

나노 탄화규소(SiC) 슬러리로 코팅된 메타-아라미드 직물의 특성

Characteristics of Meta-aramid Fabrics Coated with Slurry of Nanoscale SiC Particles

*Corresponding author

Seung Goo Lee
(lsgoo@cnu.ac.kr)

박종현, 이선영, 원종성, 이응보¹, 김의화², 이승구*

충남대학교 유기소재·섬유시스템공학과, ¹(주) 금보섬유, ²신한대학교 섬유소재공학과

Jong Hyeon Park, Sun Young Lee, Jong Sung Won, Eung Bo Lee¹, Eui Hwa Kim² and Seung Goo Lee*

Department of Advanced Organic Materials and Textile System Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

¹*Keumbo Textile co. Ltd, Daegu, Korea*

²*Department of Textile Materials Engineering, Shinhan University, Dongducheon, Korea*

Received_June 26, 2017

Revised_July 18, 2017

Accepted_July 28, 2017

Textile Coloration and Finishing

TCF 29-3/2017-9/131-138

©2017 The Korean Society of Dyers and Finishers

Abstract Most of high performance fabrics for the car racing protective clothing have been developed to have thermal resistance, flame retardant property, impact resistance and anti-frictional properties to protect the racer from the crucial accident. In this study, the meta-aramid fabric, which has inherent flame retardant, was coated with nanoparticles of SiC to enhance the impact resistance and anti-friction properties. Uniform coating of the nanoparticles onto the fabrics was obtained by using tape casting method. As the experimental parameters, size and content of the SiC nanoparticle were varied with the coating conditions of the fabric surface. The effects of the nanoparticle coating on the properties of meta-aramid fabric were examined with various instrumental analyses such as SEM, tensile strength and abrasion test.

Keywords meta-aramid fabric, slurry coating, tape casting, silicon carbide, abrasion resistance

1. 서 론

익스트림 스포츠인 자동차 레이싱 경기에 대한 인기가 높아짐에 따라 F1레이서경기 보호복에 대한 관심도 높아지고 있으며, 레이서경기 도중의 착용자의 안전성 확보 차원에서 F1레이서경기 보호복 소재의 성능 조건으로 내열성과 난연성이 매우 중요하게 간주되고 있다^{1,2)}. 이 조건을 충족하는 메타-아라미드섬유는 높은 융점 및 연기발생이 낮은 수준이며 우수한 난연성을 갖는 고성능 섬유로 F1레이서경기 보호복 뿐만 아니라 브레이크 패드, 가스켓, 열풍 필터, 산업용 벨트 및 로프, 파울 패널, 연료 탱크, 타이어 코드, 광섬유 인장 부재,

방탄 헬멧, 몸체 등에 널리 쓰이고 있다^{3,4)}. 그러나 메타-아라미드는 높은 내열성과 난연성에 비해 마모 강도가 상대적으로 낮은 결점을 나타낸다. 대부분 난연성 및 내열성용으로 많이 쓰이고 있는 메타-아라미드는 강도가 필요한 분야에서 쓰이지 못하는 이유도 이러한 낮은 기계적 물성을 갖고 있기 때문이다. 최근에는 낮은 내마모성을 가지는 메타-아라미드에 파라-아라미드를 복합하여 기계적 물성을 올리는 방법이 사용되었으나 파라-아라미드의 높은 가격과 복잡한 제직공정으로 인해 효율성이 떨어져 메타-아라미드에 고기능성 코팅가공을 하는 연구가 진행되고 있다⁵⁻¹⁵⁾.

본 연구에서는 메타-아라미드섬유의 비교적 낮은 내

Table 1. Characteristics of the fabric

| Fiber | Fabric weave | Fabric count (wp×wf) | Thickness (mm) | Weight (g/m ²) | Width (m) |
|-------------|--------------|----------------------|----------------|----------------------------|-----------|
| Meta-aramid | plain | 78×60 | 0.4 | 181 | 16.6 |

마모성을 향상시키고 메타-아라미드 직물의 표면 특성을 개선하기 위해 탄화규소(SiC) 코팅 가공을 행하였다. 코팅재로서는 높은 내마모성 및 내마찰성을 가지는 SiC를 선정 하였다. 고온 환경이나 마모 환경 하에 노출되어도 SiC의 높은 내마모성으로 인해 탄화수소 코팅 직물은 기존의 메타-아라미드직물보다 내마모성이 향상될 수 있을 것으로 기대된다.

직물의 표면층 코팅 법으로는 테이프 캐스팅 성형 방법을 이용하였으며, 공정 변수로는 SiC의 입자크기 및 함량 등을 변화시켜 SiC가 코팅된 메타-아라미드직물을 제조하였다. 각 공정 변수에 따른 직물의 특성 변화를 분석, 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

2.1.1 메타-아라미드직물과 슬러리

본 연구에 사용된 기관은 메타-아라미드로, 이물질 제거를 위하여 60℃의 증류수에 2회 수세 후 상온에서 에탄올과 아세톤에 각각 2회씩 충분히 수세하여 24시간 동안 상온 건조하는 과정을 거쳐 정련된 메타-아라미드 직물을 얻었으며, 사용된 메타-아라미드의 스펙은 Table 1에 나타내었다.

SiC는 슬러리로 제조하여 코팅을 진행하였으며, 코팅 변수를 SiC 입자 크기(nm), SiC 함량(wt%)을 변화

시키며 테이프 캐스팅 성형 방법으로 SiC를 코팅시켰다.

2.2 제조

2.2.1 슬러리 제조

테이프 캐스팅 성형을 위한 슬러리는 세라믹 원료분말과 결합제, 가소제, 분산제 및 용매 등을 사용하여 일정 조성비로 배합하여 제조한다. 이 논문에서 사용된 슬러리 제조 원료는 Table 2에 나타내었다.

제조공정으로는 원료의 혼합 및 양호한 슬러리의 분산 상태를 위해 먼저 SiC 분말, 용매, 분산제 및 입자성장 억제제를 투입하여 적정시간동안 1차 교반 후, 가소제 및 결합제를 첨가하여 적정시간동안 2차 교반하였다. 가소제 및 결합제를 분산제와 동시에 투입하지 않는 이유는 가소제와 결합제를 동시에 투입하면 유기물이 입자표면에 경쟁적으로 흡착하여 표면의 균일한 분산이 어려워지기 때문이다. 슬러리의 제조 모식도는 Figure 1에 나타내었다.

2.2.2 메타-아라미드/SiC 복합재료 제조

테이프 캐스팅공정은 원료 분체, 유기 분체, 유기 바인더, 가소제와 용제 등으로 구성된 슬러리를 일정 두께로 carrier film 위에 흘려 보내, 건조시키고 용매를 휘발시키고 고화시켜 그린 테이프를 제조하는 방법이다.

본 실험에 사용된 장비는 테이프 캐스팅 성형기계이며 이를 Figure 2에 나타내었다. 그린 테이프 두께를

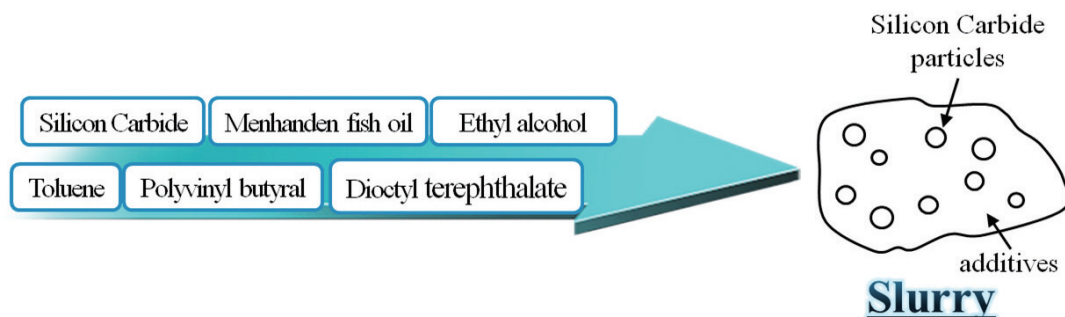
**Figure 1.** Schematic diagram of slurry manufacturing.

Table 2. Formulation of slurry

| Process | Raw material | Function | Property |
|---------|------------------------|------------------------|---|
| Step 1 | Silicon carbide | Main material | Wear · heat resistance |
| | Magnesia | Grain growth inhibitor | Grain growth inhibition if silicon carbide |
| | Ethyl alcohol | Solvent | Additive decomposition |
| | Toluene | Solvent | Additive decomposition |
| Step 2 | Menhaden fish oil | Dispersing agent | Improve the separation of particles and to prevent settling or clumping |
| | Diocetyl terephthalate | Plasticizer | Increase the plasticity or fluidity of a material |
| | Polyvinyl butyral | Binder | Holds or draws other materials together to form a cohesive whole mechanically |

5micron에서 500micron까지 조절 가능하며 온도 조절 및 건조 기능이 구비되어 있다. 슬러리 코팅 조건은 SiC의 입자크기 100, 500, 1000nm와 함량 10, 20, 30wt%로 달리하여 제조하였으며, 그 외 코팅조건은 동일하게 진행하였다.

2.3 분석

2.3.1 형태학적 분석

각 공정 조건에 따라 슬러리가 코팅된 메타-아라미드 직물의 표면특성과 코팅된 슬러리의 형태를 주사전자현미경(Scanning electron microscope : SEM)으로 관찰하였고, SiC의 입자크기 및 함량에 따른 슬러리

의 점도를 점도측정기(Brookfield viscometer) (DV-II +Pro)로 분석하였다.

2.3.2 기계적 특성 분석

각 공정 조건에 따라 슬러리가 코팅된 메타-아라미드 직물의 인장, 마모, 마찰강도를 분석하기 위해 각각 만능재료시험기(Universal testing machine, Instron, Model 4467, Korea), 굴곡마모시험기Abrasion testing machine, SDL ATLAS, Model M282, Korea), 마찰시험기Friction testing machine, FR-5020, Korea)를 사용하여 시험을 진행하였으며, 각 조건별로 10개의 시편이 측정에 사용되었다.

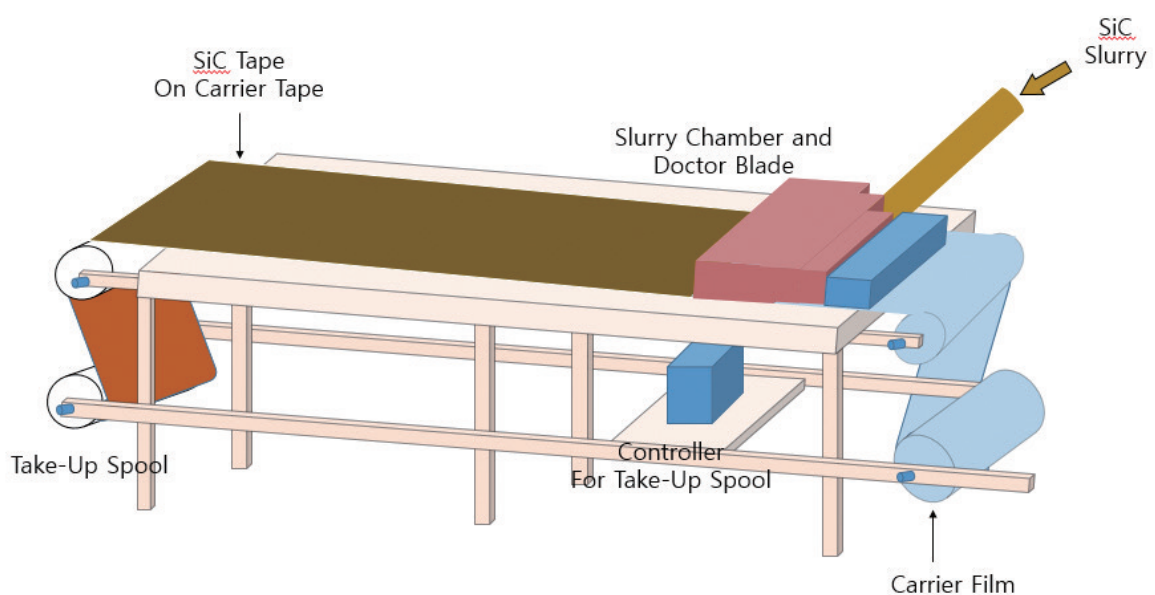
**Figure 2.** Schematic diagram of typical tape caster.

Table 3. Change of viscosity on size of SiC under same SiC content

| Size of SiC(nm) | 100 | 500 | 1000 |
|-----------------|------|------|------|
| Viscosity(cps) | 2450 | 2540 | 2510 |

2.3.3 전기저항 특성 분석

슬러리가 코팅된 메타-아라미드 직물의 전기저항을 밀리옴미터(Agilent technologies, 4338B)를 이용하여 분석하였다. 온도 20℃, 습도 65%RH의 실험환경에서 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 메타-아라미드/슬러리 복합재료의 특성

3.1.1 형태학적 분석

슬러리의 유동성은 테이프 캐스팅공정을 통한 그린 테이프를 제조할 때 중요한 인자 중 하나이다. 이는 항복 응력 이하의 응력수준에서는 슬러리가 흐르지 않는 고체와 같은 거동을 하고 항복 응력수준에서 소성점도를 갖는 유체와 같은 거동을 나타내기 때문이다.

Table 3은 슬러리 제조 시 SiC 함량을 20wt%로 고정하였을 때 SiC 입자크기를 100, 500, 1000nm로 변화시켰을 때 점도를 나타낸 것이다.

Table 4는 슬러리 제조 시 SiC 입자크기를 100nm로 고정하였을 때 SiC 함량을 10, 20, 30wt%로 달리 하였을 때의 점도를 나타낸 것이다.

Table 3에서 보듯이 SiC 입자크기를 달리하여 슬러리를 제조하였을 때는 점도의 차이가 거의 변화는 나타나지 않았다. 그러나, Table 4에서와 같이 SiC 함량을 달리하였을 때는 함량이 증가하면서 점도가 급격하게

Table 4. Change of viscosity on amount of SiC when size of SiC is constant

| Amount of SiC(wt%) | 10 | 20 | 30 | 40 |
|--------------------|------|------|------|-------|
| Viscosity(cps) | 1160 | 2450 | 5160 | solid |

변화되었으며 40wt%에서는 고체가 되었다. SiC 입자 크기 변화보다 함량 변수가 점도 변화에 유의한 영향을 미치는 주요 변수조건이라는 것을 알 수 있는데 이는 SiC 함량이 증가함에 따라 SiC를 분산시키는데 드는 용매의 양이 상대적으로 줄어들었기 때문인 것으로 사료된다.

Figure 3은 SiC 함량 변화에 따라 슬러리를 코팅하였을 때의 표면형태를 SEM으로 관찰한 결과를 제시한 것이다. SiC의 입자크기를 100nm로 고정하였을 때 SiC 함량을 0, 10, 20, 30wt%로 변화시켜 슬러리를 코팅한 메타-아라미드 직물의 표면형태를 나타내고 있다. SiC 함량이 증가할수록 메타-아라미드에 코팅된 슬러리가 대체로 증가하는 것을 관찰할 수 있었으며, SiC 함량 20wt% 조건에서 가장 균일한 코팅을 보였다. 이는 SiC 함량이 증가할수록 메타-아라미드에 코팅할 수 있는 입자들이 많아져 메타-아라미드 표면에 고루 분산되어 형성된 것으로 사료된다. 또한, 30wt% 조건에서 코팅 정도가 다소 낮게 관찰된 이유로는 높은 SiC 함량에 의해 분산 및 결합제의 상대적 비율이 다소 낮아져서 나타나는 현상으로 사료된다.

3.1.2 기계적 특성 분석

3.1.2.1 인장강도

Figure 4(a)와 (b)는 각각 SiC 입자크기 및 함량 등 공정 변수에 따라 슬러리가 코팅된 메타-아라미드의 인장강도를 나타낸 것이다. 여기서 슬러리를 코팅한 시

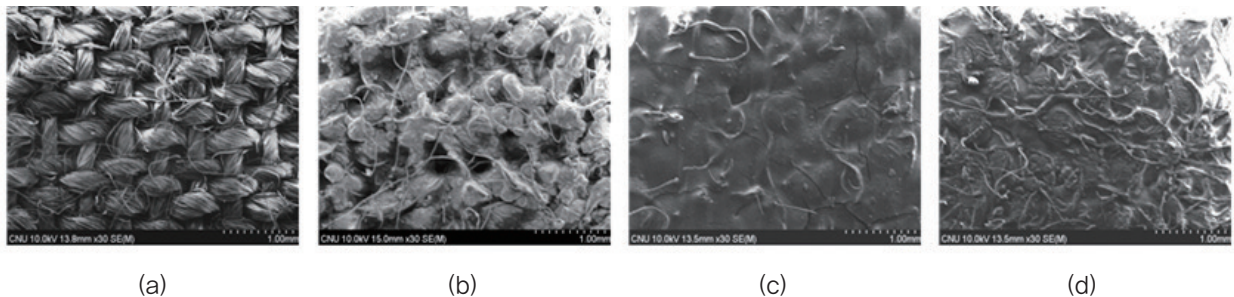
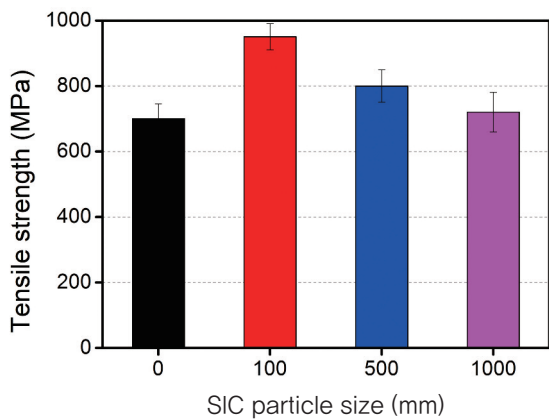


Figure 3. Side and surface images of the slurry coated meta-aramid fabrics with SiC content(SEM, ×30); amount of SiC (a) 0wt%, (b) 10wt%, (c) 20wt%, (d) 30wt%(size of SiC : 100nm).

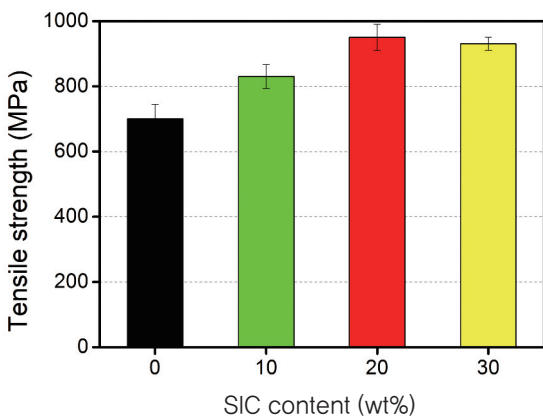
편은 슬러리를 코팅하지 않은 시편보다 더 높은 인장강도를 나타냈다. 이는 슬러리가 메타-아라미드 보강재로 작용하면서 슬러리 내에 결합재가 SiC 입자간 상호작용을 형성하였기 때문으로 사료된다. 적절한 입자간 상호작용 형성은 균일한 슬러리 코팅에 중요한 영향을 미친다. 또한 SiC 함량이 증가할수록 인장강도가 다소 증가하는 것을 확인할 수 있었으나, Figure 4(a)에서의 SiC 입자크기 조건이 100nm일 때 최대 인장강도 값을 나타내었다. 이는 SiC 입자크기가 작을수록 메타-아라미드 표면에 코팅되는 슬러리 내 SiC가 조밀하게 균일하게 분포하여 입자간 상호작용이 형성될 수 있도록 작용하였기 때문으로 사료된다.

3.1.2.2 마모, 마찰강도

SiC 입자크기와 함량 변화에 따른 슬러리가 코팅된



(a)



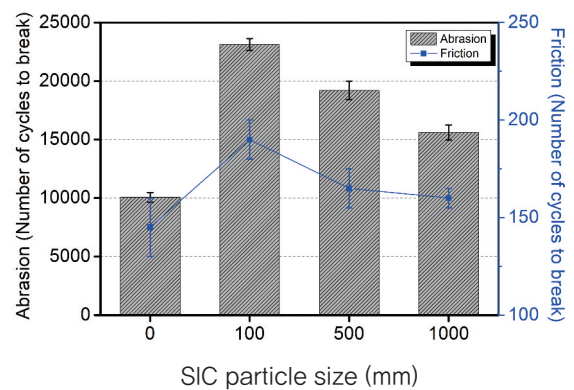
(b)

Figure 4. Tensile strength of slurry coated meta-aramid with (a) SiC particle size, (b) SiC content.

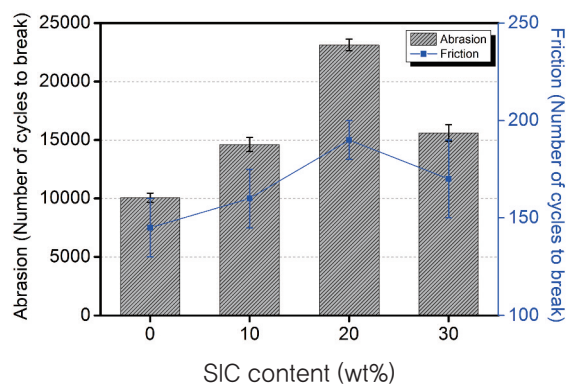
메타-아라미드 직물의 마모 및 마찰강도를 Figure 5에 나타내었다.

슬러리를 코팅시킨 시편이 코팅하지 않은 시편보다 더 높은 마모, 마찰강도를 나타내었으며, 또한 마모와 마찰강도의 경향이 유사하게 나타났다. 이는 슬러리 코팅 막에 함유된 SiC 입자가 크기가 크고 결합거리가 가까워 고경도, 내마모 특성을 가지기 때문이며, 슬러리 코팅이 마모 및 마찰강도를 향상시키는 요인으로 작용한 것으로 사료된다.

Figure 5(a)에서의 SiC 입자크기 조건 100nm와 (b)에서의 SiC 함량 조건 20wt%에서 가장 높은 마모, 마찰강도를 보였다. 이는 입자크기에 따른 입자간 상호작용 형성이 작용하였으며, SEM 이미지를 통한 형태학적 분석에서 SiC 함량에 따른 슬러리 코팅도와 경향이 대체로 일치하는 것으로 나타났다.

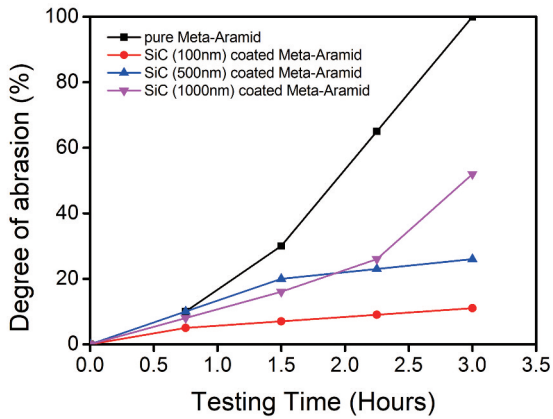


(a)

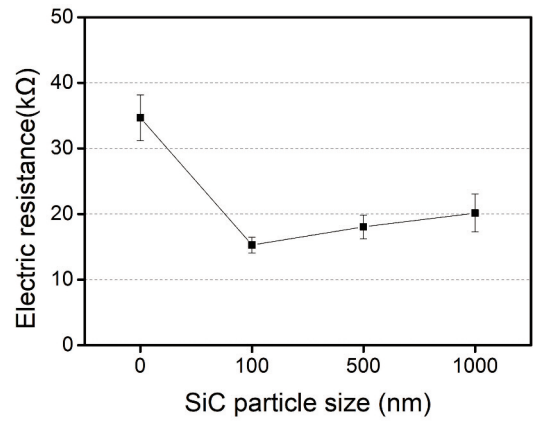


(b)

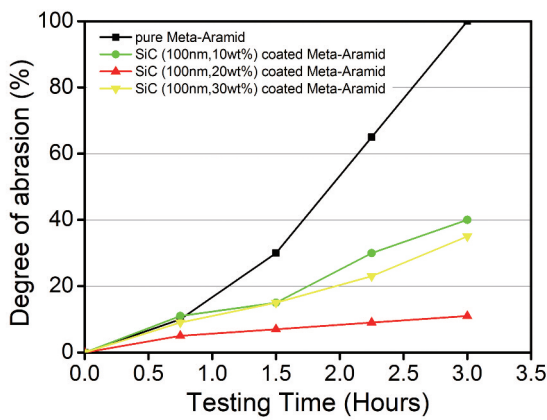
Figure 5. Abrasion and friction properties of slurry coated meta-aramid with (a) SiC particle size, (b) SiC content.



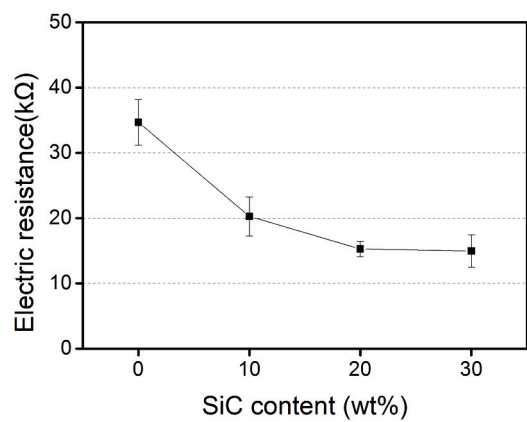
(a)



(a)



(b)



(b)

Figure 6. Degree of abrasion with (a) SiC particle size, (b) SiC content.

Figure 7. Variations of electric resistance of slurry coated fabric with (a) SiC particle size, (b) SiC content.

따라서 입자간 상호작용 형성과 슬러리의 코팅도는 마모, 마찰강도와 직접적인 상관관계가 있다는 것을 알 수 있으며, 이와 같은 결과로부터 SiC가 함유된 슬러리를 내마모특성 향상을 위한 가공재로 이용하였을 때, 메타-아라미드 직물의 마모 및 마찰강도를 효과적으로 향상시킬 수 있음을 시사한다. 추가적으로 시간의 변화에 따른 마모정도를 Figure 6에 나타내었으며, SiC를 함유한 슬러리가 내마모성에 미치는 영향을 확인할 수 있다.

3.1.3 전기 저항

SiC는 높은 내마모 및 마찰 특성뿐만 아니라 고전기 전도성을 갖는 물질로, Figure 7(a)와 (b)는 다양한 SiC 입자크기와 함량의 변화가 슬러리가 코팅된 메타-아라미드 직물의 전기 저항에 미치는 영향을 살펴본 결과를 나타낸 것이다.

SiC 입자크기에 따른 변화에서 100nm의 SiC 입자 크기로 코팅된 시료가 가장 낮은 전기저항을 나타내었으며, 그 이후 다소 증가하는 경향을 보였다. SiC 입자 크기의 변화에서 전기저항이 최소값 이후 다소 증가하는데 이 이유는 SiC의 입자크기가 작을수록 입자간 상호작용이 원활하고 분산정도가 우수하기 때문으로 사료된다. SiC 함량이 높아짐에 따라 슬러리가 코팅된 메타-아라미드 직물의 전기 저항은 차츰 감소하는 경향을 보였다. 이는 전도성 높은 SiC가 메타-아라미드 직물 전기적 특성에 지배적인 영향을 주었기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 코팅 방법으로 테이프 캐스팅성형 방법을 통해 메타-아라미드직물에 대한 슬러리 코팅을

통한 SiC의 최적 조건을 확립하였다. 다양한 SiC 입자 크기와 함량을 달리하여 슬러리가 코팅된 메타-아라미드 직물을 제조하였으며, SiC 입자크기와 함량 조건의 변화를 통해 코팅된 직물의 형태학 및 마모강도 등 다양한 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 적절한 유동성을 갖는 슬러리 제조를 위해 형태학 특성 결과를 고려할 때, SiC함량이 증가할수록 메타-아라미드에 코팅된 슬러리가 증가하여 SiC 함량 20wt% 조건에서 가장 균일한 코팅을 보였다.
2. 인장, 마모 및 마찰강도에 대한 분석 결과, SiC를 함유한 슬러리 코팅은 주어진 인장, 마모 및 마찰조건 하에서 메타-아라미드 직물의 물성에 뚜렷한 영향을 미쳤다. 이는 입자간 상호작용 형성에 기인된 결과로 사료된다. 이로부터 SiC를 함유한 슬러리를 내마모성, 내마찰성 향상을 위한 가공재로서 이용한다면 기계적 물성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 전도성 분석 결과에서 SiC 함유 슬러리가 코팅된 메타-아라미드 직물의 전기 저항에 미치는 유의한 영향을 확인하였으며, 이로부터 SiC 함량 20wt%, SiC 입자 100nm의 코팅 조건이 슬러리 코팅을 위한 최적 조건으로 확립되었다.
3. F1레이저경기 보호복 적용에 있어 SiC 슬러리 코팅은 직물을 강직하게 하여 유연성을 다소 떨어뜨리는 작용을 하므로 의류 전체에 적용하는 것이 아닌 일부 마모에 취약한 부분에 선택적으로 적용하여 마모강도 향상 및 스마트 의류를 위한 전기적 특성을 부여할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 섬유생활스트림간협력기술개발사업(과제번호 10052525)의 지원 및 관리로 수행되었습니다.

References

1. L. Yao, K. T. Kim, and J. Y. Kim, Fabrication of Meta-aramid Fibrid by Precipitation, *Fibers and Polymers*, **13**(3), 277(2012).
2. N. N. Baeva, E. A. Manyukov, S. F. Sadova, L. Va. Konovalova, and G. S. Negodyaeva, Sorption and Den-

sitometric Properties of Meta/Para-aramid Fibres, *Fibre Chemistry*, **39**(3), 205(2007).

3. H. Zheng, J. Zhang, B. Du, Q. Wei, and L. Zheng, An Investigation for the Performance of meta-aramid Fiber Blends Treated in Supercritical Carbon Dioxide Fluid, *Fibers and Polymers*, **16**(5), 1134(2015).
4. J. M. Qian and Z. H. Jin, Preparation and Characterization of Porous, Biomorphic SiC Ceramic with Hybrid Pore Structure, *J. of the European Ceramic Society*, **26**(8), 1311(2006).
5. Z. H. Zhang, F. C. Wang, J. Luo, S. K. Lee, and L. Wang, Processing and Characterization of Fine-grained Monolithic SiC Ceramic Synthesized by Spark Plasma Sintering, *Materials Science and Engineering: A*, **527**(7), 2099(2010).
6. C. C. Foo, G. B. Chai, and L. K. Seah, Mechanical Properties of Nomex Material and Nomex Honeycomb Structure, *Composite Structures*, **80**(4), 588(2007).
7. U. R. K. Lagudu, S. Isono, S. Krishnan, and S. V. Babu, Role of Ionic Strength in Chemical Mechanical Polishing of Silicon Carbide using Silica Slurries, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **445**, 119(2014).
8. M. Malek, P. Wisniewski, J. Szymanska, J. Mizera, and K. J. Kurzydowski, Technological Properties of Ceramic Slurries Based on Silicon Carbide with Poly(vinyl alcohol) Addition for Shell Moluds Fabrication in Precision Casting Process, *Acta Physica Polonica A*, **129**(4), 528(2016).
9. X. Yao, S. Tan, Z. Huang, and D. Jiang, Effect of Re-coating Slurry Viscosity on the Properties of Reticulated Porous Silicon Carbide Ceramics, *Ceramics International*, **32**(2), 137(2006).
10. J. H. Song, S. I. Park, J. H. Lee, and H. S. Kim, Fabrication Characteristics of an Anode-supported Thin-film Electrolyte Fabricated by the Tape Casting Method for IT-SOFC, *J. of Materials Processing Technology*, **198**(1), 414(2008).
11. B. Bitterlich, C. Lutz, and A. Roosen, Rheological Characterization of Water-based Slurries for the Tape Casting Process, *Ceramics International*, **28**(6), 675(2002).

12. R. Bulatova, M. G. Sørensen, M. D. Negra, K. B. Andersen, A. Kaiser, and C. R. H. Bahl, The Effect of Tape Casting Operational Parameters on the Quality of Adjacently Graded Ceramic Film, *Ceramics International*, **42**(4), 4663(2016).
13. R. Bulatova, M. Jabbari, A. Kaiser, M. D. Negra, K. B. Andersen, J. Gurauskis, and C. R. Bahl, Thickness Control and Interface Quality as Functions of Slurry Formulation and Casting Speed in Side-by-side Tape Casting, *J. of the European Ceramic Society*, **34**(16), 4285(2014).
14. S. Liu, P. Chen, Y. Li, W. Li, S. Gao, and F. Ye, Effect of Stacking Pressure on the Properties of Si₃N₄ Ceramics Fabricated by Aqueous Tape Casting, *Ceramics International*, **42**(14), 16281(2016).
15. S. Liu, F. Ye, L. Liu, Q. Liu, and J. Li, Preparation of Aluminum Nitride Ceramics by Aqueous Tape Casting, *Materials and Manufacturing Processes*, **30**(5), 605 (2015).