

저온환경에 있어서의 동결현상과 그 응용

Freezing Phenomenon and Application in Cold Environment

오 칠

C. Oh



- 1958년 6월 29일생
- 한국해양대학교 해사대학
- 기관시스템공학과 교수

1. 서 론

저온환경 하에 있어서 전열문제의 특성은 그 계통 내에 수분이 존재하면, 그 수분이 동결·융해(상변화)를 일으키는 것이라 할 수 있다. 정지층의 동결 및 얼음의 융해 문제는 노이만·스테판의 문제로서 잘 알려져 있지만, 엄밀해(해석)는 노이만의 결과밖에 없다. 그러나, 이러한 해는 실제 자연현상의 일부만을 규명하고 있다. 결국 이러한 해로서 설명할 수 없는 자연현상들이 수없이 일어나고 있다. 최근 지구의 온도가 3℃상승함에 따라서 해수면이 60cm상승한다는 결과가 나와 있다. 그러나, 실제로 해빙이 해수 중에 융해하는 현상을 관찰해보면 여러 가지 흥미로운 현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 융해방법이나 융해량에 관해서 결론을 얻기에는 아직도 많은 시간이 걸릴 것 같다. 따라서 이러한 현상을 지배하고 있는 인자에 관한 정보를 파악하는 것이 반드시 필요하다. 이러한 인자들을 역으로 이용하면 동결·융해현상을 제어하는 기술의 습득이 가능하며, 저온환경을 이용한

산업적인 이용이 가능할 것으로 생각된다.

본 해설에서는 동결·융해현상에 관한 설명과 이러한 현상의 산업응용분야에 대하여 고찰해보기로 한다.

2. 동결현상

2.1 물의 동결문제

일반적으로 액체를 저온환경 하에서 응고점 온도(평균동결온도)이하로 냉각하는 경우 액체는 응고점온도에서 동결하지 않고 응고점온도영역이하에서도 액체상태를 유지한다. 이러한 현상을 과냉각현상이라 하며, 기상학적으로 구름중의 빙결정(氷結晶)형성을 비롯하여 한랭지의 자연현상에 있어서 많은 사례를 볼 수 있다¹⁾. 물의 동결문제는 한랭지에 있어서의 수도관이나 공장의 각종 냉각관 등의 동결에 의한 파괴현상을 초래한다. 이러한 현상을 규명하기 위해 많은 연구자들이 실험 및 이론적 해석을 통하여 연구를 진행하고 있다. Fig 2.1은

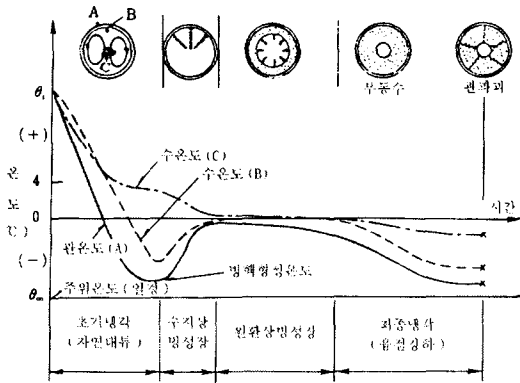


Fig 2.1 Aspect of accident of still water in a water pipe

빙점하의 주위환경에 수평으로 놓여진 관내온도 분포의 시간적 변화 및 빙 형성과정을 나타낸다. 초기온도 θ_0 로부터 빙점하의 환경조건온도 θ_∞ 에 접촉하도록 하면 관벽온도(A)는 급격히 저하함과 동시에 관 상부의 수온(B)도 동시에 저하된다. 먼저 관벽부근의 물이 냉각되어 관내에 복수의 자연대류가 나타나 관내 수온의 균일화에 기여한다. 또한 관내 수온이 저하되면 물의 밀도가 최대가 되는 약 4℃의 수층(水層)이 관 바닥부근에 정체하고, 따라서 관 중앙부의 수온의 영향을 받지만 관상부 온도(B)의 영향을 받지 않는다. 그러므로 관벽온도가 저하하면 수온(B)는 과냉각이 되고, 그 과냉각도 $\Delta\theta$ (동결온도 θ_m - 과냉각온도 θ)도 시간의 경과와 함께 증대한다. 과냉각상태는 어느 과냉각온도(핵 생성온도)에 있어서 갑자기 해방되어 그 순간 빙핵생성이 발생하고, 관 상부의 과냉각도가 큰 부분에 수지상빙(樹枝狀氷)이 발생하여 이것이 방사상으로 중앙부를 향하여 발달한다. 수지상빙의 발생과 함께 상변화로부터 발생한 열이 주위의 과냉각수에 흡수되기 때문에 수온이 0℃로 된다. 그 후 관 내벽으로부터 빙층이 관 중심부를 향하여 서서히 환상으로 발달한다. 환상의 발달과 함께 체적팽창으로부터 관 중심영역의 수압의 상승이 나타나고, 물의 빙점강하가 발생함에 따라 부동수온도가 저하된다. 또한 동결이 계속 진행되면 우선 강도가 약한 빙층의 파괴가 발생하고, 그 후에 관 재료를 소성변형시켜 관 재료에 따라서 균열이 발생하며 관의 파괴에 도달하게 된다. 이러한 수도관의 동결

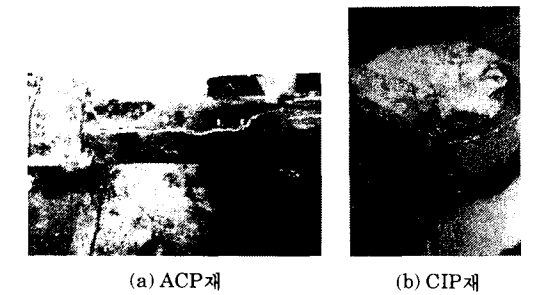
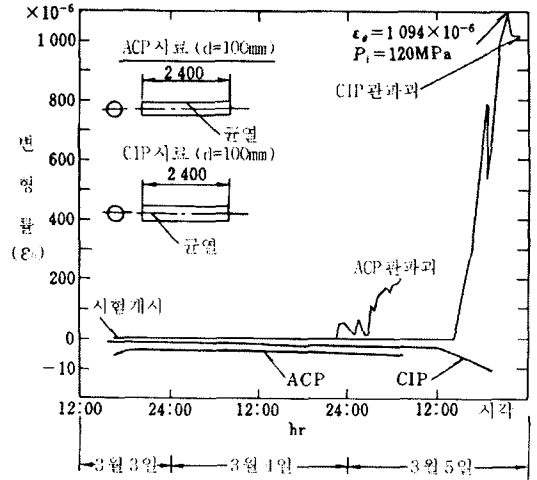


Fig 2.2 Shape of destruction of ACP and CIP

파괴는 복잡한 동결거동을 거쳐 발생한다. Fig 2.2는 관 재료에 따른 동결에 의한 관의 파괴형상을 나타낸다. Fig 2.2(a)의 석면시멘트관(ACP)은 물을 주입한 후 약 38시간 경과된 시점에서 축방향으로 긴 균열이 발생하여 파괴되었다. 관의 변형발생까지는 약 29시간 30분이 걸렸으며, 변형발생 후 약 8시간 30분 후에 파괴에 달하고 있다. 이때의 관의 온도는 $-4.6 \sim -5.1^\circ\text{C}$ 이며, 관의 변형률은 200×10^{-6} 이고, 응력으로 환산하면 약 5.2MPa의 압력이 작용하는 결과가 된다. ACP재의 새로운 재료는 약 22MPa의 강력한 강도를 갖지만 약 20~30년간의 사용에 의해 시멘트고형체의 유화 등의 열화에 의해 강도는 약 25%로 저하된다. Fig 2.2(b)의 주철관(CIP)은 변형발생까지 약 45시간이 소요되며, 변형발생 후 약 8시간 50분에서 관 파괴가 발생했다. CIP관의 경우는 강도 및 탄성계수의 관계로부터 관의 변형이 크며 급격히

변화하는 것을 알 수 있다. 또한 관의 온도도 -1.5°C 부근에서 온도가 급격히 강하함에 따라서 동결이 진행하고, 그 결과 변형의 증대가 커서 단번에 관이 파괴됨을 알 수 있다.

Fig 2.3은 내경 $D=22\text{ mm}$, 굽힘각 $\phi=45^{\circ}$ 의 경우의 평균유속(Re수)에 따른 관내 흐름의 모양을 나타낸다²⁾. Re수가 $Re=330$ 과 같이 아주 느린 경우에는 굴곡부에 있어서 흐름이 굴곡부 내측을 누르고, 굴곡부로부터 하류측으로 갈수록 불균일한 편류(偏流)가 소멸되어 정상적인 직관내의 유동으로 되는 것을 알 수 있다. 또한 Re수가 $Re=920$ 과 같이 크게되면 굴곡부에 와류가 나타나지만 하류로 감에 따라서 소멸된다. Re수가 $Re=3200$ 의 난류상태가 되면 흐름자체의 난류의 효과에 의해 흐름에 미치는 굴곡부의 효과가 적어진다. 굴곡관의 각도가 90° ³⁾ 및 180° 의 경우에도 거의 유사한 흐름이 관찰된다.

2.2 착빙 및 선체착빙

착빙(着氷)현상은 송전탑, 전선 및 건물의 벽 등에 겨울철에 나타난다. 한편 동절기에 북양을 행해하는 선박에는 황천의 경우에 해수가 선체에 동결하여 부착되는 현상이 발생되며, 특히 항공기에서 착

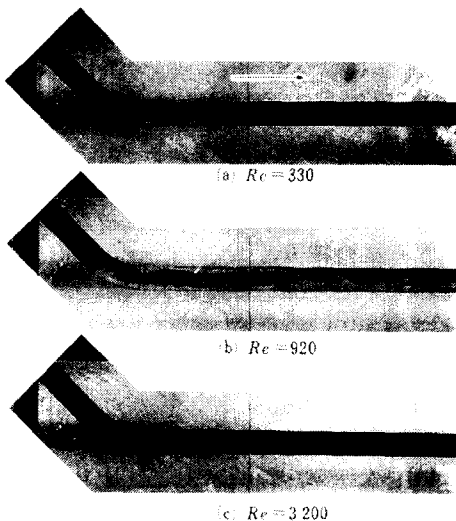


Fig 2.3 Flow shape of 45° curve

빙현상은 저항을 증대시킴과 동시에 양력을 저하시켜 비참한 사고로 연결될 가능성이 크다. 이러한 현상들은 재해의 원인이 되기 때문에 현상의 해명과 함께 재해방지에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.

착빙은 공기 중에 떠다니고 있는 0°C 이하로 과냉각된 수적(水滴)이 물체의 표면에 충돌해서 얼어붙는 현상이다. 착상현상은 다음 3가지의 프로세스에 의해 지배된다.

- (1) 기상학적 조건 (대기중에 과냉각된 안개 입자 또는 수적의 존재)
- (2) 유체학적 조건 (물체 등에 의한 과냉각 수적의 포착)
- (3) 전열학적 조건 (열전달에 의한 잠열이동)

착빙형태에 관여하는 인자로서는 기온, 풍속, 과냉각된 수적지름, 수적의 과냉각도, 단위 공기량에 포함된 수적량 등이다.

Fig 2.4는 선체착빙의 예를 나타내며, 선체착빙은 선상의 작업을 곤란하게 함과 동시에 선박의 무게중심을 높게 하고 풍압을 받는 면적이 넓어짐에 따라서 선박의 복원성을 저하시켜, 선박의 전복사고 등을 발생시킬 수 있다. 이러한 착빙현상을 방지하기 위한 방법으로서 다음과 같은 방법 등을 추천하고 있다.

- (1) 착빙물체의 전방에서 과냉각 수적을 포착한다.
- (2) 빙점강하를 이용한다 (공항 등에서 항공기에 부동액·프로필렌글리콜 등을 뿌린다).
- (3) 휘발성의 액체를 분사시켜 얼음의 부착을 어



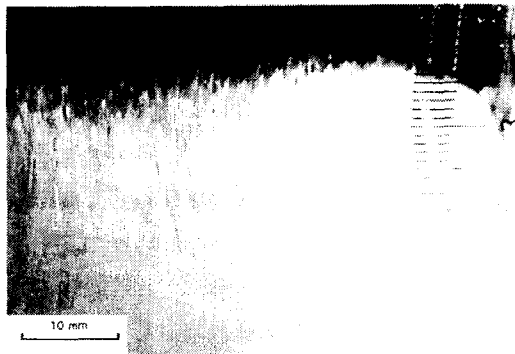
Fig 2.4 Freezing characteristics in a tube of a ship hand rail

럽게 한다.

- (4) 착빙물체의 온도를 높여 얼음을 녹인다.
- (5) 착빙물체표면을 유연한 구조로 하여 얼음을 기계적인 방법으로 제거한다.

2.3 해빙 등의 동결

해빙의 동결은 호수의 동결과는 달리 결빙온도가 0℃보다 낮기 때문에, 대류혼합층 전체가 동결되는 관점에서 볼 때 표면에 얇은 동결층이 발생하는 호수의 경우와 비교해서 보다 많은 냉각열이 필요하다. 해수의 동결거동을 살펴보면 다음과 같다. 해수가 동결하기 시작하면 염분은 얼음의 결정배면에 배출되어 동결온도보다 낮은 짙은 농도의 소금물이 되고, 아래 부분으로 하강하면서 농도가 낮은 소금물과 혼합된다. 일부의 농도가 짙은 소금물은 얼음과 얼음의 결정사이에 들어가 액체의 상태로 빙층에 남아 있다. 소금성분이 얼음에 포함되지 않는 이유는 다음과 같다. 물분자는 2개의 수소분자와 1개의 산소분자가 공유 결합되어 있기 때문에 일반적으로 수소 측은 음의 전하를 띠고 있다. 이처럼 다수의 물분자를 서서히 냉각시켜 생성되는 얼음은 1개의 산소와 가장 가까운 거리에 있는 4개의 산소를 수소원자로 결합시킨 4면체 배치를 갖는 결정구조로 된다. 그러나 Na⁺ 등의 이온이 물과 결합한 수용액의 경우에는 산소원자가 Na⁺ 등의 이온의 방향으로 향하여 위치하고, 이온 근방의 물분자는 특정모양의 배치상태가 된다. 이처럼 이온이 구속된 물분자는 주위의 물분자와의 수소

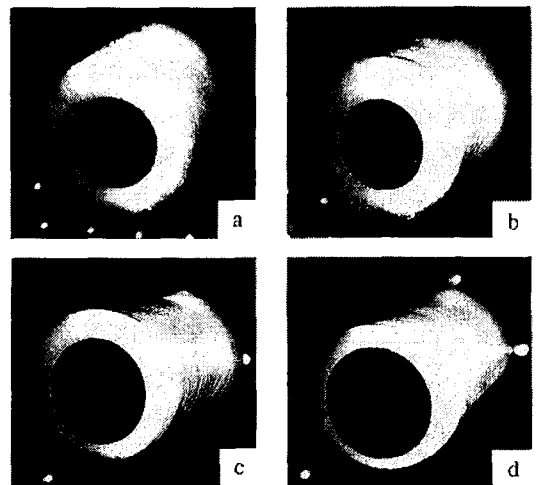


$C_0=30\text{mass}\%, \theta_w=-28^\circ\text{C}, \theta_\infty=-13^\circ\text{C}$
Fig 2.5 Dendritic ice

결합에 의해 빙결정에 포함되지 않고 배제된다. 따라서 Na⁺ 이온 등을 포함한 수용액을 냉각하면 응고점 강하에 의한 이온 근방의 물분자의 결정화 지연의 영향 이외에 상기의 이온의 특징에 의해 이온을 포함한 부분의 물은 결정화되지 않고 결정계면으로부터 액체상태로 배출된다.

이러한 해수 및 수용액의 동결현상은 공기조화장치에서 심야전력을 이용한 축열의 방법으로 축열재(염화칼슘수용액, 염화마그네슘수용액, 에틸렌글리콜수용액)의 동결현상의 규명에 반드시 필요한 기초자료로서 이용된다. 또한 다가오는 2006년에는 담수의 부족현상이 심각해질 것으로 예상되며, 이러한 담수부족현상을 해결하기 위해서는 수자원의 97%에 이르는 해수를 폐기되는 냉열을 이용하여 동결담수화하는 동결담수화장치에도 응용이 가능한 중요한 자료로서 생각된다.

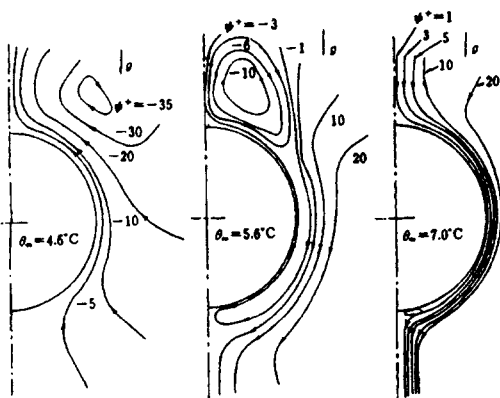
Fig 2.5는 정지층에 있어서 수용액의 동결층형상을 나타낸 그림으로서 수지상동결층이 형성되어 있다. 수지상빙(樹枝狀氷)이 형성되는 이유는 일반적으로 동결이 진행됨에 따라서 동결층 계면에 용질이 석출되어, 구성적과냉각(동결층계면 근방에 온도분포가 발생하는 것에 기인하는)이라고 불리는 과냉각현상으로부터 계면에 불안정성이



$C_0=5\text{mass}\%, \theta_w=-12^\circ\text{C}, \theta_\infty=0.01^\circ\text{C}$
Fig 2.6 Effect of the mainstream velocity at steady state
 (a) $U_\infty=0.0\text{m/s}$ (b) $U_\infty=0.01\text{m/s}$
 (c) $U_\infty=0.03\text{m/s}$ (d) $U_\infty=0.07\text{m/s}$

발생하기 때문이라고 생각한다. 또한 액빙(liquid ice)은 본질적으로 작은 얼음 조각과 수용액의 혼합물이기 때문에 수지상빙이 냉각면에서 이탈되는 것이 바람직하다. 따라서 이러한 현상을 지배하고 있는 인자를 명확히 파악하는 것이 필요하고, 이러한 것이 전열현상을 제어할 수 있는 지름길이 된다.

정지층에 있어서 수용액이 동결되는 경우에 있어서는 빙층과 빙층사이에 액의 상태로 수용액이 존재하기 때문에 해수의 담수화하는 경우에 다량의 염분이 포함되어 있어 식수 및 공업용수로서 사용하기에는 곤란하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 Fig 2.6에 나타낸 바와 같이 흐름이 존재하는 경우의 실험결과⁵⁾가 필요하다. Fig 2.6(a)의 경우에 침상동결층이 반경방향으로 성장하고 있지만, 측면으로부터 아래방향으로 석출된 용질이 동결층 표면을 따라 흘러내리기 때문에 융해가 발생하여 타원형의 빙층이 형성된다. 유속이 증가함에 따라서 박리점 근방에 형성되는 스텝(그림에서 움푹 들어간 부분)이 상류방향으로 이동한다. 따라서 어느 정도 이상의 유속에서는 Fig 2.6(d)에 나타내는 바와 같이 원에 가까운 형상으로 표면이 매끄러운 상태에서 스텝이 발생되지 않는다. 따라서 침상빙이 발생되지 않는 Fig 2.6(d)와 같은 상태의 얼음이 담수로서 사용이 가능할 것으로 생각된다.



(a) $\theta_{\infty}=4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) $\theta_{\infty}=5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (c) $\theta_{\infty}=7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig 3.1 Change of stream shape

3. 융해문제

3.1 빙층의 융해문제

탄산가스의 영향으로 지구의 온난화가 우려되고 있지만, 북극이나 남극의 얼음의 융해량은 어떠한 방법으로 산정 하는 것이 타당한가 또는 심야전력을 이용하여 동결시킨 얼음은 어떠한 방법으로 융해시켜 냉열로서 이용할 수 있을 것인가 하는 문제가 발생한다. 예를 들어 수평으로 놓여진 빙층의 융해량은 융해의 초기 즉 융해한 액층 두께가 얇은 경우에는 열전도의 문제로서 비교적 간단히 예측이 간단하지만, 시간이 경과해서 액층의 두께가 증가하면 융해액층 내에 발생하는 자연대류 때문에 융해량이 빠르게 증가하게 되어 그 예측이 어렵게 된다. 따라서 공학적으로 융해량을 정확하게 추정하기 위해서는 대류발생의 조건이나 대류전열에 의한 빙층의 융해거동을 파악 할 필요가 있다.

공기조화장치에서 축열조에 설치된 열교환기 주위의 빙층의 융해과정의 파악이 필요하며, 그림 3.1에는 단일 원주형상의 얼음 주위의 유체 흐름 모양(유체온도 θ_{∞} 의 효과)을 나타낸다⁶⁾. $\theta_{\infty}=4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 경우에는 상향흐름이, $\theta_{\infty}=5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 경우에는 관벽 근방에서 상향흐름이, 관으로부터 떨어진 부분에서는 하향흐름이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 3.2는 복수의 수평가열 원관 주위의 빙층의

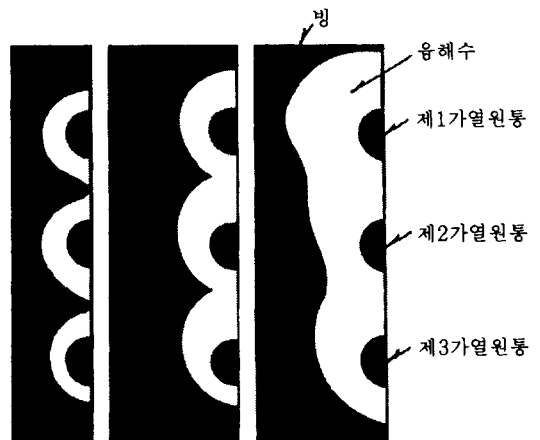


Fig 3.2 Process of melting behavior in surrounding fluid temperature with the lapse of time by vertical heating circular tube

융해거동의 시간적 변화를 나타낸 그림이다⁷⁾. 그림 중에서 백색부분이 융해액층을 나타낸다. 가열 후 10분까지는 열전도가 지배하는 열수송으로부터 동심원상으로 융해가 진행된다. 16분 후에는 각 가열관 주위의 융해수가 서로 간섭하게 되고 자연대류가 발달한다. 36분 및 58분에는 융해수 내의 자연대류 세력이 활발하게 되고 빙층의 융해속도가 크게 되어 인접하는 가열관으로부터의 융해 영역의 간섭 및 상부영역에서 융해영역의 확대가 나타난다. 이러한 결과는 열교환기에 있어서 효율적인 가열관의 배치방법의 하나로서 그 방향성을 제시한다.

3.2 서리층 형성과 융해

공기 중의 수증기가 물의 삼중점(0.01℃, 610.5Pa) 이하에 있는 저온물체표면에서 직접 얼음으로 변화하는 것을 서리라고 한다. 일반적으로 저온환경 하에서 과냉각상태에 있는 작은 물방울(안개나 구름)이 0℃이하의 물체에 충돌해서 순간적으로 동결되는 현상을 착빙이라고 하며 착상과 구별한다. 착상현상이 승화응결에 의한 것이지만, 과냉각 액적의 동결에 의해 일어나는 것은 냉각면의 형상, 온도 및 상변화에 필요한 과냉각도의 크기 등에 의존한다. 이러한 착상현상은 추수기에 있어서의 농작물의 피해를 발생시키며, 공업적으로는 저온열교환기나 저온다습지역에서의 공기 열원 열펌프시스템에서 실외증발기 주위에서의 착상은 열교환기의 성능저하, 제상시의 난방정지에 의한 쾌적성의 저하, 또한 제상운전을 반복함으로써 냉동기나 열펌프의 수명단축 등 여러 가지의

장해를 초래한다. Fig 3.3은 저온전열면온도 $\theta_w = -25^\circ\text{C}$, 외기온도 $\theta_\infty = 10 \sim 15^\circ\text{C}$, 상대습도 $\phi = 60 \sim 70\%$ 의 자연대류 하에 있어서의 서리층 성장의 시간적 변화를 나타낸다⁸⁾. 먼저 전열면에 침상의 비교적 투명한 서리가 다수 나타나고, 이어서 백색의 서리기둥과 서리결정[Fig 3.3(a)]의 성장이 나타난다. 또한 시간의 경과와 함께 Fig 3.3(b)에 나타난 것처럼 서리기둥간에 수지상의 서리층의 형성과 발달이 되고, 최종적으로 장시간 경과 후에는 서리층 표면에 수막의 형성 및 서리층 안쪽으로 물이 침투해서 그 물이 다시 응고하는 과정을 거쳐 서리층내에 빙층이 존재하는 정상상태가 되고 서리층의 발달이 정지하게 된다. 이처럼 열 및 물질의 2중확산현상의 결과로서의 비정상·불균일한 서리층은 상당히 복잡한 구조를 갖는다.

이러한 착상현상은 앞에서 설명했듯이 서리층의 성장에 의한 전열량의 감소, 통풍저항이 증가에 의한 열효율저하 등이 발생되며, 특히 고성능 열교환기에서 착상에 의한 효율의 저하는 더욱 심하다. 따라서 열교환장치의 성능을 유지하기 위해서 반드시 제상운전을 할 필요가 있다. 제상방식에는 냉동사이클방식과 비냉동사이클방식(전열방식, 물분사방식, 자연융해, 승화방식, 기계적 제거)이 있다⁹⁾. 여기서는 유동층에 의한 제상현상을 소개하고자 한다. Fig 3.4는 유동층에 의한 제상기구를 나타낸다¹⁰⁾. Fig 3.4(a)에 나타낸 바와 같이 습한 공기로서 구성된 기포층이 냉각면에 접하고 있는 영역에서는 냉각면에 수증기의 공급이 있고, 서리층이 성장

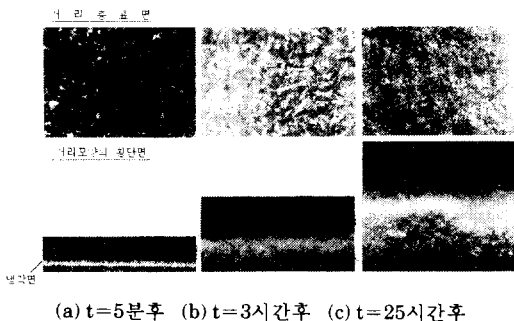


Fig 3.3 Process of frost layer with the lapse of time

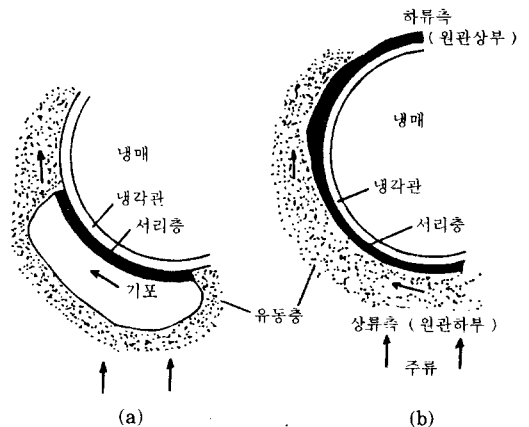


Fig 3.4 Defrost mechanism by fluid layer

한다. 한편 입자군에서 착상면이 떨어진 영역[Fig 3.4(b)]에서는 입자군이 함유하는 수증기량이 적은 것과 입자군의 충돌 및 미끄러짐 효과에 의해 서리층 발달의 억제 및 냉각면으로부터의 박리·이탈이 일어난다. 또한 유동층 입자가 갖는 입자분리효과에 의해 이탈한 서리입자는 정상적으로 유동층 밖으로 유출된다. 착상량이 많은 영역은 냉각원관의 측면 하류측에서, 입자군이 직접 충돌하는 원관 하부(상류측)와 수증기농도가 낮고 입자의 체류시간이 긴 원관상부에서 착상량은 더 적게된다.

4. 물의 동결·빙의 융해현상의 공학적 이용

4.1 식품가공 및 저장에 있어서 동결·융해 현상의 이용

수확한 농산물을 그대로 보관하면 미생물의 번식, 조직의 변화, 유지·비타민·아미노산의 산화 및 산소에 의한 변색 등의 변질을 일으킨다. 따라서 미생물의 번식을 억제하기 위해서는 농산물이 저온장해를 일으키지 않는 범위 내에서 온도관리가 필요하다. 생물조직내의 동결현상은 조직 내에 존재하는 여러 성질의 물이 얼음으로 변화하는 것이다. 이 과정의 결과로서 빙결정의 성장에 의한 세포조직의 파괴 또는 생체성분과 결합되어 있는 결합수의 탈수, 염분농축에 의한 조직손상이 일어나는 것으로 생각된다. 세포의 동결에는 세포 외 동결과 세포 내 동결이 있고, 빙결정이 형성되는 방법에 따라 동결장해의 관계가 해명된다. 식품의 동결보존에는 다음과 같은 방법이 있다.

- (1) 동결 직전상태인 $-2\sim-2^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 저장하는 방법
- (2) 절반동결상태 및 부분동결식품으로 $-2\sim-8^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 저장하는 방법
- (3) 당류, 식염, 단백질, 식물유 등을 사용해서 식품 중의 자유수를 줄이지 않고 수분활 동을 낮게 유지하는 것에 의해 $-2\sim-18^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 저장하는 방법

생체세포의 동결보존에 관련하여 생체세포는 일반적으로 60~80%의 수분을 포함하며, 그 중에

서 약 90%가 동결되는 자유수이고, 나머지는 다른 물질과 분자상호간의 작용에 의해 동결이 되기 어려운 복합수이다. 일반적으로 세포 내의 동결이 발생한 경우 생체조직의 대부분은 죽는 것으로 알고 있다. 동결에 의한 세포조직파괴는 도달온도와 냉각온도가 관계된다. 냉각속도를 일정히 하고 도달온도를 낮춤에 따라서 동결량도 증가하고 동결장해도 증가한다. 그러나, 초저온 또는 극저온 하에서는 빙결정의 상태와 세포장해정도가 변화되지 않는 한계도달온도가 있다. 한편 냉각속도를 변화시키면 어느 한계의 온도까지는 동결상태가 변화한다. 완전한 동결에서는 일반적으로 빙점을 지나서도 동결되지 않고 과냉각현상을 일으키는 경우가 많다. 급속냉각에 있어서는 빙결정이 작고 다수의 분산되는 형태로 된다. 일반적으로 세포 내에 발생한 빙결정의 크기 및 양에 따라서 세포가 죽게 된다. 그러나 극단적으로 냉각속도를 크게 하거나 동결보호물질이 첨가되어 있는 경우에는 동해(凍害)가 발생하지 않는 경우가 있다. Fig 4.1은 냉각속도에 의한 생존율을 나타낸 것으로 냉각속도가 작은 영역에서는 염분농축 및 탈수작용에 의한 동해 때문에 생존율이 현저하게 저하된다¹¹⁾. 적당한 냉각속도에서는 염분장에 및 세포 내 동결도 발생하지 않는 영역이 존재하고 생존율도 거의 100%에 이른다. 또한 냉각속도를 증가시키면 세포 내 동결을 일으켜 생존율이 극단적으로 저하된다. 액체질소 등을 이용한 초 급속 냉각에서는 세포조직 내에 빙결정이 형성되지 않으며, 세포조직은 동해를 받지 않아 생존율이 높은 양호한 동결보존이 가

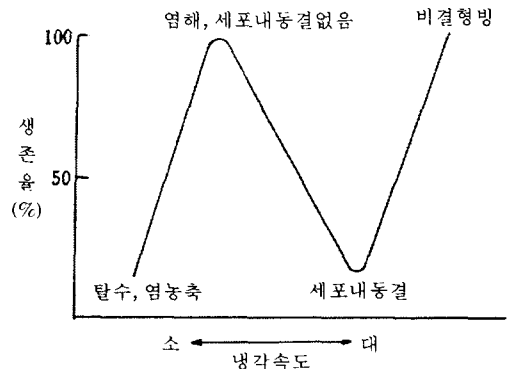


Fig 4.1 Coefficient of existence by freezing velocity

능하다.

이 밖에도 동결에 의한 물리적성질을 이용한 것으로 동결분쇄, 단백질의 변성 등 많은 분야에 응용되고 있다.

4.2 공조분야에 있어서 동결·융해현상의 이용

근래에 들어서 냉동기술의 발달, 전력수급평준화를 목적으로 한 심야전력의 유효이용, 환경문제에 관련하여 청정에너지화의 추진, 또한 지가 상승에 따르는 토지·건축공간의 유효이용 등을 배경으로 공조분야에 종래의 물을 주체로 한 현열축열(냉수축열) 이외에, 축열용량이 큰 얼음 잠열에 관련된 수요가 증가하고 있다. 최근에 있어서 빙축열시스템은 공조설비비의 단축이외에 저렴한 심야전력 등을 열원으로 해서 운전경비를 경감하는 것을 목적으로 시작되었다. 그 배경에는 냉방부하가 주간에 집중되고 열원으로서 전력사용의 시간적 불균형이 발생되었다. 따라서 전력공급 평준화의 입장에서 심야전력을 이용한 냉열원 분산시책이 전력회사 주체로 야간 축열운전용 전력요금의 큰 폭의 할인혜택을 줌으로서 빙축열시스템의 보급이 급 확산되고 있다.

냉수축열에 비교하여 빙축열의 장점은 다음과 같다.

- (1) 빙축열은 얼음의 융해잠열(334 kJ/kg)을 이 용함에 따라 작은 용적에서 큰 축열이 가능하다.
- (2) 축열조의 소형화가 가능함에 따라 축열조로부터의 열손실을 경감시킬 수 있다.
- (3) 빙축열시스템의 열원을 심야전력에 분산시킴에 따라 냉동설비의 소형화가 가능하다.
- (4) 제빙상태에서 냉매의 증발온도로서 $-6\sim -10^{\circ}\text{C}$ 가 필요하며, 이는 냉수열원의 $0\sim 2^{\circ}\text{C}$ 에 비교해서 냉동기의 성적계수의 저하(20~30%)를 방지할 수 있다.

그러나, 야간의 빙축열시스템에서는 냉매의 응축온도의 저하에 의한 성적계수의 향상, 기기의 소형화에 의한 동력의 절감이 가능하기 때문에 주간 운전 시 증발온도가 높은 냉수운전을 병행해도 냉수축열에 비교하여 종합적 성적계수를 높게 유지

할 수 있다. 또한 빙축열시스템의 효율적 운전에 있어서 제빙방법도 중요한 요소로 볼 수가 있다.

4.3 의료영역에 있어서 동결·융해현상의 이용

저온·동결현상의 의료분야에 있어서의 이용은 그 목적이나 온도범위에 따라 저체온마취, 동결수술 및 동결보존 등이 있다. 이처럼 의료분야에 있어서는 저온에 의한 세포기능의 저하 또는 동결에 의한 세포조직의 괴사 등을 방지하기 위해 저온·동결현상을 활용하고 있다.

저온마취는 전신 또는 국소적인 체온을 생리적 활성 범위이하로 저하시켜 심장, 뇌 등의 수술 시에 혈류차단을 막거나 세포대사기능의 저하를 겨냥한 것이다. 저온마취는 안정된 저 체온의 한랭반응을 저지시키고 동시에 호흡·순환기 계통의 부담을 경감시켜서, 충분한 마취심도를 유지하기 때문에 가능하다. 저온마취는 온도 및 수술내용에 따라 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 를 유지시킨다¹²⁾.

빙점하의 저온영역에서는 생체조직 내 수분의 결빙에 의해 조직세포는 물리·화학적인 다양한 장애를 받고, 심한 경우에는 세포의 사멸(死滅)이 된다. 이처럼 세포조직의 동결에 의한 효과를 이용한 것이 동결수술이다. 동결수술은 종래의 메스를 이용한 출혈·세균감염의 위험성이 적고, 조작이 간단하며 조직의 저온감수성의 차를 이용한 선택적 조직의 괴사도 가능하다. 냉동메스¹³⁾는 일반적으로 액화질소(-196°C)의 기화잠열에 의한 냉각작용을 이용한다.

4.4 건축분야에 있어서 동결·융해현상의 이용

한파로 인하여 토양이 동결되고 영구히 녹지 않는 상태를 영구동토라고 한다. 영구동토지대에서도 하절기에는 지표면 근처의 동토는 융해되지만, 융해토양하부의 영구동토는 콘크리트처럼 견고하여 수분을 침투시키지 않기 때문에 융해한 토양에 다량의 수분이 축적되어 활동층을 형성하며 초목의 생육에 기여한다. 한편 인공적으로 토양을 동결시켜 동토층의 수분의 차단효과 및 강도등을 이용한 동결공법이 토목공사에 보급되고 있다. Fig. 4.2

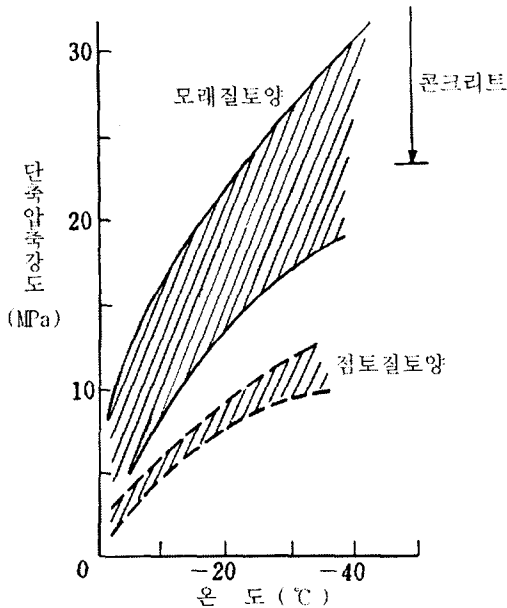


Fig 4.2 Compressive strength of frozen soil

는 동토토양의 압축강도를 나타낸 그림으로서 모래의 경우 미 동결상태에서는 압축강도가 0에 가깝지만 동결온도저하와 함께 큰 폭으로 증대하는 것을 알 수 있다. -35°C 이하의 동결온도에서는 콘크리트의 압축강도와 거의 같은 것을 알 수 있다¹⁴⁾. 이러한 결과로부터 동토의 압축강도는 얼음의 압축강도 1 MPa에 비교하여 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 종래부터 행하고 있는 방법으로 지반이 약한 곳의 강화를 위해 시멘트나 화학약품의 주입방법에 의해 야기되는 오염문제를 동결공법을 채용함으로써 해결이 가능하다. 즉 동결공법은 공사 종료 후 해동 시에 얼음이 물로 바뀌는 것이기 때문에 지하의 오염을 발생시키지 않는 이점이 있다. 이와 같은 다공질층 내의 동결현상에 대한 연구가 많은 연구자에 의해 진행되어 왔다.

4.5 인공 스키장에 있어서 동결현상의 이용

종래의 인공설은 냉동기 등에 의한 공랭, 물의 증발잠열에 의한 냉각, 또는 압축공기의 단열팽창에 의해 냉각된 공기 중에 물을 분무해서 만들었지만, 온도나 습도조건에 따라서 인공설의 질이 크게 저하하는 결점을 갖고 있다. 또한 얼음을 작은 입자로 분쇄¹⁵⁾하여 만든 눈은 인공설에 비하여 공기

온도에 관계없이 눈을 만들 수 있는 장점을 갖고 있다. 따라서 선진국에서는 액화천연가스(LNG)저장기지 주변에 LNG의 방대한 냉열을 이용하여 4계절용 인공스키장을 건설하려는 계획이 있다.

5. 결 론

상기에서 살펴본 바와 같이 저온환경 하에서의 발생하는 동결에 관한 자연현상을 관찰하고, 이러한 동결현상에 미치는 각 인자들을 파악함으로써 저온환경 하에서의 자연적인 재해가 인간생활에 유익한 정보가 됨을 알 수 있다. 앞에서 소개하지 못한 동결현상에 관련된 산업적인 응용은 동결 건조, 원자력사업에 응용되는 밸브리스공법, 동결담수화장치 등 많은 분야가 있으며, 현대문명사회에 있어서 동결현상은 상기 이외에도 많은 분야에 응용이 가능할 것으로 전망된다.

참고문헌

1. H. N. Fletcher, 前野(역), 氷の化學物理, 共立出版, pp.76, 1974
2. 稻葉, 追分, 福田, JSME, 54, 500, pp.984, 1988
3. 稻葉, 追分, 福田, JSME, 53, 495, pp.3317, 1987
4. 稻葉, 追分, JSME, 51, 471, pp.3777, 1985
5. 福迫, 山田, JSME, 56, 532, pp.3841, 1990
6. T. Saitoh, Appl. Sci. Res., 32, pp.429, 1976
7. 鳥越, 仲擇, 山下, 第26回日本熱シンポジウム, pp.580, 1989
8. 稻葉, 大竹, 野津, JSME, 第29期中西國支部講論, pp.10, 1991
9. 安立, 井上, 相擇, 日本冷凍, 52, 598, pp.715, 1977
10. 福迫, 田子, 山田, 草階, 第26回日本熱シンポジウム, pp.214, 1989
11. 阿曾, 隅田, 日本移植學會誌, 7, pp.87, 1971
12. 松橋鐵治郎, 日本冷凍, 58, 674, pp.3, 1983
13. 二葉機械(柱), クライオステックカタログ, 1972
14. 高志, 益田, 山本, 雪氷, 36, 2, pp.1, 1974
15. 笠原 浩, 空氣調和・衛生工學, 65, 10, pp.31, 1991