시멘트 복합 신재료," *한국복합재료학회지*, 제19권 제1호, 2006, pp. 43-48.
- 3) 이행기, 김봉래, "원형섬유강화 복합재료의 탄소성 거동 및 점진적 손상," *대한토목학회 논문집*, 제28권 제1A호, 2008, pp. 115-123.
- 4) 김윤용, "시멘트계 모르타르 매트릭스를 활용한 섬유복합재료 ECC (Engineered Cementitious Compioste)의 설계와 시공 성능," *한국복합재료학회지*, 제20권 제2호, 2007, pp. 21-26.
- 5) Lee B.Y., Kim Y.Y., and Kim J.K., Fiber Bridging Characteristics of PVA-ECC Evaluated Based on the Sectional Image Analysis, *Proceedings of ICCE'S09*, Phuket, Thailand, 2009, pp. 642-647.
- 6) 김윤용, 이방연, 김진근, "PVA-ECC 단면 이미지의 섬유분류 및 검출 기법," *한국콘크리트학회 논문집*, 제20권 제4호, 2008, pp. 513-522.
- 7) Wei Sun, Huisu Chen, Xin Luo, Hongpin Qian, "The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 4, 2001, pp. 595-601.
- 8) Shaikh Faiz Uddin Ahmed, Mohamed Maalej, and P. Paramasivam, "Analytical Model for Tensile Strain Hardening and Multiple Cracking Behavior of Hybrid Fiber-Engineered Cementitious Composites," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, No. 7, 2007, pp. 527-539.
- 9) Alva Peled, Barzin Mobasher, Zvi Cohen, "Mechanical properties of hybrid fabrics in pultruded cement composites," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, No. 9, 2009, pp. 647-657.
- 10) 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.
- 11) Lee, B.Y., Kim, J.K., Kim, J.S. and Kim, Y.Y., "Quantitative Evaluation Technique of PVA (Polyvinyl Alcohol) Fiber Dispersion in Engineered Cementitious Composites," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, No. 6, 2009, pp. 408-417.
- 12) Kim M.S., Chen, Y.R., and Mehl P.M., "Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety," *Transactions of the ASAE*, Vol. 44, No. 3, 2001 pp. 721-729.
- 13) 조병관, 김문성, "도계육 표면 내장 잔유물 오염 검사를 위한 형광 조사 및 방사 파장대 선정에 관한 연구," *바이오 시스템공학*, 제33권 제2호, 2008, pp. 136-141.