

# 밀폐용기내의 물의 저압 증발 최적조건에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on the Water Evaporation Conditions of the Enclosed Tank

김세현 · 신유식 · 이윤환 · 정효민 · 정한식

S. H. Kim, Y. S. Shin, Y. W. Lee, H. M. Jeong and H. S. Chung

**Key Words** : Cooling Tower(냉각탑), HVAC System(공기조화 시스템), Latent Heat of Evaporation(증발잠열), Ejector(이젝터), Heat Exchanger(열교환기)

**Abstract** : Cooling towers are widely used not only for cooling products and equipment in manufacturing process but HVAC(Heating, Ventilation and Air Conditioning) system. As a cooling tower is the terminal apparatus which discharges heat from industrial process, the efficiency of heat exchange in the cooling tower greatly affects to the overall performance of a thermal system. In this paper, we constituted a new water cooling system by using a Latent heat of evaporation in an enclosed tank, and this system is consisted of an enclosed vacuum tank and water driven ejector system. Several experimental cases were carried out for improvement methods of high vacuum pressure and water cooling characteristics. The ejector performance was tested in case of water temperature variations that flows into the ejector. Based on the vacuum pressure by water driven ejector, the water cooling characteristics were investigated for the vaporized air condensing effects.

### 기호 설명

$L$  : 탱크 부피(Liter)  
 $P$  : 압력(mmHg. abs.)  
 $Q$  : 유량(L/M)  
 $RT$  : 냉동톤  
 $T$  : 온도( $^{\circ}C$ )

$in$  : initial value  
 $p$  : pump  
 $s$  : surround  
 $w$  : water

### Subscripts

$a$  : air  
 $E$  : ejector  
 $hc$  : heat exchanger of condenser  
 $he$  : heat exchanger of ejector  
 $hw$  : heat exchanger of water/vapor separator

### 1. 서론

산업용 공기 조화 시스템이나 대형 열교환기 등에서 발생하는 폐열을 효과적으로 제거하는 방법으로 냉각탑이 주로 쓰이고 있다. 냉각탑은 최소한의 전기에너지를 사용하여 가장 경제적으로 폐열을 제거할 수 있는 수단으로서, 냉각수를 재사용함으로써 수자원부족 및 수질오염을 방지하는 데 크게 이바지하고 있다<sup>1)</sup>. 또한 냉각탑은 고열원의 열부하를 대기로 방출시키는 최종장치로서 냉각탑에서의 열교환은 시스템 전체의 성능에도 크게 영향을 미치게 된다. 최근 국내에서도 냉동공조산업의 발달과 대규모 산업플랜트 건설이 활발해지면서, 냉각탑의 수요가 급증하고 있다. 따라서 국내 제조업체들도 선진국의 국내 진입에 대처하기 위하여 냉각탑의 고효율화, 경량화 및 수명연장 기술에 관심을 기울이며, 선진국과의 기술제휴를 통하여 선진기술

접수일 : 2003년 12월 15일  
정효민(책임저자) : 경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소  
E-mail : hmjeong@gsnu.ac.kr, Tel : 055-640-3184  
김세현, 신유식, 이윤환 : 경상대학교(원) 정밀기계공학과  
정한식 : 경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소

도입하고 있는 실정이다<sup>2)</sup>.

현재 대부분의 냉각탑은 증발잠열의 효과와 대기의 현열을 이용하고 있으며 기본적으로 냉각탑 주변에는 장애물과 외부 열원이 없어야 한다. 그러나 대부분의 공조용 냉각탑이 건물 옥상에 설치됨으로 건물 외관상의 문제, 소음발생, 레지오넬라균, 협소한 배치면적에 따른 성능저하, 장애물로 인해 냉각탑 내로 유입되는 공기량의 저하에 따른 냉각성능저하 등의 문제점이 발생하는 것이 현실이다. 이러한 문제점들을 개선하고 냉각탑의 효율을 향상시키기 위해서 현재 연구되어지고 있는 주요 요소들은 팬, 전동기, 감속기, 팬스택(fan stacks), 충전재와 같은 여러 요소들이 있다<sup>3)</sup>. 또한 냉각탑분야에서 우리나라의 기술수준은 냉각탑 고효율화에 관해서 아직 많은 문제점이 있다. 그러므로 냉각탑 시스템에서 냉각탑의 고효율화, 소형화 및 수명연장 등이 가능한 신기술에 의한 냉각탑의 설계기술의 확립이 시급히 요구된다<sup>4,5)</sup>.

현재의 냉각탑은 대향류형과 직교류형의 두 가지로 요약할 수 있다. Chu et al.(1999)은 직교류형 냉각탑에서 냉각을 유지하기 위한 공기의 조건에서 적당한 공기의 유량이 있다고 발표하였다<sup>6)</sup>. 냉각탑에서 충전재는 매우 중요하며 전체적인 실행에 영향을 줄 수 있다. 그리고 Kim et al.(2000)은 대향류형 냉각탑에서의 열기의 실행을 개선하기 위해서 충전재의 두 가지 형태를 개발하였다<sup>7)</sup>. 산업분야에서 사용되는 이젝터는 3가지 종류가 있으며 이젝터는 공기, 증기 그리고 물 같은 구동유체에 의해서 분류된다. 여기서 수 이젝터는 단순한 설비와 경제적인 비용 때문에 가장 일반적으로 사용되고 있다. 수 이젝터는 두 가지 목적(Kim, 2000, Simizu, 1987)으로 사용되는데 하나는 브라인과 같은 물질을 수송하는데 사용하며 다른 하나는 밀폐탱크(Kim, 2001) 내부의 진공압력을 만드는데 사용한다<sup>8-10)</sup>. Choi et al.(2001)은 공기이젝터, 이젝터 목부분, 혼합부와 목부분 면적에서의 아음속/음속을 계산하였으며<sup>11)</sup> Kim et al.(2002)은 이젝터에서의 음속과 아음속 흐름을 연구하였다<sup>12)</sup>. 이젝터에 의한 냉각시스템은 Lee et al.(2002)이 냉매 R134a를 갖는 냉동시스템의 경우 COP에 대해서 실험하였다<sup>13)</sup>.

따라서 본 논문에서는 현재의 냉각탑의 단점을 보완, 수정하기 위하여 증발잠열을 이용한 냉각탑을 제작하고 밀폐탱크 내부에 진공을 형성하여 물의 증발을 높이기 위한 여러 가지 실험을 통하여

냉각수 활용 시스템에서 증발 최적조건을 파악하고자 한다.

## 2. 실험장치

냉각효과는 진공압력에 영향을 받기 때문에 진공을 만들어 주는 장치가 필요하며, 이러한 목적으로 진공펌프를 사용하였다. 그러나 일반적인 진공펌프는 소량의 부피, 고진공을 얻기 위해서 설계되어 있다. 본 실험에서는 밀폐공간에서 진공상태를 만들기 위해 수 이젝터 펌프 시스템을 이용하였고 이젝터 내부 구동유체의 온도, 이젝터 외부의 온도와 응축부의 위치에 따른 밀폐탱크 내부의 저압특성을 알아보기 위하여 수조와 열교환기를 내장한 수적분리기를 제작하였다.

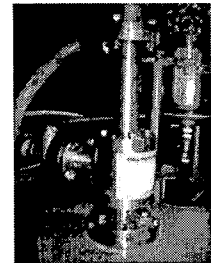
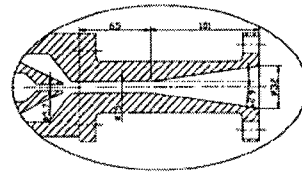


Fig. 1 Drawing and photograph of present research ejector

Fig. 1은 이젝터의 상세도를 나타내고 있으며, 이젝터는 노즐, 노즐과 디퓨저 사이의 직관, 디퓨저 각도의 주요 3부분으로 구성되어 있다. 노즐의 직경을 5.7mm, 직관의 지름은 15mm로 하였으며 디퓨저의 각도를 6.2°로 하였다.

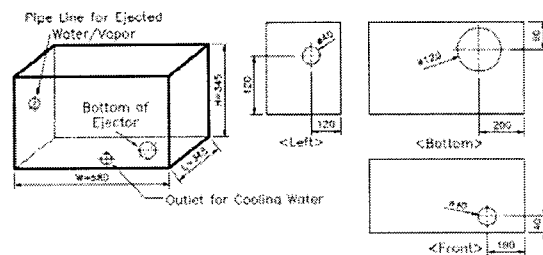


Fig. 2 Schematic diagram of water tank for ejector body cooling

Fig. 2는 이젝터 외부의 온도에 따른 밀폐탱크 내부의 저압특성 및 온도 저감특성을 알아보기 위해 제작된 수조로써 수조의 크기는 W×H×L=580

×345×345(mm)로 되어있으며 이젝터 외부에 설치하였다.

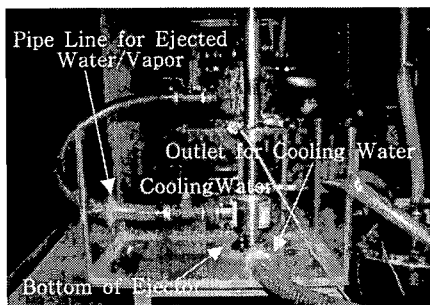


Fig. 3 Photograph of ejector body cooling system

Fig. 3은 제작된 수조를 이젝터 외부에 설치한 사진이다. Fig. 4와 Fig. 5는 수적분리기의 개략도와 사진을 나타내고 있다. 본 실험에 사용된 수적분리기는 열교환기를 내장하고 있으며 밀폐탱크 내부에서 흡입되는 흡입유체를 응축시키는 역할과 동시에 수적을 분리하는 역할을 한다.

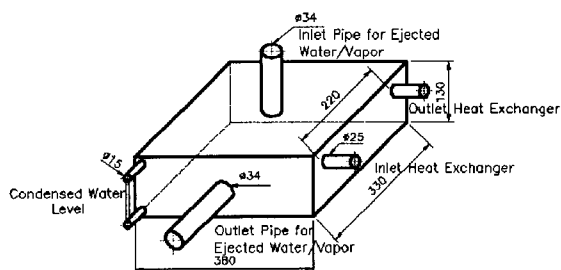


Fig. 4 Schematic diagram of water/vapor separator with inside heat exchanger

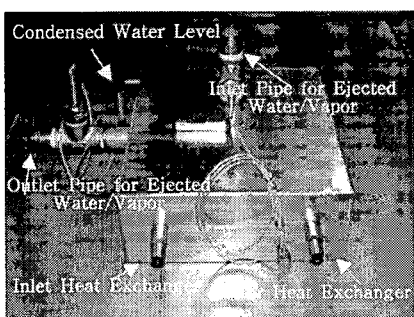


Fig. 5 Photograph of water/vapor separator

Fig. 6은 수적분리기에 내장된 열교환기와 밀폐탱크 내부에 설치한 열교환기를 나타내고 있으며 각각 흡입되는 불응축 기체를 응축하는 역할을 한다.

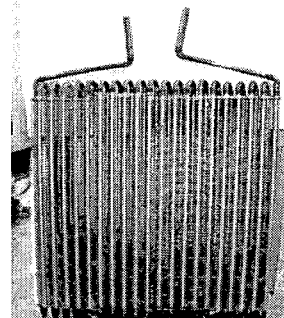
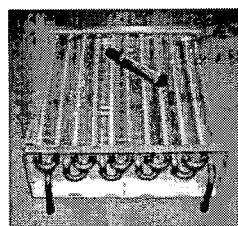


Fig. 6 Installed heat exchanger in water/vapor separator and enclosed tank

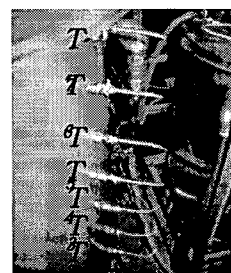
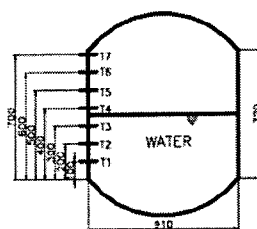
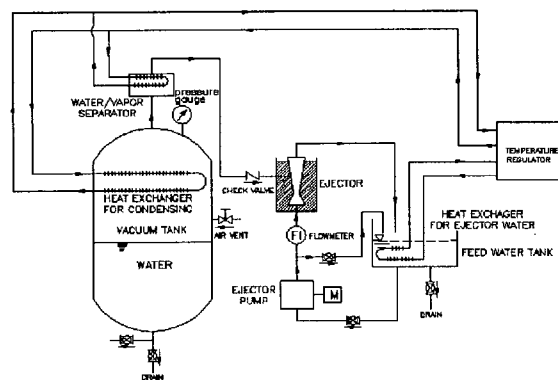
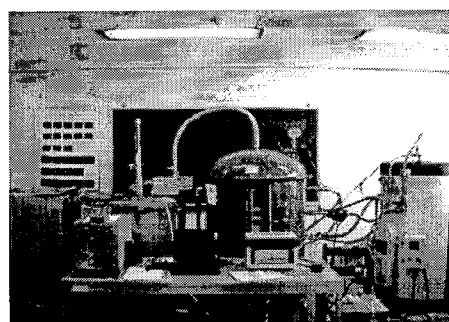


Fig. 7 Schematic diagram and photograph of temperature measuring points



(a) Schematic diagram for cooling system by water driven ejector



(b) Photograph of experimental setup  
Fig. 8 Experimental apparatus for present research

Fig. 7은 본 실험에서 사용된 온도센서 위치를 나타내고 있다. 온도센서(RTD PT100Ω) T1, T2와 T3는 수면 아래에 위치하고 있으며 T4, T5, T6와 T7은 수면 위에 위치한다. 실험에서 표준 냉각탑의 온도를 고려하여 물의 초기 온도를 37°C로 설정하였다. Fig. 8은 본 실험의 전체적인 실험 구성도를 나타내고 있다. 568L의 용량을 가지는 진공 챔버와 이 부분을 진공상태로 만들어 주는 수 이젝터로 구성되어 있다.

이젝터를 통해서 나간 물은 공급수 탱크(Feed water tank)로 흘러 들어가서 이젝터 펌프를 통해 재순환하게 된다.

이젝터 펌프 시스템은 유량계와 유량조절밸브로 구성되어 있고, 압력센서(PSHA0760HAAJ)는 진공 탱크의 상부에 설치하였으며 측정된 압력신호는 데이터로그(DR130, YOKOGAWA)를 통하여 PC로 저장되도록 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 이젝터 내부 구동유체 온도에 따른 특성

냉각수를 얻기 위해 물은 증발조건에 의해서 증발되어야 하며 이 조건들은 진공에 의해서 이루어진다. 본 실험에서 수 이젝터는 진공을 형성하기 위하여 사용하였으며 이젝터에 유입되는 물의 온도와 저압성능의 관계에 대하여 연구하였다.

Fig. 9는 이젝터에 유입되는 물의 여러 가지 초기 값들에 따른 밀폐탱크 내부의 압력분포를 나타내고 있다. 수평축과 수직축은 각각 측정시간과 탱크 내부의 절대압력을 나타내고 있다. 밀폐탱크에는 물을 채우지 않고 568L의 빈 공간의 상태에서 실험을 하였으며 변수로는 이젝터 공급수의 유입 초기온도로 하였다. 유입 초기온도  $T_E$ 가 낮을 경우 탱크 내부의 압력은 높은 진공효과가 나타났으며, 이 압력은 실험 시작 후 약 90분이 경과하였을 때 일정하게 유지되는 현상을 보였다. 이는 이젝터를 통하는 낮은 온도의 물이 이젝터 주위에서 고밀도의 흡입공기를 생성하기 때문으로 생각된다. Fig. 10은 이젝터 공급수의 온도를 나타내고 있으며 이 온도는 파이프와 이젝터 펌프에서의 마찰로 인해서 자연히 상승하는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 이젝터 외부 유체 온도에 따른 특성

이젝터 외부 유체의 온도와 저압성능의 관계에 대하여 실험하였다. Fig. 11은 이젝터 외부 유체의

온도에 따른 밀폐탱크 내부의 압력분포를 나타내고 있다. 밀폐탱크에는 물을 채우지 않고 568L의 빈 공간의 상태에서 실험을 하였으며 변수로는 이젝터를 둘러싸고 있는 수조에 공급되는 물의 유입 초기 온도인  $T_S$ 를 5°C, 15°C, 25°C와 35°C로 하였다. 유입 초기온도  $T_S$ 가 낮을 경우 밀폐탱크 내부의 압력은 높은 진공효과를 나타내었으나 그 차이는 작음을 알 수 있다.

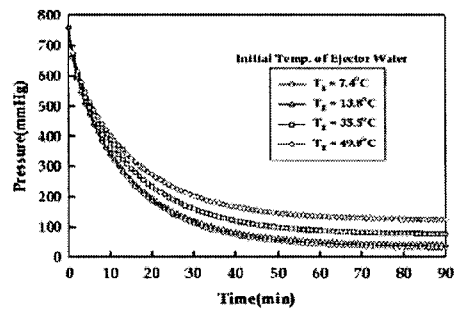


Fig. 9 Vacuum pressure distributions in an enclosed tank for various initial temperature of ejector

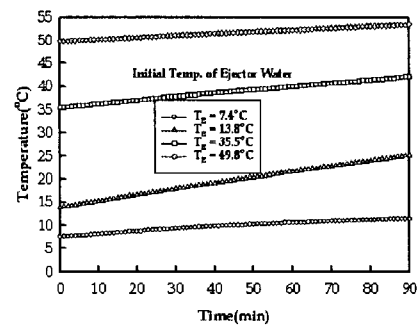


Fig. 10 Temperature variations of ejector water

#### 3.3 응축부 위치 변화에 따른 특성

위의 실험으로부터 획득한 결과에 의하면 구동유체의 온도가 낮고 흡입유체를 응축시키므로 인해 그렇지 않은 경우보다 밀폐탱크 내부의 증발조건이 더 좋아지며 또한 이것으로 인하여 물의 냉각효과가 좋아진다는 것을 알 수 있었다. 본 실험에서는 열교환기를 통하여 응축하는 위치 변화에 따른 밀폐탱크 내부의 증발조건과 물의 냉각특성을 파악하였다. 빈 밀폐탱크는 568L의 용적을 가지며 300L<sub>w</sub>는 밀폐탱크 내부에 300L의 물과 268L의 공기로 가득하다는 것을 의미한다. 본 실험에서는 표준 냉

각탑 설계의 온도를 고려하여 초기 물의 온도를 37°C로 설정하였다. Table 1은 본 실험에서의 변수를 나타내고 있으며  $Q_{he}$ ,  $Q_{hc}$  와  $Q_{hw}$ 의 값들은 각각 이젝터 공급수 탱크 내부 열교환기의 유량, 밀폐탱크 내부 열교환기의 유량과 수적분리기 내부 열교환기의 유량을 나타내고 있다.

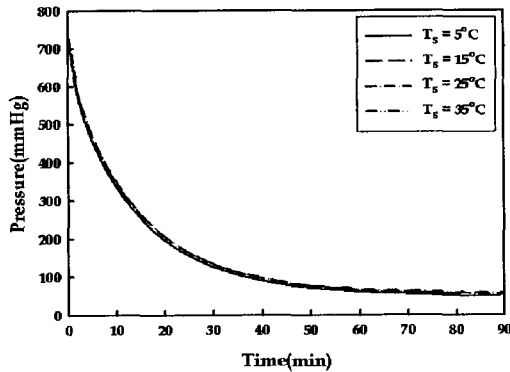


Fig. 11 The vacuum pressure distributions in an enclosed tank for various initial temperature of ejector body

Table 1 Experimental parameters for water cooling test

	Type 1	Type 2	Type 3
Enclosed tank volume(Liters)	568	568	568
Filled water and air volume(Liters)	300L <sub>w</sub> 268L <sub>a</sub>	300L <sub>w</sub> 268L <sub>a</sub>	300L <sub>w</sub> 268L <sub>a</sub>
Flow rate into ejector pump, $Q_p$ (L/M)	50	50	50
Flow rate in heat exchanger of ejector wter, $Q_{he}$ (L/M)	7.5	7.5	7.5
Flow rate in heat exchanger of condensing, $Q_{hc}$ (L/M)	none	none	4
Flow rate in heat exchanger of water/vapor separator, $Q_{hw}$ (L/M)	none	4	none

Fig. 12는 Table 1에서 3가지 경우들에 의한 진공 압력분포를 나타내고 있다. 실험 시작 후 30분이 경과했을 때의 압력이 거의 정상상태를 나타내며 Type 1, Type 2와 Type 3의 압력값은 동일한

48mmHg를 나타내고 있으며 표준 냉각탑의 설정 온도인 37°C의 증발압력 45mmHg와 유사한 압력값을 나타내므로 충분히 증발조건에 도달하였다는 것을 알 수 있다. 이 압력값은 실험 시작 후 90분이 경과했을 때 각각 33mmHg, 27mmHg와 23mmHg로 감소하였다. 3가지 경우 중 Type 3의 경우 가장 좋은 저압효과를 나타내었다. 하지만 Type 2는 밀폐탱크 외부에 열교환기를 설치한 경우로써 Type 3의 압력값과 많은 차이가 나지 않고 있다. 이러한 관점에서 보면 Type 3의 경우를 대체하여 밀폐탱크 외부에서 흡입유체를 응축하여도 Type 3과 유사한 저압효과를 얻을 수 있으며 장치 구성의 경제성 및 운전의 편리성 등 여러 가지 장점이 있을 것으로 생각된다. 또한 Type 2의 경우 실험이 끝난 후 수적분리기 내부에서 약 4L가량의 응축수가 생성되었다. 당연히 이것은 밀폐탱크 내부의 물이 증발하여 수적분리기 내부의 열교환기에 의해 응축되었기 때문이다.

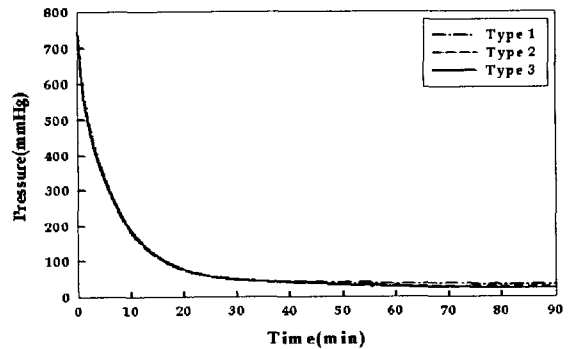


Fig. 12 Vacuum pressure distributions for three Type ; Type 1, Type 2, Type 3

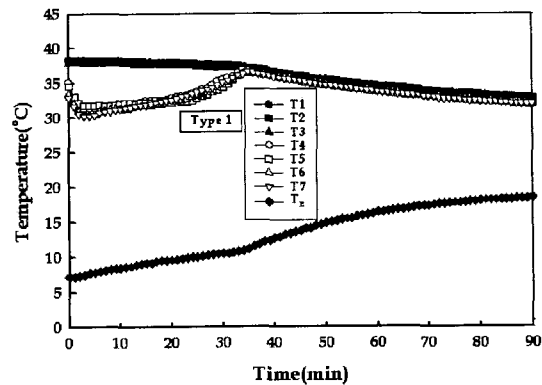


Fig. 13 Temperature distributions of enclosed tank and ejector water in case of Type 1

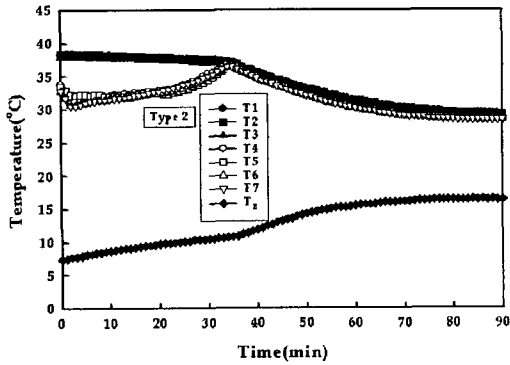


Fig. 14 Temperature distributions of enclosed tank and ejector water in case of Type 2

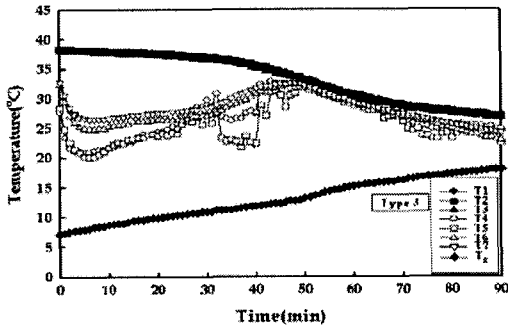


Fig. 15 Temperature distributions of enclosed tank and ejector water in case of Type 3

Fig. 13, Fig. 14와 Fig. 15는 각각의 경우 밀폐탱크 내부의 온도분포를 나타내었다. 이 그림에서 검은색 마크는 수면 아래 즉 수중을 나타내며 흰색 마크는 수면 위 즉 습증기층을 나타낸다. 온도  $T_E$ 는 이젝터 공급수의 온도이며 초기 온도값은 7°C로 3가지 경우 모두 동일하고 이젝터 펌프 시스템은 폐회로 순환을 한다. 이 세 종류의 경우 실험 시작 후 약 35분 정도 경과했을 때 수면의 온도 기울기가 급격하게 변하는 것을 알 수 있으며 이 점에서 증발조건에 도달하였음을 의미한다. 실험에서 T1, T2와 T3의 온도차는 거의 나타나지 않는 것으로 보아 수면 아래의 온도분포는 일정한 것으로 생각된다. 습증기층의 초기온도는 실험을 시작한 후 35분까지 점차적으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 37°C의 온도에서 물의 일반적인 증발조건이 약 45mmHg이기 때문에 이 조건에 도달하기까지는 탱크 내부의 고온수로부터 방출된 열에 의하여 일시적으로 증기 온도가 상승하는 것으로 생각된다.

실험 시작 후 35분 정도 경과했을 때 이러한 증발조건을 만족하며 이 현상은 Fig. 13, Fig. 14와 Fig. 15에서 보여지는 것처럼 갑자기 감소하는 온도로부터 더욱 분명하게 나타난다. 실험 시작 후 35분이 경과했을 때 습증기층과 물층의 온도분포가 일치하는 경향을 보이고 있다. 이것은 물의 증발잠열이 습증기층으로 전달되기 때문이다. 따라서 실험 시작 후 35분이 경과했을 때부터 습증기층과 물층의 온도분포가 유사하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 15에서는 습증기층의 온도가 물층의 온도보다 낮게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 밀폐탱크 내부에 설치된 열교환기가 습증기층을 응축하기 때문이다.

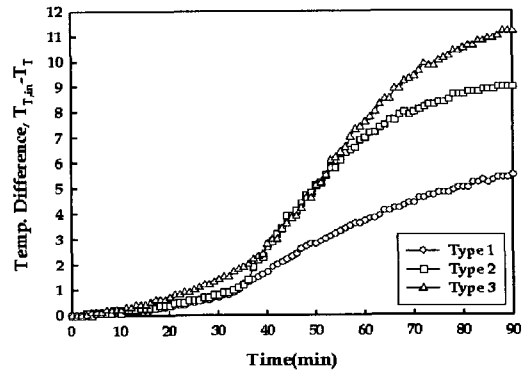


Fig. 16 Temperature difference distributions in enclosed tank

Fig. 16은 시간에 따른 밀폐탱크 내부의 온도분포를 나타낸 것으로 수직축은 37°C인 물의 초기온도와 T1의 온도값의 차를  $T_{T,min} - T_T$ 로 나타내었으며 Type 3의 경우 가장 큰 냉각효과를 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 실험을 통하여 이젝터 내부 구동유체의 온도, 이젝터 외부의 온도와 응축부의 위치에 따라 밀폐탱크 내부의 저압 증발특성과 물의 냉각특성을 알 수 있었으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 물의 증발이 생성되기 위한 저압 환경의 구축에 관해서는 이젝터 몸체의 냉각효과보다는 이젝터 내부 구동유체의 온도가 상대적으로 유리하다.
- (2) 저압 환경에 의하여 증발이 시작 될 경우 불응축 가스를 충분히 냉각시키므로써 약 2배 이상의 냉각효과를 가질 수 있다.

(3) 불응축 가스를 냉각시키기 위하여 밀폐탱크 내부에 열교환기를 설치하는 것이 외부에 설치하는 것보다 더 좋은 저온효과를 나타낸다.

(4) 외부에 독립적으로 열교환기를 설치한 것이 내부에 열교환기를 설치한 것과 유사한 저압효과를 나타내므로 전체시스템의 단순화, 경제성 및 운전의 편리성에 유리하다.

### 후 기

본 연구는 환경부 차세대 핵심 환경기술개발사업 (2001-11203-3-0)의 지원과 경상대학교 BK21지역 대학육성 사업단의 지원에 의하여 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. ASHRAE, 1996, "System and Equipment Handbook", Chap. 36.
2. Ministry of Science & Technology, 2000, "R & D on hydrophilic fill packing for high-efficiency cooling tower", pp. 11~13.
3. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1996, "Cooling Tower System and Equipment Handbook", Chap. 36.
4. J. H. Yun, 1998, "Cooling tower technology today and tomorrow", Journal of SAREK, Vol. 27, NO. 1, pp. 3~6.
5. J. D. Seo, 1998, "Upgrading for industrial cooling tower", Journal of SAREK, Vol. 27, NO. 1, pp. 7~13.
6. K. D. Chu, J. I. Yoon, J. D. Kim and C. J. Lee, 1999, "An Experimental Characteristics of Thermal Performance of Cross Flow Type Cooling Tower", Proceedings of SAREK, 99-W-047, pp. 271~276.
7. Y. S. Kim, S. D. Park and S. J. Lee, 2000, "A Study on Fill Development of Cooling Tower", Proceedings of SAREK, 2000-S-166, pp. 1115~1120.
8. K. K. Kim and S. Y. Choe, 2001, "A Study on Thermal Characteristics of Low Temperature Vacuum Drying by Hot Water Temperature", Journal of Korean Society of Marine Engineers, Vol. 25, No. 3, pp. 158~164.
9. M. K. Kim, O. B. Kwon, H. G. Kim and C. G. Lee, 2000, "A Study on the Characteristics of Jet Pump Having Exteriorly Connected Multi Nozzles", Journal of KSPSE, Vol. 4, No. 1, pp. 33~38.
10. Y. Shimizu, S. Nakamura, S. Suzuhara and S. Kurata, 1987, "Study of the Configuration and Performance of Annular Type Jet Pumps", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 109, pp. 205~212.
11. B. G. Choi, B. S. Koo, H. D. Kim and D. J. Kim, 2001, "Computations of Bleed Pump Type Subsonic/Sonic Ejector Flow", Trans, of KSME, Vol. 25, No. 12, pp. 269~276.
12. H. D. Kim and B. G. Choi, 2002, "An Experimental Study of Sonic/Supersonic Ejector Flow", Trans. of KSME, Vol. 25, No. 5, pp. 640~647.
13. W. H. Lee, Y. J. Kim and M. S. Kim, 2002, "Experimental Study in Performance of Refrigeration System with an Ejector", Int. Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 10, No. 4, pp. 201~210.