⊙ 速報研究論文

구형용기의 하부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 기초적 연구

김명준* · 길병래** · 김명환**

A Fundamental Study on Sea Water Freezing Behavior in a Rectangular Vessel Cooled from Below

M.J.Kim · B.L.Kil · M.H.Kim

Key words : LNG Cold Energy(액화천연가스 보유 냉열), Desalination System(담수화 장치), Sea Water Freezing Behavior (해수동결거동)

Abstract

The most important factor for the desalination system is the fresh water production cost dependent upon the possible energy source which should be obtained easily and with low price. Recently in Korea the demand of LNG, as a cheap and clean energy which does not cause an environmental problem, has sharply been increased. In general, LNG is storaged in a tank as a liquid state below -162℃. When it is serviced, however, the LNG absorbs energy from a heating source and transforms to the gaseous state with high pressure. During this process a huge amount of cold energy accumulated in LNG is wasted. This waste cold energy can be utilized for producing fresh water from sea water using a sea water freezing desalination system. In order to develop a sea water freezing desalination system and to establish its design technique, a qualitative and quantitative data regarding the freezing behavior of sea water is needed in advance. The goal of this study, therefore, are to reveal the freezing mechanism of sea water, to measure the freezing rate, and to investigate the freezing heat-transfer characteristics. The experimental results help to provide a general understanding of the sea water freezing behavior in a Rectangular vessel cooled from below.

* 한국해양대학교 대학원 (원고접수일 : 97년 10월)
** 한국해양대학교 기관공학부

기호설명

F_o : Fourier 수 ($\alpha \cdot \tau/Ho^2$)
H_0 : 초기용액의 깊이 (m)
R_f : 무차원 동결량 (V_f/Ho)
T_f : 농도에 따른 평형 동결온도
T_0 : 물의 동결온도
T_w : 냉각면 온도
V_f : 냉각면 단위면적당의 동결량 (m^3/m^2)
θ_w : 무차원 냉각면 온도($(T_f-T_w)/(T_0-T_f)$)
α : 얼음의 온도전도율 (m^2/s)
τ : 시간 (s)

1. 서 론

21세기에는 물부족으로 인한 국제분쟁이 도처에서 일어날 것으로 여러 전문기관들은 예견하고 있으며, 95년 유엔산하기구인 국제인구행동연구소에 의해 『물부족국가』로 분류된 바와 같이 우리나라도 물이 부족한 나라중의 하나이다. Table.1에 따르면 2006년에 4억5천톤의 물이 모자라는 등 앞으로 7~8년 뒤부터 심각한 물부족 현상이 일어날 것으로 예상하고 있으며 2000년대의 공업용수, 생활용수 및 농업용수의 안정적인 확보를 위하여 정부는 2011년까지 90조원을 투입해 34개의 댐을 추가로 건설하고자 계획하고 있다. 이러한 국내외적인 상황으로 비추어 볼 때 절대적으로 강우량이 부족한 우리나라는 자연적인 강우에 대한 치수의 노력과 아울러 인공적인 용수생산에 대한 절실한 노력이 요구된다.

인공적인 용수생산을 위하여 무한한 자원인 해수[1]를 담수화[2]하려는 노력이 지배적으로 이루어지고 있으며, 그 방법으로는 증발법, 역삼투막법 및 동결법 등이 있다. 담수화방법의 채용에 있어서 가장 중요한 요소는 담수생산비용이며 이는 쉽고 값 싸게 얻을 수 있는 담수화의 에너지원이 무엇인가에 의해 결정된다. 최근 우리나라는 Table.2와 같이 값싸고 환경문제를 야기하지 않는 청정연료인 LNG에 대한 수요가 급증하고 있다. -162℃의 액체상태로 탱크에 저장되어 있는 LNG는 고압의 기체상태로 공급되어지므로 이 때 기화와 승온에 필요한 에너지가 요구된다. LNG는 기화와 승온에 필요한 에너지를 흡열하는 과정에서 LNG가 보유한 다량의 냉열이 폐기된다. 이렇게 폐기되는 다량의 냉열을 유효하게 이용하는 하나의 방법으로서 LNG의 폐냉열을 해수동결 담수화장치[3]의 에너지원으로 이용한다면 담수생산비용을 격감시킬 수 있을 뿐만 아니라 LNG기지주변의 공단 및 주택지에 용수를 안정적으로 공급할 수 있으며 LNG 보유에너지의 극대이용으로 성에너지의 목적도 달성할 수 있다.

LNG냉열을 이용한 해수동결 담수화장치의 개발과 설계기술의 확립에 있어서는 우선적으로 해수동결거동에 관한 정성적, 정량적인 기초자료가 요구되어진다. 따라서 본 연구는 해수동결거동에 관한 기초적인 자료확보를 위하여 하면에서 냉각되어지는 구형용기내의 해수동결에 대한 메카니즘, 해수농도 및 냉각면온도가 동결량과 열 · 물질이동적인 특성[4~7]에 미치는 영향 등을 가시화를 포함하는 실험적 방법으로 검토하였다.

Table.1 물 공급량과 수요예상량 비교 단위 : 억톤

년 도	1994	2001	2006	2011
공 급 량	322.1	342.9	345.4	346.5
수 요 량	299.0	336.4	349.9	366.5
공급부족량			4.5	20.0

Table.2 LNG 공급예상량 단위 : m^3

년도	1997	1998	1999	2000
LNG	6.3×10^9	7.0×10^9	7.9×10^9	9.0×10^9

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 전체계통도이다. 본 실험장치는 크게 시험부, 브라인 순환부, 측정부 및 가시화부로 구성되어 있다. 시험부는 150×100×230mm의 구형용기로 전면과 후면은 투명유리, 측면과 윗면은 투명 아크릴로 되어 있으며 하면은

등온냉각을 위하여 두께 2mm의 동판으로 이루어져 있다. 구형용기의 하면을 소정의 냉각온도로 유지하기 위하여 냉동기에 의하여 온도가 조절된 브라인이 펌프와 미세 온도조절용의 정온도조절장치를 거쳐 하부동판의 뒷면에서 골고루 분사되도록 하였다. 구형용기의 냉각면 온도는 동판의 표면에 등간격으로 부착된 3개의 열전대로부터 검출되어 정온도조절장치 및 데이터 처리장치로 입력된다. 또한 구형용기내의 동결부와 용액부의 온도분포를 측정하기 위하여 42개의 열전대를 수직으로 위치시켰으며 데이터처리장치를 통해 P.C에서 온도를 기록하도록 하였다. 구형용기의 상부에는 동결이 진행됨에 따라 증가하는 체적량을 보상함과 아울러 증가된 체적량으로부터 동결량을 측정하기 위하여 내경 10mm의 팽창봉을 수직으로 부착하였다.

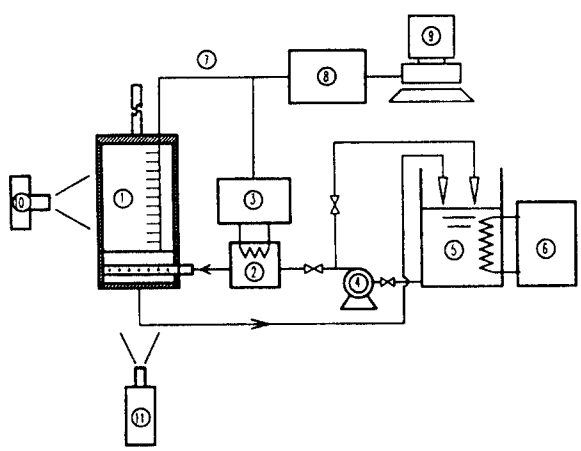
2.2 실험방법

본 실험에서는 해수의 평균농도가 3.5wt%임을 감안하여 시료로서 0wt%, 1.8wt%, 3.5wt%의 염화나트륨 수용액을 사용하였다. 구형용기내에 충만되어 있는 염화나트륨수용액의 초기온도는 5℃이며 소정의 냉각온도로 조절된 브라인을 냉각면의 뒷면에 분사하는 시각을 실험의 시작점으로 하였다. 실험이 진행됨에 따라 성장하는 빙층의 형상, 두께, 동결량 및 온도분포는 지속적으로 관찰, 측정되었으며 He-Ne Gas Laser를 이용한 그림자 영법 등의 방법으로 동결거동을 가시화하였다. 동결량은 팽창봉을 통한 수용액의 체적팽창율로 부터 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 농도의 영향

Fig.2는 냉각면온도 -5℃, 실험개시 13hr. 후의 염화나트륨수용액 농도변화에 대한 동결층 형상을 가시화한 사진이다. 본 그림으로부터 동결층의 상부계면의 위치가 농도가 저하됨에 따라 상승하고 있으며 0wt%의 경우는 빙층이 투명하고 견고한 형태를 취하고 있음을 알 수 있다[5]. 수용액 농도의 감소에 따라 동결층의 상부계면이 상승하는 것은 염화나트륨수용액의 동결온도가 농도의 증



① Test Section
② Heater
③ Constant Temperature Controller
④ Brine Pump
⑤ Brine Tank
⑥ Refrigerating Machine
⑦ Thermocouple Wire
⑧ Data Acquisition System
⑨ Personal Computer
⑩ Camera
⑪ He-Ne Gas Laser

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

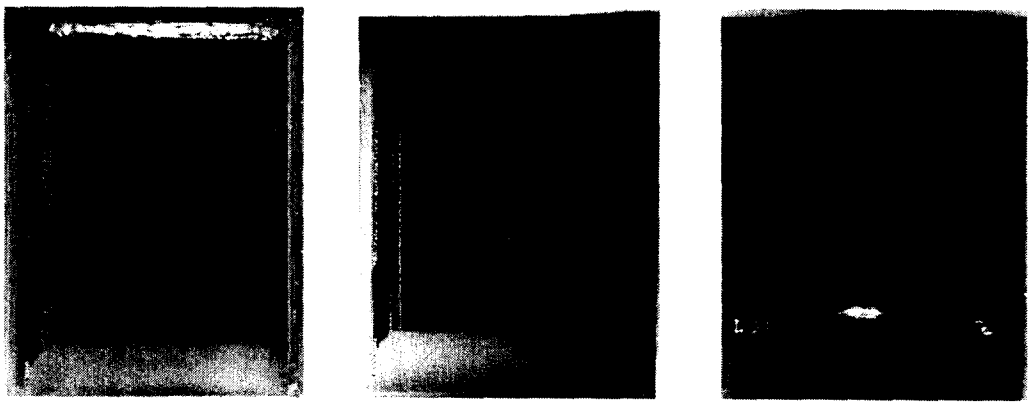


Fig.2 Effect of concentration of aqueous solution on freezing behavior.
Tw= -5℃, t=13hr

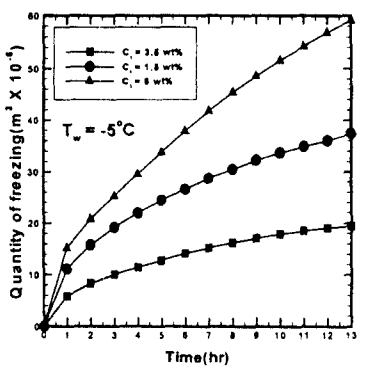


Fig.3 Quantity of freezing

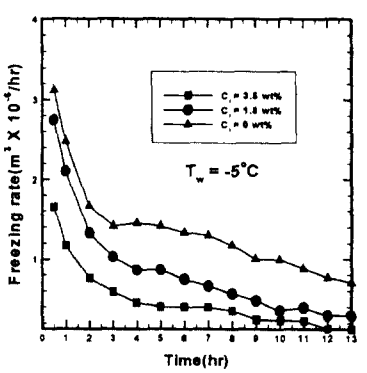


Fig.4 Freezing rate

가와 함께 하강하므로서 동결량이 줄어들기 때문이다. 그리고 수용액(Fig.2(a), (b))과 순수액(Fig.2(c))과의 사이에 동결된 빙의 형상에 차이가 발생하는 것은 수용액 동결의 경우 용질의 석출로 하부 동결층에 고농도 수용액과 침상빙이 존재하는 고액공존층[9]이 형성되기 때문이다.

Fig.3, Fig.4는 Fig.2와 같은 조건에서 시간에 대한 동결량 및 동결속도의 변화를 동결된 빙의 체적 또는 체적의 변화율로 표시한 것으로 본 그림으로부터 농도가 감소함에 따라 동결량 및 동결속도가 증가함을 알 수 있다. 또한 동결초기에는 동결속도가 크게 나타나지만 시간의 경과와 함께 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 농도가 감소함에 따라 동결량 및 동결속도가 증가하는 것은 상술한 바와 같이 수용액의 동결온도가 농도의 감소와 함께 상승하기 때문이며, 동결초기에 동결속도가 크게 나타나는 것은 빙층의 두께가 비교적 엷은 초기의 경우에 동결층의 상부계면에서 큰 온도구배가 존재하게 되므로서 하부로의 열유속이 증가되기 때문이다.

3.2 냉각면온도의 영향

Fig.5는 He-Ne Gas Laser를 이용한 그림자영법으로 동결거동에 미치는 냉각면 온도의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 냉각면 온도가 하강함에 따라 동결층의 상부계면이 상승함을 알 수 있다. 즉 동결량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 Fig.4에서 설명한 바와 같이 냉각면 온도

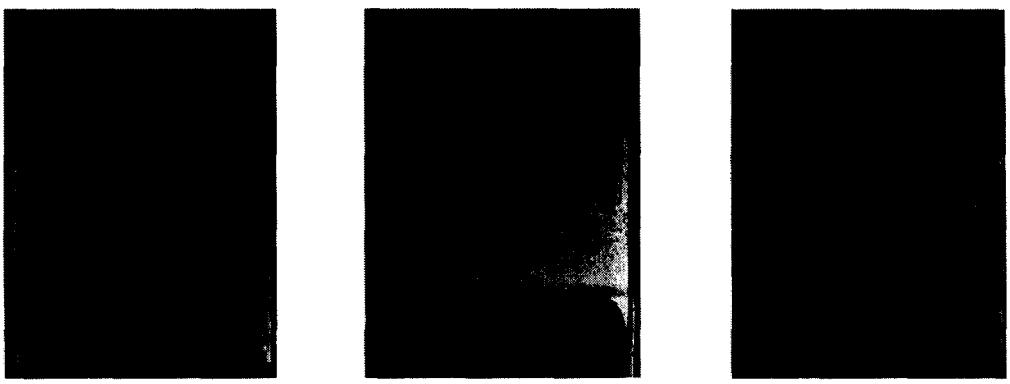


Fig.5 Effect of cooling wall temperature on freezing behavior.
Ci=3.5wt%, t=13hr

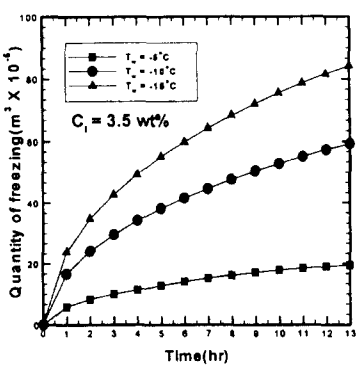


Fig.6 Quantity of freezing

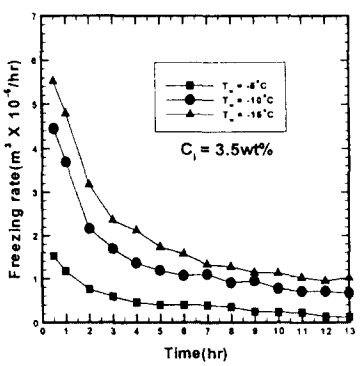


Fig.7 Freezing rate

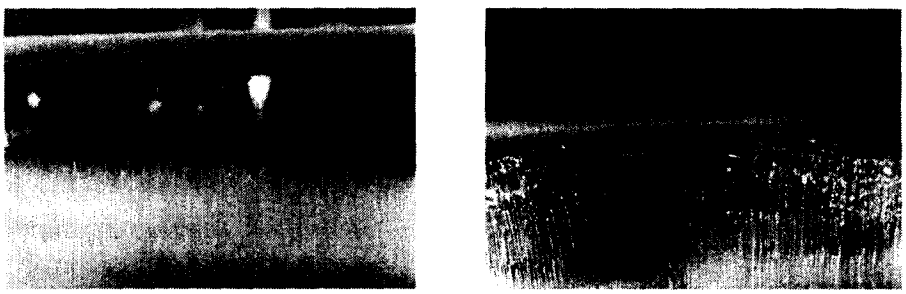
의 하강은 상부동결계면에서의 온도구배가 커짐을 의미하므로 하부로의 열유속이 증가함과 아울러 동결량이 증가되기 때문이다. 또한 그림자영법에 의하여 가시화된 Fig.5로부터 상부동결계면 근방에 횡방향으로 음영의 띠가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 수용액 동결에 따른 용질의 석출로 고농도의 수용액층이 구형용기의 하부영역에 형성되기 때문이다.

Fig.6, Fig.7은 Fig.5와 같은 조건에서 시간에 대한 동결량과 동결속도의 변화를 나타낸 것으로 Fig.5에서 가시화된 결과와 같이 냉각면 온도가 감소할수록 동결량 및 동결속도가 증가하고 있음을 알 수 있다.

3.3 동결층의 형상, 계면의 위치 및 온도분포

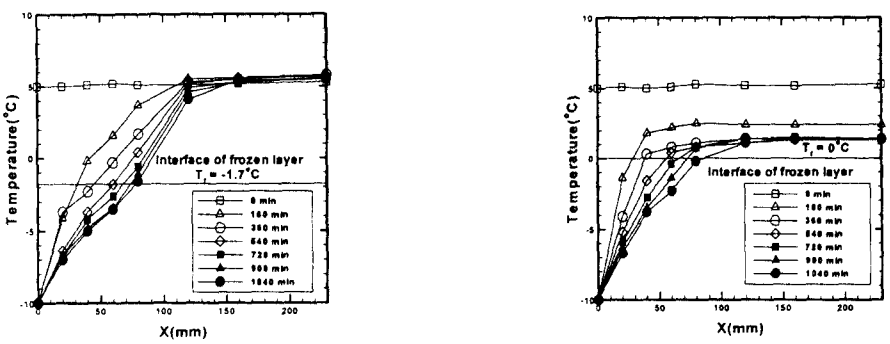
Fig.8은 동결층의 형상을 나타낸 것으로 3.5wt%의 동결층에서는 날카로운 침상빙의 형상과 고액공존층을 확인할 수 있으며, 0wt%에서는 견고한 투명빙의 존재와 계면이 후술하는 대류의 영향으로 굴곡이 지어져 있음을 알 수 있다.

Fig.9는 동결층의 상부계면의 위치와 온도분포를 나타낸 것으로 동결계면과 평형동결온도선이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 용액부 온도분포의 비교에서 3.5wt%의 경우는 열전도에 의한 열의 이동이 용액부에서 지배적으로 작용하고 있으며 0wt%의 경우에는 자연대류의 영향이 전



(a) Ci=3.5wt% (b) Ci=0wt%

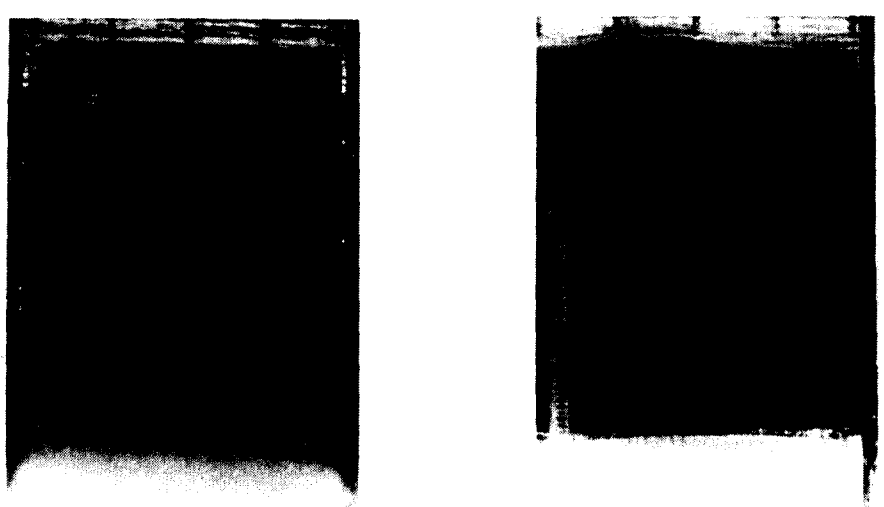
Fig.8 Configuration of frozen layer.



(a) C_i = 3.5wt% (b) C_i = 0wt%

(a) Ci=3.5wt% (b) Ci=0wt%

Fig.9 Frozen layer and temperature distribution. Tw=-10℃



(a) Ci=3.5wt% (b) Ci=0wt%

Fig.10 Flow pattern

반적으로 나타남을 알 수 있다. 이것은 0wt%의 경우 4℃근방에서 최대밀도가 되는 효과에 따라 하부액의 밀도가 상부액의 밀도보다 낮은 불안정성으로 자연대류가 발생하기 때문이다.

Fig.10은 직경 120μm인 폴리염화비닐의 분말과 He-Ne Gas Laser를 사용하여 가시화한 액상부의 유동특성을 나타낸 것으로 3.5wt%의 경우에는 정체된 액상부의 유동을, 0wt%에서는 활발하게 대류가 일어나고 있음을 보여주고 있다.

본 실험의 범위내에서 무차원 동결량은 아래와 같은 식으로 정리될 수 있다.

$$R_f = f(\theta_w, F_o) \quad (1)$$

모든 실험데이터를 최소자승법을 이용하여 식(1)의 형식으로 정리하면 무차원 동결량은 ±15%의 범위내에서 아래와 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$R_f = 3.177 \times 10^{-3} \cdot \theta_w^{0.895} \cdot F_o^{0.484} \quad (2)$$

그리고 Fig.11에는 실험데이터와 식(2)로 제시된 동결량 R_f를 표시하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 염화나트륨 수용액의 농도와 냉각면 온도가 해수의 동결거동에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동결량 및 동결속도는 수용액 농도 및 냉각면 온도가 낮을수록 증가한다.

(2) 염화나트륨수용액의 경우 동결층은 고농도의 수용액과 침상빙이 존재하는 고액공존층을 형성하나 0wt%인 순수의 경우에는 견고하고 투명한 동결층을 형성한다.

(3) 염화나트륨수용액의 경우 미동결층에 나타나지 않던 자연대류가 순수의 경우에는 활발하게 나타나며 동결면 형상 및 온도분포에 영향을 미친다.

(4) 무차원 동결량은 다음 식으로 정리된다.

$$R_f = 3.177 \times 10^{-3} \cdot \theta w^{0.895} \cdot Fo^{0.484}$$

참고문헌

1. DAVID,J.KUKULKA., BENJAMIN, GEBHART and JOSEPH,C.MOLLENDORF.,"Thermodynamic and Transport Properties of Pure and Saline Water", Advances in Heat Transfer, Volume 18, Academic Press, Inc.,(1987)
2. 김병덕, 김재윤, "물부족 현황과 국내 담수화 기술 개발 현황㈜, 한국박용기관학회 춘계학술 강연회, pp. 105~109(1996,4)
3. 김명환, 김용모, 김철환, "LNG 냉열이용과 축냉시스템의 장래㈜, 한국박용기관학회논문집 제18권, 제5호, pp. 1-11(1994.12)
4. Carey,V.P. and Gebhart,B., "Transport Near a Vertical Ice Surface Melting IN Saline Water-Experiments at Low Salinities", J.Fluid Mech., Vol. 117, pp. 403~423(1982)
5. Johnson,R.S. and Mollendorf,J.C., "Transport From a Vertical Ice Surface Melting In Saline Water",Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 27, No.10, pp.1928~1932(1982)
6. Beckermann,C., "Melting and Solidification of Binary Mixtures with Double-Diffusive Convection in the Melt", Ph.D.Thesis,Purdue University(1987)
7. Beckermann C. and Viskanta, R. : "Double-Diffusive Convection During Dendritic Solidification of a Binary Mixture",Physico Chemical Hydrodynamics, Vol. 10, No. 2, pp. 195~213(1988)
8. 開 信弘, "蓄熱工學1",森北出版社(1995)9. 福迫尙一郎, 稻葉英男, "低溫環境下の 熱現象とその應用", 養賢堂(1996)