<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.7.449 ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

이끼필터를 이용한 안개 포집/제거 시스템

오선종* · 박민용* · 김완두* · 임현의*†
* 한국기계연구원 나노자연모사연구실

Fog Collection/Removal System Using a Moss Filter

Sunjong Oh*, Minyong Park*, Wandoo Kim* and Hyuneui Lim*†
* Department of Nature-Inspired Nanoconvergence Systems, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received February 15, 2016 ; Revised April 5, 2016 ; Accepted April 6, 2016)

Key Words: Fog-removal System(안개 제거 시스템), Polyolefin Mesh(폴리올레핀 그물망), Moss Filter(이끼 필터), Water Absorption (수분 흡수), Porous Structure (기공 구조)

초록: 안개는 교통시스템에서 경제적 손실을 초래하고 대기오염물질과 결합하여 건강에 문제를 일으킨다. 안개 제거 시스템은 개발노력에도 불구하고 대부분 발생한 안개를 모니터링 후 제거하도록 구성되어 있으며, 지속적으로 시스템을 유지하기 위한 에너지 공급과 유지 보수가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 안개제거 시스템의 한계를 극복하기 위하여 이끼필터(이끼를 결합한 폴리올레핀 그물망)를 응용하는 안개 제거 방법을 제시하였다. 서로 다른 표면구조를 가지는 3가지 이끼의 수분 흡수율을 측정하고 이끼구조와의 상관관계를 살펴보았다. 가장 작은 기공의 직경과 가장 큰 총 기공의 내부 표면적을 가지는 공작이끼가 높은 수분 흡수율을 가짐을 확인 후, 공작이끼로 안개 제거 필터를 만들어 안개제거 포집/제거에 사용되는 기존의 폴리올레핀 그물망과 성능을 비교하여 보았다. 본 논문에서 제시된 이끼필터를 이용한 안개 제거 시스템은 에너지 없이 지속적으로 안개를 제거할 수 있는 경제적이면서도 친환경적인 방법이다.

Abstract: Fog causes economic losses in transportation. It also results in health problems when it is combined with air pollutants. Considerable research efforts have focused on developing fog removal systems. However, most systems operate themselves after monitoring the fog. Additionally, continuous energy supply and maintenance are required to retain the fog-removal efficiency of the system. This study included the demonstration of a moss filter (a polyolefin mesh interlaced with moss) as a fog-removal method overcoming the limitations of the fog removal system. Three types of mosses with different surface structures were investigated to elucidate the relation between the moisture absorption rate and the structures. Among the different moss types, *Hypopterygium japinicum* showed the highest efficiency based on the smallest pore diameter and the largest total pore area. The visibilities with the moss filter and the polyolefin mesh were compared to perform the fog removal tests. The moss filter could provide a cost-effective and eco-friendly fog removal system with sustainability.

1. 서 론

안개는 낮과 밤의 일교차에 의해서 대기 중의 수증기가 응결하여 지표 가까이에서 작은 물방울이 떠 있는 현상이다.(1) 안개는 피할 수 없는 자연현상 중의 하나로써 자동차, 비행기, 배 등의 교통수단 운행 시, 제한된 가시거리를 만들어 많은 사회적 손실을 일으키기 때문에 이를 줄이려는 노력들이 진행되고 있다. 또한, 안개는 공장지대나 도심에서 발생하는 연기나 먼지와 결합하여 스모그라는 대기오염을 일으키기 때문에 이도 해결해야 할 과제 중 하나이다.(2)

기존의 안개제거 방법으로는 염화칼슘 초미립자(3)나 건조공기(4)를 이용한 안개제거 시스템 또는 안개 차단망(5)을 이용한 방법들이 있다. 기존의 안개

† Corresponding Author, helim@kimm.re.kr
ⓒ 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

제거 시스템들은 설치비용, 모니터링 및 지속적인 관리 등이 발생하는 문제점들이 있어 아직 널리 사용되지는 않고 있다. 현재 일부 상습 안개 발생 구간에서는 안개 방지 시스템으로 안개 차단망을 설치하여 평균 시정거리가 향상된다는 보고[6]가 있으나 유동이 거의 없는 상태에서 발생하는 복사안개에 대해서는 효과가 없어 보다 능동적이고 성능이 우수한 안개제거 시스템이 요구되고 있다.

한편으로는 자연현상적으로 발생하는 안개를 효과적으로 포집하여 고온, 가뭄 등의 이상기후변화와 인구증가로 인한 물 부족의 해결 방안으로 사용하고자 제안되었다. 특히, 이러한 예들은 자연에서 찾을 수 있기 때문에 자연의 표면을 모사한 연구가 여러 그룹에서 진행 중이다.

자연에서 관찰할 수 있는 대표적인 안개 포집 표면은 극한 지역에서 안개를 모아 수분 흡수를 하는 나미브 사막의 딱정벌레(Namib desert beetle)이다. 나미브 사막의 딱정벌레는 등 표면에 돌기(bump)형상과 함께 친수와 소수가 함께 존재하는 복합적인 성질을 가지고 있어 안개 포집에 효과적이라는 사실이 발표되었다.[7] 또한 표면에너지 차이로 응결된 이슬을 효과적으로 결합/제거하는 거미의 거미줄,[8] 그루브(groove)패턴을 이용하여 응축된 미세물방울을 한쪽 방향으로 이동시켜 물을 모을 수 있는 선인장의 가시,[9] 미세관을 통해 수분을 쉽게 흡수하고 이동시키는 도마뱀의 피부[10]는 에너지의 소모 없이 대기 중의 수분을 효과적으로 포집(collection)하고 병합(coalescence)시킬 수 있는 뛰어난 표면들로 보고되고 있다. 따라서, 이러한 자연의 표면을 모사하여 수분 포집 기능 및 표면의 젖음성을 제어[11~13]하고자 하는 많은 연구들이 진행 중이다. 특히, 폴리올레핀 그물망(polyolefin mesh)을 이용한 수분 포집 시스템은 에너지를 사용하지 않고 설치비용도 매우 저렴한 방법으로 많은 주목을 받고 있다. MIT의 Cohen group에서는 폴리올레핀 그물망의 최적화된 디자인, 예를 들면 바람의 세기에 따른 구멍의 크기, 그물망의 젖음성 정도, 그물망의 두께 등을 제시하여 안개를 이용한 수분 포집의 효율을 높이고자 하였다.[14] 하지만 폴리올레핀 그물망을 이용한 수분 포집 시스템에는 아직도 개선될 가능성이 많이 남아 있다.

폴리올레핀 그물망을 응용하여 성능을 개선시킬 수 있는 방법으로 자연의 표면인 이끼가 있다. 가장 널리 잘 알려진 수분을 흡수하는 식물인 이끼는 뿌리 없이도 수분을 포집하여 살아가는 표면[15]을

Fig. 1 Schematic image of moss

가지고 있다. 이끼의 잎은 친수 또는 초친수 특성을 나타내며 표면은 기공구조(porous structure)를 가지고 있어, 건조 중량대비 최대 3000%까지 수분을 흡수할 수 있는 것으로 알려져 있다.[16] 또한 이끼는 완전히 건조된 상태에서도 사멸하지 않고 수분이 공급되면 다시 광합성을 하여 생장을 지속하는 특성이[15] 있어 매우 친환경이며 지속 가능한 수분 흡수 표면으로 활용 가능성이 높다.

본 연구에서는 폴리올레핀 그물망에 자연의 표면을 접목시켜 수분 포집/제거가 가능한 안개제거 필터를 개발하였다. 3종의 이끼인 톳이끼, 우산이끼, 공작이끼의 습도에 따른 수분을 흡수하는 능력을 측정하여, 이끼 잎 표면의 기공 구조 및 기공 내부의 표면적과의 관계를 살펴보았다. 또한, 가장 우수한 수분 흡수 성능을 보인 공작이끼를 폴리올레핀 그물망에 부착하여 이끼 필터(moss filter)를 제작한 후 안개제거 성능을 실험하여 친환경 이끼필터가 안개 포집/제거 효율이 우수한 지속가능한 시스템으로써 사용 가능함을 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 이끼의 구조를 개략적으로 나타낸 그림이다. 이끼는 헛뿌리, 줄기, 잎, 자루 및 포자낭으로 이루어져 있으며, 일부 이끼는 헛뿌리를 통해서 수분을 흡수하지만 대부분의 이끼는 잎 표면 전체를 통해서 수분을 흡수하는 것으로 알려져 있다.[15] 본 실험에 사용된 톳이끼, 우산이끼, 공작이끼의 서식 환경을 정리하면 다음과 같다.

- 톳이끼(*Rhacocarpus purpurascens*): 주로 열대지방에 분포되어 있으며 태양광이 노출되는 돌이나 높은 산에 서식
- 우산이끼(*Marchantia polymorpha*): 전세계에 분포하며 습기가 있는 축축한 흙과 바위에 서식
- 공작이끼(*Hypopterygium japinicum*): 중국, 한국, 일본에서 주로 발견되며 나무 줄기나 암석, 토양, 부패한 통나무에 서식

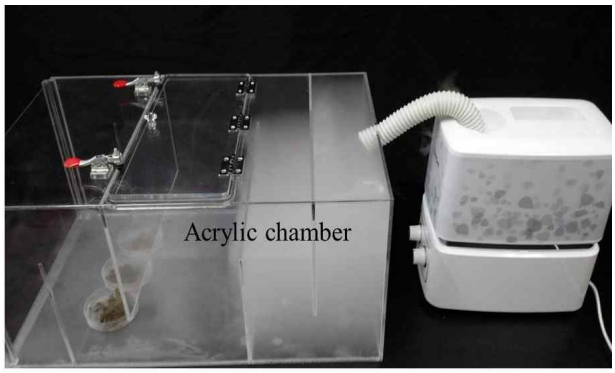

Fig. 2 Experimental setup to measure the water absorption characteristic of different types of mosses

이끼 잎 표면의 미세구조는 field-emission scanning electron microscope(FE-SEM, Nano Nova 200, FEI)를 이용하여 관찰하였다. 이끼 잎의 표면과 수분 흡수율의 관계를 이해하기 위해 Mercury Porosimeter(Autopore Ⅳ 9500, Micromeritics)를 이용하여 이끼 잎에 존재하는 기공의 직경 그리고 총 기공의 내부 표면적을 측정하였다.

이끼의 종류에 따른 이끼의 수분 흡수 실험을 위해 이끼시료는 흙을 털어낸 후 물로 세척하였고, 동일한 수분 흡수 정도를 갖도록 하기 위하여 일주일간 온도 24℃, 상대습도 50% 조건에서 건조시켰다. 이끼의 수분 흡수 실험은 건조된 이끼를 챔버 안에 넣고 조절된 습도분위기에서 시간별로 흡수한 수분의 양을 측정하여 실험 전·후의 이끼 중량차를 계산함으로써 결과를 얻었다. 실험에 사용한 이끼의 건조중량은 0.3 g이었다.

Fig. 2는 실험을 위하여 자체 제작한 아크릴 챔버(W: 400 mm × H: 300 mm × L: 600 mm)를 보여준다. 수분 공급은 가습기를 이용하였으며, 가습기에서 나온 수증기가 챔버 내에서 균일하게 분산되도록 유로를 형성하였다. 습도 조절은 이끼 시료들 옆에 온·습도계를 위치시켜 모니터링 하면서 가습의 양을 제어함으로써 실험에서 필요한 조건을 가지도록 하였다. 같은 조건으로 건조된 이끼를 상대습도가 60, 80, 100%인 분위기에서 수분 흡수가 되도록 하면서 30 분, 1시간, 2시간, 3시간, 4시간, 5시간 동안 흡수한 수분의 양을 측정하였다. 이끼의 수분 흡수량은 측정감도가 ±0.02 g인 전자저울(PW4KRC3-2, HBM)로 측정하였고, 각 실험은 3회 이상 반복 측정하였다.

안개 제거용 이끼필터는 폴리올레핀 그물망에 이끼를 부착하여 제작하였다. 폴리올레핀 그물망은 Fog Quest 단체의 Raschel mesh를 사용하였다.

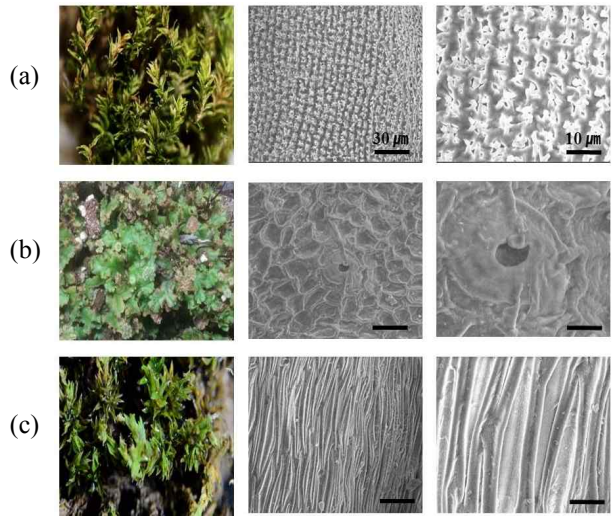

Fig. 3 Photographs and SEM images of (a) *Rhacocarpus purpurascen*, (b) *Marchantia polymorpha,* and (c) *Hypopterygium japonicum* with different magnifications. Scale bars indicate a size of 30 μm and 10 μm

이끼를 그물망에 부착하기 위해서 이끼 그래피티(Moss graffiti)라고 불리는 자연친화적인 방법을 사용하였는데, 접착제로는 이끼(10 g), 요거트(20 g), 설탕(3 g), 물(400 ml)을 믹서기에 함께 갈아 사용하였다. 준비된 접착제 용액을 먼저 그물망에 바른 후 건조이끼를 부착하면 접착력이 우수한 이끼 필터가 제작된다.

3. 실험결과 및 고찰

먼저 3가지 종인 이끼들의 젖음성 성질을 살펴보았다. 모든 이끼들은 표면에 물방울을 떨어뜨렸을 때 모두 수분을 흡수하는 성질을 보였으며 수분이 흡수되면서 잎의 부피가 팽창하는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 3은 이끼들의 실물모습을 보여주는 사진들과 전자현미경으로 잎의 표면 구조를 관찰한 결과 사진들이다. 각 이끼들은 종류에 따라 서로 상이한 패턴구조를 가지고 있었는데, 톳이끼의 경우 기공구조들이 선패턴을 이루도록 배열되어 있고, 우산이끼의 경우는 10 μm 정도의 구멍을 중심으로 물결무늬를 가지고 있으며, 공작이끼의 경우에는 선모양의 주름구조를 가지고 있음을 관찰할 수 있었다. 분석을 통해 밝혀진 이끼 잎이 지닌 표면구조와 서식환경과의 상관관계는 명확하지 않고, 이끼들이 왜 종류마다 특징이 다른 표면구조를 가지는지는 설명하기 어렵다. 하지만, 다른 식물의 잎과는 달리 3종의 이끼 잎들은 모두 수분 흡수를

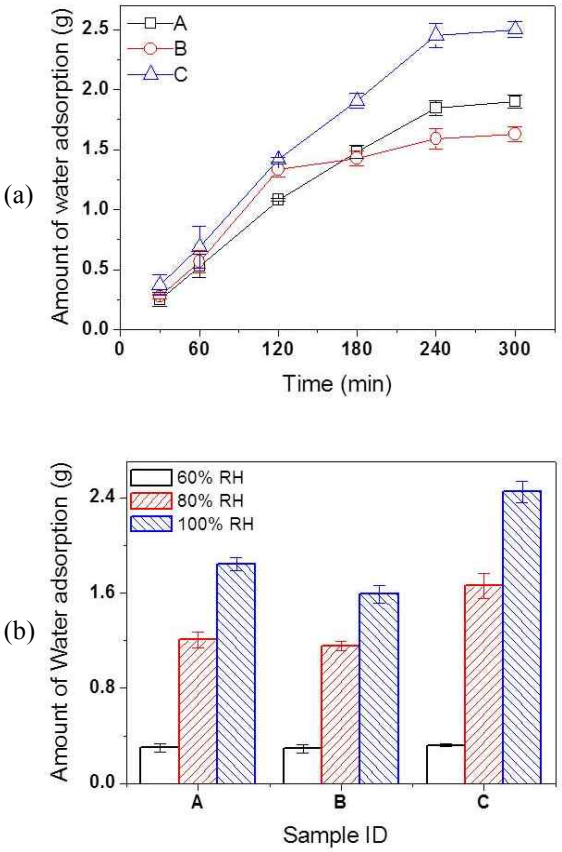

Fig. 4 (a) Water absorption amount of the mosses according to time under the temperature of 24℃ and relative humidity of 100% condition. (A: *Rhacocarpus purpurascen*, B: *Marchantia polymorpha* and C: *Hypopterygium japonicum*) The weight of dried moss is 0.3g for each case. (b) Amount of water absorption depending on the relative humidity. The humid exposure time is 4 hours

돕기 위한 친수의 젖음성과, 수분 흡수 시 수분을 충분히 흡수하고, 잎 안에 보유하기 위하여 부피가 팽창되기 위한 기공구조나 주름구조를 가지고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 4(a)는 온도 24℃, 상대습도 100%의 조건에서 수분을 흡수한 이끼들의 시간에 따른 수분 흡수량을 측정한 결과이다. A는 톳이끼, B는 우산이끼, 그리고 C는 공작이끼를 가리킨다. 시간과 습도에 따른 이끼들의 수분흡수량 측정 실험은 동일 시료로 10회 이상 반복한 실험결과이며 이때 실험오차는 최대 ±5% 미만이었다. 모든 이끼들이 시간이 지남에 따라 수분 흡수량이 선형적으로 증가하는 경향을 보였으나, 4시간 이후부터는 포화가 되어 수분 흡수량의 변화가 거의 없었다. 2시간 측정 시까지 수분 흡수량의 크기 순서는 공작이끼, 우산이끼, 톳이끼의 순으로 측정었으나, 3시간부터

Table 1 Structural property of the mosses and water absorption amount

	Rhacocarpus purpurascen	*Marchantia polymorpha*	*Hypopterygium japonicum*
Pore diameter (nm)	262	460	225
Total Pore area (m^2/g)	1.64	2.14	4.57
Amount of water adsorption (g)*	1.8	1.6	2.5

* at T: 24℃, RH: 100%, and time: 4 hours

는 순서가 달라지기 시작하여, 포화상태에 가까운 흡수가 일어난 4시간에서는 공작이끼(2.5 g), 톳이끼(1.8 g), 우산이끼(1.6 g)의 순으로 측정되었다. 이는 공작이끼가 건조 중량대비 약 830%까지 수분을 흡수한 결과이다. Fig. 4(b)는 서로 다른 습도에서 4시간 동안 각 이끼들의 수분 흡수량을 측정한 결과로, 습도가 낮을수록 수분 흡수량은 적었다. 또한, 낮은 습도인 60 %에서는 모든 이끼들이 비슷한 수분 흡수량을 보임에 반해, 습도가 증가하자 수분 흡수량에 차이를 보였다. 공작이끼는 모든 상대습도 조건에서 가장 높은 수분 흡수량을 보임으로써, 수분 흡수능력이 가장 우수한 것을 알 수 있다.

Table 1은 3종 이끼 잎 표면의 평균 기공 직경과 총 기공 내부 단면적을 Porosimeter로 측정한 결과이다. 이끼 잎의 평균 기공 직경은 225 nm (공작이끼), 262 nm (톳이끼), 그리고 460 nm (우산이끼)의 순으로 측정되었다. 그리고, 기공의 내부를 원통형으로 가정하였을 때, 이끼 질량당 총 기공의 내부 표면적은 톳이끼(1.64 m^2/g), 우산이끼(2.14 m^2/g), 공작이끼(4.57 m^2/g)로 공작이끼의 기공 표면적이 기공직경이 비슷한 톳이끼에 비해 3배정도 큰 것으로 측정되었다. 이러한 결과는 공작이끼의 기공이 깊이 방향으로 톳이끼에 비해 깊다는 걸 유추할 수 있게 해 주는데 이를 상대습도 100% 에서 4시간 측정한 수분 흡수량과 비교하여 보면, 기공의 직경이 작아 모세관 현상이 잘 일어나는 이끼의 구조를 가질수록 수분 흡수량이 많고 더불어 내부 기공 표면적이 넓을수록 즉, 기공이 깊을수록 수분 흡수량이 크다는 사실을 알 수 있다.

앞의 실험에서 가장 우수한 수분 흡수 능력의 결과를 보여준 공작이끼를 이용하여 안개 제거 효과를 살펴보았다. 안개 제거 효과를 관찰하기 위하여 투명 아크릴 챔버(W: 80 mm × H: 80 mm × L: 400 mm)를 제작하여 실험을 진행하였다.

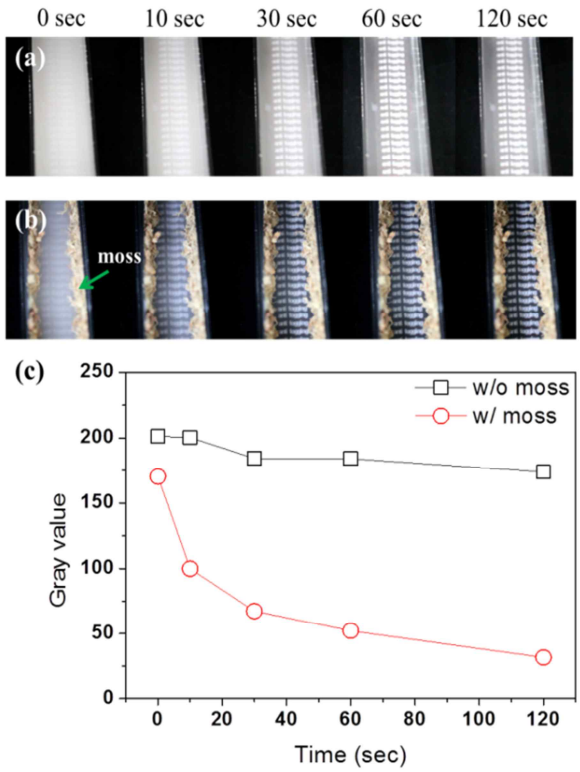

Fig. 5 Real time images of visibility changes inside chamber according to the time (a) without moss, (b) with moss on the wall, and (c) gray values. Gray values are obtained using the Image J software without and with moss condition; high gray value means low visibility. Square indicates the value without moss and circle indicates the value with moss on the wall.

먼저 이끼를 챔버 벽면에 부착한 경우와 아크릴 표면을 그대로 수증기에 노출시킨 두 경우를 비교하여 보았다. 실험은 가습기를 이용하여 각각의 챔버에 120초 동안 수증기를 주입한 후 통풍구를 막아 공기의 유동이 없이 닫힌 분위기 내에서 수증기가 사라지는 현상을 120초 동안 실시간으로 관찰하였다. 아무것도 부착하지 않은 상태(Fig. 5(a))와 공작이끼를 챔버 벽면에 부착한 상태(Fig. 5(b))에서 안개 제거 정도를 비교한 결과, 이끼를 벽면에 부착한 챔버는 같은 조건으로 수증기를 공급하여도 공급과 동시에 수증기가 흡수되어, 초기부터 시야확보 정도가 다름을 알 수 있다. 또한 시간이 지남에 따라 두 챔버 내에서의 시야확보 정도는 확연하게 차이가 나며 10초만 지나도 공작이끼가 있는 챔버 내에서는 시야가 확실히 확보가 됨을 알 수 있다. 이끼가 없는 챔버에서도 시간이 지남에 따라 시야가 좋아지는 이유는 시간이 지남에 따라 일부 수증기가 서로 결합되고 챔버 내부 벽 표면에 응축되기 때문인 것으로 사료된다.

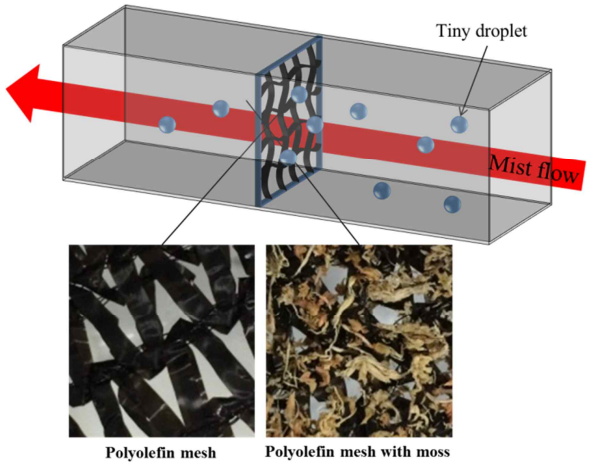

Fig. 6 Schematic image of fog removal experimental setup and photographs of polyolefin mesh filter and moss filter

Fig. 5(c)는 Fig. 5(a) 및 (b)의 측정 결과를 정량적으로 나타내기 위하여 이끼 유/무에 따른 이미지를 image J 소프트웨어를 이용하여 비교 분석한 결과이다. 수증기량이 많아 챔버 안이 불투명할수록 Gary value가 높고, 수증기량이 작아 시야확보가 될수록 Gray value가 낮다. 챔버 내부벽면에 이끼가 없는 경우는 시간에 따른 Gray value 값에 변화가 거의 없었으며, 이끼가 있는 경우는 시간에 따라 Gray value 값이 계속 감소함을 알 수 있다. 이는 챔버 안의 수증기가 이끼에 흡수되면서 챔버 안이 투명해졌다는 것을 명확히 설명해 줄 수 있다.

두 번째로 안개제거 필터를 제작하여 수증기의 유동이 있는 상태에서 필터 유무와 필터 종류에 따른 안개 제거 효과를 살펴보았다. 투명아크릴 챔버 두 개가 서로 연결되도록 제작하고 연결 부분에 제작된 폴리올레핀 필터와 폴리올레핀 그물망에 이끼를 부착한 이끼필터를 위치하도록 한 후, 가습기를 이용하여 연속적으로 수증기를 통과시키면서 시간에 따른 시야변화를 실시간으로 관찰하였다. 폴리올레핀 그물망은 접촉각이 120°인 폴리에틸렌 필름을 그물망으로 만든 형태이며, 여기에 공작이끼를 부착하여 이끼필터를 만들었기 때문에 이끼필터의 경우 그물망 사이의 간격이 좁아진 것을 Fig. 6의 사진에서 볼 수 있다.

Fig. 7은 안개 포집/제거 필터 장치를 이용하여 시간에 따른 시야변화를 관찰한 실험 결과이다. 아크릴 관 중간에 필터가 없는 경우(a), 폴리올레핀 그물망만 있는 경우(b) 그리고 이끼필터가 있는 경우(c)이며, 시야확보에 대한 정량적인 분석은

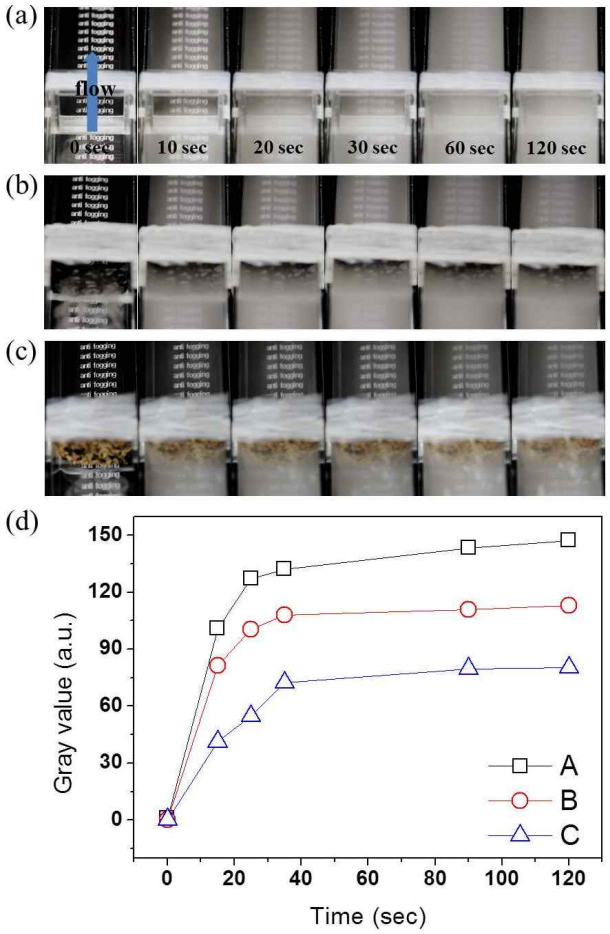

Fig. 7 Real time images of visibility changes over the time (a) without filter, (b) polyolefin only filter, (c) moss combined polyolefin filter and (d) Gray value using the Image J software over time (A: no filter, B: polyolefin filter and C: moss filter

image J 소프트웨어를 이용하여 그래프로 나타내었는데 (d)는 필터를 통과한 후 값을 나타낸다. 계속적으로 가습기를 통한 수증기의 공급이 진행됨에도 불구하고, 폴리올레핀 그물망과 이끼필터를 지나면 시야가 확보됨을 결과에서 알 수 있다. 시간이 더 지난 후에는 연속적으로 응축과 흡수가 되면서 통과하는 수증기 량이 일정하게 유지 되는 것을 확인하였다. 결과에서 명확히 보여주듯이, 필터가 있는 경우는 Gray value 가 필터가 없는 경우에 비해 상대적으로 낮게 측정되었으며, 이끼필터를 사용하는 경우 Gray value 가 더 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 세계적으로 안개 포집용으로 많이 사용되고 있는 폴레올레핀 그물망보다 이끼필터를 사용하는 경우 그 성능이 현저하게 증가되었다는 결과를 보여주는 내용이다. 폴레올레핀 그물망의 경우 표면에서 일어나는 응축으로 수증기가 제거되지만, 이끼필터는 필터에 응축되는 효과와 이끼가 수증기를 흡수하는 현상으로 보다 효과적으로 수증기를 포집하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

교통과 환경의 위험요소로서 밤낮의 온도차 때문에 발생하는 안개를 효과적으로 제거하기 위해 본 연구에서는 친환경적인 재료인 이끼를 이용하여 안개제거 효과를 관찰하였다. 톳이끼, 우산이끼, 공작이끼 중 잎 표면에 작은 기공과 넓은 기공 내부 표면적을 가지는 공작이끼가 건조 중량대비 약 830%까지 수분을 흡수하면서 가장 우수한 수분 흡수량을 보임을 확인하였고, 공작이끼를 폴리올레핀 그물망에 친환경적 방법으로 붙여 이끼필터를 제작하였다.

안개제거 효과를 알아보기 위하여 제작된 챔버 내에서 유동이 없는 상태와 유동이 있는 상태 모두에서 수분 흡수의 능력을 보임을 확인 하였으며, 특히 안개 포집용으로 널리 사용 중인 폴리올레핀 그물망에 비하여 이끼 필터가 안개 제거에 탁월한 효과를 보임을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 자연에서 쉽게 발견할 수 있고 생존 능력이 뛰어난 이끼가 안개제거 시스템에 응용되어 짧은 시간 내에 시야확보를 가능하게 할 수 있다는 것을 보여준다. 이끼필터는 친환경적이며 제작, 유지, 보수가 저렴한 지속 가능한 안개제거 시스템으로, 이끼필터에 흡수되어 포집된 물은 농업용수, 생활용수 등 여러 가지 용도로도 활용 가능하므로 실제 현장에 적용된다면 수자원 및 에너지 절약형 안개제거에 크게 기여 할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통산자원부 글로벌전문기술개발사업(10038702, 자연모사 응용 스마트 물/용제 순환기술) 및 한국기계연구원의 기관고유사업(NK196D, 자연모사기반 다기능 모폴로지 구현기술개발)의 연구 지원비로 수행되었습니다.

참고문헌
(References)

(1) Gultepe, I. Tardif, R., Michaelides, S. C., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., Muller, M. D., Pagowski, M., Hansen, B., Ellrod, G., Jacobs, W., Toth, G. and Cober, S. G., 2007, “Fog Research: a Review of Past Achievements and Future Perspectives,” *Pure and Appl. Geophy.*, Vol. 164, pp. 1121~1159.

(2) Cowan, R. S., 1997, *A social history of American technology*, New York, NY: Oxford University Press.
(3) Brunt, D., 1939, "The Artificial Dissipation of Fog," *Sci. Instr*., Vol. 16, pp. 137~140.
(4) Seinfeld, J. H., 1986, *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley, New York. pp. 198~241.
(5) Martikainen, A. L., 2007, "Fog Removal with a Fog Mesh-mist Eliminators and Multiple Mesh Systems," *International Journal of Mining, Reclamation and Environment,* Vol. 21, pp. 185~197.
(6) Minami, M., Kato, R., Hagiwara, T., Araki, K., Nagata, Y. and Takitani, K., 2008, "Development of a Visibility Estimation Model Based on Visibility Information from Road Images Captured in Winter," *Proceedings of the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C.
(7) Parker, A. R. and Lawrence, C. R., 2001, "Water Capture by a Desert Beetle," *Nature*, Vol. 414 pp. 33~34.
(8) Zheng, Y., Bai, H., Huang, Z., Tian, X., Nie, F. Q., Zhao, Y., Zhai, J. and Jiang, L., 2010, "Directional Water Collection on Wetted Spider Silk," *Nature*, Vol. 463 pp. 640~643.
(9) Ju, J., Bai, H., Zheng, Y., Zhao, T., Fang, R. and Jiang, L., 2012, "A Multi-Structural and Multi-Functional Integrated Fog Collection System in Cactus," *Nature Commun*., Vol. 3, p. 1247.
(10) Comanns, P., Effertz, C., Hischen, F., Staudt, K., Böhme, W. and Baumgartner, W., 2011, "Moisture Harvesting and Water Transport Through Specialized Micro-Structures on the Integument of Lizards," *Beilstein J. Nanotechnol*., Vol. 2, pp. 204~214.
(11) Lee, A. N., Moon, M.-W., Lim, H., Kim, W.-D. and Kim, H.-Y., 2012, "Water Harvest via Dewing," *Langmuir*, Vol. 28, pp. 10183~10191.
(12) Koch, K. and Barthlott, W., 2009, "Super-Hydrophobic and Superhydrophilic Plant Surfaces: an Inspiration for Biomimetic Materials," *Phil. Trans. R. Soc. A*, 367, pp. 1487~1509.
(13) Chaudhury, M. K., Chakrabarti, A. and Tibrewal, T., 2014, "Coalescence of Drops Near a Hydrophilic Boundary Leads to Long Range Directed Motion," *Extre. Mech. Lett*., Vol. 1, pp. 104~113.
(14) Park, K.C., Chhatre, S.S., Srinivasan S, Cohen, R.E. and McKinley, G. H., 2013, "Optimal Design of Permeable Fiber Network Structures for Fog Harvesting," *Langmuir*, Vol. 29, pp. 13269~77.
(15) Evans, R. D. and Johansen, J. R., 1999, "Microbiotic Crusts and Ecosystem Processes," *Crit. Rev. Plant Sci*., Vol. 18, pp. 182~225.
(16) Schofield, W. B., 1985, *Introduction to Bryology*, Macmilllan Pub. Co.