

# 저온설비에서 습표면의 젖음성 제어를 위한 표면 개질 기술

저온설비에서 수반되는 습표면은 설비의 성능과 운전  
전에 중요하며 표면의 젖음성을 제어하는 과학적  
근거와 기술을 소개하고자 한다.

## 저온설비에서 젖음성

저온설비는 주위의 온도보다 낮음으로 인하여 대기 중 또는 제품의 습기가 응축이나 착상이 일어나는 조건에 노출되어 있다. 많은 경우 응축이나 착상은 설비의 효율, 적절한 운전, 위생, 설비의 건전성 및 제품에 부정적인 영향을 준다.

저온설비 중에서도 증발기와 같은 열교환기 표면에서의 공기 상대습도와 대기중의 상대습도는 그 차이가 커서 응축, 제습, 착상 및 제상은 일상으로 접하는 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 열교환기 재료의 개발, 화학 처리, 표면 개질 등에 대하여 지속적으로 연구되었다. 본고에서는 고체 표면의 젖음성에 관련하여 젖음성의 구분, 생명체에서 응용, 젖음성의 제어 기술에 대하여 간략히 정리하고자 한다.

## 생명체에서 젖음성

생명체 구성의 주요 성분이 물이며 또한 생명체는 물과 같이 생활한다. 식물은 이동이 쉽지 않은 이유로 인하여 식물에게 주어지는 물을 아



[그림 1] 스페인 풍란(좌), 기적의 고사리(우)

주 효과적으로 흡수하거나 배수한다. 식물은 물을 효과적으로 이용하도록 고도로 진화하였다. 그림 1은 ‘스페인 풍란’과 ‘기적의 고사리’의 사진이다. ‘스페인 풍란’은 건조한 지역에서 매우 소량의 물로 생명을 유지할 수 있다. 스페인 풍란 잎은 물을 잘 흡수하도록 친수성 미세 구조로 되어 있다. 작은 물방울이라도 잘 흡수할 수 있는 구조이다. 우측 그림의 ‘기적의 고사리’는 수십 년간 물 없이도 생명을 유지하는 것으로 알려진 식물이다. 물이 없을 때에 공 모양으로 움츠린 이 고사리에 물을 주면 수 시간 안에 잎은 꽃이 개화하듯이 정상적으로 벌어진다. 이러한 친수성 식물의 표면의 접촉각은  $10^\circ$  이내로 매우 작다. 식물은 배수 측면에서도 매우 잘 진화되었다. 대표적인 사례가 연잎이다. 연잎의 표면 접촉각은 거의  $180^\circ$ 에 가깝다. 더 놀라운 것은 미끄럼 각(contact angle hysteresis)이 몇 도 이내로 매우 작아서 물방울이 잘 구르도록 잎의 표면이 진화되어 있다. 이를 연꽃 효과(lotus effect)<sup>1)</sup>라고 한다.

동물 역시 물을 잘 이용하도록 진화되어 있다. 잘 알려진 바와 같이 오리의 깃털은 물에 잘 젖지 않는다. 우리는 오리의 몸에서 내는 기름으로 인하여 오리의 깃털이 물에 잘 젖지 않는다고 생각하곤 한다. 이 보다 더욱 중요한 것은 깃털의 미세구조이다. 1944년 Cassie와 Baxter<sup>2)</sup>는 깃털의 형상이 소수성에서 중요하다는 것을 이론적으로 입증한 바 있다. 이 외에도 나비의 날개의 다층 미세구조, 잠자리 날개의 미세 침상 구조, 거미줄의 미세 마디

구조, 사막 풍뎅이 등껍질의 친수와 소수의 혼합 구조 등은 잘 알려진 사례이다. 이는 생명체의 표면이 물을 이용하는 방법 중에서 우리가 알고 있는 일부의 사례일 것이다.

### 젖음의 구분과 젖음성 제어 원리

제습, 배수, 착상, 제상에서 젖음성은 고체와 액체의 표면에너지에 의하여 결정된다. 저온설비의 경우 물이나 냉매가 주요 대상 액체이다. 물과 냉매는 물성이 한정되어 고체의 표면에너지가 중요하다. 고체의 단위 투영 면적당 표면에너지는 화학적 조성 및 표면의 미세구조에 의하여 결정된다. 저온설비나 열교환기 기저 재료의 표면에너지를 바꾸는데 표면에 화학물질은 처리하는 것이 유용하지만 제품의 상용화와 양산을 위해서는 비용, 시효성, 유지관리 측면을 고려할 필요가 있다. 고체 표면의 미세 구조는 표면에너지를 증폭하는 특성이 있다. 표면적의 증폭에 대한 특성은 1936년 Wenzel<sup>3)</sup>에 의하여 제시되었고 이 가설은 이후 여러 연구자들에 의하여 개선되었다. 미세구조는 친수 표면을 더욱 친수 표면으로 소수 표면을 더욱 소수 표면으로 제어하여 표면 젖음성을 제어하는 데 기여할 수 있다.

생명체는 화학물질과 더불어 표면의 미세구조 특히 다층적 미세 구조를 이용하여 효과적으로 젖음성을 제어한다. 따라서 저온설비에서도 생체에서 원리를 이용할 필요성이 있다.

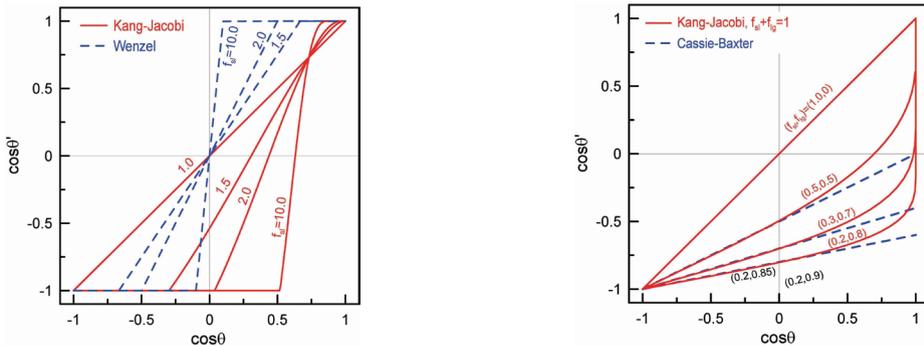
고체 표면은 화학적 조성에 따라 그 표면에너지



[그림 2] 고체 표면에서 Wenzel(좌)과 Cassie-Baxter(우) 상태

지(일반적으로 고체-기체 간 표면에너지)가 정해진다. 고체 표면의 거칠기가 증가하면 액체와 접할 수 있는 표면적은 증가하고 해당 투영 면적당 고체의 표면적을 증가하게 된다. 따라서 표면의 젖음성을 증폭할 수 있다. 젖음성의 형태는 그림 2와 같이 완전 젖음(fully wetting)과 부분 젖음(partial wetting)의 2가지로 구분된다. 완전 젖음은 액체가 고체 표면에 빈틈없이 완전히 젖어 있는 상태이며 이를 Wenzel 상태라고도 한다. 완전 젖음 상태는 고체 표면을 초친수성으로 개질하고자 하는 경우에 유효하며 고체 표면의 화학적 조성이 균일하다면 거칠기가 주요 제어인자가 된다. 액체가 고체 표면에 일부분이 젖어 있고 고체 표면 측에 잔여 부분이 공기에 노출된 경우가 부분 젖음 상태이다. 이를 Cassie 상태라고 하며 이는 고체 표면을 소수성 표면으로 만드는데 효과적이다. 이 상태에서 액체 중에서 공기에 노출된 면적의 비율이 젖음성을 제어하는 주요한 제어인자이다. 부분 젖음 상태의 변화는 기존의 이론으로 잘 예측할 수 있는 것으로 알려지고 있다.

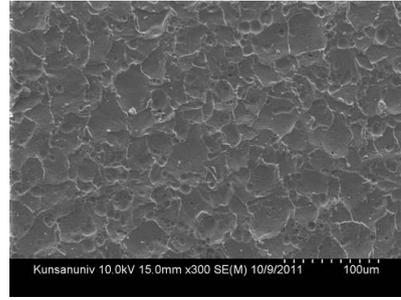
그림 3은 고체 표면의 젖음성을 어떻게 제어하는지 나타내는 선도이다. 그림에서 가로축은 원래 표면의 고체 표면의 접촉각 또는 젖음성을 나타내며 세로축은 개질된 표면의 접촉각을 나타낸다. 그림에서 인자  $f$ 는 기체(g), 액체(l), 고체(s)의 면적비이다. 젖음성을 우선 결정하는 것은 고체 표면의 화학적 접촉각(chemical contact angle)이다. 최근의 연구<sup>4)</sup>는 이상적인 표면의 친수성과 소수성을 구분하는 임계각을  $48^\circ$ 로 제안하였다. 임계각은 젖음성을 제어하는 데 매우 중요한 요소이다. 고체 표면의 재료의 특성으로 인한 화학적 접촉각이 임계각보다 작으면 표면 개질을 통하여 더욱 친수성을 얻을 수 있으나 소수성으로 변환하는 것은 불가능하다. 반면에 화학적 접촉각이 임계 접촉각보다 크면 표면 개질을 통하여 친수성으로 변환하는 것은 어려우며 고체의 표면 거칠기가 증가할수록 접촉각이 증가한다. 표면에너지의 증가뿐만 아니라 부분 젖음 현상이 증폭되면 이러한 소수성 정도를 더 크게 증대할 수 있다. 동물과 식물은 다층적 거친 구조로 초친수 또는 초소수 현상을 구현한다.



[그림 3] 매끈한 표면과 거친 표면 간의 접촉각 관계<sup>4)</sup> (좌) 완전 젖음 상태, (우) 부분 젖음 상태



[그림 4] 요거트 포장의 내부의 소수성 표면



[그림 5] 친수성 특성을 갖는 방전가공 된 알루미늄 표면

### 젖음성 제어 기술동향

젖음성의 제어는 다양한 분야에 적용되고 있다. 그림 4는 실생활의 예로서 소수성 성질을 얻기 위한 요거트 포장재 내부의 표면 처리를 보여주는 그림이다. 친수성 표면을 얻기 위하여 표면에너지를 낮추는 처리를 한다. 고전적인 방법은 표면에너지가 낮은 물질로 코팅하는 것이다. 플라즈마 처리를 통하여 내구성 높은 친수성 처리가 산업에 응용되고 있다. 금속의 표면을 에칭하여 표면 형상을 다층의 미세한 거친 구조로 개질하여 극 친수표면을 얻는 기법<sup>5)</sup>이 소개되었다. 이 표면에 화학적 친수 처리를 하여 극소수 표면을 구현하는 방법도 동시에 개발되고 있다. 그림 5와 같이 표면을 방전가공하거나 레이저 가공을 통하여 표면 개질하는 방법도 시도되고 있다.

### 결론

저온설비에서 설비의 표면에서 액체의 젖음성은 피할 수 없는 문제이다. 고체의 젖음성은 일반적으로 접촉각으로 표현하며 접촉각은 고체-액체 사이에 친수성과 소수성으로 구분하는 기준이 된다. 임계 접촉각은 화학적으로 친수성과 소수성을 제어할 수 있는 한계를 제공한다. 설비에서 접촉각을 효과적으로 제어하기 위해서는 고체의 표면에너지 즉 표

면의 화학적 조성의 변경과 표면의 개질 두 가지 방법을 동시에 사용할 경우에 효과를 높일 수 있다. 최근 젖음성을 제어하기 위한 개선된 이론과 다양한 생산기술이 제시되고 있으며 이를 활용한다면 저온설비의 품질 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. Bhushan, B., 2009, Biomimetics : Lessons from Nature-an Overview, Phil. Trans. R. Soc. A, Vol. 367, pp. 1445-1486.
2. Cassie, A. B. D. and Baxter, S., 1944, Wettability of Porous Surfaces, Trans. Faraday Soc., Vol. 40, pp. 546-551.
3. Wenzel, R. N., 1936, Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water, Ind. Eng. Chem., Vol. 28, pp. 988-994.
4. Kang, H. C. and Jacobi, A. M., 2011, Equilibrium Contact Angles of Liquid Droplets on Ideal Rough Solids, Langmuir, Vol. 27, p. 14910.
5. Kim, Y., Lee, S., Cho, H., Park, B., Kim, D., and Hwang, W., 2012, Robust Superhydrophilic/Hydrophobic Surface Based on Self-Aggregated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanowires by Single-Step Anodization and Self-Assembly Method, ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 4, pp. 5074-5078. 