

PAN계 탄소섬유 강화 종이의 물리적 특성 및 전기전도도

장 준 · 이창호 · 박관호 · 유승곤[†]

충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 궁동 220
(2006년 6월 15일 접수, 2006년 8월 11일 채택)

Physical Properties and Electrical Conductivity of PAN-based Carbon Fiber Reinforced Paper

Joon Jang, Chang-Ho Lee, Kwan-Ho Park and Seung-Kon Ryu[†]

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, 220, Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea
(Received 15 June 2006; accepted 11 August 2006)

요 약

폴리아크릴로니트릴(PAN)계 탄소섬유와 목재펄프를 이용하여 탄소섬유의 길이와 함량 및 강화 종이의 평량을 달리 하여 각각 탄소섬유 강화 종이를 제조한 후 탄소섬유와 펄프섬유의 접착특성 및 강화 종이의 물리적 특성과 전기전도도를 조사하였다. 탄소섬유 강화 종이의 형성은 탄소섬유와 펄프섬유의 계면에서의 화학적 결합이라기보다는 물리적인 얽힘과 접착이었으며, 탄소섬유의 첨가량을 증가시키면 강화 종이의 두께와 인열강도는 증가하는 반면 인장강도와 파열강도는 감소하였다. 탄소섬유의 길이가 짧을수록 강화 종이 내에서 섬유의 분산성이 양호하였으나 가장 우수한 전기전도도는 탄소섬유의 길이가 10 mm일 때였다. 강화 종이의 전기전도도는 탄소섬유의 함량이 2 wt% 일 때부터 급격히 증가하다가 8 wt% 이상이 되면 서서히 증가하는 S자형 곡선을 보였으며, 강화 종이의 평량 증가에 따라 선형적으로 비례하여 향상되었다. 따라서, 전기전도도와 물리적 특성이 우수한 강화 종이를 얻기 위해서는 탄소섬유의 함량을 증가시킴과 동시에 평량을 증가시키는 것이 바람직하다.

Abstract – Carbon fiber (CF) reinforced papers using polyacrylonitrile (PAN) based CF and wood pulp were prepared by varying the lengths and the concentrations of CF, and the basis weight of paper to investigate adhesive state between CF and pulp, and physical properties and electrical conductivity of the paper. The reinforcement was caused by physical entanglement and adhesion at the interface of the different fibers rather than by chemical bonds. The tear strength and the thickness of the paper increased as increasing the concentration of CF, while the tensile and the burst strength of the paper decreased. The improved dispersion of CF in the paper was obtained from mixing shorter CF, but the maximum electrical conductivity of the paper was gained from mixing 10 mm chopped CF. The electrical conductivity of the paper increased sharply from 2 wt% to 8 wt% of CF showing S-curve, and increased linearly as increasing the basis weight of the paper. Therefore, in order to improve the electrical conductivity and the physical property of the paper, the increase of basis weight of the paper is also important as the increase of CF content in the paper.

Key words: PAN-based Carbon Fiber, Reinforced Paper, Physical Property, Electrical Conductivity

1. 서 론

탄소섬유는 내열성, 화학적 안정성, 전기전도성, 전자파 차폐성, 생체 친화성, 유연성 등 다양하게 우수한 특징을 갖고 있어 여러 산업분야에 폭 넓은 응용이 가능하다. 특히, 우수한 전기전도성은 면상발열체 및 전자파 흡수재료 분야의 새로운 응용성을 제시하고 있다. 탄소섬유를 첨가한 탄소섬유 강화 복합체는 사용목적에 따라 결합재를 달리하며, 제조방법에 따라 다양한 전기전도도를 갖는 신소

재를 제조할 수 있다. 탄소섬유 강화 복합체에서 결합재로 가장 많이 사용된 것은 플라스틱[1, 2]이나, 고무[3, 4], 시멘트[5, 6]도 그 사용량이 증가하고 있으며 근래에는 펄프[7-10]를 결합재로 응용하는 연구가 활발해지고 있다. 펄프를 이용한 탄소섬유 강화 복합체는 면상발열체, 대전방지재, 전자파 차폐재, 센서 재료, 전자재료 및 기기의 포장재 등으로 사용이 가능하다. 탄소섬유 강화 종이는 사용 목적에 따라 제조조건과 방법이 다르며 그에 따른 물리적 특성과 전기전도도가 달라진다. 그러나 탄소섬유 강화 종이는 손쉽게 공업 제품으로 응용되는 장점에 비하여 제조조건에 따른 물리적 특성이 거의 보고되고 있지 않다. 본 연구팀은 이전의 연구[9]에서 5 mm 길

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: skryu@cnu.ac.kr

이의 피치(pitch)계 탄소섬유 및 활성탄소섬유를 첨가하여 제조한 강화 종이의 전기전도도 및 표면온도를 고찰한 바 있으나 전구체가 다른 탄소섬유 및 물리적 특성 등에 대한 연구를 하지 못하였다.

그러므로, 본 연구는 탄소섬유 중 전기전도성이 가장 우수한 폴리아크릴로니트릴(polyacrylonitrile, PAN)계 탄소섬유를 사용하여 탄소섬유 길이별, 함량별, 그리고 종이의 평량별로 강화 종이를 제조한 후, 그에 따른 탄소섬유와 목재펄프의 접착특성 및 강화 종이의 물리적 특성과 전기전도도를 조사하는데 목적이 있다.

2. 실험

2-1. 재료

본 실험에서 보강재로 사용한 탄소섬유는 PAN계 탄소섬유(taekwang industrial Co., Korea)이며 물성은 Table 1과 같다. 탄소섬유는 실험에 사용하기 전에 일정 길이로 절단하고 전기로에서 2°C/min 속도로 300°C까지 승온시켜 3 h 동안 유지하여 먼지 등의 불순물을 제거한 후 상온에서 냉각시키고 증류수로 세척, 건조하여 사용하였다. 결합재로 사용한 목재펄프는 침엽수표백크라프트펄프(nadelholz bleached kraft pulp, NBKP, Stora-Enso Co., Finland-Sweden)이며 물성은 Table 2에 제시한 바와 같다. 본 실험에서는 탄소섬유와 목재펄프만으로 종이를 제조하여 제조조건에 따른 특성을 고찰하기 위한 것으로, 종이의 지력증강이나 물성을 향상시키기 위한 충전제, 사이징제, 첨가제 등은 사용하지 않았다.

2-2. 방법

탄소섬유 강화 종이의 제조공정은 이전의 시험방법[9]과 같다. 목재펄프를 물 속에서 2 h 침지시킨 후 고해기(PEI Mill, Sweden)를 이용하여 고해도가 60° SR이 될 때까지 고해하였다. 고해과정을 거친 목재펄프의 무게를 정량한 후 일정한 길이로 절단한 탄소섬유의 중량을 달리하여 첨가하고 교반기에서 1,200 rpm으로 30 min간 교반하였다. 교반된 지료로 수초지(handsheet machine, TMI Co.)를 만들고, 카우칭, 제1프레싱, 제2프레싱 한 후, 105°C에서 30 min간 건조하여 제조하였다. 이렇게 제조된 종이의 면적(m²) 당 무게(g)를 평량(basis weight, BW)이라 하며 본 실험에서는 강화 종이의 평량이 각각 60, 70, 80, 90 g/m²이 되도록 제조하였다.

2-3. 분석

탄소섬유와 목재펄프의 접착특성은 주사전자현미경(S-3200N, Hitachi Co., Japan)을 사용하여 관찰하였으며, 탄소섬유가 첨가된

Table 1. Characteristics of carbon fiber (CF)

Type	Diameter (μm)	Specific density (g/cm ³)	Electrical conductivity (S/cm)
PAN based CF*	6.8	1.78	588

*T300 supplied by Taekwang Industrial Co.

Table 2. Characteristics of pulp

Pulp	Specific gravity (g/cm ³)	Brightness (%)	Ether extractives (%)	Ash contents (%)
NBKP	0.55	90.2	0.50	0.21

경우와 첨가되지 않은 경우의 열분해 현상을 관찰하기 위하여는 열분석기(Labsys TG-DTA16, Setaram Co.)를 사용하여 질소분위기에서 5°C/min 속도로 승온시키면서 측정하였다. 또한, 강화 종이의 기공도는 ISO[11] 규격에 따라 기공도 측정기(model 6 no. 4891, Anseson & Sorensen Co., Denmark)를 사용하여 측정하였다. 강화 종이 내 탄소섬유의 분산성은 제조된 종이에 광을 투과하고 그 이면을 스캐너(Duoscan, Agpa Co.)를 사용하여 관찰하였다.

강화 종이의 두께는 마이크로미터기(model 2046F, Mitutoyo Co., Japan)를 사용하여 10회 측정치의 평균으로 구하였다. 강화 종이의 물리적 특성을 알아보기 위하여 인장강도, 인열강도 및 파열강도를 Tappi 규격(T 220 om-88)에 따라 각각 인장강도 시험기(model no. N10.25, Zwick Co.), 인열강도 시험기(thwing albert instrument Co.), 파열강도 시험기(L&W Co.)를 사용하여 측정하였으며 아래의 식들을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Tensile index (N-m/g)} = \frac{\text{Tensile break load (kg on a 15 mm strip)}}{\text{Mass per unit area (g/m}^2\text{)}} \times 653.8 \quad (1)$$

$$\text{Tear index (mN-m}^2\text{/g)} = \frac{\text{Force to tear a single sheet (g)}}{\text{Mass per unit area (g/m}^2\text{)}} \times 9.807 \quad (2)$$

$$\text{Burst index (kPa-m}^2\text{/g)} = \frac{\text{Bursting strength (kPa)}}{\text{Mass per unit area (g/m}^2\text{)}} \quad (3)$$

전기전도성 종이의 전기 저항이나 전도도를 측정하는 표준방법이 아직 소개되어 있지 않으므로 본 연구에서는 이전의[9] 실험방법과 같이 120×15 mm의 시편을 만들고, 양 끝에 10 mm 폭으로 silver paste (P-255, Okenshoji Co., Japan)를 코팅한 후 항온항습실(23±3°C, RH 55±5%)에서 정밀 전기저항 테스터(HP 4338A, USA)로 전기저항을 측정하였으며, 전기전도도는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma(\text{S/cm}) = \frac{s}{wt} \times \frac{1}{R} \quad (4)$$

여기서 s는 단자간의 거리(cm), t와 w는 각각 시편의 두께(cm)와 폭(cm), R은 전기저항(Ω)을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 탄소섬유와 펄프섬유의 접착 특성

Fig. 1과 Fig. 2는 탄소섬유 강화 종이 내에서 탄소섬유와 펄프섬유간 접착상태를 관찰하기 위한 SEM 사진이다. 표면이 매끈하고 지름이 균일한 섬유가 탄소섬유이고, 표면이 거칠고 납작한 형태의 섬유가 펄프이다. 종이 제조과정 중 탄소섬유는 형태가 변하지 않았으나 목재펄프는 고해과정을 거치는 동안 표면에 무수한 미세섬유가 발달하여 있음을 관찰할 수 있다. 탄소섬유 강화 종이가 우수한 물리적 특성을 갖게 하기 위해서는 탄소섬유와 펄프섬유간 응력을 전달하기에 충분한 강도로 상호접착이 잘 되어야 한다. 그러나, 탄화나 흑연화 공정을 거친 탄소섬유의 표면은 방향족 육각평면으로 덮여있기 때문에 펄프섬유와의 접착성이 부족하다[12]. 목재펄프는 접착제가 없어도 펄프 자체가 가지고 있는 수산기가 많아 펄프 섬유 사이에 비교적 강한 수소결합을 하는 것으로 알려져 있다[13, 14]. 물론 탄소섬유의 표면에도 약간의 수산기, 카르복실기와 카르보닐

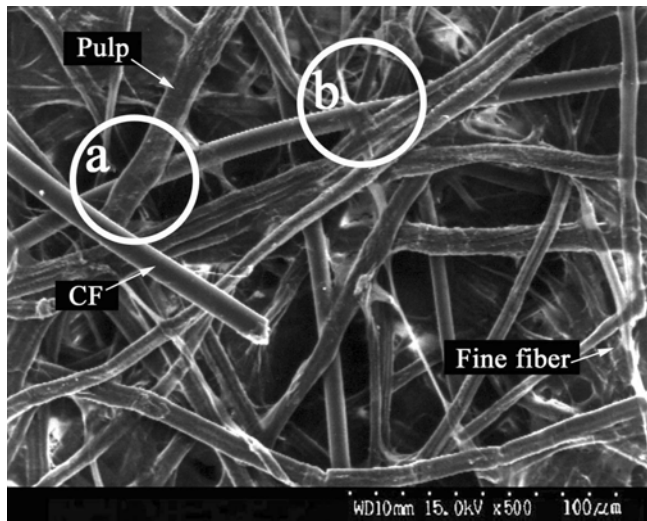


Fig. 1. SEM micrograph of carbon fiber reinforced paper (CF : 10 wt%, Basis weight : 80 g/m²) : (a)cross-adhesion, (b)the adhesion of residual stress.

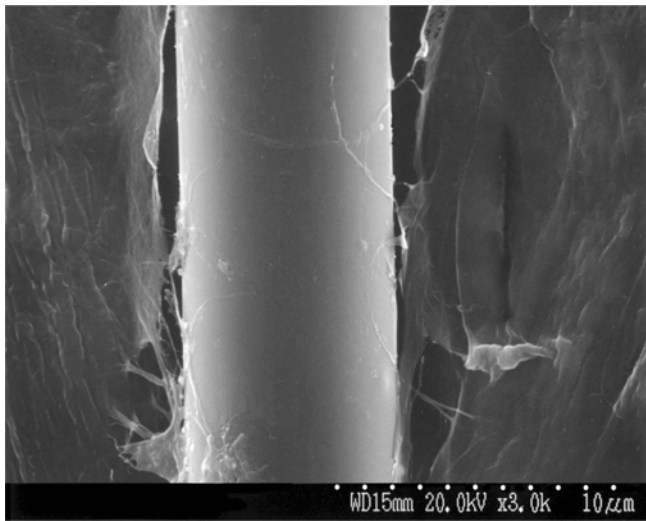


Fig. 2. SEM micrograph of carbon fiber reinforced paper.

기 등이 있으나[15], 펄프섬유가 가지고 있는 것 보다 훨씬 적다. 따라서, 탄소섬유와 펄프섬유의 계면에서는 수소결합 등의 화학적 결합보다는 접착 즉 탄소섬유에 펄프섬유가 단순히 얹힌 물리적 결합에 따른 이중섬유간 계면에서의 교차 접착(Fig. 1의 a)과 강화 종이를 제조할 때 습윤상태의 펄프섬유가 건조과정을 거치면서 펄프섬유의 수축에 의하여 이중 섬유간의 계면층에 응력이 잔류되어 형성된 응력 접착(Fig. 1의 b와 Fig. 2)이라고 판단된다.

Fig. 3은 탄소섬유를 첨가하지 않은 종이와 탄소섬유를 10 wt% 첨가한 강화 종이의 질소 분위기에서의 열분석 결과이며, 30 wt% 강화 종이에 대한 자료는 이전의 결과를 인용한 것이다. 각각의 시료에서 강화 종이의 열분해가 시작되는 온도는 탄소섬유 함량이 증가함에 따라 상승함을 알 수 있다. 그러나 펄프가 완전히 열분해되는 온도는 약 350 °C로서 서로 일치하였다. 한편, 본격적인 열분해가 발생하기 이전의 온도 즉 50~300 °C에서의 중량감소는 탄소섬

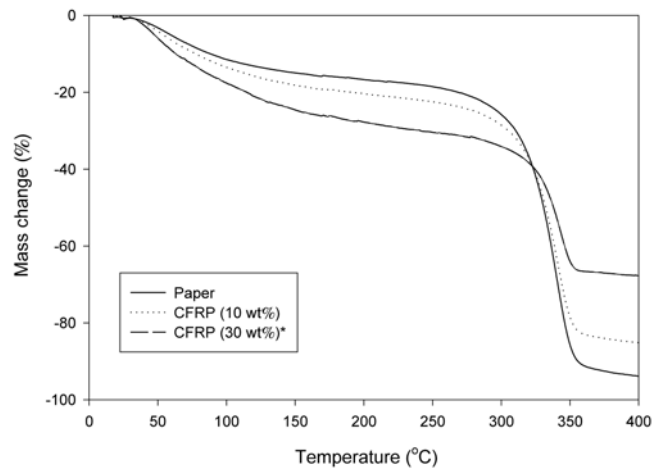


Fig. 3. TG curves of carbon fiber reinforced paper.

*previous work data [9].

유의 함량에 비례함을 알 수 있다. 탄소섬유는 약 1000 °C의 탄화 공정을 거쳐 생산되었으므로 350 °C 이후에서도 거의 중량변화를 보이지 않는다. 그러므로 350 °C 이전의 중량감소는 펄프의 열분해 즉 탈수, 탈중합, 분해, 축합(이차 중합) 등에 의하여 발생하지만 탄소섬유의 첨가에 의하여 더 큰 중량변화를 보이는 것은 탄소섬유가 펄프섬유간의 수소결합 부위를 감소시키며 또한 탄소섬유의 열전달 가속이 열분해를 촉진시켰기 때문으로 판단된다. 이전[9]의 연구에서도 탄소섬유를 많이 첨가할수록 350 °C 이전에서 더 큰 중량감소를 나타내었다. 350 °C 이후는 열에 안정한 물질이 잔류하는데 첨가된 탄소섬유량 보다 많은 것은 펄프로부터의 잔류량이 추가되었기 때문이다.

Fig. 4는 탄소섬유 함량에 따라 강화 종이 치밀하게 형성된 정도를 알아보기 위하여 기공도를 측정된 결과이다. 종이의 기공도는 공기를 종이의 단위면적에 일정 유량으로 유입시켜 일정시간 동안 빠져나가는 공기의 양을 측정한 것이다. 탄소섬유를 함유하지 않는 종이의 기공도는 약 1000 ml/min이었으며, 탄소섬유의 함량이 증가함에 따라 기공도가 선형적으로 증가하였다. 이러한 증가의 원인은

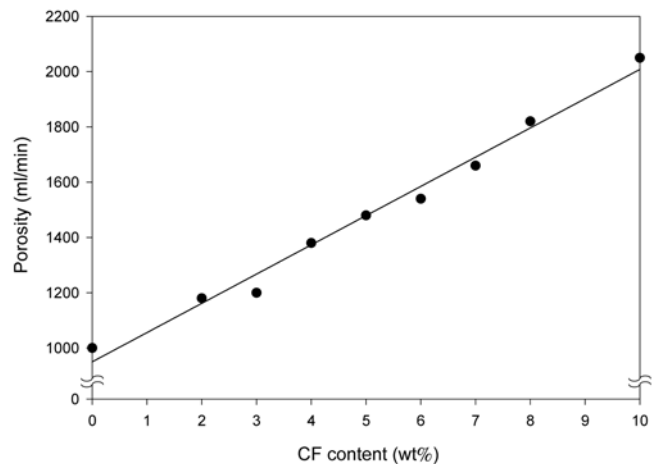


Fig. 4. Porosity of carbon fiber reinforced papers with respect to carbon fiber content (CF length : 10 mm, Basis weight : 80 g/m²).

Table 3. Characteristics of carbon fiber reinforced paper

CF length (mm)	CF content (wt%)	Basis weight (g/m ²)	Thickness (μm)
5	5	80	239
10	"	"	246
15	"	"	241
20	"	"	245
10	2	80	231
"	4	"	237
"	5	"	246
"	6	"	247
"	7	"	250
"	8	"	251
"	10	"	257
10	5	60	225
"	"	70	235
"	"	80	246
"	"	90	272

다음과 같다. 즉, 탄소섬유 강화 종이 내에서 펄프섬유는 강도가 약하므로 압착에 의하여 다양하게 변형되며 탄소섬유와 접착하나 탄소섬유는 원형을 그대로 유지하고 있다. 따라서, 강화 종이 내 탄소섬유의 함량이 증가함에 따라 펄프섬유간 수소결합은 감소하고 Table 3에 제시된 바와 같이 종이의 두께가 증가하였다. 동일 평량에서 두께의 증가는 밀도의 감소로 공극이 넓어져 결국 탄소섬유 강화 종이의 기공도가 증가하였다.

3-2. 탄소섬유 강화 종이의 물리적 특성

인장강도는 종이의 가장 기본적인 물리적 특성으로서 종이의 다른 여러 가지 물리적 성질을 이해하는데 도움이 된다. 파열강도는 많이 측정되에도 불구하고 종이의 여러 가지 복합적인 물리적 성질의 표현이므로 그 유용성이 매우 제한되나, 포장재 등으로 이용에 있어 터짐에 대한 물리적 강도를 파악하는데 특히 유용하다. 인열강도는 섬유장, 밀도 및 종이의 평량에 따라 달라지며 섬유의 길이가 증가할수록 함께 증가하는 특성이 있다[16].

Fig. 5는 강화 종이 내에서 탄소섬유의 길이에 따른 물리적 강도를 측정한 것이다. 탄소섬유의 길이가 길수록 인열강도와 파열강도는 감소하였으나 인장강도는 탄소섬유의 길이가 10 mm 일 때 최

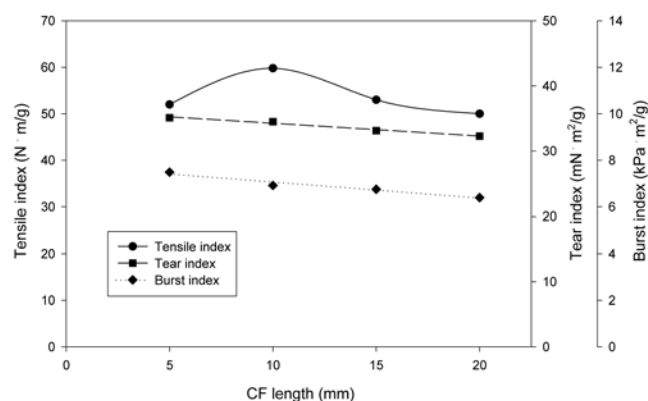


Fig. 5. Physical properties of carbon fiber reinforced paper with respect to carbon fiber length (CF : 5 wt%, Basis weight : 80 g/m²).

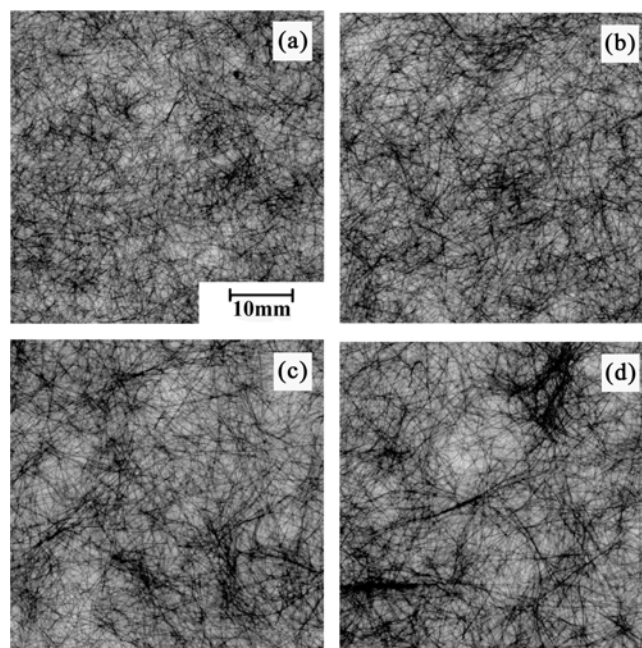


Fig. 6. Distribution of carbon fiber reinforced paper in different carbon fiber length (CF : 5 wt%, Basis weight : 80 g/m²) : (a) 5 mm, (b) 10 mm, (c) 15 mm, (d) 20 mm.

대치를 보이다가 다시 감소하였다. Fig. 6은 탄소섬유 강화종이 내에서 탄소섬유의 길이변화에 따른 분산성을 조사한 것으로 스캐너로 종이의 이면에 빛을 비추어 스캔한 것이다. 펄프섬유는 광을 일정부분 투과시키고 탄소섬유는 광을 차단하므로 그림에서 검게 나타나는 부분이 탄소섬유이다. 탄소섬유의 길이가 짧을수록 강화 종이 내에서 탄소섬유는 고르게 분산하였으나(Fig. 6의 (a)와 (b)), 탄소섬유의 길이가 길어짐에 따라 일부분 탄소섬유끼리 서로 엉켜서 뭉쳐있는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6의 (c)와 (d)). 펄프섬유의 길이는 0.5~5.0 mm 정도로 탄소섬유와의 길이 차이가 커질수록 탄소섬유와의 분산성이 나빠지게 된다. 따라서, 탄소섬유의 길이가 길어짐에 따라 분산성이 나빠져서 대체적으로 물리적인 특성 또한 나빠지는 것으로 판단된다. 그러나, 탄소섬유의 길이가 10 mm일 때 강화 종이의 인장강도가 가장 큰 값을 보인 것은 비교적 양호한 분산성과 이중 섬유간의 접착이 양호하게 형성되었기 때문으로 판단된다. Fig. 7은 탄소섬유의 길이를 10 mm로 고정하고 함량을 달리한 종이를 스캔한 것이다. 탄소섬유의 함량이 증가함에도 불구하고 비교적 균일한 분산성을 나타냄을 볼 수 있다.

Fig. 8은 탄소섬유 강화 종이 내에서 탄소섬유의 함량에 따른 물리적 강도를 측정한 것으로 탄소섬유의 함량이 증가할수록 인장강도와 파열강도는 감소한 반면 인열강도는 증가하였다. 탄소섬유의 함량이 증가하면 펄프섬유의 함량이 상대적으로 감소하므로 펄프섬유간의 비교적 강한 수소결합 부위가 적어져서 인장강도 및 파열강도가 낮아진 것으로 판단된다. 인열강도는 종이가 찢어지는데 저항하는 정도를 나타내는 강도로 섬유간 마찰과 섬유가 끊어지면서 나타나게 되는데 이들 두 가지 경우 중 섬유간 마찰이 더 큰 영향을 미치며 섬유의 길이가 길수록 인열강도는 증가한다[16]. 따라서, 강화 종이 내에서 10 mm 길이의 탄소섬유 함량이 증가함에 따라 복

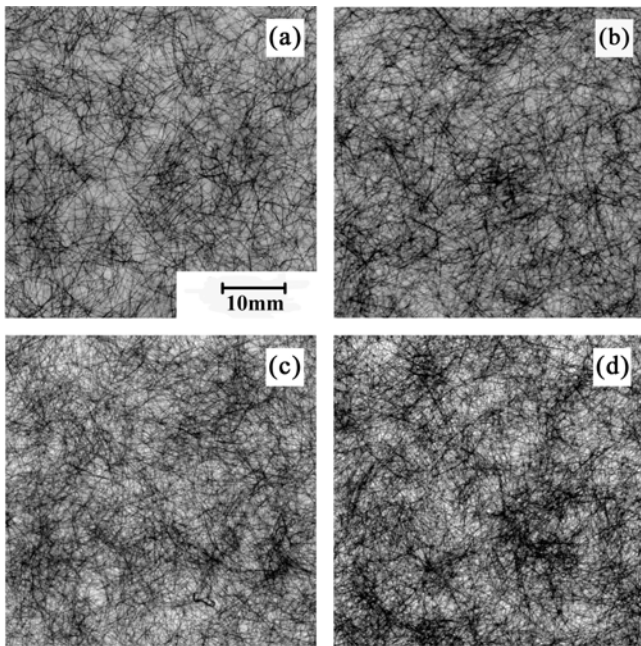


Fig. 7. Distribution of carbon fiber in the carbon fiber reinforced paper in different carbon fiber content (CF length : 10 mm, Basis weight : 80 g/m²) : (a) 3 wt%, (b) 5 wt%, (c) 7 wt%, (d) 10 wt%.

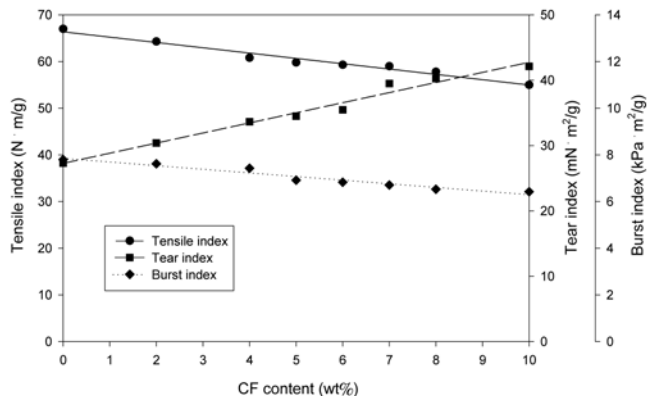


Fig. 8. Physical properties of carbon fiber reinforced paper with respect to carbon fiber content (CF length : 10 mm, Basis weight : 80 g/m²).

합체의 평균 섬유길이가 길어져 섬유간 마찰을 증가시킨 결과로 판단된다. 한편, Clark [17]은 종이의 밀도가 증가함에 따라 인장강도 및 파열강도는 증가하고, 반면 인열강도는 감소한다고 보고한 바 있다. Fig. 4에서 검토한 바와 같이 탄소섬유의 함량이 증가하면 탄소 섬유 강화 종이의 밀도는 감소함을 알 수 있었다. 즉, 본 연구도 Clark의 보고내용과 같은 결과를 얻었으며, 탄소섬유 강화 종이의 물리적 특성은 밀도와도 연관이 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 탄소섬유 강화 종이의 평량에 따른 물리적 강도를 측정한 것이다. 평량이 증가함에 따라 모든 강도가 선형적으로 증가하였다. 탄소섬유 함량 및 길이가 동등한 조건에서 평량의 증가는 탄소섬유와 펄프섬유의 양의 증가이므로 모든 강도가 증가됨을 알 수 있다.

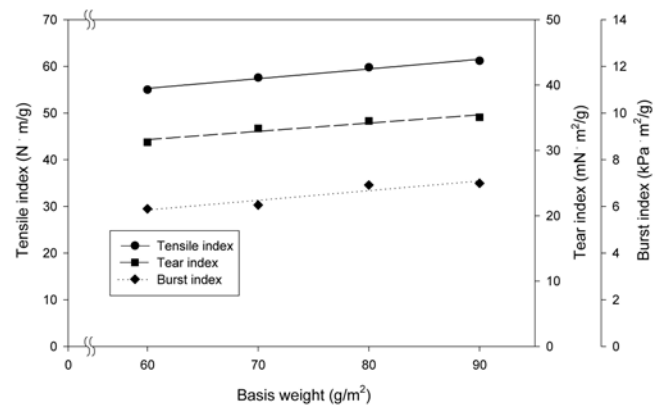


Fig. 9. Physical properties of carbon fiber reinforced paper with respect to basis weight (CF length : 10 mm, CF : 5 wt%).

3-3. 탄소섬유 강화 종이의 전기전도도

전도체를 첨가한 복합체의 전자수송에 관하여 몇 가지 물리적인 이론이 제시되어 있으며 그 중 가장 일반적인 이론은 “the theory of conductive paths”이다[18]. 이 이론은 섬유상이나 입자상으로 된 전도체 간에 전기전도 수송 통로가 존재하게 되면 복합체의 전기전도가 이루어지고 전도성 섬유나 입자의 함량이 증가함에 따라 섬유나 입자간의 전기전도 수송통로가 증가하고 평균거리가 더욱 가까워지므로, 복합체의 전기전도도는 증가하게 된다고 제시한 것이다.

Fig. 10은 탄소섬유 강화 종이 내 탄소섬유의 길이변화에 따른 전기전도도를 나타낸 것이다. 그림으로부터 탄소섬유의 길이가 5 mm인 경우 0.962 S/cm의 전기전도도를 나타내었으며 10 mm일 경우 가장 높은 1.936 S/cm를 보인 후 15 mm, 20 mm에서는 오히려 더 낮은 전기전도도를 나타내었다. 이는 Fig. 6에서 살펴본 바와 같이 5 mm와 10 mm에서는 비교적 좋은 분산성을 나타내었으나 그 이상의 길이에서는 탄소섬유가 일부분 서로 뭉치므로 분산성이 나빠져 전도체 간의 접촉이 감소되어 오히려 전기전도도가 낮아진 것으로 판단된다. 한편, 탄소섬유의 길이가 5 mm일 때 보다 10 mm일

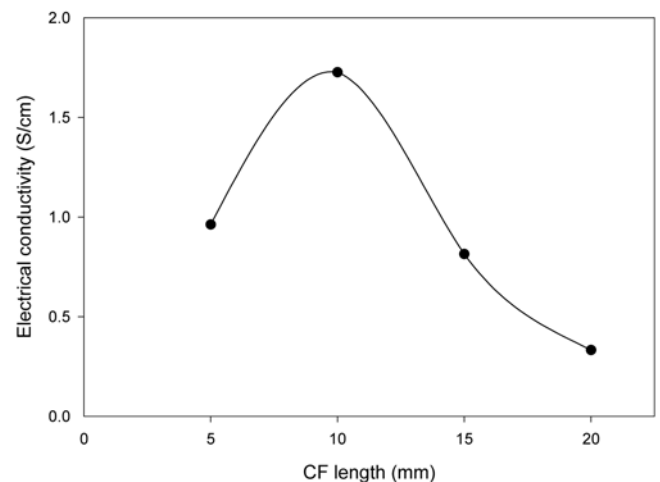


Fig. 10. Electrical conductivity of carbon fiber reinforced paper with respect to carbon fiber length (CF : 5 wt%, Basis weight : 80 g/m²).

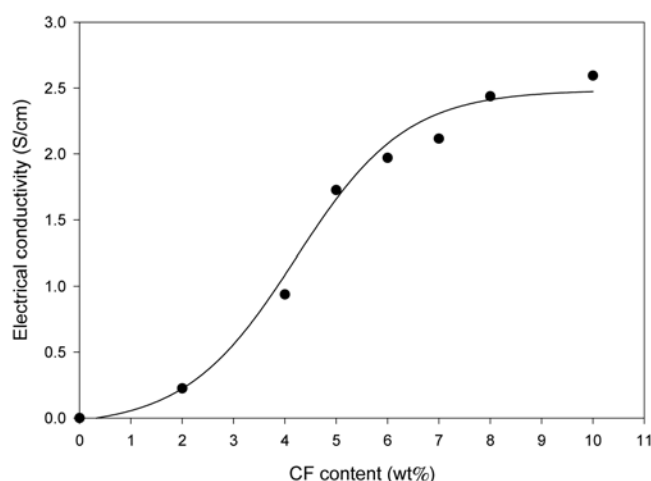


Fig. 11. Electrical conductivity of carbon fiber reinforced papers with respect to carbon fiber content(CF length : 10 mm, Basis weight: 80 g/m²).

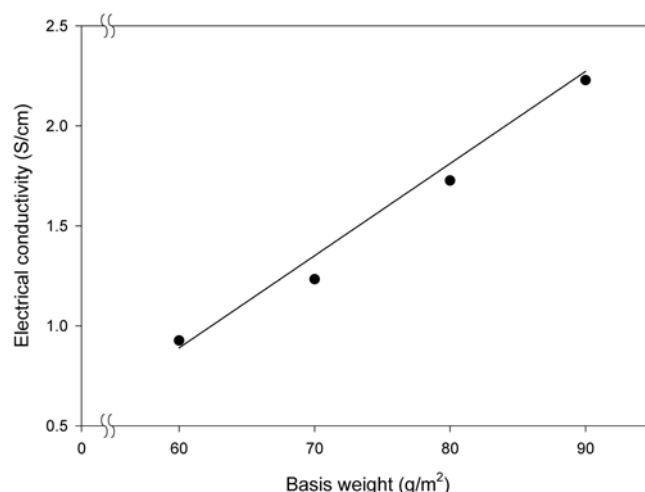


Fig. 12. Electrical conductivity of carbon fiber reinforced papers with respect to basis weight (CF length : 10 mm, CF : 5 wt%).

때가 더 높았다. 복합체의 전도성은 충전제 입자의 형태, 접촉수, 접촉저항, tunnel 전도성, 열전자 복사성 등 전도체 상호의 다양한 인자에 의하여 영향을 받지만, 무엇보다도 복합체 내에서 접촉이 많아야 한다[19]. 그러므로 탄소섬유의 길이가 10 mm일 경우 강화 종이 내에서 탄소섬유간 접촉 및 전하수송이 용이하게 이루어지지만 5 mm일 때는 분산성을 좋으나 접촉이 부족하기 때문으로 판단된다. 본 실험의 경우 10 mm 길이의 탄소섬유를 보강재로 사용하는 것이 강화 종이의 전기전도에 최적 조건이었다.

Fig. 11은 탄소섬유 함량변화에 따른 전기전도도를 나타낸 것이다. 탄소섬유 함량이 증가할수록 전기전도도는 S자 곡선형으로 증가하였다. 즉, 탄소섬유 강화 종이 내에서 탄소섬유의 함량이 높을수록 전도체인 탄소섬유간의 접촉이 많아지므로 전기전도도는 향상되었다. 그림으로부터 탄소섬유 함량이 2 wt%부터 전기전도성을 나타냈는데 이는 이 함량부터 전기전도 네트워크가 형성되었기 때문으로 판단된다. 또한, 5 wt%까지 전기전도도가 급격한 상승을 보이다가 5 wt% 이상에서부터 상승률이 둔화되었다. 일반적으로 전도성 보강재가 함량별로 충전된 복합체에 전류를 각각 통과시키면 낮은 함량에서는 임계함량까지 전기전도도가 서서히 증가하다가 임계함량 이후에는 급격히 증가하는 임계치 즉 침투문턱(percolation threshold)을 보인다고 보고되고 있다[20, 21]. 따라서, 이러한 결과는 침투문턱에 대한 보고와 같은 결과를 나타내었다. 실험결과로부터 PAN계 탄소섬유를 첨가한 종이의 침투문턱은 2 wt% 전후로 나타났다. 한편, 5 wt% 이상의 함량에서는 전기전도도의 증가가 둔화되었는데 이는 Table 3에서 보는 바와 같이 탄소섬유 함량의 증가와 함께 탄소섬유 강화 종이의 두께가 증가되었기 때문으로, 두께의 증가는 실험시편의 단위 단면적 당 전기전도도를 나타내는 (4)식의 결과에 따라 전기전도도의 증가폭을 둔화시킨 주요 요인으로 판단된다.

Fig. 12는 탄소섬유를 5 wt% 첨가한 탄소섬유 강화 종이의 평량 변화에 따른 전기전도도를 나타낸 것이다. 전기전도도는 평량이 증가하더라도 탄소섬유의 함량이 동일하기 때문에 같아야 할 것이나, 평량이 증가함에 따라 전기전도도가 선형적으로 증가하였다. 종이

의 밀도는 펄프 섬유의 치밀도, 분산계수, 상대적 결합면적 및 종이 제조시 배수의 용이성 등에 의하여 변화하므로[22], 종이의 평량이 2배 증가하더라도 두께가 2배로 증가하지 않고 약간 증가하므로 상대적으로 밀도는 증가한다. Table 3에서 보는 바와 같이 탄소섬유 강화 종이의 평량 증가율에 비하여 두께의 증가율이 더 적다. 따라서, 평량의 증가에 대한 단위 단면적의 감소는 탄소섬유를 밀집시켜 전기전도도를 증가시킨 것이다. 즉, 평량의 증가는 탄소섬유와 펄프섬유의 양을 함께 증가시키고 밀도가 증가하므로 탄소섬유 강화 종이 내에서 3차원 전기전도 네트워크가 더욱 긴밀히 이루어져 전기전도도가 증가된 것이다. Fig. 12로부터 60 g/m²의 전기전도도는 0.926 S/cm를, 90 g/m²의 전기전도도는 2.228 S/cm를 나타내어 평량 50%의 증가로 전기전도도가 250% 향상되었다. 이러한 결과로부터 전기전도도가 높은 전도성 종이를 얻기 위하여 탄소섬유 함량을 증가시키는 방법이 있으나 물리적 강도(인장강도, 파열강도)가 떨어지므로 탄소섬유 강화 종이의 평량을 증가시키므로써 전기전도도와 물리적 강도가 우수한 전도성 종이의 제조가 가능함을 제시할 수 있다.

4. 결 론

PAN계 탄소섬유의 길이와 함량, 그리고 강화 종이의 평량을 달리하여 탄소섬유 강화 종이를 각각 제조한 후 탄소섬유와 목재펄프와의 접착특성 및 강화 종이의 물리적 특성과 전기전도도를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 탄소섬유 강화 종이의 형성은 탄소섬유와 펄프섬유 계면에서의 화학적 결합이라기 보다는 물리적인 얽힘과 계면에서의 접촉으로 형성된다.

(2) 탄소섬유의 첨가량을 증가시키면 강화 종이의 두께와 인장강도가 증가하는 반면 인장강도와 파열강도는 감소하였다. 탄소섬유의 길이가 짧을수록 강화 종이 내에서 탄소섬유의 분산성은 양호하였으나 전기전도도를 향상시키기 위한 최적 탄소섬유의 길이는 10 mm였다.

(3) 탄소섬유 함량 및 강화 종이의 평량이 증가함에 따라 전기전도도는 향상한다. 전기전도도가 높은 전도성 종이를 얻기 위하여 탄소섬유 함량을 증가시키는 방법이 있으나 인장강도와 파열강도가 떨어지므로 탄소섬유 강화 종이의 평량을 증가시킴으로써 높은 전기전도도와 물리적 강도가 우수한 전도성 종이를 제조할 수 있다.

감 사

본 논문은 한국산업기술재단 지역혁신인력양성사업으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Murday, J. S. and Dominguez, D. D., "An Assessment of Graphitized Carbon Fiber use for Electrical Power Transmission," *Synth. Met.*, **9**(3), 397-424(1984).
2. Agari, Y., Ueda, A. and Nagai, S. J., "Electrical and Thermal Conductivities of Polyethylene Composites Filled with Biaxial Oriented Short-cut Carbon Fibers," *Appl. Polym. Sci.*, **52**(9), 1223-1231(1994).
3. Das, N. C., Chaki, T. K., Khastgir, D. and Chakraborty, A., "Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Conductive Carbon Black and Carbon Fiber-filled Composites Based on Rubber and Rubber Blends," *Adv. Polym. Technol.*, **20**(3), 226-236(2001).
4. Roy, D., Jana, P. B., De, S. K., Gupta, B. R., Chaudhuri, S. and Pal, A. K., "Study on the Electrical Conductivity and Galvanomagnetic Characteristics of Short Carbon Fibre Filled Thermoplastic Elastomers," *J. Mater. Sci.*, **31**(20), 5313-5319(1996).
5. Wang, X. F., Wang, Y. L. and Jin, Z. H., "Electrical Conductivity Characterization and Variation of Carbon Fiber Reinforced Cement Composite," *J. Mater. Sci.*, **37**(1), 223-227(2002).
6. Park, J. M., Lee, S. I., Kim, J. W. and Yoon, D. J., "Interfacial and Microfailure Evaluation of Modified Single Fiber-brittle Cement Matrix Composites Using an Electro-micromechanical Technique and Acoustic Emission," *J. Colloid Interface Sci.*, **244**(2), 410-422(2001).
7. Kio, K. and Hayashi, Y., "Sheet-like Electric Heater and a Sheet-like Thermal Sensing Element Using Carbon Fiber Mixed Paper," U.S. Patent No. 5,582,757(1996).
8. Itabashi, M., "Manufacture of Conductive Heating Paper," J.P. Patent No. 2000150117(2000).
9. Jang, J. and Ryu, S. K., "Electrical Conductivity and Surface Temperature of Carbon Fiber Reinforced Paper," *Korean Chem. Eng. Res.*, **42**(5), 598-604(2004).
10. Tim, P. and Larry, T., "The Evolution of Conductive Coatings," *Tappi*, **73**(12), 86-92(1990).
11. Paper and board - determination of air permeance (medium range) part3: bendtsen method, ISO 5636-3(1992).
12. Lee, Y. K., "Recent Developments in Carbon Fiber as a new Advanced Material," *Polymer(Korea)*, **9**(3), 175-185(1985).
13. Gardner, K. H. and Blackwell, J., "The Structure of Native Cellulose," *Biopolymers*, **13**(10), 1975-2001(1974).
14. Blackwell, J., Kolpek, F. J. and Gardner, K. H., *Tappi*, **61**(1), 71-79(1978).
15. Krekel, G., Huttinger, K. J. and Hoffman, W. P., "The Relevance of the Surface-structure and Surface-chemistry of Carbon-fibers in Their Adhesion to High-temperature Thermoplastics. 2. Surface-chemistry," *J. Mater. Sci.*, **29**(13), 3461-3468(1994).
16. Bristow, J. A. and Kolseth, P., "Paper Structure and Properties," Marcel Dekker. Inc., 311(1986).
17. Clark, J. d'A., "Effects of Fiber Coarseness and Length: E. Bulk, Burst, Tear, Fold, and Tensile Tests," *Tappi*, **45**(8), 628-634(1962).
18. Miyauchi, S. and Togashi, E., "The Conduction Mechanism of Polymer-filler Particles," *J. Appl. Polym. Sci.*, **30**(7), 2743-2751(1985).
19. Cho, J. W. and Choi, J. S., "Relationship Between Electrical Resistance and Strain of Carbon Fibers Upon Loading," *J. Appl. Polym. Sci.*, **77**(9), 2082-2087(2000).
20. Zhang, C., Yi, X. S., Yui, H., Asai, S. and Sumita, M., "Morphology and Electrical Properties of Short Carbon Fiber-filled Polymer Blends: High-density Polyethylene Poly (methyl methacrylate)," *J. Appl. Polym. Sci.*, **69**(9), 1813-1819(1998).
21. Lozano, K., Rios, B. J. and Baeceera, E. V., "A Study on Nanofiber-reinforced Thermoplastic Composites (II): Investigation of the Mixing Rheology and Conduction Properties," *J. Appl. Polym. Sci.*, **80**(8), 1162-1172(2001).
22. James, d'A. C., *Pulp technology and treatment for paper*, 430(1985).