

수분무에 의한 아이스 슬러리 생성에 관한 연구

A study on ice-slurry production by water spray

김 병 선*, 이 윤 표**, 윤 성 영**, 이 진 호***
B. S. Kim, Y. P. Lee, S. Y. Yoon, J. H. Lee

Key words : Ice-slurry(아이스슬러리), Ethylene-glycol(에틸렌 글리콜), Spraying droplets(액적분무), Cold heat transport material(냉열수송물질)

Abstract

A theoretical and experimental study has been performed to investigate the characteristics of ice-slurry product. By diffusion-controlled model, the possibility of ice slurry has been theoretically anticipated. The water vapor evaporated from the surface of droplets is extracted continuously from the chamber by a vacuum pump. The droplet diameter was measured by silicon immersed method. The ice slurry has been obtained by spraying droplets of ethylene-glycol aqueous solution in the chamber where pressure is maintained under the triple point of water. The droplet of which the diameter is $300 \mu\text{m}$, and the initial temperature is 20°C , was changed into ice particle within the chamber of which the height is 1.33m.

기호설명

a : 액적반경, m

C_p : 비열, $J/(kg \cdot K)$

c : 증기밀도, kg/m^3

D_p : 액적직경, m

D_i : 증기확산계수, m^2/sec

h_{fg} : 기화삼열, J/kg

k : 열전도율, $W/(m \cdot K)$

M : 분자량, $kg/mole$

m : 액적질량, kg

P_{in} : 노즐분사압력, $kg/cm^2 G$

R : 기체상수, $N \cdot m/(mole \cdot K)$

그리스문자

λ : 평균자유행성, m

ρ_p : 액적밀도, kg/m^3

하첨자

* 대우전자 냉장고 연구소

** 정회원, 한국과학기술연구원

*** 정회원, 연세대학교 기계공학과

l, g : 액상, 기상

$r=a, r=\infty$ 에서의 값

1. 서 론

CFC 물질이 오존층 파괴와 연관되면서 비CFC 냉매에 관한 개발이 국내에서도 활발하게 진행되고 있다. 그러나 힘들여 개발된 CFC 대체 물질이 지금은 난화 지수등 새로운 환경파괴 기준치에 저촉되는 등 냉매의 개발전략을 혼돈스럽게 하고 있다. 이에 대하여 유럽에서는 냉매와 관련한 환경 파괴 논란에 근본적으로 대처하기 위하여 물, 공기, 헬륨등 자연냉매를 직접 냉동기 등에 이용하고자 하는 연구가 활발히 일어나고 있다.

물은 증발에 의한 제빙조건에서 수증기의 비체적이 매우 크므로 경제성이 의문시 되어 왔다. 그럼에도 불구하고 물은 환경에 무해하고 프로판등 다른 자연냉매에 비하여 안전하기 때문에 최근 유럽에서는 물 자체를 냉매로 하려는 시도가 활발하게 일어나고 있다. 특히 최근에는 물의 제빙조건인 저압하에서 관련 애로기술(증기압축기 등)을 해결함으로써 물 자체를 냉매로 하여 얼음을 생성하는 시도를 본격화하고 있다.⁽¹⁾ 물은 그 자체가 냉매이면서 고밀도 냉열 수송이 가능한 아이스 슬러리(Ice Slurry)를 바로 제조할 수 있다는 점에서 많은 매력을 갖는다⁽²⁾.

물을 분무시켜 얼음을 얻는 기술은 스키장의 인공제설에서 오래전부터 이용되어 왔다. 인공제설은 영하의 주변 대기에 압축기를 이용하여 물을 분무시켜서 눈을 만든다. 즉 주변의 영하의 대기로부터 액적으로 냉열이 전달됨으로써 얼음알갱이가 이루어진다.(이에 반하여 본 기술은 물 자체를 난열된 진공용기중에 분무하고 분무된 액적으로부터 증기를 지속적으로 제거하면 증기는 증발점열을 액적으로부터 공급받아야 하므로 액적자체의 온도가 강하게 되는 것이다.) 이와 같은 온도강하는 액적이 모두 얼음으로 바뀔 때까지 지속된다.

본 연구에서는 상온에서 분무된 액적이 1.33m 정도의 진공 챔버의 상부로부터 낙하하면서 바닥에 떨어지는 동안 액적의 일부 또는 모두가 과연 얼음으로 바뀔 수 있는가? 이를 위해선 어떤 액적조건이 필요한가? 얼음으로 바뀐 얼음알갱이는 바닥에 떨어질 때 유동성있는 아이스 슬러리를 구현할 수 있을 것인가? 등을 검증하기 위하여 이론 해석과

실험을 수행하였다.

단일액적의 증발현상을 확산제어적 증발(diffusion controlled evaporation) 모델을 사용하여 분무된 액적의 입경과 챔버압력조건에 따른 액적증발과정을 예측하였다.

노즐분사압력에 따른 액적의 입경변화를 감압된 챔버내에서 액침법에 의해 측정하였으며 동일한 분사압력에서 수용액과 일반 수돗물의 액적크기를 비교하였다. 또한 에틸렌 글리콜을 일정 비율 섞은 수용액을, 감압된 챔버에 분무하여 미세한 얼음입자를 가지는 고액이상(two phase)의 유동성 있는 아이스 슬러리의 생성과정을 관찰하였다.

2. 이론적 해석

2.1 액적의 질량감소율

압력에 따른 액적의 증발에 관한 내용은 문헌에 소개되어 있다^{(3), (4)}. 본 논문에서는 조건을 물의 삼중점 근처의 낮은 압력까지 확대시키고 액적의 증발을 이로 인한 액적자체의 온도변화와 연결하여 액적의 온도변화를 산출하였다. 액적표면에서의 수분증발을 단순히 확산제어적증발로 가정하면, Fig. 1과 같은 액적에 대해서 질량 감소율은

$$\dot{m} = 4\pi a^2 D \left(\frac{dc}{dr} \right)_a \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으므로

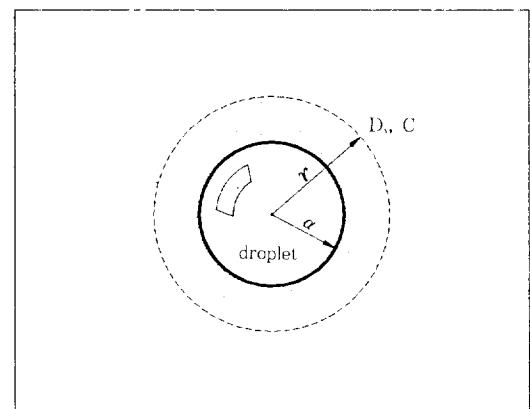


Fig.1 Diffusion controlled evaporation model

$$\frac{dc}{dr} = \frac{\dot{m}}{4\pi D_r r^2} \quad (2)$$

이 된다. 식 (2)를 적분하면

$$c_a - c_\infty = \frac{\dot{m}}{4\pi D_r} \int_a^\infty \frac{dr}{r^2} = -\frac{\dot{m}}{4\pi D_r a} \quad (3)$$

$$\dot{m} = -4\pi a D_r (c_a - c_\infty) \quad (4)$$

이 되고, 이것은 Maxwell 방정식에 해당한다. 액적증발에 따른 증기는 이상기체로 가정할 수 있으므로 식 (4)는 $c = MP/\bar{R}T$ 의 관계식을 이용하여

$$\dot{m} = -4\pi a D_r \frac{M}{\bar{R}} \left(\frac{P_a}{T_a} - \frac{P_\infty}{T_\infty} \right) \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다.

2.2 액적직경의 변화^{(5), (6)}

액적의 질량변화율은 $dD_p^3/dt = 3D_p^2 dD_p/dt$ 인 관계에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m} = \frac{\pi}{2} \rho_p D_p^2 \frac{dD_p}{dt} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)을 같게 두면, 시간경과에 따른 액적직경의 변화율은

$$\frac{dD_p}{dt} = \frac{4D_p M}{\bar{R}\rho_p D_p} \left(\frac{P_\infty}{T_\infty} - \frac{P_a}{T_a} \right) \quad \text{for } D_p > \lambda \quad (7)$$

로 나타낼 수 있고, 양변을 적분하여 액적이 직경 D_μ 에서 D_ν 로 증발될 때까지 걸리는 시간과의 관계식을 구할 수 있다.

$$\int_{D_\mu}^{D_\nu} D_p \, dD_p = \int_0^t \frac{4D_p M}{\bar{R}\rho_p} \left(\frac{P_\infty}{T_\infty} - \frac{P_a}{T_a} \right) dt \quad (8a)$$

$$D_\nu^2 - D_\mu^2 = \frac{8D_p M t}{\bar{R}\rho_p} \left(\frac{P_\infty}{T_\infty} - \frac{P_a}{T_a} \right) \quad (8b)$$

$$\text{for } D_p > \lambda$$

2.3 액적표면온도의 변화^{(7), (8)}

무한공간에 정지된 액적의 온도는 증발에 의한 잠열손실과 액적표면과 주변의 온도차에 의한 열전

도에 좌우된다. 이때 액적의 크기가 수백 μm 로 매우 작을 경우 액적내의 자연대류는 무시될 수 있는 것으로 가정한다. 열전도방정식은 다음과 같은 형태의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_g}{\rho_g C_{pk}} \left(\frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (9)$$

액적온도가 주변온도 보다 낮은 경우 ($T_a < T_\infty$)

$$\text{액적으로 의 열 전도율} = 4\pi a^2 k_g \left(\frac{dT}{dr} \right)_a \quad (10a)$$

$$\text{증발에 의 한 열 방출율} = h_{fr} \dot{m} = 4\pi a^2 D_r h_{fr} \left(\frac{dc}{dr} \right)_a \quad (10b)$$

로 나타낼 수 있는데, 정상상태에서는 액적표면에서의 열적평형 관계에 있으므로

$$k_g \left(\frac{dT}{dr} \right)_a + D_r h_{fr} \left(\frac{dc}{dr} \right)_a = 0 \quad (11)$$

이 된다. 한편 식 (1)과 식 (4)로 부터

$$\begin{aligned} \left(\frac{dc}{dr} \right)_a &= \frac{\dot{m}}{4\pi D_r a^2} = -\frac{(c_a - c_\infty)}{a} \\ &= -\frac{1}{a} \frac{M}{\bar{R}} \left(\frac{P_a}{T_a} - \frac{P_\infty}{T_\infty} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

로 낼 수 있다.

액적의 크기가 매우 작은 경우 온도구배는 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{dT}{dr} \right)_a = -\frac{(T_a - T_\infty)}{a} \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)를 식 (11)에 대입하여 정리하면,

$$T_\infty - T_a = \frac{D_r h_{fr} M}{\bar{R} k_g} \left(\frac{P_a}{T_a} - \frac{P_\infty}{T_\infty} \right) \quad (14)$$

이 되고, 이 식을 통해 정상상태에 도달한 액적의 온도는 액적의 크기에 무관함을 알 수 있다.

‘액적의 내부에너지 변화 = 전도에 의한 열획득 – 증발에 의한 열손실’의 관계를 이용하여 유사정상상태에서 짧은 시간경과 후의 온도변화를 구하면

다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta T_d = \frac{\text{증발에 의한 열손실-전도에 의한 열획득}}{4/3\pi a^3 \rho_p C_{pi}} \quad (15)$$

$$\frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 C_{pi} \delta T_d = \left\{ \pi D_p^2 h_{fr} D_i \left[-\frac{2M}{D_p R} \left(\frac{P_a}{T_a} - \frac{P_\infty}{T_\infty} \right) \right] + \pi D_p^2 k_s \left[-\frac{2}{D_p} (T_a - T_\infty) \right] \right\} \cdot \delta t \quad (16)$$

$$\delta T_d = -\frac{12}{\rho_p C_{pi} D_p^2} \left\{ \frac{h_{fr} D_i M}{R} \left(\frac{P_a}{T_a} - \frac{P_\infty}{T_\infty} \right) - k_s (T_\infty - T_a) \right\} \delta t \quad (17)$$

2.4 이론해석의 결과

Fig.2는 챔버내의 압력이 물의 삼중점에 해당하는 포화압력(0.6113kPa)일 때, 초기온도 20°C 인 액적의 초기입경에 따른 표면온도의 변화를 식 (17)을 사용하여 계산한 것이다. 식 (14)에 나타낸 바와 같이 일정시간이 경과한 최종 정상상태에서의 액적표면온도는 액적의 크기와 무관하게 동일하게 된다. 그러나 초기 액적의 입경이 작을수록 액적의 온도는 빨리 감소함을 알 수 있다. 또한 초기액적크기가

$300\mu\text{m}$ 이하일 때 초기온도가 20°C 이더라도 0.07sec 이내에 0°C 까지 감소함을 알 수 있다. 따라서 0.6113kPa 로 유지된 단열용기내에 상온의 물도 액적 $300\mu\text{m}$ 이내로 분무하여 주면 0.07sec 이내의 낙하동안 얼음으로 바뀔 수 있다는 것을 짐작할 수 있다.

Fig.3은 초기온도 20°C 인 $300\mu\text{m}$ 크기의 액적이 단열된 용기에 분무되었을 때의 온도변화를 나타낸 것이다. 이때 액적은 얼음으로 바뀌지 않는다고 가정하였다. Fig.3으로부터 분무된 상온의 액적이 체공시간 0.07sec 이내에 얼음으로 바뀌려면 0.477kPa (0.0047 기압, 3.5torr) 정도의 압력조건이 되어야 함을 알 수 있다. 왜냐하면 얼음생성이 시작되기에는 어느정도의 과냉이 있다고 예상되기 때문이다.

이상의 해석적인 결과로부터 초기온도 20°C 의 물로부터의 증기흡수에 의하여 Ice Slurry의 생성이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 다만 이를 위해선 다음과 같은 환경을 만들어야 한다. 즉

- 초기 액적은 $300\mu\text{m}$ 이하이어야 한다.
- 액적의 체공시간은 0.07 sec 이상이어야 한다.

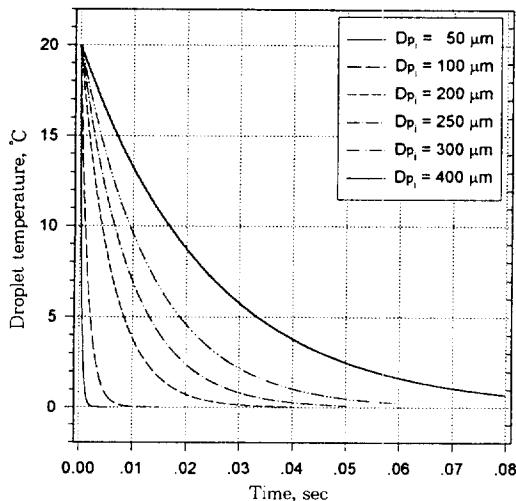


Fig.2 Effect of initial droplet diameter on variation of droplet temperature

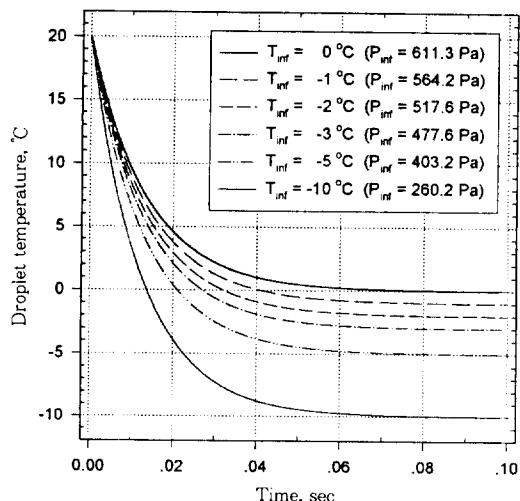


Fig.3 Effect of surrounding pressure on variation of droplet temperature

- 용기내의 압력조건은 $0.477 kPa$ (0.0047 atm, 3.5 torr) 이하로 유지시켜야 한다.

3. 실험 및 결과고찰

3.1 실험장치

앞서의 해석으로부터 초기액적을 $300\mu m$ 분무할 수 있는 노즐을 선정하였다. 또한 액적 체공시간 0.07sec 이상을 확보하기 위해 높이 1.33m의 기밀이 유지되는 진공챔버⁽¹⁾를 준비하였다. Fig.4는 아이스슬러리 제조 및 노즐에서 분무된 액적의 특성을 분석하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

정압장치가 장착된 압축공기용기⁽¹⁸⁾, 물과 에틸렌 글리콜의 혼합(에틸렌 글리콜의 혼합이유는 물만의 예비분무에서 지나치게 딱딱한 얼음이 얻어졌기 때문임.)을 위한 수용액 혼합유니트⁽¹⁷⁾, 공급수 제어 유니트⁽¹⁶⁾, 필터⁽¹⁵⁾로 구성되어 있다. 노즐로 공급되는 유체의 압력 및 온도를 보다 정확히 측정하기 위해 압력계와 열전쌍을 노즐로부터 아래로 10mm 떨어진 위치에 설치하고 배관주위를 단열하였다.

진공매기장치는 배제용적 1,500 ℓ /min 인 진공펌프⁽¹⁴⁾, 진공 앞단에 설치하여 진공펌프를 보호하기 위한 콜드 트랩⁽⁷⁾, 압력센서⁽³⁾를 통해 검출된 전기적 신호를 시스템 제어장치⁽¹³⁾에 설정된 압력치에 의해 밸브의 개폐가 가능한 쓰로틀 밸브⁽⁶⁾로 구성되어 있다.

챔버내부의 배기구조는 분무된 액적이 배기구에 직접 유입되는 것을 방지하기 위해 챔버상부 플렌지 내부에 디스크 형상의 플레이트를 설치하여 공기 또는 수증기가 그 틈을 통해 배출될 수 있도록 하였다. 콜드 트랩의 경우 액체질소가 담겨 있는 실린더 형상의 용기 주위로 O.D. 1/2인치 동관을 취부하여 수증기가 동관 내부를 통과하는 동안 빙착될 수 있게 하였다.

냉각수 순환회로⁽²¹⁾는 챔버의 가시창 및 플렌지 등으로 전달되는 열량의 보상 및 분무액적의 분무작전인 초기온도를 상온 이하로 조절하기 위한 것이다.

온도측정의 경우 챔버내부와 내벽면 등에 취부된 열전쌍에서의 전기신호를 열전쌍 입력보드⁽¹¹⁾를 통해 수신하고 컴퓨터⁽¹²⁾에 내장된 A/D 변환기를 이용하여 온도데이터를 얻는다.

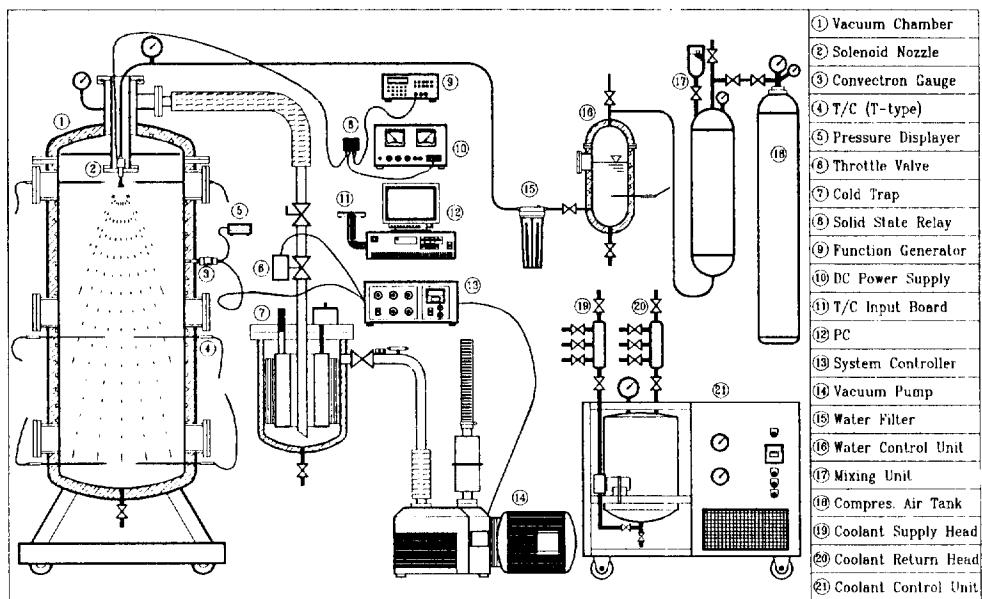


Fig.4 Schematic diagram of ice slurry making system

압력측정의 경우 진공챔버에 취부된 압력센서⁽³⁾와 진공게이지 제어기⁽⁵⁾를 통해 압력데이터를 얻는다.

액적분무에 사용된 노즐은 MPI(Multi Point Injection) 방식의 가솔린엔진에 사용되는 연료분사밸브로 본체와 전자석이 부착된 니들(needle)로 구성되어 있다. 마그네트(magnet)의 동작에 따라 니들은 시트(seat)에서 약 0.1mm 정도 위로 이동하면서 이때 유체가 열려진 틈을 지나서 니들의 끝에 있는 펀틀(pintle)을 통해 분무된다.

3.2 분무액적의 입경측정

액적의 크기를 측정하는 방법으로는, 측정대상이 거의 진공상태의 밀폐된 용기내에 존재한다는 기술적인 어려움 때문에, 비교적 측정이 간단한 오일배스(oil bath) 채집방법을 선택하였다. 오일로는 물의 액적채집에 주로 사용되는 실리콘 오일을 사용하였다.

진공챔버의 바닥면에 오일배스(oil bath)를 설치하고 진공펌프를 가동하여 챔버내 압력이 1 torr (0.133kPa)가 되는 시점에서 10초 동안 분무하였다. 분무된 액적이 채집된 오일배스는 챔버의 가시창 체결부를 통해 꺼내어 배율 50~10,000배의 측정이 가능한 전자현미경과 장착된 폴라로이드 카메라(Polaroid camera)에 의해 채집된 액적의 크기를 측정하였다. 전자현미경에서 최저배율(50배) 촬영시 얻어지는 사진의 크기는 95×73mm²로 10

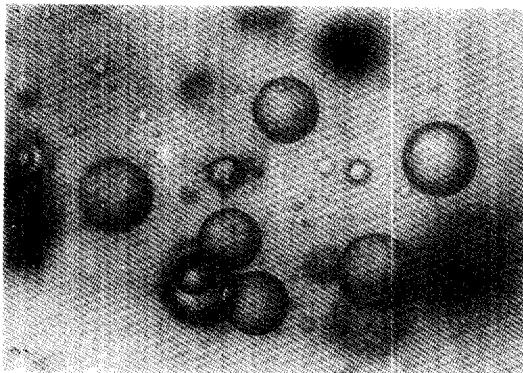


Fig.5 Microphotograph of droplets

~15개 정도의 액적화성이 포함되는데 화상을 얻는 위치에 따른 편차를 줄이기 위해 각기 다른 위치에서 2~4회의 샘플링(sampling)을 하였다. Fig.5는 전자현미경으로 촬영된 액적이다.

오일배스에 채집된 액적의 사진으로부터 액적은 거의 완전한 구형상으로 채집된 것을 알 수 있다. 분무와 관련된 평균직경은 SMD(Sauter Mean Diameter)를 적용하여 다음과 같은 식 (18)을 이용하여 구할 수 있다.

$$D_{ab} = \left[\frac{\sum ND_i^a}{\sum ND_i^b} \right]^{1/(a-b)} \quad (18)$$

여기서 a, b는 분무조건에 따른 상수이다.

Fig.6은 에틸렌글리콜 7% 혼합액(E. G. Sol.)에 대하여 분사압과 액적평균입경의 관계를 나타낸 것이다. 본 실험결과 분사된 액적의 평균직경은 200~350μm 범위의 값을 가지고 노즐의 분사압이 커질수록 평균직경이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 에틸렌 글리콜의 점도는 0°C에서 6.51×10^{-2} N·s/m²로 물의 점도(1.75×10^{-3} N·s/m²)에 비해 큰 값(약 37배)을 가지므로 액체의 점도가 증가함에 따라 평균입경이 증가함을 본 실험을 통해 알 수 있다.

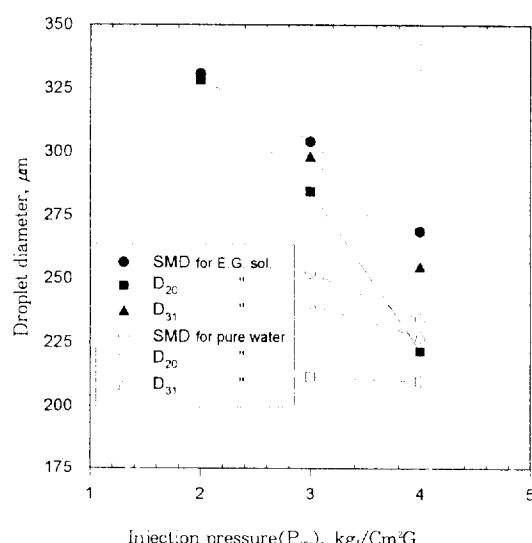


Fig.6 Mean diameters of droplets captured in oil bath

3.3 수분무를 통한 아이스 슬러리 제조

진공챔버 내 압력을 1 torr 조건에서 실제로 아이스 슬러리 제조장치 전체를 가동하여 진공배기관 경에서 수분무를 통한 아이스슬러리 형태 및 시간에 따른 챔버내 각 부위의 온도변화를 관찰하였다.

Fig.7은 최초 챔버내 각 부위의 온도를 외기온도(약 25°C)에 근사시킨 후 진공펌프를 가동시켜 챔버내 압력이 1torr 이하가 되는 시점에서 노즐을 통해 에틸렌 글리콜 7% 수용액을 분사압 2kg/cm²G로 분무했을 때 챔버내 각 위치에서의 온도를 보여준다.

해석에서 예상하였듯이 챔버 벽면 온도가 상온이고 분무액체(supplied solution)의 온도가 상온임에도 불구하고 분사초기단계에 바닥에서 챔버내 각 부위 온도가 약 -10°C까지 떨어짐을 알 수 있다. Fig.7에서 챔버 내부가 액적증발에 의하여 준평형 상태이므로 챔버 내의 중간 위치에서 온도는 아이스 슬러리 온도와 비슷하게 -10°C까지 떨어진다. 그러나 실험의 시작전에 챔버 내의 하부 온도가 실내 온도와 같아져 있으므로 아이스 슬러리가 생성되어 바닥에 도달해도 챔버 내의 하부 온

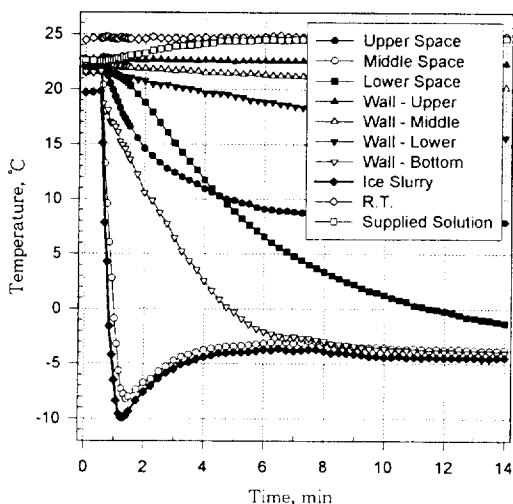


Fig.7 Temperature variations in chamber by spraying water solution. Measuring condition : Ethylene glycol 7%, $P_{\text{v}} = 2 \text{ kg}/\text{cm}^2\text{G}$, Duty=5%

도는 챔버 내의 중간 위치에서 온도보다 서서히 강하하는 것을 볼 수 있다.

Fig.8(a)는 7% 에틸렌 글리콜 수용액을 감압된 챔버에 분무하여 얻어진 아이스슬러리를 채취한 것으로 고체와 액체상태가 공존하는 미세한 입자의 얼음죽이 형성되었음을 알 수 있다. 한편, Fig.8(b)은 에틸렌 글리콜을 포함하지 않은 수돗물(city water)을 분무한 경우이다. 챔버바닥에 떨어진 얼음알갱이가 서로 부착되어 딱딱한 빙과가 형성됨을 알 수 있다. 이와 같이 딱딱한 빙과는 추출해낼 때 많은 어려움이 예상된다. 따라서 부동액의 일종인 에틸렌 글리콜을 일정량 함유한 수용액을 분무시켰다. 에틸렌글리콜을 구태여 7% 함유한



(a) Aqueous solution(Ethylene-glycol 7%)



(b) water(no Ethylene-glycol)

Fig.8 Photographs of ice obtained by spraying water or its aqueous solution

이유는 예비실험에서 과냉을 약 -3°C 로 조절하기 위함이다.

3.4 빙축열량 계산예

본 연구에 사용된 실험장치에 대해 다음과 같은 액적분무조건이 주어졌을 때 단위시간당 얻을 수 있는 빙축열량을 본 연구의 이론해석과 실험을 통해 얻어진 결과를 이용하여 계산하였다. 계산조건은 다음과 같다.

- 분사압력(P_{inj}) : $3\text{kg}/\text{cm}^2\cdot\text{G}$
- 분무수온(T_{inj}) : 20°C , 물(water)
- 챔버조건 : $P_{\infty} = (P_{\text{sat}})_{-5^{\circ}\text{C}} = 0.403\text{kPa}$
- 노즐에서 챔버바닥까지의 거리 : 1.33m

그리고 이론 해석을 위해서 액체 분무를 다음과 같이 가정하였다.

- 챔버바닥에 도달한 액적은 더 이상 증발하지 않는다.
- 챔버내부의 상태는 단열포화상태로 self-control 된다.
- 액적은 과냉각(supercooling) 없이 0°C 에서 상변화가 진행된다.

이상과 같은 조건 하에서 단위시간당 분무유량(G), 분무 액적의 크기(D_{inj}), 단위시간당 분무액적의 수(N)등은 사용된 노즐의 특성으로 부터 다음과 같이 결정된다.

$$\dot{G} = 89.75\text{g}/(10\text{min}) = 1.50 \times 10^{-4}\text{kg/sec}$$

$$D_{\text{inj}} \div 250\mu\text{m} = 2.50 \times 10^{-4}\text{m}; SMD$$

$$m = \frac{\pi}{6} \rho_i D_{\text{inj}}^3 = 8.18 \times 10^{-9}\text{kg}$$

$$N = \dot{G}/m = 1.83 \times 10^4 \#\text{/sec}$$

그리고 단일액적의 증발량(δm)은 다음과 같은 식으로 부터 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta m &= \frac{\pi}{6} \rho_i \left\{ \frac{D_{\text{inj}}^3}{1 + (\rho_i/\rho_r - 1) \times (I.P.F./100)} - D_{\text{inj}}^3 \right\} \\ &= \frac{\pi}{6} \times 1000 \\ &\times \left\{ \frac{(2.4634 \times 10^{-4})^3}{1 + (1000/917 - 1) \times (34.85/100)} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &- (2.5 \times 10^{-4})^3 \} \\ &= -5.93 \times 10^{-10}\text{kg} \end{aligned}$$

액적 분무에 의한 총 빙축열량(Q_c)은 얼음의 잠열, 분무 액적의 수로부터 계산된다.

$$\begin{aligned} Q_c &= -\delta m \cdot N h_{f_{\text{inj}}} \\ &= (5.93 \times 10^{-10})(1.83 \times 10^4)(2.477 \times 10^6) \\ &= 26.9\text{W} \end{aligned}$$

이때 사용된 얼음의 잠열은 다음과 같은 식으로 부터 계산하였다.

$$\begin{aligned} \therefore h_{f_{\text{inj}}} &= \sqrt{(h_{f_{\text{inj}}})_{0^{\circ}\text{C}} \times (h_{f_{\text{inj}}})_{20^{\circ}\text{C}}} \\ &= \sqrt{(2.501 \times 10^6)(2.454 \times 10^6)} \\ &= 2.477 \times 10^6 \text{J/kg} \end{aligned}$$

3.5 아이스 슬러리 생성 조건 도출

일반적으로 배관 크기가 100mm 이하의 소규모 시스템에 있어서 본 연구에서와 유사한 아이스 슬러리를 배관을 통해 수송할 때 적절한 빙분율은 $25\sim30\%$ 범위로 알려져 있다.

물의 분무에 의하여 아이스 슬러리 수송에 적합한 빙분율을 얻기 위한 시스템을 구성하기 위해 선설계자에게 노즐의 분사압력, 분무액적의 직경, 챔버설정압력(P_{inj})의 조합을 제공하여 주어야 한다. 이를 위하여 Fig.2, Fig.3 및 Fig.6 그리고 액적의 노즐에서 출발하여 챔버바닥면까지 도달하는데 걸리는 시간 등을 조합하여 본 논문의 결론이라고 할 수 있는 Fig.9와 같은 도표를 작성하였다.

계산조건

- 물의 공급온도, 즉 초기액적 온도($T_{\text{inj}}: 20^{\circ}\text{C}$)
- 적성빙분율 : 27.5% (즉 액적이 바닥에 도달시 액적전체의 27.5% 가 얼음으로 바뀐 상태)
- 액적의 어는점 : $T_f = -2.42^{\circ}\text{C}$ (7% 에틸렌 글리콜 수용액)

도표의 이용방법

(1) 본 연구에 사용된 실험장치에 대한 해석에 : 노즐분사압력이 $4\text{kg}/\text{cm}^2\cdot\text{G}$ 일 때 약 $270\mu\text{m}$ 크기의 액적을 얻었고 노즐에서 챔버의 바닥면까지의 거리는 1.33m 이므로 Fig.9의 상부 x -축(Injection Pressure)에서 ' 4 '인 점으로부터 y -축에 평행한

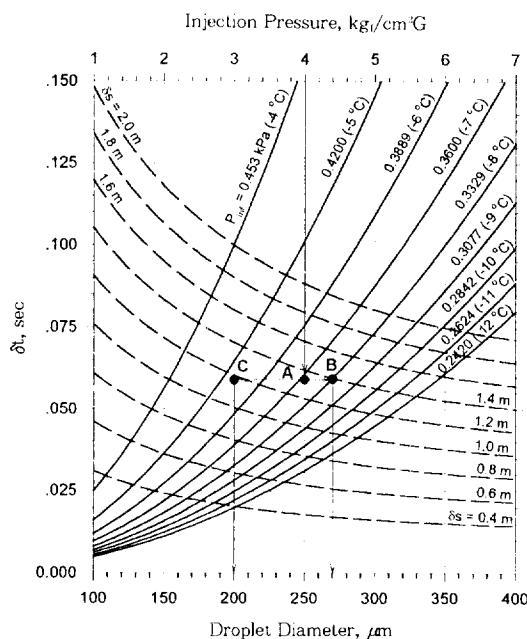


Fig.9 Optimizing chart for making transportable ice-slurry(at I.P.F. = 27.5 %)

선을 그어 점선으로 표시된 곡선에서 $\delta_s = 1.33m$ 에 해당하는 점(A)을 찾는다.

A점에서 x축과 평행한 직선을 그고, 하부 x축(Droplet Dameter)에서 $270\mu m$ 에 해당하는 점으로부터 y축에 평행한 직선을 그어 교차점(B)에서의 해당 P_{in} 의 값($=0.3329kPa$)을 읽는다. 따라서 챔버압력은 $0.3329kPa$ 를 유지시켜야 원하는 아이스 슬러리를 얻을 수 있다.

(2) 동일한 분사압력에서 분무된 액적입경이 작은 경우 :

분사압력과 챔버의 크기가 ①의 경우와 같고 액적($200\mu m$)을 분무할 수 있다면 Fig.9의 A점에서 x축과 평행한 직선을 그고, 하부 x축(Droplet Diameter)에서 $200\mu m$ 에 해당하는 점으로부터 y축에 평행한 직선을 그어 교차점(C)에서의 해당 P_{in} 의 값($\approx 0.41kPa$)을 읽는다. 즉, 동일한 분사 압력에서 ①의 경우보다 작은 크기의 액적을 분무할 수 있다면 챔버의 압력을 보다 높게 유지하더라도 무방함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 감압된 챔버내에 에틸렌 글리콜을 일정한 비율로 섞은 수용액을 분무하여 빙축열 시스템에 있어서 잠열수송이 가능하게 하는 아이스 슬러리(ice-slurry)를 생성시키기 위한 연구를 수행하였다. 이로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 단일액적의 증발에 대한 이론해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. 즉 초기온도 $20^{\circ}C$ 의 물로부터의 증기흡수에 의하여 아이스 슬러리의 생성이 가능하다. 다만 이를 위해선 다음과 같은 조건을 만들어야 한다.

- 초기 액적은 $300\mu m$ 이하이어야 한다.
- 액적의 채공시간은 $0.07sec$ 이상이어야 한다.
- 용기내의 압력조건은 $0.477kPa$ 이하로 유지시켜야 한다.

2) 해석으로부터 얻어진 내용으로부터 아이스 슬러리 생성을 위한 실험장치를 구성하고 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 분사된 액적의 평균직경은 분무압 $3kgf/cm^2$ G에서 $200\sim 350\mu m$ 범위의 값을 가지고 노즐의 분사압이 커질수록 평균직경이 감소하는 경향을 나타낸다.
- 에틸렌 글리콜의 함유량이 많을수록 평균입경이 증가한다.
- 챔버벽면 온도가 상온이고 분무액체의 온도가 상온임에도 불구하고 분사에 의하여 생성된 아이스 슬러리의 온도가 약 $-10^{\circ}C$ 까지 떨어짐을 알 수 있다.
- 7% 에틸렌 글리콜 수용액을 감압된 챔버에 분무한 결과 미세한 입자의 얼음죽이 형성되었음을 알 수 있다.
- 에틸렌 글리콜을 포함하지 않은 수돗물(city water)을 분무한 경우, 챔버바닥에 떨어진 얼음 알갱이가 서로 부착되어 딱딱한 빙괴가 형성되었다.

3) 계산에 의한 증발량은 질량비로 분무유량의 7.25%이며 이로부터 산출된 빙축열량은 $26.9W$, 분무량당 얼음생성량은 $1kg$ 의 분무에 $0.53kg$ 의 얼음을 생성할 수 있다.

4) 액적의 체공시간, 분사압력, 분무액적의 직경, 챔버설정압력(P_{int})등을 조합하여 아이스 슬러리를 얻을 수 있는 운전조건을 도출할 수 있는 Fig.9과 같은 도표를 작성하였다.

참 고 문 헌

1. Joachhim, P., 1994, "Water as Alternative Refrigerant", International IIF/IIR Conference Hannover, pp. 97~108
2. Hideo Inaba, Kengo Takeya and Shigeru Nozu, 1994, "Fundamental Study on Continuous Ice Making Using Flowing supercooled Water", JSME International Journal, Series B, Vol. 37, No. 2, pp. 385~393.
3. David, T. S., 1978, Fundamental of Aerosol Science, John Wiley & Sons, pp. 135~164.
4. William, C. H., 1982, "Aerosol Technology", John Wiley & Sons Inc., U. S. A., pp. 249~273.
5. James, C. L. and Kam, C. N., 1990, "Effect of Ice Nucleators on Snow Making and Spray Freezing", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 29, No. 3, pp. 361~366.
6. Robert, C. R., John, M. P. and Thomas, K. S., 1977, The Properties of Gases and Liquid, 3rd ed., McGRAW-HILL.
7. Felix, F., 1982, Water, Vol. 7, Plenum Press, New York, pp. 1~81.
8. Arthur, H. L., 1989, Atomization and Spray, Taylor & Francis, pp. 79~103.