

〈연구논문(학술)〉

## 극초경량 실리카 에어로겔의 폴리우레탄 멤브레인 적용 특성

민문홍 · 정천희 · 윤석한 · 양정한<sup>1</sup> · 김태경<sup>2,†</sup>

다이텍연구원, <sup>1</sup>(주)빅스, <sup>2</sup>경북대학교 섬유시스템공학과

### Application Properties of Ultra Light Weight Silica Aerogel to Polyurethane Membrane

Munhong Min, Cheonhee Jeong, Seokhan Yoon, Junghan Yang<sup>1</sup> and Taekyeong Kim<sup>2,†</sup>

Korea Dyeing and Finishing Technology Institute, Daegu, Korea, <sup>1</sup>VIX, Daegu, Korea

<sup>2</sup>Department of Textile System Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Received: December 3, 2013 / Revised: December 16, 2013 / Accepted: December 18, 2013)

**Abstract:** Application properties of ultra light weight silica aerogel toward polyurethane membranes were investigated. From the results of pre-milling process of the silica aerogel, the solvent for dispersion of the aerogel was determined for methyl ethyl ketone and its content in the solvent was determined by 30%. Using this aerogel dispersion, the polyurethane membranes were prepared according to the mixing amount of silica aerogel and various properties of the membranes were investigated. As results, the optimum mixing amount of silica aerogel inside polyurethane membranes was decided at 11%, because the improvement of light weight property, air permeability, and moisture vapor permeability were improved upto 11% of silica aerogel content, maintaining the water penetration resistance almost unchanged.

**Keywords:** aerogel, silica, light-weight, polyurethane, membrane

## 1. 서 론

소재를 다루는 여러 산업영역에서 최근 들어 공통적으로 화제가 되고 있는 분야 중의 하나가 바로 경량화이다. 경량화는 특히 자동차, 항공, 우주 등의 수송 분야에 있어서 수송에 소요되는 에너지를 절감하기 위한 목적이 크지만 수송 분야가 아니라 하더라도 경량화는 그 자체로서도 다양한 이점이 많다. 또한 수송 분야는 금속, 세라믹, 고분자, 전기전자 등의 많은 재료가 이미 사용되고 있고, 섬유의 사용량도 많은 비중을 차지하고 있으며 또한 지속적으로 증가하고 있는 추세이다<sup>1,2)</sup>.

그 중 에어로겔은 경량재료 중 최근 들어 관심이 크게 증가하고 있는 소재로서, 주로 실리카를 기반으로 하는 초다공성의 구조로 인해 사실상 내부공간이 거의 비어 있는 형태가 되어 비중이 0.1 이하에 이르는 극초경량성을 나타내는 것이 특징이다.

또한 내부의 다공성 구조로 인해 열차단성이 우수하여 단열재로서도 활용이 가능할 뿐만 아니라 흡음성도 우수한 것으로 알려져 다양한 특수기능성의 용도로 사용이 기대되고 있다<sup>3-6)</sup>.

이러한 에어로겔은 일반적으로 초미세입자의 분말형태로 제조되므로 그 자체로는 사용이 불편하며 다양한 고분자 등의 재료에 혼입시켜 매트릭스 구조의 형태로 제조하여 사용하는 것이 일반적인데, 이때 고분자 매트릭스의 고유 성능을 저하시키지 않고 균일하게 분산 혼입시키는 것이 중요하다.

본 연구에서는 섬유분야에서 코팅 및 라미네이팅 재료로 가장 널리 사용되고 있는 폴리우레탄 수지<sup>7-9)</sup>에 대한 실리카 에어로겔의 분산혼입 특성을 조사함으로써 기존의 폴리우레탄 수지를 보다 경량화하고 아울러 에어로겔 함유 폴리우레탄 멤브레인의 투습성, 방수성 및 공기투과도 등의 물성 변화를 검토하였으며, 향후 에어로겔 함유 폴리우레탄 수지의 경량 기능성 의류 및 자동차 내장재 등의 활용에 대한 기초자료를 확보하고자 하였다.

<sup>†</sup>Corresponding author: Taekyeong Kim (taekyeong@knu.ac.kr)

Tel.: +82-53-950-5639 Fax.: +82-53-950-6617

©2013 KSDF 1229-0033/2013-12/279-286

## 2. 실험

### 2.1 시료 및 시약

본 연구에 사용된 에어로겔은 (주)지오스로부터 구매된 실리카 에어로겔로서 화학구조는 Figure 1과 같이 실리콘 원자에 4개의 메톡시기가 치환된 tetramethoxysilane이며, 95% 이상의 기공도를 가진다. 제시된 에어로겔의 물리화학적 특성을 Table 1에 정리하였다.

에어로겔이 혼입될 폴리우레탄 수지는 (주)빅스에서 제공된 것으로 건식의 미세다공형 멤브레인 형성이 가능하도록 제조되었으며, 수지와 함께 멤브레인 캐스팅용 첨가제인 경화제(CRL100), 경화촉진제(R446), 실리콘첨가제(STM), 소포제(AS41), 발수제(UM651)가 함께 사용되었다. 에어로겔의 분산 및 수지용해 등에 사용될 용매인 iso-propyl alcohol (IPA), N,N-dimethylformamide(DMF), methyl ethyl ketone(MEK), toluene, n-hexanol은 시약급을 사용하였다.

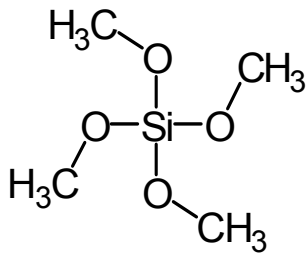


Figure 1. Chemical structure of silica aerogel (tetramethoxysilane) used in this study.

Table 1. Characteristics of silica aerogel used in this study

Properties	Values
Average pore diameter	10 nm
Bulk density	0.04 ~ 0.1 g/cm <sup>3</sup>
Thermal conductivity	17 ~ 22 mW/m·K
Surface area	800 ~ 1,000 m <sup>2</sup> /g
Porosity	> 95%
Temperature range	-200 ~ 1,600 °C
Surface chemistry	Hydrophobic
Flame resistance	Flame retardant

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 에어로겔의 분산 및 분산안정성 평가

폴리우레탄 수지에 혼입하기 위한 에어로겔의 용매에 대한 분산안정성 평가를 위해 에어로겔 3.0g을 5종의 용매(iso-propyl alcohol, N,N-dimethylformamide, methyl ethyl ketone, toluene, n-hexanol) 각 100mL에 첨가하여 초음파 처리기로 3분간 처리한 후, 입자분산안정성측정기(Turbiscan Lab, Formulation, France)를 이용하여 분산안정성을 측정하였다.

Turbiscan은 파장 880nm인 근적외선을 광원으로 하며 광센서인 reading head와 transmission detector 및 입사각과 45°각도 뒤쪽에 위치한 back-scattering detector로 구성된다.

Reading head는 시료가 담긴 측정 셀의 아래쪽에서 위쪽으로 움직이며 40 $\mu$ m 간격으로 근적외선을 조사하며 시료 전체 높이(55mm)를 스캐닝 한다. 분산상인 입자의 크기와 분산상과 연속상의 부피 비율에 따른 transmission(T) 및 back-scattering(BS)된 광량(%)을 동시에 측정하여 T 및 BS값을 얻는다. 측정된 T 및 BS값에서 측정 초기의 값을 "0"으로 두고 상대적으로 방치시간에 따른 변화를 나타낸 것이  $\Delta T$  및  $\Delta BS$ 이다<sup>10)</sup>.

#### 2.2.2 SEM 측정

에어로겔의 용매에 대한 분산성 및 형태 안정성을 확인하기 위하여 에어로겔 1.0g을 5종의 용매 10mL에 각각 분산시키고 48시간 경과 후에 용매를 휘발시킨 후, 시료의 상태를 주사전자현미경(S-4300, Hitachi)을 이용하여 관찰하였다.

#### 2.2.3 에어로겔의 밀링공정성 평가

에어로겔을 폴리우레탄 수지에 혼입시키기 위해서는 에어로겔의 입자 크기가 형성될 폴리우레탄 멤브레인의 두께 이하의 수준에서 입도가 균일해야 한다. 일반적으로 섬유코팅용 멤브레인층의 두께는 15~50 $\mu$ m 정도이기 때문에 에어로겔을 코팅 수지에 혼입시키기 위해서는 경우에 따라서 에어로겔 분말의 균일한 분산 및 분쇄를 위하여 밀링을 실시할 필요가 있으며, 이에 에어로겔 분말의 밀링 용이성을 판단하기 위한 밀링공정성을 평가하였다.

Turbiscan 측정 결과 5종의 용매 중 분산안정성이 상대적으로 양호하며, 본 연구에서 사용하는 건식 미세다공형 폴리우레탄 수지와와의 상용성 및 기공형성이 우수한 것으로 판단된 methyl ethyl ketone에

대해서 에어로겔의 첨가량을 변화시켜가며 분산액의 점도와 밀링공정성을 평가하였다. Methyl ethyl ketone 100mL에 에어로겔을 10~40g으로 첨가량을 변화시켜가며 3본 밀링장치(3-roll milling machine, UAM-015, Kotobuki)를 이용하여 밀링 롤러간의 간격(roll gap)을 5 $\mu$ m로 고정하고, 롤러의 회전수를 300 rpm으로 하여 3회 밀링하였다. 제조한 에어로겔 분산 methyl ethyl ketone 페이스트의 점도는 25 $^{\circ}$ C에서 Brook field 점도계(spindle #64)를 이용하여 측정하였다. 3본 밀링장치는 3개의 롤러 사이를 시료가 통과하면서 밀링되는 원리로서 적정 점도와 흐름성을 가지고 있어야 하며, 용액의 점도가 너무 높거나, 높으면 공정진행이 불가능하다.

그러나 밀링공정성 평가의 경우 객관적 수치로 나타내는 방법은 표준화되어 있지 않기 때문에 일반적으로 전문가의 육안판정을 실시한다. 따라서 본 연구에서도 methyl ethyl ketone에 대한 에어로겔의 혼합량에 따른 밀링공정성을 육안 판정하였다.

#### 2.2.4 에어로겔 함유 폴리우레탄 멤브레인의 제조

먼저 적정 분산용매로 선정된 methyl ethyl ketone 100g에 최적의 밀링공정성을 가지는 것으로 나타난 에어로겔 첨가량 30g의 조합을 M30이라 명명하고, 이 M30의 폴리우레탄 수지에 대한 혼합비율을 증가시켜가며 미세다공형 폴리우레탄 멤브레인용 수지를 제조하였다.

미세다공형 폴리우레탄 멤브레인 제조용 수지에는 경화제, 경화촉진제 등 다양한 첨가제가 필요하며, 이들의 사용량은 모두 동일하게 하였다.

최종적으로 용매가 모두 건조된 후 형성된 멤브레인은 폴리우레탄 수지 성분과 각종 첨가제 성분, 그리고 에어로겔만이 남게 되며, 최종 멤브레인에 대한 에어로겔의 고형분 함량은 각각 0%, 11.0%, 15.7%, 23.7%가 된다.

멤브레인 캐스팅 방법은 농도별로 배합된 폴리우레탄 수지를 이형지 위에 comma knife를 사용하여 knife over roll 코팅방식으로 knife와 coating roller 사이의 간격을 150 $\mu$ m로 조절하여 캐스팅을 하고, 미세다공의 형성을 위해 90 $^{\circ}$ C, 120 $^{\circ}$ C, 140 $^{\circ}$ C에서 순차적으로 각각 30초간 다단 건조하여 두께 약 30 $\mu$ m의 폴리우레탄 멤브레인을 제조하였다. 이형지는 SK VEZ Matt(Sappi사)를 이용하였으며, 코팅기는 Mathis Lab. Coater를 사용하였다.

#### 2.2.5 에어로겔 함유 폴리우레탄 멤브레인의 성능평가

에어로겔 함유 폴리우레탄 멤브레인의 두께는 두께측정기(No. 2046F, Mitutoyo사)를 이용하여 측정하였으며, 투습도는 JIS L 1099 A-1법(염화칼슘법), 공기투과도는 JIS L 1096-A법(frazier법), 내수압은 ISO 811 규격에 준하여 측정하였다.

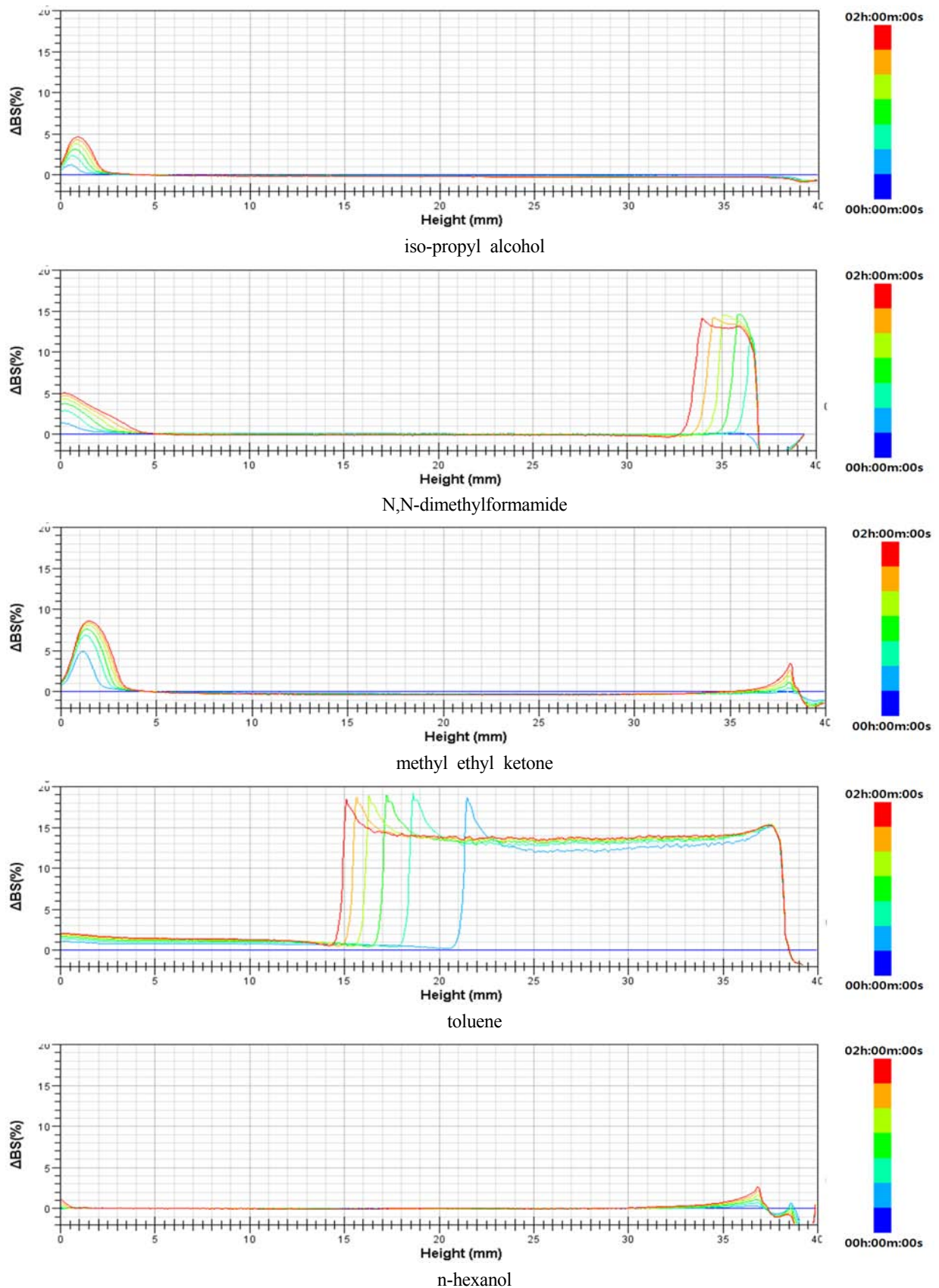
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 실리카 에어로겔의 용매 분산안정성 및 밀링 공정성

본 연구에서 사용한 에어로겔은 상기 Figure 1에서도 알 수 있는 바와 같이 4개의 메톡시기가 결합되어 있는 형태로서 에어로겔의 입자 표면이 소수성을 나타낸다. 또한 에어로겔 입자는 어느 정도의 입도균일성을 가지고 공급되기는 하지만, 박막의 멤브레인에 적용되기 위해서는 멤브레인 두께 이하 수준으로 다시 입도를 조절할 필요가 있으므로 필연적으로 밀링공정을 거쳐야 한다. 가능한 몇 가지 밀링공정 중에서 에어로겔의 경우에는 3본 밀링(3-roll milling)이 가장 적합한 것으로 선정되어 있다. 3본 밀링 공정은 3개의 밀착된 롤러 사이를 일정한 점도를 가지도록 용매에 분산시킨 분산액을 수차례 통과시키면서 압착 밀링을 하도록 설계되어 있는 설비이다. 이를 위해서 에어로겔 역시 적당한 용매에 적정 점도로 분산시켜야 하는데 에어로겔이 소수성의 특성을 가지므로 물에 의한 분산은 거의 불가능하며 적절한 유기용매가 사용되어야 한다.

본 연구에서는 iso-propyl alcohol(IPA), N,N-dimethylformamide(DMF), methyl ethyl ketone(MEK), toluene, n-hexanol 등 5종의 유기용매를 대상으로 조사되었으며, 우선 3본 밀링 공정에 적합한 용매를 선정하기 위해 각각의 용매에 분산된 에어로겔의 분산안정성을 조사하였다. 분산안정성은 밀링공정을 위한 적정점도의 분산액을 준비하는데 필요한 요소로서 분산안정성이 오래 지속될수록 공정에 유리하며, 또한 최종적으로 분산용매가 건조 제거된 후에 실리카 에어로겔 입자의 재응집 상태가 현저히 변화하는 일이 없는 것이 유리하다.

에어로겔의 용매에 대한 분산안정성을 평가하기 위해 입자분산안정성측정기(Turbiscan)를 사용하였다. Turbiscan의 기본적인 원리는 일정농도의 분산용액을 제조한 후 이를 방치하면서 시간의 경과에 따라



**Figure 2.** Back scattering( $\Delta BS$ ) profiles (dispersion stability) of silica aerogel in several organic solvents, obtained by turbidity analysis at 20°C for 2 hours.

분산입자가 용매의 아래쪽으로 가라앉을 때 발생하는 분산액의 탁도 변화를 관찰 측정하여 데이터화하는 장비이다. 그 결과를 Figure 2에 용매별로 나타내었다.

연속상내에서 분산상의 시간에 따른 변화는 분산입자의 크기 변화와 상의 이동으로 분류된다. 분산입자의 크기 변화는 분산상의 특성에 따라 입자의 응집(coalescence 또는 flocculation)이 발생할 수 있고, 분산상의 이동에는 침적(sedimentation)과 크리밍(creaming)이 있다. 이들 변화는 분산상과 연속상의 점도, 친수성과 소수성 및 상호작용력, 밀도차에 따라 입자의 크기 변화에 수반된 상의 이동이 일어날 수 있다<sup>11)</sup>. 즉, 연속상인 용매 중에서 분산입자인 에어로겔의 분산안정성에 관련한 실험결과로부터 에어로겔 입자간의 상호작용력 및 가공과정에서 균일 가공이나 흡착형태 등을 추측해 볼 수 있다.

Figure 2는 각각의 용매와 에어로겔 부피비 100:1의 혼합용액을 2시간 방치하는 과정에서 시간 경과에 따른 측정 셀의 하층부에서 상층부까지 ΔBS의 변화를 나타낸 것이다. 평균입자간의 거리가 멀어지면 ΔBS가 감소하는데, 용매의 종류에 상관없이 최상층부는 ΔBS값이 약간 감소하고, 최하층부는 증가하는 경향을 보였다. 이는 분산입자들이 독립적으로 침전하는 자유침전(free settling)이 발생하는 것으로 생각된다. Iso-propyl alcohol과 n-hexanol에서는

이러한 약간의 자유침전 이외에는 큰 변화가 없음을 확인하였다. N,N-dimethylformamide의 경우 33~37 mm부근에서 ΔBS값이 크게 증가하였으며 시간 경과에 따라 하층부로 이동하는 결과를 보였는데 이는 상층부에서부터 에어로겔 입자들의 응집이 일어나며 응집한 입자의 자유침전에 의한 결과로 여겨진다.

Methyl ethyl ketone도 N,N-dimethylformamide과 유사한 거동을 나타내었으나, 시간에 따른 입자 응집 정도는 N,N-dimethylformamide보다 매우 적은 결과를 나타내었다. 반면에 toluene의 경우에는 상층부의 ΔBS값이 크게 증가하고 시간 경과에 따라 하층부로 이동하는 결과를 보였으나 최하층부의 ΔBS값은 큰 변화가 없어 상층부에서부터 에어로겔 입자의 응집이 빠르게 이루어지나 응집된 입자의 자유침전은 거의 일어나지 않은 결과로 여겨진다. 상기의 결과를 바탕으로 5종의 유기용매 중 iso-propyl alcohol, n-hexanol, methyl ethyl ketone 용매에서의 에어로겔 분산안정성이 비교적 양호하게 나타난 것으로 생각된다.

Figure 3은 에어로겔이 용매에 분산되었다가 다시 건조된 후의 입자의 응집상태를 SEM으로 관찰한 것이다. Figure 3에 의하면 용매에 분산되지 않았던 원래의 에어로겔 입자 분말의 응집상태에 비해 N,N-dimethylformamide, iso-propyl alcohol, methyl ethyl ketone은 응집상태의 변화가 크지 않으나 toluene에서 다소의 응집이 관찰되고, n-hexanol의 경우에는

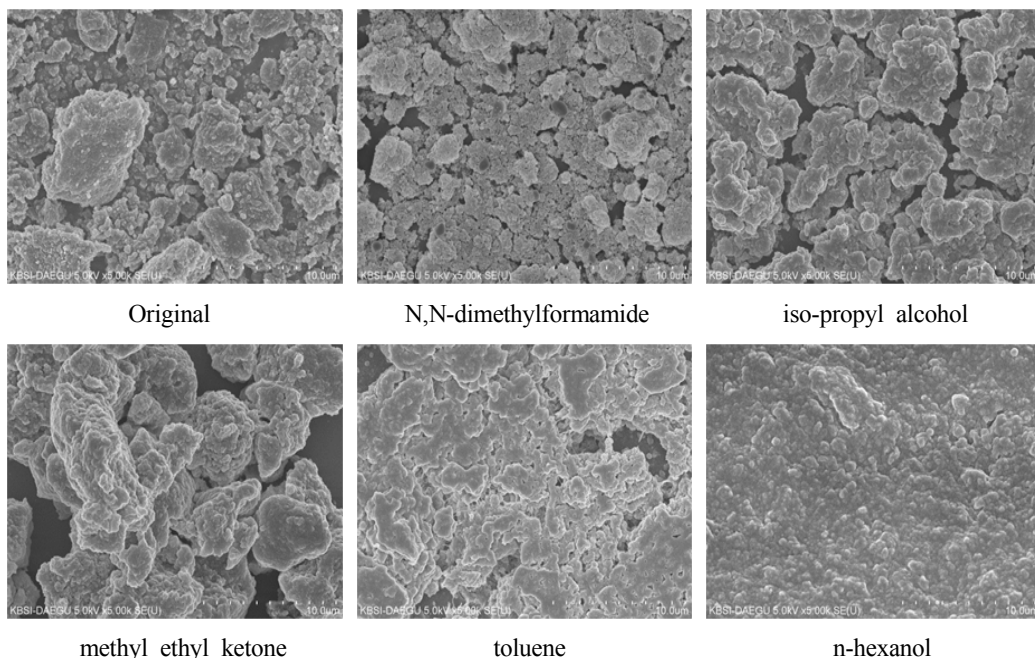


Figure 3. SEM images of silica aerogel after drying of solvents (×5,000).

입자분말 전체가 뭉쳐서 큰 덩어리를 형성하는 상태가 관찰되었다. 따라서 Turbiscan과 SEM의 결과를 종합해 보면, iso-propyl alcohol, methyl ethyl ketone이 에어로겔의 분산 및 밀링공정을 위해서 선택될 수 있다고 판단된다. 그러나 궁극적으로 본 연구에서 사용한 폴리우레탄 수지의 희석용매 및 미세다공 형성을 위한 에멀전 제조에 methyl ethyl ketone과 toluene이 사용된다는 점을 고려하면 여기서는 methyl ethyl ketone을 적정용매로 선정하고 이를 에어로겔의 밀링과 폴리우레탄 수지 배합용으로 사용하는 것이 적절하다고 판단된다.

선정된 methyl ethyl ketone 일정량(100g)에 대해 실리카 에어로겔의 양을 10, 20, 30, 35, 40g으로 변화시켜가며 서로 다른 농도의 에어로겔 분산액을 제조하고, 이 분산액의 점도와 3분 밀링장치에 의한 밀링성을 평가하였다. Table 2에 의하면 에어로겔의 사용량이 증가함에 따라 분산액의 점도는 300cP에서 24,300cP까지 증가한 것으로 나타났다. 이들 분산액의 밀링성을 육안 판정한 결과 에어로겔 사용량이 20g(17%) 이하인 경우에는 점도가 낮아 분산액이 밀링 롤러 사이로 흘러내리는 경향이 심하여 효과적인 밀링이 이루어지지 않는 것으로 판정되었다. 반대로 에어로겔 35g(26%) 이상의 경우에는 밀링이 이루어지기는 하지만 점도가 상대적으로 높아 밀링공정의 효율성과 밀링의 균일성에 있어서 다소 불리할 것으로 판정되었다. 따라서 methyl ethyl ketone 100g에 대해 실리카 에어로겔의 사용량 30g을 적정 첨가농도로 결정하였으며, 이 조성에 의한 에어로겔 분산액을 M30이라 명명하고 이어지는 폴리우레탄 멤브레인 제조용의 에어로겔 배합원액으로 사용하였다.

### 3.2 실리카 에어로겔 함유 폴리우레탄 멤브레인의 제조 및 성능평가

본 연구의 목적은 섬유분야에서 코팅 및 라미네이

팅용으로 많이 사용되는 폴리우레탄 수지에 실리카 에어로겔을 혼입시킴으로써 생성된 코팅층의 경량성을 높이는 것과 동시에 물성의 저하를 방지 또는 최소화하면서 투습방수성 그리고 공기투과도 등의 성능을 유지 또는 향상시키는 것이다. 따라서 앞에서 조건 확립한 에어로겔 분산액 M30의 배합량을 다르게 변화시키면서 혼입하여 최종적으로 서로 다른 에어로겔 고형분 함량을 가지는 폴리우레탄 멤브레인을 제조하고 이들의 물성 및 기능성의 변화를 조사하였다.

에어로겔 분산액 M30의 배합량은 0g(미첨가)에서부터 20g, 30g, 50g로 변화시켰으며, 기본적인 폴리우레탄 수지와 첨가제의 양은 동일하게 하였다. 또한 수지와 에어로겔이 모두 포함된 최종 폴리우레탄 수지 혼합액은 멤브레인 필름 캐스팅을 위한 적정 점도 조절을 위해 필요에 따라 toluene을 일부 첨가하였다. 멤브레인 필름 형성을 위해 수지 조성액에 사용된 각종 용매류와 물은 건조 후 모두 제거되며 최종적으로 멤브레인에 잔존하는 성분은 폴리우레탄과 비휘발성 첨가제, 그리고 에어로겔 뿐이다. 에어로겔 미첨가 시료를 포함하여 모두 4가지의 미세다공형 폴리우레탄 멤브레인이 형성되었으며, 이들 내의 에어로겔 고형분 함량은 각각 0%(미첨가), 11.0%, 15.7%, 그리고 23.7%였다. 수지 조성액의 성분별 배합비율과 최종 멤브레인내의 고형분 함량을 Table 3에 정리하여 나타내었다.

Table 3의 조성에 따라 형성된 미세다공형 폴리우레탄 멤브레인의 특성과 경량성 그리고 투습방수성 등을 조사하여 Table 4에 정리하였다. 본 연구의 가장 중요한 목표인 경량성에 있어서는 에어로겔 미첨가에 비해 모두 향상되어 에어로겔 고형분 함량에 따라 약 13%, 23%, 30%로 점차 향상되었다.

실리카 에어로겔의 함량이 증가함에 따라 공기투과도는 지속적으로 증가하는 경향을 보였으나, 투습성

Table 2. Milling processability according to the relative amount of silica aerogel in methyl ethyl ketone

Weight (g)		Concentration of aerogel (%)	Viscosity (cP)	Processability
MEK	Aerogel			
100	10	9	300	bad
	20	17	820	bad
	30	23	11,000	good
	35	26	18,500	normal to good
	40	29	24,300	normal

Table 3. Mixing composition of polyurethane membrane according to the relative amount of silica aerogel

Components	Aerogel 0% content		Aerogel 11.0% content		Aerogel 15.7% content		Aerogel 23.7% content		
	Before drying	After drying	Before drying	After drying	Before drying	After drying	Before drying	After drying	
	Mixed weight (g)	Solid content (%)	Mixed weight (g)	Solid content (%)	Mixed weight (g)	Solid content (%)	Mixed weight (g)	Solid content (%)	
PU resin	100.0	81.1	100.0	72.0	100.0	68.2	100.0	61.7	
Additives*	11.5	18.9	11.5	17.0	11.5	16.1	11.5	14.6	
MEK <sup>a</sup>	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	
Toluene <sup>a</sup>	25.0	0.0	25.0	0.0	25.0	0.0	25.0	0.0	
Water <sup>a</sup>	40.0	0.0	40.0	0.0	40.0	0.0	40.0	0.0	
M30	Aerogel	0.0	0.0	4.6	11.0	6.9	15.7	11.5	23.7
	MEK <sup>b</sup>	0.0	0.0	15.4	0.0	23.1	0.0	38.5	0.0
Toluene <sup>c</sup>	0.0	0.0	35.0	13.3	53.0	0.0	70.0	0.0	
Total	181.5	100.0	236.5	100.0	264.5	100.0	301.5	100.0	

\*Additives : R446 3.0g, CRL100 5.0g, STM 1.0g, AS41 0.5g, UH651 2.0g

a : solvent for resin emulsion

b : solvent for aerogel paste

c : solvent for viscosity control of final resin

Table 4. Physical properties of polyurethane membranes containing silica aerogel inside

Physical properties	Aerogel 0.0%	Aerogel 11.0%	Aerogel 15.7%	Aerogel 23.7%
Thickness ( $\mu\text{m}$ )	30 $\pm$ 1			
Moisture vapor permeability ( $\text{g}/\text{m}^2\cdot 24\text{hr}$ )	14,692	16,475	19,873	15,626
Air permeability ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2\cdot \text{sec}$ )	0.040	0.149	0.166	0.137
Water penetration resistance ( $\text{mmH}_2\text{O}$ )	3,140	3,280	1,600	1,800
Weight	Absolute ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	30	26	23
	Relative (%)	100.0	86.7	76.7

은 15.7% 함량까지는 증가하다가 그 이상의 함량에서는 오히려 다시 감소하는 경향을 나타내었다.

이러한 현상은 본 연구에서 사용한 실리카 에어로겔이 소수성을 나타내기 때문으로 생각되는데, 공기의 투과는 에어로겔의 친수 또는 소수성에 영향을 받지 않고 단순히 공기의 투과가 가능한 미세기

공의 절대량에 의존하므로 에어로겔 함량에 따라 계속 증가하는 반면, 투습성은 기체상태의 수분이 통과하는 것이므로 에어로겔의 미세기공의 양과 소수성적인 특성에 동시에 영향을 받으므로 어느 정도까지는 미세기공의 양이 많아짐에 따라 투습성이 증가하다가 일정량 이상에서는 소수성이 오히려 큰

영향을 끼쳐 투습도가 더 증가하지 않고 오히려 감소하는 경향을 나타내는 것으로 판단된다. 그러나 내수압의 변화에 있어서는 액체상태의 물이라고 하더라도 압력이 가해지는 상태에서의 물의 통과를 측정하기 때문에 실리카 에어로겔 자체의 기공 또는 에어로겔의 혼입에 의한 멤브레인 내의 공극 형성 등으로 인해 에어로겔 함량의 증가에 따라 내수압이 저하하는 경향을 나타낸다.

그러나 에어로겔 함량 11.0%까지는 거의 유지되거나 약간 증가하는 경향을 보이다가 그 이상의 함량에서 내수압이 심각하게 저하하므로 결과적으로 본 연구에서 사용한 폴리우레탄 수지의 경우 실리카 에어로겔 고형분 함량 11.0%까지는 혼입이 가능하며 이 경우 내수압은 거의 동일한 수준으로 유지하는 수준에서 약 13%의 경량성 향상과 함께 공기투과도 및 투습성의 향상도 병행할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

극초경량 실리카 에어로겔의 폴리우레탄 멤브레인으로서의 적용특성을 조사하였다. 에어로겔을 멤브레인에 적용하기 위해 사전에 밀링공정이 필요하며 이 밀링공정에의 적용특성을 확인하기 위해 분산용매 선정시험과 밀링공정성을 평가한 결과 methyl ethyl ketone 100g에 대해 에어로겔 30g의 조성이 최적조건으로 확립되었다. 이렇게 결정된 조성으로 에어로겔 분산액을 제조하고 밀링공정을 실시한 후 수지에 대한 혼합비율을 조절해 가며 폴리우레탄 멤브레인을 제조하였다. 제조된 멤브레인의 성능을 조사한 결과 실리카 에어로겔 고형분 함량 11.0%까지는 혼입이 가능한 것으로 확인되었으며 이 경우 내수압은 거의 동일한 수준으로 유지하는 수준에서 약 13%의 경량성 향상과 함께 공기투과도 및 투습성의 향상도 병행할 수 있는 것을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 중소기업청 융복합기술개발사업(과제번호 : S2023205)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

1. Y. O. Choi and D. Y. Lim, Light Weight Materials

- for Automobiles, *Fiber Technology and Industry*, **14**(1), 18(2010).
2. Y. S. Jung, K. Y. Kim, J. W. Han, and Y. H. Bang, Ultra Light Weight Carbon Fibers, *Fiber Technology and Industry*, **14**(1), 27(2010).
3. K. W. Oh and H. W. Choi, Acoustic Characteristics of Ultra-porous Aerogel/Fiber Composite Materials, *Textile Science and Engineering*, **46**(1), 48(2009).
4. H. Yokogawa and M. Yokoyama, Hydrophobic Silica Aerogels, *J. of Non-Crystalline Solids*, **186**, 23(1995).
5. L. W. Hrubesh, Aerogel Application, *J. of Non-Crystalline Solids*, **225**, 335(1998).
6. M. Schmidt and F. Schwertfeger, Applications for Silica Aerogel Products, *J. of Non-Crystalline Solids*, **225**, 364(1998).
7. S. Y. Yang, H. A. Kim, and S. J. Kim, The Synthesis of One-step Type Hydrophilic Non-porous Polyurethane Resin and the Physical Property of its Coated Fabric for the Garment, *Textile Coloration and Finishing(J. of Korea Soc. Dyers and Finishers)*, **23**(2), 131(2011).
8. B. K. Kim and S. J. Kim, Synthesis and Binder Application of Aqueous Polyurethanes to Non-woven Fabrics, *Textile Coloration and Finishing (J. of Korea Soc. Dyers and Finishers)*, **5**(3), 188 (1993).
9. J. H. Hwang, K. S. Oh, and N. S. Yoon, Fluoroalkylation of the Surface of Hydrophilic Polyurethane Breathable Membrane, *Textile Coloration and Finishing(J. of Korea Soc. Dyers and Finishers)*, **25**(1), 30(2013).
10. C. Lemarchand, P. Couvreur, C. Vauthier, D. Costantini, and R. Gref, Study of Emulsion Stabilization by Graft Copolymers using the Optical Analyzer Turbisca, *International J. of Pharmaceutics*, **254**(1), 77(2003).
11. H. I. Kim, Y. H. Hong, and S. M. Park, Development of PET Flane Retardant Sheets for Industrial Materials by Contro of Manufacturing Process, *Textile Coloration and Finishing(J. of Korea Soc. Dyers and Finishers)*, **21**(4), 46(2009).