

베어관을 이용한 30RT급 하이브리드 밀폐형 냉각탑의 성능특성에 관한 실험적 연구

전철호⁺·이호생⁺·문춘근⁺·김재돌⁺⁺·윤정인⁺⁺⁺

An Experimental Study on Performance Characteristic of 30RT Closed-Type Hybrid Cooling Tower using Bare Tube

Chul-Ho Jun⁺, Ho-Saeng Lee⁺, Choon-Geun Moon⁺, Jae-Dol Kim⁺⁺ and Jung-In Yoon⁺⁺⁺

Abstract : In this study, the experiment of thermal performance about closed-type hybrid cooling tower was conducted. A closed type cooling tower is a device similar to a general cooling tower, but with cooling tower replaced by a heat exchanger. The test section for this experiment has the process that the cooling water flows from top part of heat exchanger to bottom side in the inner side of tube, and spray water flows gravitational direction in the outer side of it. Air contacts of tube outer side are counterflow. The heat transfer pipe used in this experiment is a bare type tube having an outside diameter of 15.88mm. In this experiment, heat performances of the cooling tower are calculated such as overall heat transfer coefficient of between the process fluid and air, cooling capacity and pressure drop.

Key words : 밀폐형 냉각탑(Closed type cooling tower), 습구온도(web-bulb temperature), 냉각성능(Cooling performance), 냉각수(cooling water), 스프레이수(Spray water), 압력강하(pressure drop),

기호설명

Q : Heat capacity, kcal
 W : Cooling water flow rate, kg/h
 T : Temperature, $^{\circ}\text{C}$
 c : Specific heat, kcal/kg $\cdot^{\circ}\text{C}$
 G : Air flow rate, kg/h
 L : Spray water flow rate, kg/h
 i : Enthalpy, kcal/kg
 A : Heat transfer area of tube, m^2
 U : Overall heat transfer coefficient, kcal/ $\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$

하첨자

w1 : Cooling water inlet
w2 : Cooling water outlet
a1 : Air inlet

a2 : Air outlet

LMTD : Logarithmic mean temperature difference

1. 서론

최근 환경 및 에너지 보존에 따른 국제동향에 미루어 에너지설비의 효율향상 및 이를 위한 기술 개발은 매우 중요하다. 따라서 각종 산업공정이나 공기조화 및 냉동시스템에서 생성되는 열을 효과적으로 제거하기 위해서 필요한 양의 냉각수를 공급하는 냉각탑의 최적설계 및 운전기술의 확립은 매우 필요하고 시급하다. 냉동기 및 생산공정에서 발생된 열은 냉각수로 식혀지고 열을 전달받아 데워진 냉각수는 냉각탑으로 보내져 냉동기 및 생산공정이 요구하는 온도로 냉각되게 된다. 냉각탑은 공조용 및 산업용으로 대별되며, 무제한의 대기 공기를 이용하여 다량의 냉각수를

+ 전철호(부경대학교 냉동공조공학과 대학원), E-mail: zeon97@nate.com Tel: 051)620-1506

+++ 윤정인, 부경대학교 기계공학부

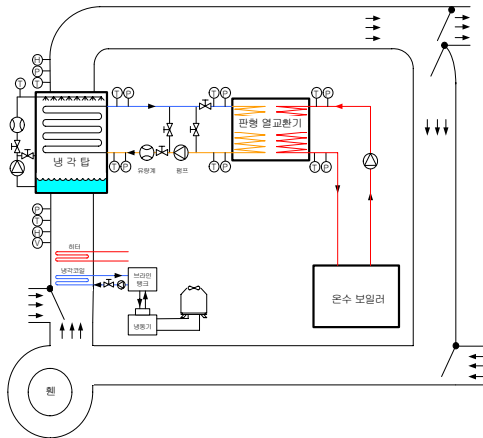


Fig.1 The Photograph and Schematic diagram of experimental apparatus.

가장 경제적으로 냉각시킬 수 있는 냉각시스템의 핵심 장치이다. G. Gan 등^[1]은 밀폐형 습식 냉각탑(CWCT)의 내부 열 및 동특성에 대하여 CFD를 통하여 해석하였으며, Jorge Facad 등^[2]은 건물 내 천장냉방에 적용한 밀폐형 냉각탑에 관한 실험적 특성을 밝혔다. Shunichi TEZUKA 등^{[3]-[5]}은 증발냉각기에 대한 실험적 연구로 엔탈피 기준 총괄 체적열전달계수, 분무수의 열전달율 등의 열적 특성 및 온도의 영향에 대하여 실험적으로 밝혔다. Berkeley^[6]는 공랭식 열교환기보다 증발냉각기가 경제적으로 유리함을 증기터빈 복수기를 이용하여 비교하였다. 기존의 밀폐식 냉각탑은 코일 번들 상부에 물을 분무하여 분무수 (Spray water)가 대기공기와 접촉하면서 그 일부가 증발되어 냉각수의 열을 빼앗아 냉각을 시키게 된다. 이때 분무수의 1% 정도가 증발되어 대기로 방출되게 된다. 냉각탑에서 대기로 방출되는 공기가 주변의 찬 공기

와 만날 때 노점 이하로 내려가면 뿌연 연기와 같이 변하여 눈에 띄게 되는데 이 뿌연 연기를 백연이라 한다. 환경부는 백연을 공해물질로 취급할 예정이며, 이미 선진국에서는 도심지에 설치되는 냉각탑에서 발생하는 백연을 공해물질로 간주하고 백연경감 장치의 의무화하고 있는 실정이다.

영하 12℃에 이를 때 까지 코일 번들에 분무수를 부어야 냉각 시스템이 요구하는 온도 (32℃)로 내릴 수 있는 기존의 밀폐식 냉각탑과는 달리 외기 온도가 영상 15℃ (요구 조건에 따라서 조정 가능) 이상이면 코일 번들에 분무수를 뿌려주고 (습식 운전), 대기의 온도가 영상 15도씨 미만이면 분무수를 뿌려주지 않아도 (건식 운전) 냉각시스템이 요구하는 온도로 냉각이 될 수 있는 하이브리드 밀폐식 냉각탑은 동절기 운전 시 분무수를 사용하지 않음으로 수자원을 절약할 수 있고 또한 냉각탑에서 발생하는 백연 현상을 막을 수 있는 신 개념의 냉각탑 기술이다. 일반적인 밀폐형 냉각탑에 대한 체계적인 이론이 정립되어 있지 않은 국내에서는 외국의 제품을 흉내 내거나 외국기업과의 기술제휴를 통하여 제품을 생산하고 있는 실정므로 밀폐형 냉각탑에 대한 이론적 해석이 시급하다고 하겠다. 이에 본 연구에서는 하이브리드 밀폐식 냉각탑에 대한 이론적인 열량해석 능력을 개발하고, 최적화 설계기술을 구축하여 외국에서 전량 수입되고 있는 하이브리드 밀폐식 냉각탑에 대한 설계데이터를 제공하는 동시에 장기적으로 수입대체를 하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 밀폐형 냉각탑의 열 성능특성을 파악하기 위한 열교환기 실험장치의 개략도와 실제사진을 나타낸다. 냉각탑은 상부의 코일섹션과 하부의 수조 및 송풍기로 구분되며, 코일 섹션은 코일, 스프레이 시스템, 엘리미네이터 및 이들 부품을 둘러싸고 있는 외부 케이싱으로 구성되어 있고 지름 15.88mm, 길이 2.4m의 동관을 이용한 열교환 전열관을 삼각 배열로 배치하였다. 65A 냉각수 인입관을 냉각수 분배 헤드에 연결하여 16×22 본의 냉각코일에 연결하여 냉각수를 분배하였다. 코일 튜브는 냉각유체가 자유 드레인이 되도록 구배를 주어 압력손실이 적게 하였다. 스프레이 시스템은 동관 재질의 헤

드, 분사분지관 및 분사분지관에 부착되는 대구경 막힘방지 분사노즐로 구성되어 코일 위에 관외 냉각수가 끌고루 적셔지도록 설계되어 있으며, 공기저항 압력손실을 최소화하고 수분을 효과적으로 제거 하기 위해 PVC재질의 엘리미네이터를 설치했다. 상부의 냉각 코일과 엘리미네이터 및 스프레이 시스템을 설치할 수 있는 상부 케이싱연결부 누수방지 기밀강화를 위해 2중 플렌지 관넬로 제작하였다.

하부 케이싱은 냉각코일로 건공기를 공급하며 냉각작용을 일으킬 수 있도록 외부 공기 공급용 팬을 장착할 수 있도록 설계하였으며, 냉각탑 상부에 장착된 스프레이 시스템에서 냉각코일 외부로 흘러 냉각작용을 한 후 냉각코일 아래로 흘러내리는 관외 냉각수를 저장하는 수조역할을 할 수 있도록 설계하였다. 이때 상부의 냉각코일외부로 흘러내리는 관외 냉각수가 송풍기부로 흘러 들어오지 않도록 하기 위하여 송풍기 출구부에 댐퍼를 설치하였다.

냉각탑 입구의 건구 온도와 습구 온도의 조절은 냉각탑 출구에 리턴덕트를 설치하여 냉각탑 출구의 고온의 포화공기와 외기를 댐퍼를 이용하여 적절히 혼합하여 냉각탑 입구의 습도를 조절하고, 냉각탑 입구 덕트 내에 20kW급 히터를 설치하였으며 슬라이덕스를 이용하여 히트에서 발생하는 발열량을 조절하여 공기 온도를 조절하였다. 또한, 10RT급 냉동기를 이용하여 덕트 내의 냉각 코일에 냉수를 공급하여 일정한 조건의 공기가 냉각탑으로 유입되도록 구성하였다. 냉동기에서 냉각코일로 냉매증기를 바로 보낼 경우 냉동기의 운전이 불안하고 냉각 양의 조절이 어려워 냉동기에서 냉수 저장통의 냉수를 냉각시킨 수 냉수 저장통 내의 냉수를 냉각 코일내로 순환 시켜 공기를 냉각시키도록 하였다. 이때 냉수 유량을 조절함으로써 공기의 온도를 조절 할 수 있었다. 냉각탑으로 유입되는 건공기의 양은 입구에 설치된 팬을 Hitachi사의 15HP급 인버터를 이용하여 속도를 제어함으로써 조정하였다. 일정 온도의 냉각수를 냉각탑 코일 내로 보내기 위해서, 냉각탑 코일에서 나오는 출구 냉각수를 판형 열교환기에 보내어 150,000kcal/h급 보일러에서 공급되는 80℃의 온수와 열교환시켰다. 이 때 온도 조절은 보일러에서 공급되는 온수의 유량을 조절하여 조정하였다. 순환수의 순환은 펌프를 이용하였다.

관내 유체의 온도 측정용 센서로는 지름 1.6mm의 K형 열전대를 사용하였으며, 냉각탑 입출구의 냉각수

Table 1 Experimental standard conditions.

Cooling water	Flow rate	[m ³ /h]	24	
	Inlet Temperature	[°C]	37	
Spray water	Flow rate	[m ³ /h]	33	
	Air	Velocity	[m/s]	3.2
		Inlet Wet-bulb Temp.	[°C]	27

온도, 판형 열교환기 입출구의 냉각수, 온수 온도를 각각 측정하였다. 공기의 온도 측정에는 0.3mm의 T형 열전대를 사용하여 측정 하였으며, 냉각탑 입구와 출구에 각각 5군데의 공기 온도를 측정하여 평균 온도를 입출구 온도로 설정하였다. 습도 측정은 습도 센서를 이용하여 측정하였으며, 냉각탑 공기유로 입·출구에 각각 5지점을 측정하여 평균하여 그 지점의 습도로 하였다. 온도와 습도는 데이터로거와 컴퓨터를 이용하여 5초마다 1번씩 측정하고 기록하였다. 물의 유량은 초음파 유량계와 플로트식 유량계를 이용하여 측정하였으며, 공기는 열선 유속계를 이용하여 풍속을 측정하였다. 각종 기기는 콘트롤 판넬에 연결하여 조절하였다.

2.2 실험방법

실험의 주요 순서는 흡입공기의 유량조절과 공급 냉각수의 유량 및 온도조절 및 입구공기의 습구온도 및 건구온도를 조정하여 정상상태에 도달한 후 일정 시간동안 운전한 데이터를 측정하였다.

송풍기와 인버터를 이용하여 공기의 설정 유량을 유지하고, 냉각탑 출구에서 나온 고온 다습한 배출공기는 리턴덕트를 통해 외기와 혼합하여 건구온도 및 습구온도를 조절하며, 냉각탑 입구의 히터와 냉각코일에 의해 실험조건에 맞는 공기의 상태를 만든다. 여분의 배출공기는 밖으로 배출하여 실내 환경의 변화를 최소화하였다. 코일 내부로 흐르는 냉각수는 냉각탑 출구의 냉각수를 판형 열교환기로 보내어 판형 열교환기에서 보일러에서 공급되는 약 80℃의 온수와 열교환 하여 설정 온도로 상승 시켜 지속적으로 공급하도록 하였다. 이때 정밀한 온도 조절을 위하여 냉각수 관과 온수 공급관에 바이패스를 두어 하여 판형 열교환기로 공급되는 냉각수와 온수의 양을 조절함으로써 원하는 온도를 유지 시킬 수 있었다.

물의 순환은 순환펌프를 이용하여 저수조의 물을

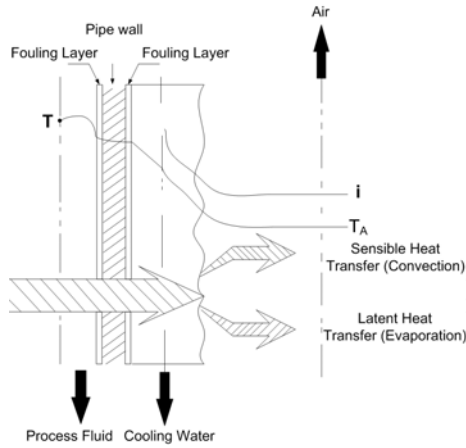


Fig. 2 Heat and mass transfer process of heat exchanger.

흡입하여 항온조로 보내고, 항온조에서 물은 일정온도로 유지되면서 가압펌프의 압력에 의해 실험부의 노즐에서 분사된다.

실험은 우선 냉각코일에서 공기의 유속을 일정속도로 유지하고, 입구공기의 건구온도와 습구온도를 일정하게 조절한 다음 냉각수 수량을 조절하여 수-공기 유량비를 변화시키면서 냉각수 입-출구 온도차를 측정하고, 다음에 풍속을 변화시켜 실험한다. 탑 내의 압력강하는 팬이 정상상태가 된 후 냉각수 순환수량과 공기유속에 따라 마노미터를 이용하여 차압을 측정하였다. Table 1은 장치의 기준 실험조건을 나타낸다.

3. 실험이론

열교환기의 임의 높이에 대한 각 유체의 온도 및 엔탈피 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 밀폐형 냉각탑에서 열은 냉각수로부터 관벽을 통해 관의 분무수에 전해지고 이 열이 공기로 전해진다. 물에서 공기로의 열전달은 물의 증발에 의한 잠열전열과 공기의 현열변화에 의한 현열전열로 구성되어 있다. 이 때 냉각탑의 냉각수가 순환수와 교환한 열량 Q_{r1} 과 공기의 교환열량 Q_{r2} 는 각각 다음과 같다.

$$Q_{r1} = W \cdot c_w \cdot (T_{w1} - T_{w2}) \quad (1)$$

$$Q_{r2} = (G + L_e) \cdot i_{a2} - G \cdot i_{a1} \quad (2)$$

한편, 건식운전일 때의 총괄 열전달계수 U 는 다음

식에서 구해진다.

$$\frac{1}{U} = \frac{A \cdot T_{LMTD}}{W \cdot c_w \cdot (T_{w1} - T_{w2})} \quad (3)$$

4. 결과 및 고찰

식 (1)과 (2)에 나타난 열평형을 이용하여 실험장치의 및 열 물질평형을 검증하여 실험장치의 신뢰성을 검증하였다. 실험 장치의 신뢰성 검증 결과 Fig. 3에서와 같이 $\pm 15\%$ 내에서 열평형이 이루어지는 것을 알 수 있었다. 이것은 실험장치가 단열 되어 있다고는 하나 배관 내에서의 방열과 실험장치 본체의 열용량 및 방열, 측정장치의 오차 등에 의한 것이라고 생각된다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 냉각탑 입구의 습구온도 변화에 따른 냉각탑의 레인지와 냉각능력을 나타내고 있다. 습구온도가 증가 할수록 냉각수 출구 온도도 증가하는데 이것은 입구의 습구온도가 올라감으로서 입구 냉각수와 공기의 온도차가 줄어들어 관의 냉각수의 증발이 줄어들고 관내 냉각수 온도 저하가 감소하기 때문이라 생각된다. 습구온도 26°C 이상에서 온도레인지는 급격히 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 냉각능력은 냉각수의 입구와 출구 온도차에 냉각수 유량과 냉각수의 비열을 곱한 값이므로 냉각수 유량을 기준 설계유량으로 하고 비열이 일정하므로 냉각탑의 냉각능력은 레인지의 경향과 동일한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 6은 수·공비에 따른 냉각탑의 냉각능력을 나타낸다. 그림에서와 같이 분무수량이 증가할 때 냉각능력은 선형적으로 증가하며 이는 분무수의 증발에

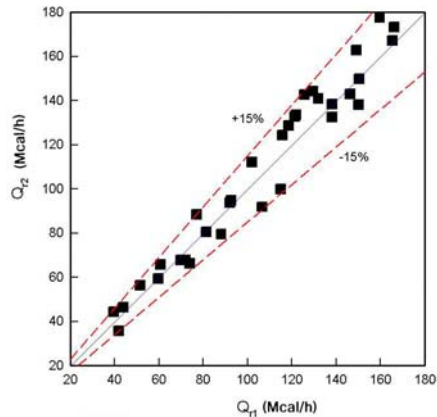


Fig. 3 Heat balance in the system

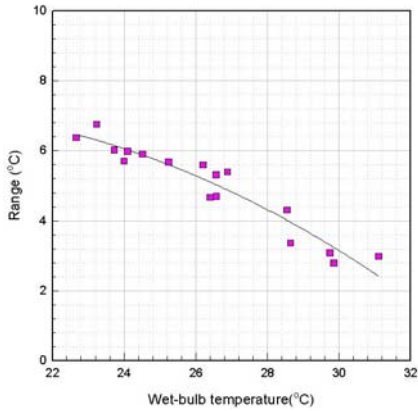


Fig. 4 The range variation to wet-bulb temperature

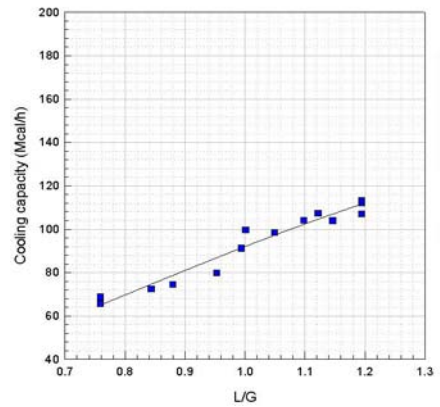


Fig. 6 The cooling capacity to water-air ratio

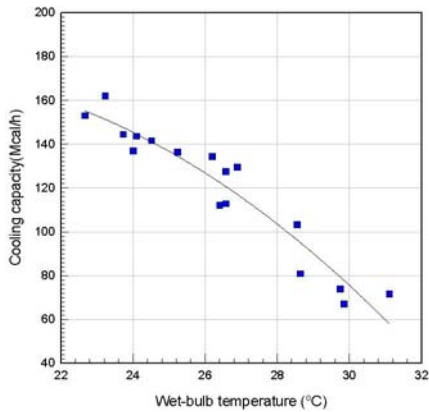


Fig. 5 The cooling capacity to wet-bulb temperature

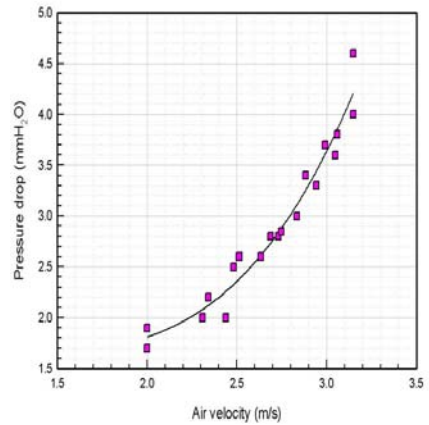


Fig. 7 The pressure drop to air velocity

의한 물질 전달에 비례한다고 볼 수 있다.

Fig. 7은 공기유속에 따른 압력강하를 나타내며 풍속 증가에 따라 압력강하는 커짐을 알 수 있다. 기준조건에서 정압손실 값은 4.0 mmH₂O 를 나타내었다.

Fig. 8은 동계운전(건식운전)시 공기의 입구온도에 따른 냉각능력을 나타내며 분무수 순환이 없는 공랭식 열교환기와 같은 프로세서를 가진다. 앞서 기술한 바와 같이 입구 공기가 올라갈수록 냉각수와의 온도차가 줄어들어 냉각능력이 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 동일한 동계운전 하에 공기유속에 따른 총 열전달 계수와 압력강하를 나타낸다. 유속이 빨라질수록 즉, 풍량이 많아질수록 열전달 계수는 선형적으로 증가하였다. 물질전달이 없는 현열교환이 일어나는 과정이므로 급격한 변화는

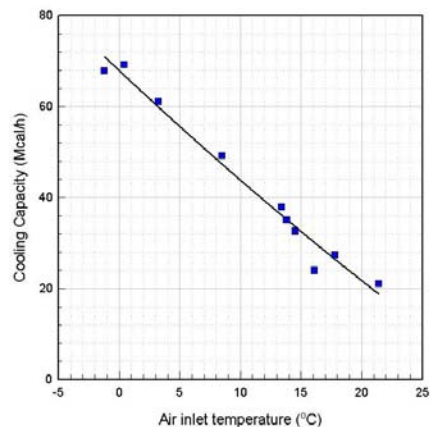


Fig. 8 The cooling capacity to air inlet temperature

보이지 않았다. 압력강하 역시 습식운전과 비교해서 다소 적은 값을 보이는 이유는 분무수의 순환이 없기

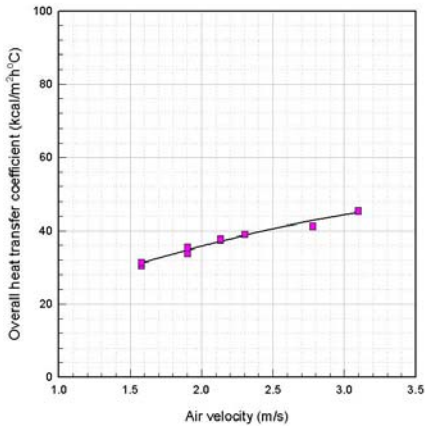


Fig. 9 The overall heat transfer coefficient to air velocity

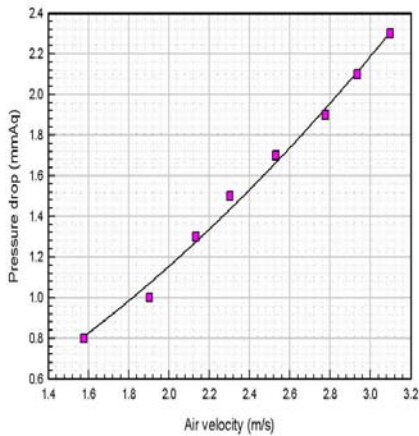


Fig. 10 The pressure drop to air velocity

때문이라 보여진다.

5. 결 론

본 연구는 약 1RT급 기초 실험장치에서 얻은 밀폐식 냉각탑의 기초설계 자료를 바탕으로 30RT급 실제 냉각탑을 설계·제작하여 성능특성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기준조건에서 냉각탑의 냉각능력이 약 112 Mcal/h가 되었으며 설계 값 117 Mcal/h와 약 4.5%정도 작은 값을 나타내고 있으나 설계값과 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있었다. 따라서 기초실험에서 얻은 설계 자료가 신뢰성이 있다 하겠다.

- (2) 공기의 입·출구 온도 변화가 미소함을 통하여 분무수와 공기의 열교환 프로세스가 현열에 의한 열전달보다는 분무수의 증발에 의한 물질전달에 의존함을 알 수 있었다.
- (3) 동계 건식운전 시 하계 습식운전에 비하여 기준 조건에서 약 27%의 냉각능력을 나타내었고 약 50%의 압력강하가 일어났다. 이는 각각 분무수의 순환유무에 따른 결과임을 알 수 있었다.

향후, 전열관 교체 실험(Fin tube)을 통하여 습식 및 건식 운전의 적합성 여부를 판단하기 위한 추가 실험을 수행할 계획이다.

후 기

본 연구 과제는 산업자원부 2003년 지역산업기술개발사업에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] G. Gan, S. B. Riffat, L. Shao and P. Doherty, Application of CFD to closed-wet cooling towers, Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp. 79-92, 2001.
- [2] J. Facãd, A. C. Oliveira, Thermal behaviour of closed wet cooling towers for use with chilled ceilings, Applied Thermal Engineering, Vol. 20, pp. 1225-1236, 2000.
- [3] 手塚, 高田, 河西, 蒸發冷却器の性能 - 第1報 엔탈피 基準總括容積熱傳達係數, 冷凍, 第 47 卷, 第 538 号, pp. 695~700, 1972.
- [4] 手塚, 蒸發冷却器の性能 - 第2報 散布水の熱傳達率, 冷凍, 第 47 卷, 第 541 号, pp. 1007~1016, 1972.
- [5] 手塚, 山下, 小川, 蒸發冷却器の性能 - 第4報 溫度の影響, 冷凍, 第 51 卷, 第 590 号, pp. 1037~1044, 1973.
- [6] Berkely, F. D., Petroleum Refiner, Vol. 40, No. 1, pp. 165~170, 1961.