

빙축열조 내부의 열적유동 특성 해석

Analysis of Thermal and Flow Characteristic in Ice Storage Tank

김 영 인,* 홍 희 기,* 배 철 호,** 김 영 일,** 윤 호 식**
 Y. I. Kim, H. K. Hong, C. H. Bai, Y. I. Kim, H. S. Yoon

ABSTRACT

Among several methods to solve the unbalanced electric power load, the Ice Storage System (ISS) for the air conditioning is relatively easy to realize and gives big effect on balancing the electric power load.

The goals of this study are to develop the practical ISS for the air conditioning through the design, manufacturing and performance test of the experimental ISS (size 0.335 m³, cold storage capacity 14200 kcal, IPF 0.4). Thermal fluid motion inside the ice storage tank during cooling and cooling release are studied. The data are analyzed by the dispersion analysis and optimal design conditions are derived from the result.

기 호 설 명

C : 비열(kcal / kg °C)
d : 축열조 입구 직경(m)
F : Ratio of Mean Square
g : 중력 가속도(m/s²)
Gr : Grashof Number($gH \Delta\rho/\rho_0/\nu^2$)
h : 측정점 높이(m)
H : 축열조 수면 높이(m)
IPF : Ice Packing Factor (빙충진율)
Q_s : 유효 축열량(kcal)
Ri : Richardson Number
Re : Reynolds Number (ud/ν)

S : Variation
u : 입구속도(m/s)
V : 축열조 수량(m^3), Mean Square
 β : 체적 열팽창 계수(1/°C)
 ν : 점성계수(m^2/s)
 ρ : 밀도(kg/ m^3)
 ϕ : Degree of Freedom
 $\Delta\theta_C$: 순환수 입출구 온도차(°C)
 $\Delta\theta_{EUT}$: 축열조 유효 이용 온도차(°C)
 θ_{LM} : 이용 한계 온도(°C)

1. 서 론

전력예비율의 증가 및 주야간의 전력부하 불

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학부

** 한국과학기술원 기계공학부

균형 문제 해결을 위한 방법의 일환으로 값싼 심야 전력을 이용한 공기조화용 빙축열 시스템의 개발 및 실용화가 활발히 이루어지고 있다.

빙축열 시스템의 성능은 핵심요소인 빙축열조의 성능에 의해서 크게 좌우되며 빙축열조의 성능에 영향을 미치는 요인으로서는 열교환기의 길이, 구경, pitch 및 부설을, 축열조의 형상, 브라인의 입출구온도, 순환수의 입출구 위치와 높이, 순환수의 입출구온도차 및 유량의 변화 등이 알려졌다.

수축열조의 성능을 향상시키기 위하여 미국^{1,2)}에서는 성층화를 촉진시키는 방법을 실험 및 수치해석을 통하여 연구하여 왔으며, 일본^{3,4,5)}에서는 축열조를 모델화하기 위하여 많은 연구를 하여 왔으나 빙축열조의 성능에 측 및 향상에 대하여는 연구가 미흡한 편이다.

본 연구에서는 축열조의 열적유동특성에 영향을 미치는 성능인자인 순환수 입출구의 높이와 위치, 순환수 유량, 순환수입구온도, IPF 등이 열유동에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

2. 이론적 고찰

본 연구의 목적은 축열조에 저장된 일정한 축열량으로부터 최대의 유효축열량을 얻기 위한 것이다. 유효축열량이란 축열조의 출구온도가 이용한계 온도(θ_{LM})에 도달할 때까지 사용될 수 있는 축열조에 축열되는 열량을 말한다. 유효축열량은 축열조내의 성층화가 잘 형성될수록 큰 값을 지닌다. 축열조의 성층화 성능을 나타내는 지표로 식 (1)에서와 같이 축열조 유효이용온도차, $\Delta\theta_{EUT}$ 를 정의한다.

$$\Delta\theta_{EUT} = \theta_s / \rho CV \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 1은 온도분포에 따른 유효축열량(Q_s)과 유효이용온도차($\Delta\theta_{EUT}$)의 관계를 보여준다. $\Delta\theta_{EUT}$ 에 영향을 주는 무차원수는 Richardson(Ri) 수라고 생각되며, 이에 따라 실험 결과를 분석한다. Ri 수는 식 (2)에서와 같

이 정의된다.

$$Ri = g\beta d \cdot \Delta\theta_c / u^2 \dots\dots\dots (2)$$

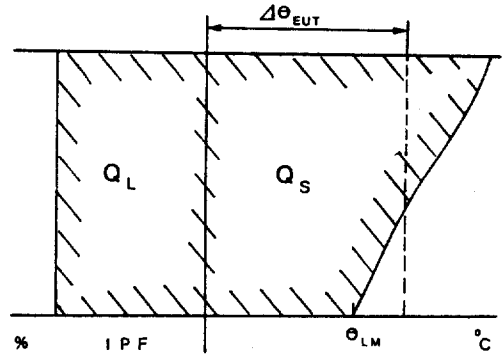


Fig.1 Effective Thermal Quantity, Effective Utility Temperature and Temperature Profile

3. 실험

(1) 실험장치

공조용 축열 시스템의 성능에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위한 실험장치는 축열조, 냉동기, 브라인 탱크, 모의공조부하장치, 이들 각 부분을 연결하는 배관 및 펌프와 실험장치의 운전상태 표시 및 제어를 수행하는 자동제어반으로 구성되어 있다. 실험장치의 개요도가 Fig. 2에 나타나 있고, 각 기기의 사양은 Table 1에 나타나 있다.

축열조는 가시화가 가능하도록 두께 15 mm의 투명한 아크릴판으로 제작 하였다. 또한 축열조의 형상, 냉수 입출구의 위치 및 구경 변화가 용이하도록 조립식으로 제작하였다. 축열조의 형상은 Fig. 3에서 보여주는 바와 같다.

제빙용 열교환기에 저온의 브라인을 통과시켜 외벽에 얼음을 형성한다. 일반적으로 제빙용 열교환기로는 Hair - Pin, 2중나선형 및 모기향형이 사용되고 있으며, 높은 IPF가 요구되는 Unit Type 축열조에서는 Hair - Pin 형상을 사용한다. 열교환기 외벽에 균일한 두께의 얼음을 형성하기 위하여 삼단으로 구성하였으며 각 단의 압력손실이 일정하도록 출구

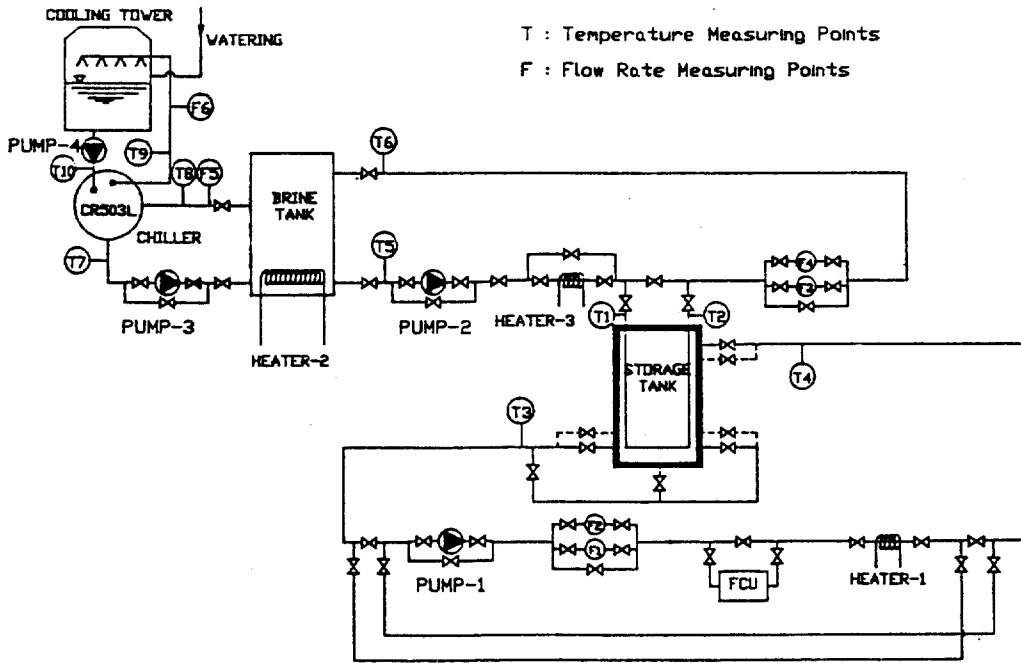


Fig.2 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

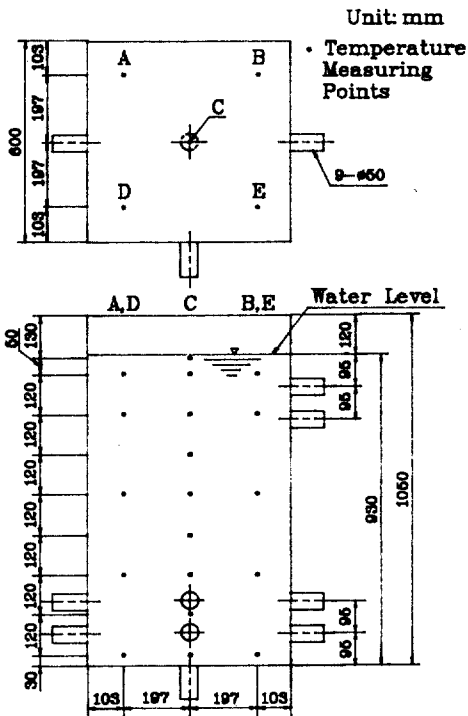


Fig.3 Ice Storage Tank and Temperature Measuring Points

Table 1 Specification of Experimental Apparatus

Item	Dimension & Type	Each	Remark
Thermal Storage Tank	600 ^W ×600 ^D ×1050 ^H mm	1	Material : Acryl (t = 15 mm) Detachable Type
Heat Exchanger	Hair - Pin Type	1	Copper Tube, $\phi = 15.88$ mm Total Length 76 m
Chiller	5,600 kcal / hr	1	for Low Temp., Reciprocal, Water Cooling
Cooling Tower	8,600 kcal/hr	1	With Heater to Prevent Freezing
Brine Tank	200 Liter	1	Material : Steel Insulation : Urethane 200 mm
FCU	3,300 kcal/hr	1	
Heater-1	5 kw	1	3 kw : Mg Controller 2 kw : SCR Controller

측에 U자 헤드를 설치하였다. 이 실험에서는 외경 $\phi 15.88\text{ mm}$ 의 동관을 사용하였지만, 가격이 보다 저렴한 폴리에틸렌 파이프로도 거의 같은 성능을 기대할 수 있다.

냉동기는 최대용량 5600 kcal/hr 의 저온용 왕복형 수냉식 냉동기를 사용하였다. 냉동기에 의하여 냉각된 브라인은 200 liter 용량의 브라인 탱크에 저장되어 제빙용 열교환기에 일정한 유량과 온도로 공급될 수 있도록 한다. 브라인은 중량비 40%의 에틸렌그리콜 용액을 사용하였다. 냉각탑의 용량은 8000 kcal/hr 이고 동파방지용 히터가 설치되어 있다.

실험장치의 모의부하를 담당하기 위한 모의 공조부하장치로 Fan Coil Unit 와 Heater를 사용했다. Fan Coil Unit 은 냉방용량 3000 kcal/hr 이고 대부분의 부하를 담당한다. 미세한 온도에서는 5 kw 의 Heater 로 하는데, 이는 3 kw 의 Magnetic Heater 와 2 kw 의 SCR Heater 로 구성되어 있다. 유량조절은 펌프에 by-pass 밸브를 설치하여 밸브의 개폐 조절로 한다.

운전상태를 쉽게 파악하고, 제어를 용이하게 하기 위하여 자동제어반을 설치하였다. 자동제어반은 표시등, 스위치, 제어기기, 보호기기 및 계기류 등으로 구성되어 있고, 소요전력을 측정하기 위하여 2 대의 적산전력계가 설치되어 있다. 또한 Heater 의 온도제어를 위한 제어기기와 제어부의 온도를 지시하는 온도계가 부착되어 있다.

(2) 측정장치

본 실험의 측정항목은 온도, 유량, 소비전력량 및 제빙량을 간접적으로 측정하기 위한 수면의 수위이다. 측정장치의 사양은 Table 2 와 같다. 측정조 내부 26 곳에 C-C 열전대 (T-type)를 설치하여 측정조 내부의 온도를 측정하였으며 Fig. 3에 온도 측정점을 나타낸다. 열교환기의 표면온도를 측정하기 위하여 열교환기 표면으로부터 8 mm 간격으로, 중간단의 입구와 출구 위치에 각각 4개의 열전대를 설치하였다. 브라인 탱크 및 각 배관 중의 온도를 측정하기 위하여 11 곳에 열전대

를 설치하였고, Fig. 2에 측정점이 나타나 있다.

온도는 Digital Thermometer 로 측정하며, 측정값은 RS-232C를 통해 마이크로 컴퓨터로 제어되는 Multi Plexer 를 사용하여 최대 72채널을 측정한다. Data Acquisition System 은 Fig. 4에 나타낸다.

물 및 브라인의 유량을 측정하기 위한 유량계가 Fig. 2에서와 같이 설치되어 있다. 얼음의 밀도가 물과 다르다는 점을 이용하여, 수위변화를 측정하여 제빙량을 측정하였다. 본 실험은 정확한 수위측정이 요구되므로, 측정간격이 1 mm 인 전기저항식 수위측정계를 자체로 설계하여 제작하였다.

Table 2 Specification of Measuring Instruments

Item	Dimension & Type	Each	Remark
Thermodac	Thermodac -32	1	Channel No : 18
Flow Meter	0.15~4.2 m^3/hr	6	Orifice Type
Level Sensor	Electric Resistance Type	1	Measuring Distance ; 1 mm
Watt-meter	100 A	2	$3\phi : 220\text{ V}$ $2\phi : 220\text{ V}$

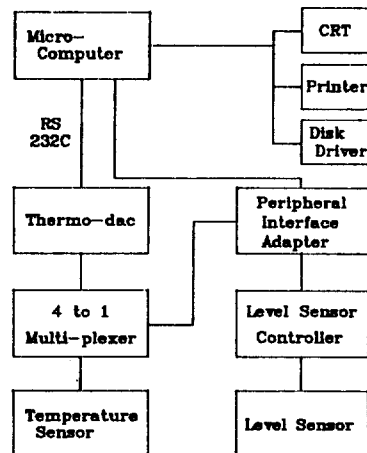


Fig. 4 Data Acquisition System

(3) 실험방법

정하여진 IPF의 축냉이 완료되면 냉동기를 정지시키고 방냉실험을 시작한다. 축열조의 하단으로부터 냉수를 뽑아 모의 공조부하장치를 통과시켜 원하는 온도로 상승시킨 후 축열조의 상단으로 유입시킨다.

축열조의 성능에 영향을 미친다고 생각되어지는 몇 가지 변수들의 값을 변화시키면서 축열조의 온도성층화를 향상시키는 것을 목적으로 실험을 실시하며 Table 3에 실험의 변수와 그 수준들을, Table 4에는 실험의 배치를 표시하는 직교배열표를 나타낸다. 실험번호 B-1-1 등은 일련의 방냉실험을 의미한다. 실험의 결과는 분산분석표를 작성하여 각 요인의 효과를 추정한다. 실험 중 유량 및 순환수 입구온도는 일정하게 유지하며, 순환수 이용 한계온도를 7°C로 하여, 순환수 출구온도가 그

Table 3 Condition of Cooling Release Experiment

Experimental Parameter	Unit	Condition 1	Condition 2	Remark
A: Entrance Port Height of Circulating Water	mm	95	190	from the Surface
B: Exit Port Height of Circulating Water	mm	95	190	from the Bottom
C*: Port Position of Circulating Water	deg	0	180	
D: Flow Rate	m ³ /hr	0.20	0.34	Volume of Storage Tank 0.34 m ³
E: Entrance Temperature of Circulating Water	°C	10	20	
F: IPF	%	10	20	

*When two ports are on the same side, the value is 0°, when they are on the opposite side, it is 180°.

Table 4 Arrangement of Cooling Release Experiment

Parameter Exp. No.	A	B	C	D	E	F	e*
B-1-1	1	1	1	1	1	1	1
B-1-2	1	1	1	2	2	2	2
B-1-3	1	2	2	1	1	2	2
B-1-4	1	2	2	2	2	1	1
B-1-5	2	1	2	1	2	1	2
B-1-6	2	1	2	2	1	2	1
B-1-7	2	2	1	1	2	2	1
B-1-8	2	2	1	2	1	1	2

*e: Error Term

이상이 되면 방냉실험을 종료하였다.

4. 결과 및 고찰

(1) 실험결과

방냉실험중 축열조의 성능에 영향을 미친다고 생각되어지는 6개의 요인을 직교배열법에 의하여 실험을 실시하였다. 실험의 결과, 실험 B-1-5에서 가장 좋은 성층화를 보여주고 있으며 실험 B-1-8은 축열조내의 완전 혼

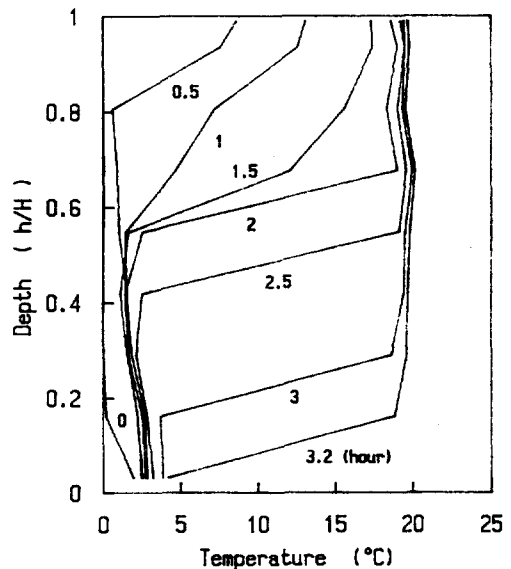


Fig.5 Water Temperature Profile(B-1-5)

Table 5 Characteristic Value, $\Delta\theta_{EUT}$

Exp.No.	B-1-1	B-1-2	B-1-3	B-1-4	B-1-5	B-1-6	B-1-7	B-1-8	Avg.
$\Delta\theta_{EUT}$	9.80	15.05	8.96	12.25	18.06	9.45	15.40	8.82	12.22

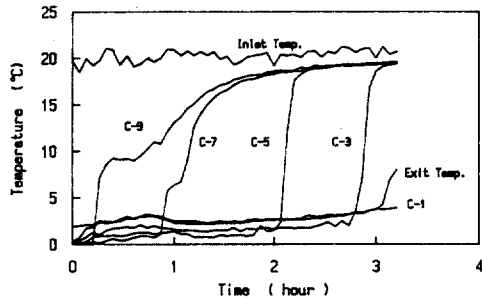


Fig.6 Transient Water Temperature Response of Ice Storage Tank (B-1-5)

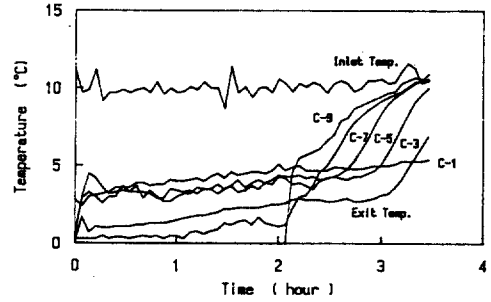


Fig.8 Transient Water Temperature Response (B-1-8)

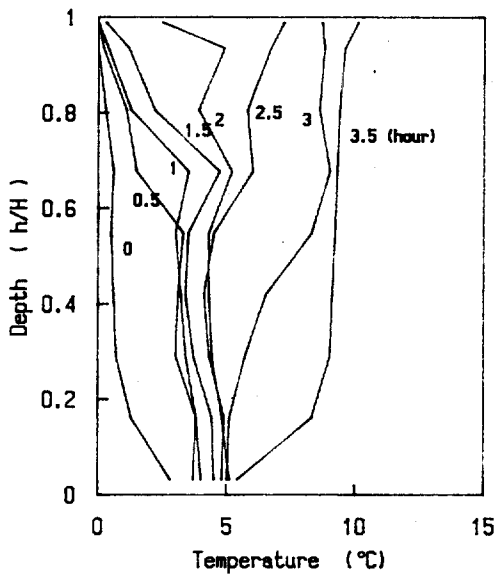


Fig.7 Water Temperature Profile(B-1-8)

합된 현상을 나타내고 있다. Fig. 5, Fig.7에 이 실험들의 축열조내 수직 온도 분포를, Fig 6, Fig. 8에 각 온도 측정점의 시간별 온도 분포를 나타내고 있다. 여기에서 h/H 는 측정점과 수면높이와의 비를 나타낸다. Fig. 7, Fig. 8 중의 C는 Fig. 3의 측정점중 축열조의 중심부를 의미하며 축열조 하단에서부터 측정번호를 부여하였다.

조내에 얼음이 존재하면 시간이 경과하여도

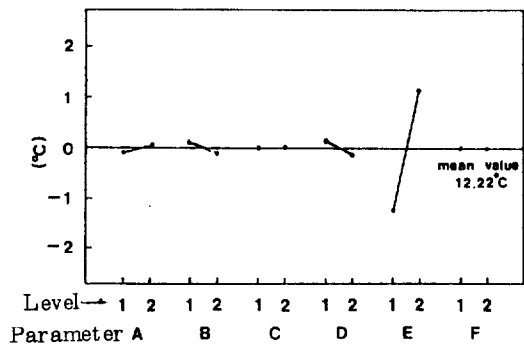


Fig.9 Estimation of Effectiveness

균일한 온도 분포가 존재함을 알 수 있었다. 조내의 온도 4°C를 기준으로 온도 성층역이 조상부에 형성되기 시작하고 외부에서 열량의 공급에 따라 온도 성층역이 조 하부로 확산되어 간다. 실험 B-1-5에서 이러한 현상이 더욱 뚜렷이 나타나고 있으며 이것은 축열조내의 온도 성층화가 잘 형성된 경우이고 실험 B-1-8은 조내에서 완전 혼합을 일으킨 경우이다.

실험이 진행되는 동안 축열조 상부 열교환기에 부착되어 있는 얼음은 온도의 공급에 따라 비교적 균일하게 해빙이 되는 경향을 보이고 있으나 조하부의 얼음은 열교환기의 하부에서부터 녹기 시작하여 열교환기에서 분리되어 수면으로 떠오른다. 이러한 현상에 의하여

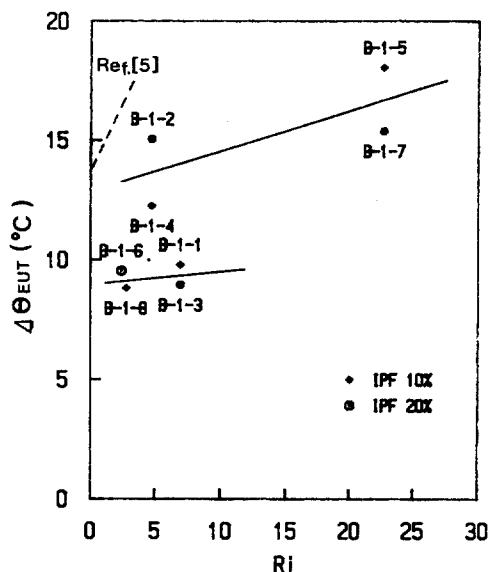


Fig. 10 Relation between $\Delta\theta_{EUT}$ and Ri

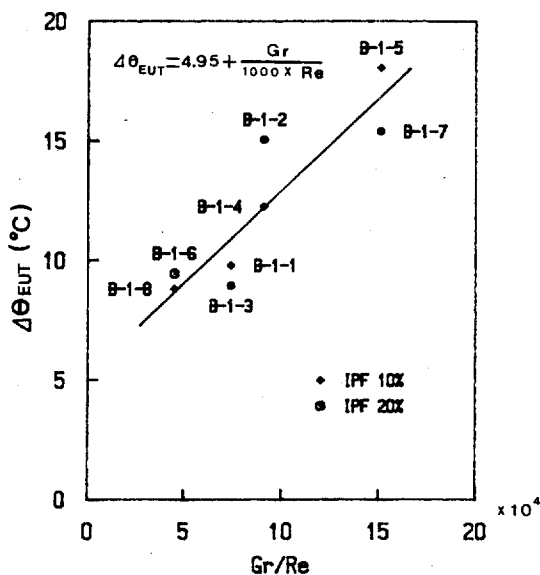


Fig. 11 Relation between $\Delta\theta_{EUT}$ and Gr/Re

온수가 공급되는 조 상부는 온도가 서서히 증가하다가 얼음이 완전히 녹은 후에는 조내의 온도가 급격히 상승한다.

(2) 실험결과와 분석 및 토의

축열조의 열적 성능을 나타내는 지표로서 축열조 유효이용온도차 $\Delta\theta_{EUT}$ 를 취하고 Table 5에 실험의 $\Delta\theta_{EUT}$ 값을, Table 6에 분산분

Table 6 Table of Dispersion Analysis

Parameter	Variation S	Degree of Freedom ϕ	Mean Square V	Ratio of Mean Square F
A	4.02	1	4.02	6.00
B	6.00	1	6.00	8.96
D	5.53	1	5.53	8.25
E	70.39	1	70.39	105.06**
C+F+e	2.01	3	0.67	
Total	87.95	7		

** 1% Significant

석표를 나타 내었다. 여기에서 요인 C, F의 변동값이 미세하여 오차에 포함시켰다. 분산분석으로부터 축열조의 성능에 영향을 주는 요인이 순환수의 축열조 입구온도임을 알 수 있다(1% 유의 수준).

Fig. 9에 각 요인이 특성치 $\Delta\theta_{EUT}$ 에 영향을 미치는 방향성에 대하여 나타내었으며 본 실험에서 가장 좋은 축열조 성능을 나타내는 실험 조건은 $A_2 B_1 D_1 E_2$ 이다. 축열조의 성능에 영향을 미치는 실험의 각 요인들은 입구 Ri 수와 관계가 있는 것으로 생각 되어지나 본 실험의 경우 입구 Ri 수 (≈ 10)의 변화가 미소하여 그 영향을 관찰할 수 없었는데 이것은 축열조에 비해 출입구의 직경이 크기 때문인 것으로 생각되어진다.

Fig. 10에 Ri 수와 $\Delta\theta_{EUT}$ 의 관계를 나타내었는데 분산 분석에서 해석한 것과 같이 순환수의 유량이나 IPF 변화보다는 입구 온도의 변화에 의한 축열조 성능의 변화를 관측할 수가 있었다. 酒井吉郎⁶⁾은 공조부하의 패턴과 토출구 구경, 냉동기 운전상태 등을 변수로 하여 실제의 대형건물을 대상으로 IPF 10%의 방냉실험을 하였는데 Ri 수 0~5의 범위에서 토출구 직경 200 mm의 경우 본 실험의 실험값($\Delta\theta_{EUT}$)들과 유사한 경향을 보이고 있으며 Fig. 10에서 비교하여 나타내었다. $\Delta\theta_{EUT}$ 에 영향을 미치는 변수로 온도차에 의한 부력과 입구 유동의 관성력을 같은 정도로 보아 Gr/Re 에 대하여 Fig. 11에 나타내었는데 실험의 경향을 비교적 잘 나타내고 있으며

근사식을 다음과 같이 구하였다.

$$\Delta\theta_{EUT} = 4.95 + 10^{-3} Gr/Re \dots\dots(3)$$

5. 결 론

빙축열 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 방냉실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 축열조의 성층화를 촉진시킴으로써 유효이용 온도차를 증가시켜 축열조의 성능을 향상시킬 수 있다.
- (2) 축열조의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 것은 순환수의 입구 온도이다.
- (3) 축열조의 유효이용온도차와 Gr/Re 와의 실험근사식을 구하였다.

참 고 문 헌

- (1) Loehrke, R.I., "Stratification Enhance-

ment in Liquid Thermal Storage Tank," J. Energy, Vol.3, No.3, 1979.

- (2) Philips, W.F., "Effects of Stratification on the Performance of Liquid-Based Solar Heating System," Solar Energy, Vol.29, No.2, 1982.
- (3) 中原信生, "빙축열조의 성능예측에 관한 연구," 공기조화. 위생 공학회 학술 논문집, 1984.
- (4) 相良和伸, "빙축열조의 특성해석에 관한 연구," 공기조화. 위생공학회 학술 논문집 1984.
- (5) 酒井吉郎, "대형건물을 대상으로한 축열 방식의 연구," 공기조화. 위생공학회 학술 논문집, 1986.