

장방형내 함수 다공성 물질의 동결거동에 관한 실험적 연구

An Experimental study on the Freezing Phenomena of Saturated Porous Media in a Rectangular Cavity

김 병 철*, 김 종 일*, 김 진 흥*
B. C. Kim, J. I. Kim, J. H. Kim

Key Words : Porous media (다공성 물질), Freezing (동결), Density inversion (밀도역전), Porosity (공극율)

ABSTRACT

Freezing of saturated porous media contained in a rectangular cavity has been studied experimentally. Water and different diameter glass beads constituted the liquid and porous media. Solidification front shape, the effects of bead diameter and initial liquid temperature was investigated. When the hot wall temperature was below 4°C , the freezing rate was higher at the top than at the bottom due to the density inversion, but with increasing the hot wall temperature the freezing rate at the top was effected by the liquid temperature and was lower than at the bottom. With increasing the bead diameter, the difference of freezing rate between top and bottom was increased and depends on thermal conductivity. When the liquid temperature was low in the beginning, the freezing rate was high, but with increasing the time almost the same with those of high temperature liquid.

1. 서 론

함수 다공질층의 동결현상은 한냉지에서 토양의 자연동결 외에도 많은 공학적 시스템에서 볼 수 있는데¹⁾ 식품의 동결건조보존이나 연약한 지반을 단단하게 할 목적으로 하는 지반의 동결공법²⁾ 및 응해잠열에너지 축열조등의 경우에 사용되고 있다.³⁾ 또한 토양의 자

연동결은 수도관이나 하수도관의 동결원인이 될 뿐 아니라 지하 건조물의 단열문제와 밀접한 관계가 있으며 한냉지에 있어서 지열원을 이용한 열펌프의 성능은 열교환되는 주위 토양의 동결이나 용해에 영향을 미친다고 알려져 있다.^{4,5)} 다공질층내의 자연대류문제는 건축이나 원자로 시스템에 사용되는 다공질 단열층의 구조설계, 지열에너지의 유효한 이

용이나 고액상 축열재의 개발등과 관련되어 많이 연구되고 있다.^{6,7)} 저온동결의 경우에 밀도역전의 문제가 생기며 물의 경우에는 있어서는 4℃에서 밀도가 최대이므로 수직벽의 경우 가열 또는 냉각될 때 용기내에 방향이 다른 2개의 유동이 생기며 이는 초기온도와 함께 동결계면의 형상과 열전달에 영향을 미친다.⁸⁾ Brewster와 Gebhart는 순수한 물의 하향동결에 대한 대류시험에서 0-4℃, 4-6℃ 그리고 6℃ 이상에서 유동형태가 다르다고 발표하였다.⁹⁾

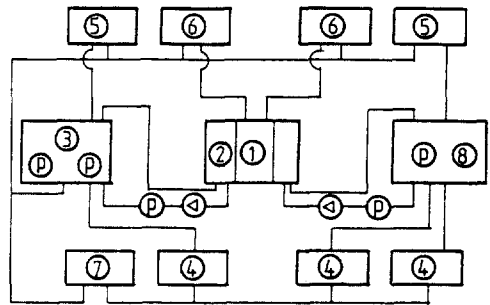
Weaver와 Viskanta는 4℃이하의 원통과 장방향 밀폐용기의 동결에 대하여 연구하였고¹⁰⁾ Chellaich와 Viskanta는 자연대류에 대하여 연구하였다.¹¹⁾ Beckerman등은 Gallium과 유리 bead를 유체와 다공질로 사용하여 연구하였고¹²⁾ 岡田와 菅原은 자연대류의 영향을 고려한 원관주위의 응해에 대하여¹³⁾ 佐夕木 章등은 물로 포화된 다공질층의 동결현상에서 입자지름 및 물성치의 영향에 대하여 연구하였는데¹⁴⁾ 그들은 모두 입자지름이 16mm 보다 작은 경우에 대하여 실험하였다.

본 연구에서는 형상비 3/2인 장방향 test section내에 지름 14.5mm, 16mm 그리고 21mm의 유리 bead를 넣은 경우와 유리 bead를 넣지않은 경우에 대하여 냉각부 벽면의 온도를 -10℃로 고정하고 가열벽면의 온도를 각각 2℃, 5℃, 10℃, 15℃ 등으로 유지하고 초기온도를 변화시키면서 실험하여 동결계면의 형상과 액상영역의 온도분포 그리고 입자의 크기와 초기온도가 동결에 미치는 영향을 실험적으로 밝히고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 test section 냉각장치, 가열장치로 이루어졌으며 그 개략도를 Fig.1에 나타낸다. test section은 가로 100mm, 높이 150mm, 폭 150mm의 장방향으로 윗면과 아랫면을 두께 15mm의 아크릴 수지를 사용하



- ① Test section
- ② Heat exchanger
- ③ Constant temperature bath
- ④ Refrigerator
- ⑤ Temperature controller
- ⑥ Temperature recorder
- ⑦ A. V. R.
- ⑧ Pump

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

여 단열하고 앞면과 뒷면은 아크릴 수지를 2겹으로 하여 내부를 관찰할 수 있도록 하였으며 좌측면과 우측면은 180×180mm, 두께 8mm의 동판을 사용하였고 그 면의 뒷쪽에는 두께 1.5mm의 동판을 사용하여 180×180×70mm의 두개의 열교환기를 제작하여 붙였다. 그 뒷면에는 test section부에 균일한 온도를 유지하고 동결부분을 녹이기 위해 220V 1kW의 heater를 설치하였다. 외부와의 단열을 위하여 50mm의 styrofoam을 사용하였으며 test section부는 수평으로 설치하였다. 냉각조와 가열조는 300×300×300mm, 두께 10mm의 아크릴 수지로 만들었고 그 안에 냉동관과 220V, 1kW의 heater를 설치하였으며 균일한 온도를 얻기위해 각 항온조에 2개씩의 수증펌프를 설치하였다. 순환펌프를 통하여 열교환기와 순환시켰으며 열매체로는 methyl alcohol과 물을 섞어 사용하였고 밸브를 달아 그 양을 조절하였다. test section내에는 지름 0.127mm의 열전대를 35곳에 설치하였고 관로와 냉각부와 가열부벽, 그리고 항온조에는 15곳에 지름 0.3mm의 열전대를 설치하였다. 온도는 ±0.2℃내까지 조절되는 자동온도조절기를 사용하였고 data logger를 사용하여 미리 설정한 시간에 따라 측정하였다.

실험에 사용한 재료의 성질과 측정된 공극

물은 표 1, 2 와 같다.

Table 1. Properties of materials used in experiment

Material	Temperature (°C)	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg K)	Thermal conductivity (W/mK)
Glass	-20	2500	691.3	0.941
"	-10	2500	708.7	0.960
"	0	2500	726.5	0.979
"	10	2500	743.7	0.992
"	20	2500	761.5	1.004

Table 2. Porosity of glass beads

φ 14.5mm	0.433	φ 16mm	0.466	φ 21mm	0.512
----------	-------	--------	-------	--------	-------

2.2 실험방법

가로 100 mm, 세로 150 mm, 폭 150 mm의 test section 내에 처음에는 공기를 뺀 증류수만 넣어 실험하였고 지름 14.5 mm와 16 mm와 21 mm의 유리 bead를 각각 넣어서 가열부 벽면의 온도를 2°C, 5°C, 7°C, 8°C, 9°C, 10°C, 15°C로 설정하고 냉각부 벽면의 온도를 -10°C로 유지시켜 실험하였다. 가열조와 냉각조 내의 methyl alcohol과 물의 혼합물을 순환펌프와 유량조절밸브를 통하여 순환시켜 열교환시켰으며 7시간 동안 실험하였다. 유체의 초기온도는 5°C, 8°C, 10.5°C, 15°C로 유지시켜 실험하였다. 실험이 끝나고 10시간이 지난후 물의 동결에 의한 배제량을 측정하여 보충하고 다시 6시간후에 test section내에 물의 온도가 안정된 후에 실험하였다. 가열부와 냉각부 벽온이 균일한가를 실험중에 체크하면서 실험을 행하였고 data logger를 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 동결계면의 형상

동결계면의 형상은 가열부 벽면과 냉각부 벽면의 온도차에 의하여 다르다. 가열벽면의 온

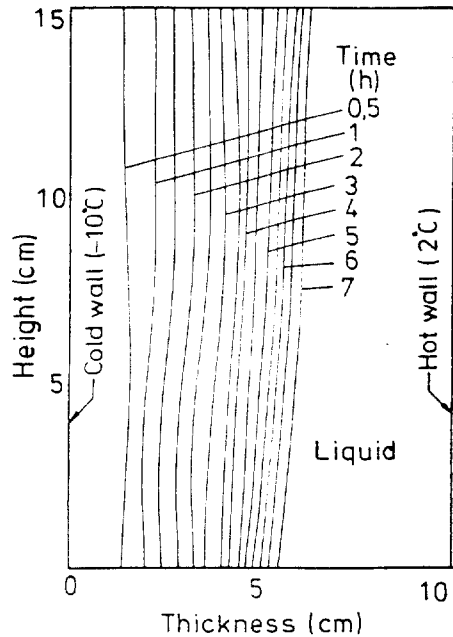


Fig.2 Solid-liquid interface shape and position at every 30 min initial temperature=10.5°C, glass bead diameter = 14.5 mm

도가 낮을수록 상부의 동결계면이 두꺼워지며 가열벽면의 온도가 증가할수록 상부의 동결두께는 가열부 벽면온도의 영향을 받아 얇아지는 현상을 보였다.

처음에는 가열벽의 온도가 낮을수록 상부와 중부와 하부의 동결두께는 차이가 적었으나 온도가 높을수록 상부와 하부의 차이가 커졌고, 시간이 경과함에 따라 벽면에 형성된 얼음과 유리 bead에 의한 열저항의 증가에 따라 동결율은 감소하였다.

Fig.2는 지름이 14.5 mm인 유리 bead를 test section내에 넣어 초기 온도를 10.5°C로 하고 냉각부 벽면의 온도를 -10°C, 가열부 벽면의 온도를 2°C로 유지시키면서 동결시켰을 때 test section내 중앙 단면에서의 동결계면을 표시하고 냉각벽면으로부터 동결되어가는 계면의 형상을 7시간 동안 측정하여 30분 간격으로 나타낸 것이다. 유체의 초기온도는 10.5°C이므로 양벽 근처에서의 온도가 유체 온도보다 낮아서 이 벽에 접촉하는 유체는 열

을 교환하며 온도가 낮아진다. 따라서 밀도가 높아져 하부로 내려오며 온도는 하부로 갈수록 낮아지므로 동결계면은 하부가 두꺼워지는 현상을 보이거나 시간이 경과함에 따라 유체의 온도가 4°C 근처에 이르면 밀도의 변화에 의해 상부의 온도가 낮아져 상부의 동결두께가 두껍게 진행되었다.

또한 하부에서 냉각부와 가열부의 벽온에 의해 하부의 온도가 4°C 이하로 낮아지면 그에 따라 상부의 온도도 낮아져 결국 상부의 동결두께가 하부보다 두껍게 되는 현상을 보였다. 실험시작 후 30분에 하부에서부터 125mm와 25mm인 곳의 동결두께는 각각 15mm와 16mm를 나타냈으나 120분 후에는 46mm와 41mm를 각각 나타냈다.

Fig. 3은 가열벽면의 온도가 5°C의 경우 동결두께를, Fig. 4는 이때에 30분, 180분후의 등온선을 나타낸다. 2°C의 경우와 같은 현상을 보이거나 약 30분 경부터는 중앙상부에 남아있는 6°C 정도의 고온 유체의 영향으로 상

부 동결계면의 성장속도가 둔화되었다. 약 3시간 정도부터는 유체 전체가 가열벽면 5°C보다 낮게되어 밀도가 큰 4°C 부근의 유체를 가장 하부로 하여 상부로 갈수록 낮은 온도 분포를 보여 차츰 상부가 두껍게 동결되었다. 그러나 하부에 4°C의 유체가 존재하므로 동결두께는 2°C의 경우보다 더 얇아졌다. 본 실험의 경우 90분후에 하부로부터 1/6과 2/6, 3/6, 4/6, 5/6인 곳의 동결두께가 각각 23mm, 26mm, 28mm, 29mm, 26mm 이었으나, 240분후에 각각 38mm, 41mm, 44mm, 44mm, 360분후에는 각각 45mm, 47mm, 50mm, 52.5mm, 53mm를 나타냈다.

Fig. 5는 가열벽면의 온도가 10°C인 경우의 동결두께를, Fig. 6은 이때에 30분, 180분후의 등온선을 나타낸다. 중앙부쪽의 동결두께가 더 두꺼운 현상을 나타냈다. 동결계면의 형상은 2°C의 같은 현상을 보이거나 중앙부에서는 가열부 벽과 유체의 온도에 의해 10°C 정도의 유체가 동결계면에 접근하게 되

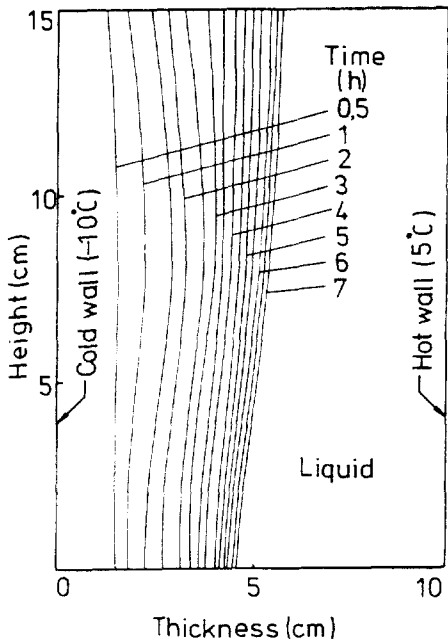
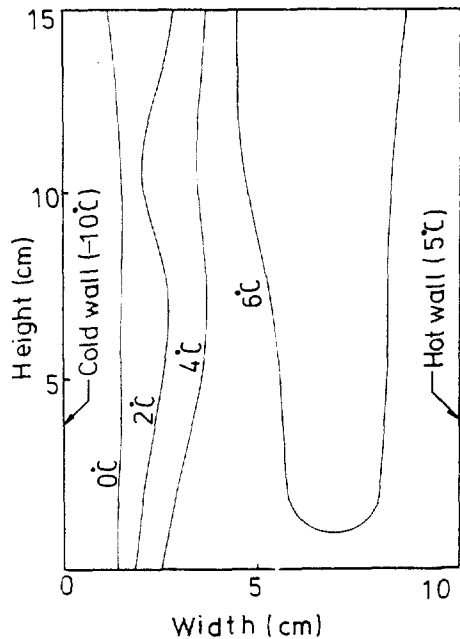


Fig. 3 Solid-liquid interface shape and position at every 30 min initial temperature = 10.5°C, glass bead diameter = 14.5 mm



(a)

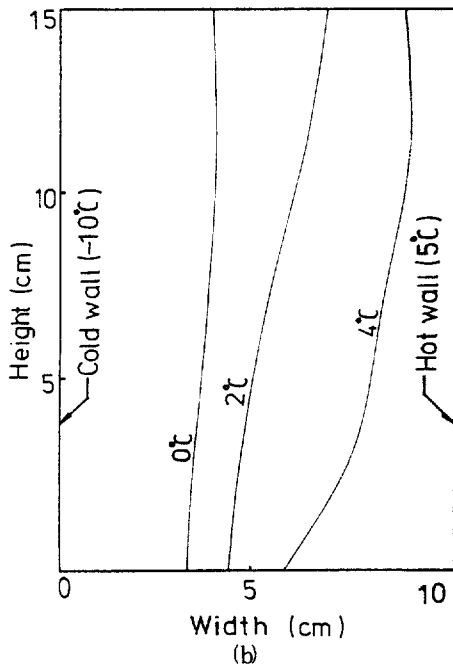


Fig. 4 Isothermal line, glass bead diameter = 14.5mm, initial temperature = 10.5°C (a) after 30 min (b) after 180 min

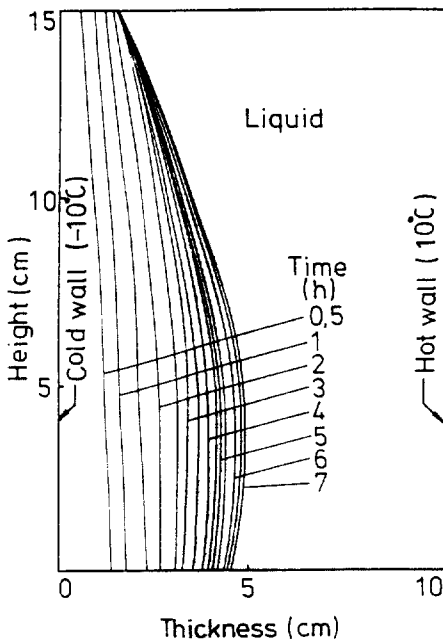


Fig. 5 Solid-liquid interface shape and position at every 30 min initial temperature = 10.5°C, glass bead diameter = 14.5mm

므로 냉각되어 하부로 내려오고 밀도의 변화에 의해 냉각부벽 하부의 4°C 유체와 동결계면의 하부로부터 상승한 동결계면 근처 유체의 온도는 상부보다 낮으므로 중앙부의 동결두께가 더 두껍고, 그 하부가 약간 얇으며 상부로 갈수록 더 얇아지는 현상을 보였다. 가열벽면이 15°C의 경우 10°C의 경우와 거의 같은 현상을 보이나 상부의 동결율이 더 낮으며 상부에 10°C의 경우보다 더 고온 유체가 존재하므로 가장 두꺼운 동결부분이 10°C의 경우보다 아래에 있음을 볼 수 있었다.

3.2 Bead 크기에 의한 영향

Fig.7과 8은 각각 가열벽면의 온도를 15°C로 하고 냉각부 벽면의 온도를 -10°C로 유지하였을 때 bead를 넣지 않고 실험하였을 때와 지름 21mm의 유리 bead를 넣었을 때 동결계면의 형상을 나타낸다. 이론상으로 공극률은 지름의 크기와 무관하나 벽의 영향에 의해 bead의 지름이 클수록 공극률은 크게 된다. 따라서 액상영역의 대류유동이 강하게 되어 순환류의 중심이 상부에 있음을 보여주며 동결계면의 형상은 지름이 작은 경우보다 큰쪽이 굴곡이 심하여 졌다. bead의 지름이 작으면 공극률이 작으므로 상변화 물질의 양이 작아서 전도에 의한 영향을 더 많이 받므로 상부와 하부의 두께차가 더 작아졌다. 또한 유리 bead를 넣어 동결시킨 경우가 넣지 않은 경우보다 온도강하가 더 빠르고 동결율이 더 빨랐는데 이는 고상화되는데 필요한 상변화 물질의 양이 적고 다공질을 넣어 유동속도가 느리기 때문이며 또한 bead의 열전도율에 의한 영향 때문이라고 추정된다. 또한 Fig.7의 증류수를 넣은 경우 실험 시작 약 4시간후 높이 5cm 부근에서 경계면의 곡률이 불연속을 이루는 점이 관찰되었는데 이는 상부의 대류작용이 활발해져서 동결이 방해받는 정도가 점점 커지기 때문으로 추정된다. Fig. 9와 10은 가열벽면 온도가 7°C로 bead를 넣지 않은 경우와 지름 16mm의 유리 bead를 넣었을 때의 동결계면을 나타내는데 bead를 넣지 않은 경우 초기온도 10.5°C의 유체는

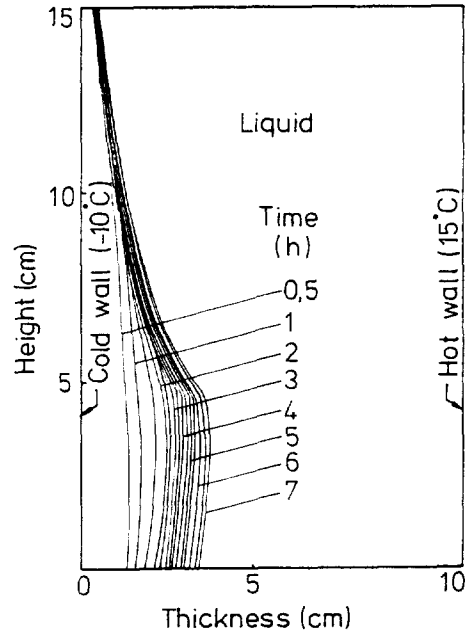
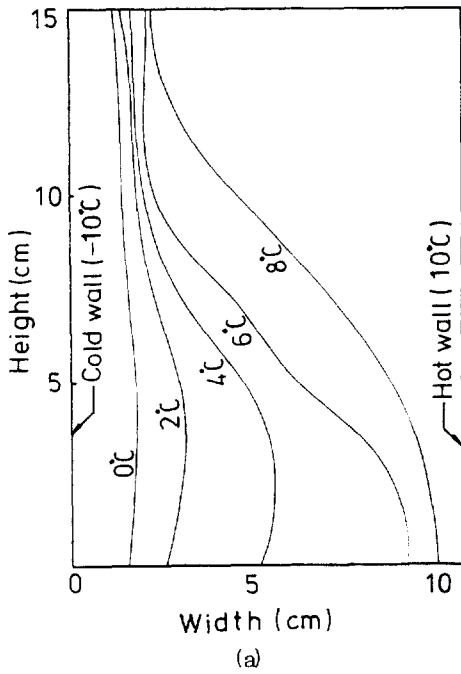


Fig.7 Solid-liquid interface shape and position at every 30 min distilled water, initial temperature = 10.5°C

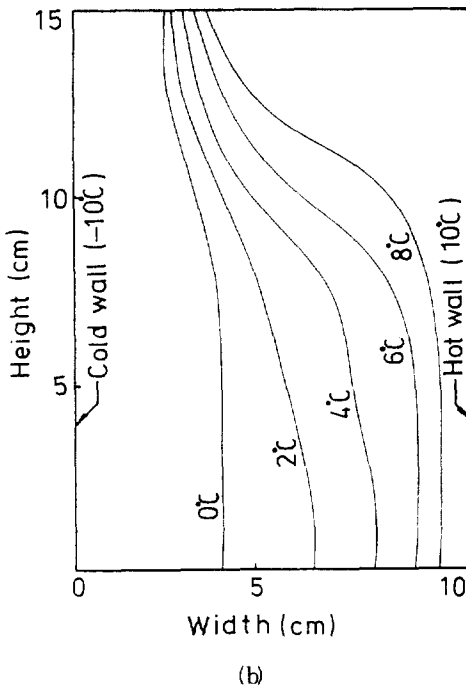


Fig.6 Isothermal line, glass bead diameter = 14.5mm, initial temperature = 10.5°C
(a) after 30min (b) after 180 min

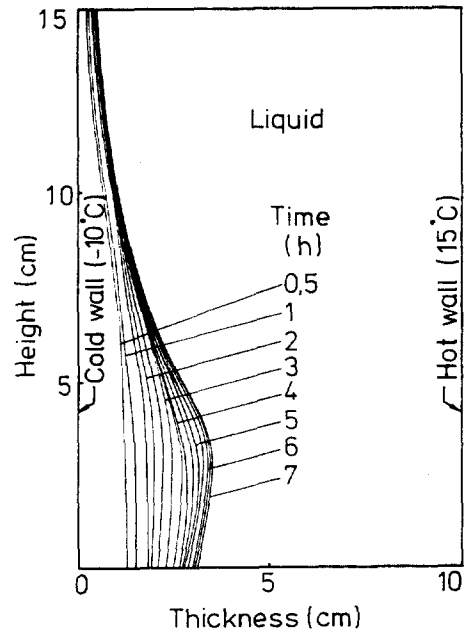


Fig.8 Solid-liquid interface shape and position at every 30 min initial temperature = 10.5°C, glass bead diameter = 14.5 mm

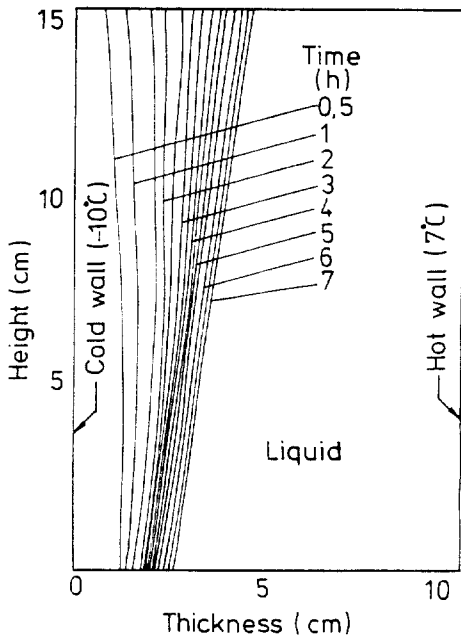


Fig. 9 Solid-liquid interface shape and position at every 30 min distilled water, initial temperature = 10.5°C

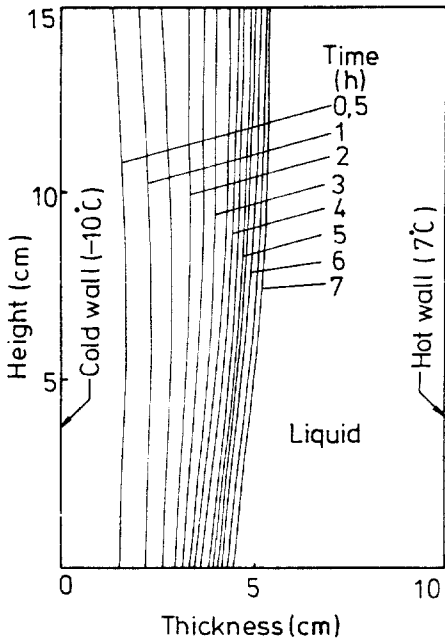


Fig. 10 Solid-liquid interface shape and position at every 30 min Initial temperature = 10.5°C , glass bead diameter = 16mm

냉각부 벽과 가열부 벽면의 온도 영향에 의해 온도가 낮아져서 밀도가 높아져 하부로 내려오므로 처음에는 상부의 온도가 높고 하부는 낮아졌다. 따라서 처음에는 하부의 동결 두께가 약간 두꺼운 현상을 보였다. 약 30분 후에 모든 유체는 7°C 이하로 되며 상부의 가열벽면 근처에 7°C 에 가까운 유체가 존재하여 상부의 동결두께에 영향을 미치나 약 2시간 30분부터 4°C 의 유량이 많아져 밀도차에 의해서 동결계면 근처의 온도분포가 하부에서 상부로 갈수록 낮아지므로 상부의 동결 두께가 두꺼워져 차츰 하부에서 상부로 갈수록 차츰 두꺼워지는 현상을 보였다.

유리 bead를 사용하였을 경우 처음에는 bead가 없는 경우와 대류유동의 형태가 거의 같으나 시간이 경과함에 따라서 bead가 없는 경우보다 상부와 하부에서의 온도구배가 더 적어짐을 볼 수가 있는데 이는 상변화 물질의 양이 적어 유동이 느리기 때문이며 bead의 열전도에 의한 영향이라고 볼 수 있다. 가열벽면의 온도가 15°C 의 경우 지름이 14.5mm일때 상부의 동결이 21mm에 비해 약 같은 동결이 진행되었으나 21mm의 경우는 거의 동결되지 않았다.

3.3 초기온도에 의한 영향

Fig. 11과 12는 지름 16mm의 유리 bead를 넣어 냉각부벽의 온도가 -10°C , 가열부벽면의 온도가 10°C 일 때 유체의 초기온도를 각각 5°C 와 15°C 로 하였을 경우의 동결계면 형태를 나타내며, Fig. 13과 14는 이때의 수직온도분포를 나타낸다. 초기온도가 낮으면 시간이 경과함에 따라 상부는 가열벽면에서 가까울수록 가열벽면온도의 영향을 받아 온도가 상승하며 온도강하가 늦어지고 하부로 갈수록 온도강하가 빨라지나 시간이 경과함에 따라 온도가 큰 경우와 거의 차이가 나지 않았다. 초기온도가 높으면 상부는 냉각부 벽면 온도와 차이가 크므로 열전달이 많아 온도강하가 빠르며 시간이 경과함에 따라 온도강하 속도가 늦어졌다. 따라서 동결계면도 초기온도가 낮으면 초기의 상부의 동결속도가 빠르

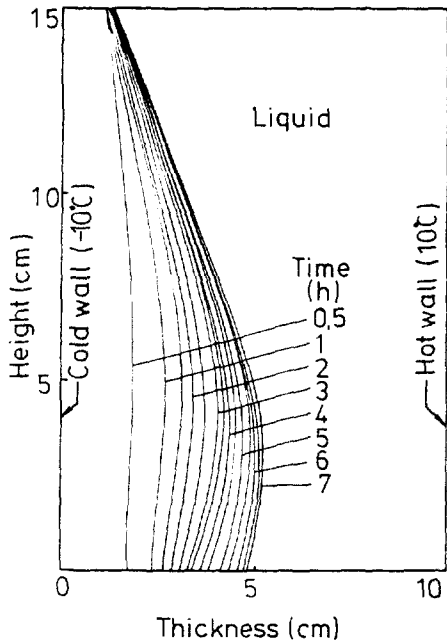


Fig. 11 Solid-liquid interface shape and position at every 30 min initial temperature = 5°C, glass bead diameter = 16mm

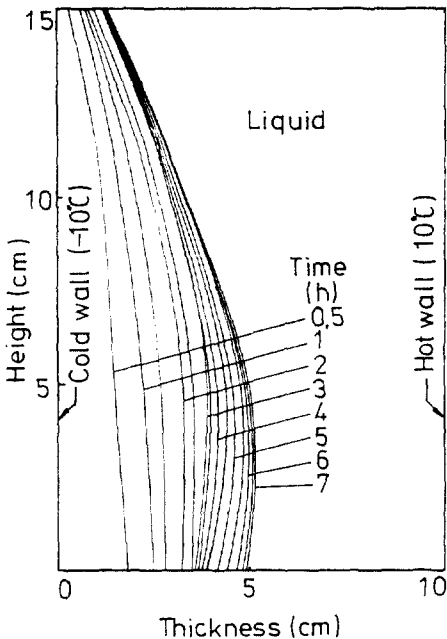


Fig. 12 Solid-liquid interface shape and position at every 30 min initial temperature = 15°C, glass bead diameter = 16mm

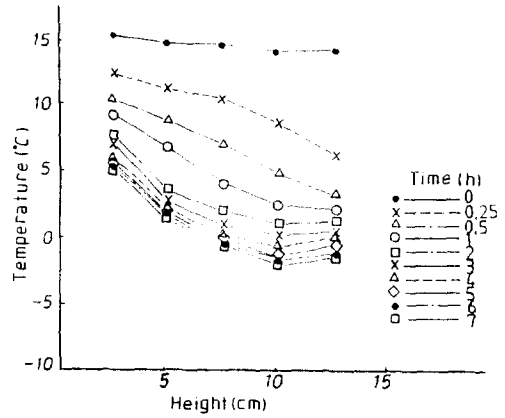


Fig. 13 Vertical temperature distribution at 4cm from cold wall, glass bead diameter = 16mm, initial temperature = 15°C

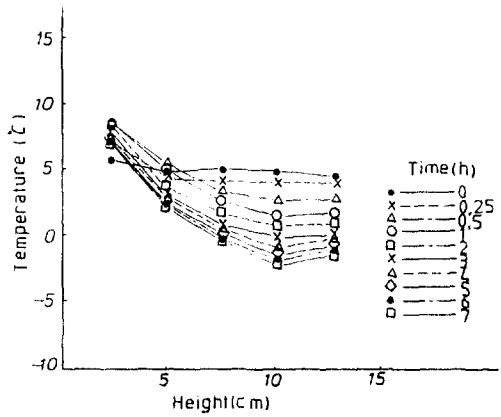


Fig. 14 Vertical temperature distribution at 4cm from cold wall, glass bead diameter = 16mm, initial temperature = 5°C

고 시간이 경과함에 따라 초기온도가 높았을 때와 동결속도가 거의 같아지는 현상을 보였다.

4. 결론

형상비 3/2인 장방형내에 다공질을 넣은 후 물을 넣고 양쪽벽면에 온도차를 두어 동결시키면서 실험한 결과 동결두께는 양쪽 벽면의 온도에 의해 유체의 초기온도가 열교환하

여 조성되는 냉각부 근처 유체의 온도분포와 bead의 공극률과 열전도율에 의해 달라지며 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 가열벽면의 온도가 4°C 이하에서는 상부의 동결두께가 하부보다 두꺼우며 5°C 에서는 2°C 의 경우보다 하부의 동결두께가 더 얇았다.

2) 가열벽면의 온도가 10°C 의 경우 가열벽 근처의 상부유체의 온도로 인하여 가운데가 두꺼워지며 상부가 하부보다 얇았다.

3) bead가 클수록 공극율이 커서 대류에 의한 열전달이 커지므로 상부와 하부의 동결두께차가 커지고 bead가 작을수록 전도의 영향을 받아 상부와 하부의 두께차는 작아지며 공극률과 열전도율에 따라서 달라진다.

4) 유체의 초기온도가 낮을수록 초기에는 동결속도가 빠르고 상부가 두꺼우며 온도차가 작아지나 시간이 증가함에 따라 다른 동결형태와 같은 경향을 보였다.

후 기

이 연구는 1990년도 문교부지원 학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었으며 이에 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Miller, R.C., 1980, Freezing phenomena in soils, In Applications of Soil Physics (Edited by Hillel) pp. 254-318, Academic Press New York.
2. Sanger, F.J., 1968, Ground freezing in construction, ASCE Mech. Foundation Div 94, pp. 131-158.
3. Staff, M.E., 1984, Seasonal thermal energy storage, Mech. Engng. 105, pp. 28-34.
4. Metz, P.D., 1983, A simple computer program to model three dimensional underground heat flow with realistic boundary conditions, ASME J. Solar Energy Engng. 105, pp. 42-49.
5. Svec, O., Goodrich, L.E. and Planer, J.H.L. Heat transfer characteristics of inground heat exchangers, J. Energy Res. 7, pp. 263-278.
6. Beckerman, C. and Viskanta, R., 1988, Natural convection solid/liquid phase change in porous media, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 1, pp. 35-46.
7. O'Neil, K. and Albert, M.R., 1984, Computation of porous media natural convection flow and in Finite Elements in Water Resources. pp. 213-229, Springer, Berlin.
8. 服部 賢 1987, Heat Transfer with Freezing and/or Melting 冷凍 Vol. 2, No. 714, pp. 12-18.
9. Brewster, R.A. and Gebhart, B., 1988, An experimental study of natural convection effects on downward freezing of pure water, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 2, pp. 331-348.
10. Weaver, J.A., Viskanta, R. 1988, Freezing of Liquid Saturated Porous Media, J. Heat Transfer, Vol. 108, pp. 654-659.
11. Chellaiah, S., Viskanta, R., 1989, Freezing of Water-Saturated Porous Media in the presence of Natural Convection Experiments and Analysis, J. Heat Transfer, Vol. 111, pp. 425-432.
12. Beckerman, C. and Viskanta, R., 1988, Natural convection solid/liquid phase change in porous media, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 1, pp. 35-46.
13. 菅原征洋等, 1988, 水平におかねた含水多孔層の凍結挙動, 日本機械學會論文集(B) 51卷 46號, pp. 35-46.
14. 佐夕木 章 等, Freezing Heat Transfer within a Water-Saturated Porous Media, JSME. Vol. 514, pp. 1666-1672.