

제오라이트 히트펌프의 개발과 가능성

출처 : 溝田忠人, 2000, ゼオライトヒートポンプの開発と可能性, マテリアルインテグレーション, Vol.13, No.10, pp.25-30

번역 : 박 기 원 / 정회원 여수대학교 냉동공학과(pkw@yusu.ac.kr)

키워드 : 제오라이트, 히트펌프, 수화, 에너지, 열교환, 카르노 효율, 엔트로피, 수증기, 제오라이트 물

1. 서론

제오라이트 히트펌프는 제오라이트를 수증기의 흡착제로 사용하여 수증기의 흡·탈착에너지를 이용함으로써 열을 회수하고 이용하는 장치이다. 약 20년 전에 Tchernev(1978, 1980)가 제오라이트를 사용하여 태양열 에어컨, 냉장고를 실현할 수 있다고 발표한 논문^{1,2)}에서는 전기 등 다른 에너지를 전혀 사용하지 않고 태양열을 써서 열을 만든다거나 공조를 할 수 있다고 서술하였다. 그 당시에는 상당한 주목을 받았고 일부 기업들도 관심을 가져 테스트하게 되었다. 또 기초연구도 상당히 진행되었다. 그러나 그 후에는 그다지 주목과 발전이 없었고, 마침내 잊어버리게 되었다.

그러나 溝田 등은 알루미늄 제련폐액을 사용하여 제오라이트를 합성하였고³⁾, 직접 만든 단열형 열량계를 사용하여 합성 및 천연 제오라이트의 수화열을 측정하였으며^{4,5)}, 제오라이트의 물 상태를 살펴보았다. 합성 Na-A형 및 몰데나이트(mordenite)나 클리놉타이로라이트(clinoptilolite) 등과 같은 천연 제오라이트의 수증기 수화열 측정값으로부터 열교환능력을 계산하던 중 A형 제오라이트가 천연 제오라이트보다 확실히 큰 열교환능력이 있다는 것을 알고 이 히트펌프에 큰 흥미를 가지게 되었다. 제오라이트의 열교환능력이 함수량에 의존한다는 사실로부터 함수량을 증대시키기 위해 다가 양이온인 Na^+ 를 이온교환하는 것이 좋겠다는 생각으로 다양한 이온교환을

하게 되었다. 그 결과 Mg^{+2} 교환으로 좋은 결과를 얻을 수 있었다³⁾. 이러한 점으로 볼 때 제오라이트 히트펌프를 실용화시킬 수는 없을까 하는 생각에 문제점을 재검토하기 시작하였다.

지금까지의 검토에 의한 결론을 미리 밝혀두고자 한다. 「제오라이트의 열교환 능력은 수화열 측정으로부터 얻어진 이론과 같으며, 에너지 회수의 강력한 수단이 될 수 있다. 이 원리를 뒷받침하는 것은 H_2O 를 독립성분이라고 가정하였을 때 제오라이트 물의 엔트로피 저하와 수증기를 통해 그 상태로 이용될 수 있을 것이다. 무엇보다도 결정질인 제오라이트의 성질을 잘 이해하여야 한다. 실용화를 위해 극복해야 할 장애는 범용 화학상치보다 훨씬 고도의 진공기술이다.」

2. 제오라이트란

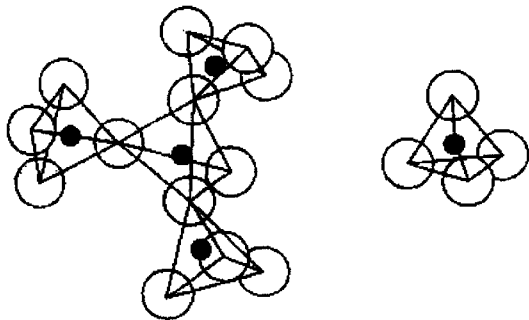
2.1 제오라이트는 지구표면의 물질

제오라이트 히트펌프를 보다 잘 이해하기 위해서는 주역인 제오라이트의 성질을 알고 있어야 한다. 이를 위해 먼저 광물로서 천연적으로 생산되는 제오라이트에 대해 살펴보자. 제오라이트는 그 결정구조 속에 분자레벨이 큰 구멍을 가지고 있는데, 대개는 알루미늄노규산염(aluminosilicate)이다. 천연적으로 생산되는 제오라이트는 모두 지반이 비교적 얇은 부분(보통 깊이 10km보다 낮은 곳)에서 생성되는 것으로 생각된다. 제오라이트의 근원물질로는 여러 가지가

있는데, 현무암질의 용암이 해저에서 분출할 때 해수 (또는 지반에 침투한 해수)와 반응하여 만들어지거나 화산재 등의 화산분출물이 침적하여 지하에 매립된 상태로 압축되어 온도가 상승할 때 만들어지기도 한다.

지구표면에 존재하는 암석의 조성으로 보아 그 메카니즘을 간단하게 설명하면, 마그마가 지구심부에서 지표에 이르는 동안 온도와 압력이 점차 낮아지고, 이에 따라 마그마 속에서 조기에 만들어진 광물을 결정침적시키면서 상승하기 때문에 화학조성에 계통적인 잇달림이 일어난다. 그로 인해 지표에 가까워지면서 마그마(유동성분)는 점점 SiO_2 (실리카겔) 조성이 많아지게 된다. 고온의 마그마 속에서 결정화되는 광물의 결정 중에는 SiO_4^{4-} 가 독립적으로 존재하지만, 지표에 가까워짐에 따라 SiO_4^{4-} 는 몇 개씩 연결된다(결합한다, 그림 1)

다시 말하면 SiO_2 성분은 마그마의 온도가 낮아지면 그 유동성분 속에 농축되고, 늦게 결정화되는 광물일수록 SiO_2 가 풍부해진다. 따라서 지표의 암석은 대부분 SiO_2 가 풍부하다. 지표에서 가장 전형적인 암석이 화강암인데, 화강암은 장석이나 석영, 즉, 텍토규산염이 주성분이다. 석영에서는 SiO_4^{4-} 의 모든 산소가 인접한 규산과 공유되고 있어 4개의 산소 중 반이 하나의 규산에 속하는 것으로 생각할 수 있으므로 전체적으로는 SiO_2 의 조성이 되고 있다. 장석에서는 규산과 크기가 비슷한 알루미늄이온(Al^{3+})이 규산이온의 일부를 대신하고 있다. Si^{4+} 가 Al^{3+} 로 치환되면 + 전하가 부족하므로 이것을 보완하기 위해 알칼리 금속이나 알칼리토류금속의 이온이 결정 속에 들어



[그림 1] SiO_4^{4-} 사면체(우)와 그것이 점점의 산소를 공유하는 4중 결합(좌). 검은 색 원은 Si 또는 Al, 큰 원은 산소, 선은 산소원자의 중심을 연결.

간다. 만약 이러한 알루미늄규산염이 지표 근처의 환경 중 수분이 많은 곳에서 생성될 때에는 결정 속에 규칙적으로 물분자 클러스터가 들어가는데, 이것이 제오라이트로 된다. Si와 Al이 풍부한 암석(이 중에는 화산재로부터 생성되는 가스질 암석도 있다)이 적당한 수분과 온도, 압력조건을 만나면 제오라이트 암으로 변하는 것이다. 다른 표현을 빌리면, 이와 같이 수분이 많은 환경에서는 광물이나 유리의 알루미늄규산염 성분이 물 속에 용해되어 물분자와 알칼리 금속(알칼리토류) 이온을 배위시킨 함수 알루미늄규산염 클러스터(착이온)가 형성되고, 이것이 탈수축합하는 과정의 중간생성물로 각종 제오라이트가 형성되는 것이다. 누가 뭐라고 해도 제오라이트야말로 「기적의 물의 흡성=지구」표면의 부산물인 것이다. 합성 제오라이트도 처음에는 천연 생성조건을 모사하므로써 탄생되었다.

2.2 재료로서 제오라이트의 성질

제오라이트를 가열하면 그 물분자가 추출되어 탈수 제오라이트를 만들 수 있다. 탈수 제오라이트는 물이 빠진 구멍을 유지하면서 결정구조를 지키고 있다. 이 탈수 제오라이트의 온도를 내리면 흡습작용을 하는 강력한 건조제로 된다.

제오라이트 속의 알칼리금속, 알칼리토류금속 이온 등의 Al, Si를 제외한 양이온은 수용액 속에서 다른 이온과 꽤 쉽게 교환할 수 있으므로 교환양성이온이라 부른다. 따라서 제오라이트는 이온교환체의 성질을 가진다. 환경문제를 해결하면서도 제오라이트가 세제빌드로 작용하여 Ca^{2+} 제거용으로 인산염을 대신한다는 것은 잘 알려진 사실이다.

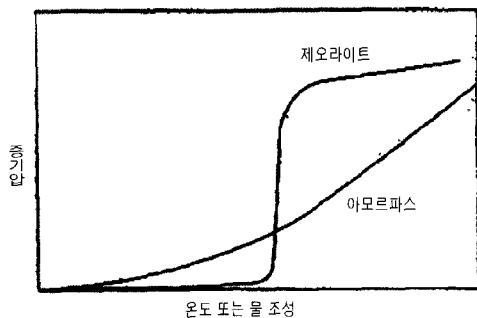
물을 뺀(탈수한) 뒤의 구멍은 분자레벨의 크기이고, 이 속에 유기분자 등이 들어가면 작은 공간에서 주위의 알루미늄규산염의 프레임워크나 양이온의 강한 전장 기울기가 이루어져 절단이나 반응이 촉진된다(촉매작용). 그 덕으로 이 구멍이 결정화되기 때문에 크기나 형태가 갖추어지고, 들어가는 분자를 엄격하게 선별하는 기능을 가지게 된다(분자선별성). 합성 제오라이트는 밀도가 2g/cm^3 정도인 가벼운 물질이고, 독성이 없으며, 조성을 조정하는 것으로, 표면의 성질을 여러 가지로 변화시킬 수 있고, 분말의 모양과 크기도 상당히 자유롭게 만들 수 있으므로, 플라스틱 등의 충전재로도 많이 사용된다. 이것이 모여 오늘날에는 제오라이트가 화학공업에 없어서는 안

될 물질이 되었고, 새로운 구조를 가진 것이 여러 가지 방법으로 합성되어 제오라이트산업을 발전시켜 왔다.

독성이 없다는 것은 앞에서 서술한대로 인간(생물) 및 지구표면과 같은 조건에서 제오라이트가 생성되어 존재한다는 것과 같은 이야기이다. 즉, 생물과 공존하여 온 증거이다. 단, 에리오나이트(erionite) 등과 같은 어떤 제오라이트는 침상의 성질을 가져 아스베스트(asbest, 石棉)와 같은 위험이 지적되고 있다⁶⁾.

3. 아모르파스(amorphous)계와의 차이

제오라이트는 가열하면 100~200℃ 정도에서 탈수한다. 구멍 속에 있는 물분자의 열운동이 격심해지면 그 속에 보존될 수 없게 되는 것이다. 탈수한 제오라이트에 물이 공급되지 않도록 하여 냉각하면 강력한 건조제가 된다. 이것은 시판되고 있는 실리카겔 등과 같은 성질인데, 한 가지 점에서 큰 차이가 있다. 그것은 제오라이트는 결정인데 비해 실리카겔은 아모르파스라는 점이다. 제오라이트 결정 속의 구멍은 형태와 크기, 성질이 갖추어져 있어 물리화학적인 성질이 균질하고 그 속에 들어간 물의 에너지상태도 비교적 균질하다. 이것은 그 제오라이트가 특유의 온도와 압력에서 탈수, 수화가 일제히 일어난다는 것을 말한다(증기압-온도, 물 조성에 있어서의 비선형성). 그러나 아모르파스계 물질은 이에 비해 증기압이 온도, 물 조성에 따라 완만하게 선형적으로 변한다(그림 2). 제오라이트는 천연과 합성을 포함하면 100종 이상이 된다. 또 하나의 종에서도 양이온 교환에 의해 조성을 자유자재로 바꿀 수 있다. 이 변화



[그림 2] 제오라이트와 아모르파스계의 흡착제 증기압 및 온도 또는 물 조성과의 관계 개념도

에 따라 증기압-온도, 조성곡선도 변한다. 따라서 엄밀하게 말하면 이용하고자 하는 온도영역에 알맞은 제오라이트를 선정하여야 한다. 실리카겔 등은 그다지 차이가 없기 때문에 어느 것이나 비슷한 성질을 나타내지만, 제오라이트에서는 그렇게 되지 않는다. 이것은 제오라이트를 이용하고자 할 때 귀찮은 부분이기도 하다. 각 제오라이트에 관해 현 시점에서는 P-T-C의 관계가 그다지 알려져 있지 않으므로 더욱 사용하기 어려운 점이 되고 있다.

4. 제오라이트 물과 열

4.1 제오라이트의 열교환 능력

제오라이트 히트펌프의 능력을 나타내기 위하여 현 시점에서 보다 능력이 큰 Mg50-A형 제오라이트(Na-A형 전하의 50%를 Mg²⁺로 교환한 것)의 열교환능력을 아래에 나타낸다. 100℃에서 1시간 진공 가열하면 약 15%의 탈수가 생긴다. 이 탈수된 Mg50-A형을 25℃로 냉각하여 같은 온도의 수증기를 흡착시킬 때의 발열량을 단열형 수화열량계로 측정하였다. 수화량은 수화전후의 시료병(frasco) 중량을 직접 저울로 제어 구하는 방법을 취하였다⁷⁾. 그 결과 -64kJ/mol이라는 적분수화엔탈피를 얻었다. 적분수화엔탈피란 탈수제오라이트가 15%의 수증기를 흡착할 때 물분자 1mol(18g)당의 평균증발량이고, -는 발열을 나타내며, 수화시 제오라이트에서 열이 나온다는 의미이다. 따라서 수화 Mg50-A형 1kg의 열교환능력 Q는

$$Q = 64 \times \frac{1000 \times 0.15}{18} = 533 \text{kJ/kg}$$

이 된다. 이 533kJ/kg을 얼음의 엔탈피와 비교하면 그 능력을 충분히 알 수 있다. 0℃ 얼음이 가지고 있는 에너지를 얼음이 녹아 25℃의 물로 될 때까지의 열량을 Q_{ice}라 하면

$$Q_{ice} = \frac{6.01 \times 10^3 + 0.0752 \times 25}{18} = 438 \text{kJ/kg}$$

으로 되어 Mg50-A형쪽이 얼음보다 같은 중량당 1.2배 이상 축열능력이 크다. 여기서는 얼음의 용해엔탈피를 6.01kJ/mol, 물의 평균열용량을 75.2J/mol이라 하였다. 그러나 Mg50-A형은 15%밖에 탈수할 수 없고, 아직 10% 가까운 제오라이트

물을 가지고 있으므로, 탈수온도를 올리면 더욱 그 능력은 커진다. 溝田 등의 실험에서는 실온인 자유수와 평형을 유지하면서 가열탈수(진공배기하면서 이루어진 것은 아님)함에 따라 160℃ 정도에서 15~17% 탈수하였다.

그러나 위의 계산에서는 얼음이 냉각능력으로서의 에너지이고, 제오라이트는 발열에너지이므로 직접적으로 비교할 수는 없다. 그렇다 하더라도 제오라이트 히트펌프는 흥미있는 성질을 가지고 있다. 즉, 흡수에 의한 533kJ/kg의 발열이 있었다는 점은 수화하는 수증기를 어떻게든 가지지 않으면 안된다는 점이다. 여기서 물의 증발이 유도되는데, 그 에너지 Q_c 를 구하면

$$Q_c = 44 \times \frac{1000 \times 0.15}{18} = 438 \text{kJ/kg}$$

으로 된다. kg은 물론 제오라이트 1kg당이라는 의미이다. 이것은 25℃ 물의 증발열을 44kJ/mol로 하여 25℃인 수증기를 제오라이트에 수화시키기 위해 물을 증발시키는 에너지로서, 냉각능력이라 할 수 있다. 이것은 얼음이 지닌 냉각능력의 83.7%에 해당한다. 얼음보다 능력이 낮은 것처럼 보이지만, 얼음을 얻기 위한 전력에 의한 제빙효율은 80% 밖에 안될 것이다. 그러나 제오라이트의 냉각능력은 탈수열원 과 실온 등 제오라이트를 냉각하는 열량만으로 얻어진 것이다.

각종 제오라이트를 대상으로 하여 100℃ 진공탈수 처리에서 측정한 열교환능력 Q 의 값으로, 천연제오라이트인 몰데나이트(mordenite)나 크리놉타이로라이트(clinoptilolite)에서는 200~280kJ/kg이었고, Na-A에서는 490kJ/kg, Mg50-A에서는 530kJ/kg 정도였다²¹.

4.2 제오라이트 히트펌프의 작동

이 열교환능력을 이용하는 장치를 가장 단순하게 나타낸 것이 그림 3의 제오라이트-물계 히트펌프이다²¹.

- 탈수과정 : 제오라이트 베드(ZB)의 제오라이트에 열원으로부터의 열이 공급되어 온도가 상승하고 탈수가 일어난다. 수증기는 응축기(CND)에서 냉각되어 물로 되고, 수류(WR)에 저장된다.
- 냉각과정 : 다음 코크를 담아 수증기의 이동을 정

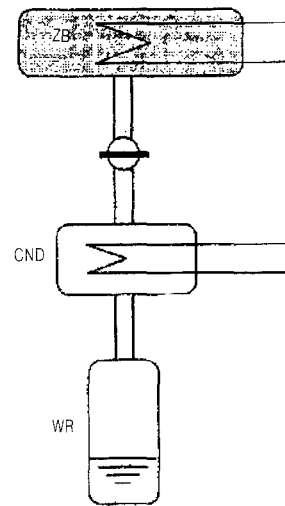
지시킨 뒤 ZB를 실온까지 냉각한다. 이에 따라 ZB 내부는 매우 수증기압이 낮은 상태로 된다.

- 수화과정 : 코크를 열면 WR에서 증기가 발생하여 그 증발열로 냉각된다. 단열하여 두면 얼음을 만들 수도 있다. 냉열은 얼음의 제조나 냉방에 사용한다. 한편 ZB 쪽은 수증기를 흡수하여 발열한다. 이 열을 온열원으로 사용할 수 있다. 물론 ZB는 방열시켜 냉각하지 않으면 수화가 충분히 일어나지 않는다.

이상에서 히트펌프의 한 사이클 운전이 완성된다. 축열에너지는 온열로서 ZB에서, 냉열로서 WR에서 이용할 수 있다. 또 탈수능력을 이용하여 건조시스템, 특히 저온 또는 동결건조에도 이용할 수 있다²².

4.3 제오라이트 물과 증기압

여기서 문제가 되는 점은 Q 가 작은 쪽의 Q_e/Q 의 비가 크기 때문에 열원에서 얻어지는 에너지에 비해 냉각에너지가 커지고, 히트펌프의 효율이 올라간다는 생각이다²³. 숫자상으로는 확실히 그렇게 되지만, 극단적인 경우를 제외하면 이 생각의 약점이 분명해진다. 그것은 제오라이트 베드와 수류에 물이 들어있는 경우이다. $Q=Q_e$ 이기 때문에 효율은 100%이지만, 과연 이 상태에서 히트펌프가 동작할까? 히트펌프가 동작하기 위해서는 제오라이트 베드와 수류의

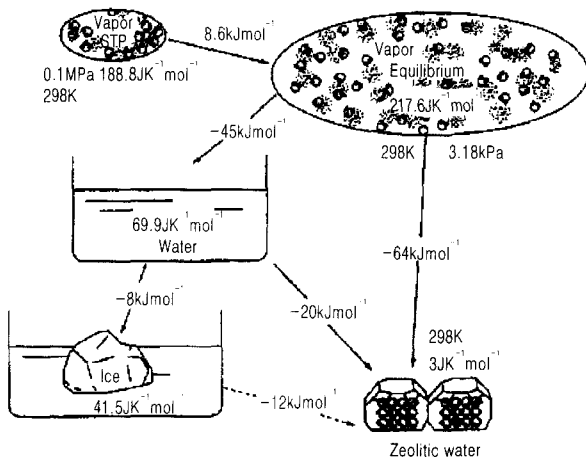


[그림 3] 제오라이트 물계 히트펌프의 개념도²¹
ZB : 제오라이트베드, CND : 응축기, WR : 수류

압력차가 필요하다. 열역학의 원리(예를 들어 Clausius-Calpeyron의 관계)에서 보면, 수화(탈수)엔탈피의 절대값이 큰 쪽의 증기압이 낮다. 즉, 증기압차가 없으면 히트펌프는 일을 할 수 없는 것이다. 단, 어느 정도의 증기압차가 있어야 실용적으로 히트펌프가 작동할지는 아직 해명되어 있지 않다. 뒤에서 서술하겠지만, 공기 등의 혼입을 완전히 배제한다면 적은 압력차에서도 히트펌프가 작동하기 때문에 이러한 기술개발이 중요할 것이다.

5. 제오라이트 물의 열역학적 성질

오라이트-물계 히트펌프 시스템 능력의 근원은 제오라이트 물이므로, 그 열역학적 성질을 알아 둘 필요가 있다. 수증기, 물, 얼음, 제오라이트 물을 H₂O의 독립성분으로 생각하여 이 4가지 H₂O 상태 사이의 전이열(엔탈피)을 정리하면 그림 4와 같이 된다⁹⁾. 이들의 엔탈피 변화값으로부터 엔트로피 변화를 구할 수 있다. H₂O 독립성분이라고 가정하여 구한 제오라이트 물의 엔트로피는 3.0J/K·mol로 되어(그림 4) 거의 0이라고 보아도 좋을 정도의 값이 되었다. 이것은 예전의 결과와는 현저하게 다른 값이다. 종래의 제오라이트 물의 엔트로피값은 제오라이트 물이



[그림 4] H₂O의 각종 상태에서의 열역학적 관계⁹⁾

엔트로피의 기준인 표준상태(STP:298.15K, 0.1013MPa)인 가성적인 수증기, 298K인 물의 증기압에서의 수증기, 물, 273.15K인 얼음, 298K인 제오라이트 물의 각각 상변화를 위한 엔탈피와 각 상태의 엔트로피를 나타낸다.

얼음과 물의 중간성질을 가졌다는 선입관에 따라 방법이나 이론적인 검토가 불충분한 상태에서 사용되었을 가능성이 있다⁴⁾. 溝田 등의 연구들로부터 제오라이트 물을 H₂O의 독립성분으로 취급하여 보았을 때 25℃에서도 그 엔트로피는 매우 낮은 상태에 있다는 것이 밝혀지게 되었다.

6. 카르노 효율을 올리는 방법으로 제오라이트 물의 이용

제오라이트 물의 엔트로피가 매우 낮다는 점을 어떻게 이용할 수 있을까?

일반적으로 기관의 이상적인 효율을 카르노 효율로 나타낸다.

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1)$$

T₁, T₂는 각각 고온열원, 저온열원의 온도이다. 어떠한 기관도 이 간단한 식에 따라 규정되는 효율을 초과할 수는 없다. 또 T₂는 배열온도라고도 생각할 수 있으므로 배열하는 장소, 즉, 지구표면의 상온 부근으로 고정된다. 즉, 25℃ 부근이다. 따라서 효율을 높이는 유일한 변수는 T₁인데, T₁을 상승시키기 위해 모든 기술을 집중시켜 왔다¹⁰⁾. 그러나 고온을 얻기 위해서는 질 좋은 에너지를 사용하게 되는 결과를 만들었고, 선진국들이 고효율 대량 에너지 소비국일 수밖에 없었다⁹⁾.

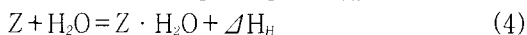
카르노 효율을 높이려면 T₂를 낮추어도 된다. 그러나 지구상의 자원 중 저온의 물질로는 얼음, 심층해수 등으로 한정되고 멀리 떨어져 있기 때문에 실제 이용하기는 어렵다. 그러나 제오라이트 물의 엔트로피가 낮고, 그 상태를 200℃ 정도의 온도(탈수온도)와 실온(냉각온도)의 2가지에 의해 작동할 수 있다는 것은 하나의 해답을 주는 것이다. 제오라이트 히트펌프를 사용하여 간단하게 -18℃를 달성하여 왔다¹¹⁾. 따라서 제오라이트 히트펌프를 저온도인 T₂(폐열온도) 열원의 발생기라고 생각하여도 좋을 것이다.

더욱 중요한 것은 이와 같이 엔트로피가 낮은 상태가 수증기와의 평형에 의해 실제로도 이용할 수 있다는 점이다. 일반적으로 엔트로피가 낮은 극저온 물질에서는 증기압이 대단히 낮고, 고체이기 때문에 에너지를 추출하기가 쉽지 않다. 그러나 제오라이트에서는 상온이고, 수증기를 평형시키는 일을 통하여 쉽게

에너지를 추출할 수 있다고 생각하여도 좋다. 이러한 것이 가능한 이유는 25℃에서부터 200℃ 정도까지의 좁은 온도영역에서 제오라이트 물이 아직 미지의 급격한 변화를 받고 있다는 것으로, 그 변화모습을 연구하는 것은 매우 흥미로운 것이다.

7. 결론

현재 몇 가지의 히트펌프를 시험제작하여 차차 대형으로의 개발을 추진하고 있다. 그 과정에서 무려 20년 전에 제안되어 지금까지 실용화되지 않았던 불가사의를 생각해 왔는데, 최근에서야 겨우 그 이유를 밝히게 되었다. 한 가지는 Mg50-A형의 열교환능력이 기존의 천연제오라이트 등에 비해 2배 가깝다는 것을 발견한 것이다. 그러나 그 Mg50-A형을 사용하여도 장치가 잘 운전되지 않았다. 이 때 장치내의 증기압, 온도를 면밀히 조사한 결과 공기가 침입하여 물보다 빠르게 제오라이트 베드를 폐쇄하여 흡착을 방해하거나 탈수과정에서 응축기나 파이프로 선회하여 탈수된 수증기의 이동을 곤란하게 하는 것을 발견하였다. 공기 등은 이 히트펌프와 관계가 없는 물질이지만, 조금이라도 존재하면 히트펌프의 능력을 높일 수 없다. 제오라이트의 연구자는 이러한 사실을 잘 이해할 수 있는 일이지만, 히트펌프 개발자에게는 익숙하지 않은 점이다. 그 증거로 제오라이트-물계 히트펌프를 공기중에서 운전하려는 시도가 여러번 있었는데, 이것은 제오라이트의 성질을 전혀 이해하지 못한 경우이다. 그 이유로는 공기를 질소분자로 대표하여 탈수제오라이트를 Z라 쓰면 식 (2)에 따라 일단 질소를 흡착한 제오라이트는 식 (3)에서와 같이 질소를 분리한 뒤 물분자를 흡착하지만, 이 때 물분자와의 분자교환 엔탈피 ΔH_{NH} 은 식 (4)의 물분자 흡착엔탈피 ΔH_N 보다 그 절대값이 상당히 적다. 동시에 식 (2)에 따라 질소로 폐쇄된 제오라이트의 구멍은 그렇게 쉽게는 수증기와 교환할 수 없고, 속도가 대단히 느려진다.



더구나 식 (3)에서 빠져나온 질소는 재빨리 배관을 선회하여 응축기로 수증기가 이송되는 것을 막아버리고, 수증기압이 높아져도 공기중의 확산에 의해 이송될 뿐 사실상 탈수가 이루어질 수 없게 되어버린다. 이것은 실리카겔 등을 비롯한 고체흡착제와 기체를 조합한 히트펌프에서는 같은 현상이 일어날 것이다.

제오라이트-물계 히트펌프에는 수증기 이외의 기체가 들어가서는 안된다는 점을 분명히 인식할 수 있을 것이다.

끝으로 이 시스템은 광범위한 열교환 시스템으로 이용할 수 있을 뿐만 아니라 탈수능력을 이용하여 저온·동결건조제 등으로도 틀림없이 에너지절약에 기여할 것이며⁷⁻¹¹⁾, 많은 분들의 협력으로 하루빨리 실용화되기를 바란다.

참고문헌

- 1) D. I. Tchernev, 1978, Natural Zeolites, L. B. Sand and F. A. Mumpton (eds.), Pergamon, Oxford, p.479.
- 2) D. I. Tchernev, 1980, Proc. 5th Int. Conf. on Zeolite, Rees, L.V.C. (ed.), p.788.
- 3) T. Kasai et al., 1994, Mineral. J., Vol.17, No.4, p.170.
- 4) 溝田忠人, 中山則昭, 1998, 熱測定, Vol.25, No.3, pp.67-72.
- 5) T. Mizota et al., 1995, Thermochem. Acta, No.266, p.331.
- 6) 溝田忠人, 1997, エネルギー・資源, Vol.18, No.5, p.427.
- 7) 溝田忠人, 2000, ゼオライト, Vol.3, No.17, pp.108-113.
- 8) 溝田忠人, 1999, “應用鑛物學の新分野”, 鑛物學雜誌, Vol.28, No.2, p.47.
- 9) T. Mizota et al., 1999, Proc. 13th IPCWS, Physical Chemistry of Aquous Systems : Meeting the Needs of Industry.
- 10) 溝田忠人, 1999, 資源處理技術, Vol.46, No.4, p.225.
- 11) 溝田忠人, 1999, 資源と素材, Vol.115, p.195. 