



전기저항 측정을 통한 모르타르 내의 섬유활성탄의 분산성 평가

이보연^{1)*} · 이재승¹⁾

¹⁾수원대학교 건축공학과

Evaluation of Dispersion of Activated Carbon Fiber in Mortar Using Electrical Resistivity Method

Bo Yeon Lee^{1)*} and Jae Seoung Lee¹⁾

¹⁾Department of Architectural Engineering, The University of Suwon, Hwaseong 18323, Rep. of Korea

ABSTRACT Various types of fibers are utilized in cementitious materials in order to improve their performances. Here, the extent of fiber dispersion is of key importance regardless of the purpose of using fiber. In this study, activated carbon fiber dispersion in mortar samples was evaluated using electrical resistivity method. In particular, the extent of fiber dispersion was compared per mixing methods and surface treatments. The results suggest that the surface resistivity method is capable of evaluating dispersion of activated carbon fiber and that ultrasound dispersion method is superior to mortar mixer and hand mixer method. The use of superplasticizer improved dispersion but acid treatment was not effective.

Keywords : dispersion, electrical resistivity, wenner probe, activated carbon fiber, acid treatment

1. 서 론

각종 섬유를 콘크리트 등의 시멘트계 재료에 혼입하는 연구는 매우 활발하게 이루어져왔다. 섬유의 종류와 그 특성에 따라 섬유를 혼입하는 목적이 상이한데, 휨인성 증가, 휨강도 증가, 내진성능 개선 등 역학적 성능의 개선에 관련한 연구가 가장 많이 이루어지고 있으며,^{1,4)} 그 외에도 수축 감소,⁵⁾ 내부 양생,⁶⁾ 전기적 특성 개선,^{7,9)} 비파괴검사¹⁰⁾ 등 다양한 목적이 있다. 이러한 여러 가지 의도에 따른 섬유 혼입의 목적에 최대한 도달하기 위해서는 섬유의 균질한 분산이 필수적이다. 섬유의 분산이 균질하게 이루어지지 않은 부위는 전체 매트릭스의 결점으로 작용하여 우선적으로 성능 저하가 일어나게 된다.¹¹⁾

따라서 섬유상의 재료를 사용하였을 때의 분산성의 문제는 중요하게 다루어지고 있으며, 시멘트계 재료 내에 혼입된 섬유의 분산성 향상에 대한 연구와 분산성을 측정하는 방법에 대한 연구들이 꾸준히 진행되고 있다. 예를 들어 카본나노튜브(CNT)의 연구에 가장 큰 문제 중 하나는 분산성 향상으로, Konsta-Gdoutos et al. (2010)은 계면활성제와 함께 초음파를 적용하여 효과적으로 multiwall carbon nanotubes를 분

산하였다.¹²⁾ 한편, 섬유의 표면 처리를 통하여 섬유와 물의 접촉각을 감소시켜 분산성을 향상하는 방법이 있는데, 열처리, 산처리, 플라즈마 처리, 양극산화 방법 등이 있다.¹³⁾ Fu et al. (1998)은 오존을 이용한 산화처리를 이용하여 탄소섬유와 시멘트의 접착력이 향상되고 분산성이 증가되는 결과를 얻었다.¹³⁾ 한편, 혼화재료를 섬유와 함께 사용하여 섬유의 분산성을 향상시키는 연구도 진행되었다.¹⁴⁾ 일반적으로 섬유의 분산성 측정은 이미지분석을 이용하는 방법이 가장 널리 사용되어 왔다.^{11,15-17)} 이 방법은 직접적이고 명료한 결과를 제공하지만 시편을 훼손하고 시간과 인력의 소모가 큰 단점이 있다. 또한 microfiber의 경우 현미경으로 섬유의 뭉침은 관찰할 수 있지만 개별 섬유의 분산성을 평가하기에는 한계가 있어 이미지분석 방법이 적절치 않다. 최근 Woo et al. (2005)은 AC-Impedance Spectroscopy 방법을 개발하고 이 방법으로 강섬유의 분산성을 평가하였다.¹⁸⁾ AC-IS방법은 이미지 분석 방법의 단점을 보완하고 많은 이점이 있지만 실험실 내에서만 적용이 가능하고 실험 방법이 복잡한 단점이 있다. 한편, Chung은 역시 전기적 특성인 전기저항(volume electrical resistivity)을 측정하는 방법으로 탄소섬유와 강섬유 혼입 모르타르내의 섬유 분산성을 효율적으로 측정하였다.¹⁴⁾ 그러나 사용된 전기저항 측정의 방법은 프로브(probe)가 시편의 내부에 위치함에 따른 실험의 번거로움이 있고 실험실 내에서만 측정이 가능하며 전기저항에 사용된 시편을 강도 등 다른 시험에 재사용하지 못하는 단점이 있다.

*Corresponding author E-mail : bylee@suwon.ac.kr
 Received January 11, 2017, Revised March 17, 2017,
 Accepted March 29, 2017

©2017 by Korea Concrete Institute

본 연구에서는 시멘트계 재료에 혼입한 섬유 분산성을 표면전기저항법(electrical surface resistivity method)으로 평가하였다. 표면전기저항법은 Four-point Wenner 방식을 이용하여 네 개의 프로브를 시편의 표면에 접촉하여 전기저항을 측정하는 방법이다. 이 방법은 1) 시편을 파괴하지 않고, 2) 짧은 시간에 평가가 가능하며, 3) 수화 초기에도 사용이 가능하고, 4) 정량적 수치를 얻을 수 있어 평가가 용이하며, 5) 비교적 저렴하게 시행할 수 있고 6) 현장에서 시행 가능한 장점이 있다. 단, 방법의 특수성 때문에 전기전도성이 있는 섬유에 대해서만 시행이 가능하다는 단점을 지닌다.

본 연구에는 섬유활성탄 (Activated Carbon Fiber, ACF)을 혼입 섬유로 선정하였다. 섬유활성탄은 일반적인 탄소섬유를 활성화하여 제조하므로 탄소의 함량이 높고 높은 전기전도성을 지니 본 연구의 목적에 적합하다. 또한 일반적인 섬유활성탄은 직경이 10 μm 내외로 microfiber에 속하는데, 지름이 1 mm에 가까운 강섬유에 비하여 분산이 까다롭고 분산의 정도가 매트릭스에 미치는 영향이 크므로 분산성 연구에 적합하다고 판단하였다. 또한, 섬유활성탄은 활성화 과정에서 다공질의 미세구조가 형성되어 일반적으로 1,000 m²/g 이상의 매우 큰 비표면적을 지니는데, 이 때문에 각종 가스나 용액 중의 무기 또는 유기 물질 등에 대해 강력한 흡착력을 나타내어 시멘트계 재료에 새로운 기능, 즉 친환경성을 부여할 수 있다.

본 연구의 목적은 첫째, 섬유활성탄이 혼입된 모르타르의 섬유 분산성을 표면전기저항법을 통하여 평가가 가능한지 검토하고, 둘째, 다양한 물리적 분산 방법과 표면처리에 따른 분산 정도의 정량적 평가가 표면전기저항법을 이용하여 효과적으로 이루어질 수 있는지에 대하여 판단하는 것이다. 더 나아가 microfiber를 포함하는 시멘트계 재료의 전도성 섬유 분산에 관하여 새로운 데이터를 제시하는 것에 의의가 있다.

2. 이론적 배경

2.1 시멘트계 재료의 전기적 특성

일반적으로 콘크리트는 건조 상태에서 전기전도성이 높지 않다. 보통중량콘크리트의 건조상태 전기저항성은 6.54-11.4 kΩ·m 정도로 알려져 있다.⁹⁾ 콘크리트에 강섬유 등 다양한 전도성 물질을 혼입하여 콘크리트의 전기전도성을 개선하는 연구가 1990년대 중반부터 이루어졌다.^{8,19)} 전기전도성이 있는 콘크리트(Conductive Concrete)는 다양한 적용가능성을 내포하는데, 예를 들어 정전기방지 바닥(anti-static flooring), 전자기장 차폐(electromagnetic shielding), 철근의 부식방지(cathodic protection), 도로제빙(roadway deicing), 자가 감지(self-sensing) 등이 있다.^{14,20)}

콘크리트의 전기 전도는 두 가지 방식(전자 전도(electronic conduction)와 이온 전도(ionic conduction))에 의해 일어난다. 전자 전도는 섬유의 자유전자의 이동에 의하여 전류가 흐르는 것을 의미하고 이온 전도는 공극수 내의 이온의 이동에

의한 전기 전도를 의미한다.^{9,21)} 따라서 측정되는 전기 전도값(또는 전기 저항값)은 혼입된 전도성 물질의 성질과 혼입량, 그리고 분산의 정도와 함께 공극수의 특성과 공극의 크기와 양, 그리고 연결성, 즉 투수성의 영향을 받는다. 공극수의 화학조성, 양생과정, 온도와 습도 등도 콘크리트의 전기저항에 영향을 미치지만⁷⁾ 이번 연구에서는 다루어지지 않았다.

콘크리트의 전기전도(또는 전기저항)에 관한 연구는 활발하게 이루어지고 있으나 이에 대한 기준이나 권고안은 아직 미비한 상황이다. 이에, 여러 가지 전기전도(또는 전기저항) 측정 방법이 다양한 연구에 사용되고 있다. 전극을 시편에 매립하여 전류를 직접 측정하는 방식,²⁰⁾ 시편의 양 단부 표면에 전극을 부착하여 콘크리트 전체의 전기저항을 측정하는 방식,²²⁾ Wenner 전극을 사용하는 방식 등이 있다.¹⁴⁾ 본 연구에서는 Four-point Wenner probe 방식의 표면전기저항 측정 방법(Surface resistivity method, SR test)을 사용하였다. 이 방법은 노동집약적이고 비용이 높은 기존의 급속염소이온 침투시험(rapid chloride permeability test, ASTM C1202, AASHTO T 277)에 비해 효율적이며 AASHTO TP 95-14에 실험 방법이 권고되어 있다. 이 방법은 콘크리트의 투수성을 간접적으로 측정하기 위한 방법으로 사용이 증가하고 있다.

Four-point Wenner 방식은 등 간격으로 일렬로 나열한 4개의 전극을 사용하며, 두 개의 외부 전극 사이에 AC 전류가 흐르고 두 개의 내측 전극이 전위차를 측정하여 전기저항을 측정한다(Fig. 1). 일반적으로 수화반응이 진행됨에 따라 공극의 크기가 작아지고 수가 감소하며 또한 공극의 연결성이 감소하여 전기 저항값은 상승하게 된다. 전기저항은 Equation 1에 따라 계산된다.

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} (k\Omega \cdot cm) \quad (1)$$

여기서, ρ는 표면전기저항, a는 전극간의 거리, V는 전압, I는 전류를 의미한다. 계측된 전기저항은 물체의 고유한 값이며, 전기전도값(electrical conductivity)과 역수의 관계를 가진다.

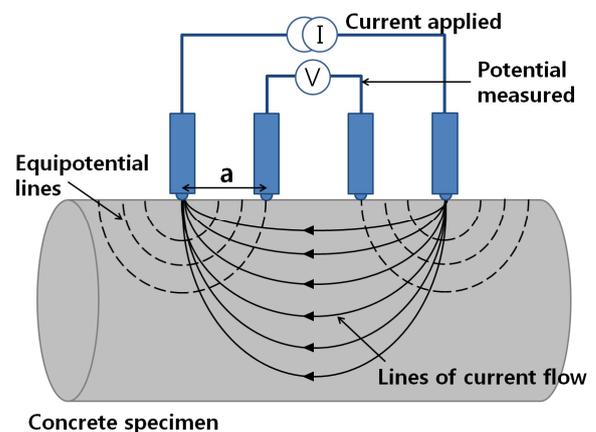


Fig. 1 Four-point Wenner surface electrical resistivity method

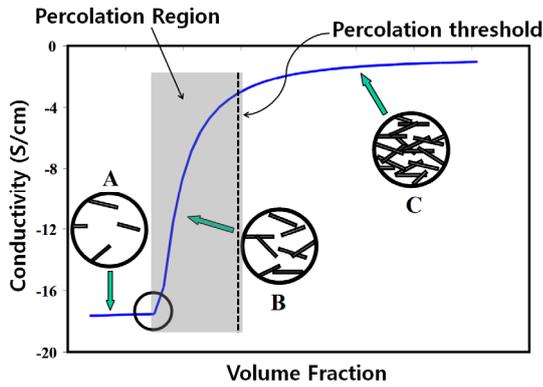


Fig. 2 Dependence of electrical conductivity on filler volume fraction, adapted and modified from¹⁴⁾

2.2 침투임계점(Percolation Threshold)

침투임계점(Percolation threshold)은 임의의 시스템에 대한 장기적 연결성의 형성(formation of long-range connectivity in random systems)에 관한 개념이며, 침투임계점 이상에서 거대 연결요소가 형성되는 것을 의미한다. 이 이론을 본 연구에 적용한다면, 시멘트계 재료 내에 연속적인 전기 전도 경로가 형성되는 것을 의미한다. 즉, 외부에 전원공급이 있을 경우 시멘트 매트릭스에 혼입된 전도성 섬유와 공극수를 따라 전류가 흐르는데, 섬유의 양이 증가할수록 전기 전도성이 높아지고 일정 양 이상의 섬유가 혼입되면 섬유들간의 연결성이 높아져 전체적으로 연속적인 전기 전도 경로가 형성된다. 이 때의 섬유 혼입량을 침투임계점이라고 한다(Fig. 2). 섬유의 혼입량이 침투임계점 이하일 때에는 섬유의 분산성이 높을수록 전기 전도성이 높아진다.¹⁴⁾ 섬유의 분산성이 높을수록 상대적으로 모체 내에 전류의 경로가 짧아지기 때문이다. 그러나 섬유의 혼입량이 침투임계점 이상일 경우에는 이미 연속적인 전기 전도 경로가 형성되어 분산의 정도에 관계없이 높은 전도성을 나타낸다. 따라서 시멘트계 재료 내의 전도성 섬유의 분산성을 전기전도 방식으로 판단하기 위해서는 해당 섬유에 대한 침투임계점 이하의 섬유혼입량을 사용할 때에만 정확한 결과를 얻을 수 있다.

3. 실험 계획 및 방법

본 연구에서는 섬유활성탄을 혼입한 실린더형 모르타르 샘플을 제작하였고, 물리적 분산 방법과 섬유의 표면 처리 방법에 따른 섬유의 분산 효과를 표면전기저항 측정 방법을 이용하여 실험적으로 평가하였다.

3.1 실험 재료

국내에서 생산된 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 시멘트의 성분은 XRF (X-ray fluorescence)로 분석하였고, 그 결과를 기본 물성과 함께 Table 1에 나타내었다. 각 구성 물질의 질량비(%)는 총합을 100으로 환산하였을 때의 값이

Table 1 The chemical and physical properties of cement

Chemical components (%)	CaO	67.43
	SiO ₂	18.43
	Al ₂ O ₃	4.00
	Fe ₂ O ₃	3.903
	MgO	2.05
	SO ₃	1.29
	K ₂ O	1.15
	P ₂ O ₅	0.589
	TiO ₂	0.33
	MnO	0.272
	Na ₂ O	0.251
	ZnO	0.135
	SrO	0.089
	CuO	0.045
CoO	0.0197	
ZrO ₂	0.0115	
Physical Properties	Loss on ignition (%)	3.35
	Blaine fineness (cm ² /g)	3790
	Density (g/cm ³)	3.15

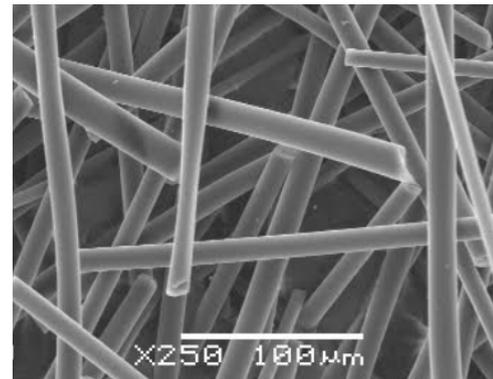


Fig. 3 SEM image of ACF at x250 magnification

다. 잔골재는 KS L 5100을 만족하는 주문진 표준사를 사용하였다. 본 연구에 사용된 섬유활성탄은 ACF-1603-10 (Kynol Activated Carbon Fiber, Gunei Chemicals)이며, 비표면적이 800 m²/g 이상인 제품이다. 제조사에 따르면, 섬유의 직경은 약 10 μm, 섬유의 평균 길이는 3 mm, 섬유의 인장강도는 약 490 MPa (50 kg/mm²)이다. 본 ACF는 석탄산 수지(phenol resin)를 원료로 탄화와 기화의 과정을 거쳐 생산된다. 사용된 ACF의 SEM 이미지는 Fig. 3과 같다.

잔골재와 ACF는 각각 105°C에서 24시간 건조한 뒤 밀봉하여 시편 제작시까지 보관하였다. 배합수는 저항 18.2 MΩ의 탈이온수(Deionized Water, DI Water)를 사용하였다. 고성능 감수제(superplasticizer, SP)는 폴리카르복실산(polycarboxylate) 계열이 사용되었다.

3.2 연구 방법 및 시편 제작

3.2.1 연구 방법

본 연구는 크게 세 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계는 본격적인 분산성 연구에 앞서서 전기저항 방법론을 적용할 수 있는 적정 섬유량을 산정하는 연구이다. 2.2절에 소개되었듯이, 전도성이 있는 섬유의 혼입량이 침투 임계점(percolation threshold)을 초과하면 전류의 흐름이 섬유의 분산성에 큰 영향을 받지 않게 된다. 따라서 전기저항 측정 방법으로 섬유의 분산성을 판단하기 위해서는 침투 임계점 이하의 섬유량을 사용해야 한다. 첫 번째 단계에서는 ACF의 함유량을 달리 하면서 적정 섬유량을 산정하는 것을 목표로 한다. 두 번째 단계에서는 세 가지 물리적 분산 방법에 따른 ACF의 모르타르 내 분산 정도를 표면전기저항 방법으로 측정하고 표면전기저항 방법의 적용 가능성에 대해 평가한다. ACF 함량은 첫 번째 단계에서 산정한 침투 임계점 이하로 한다. 마지막으로 세 번째 단계에서는 ACF의 표면처리(surface treatment)가 섬유의 분산성에 미치는 영향에 대하여 평가한다. 특히 고성능 감수제의 사용과 섬유의 산 처리가 분산성에 미치는 영향을 평가한다. 시멘트 페이스트는 물-기반이므로 섬유의 친수성(hydrophilicity)을 향상시켰을 때 섬유의 분산성이 개선된다고 알려져 있다. 또한 섬유의 친수성은 고성능 감수제를 사용하거나 섬유의 표면처리에 따라 제어할 수 있다.^{23,24)} 고성능 감수제의 영향을 비교평가하기 위하여 두 번째 단계에 사용된 물리적 분산 방법에 추가하여 각각 고성능 감수제를 사용하였다. 특히, 고성능 감수제의 역할에 대해 심층 연구하기 위하여 모르타르의 흐름 시험(flow test)을 실시하였다. 대표적인 표면처리 방법으로는 산 처리, 플라즈마처리, 오존처리 등이 있으며, 본 연구에서는 산 처리 방법이 사용되었다. 산 처리 방법은 CNT (carbon nanotube)를 수용액에 분산하는 데 흔히 사용되는 방법이다.²⁵⁾

3.2.2 시편 제작

모든 시편에 대하여 물-시멘트비(w/c)가 0.45, 시멘트와 잔골재의 질량 비율이 1:2인 $\phi 100 \times 200$ mm 모르타르 실린더를 제작하였다. 모든 시편은 성형 후 $25 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 100%에서 24시간 양생한 후 탈형하였다. 이후 석회수 수조에서 전기저항 측정 시기까지 수중 양생 하였다.

첫 번째 단계에서는 시멘트 질량 대비 0.0%, 0.1%, 0.3%, 0.5%, 1.0%, 2.0%의 ACF를 혼입하여 실린더 시편을 각 2개씩 제작하였다. ACF는 모르타르 믹서에 시멘트와 잔골재를 투여할 때 손으로 일정한 크기로 작게 떼어 넣는 방식으로 투입하였다.

두 번째 단계에서는 모든 시편에 대해 시멘트 질량 대비 0.5%의 ACF를 사용하였다. 총 세 가지의 물리적 분산/믹싱 방법을 사용하고 그 결과를 비교하였다. 핸드믹서 방법(Hand Mixer, HM), 모르타르 믹서 방법(Mortar Mixer, MM), 초음파 처리 방법(Ultrasonication, Ultra)에 따라 ACF를 분산하고 믹싱하였다. 핸드믹서 방법과 초음파 처리 방법의 시편 제작

순서는 다음과 같다. 계량된 배합수에 ACF를 담그어 각각 핸드믹서와 초음파 방식으로 30분간 분산시켰다. 그 이후 ACF가 포함된 배합수를 건비빔된 시멘트와 잔골재에 투여하여 모르타르 믹서기로 저속으로 2분간 비빔을 진행하였다. 모르타르 믹서 방법에서는 시멘트와 잔골재와 함께 ACF를 손으로 일정한 크기로 작게 떼어 넣고 저속으로 30분간 건비빔한 후 계량된 배합수를 넣어 믹싱하였다.

세 번째이자 마지막 단계에서는 섬유의 표면처리가 분산성에 미치는 영향을 판단하기 위하여 고성능 감수제가 사용된 시편과 산 처리된 ACF를 사용한 시편이 각각 제작되었다. ACF의 산 처리 과정은 다음과 같다. 105°C 에서 24시간 건조시킨 ACF를 40°C 의 산 용액으로 48시간동안 처리하였다. 산용액은 황산(H_2SO_4 , 98%), 질산(HNO_3 , 60%), 탈이온수를 1:8:7의 부피비로 섞어 만들며, 처리 시간 동안 마그네틱 바로 교반하였다. 산 처리 후 ACF를 탈이온수로 세척하여 80°C 에서 24시간 동안 건조하였다. 비교군으로 사용된 ACF의 경우도 동일한 과정으로 처리되되 산 용액 대신 동량의 탈이온수를 사용하였다. 상기 과정을 통해 산 처리된 ACF는 두 번째 단계에서 사용된 초음파 방식으로 분산하고 시편을 제작하였다. ACF 혼입량은 고성능 감수제가 첨가되지 않은 시편의 경우 시멘트 질량대비 0.294%가, 고성능 감수제가 첨가된 시편의 경우 0.265%가 사용되었다. 두 가지 경우에 ACF의 함량에 차이가 발생하였는데, 이는 ACF를 산 처리하는 도중의 손실 때문이다. 고성능 감수제는 물리적 분산방식과 산 처리 방식으로 제작한 모든 시편과의 비교를 목적으로 사용하여 각각 추가적으로 시편을 제작하였으며, 배합수에 시멘트 질량 대비 1.0%를 추가하여 사용되었다.

3.3 전기저항 측정

전기저항 측정은 모든 시편에 대하여 AASHTO TP 95-14에 제시된 방법에 따라 이루어졌다. 장비는 Four-point Wenner probe 방식의 Resipod사의 Proceq가 사용되었다. 본 장비는 AC 전류를 사용하여 표면전기저항을 측정하며, 사용된 전극의 간격은 38 mm이다. 모든 시편에 대하여 일정 재령일까지 전기 저항값을 측정하였고, 고성능 감수제를 사용한 일부 시편에 대하여 재령 1일에 측정이 불가능한 경우 재령 2일 또



Fig. 4 Picture of surface electrical resistivity test

는 3일에 첫 측정이 이루어졌다. 전기저항은 공극의 포화도와 밀접한 관계가 있으므로 모든 시편은 표면전기저항 측정 시점까지 수중양생이 이루어졌다. 각각의 시편은 전기저항 측정 직전 수조에서 꺼내어 표면의 물기를 가볍게 닦은 후 측정하였으며, 실험 후에는 다시 수조에 넣어 양생하였다. 전기저항 측정 과정에서 시편은 전도성이 없는 표면에 움직이지 않도록 고정하였다. 표면전기저항은 각각의 실린더 샘플을 대표할 수 있는 네 개의 위치에서 측정하여 평균하였다. 표면전기저항 측정 이미지는 Fig. 4와 같다.

4. 결과 및 고찰

제작한 시편의 전기저항 결과에 대해 나타내고 그 의미에 대해 서술하였다. 모든 전기저항 측정 값은 AASHTO TP 95-14의 석회수에서 수중양생 할 경우의 내용에 따라 1.1배 하여 보정하였다. 세 단계의 연구 방법에 따른 결과를 순차적으로 서술하고 통합적 의미에 대해 다루었다.

4.1 ACF의 침투 임계점 산정 및 적합성 평가

ACF-모르타르의 침투 임계점을 산정하기 위하여 시멘트 질량 대비 ACF 함량을 0.0%에서 2.0%까지 변화하여 시편을 제작하였다. 각 시편의 표면전기저항을 재령 28일까지 Four-point Wenner probe를 사용하여 측정하였고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

모든 시편에서 재령의 증가에 따라 전기저항이 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 3일 이하의 초기 재령에서 전기저항의 증가가 급격하며 재령이 증가할수록 증가율이 점차 완만해지는 경향을 보였다. 이것은 시멘트계 재료의 전기저항의 매우 일반적인 양상으로 타 연구에서도 확인할 수 있다.^{7,26)} 이는 수화반응이 진행됨에 따라 공극수의 양이 감소하고 공극구조가 치밀해지며 불연속적이 되면서 전류의 흐름이 방해 받기 때문이다.

한편, 2일 이상의 모든 재령에서 ACF의 함유량이 증가할수록 전기 저항성은 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 전도

성이 있는 섬유 함량이 증가할수록 전도성이 향상되었다. 이를 통하여 전류가 공극수를 통한 이온전도 방식뿐만 아니라 섬유활성탄을 통한 전자전도 방식으로도 함께 흐름을 알 수 있다. 또한 ACF의 함유량이 매우 적고 변동량이 작음에도 불구하고 안정적인 결과를 나타낸 것으로 보아 표면전기저항 측정법은 섬유의 분산성 평가 등에 유효하게 사용될 수 있다고 판단한다.

침투 임계점을 판단하기 위하여 Fig. 5의 ACF 1.0%와 2.0%의 전기저항 경향을 살펴보면 모든 재령에서 표준편차 범위가 겹침을 알 수 있다. 즉, ACF 함량이 1.0%를 넘어서면 섬유간의 연결성이 높아져 함량 증가에 따른 전기저항값의 감소가 크지 않음을 의미한다. 따라서 본 실험에 사용된 섬유의 경우 침투 임계점이 대략 1.0-2.0%정도에서 발생한다고 판단한다. 분산성을 평가하기 위해서는 침투임계점 이하의 섬유량을 사용해야 하므로 추후 진행된 분산성 실험에서는 섬유혼입 안정값인 0.5% 또는 그 이하의 섬유량을 사용하여 시편을 제작하였다.

실험 결과에 대하여 언급할 사항은, 건조상태의 ACF를 사용하여 시편을 제작하였다는 점이다. ACF는 믹싱 과정에서 다량의 수분을 흡수하므로 모르타르 내의 함량이 높아질수록 시멘트의 수화반응에 사용되는 유효 물시멘트비는 감소한다. 따라서 ACF의 함량이 높아질수록 시편의 공극구조가 더 치밀해지고 공극간 연결성이 떨어져 궁극적으로 전기저항이 높아질 것으로 예상된다. 이는 물시멘트비가 높아질수록 전기전도성이 높아진다는 Zhang et al. (1996)의 연구 결과에서도 확인할 수 있다.²⁷⁾ 그럼에도 불구하고 ACF의 함량이 2.0%까지 증가함에 따라 전기저항이 감소, 즉 전도성이 증가하였다. 이는 ACF 섬유를 통한 전자 전도의 증가가 공극수를 통한 이온 전도 감소량 보다 더 우세함을 의미한다. ACF의 높은 흡수성에 따른 물시멘트비를 보정한다면 ACF의 함유량 증가에 따른 전기 저항성은 더 큰 폭으로 감소할 것으로 예상되며, 침투 임계점 또한 더 높은 지점에서 발생할 것으로 예상된다. 따라서 이후 실험에서 시멘트 질량 대비 섬유량 0.5% 또는 그 이하 사용은 적절하다고 판단된다. 또한 본 실험의 결과, 표면전기저항값은 편차가 크지 않고 재령에 따른 경향이 바뀌지 않아 정성적, 정량적 평가가 가능함을 확인하였다. 이것은 표면전기저항법의 장점으로, 초기 재령에서도 분산성의 측정이 가능하며 쉽고 빠르게 결과를 얻을 수 있다. 따라서 추후 분산성 평가에서는 재령 14일 까지만의 전기저항값을 제시하였다.

4.2 물리적 분산 방법에 따른 분산성 평가

핸드믹서 방법(Hand Mixer, HM), 모르타르 믹서 방법(Mortar Mixer, MM), 초음파 처리 방법(Ultrasonication, Ultra)의 세가지 물리적 분산/믹싱 방법에 따라 ACF를 분산하고 믹싱하여 모르타르 시편을 제작하였고 표면전기저항을 14일간 측정하였다. 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

전기저항 결과 곡선은 예상대로 Fig. 5와 유사한 경향, 즉

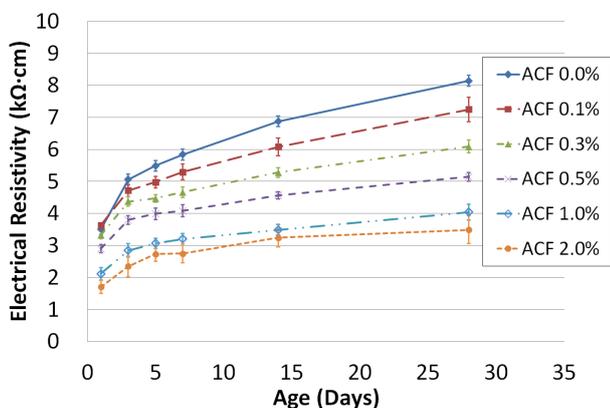


Fig. 5 Electrical resistivity of 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, and 2.0% ACF containing mortar samples

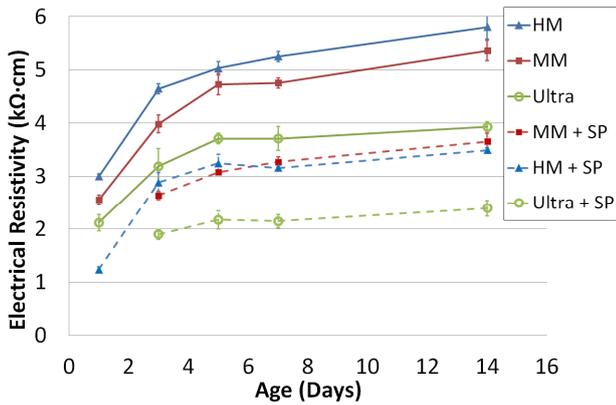


Fig. 6 Electrical resistivity of mortar samples prepared using different physical mixing method (HM: Hand mixer, MM: Mortar mixer, Ultra: Ultrasonication, SP: Superplasticizer)

재령에 따라 증가하는 경향을 보였다. 고성능 감수제가 사용되지 않은 경우의 믹싱 방법 별 차이를 살펴보면, 핸드믹서를 사용하였을 때 가장 높은 전기저항 값을 보였고 초음파 분산을 하였을 때 가장 낮은 전기저항 값을 보였으며 몰탈 믹서를 사용할 때는 그 사이의 값을 보였다. 즉, 초음파 분산 방식이 ACF의 분산에 가장 우수한 것으로 판단된다. SP가 사용된 경우의 결과에서도 역시 초음파 분산 방식에서 가장 낮은 전기저항을 나타내어 초음파 분산 방식이 ACF의 분산에 가장 효과적임을 알 수 있다. SP가 사용된 경우 핸드믹서와 몰탈 믹서의 전기저항은 비슷한 결과값을 나타내어 ACF의 분산 정도가 유사하다고 판단된다. 또한 SP의 사용 여부와 관계 없이 초음파 분산 방식의 전기저항이 다른 두 가지의 방식에 비하여 월등히 낮음을 보인다. 따라서, SP의 사용과 무관하게 초음파 분산 방식이 가장 효과적인 물리적 분산 방법이라고 판단된다. 또한, 이 실험을 통하여 표면전기저항 측정 방법으로 믹싱 방법에 따른 섬유 분산의 비교가 간단하고 정확하게 판단할 수 있음을 알 수 있다. 본 실험에 사용된 시편을 사용하여 파괴 단면에 대한 육안 관찰이 시행되었다. 그러나 사용 섬유의 지름이 10 μm로 매우 작고 믹싱 과정에서 시멘트 페이스트로 코팅되어 있어서 개별섬유의 식별이 불가능하였다. 따라서 이와 같은 microfiber의 경우 이미지 분석을 이용한 시멘트계 재료 내의 섬유 분산성 판단은 한계가 있음을 알 수 있으며, 전기저항측정 방법 등의 간접 방법이 효과적임을 알 수 있다.

4.3 표면 처리에 따른 분산성 평가

세 번째 단계로 고성능 감수제와 산 처리가 섬유의 분산성에 미치는 영향을 전기저항 방법으로 평가하였다. 고성능 감수제를 사용한 시편(점선)과 그렇지 않은 시편(실선)의 전기저항을 Figs. 6과 7에서 비교할 수 있다.

Fig. 6을 살펴보면, SP를 사용하였을 때에 모든 믹싱 방법들에서 전기저항 값이 큰 폭으로 하락하였다. 전기저항 수치가 HM, MM, 그리고 Ultra의 경우 각각 39.8%, 31.8%, 39.2%

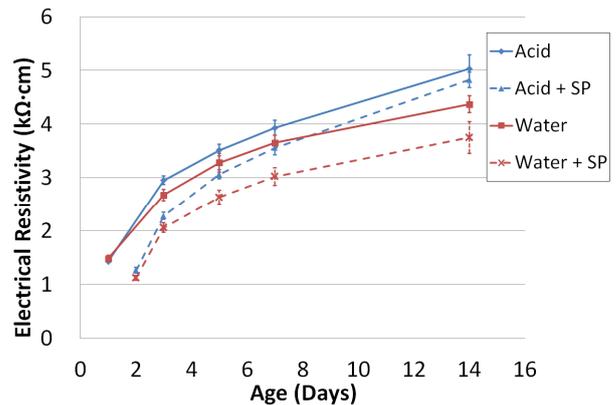


Fig. 7 Electrical resistivity of mortar samples prepared using acid and deionized water

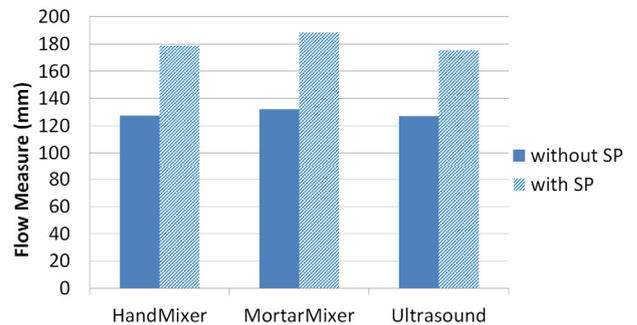


Fig. 8 Flow measure of the mortar with and without superplasticizer

씩 하락하였다. Fig. 7의 경우에도 하락 폭은 적으나 SP의 사용으로 전기저항값이 하락하였다. 특히, Fig. 7의 경우 SP가 사용된 시편에 더 적은 양의 ACF가 사용되었는데, 일반적으로 적은 양의 전도성 섬유가 포함된 시편에서 더 높은 전기저항을 예상할 수 있음에도 불구하고 전기 저항이 오히려 하락하였다. 이것은 SP의 영향이라고 판단된다. 만약 같은 양의 ACF가 사용되었다면 전기저항값의 하락 폭은 더 클 것으로 예상된다.

폴리카르보나계 고성능 감수제가 시멘트풀에 작용하였을 경우 일반적으로 시멘트 입자의 균질한 분산을 유도하여 공극 구조의 개선 효과가 있다.^{28,29)} 따라서 치밀한 공극구조로 인하여 더 높은 전기저항값이 기대된다. 그러나 SP의 사용이 결과적으로 더 낮은 전기저항값을 나타내었는데, 이것은 곧 섬유의 분산성이 향상되었음을 의미한다. 즉, 섬유를 통한 전자 전도에 의한 전류량이 공극 구조 개선 효과로 인한 전류 감소량 보다 크다는 것을 의미한다. SP를 첨가한 대다수의 시편의 경우 재령 1일에 전기저항 측정이 불가하였는데, 이는 카르보나계 고성능 감수제의 응결 지연 효과 때문이라고 판단된다.²⁸⁾

이때, SP에 의한 섬유 분산성 향상의 메커니즘을 두 가지로 생각해볼 수 있다. 첫 번째로, 고성능 감수제가 직접적으로 ACF의 친수성을 향상시켜 섬유의 분산성을 향상시키는 것이고, 두 번째로 모르타르의 유동성 향상으로 작업성이 개선되어 간접적으로 섬유의 분산성이 향상되는 것이다. 이에,

SP의 사용에 따른 유동성의 변화가 전기저항에 미치는 영향에 대해 알아보기 위하여 모르타르 흐름 시험을 실시하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

실험 결과, 예상과 같이 고성능 감수제를 사용한 경우 세 가지 믹싱방법 모두 모르타르의 유동성이 대폭 향상됨을 알 수 있다. 모르타르의 유동성과 전기저항과의 상관관계를 살펴보기 위해 Figs. 8과 6을 비교하였다. 각 믹싱 방법별로 비교해보면 고성능 감수제의 첨가로 인한 유동성 향상과 전기저항성간에 상관관계가 있다고 판단할 수 있다. 그러나 유동성 결과만으로 설명되지 않는 부분이 존재한다. 예를 들어, “HM”과 “Ultra” 사이의 유동성 차이는 미미한데 반해 Fig. 6에서 둘 사이의 전기저항값의 차이가 상당량 발생하였다. 또한 “Ultra”와 “MM+SP” 사이의 유동성 차이는 상당량 발생한 것에 비하여 전기저항값의 차이는 크지 않다. 전자의 경우 섬유 분산 정도가 믹싱 방법에 따라 크게 차이가 남을 알 수 있고, 후자의 경우 유동성의 증가가 더 높은 분산성과 연결되지 못함을 의미한다. 따라서 고성능 감수제를 사용함에 따른 유동성의 증가는 섬유의 분산성 향상에 큰 영향이 없다고 판단되며, 고성능 감수제가 섬유에 직접적으로 작용하여 섬유의 친수성을 증가시키고, 이에 따라 섬유의 직접적인 분산 작용에 기여했다고 판단된다. 따라서 SP의 사용은 시멘트뿐 아니라 ACF에도 유효하게 작용하여 분산성을 향상시키는 효과가 있으며, 전체적으로 콘크리트의 워커빌리티와 섬유의 분산성을 동시에 개선할 수 있다고 판단된다.

한편 ACF를 산 처리 하였을 때의 결과는 Fig. 7에 제시하였다. 고성능 감수제의 사용에 관계없이 산 처리를 하였을 때에 더 높은 전기저항값을 나타내었다. 산 성분이 충분히 세척되었다고 가정할 때 이것은 두 가지의 가능성을 내포하는데, 산 처리로 인한 표면의 변화로 1) ACF의 전도성이 감소하였을 가능성과 2) 일반적인 산 처리 경우와 달리 분산성이 감소하였을 가능성이 있다. ACF의 주요 구성 물질이 탄소임을 생각할 때 전기전도성의 감소는 크지 않을 것으로 생각되며 섬유의 분산성 감소가 전기저항값 상승의 원인이라고 판단된다. 그러나 고성능 감수제를 사용하지 않은 산 처리 시편의 재령 14일 전기저항값(5.03 kΩ·cm)을 Fig. 5의 “ACF 0.0%”의 재령 14일 전기저항값(6.88 kΩ·cm)과 비교해 볼 때, 산 처리로 인한 전기저항의 증가는 ACF 섬유의 첨가(약 0.3%)로 인한 전기저항 감소를 상쇄하지 못하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

표면전기저항 측정을 통하여 전도성 섬유인 섬유활성탄의 모르타르 내 분산성을 평가하였다. 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 표면전기저항은 ACF의 함유량이 시멘트 질량대비 2.0%까지 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었고, 이를 통하여 ACF를 통한 전자 전도량이 증가함을 알 수 있다. 사용된 ACF의 경우 침투임계점은 1.0-2.0%

정도로 판단되며 이후 시험에서 침투임계점 이하인 0.5% 또는 그 이하의 섬유량이 사용되었다.

- 2) ACF의 물리적 믹싱 방법에 따라 표면전기저항의 차이를 보였으며, 이것은 곧 분산성의 차이라고 판단된다. 실험에 사용된 핸드믹서 방법, 초음파 처리 방법, 모르타르 믹서 방법 중 초음파 처리 방법이 가장 우수한 분산성을 나타내었다.
- 3) 표면전기저항 측정 방법을 통하여 전도성 섬유의 분산 정도를 비교적 초기 재령, 즉 재령 7일 이내에 판단할 수 있으며, 쉽고 빠르게 정량적 결과를 얻을 수 있다. 이미지 분석법을 적용하기 어려운 마이크로 섬유 경우 본 방법의 사용이 권장된다.
- 4) 고성능 감수제의 사용은 ACF의 모르타르 내 분산성을 더욱 향상시킨다. 고성능 감수제는 ACF 섬유의 친수성을 증가시켜 섬유를 직접적으로 분산하는 방식으로 작용한다. 그러나 산 처리된 ACF의 경우 시편의 전기저항이 증가하였고, 섬유의 분산성의 감소가 원인이라고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2014-R1A1A3051777).

References

1. Samir, A. A. and Faisal, F. W., “Flexural behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams”, *Structural Journal*, Vol. 90, No. 3, 1993, pp. 279-287.
2. Oh, B. H., “Flexural analysis of reinforced concrete beams containing steel fibers”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 10, 1992, pp. 2921-2836.
3. Kang, S. -T., Kim, Y. -Y., Lee, B. -Y., and Kim, J. -K., “Fiber orientation impacts on the flexural behavior of steel fiber reinforced high strength concrete”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 6, 2008, pp. 731-739.
4. Kim, S. -H., Kwon, B. -U., and Kang, T. H. -K., “Seismic performance assessment of roof-level joints with steel fiber-reinforced high-strength concrete”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 28, No. 2, 2016, pp. 235-244.
5. Banthia, N., and Gupta, R., “Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 7, 2006, pp. 1263-1267.
6. Mechtcherine, V., Dudziak, L., and Schulze, J., “Internal curing by super absorbent polymers (SAP)—Effects on material properties of self-compacting fibre-reinforced high performance concrete”, *Int RILEM Conf on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*, Lyngby, Denmark, 2006, pp. 87-96.

7. Nadelman, E., and Kurtis, K. "A resistivity-based approach to optimizing concrete performance", *Concrete International*, Vol. 36, No. 5, 2014, pp. 50-54.
8. Sherif, Y., and Christopher, Y. T., "Conductive concrete overlay for bridge deck deicing", *Materials Journal*, Vol. 96, No. 3, 1999, pp. 382-390.
9. Whittington, H., McCarter, J., and Forde, M., "The conduction of electricity through concrete", *Magazine of concrete research*, Vol. 33, No. 114, 1981, pp. 48-60.
10. Chen, P. -W., and Chung, D. D., "Carbon fiber reinforced concrete for smart structures capable of non-destructive flaw detection", *Smart Materials and Structures*, Vol. 2, No. 1, 1993, pp. 22-30.
11. Akkaya, Y., Picka, J., and Shah, S. P., "Spatial distribution of aligned short fibers in cement composites", *Journal of materials in civil engineering*, Vol. 12, No. 3, 2000, pp. 272-279.
12. Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., and Shah, S. P., "Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 7, 2010, pp. 1052-1059.
13. Fu, X., Lu, W., and Chung, D. D. L., "Ozone treatment of carbon fiber for reinforcing cement", *Carbon*, Vol. 36, No. 9, 1998, pp. 1337-1345.
14. Chung, D., "Dispersion of short fibers in cement", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 4, 2005, pp. 379-383.
15. Chermant, J. -L., Chermant, L., Coster, M., Dequiedt, A. -S., and Redon, C., "Some fields of applications of automatic image analysis in civil engineering", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, No. 2, 2001, pp. 157-169.
16. Akkaya, Y., Shah, S.P., and Ankenman, B., "Effect of fiber dispersion on multiple cracking of cement composites", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127, No. 4, 2001, pp. 311-316.
17. Kim, J. -K., Kim, J. -S., Ha, G. J., and Kim, Y. Y., "Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 7, 2007, pp. 1096-1105.
18. Woo, L. Y., Wansom, S., Ozyurt, N., Mu, B., Shah, S. P., and Mason, T. O., "Characterizing fiber dispersion in cement composites using AC-Impedance spectroscopy", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 6, 2005, pp. 627-636.
19. Xie, P., and J. J., Beaudoin, "Electrically conductive concrete and its application in deicing", *ACI Special Publication*, Vol. 154, 1995, pp. 399-418.
20. Wu, T., Huang, R., Chi, M., and Weng, T., "A study on electrical and thermal properties of conductive concrete", *Computers and Concrete*, Vol. 12, No. 3, 2013, pp. 337-349.
21. Sun, M., Li, Z., Mao, Q., and Shen, D., "Study on the hole conduction phenomenon in carbon fiber-reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 4, 1998, pp. 549-554.
22. Polder, R. B., "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete-a RILEM TC-154 technical recommendation", *Construction and Building Materials*, Vol. 15, No. 2, 2001, pp. 125-131.
23. Fu, X., and Chung, D., "Improving the bond strength of concrete to reinforcement by adding methylcellulose to concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 95, 1998, pp. 601-608.
24. Xu, Y., and Chung, D., "Cement-based materials improved by surface-treated admixtures", *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 3, 2000, pp. 333-342.
25. Yu, X., and Kwon, E. "A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties", *Smart Materials & Structures*, Vol. 18, No. 5, 2009, pp. 1-5.
26. Sengul, O., and Gjorv, O. E., "Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction", *ACI Materials Journal*, Vol. 105, No. 6, 2008, pp. 541-547.
27. Zhang, X., Ding, X. Z., Ong, C. K., Tan, B. T. G., and Yang, J., "Dielectric and electrical properties of ordinary Portland cement and slag cement in the early hydration period", *Journal of Materials Science*, Vol. 31, No. 5, 1996, pp. 1345-1352.
28. Puertas, F., Santos, H., Palacios, M., and Martinez-Ramirez, S., "Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes", *Advances in Cement Research*, Vol. 17, No. 2, 2005, pp. 77-89.
29. Miao, C., Tian, Q., Ran, Q., and Liu, J., "Influence of polycarboxylate-based superplasticizer on the microstructure of concrete", *1st international conference on microstructure related durability of cementitious composites*, Nanjing, China, 2008, pp. 13-15.

요 약 시멘트계 재료의 성능을 개선시키기 위하여 다양한 섬유가 사용되고 있다. 이때, 섬유 사용 목적에 관계없이 섬유의 분산성은 목표로 하는 성능 개선에 매우 중요한 지표이다. 본 연구에서는 모르타르 내의 섬유활성탄의 분산을 전기저항 방법으로 평가하였다. 특히, 믹싱 방법과 섬유의 표면 처리에 따른 섬유 분산성의 차이가 다루어졌다. 연구 결과 표면전기저항 방법은 섬유활성탄의 분산성을 평가하는데 적합하였고, 초음파 방식의 분산 방법이 몰탈믹서와 핸드믹서 방법에 비하여 우월한 것으로 나타났다. 고성능 감수제는 섬유의 분산성을 향상하는 효과가 있었으나 산 처리는 전기저항성을 높이는 결과를 가져왔다.

핵심용어 : 분산성, 전기저항, 웨너프로브, 섬유활성탄, 산 처리