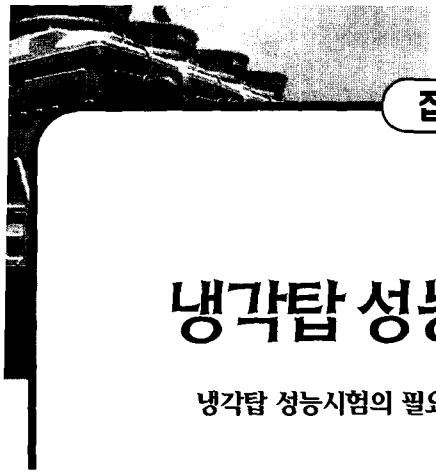


집중기획

냉각탑 성능시험 방법 및 설비구축 현황

냉각탑 성능시험의 필요성, 성능시험 방법, 성능시험설비구축 현황 등을 소개 하고자 한다.

윤 재 호
한국생산기술연구원(jhyun@kitech.re.kr)

개 요

최근 우리나라의 경제 발전에 따른 산업 규모가 총체적으로 증가함으로써 그에 따른 산업용수의 사용량이 크게 증가하고 있다. 산업용수 사용량의 증가는 제한된 수자원의 부족과 방류 산업용수에 의한 수질오염 등의 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 산업용수중 약 70%를 차지하는 각종 냉각수의 재이용이 필요하다. 냉각수는 주로 생산공정 중 제품의 냉각, 생산기기의 냉각, 그리고 공기조화기기의 냉각에 사용되고 있다. 산업체 및 대형건물 등에서는 산업기기 및 냉동공조설비의 열방출용 설비로서 냉각탑을 사용하고 있으며 일반적으로 고열원의 열부하를 대기로 방출하는 최종 장치로서 냉각탑에서의 효율적인 열교환은 전체시스템의 성능을 좌우하게 된다. 현재 국내에서 생산되고 있는 냉각탑은 일정한 생산설비와 규모를 가지는 업체를 제외하고 단순한 이론 및 외국제품의 모방으로 설계 및 제작되고 있는 실정이다. 따라서 고성능 냉각탑을 개발하는데 있어서 대두되는 문제인 열교환 성능의 향상과 설치면적의 축소라는 상반되는 문제를 자체 해결할 수 있는 능력이 부족한 상태이다. 이러한 문제를 해결해 나가는 방법으로는 열교환 형태의 선정 및 공기유로 형태의 개선 등에 대한 연구가 필요하며 이 결과를 토대로 고성능 냉각탑의 설계 및 시공은 물론 성능시험방법 및 성능평가 기술개발 등 냉각탑 열성능 향상을 위한 관련 기술의 개발이 시급한 실정이다.

냉각탑 성능시험 및 설비구축의 필요성

국내에서 냉각탑을 생산하는 국내 기업의 대부분은 미국, 일본 등의 선진국과 기술제휴를 통하여 기술을 도입하였으며, 최근에는 기업 자체의 부설연구소를 두고 냉각탑 설계 및 제작에 대한 자체기술 개발, 생산된 냉각탑에 대한 성능평가, 냉각탑 성능향상의 핵심부품인 충전재(fill), 팬(fan), 분배기(distributor), 비산방지판, 백연방지판, 등의 개발에 노력하고 있다. 그러나 이러한 연구 개발도 일정한 규모 이상의 생산설비와 매출을 가지는 기업을 제외하고 대부분의 기업이 영세하여 국외기업의 냉각탑을 모방설계하여 제품을 생산하고 있는 실정이다. 또한 냉동기, 열원설비, 공조기기 등의 관련제품에 비하여 냉각탑의 판매가격이 낮고 수익성이 취약하여 냉각탑의 성능향상, 고효율, 저소음, 환경친화적인 기술개발은 물론 업체생산제품의 성능평가마저도 정확하게 이루어지지 않는 악순환을 되풀이 하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 냉각탑 관련 산업의 전반적인 문제점을 해결하기 위하여 가장 먼저 공인기관의 냉각탑 성능시험설비구축이 필수적이며, 냉각탑 성능시험설비구축의 중요성을 요약하면 다음과 같다.

- 냉각탑 제조업체의 설계용량에 대한 냉각 능력의 정확한 검증.
  관련 기업에서 설계 및 제작된 냉각탑의 냉각성능이 정확하게 평가되어야 업체에서 냉각탑의 장단점을 인식하고 냉각탑 설계에 반영할 것이다.

- 냉각탑 사용자의 냉각탑에 대한 신뢰성 확보.
  냉각탑이 냉동기, 열원기기 및 산업용으로 사용될 때 냉동기나 생산설비의 안정성을 위하여 정확히 검증된 냉각탑의 사용이 필수적이다. 신뢰할 수 있는 냉각탑의 성능에 대한 데이터를 확보함으로써 냉각탑 생산자와 소비자 사이의 신뢰를 줄 수 있을 것이다.
- 냉각탑 기술개발에 기여.
  냉각탑 성능향상을 위한 핵심부품 즉, 충전재, 팬, 분배기 등과 시스템에 대한 연구개발을 원활하게 추진하기 위해서는 이러한 핵심 부품 및 시스템이 냉각탑 성능에 어떠한 영향을 미치는가를 정확히 평가하여야 할 것이다.
- 냉각탑 관련기술의 국제 경쟁력 강화.
  냉각탑 성능시험설비구축을 통하여 냉각탑 업체의 기술개발 환경이 조성되어 종전의 선진국과 기술제휴를 통한 제품개발 방법을 지양하고 관련 기술의 국제 경쟁력이 향상될 것으로 판단된다.

국내외 냉각탑 성능시험설비구축 현황

국외의 경우

냉각탑 분야에서는 미국이 가장 선두를 달리고 있다. 미국은 오래전부터 냉각탑의 독립적인 성능 확인 프로그램을 개발하여 활용해 왔고 1950년도에 창설된 미국 냉각탑 협회인 CTI(Cooling Tower Institute)를 통해 냉각탑 성능확인, 기술이전 및 신기술 개발에 박차를 가하고 있다. 국가기관인 EPRI에서는 관련 당사자들이 종합적으로 참가하여, VERA-2D(Program for 2-D Analysis of Flow, Heat and Mass Transfer in Evaporative Cooling Towers)라는 냉각탑 내의 유체 유동 및 열전달 현상 해석 프로그램을 개발하여 냉각탑의 성능향상 및 최적설계기술 개발에 사용하고 있다. 또한 냉각탑이 규모가 매우 큰 관계로 실제품의 정확한 성능시험이 곤란하다는 점을 해결하여야만 개발된 최적설계기법의 효용성이 있으므로 이를 해결하기 위하여 현장에 설치된 냉각탑의 성능시험을 통하여 냉각탑의 성능을 해석 평가하는 기술의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

국내의 경우

냉각탑의 설계 및 해석 기술은 반드시 실증시험을 통하여 검증되어야만 함에도 불구하고 냉각탑 업체의 경우 일부 업체만이 간이 시험설비를 갖추고 자사 제품에 대해서 성능시험을 수행하고 있다. 또한 일부 대학에서 냉각탑 내에서의 유동 및 열전달해석 기술 개발을 위한 실험실 규모의 소형 특성시험장치를 이용하는 정도이다. 그러나 냉각탑은 그 규모가 크고 운전조건이 매우 다양하다는 특성 때문에 실험실 규모의 시험장치에서 시험한 결과와 실제품의 성능 사이에 많은 오차가 있으므로, 적정 수준 및 규모의 성능시험설비를 통한 실제품의 성능시험결과가 요구되고 있다.

최근 국가공공기관으로서는 유일하게 한국생산기술연구원에서 400RT 규모의 실제품 냉각탑 성능시험설비를 구축하였다. 본 성능시험설비는 열성능시험, 소음시험, 팬 소비동력시험, 정압시험 등을 수행할 수 있도록 하였다. 더불어 냉각탑의 설계기술 개발을 위해서는 이론적인 해석기술, 설계 및 시험평가기술 등을 축적하여 냉각탑 업체들과 기술개발 및 냉각탑 성능시험 평가에 대하여 공동의 노력을 하고 있다.

냉각탑 성능시험 방법

일반적으로 사용되는 냉각탑 성능시험 방법에 대한 국내, 국가 규격으로는 KS B 6364 규격과 단체규격으로 KRATA B004 규격이 있다. 규격 KS B 6364는 성능시험방법에 대한 규격이며, KRATA B004는 시험방법과 제품규격에 대한 단체규격이다. 또한 전 세계적으로 가장 일반화 되어 널리 사용되고 있는 규격으로는 미국 CTI 규격이 있으며, 이는 성능시험방법(ATC-105)과 인증규정(STD-201) 규격으로 구분되어 있다. 이들 규격 KS B 6364, KRATA B004 및 CTI 규격은 성능시험 조건, 시험용량 및 시험범위 등에 있어 상이점이 있어 공통적으로 적용할 수 있도록 시험규격의 정비가 필요한 실정이다. 일반적인 냉각탑 성능시험 항목 및 시험방법에 대하여 간략하게 기술하면 다음과 같다.

- **일반적 성능시험 항목**
  - 냉각능력시험
  - 비산 시험
  - 소음시험
  - 절연저항시험

- 소비전력, 운전전류시험
- 내전압시험
- 시동전류시험

냉각능력시험

• 특성곡선법(characteristic curve method)

시험자료로부터 수공기비와 냉각탑 특성값의 계산된 값을 나타내는 점은 제조자의 냉각탑 특성곡선에 의해 결정된다. 이 시험조건을 나타내는 점을 지나면서 제조자의 냉각탑 특성곡선에 평행한 곡선을 그린다. 작성된 곡선과 설계 어프로우치 곡선의 교차점으로부터 수공기비 값(시험 수공기비 능력)이 결정된다. 여러 개의 특성곡선이 제출된 경우에는 시험조건에 대해 적용할 수 있는 특성곡선에 맞추어 설계 수공기비를 조정 및 적용하여야 한다.

설계 순환수량을 퍼센트로 나타내는 냉각탑 능력은 이렇게 결정된 시험 수공기비 능력(L/G capability) 값과 설계 수공기비 값을 다음의 식으로 계산함으로써 결정된다.

$$\text{냉각탑능력}(\%) = \frac{\text{시험수공기비능력}}{\text{설계수공기비}} \times 100$$

• 성능곡선법(performance curve method)

냉각탑능력 계산을 위해 제조자의 성능곡선은 시험조건에서 그려져야 한다. 적절한 절차는 시험습구온도를 기준하여 냉각범위, 냉수온도 및 순환수량의 관계를 표시하는 3개의 곡선으로 이루어진 한 조의 곡선을 그린다. 이 한 조의 곡선들로부터 시험 냉각범위를 기준하여 냉수온도와 순환수량 관계를 표시하는 곡선 1개를 그린다. 냉각탑 능력은 이 곡선에서 예상유량(predicted flow rate)과 조정된 시험유량(adjusted flow rate)을 다음 식에 의해 계산함으로써 결정된다.

$$\text{조정된 시험순환수량}(m^3/h) = (\text{시험순환수량}) \times \left(\frac{\text{설계팬동력}}{\text{시험팬동력}}\right)^{1/3} \times \times \left(\frac{\text{시험밀도}}{\text{설계밀도}}\right)^{1/3}$$

$$\text{냉각탑능력}(\%) = \left(\frac{\text{조정된 시험순환수량}}{\text{예상순환수량}}\right) \times 100$$

비산시험

냉각탑 시험운전조건에서 냉각탑 입구수온과 입구공기 습구온도의 차이가 1℃ 이하로 된 후 30분마다 수량(순환수량), 감소수량, 펌프 누수량, 입구수온, 입구공기 건구온도와 입구공기 습구온도를 4회 측정값의 산술평균치를 사용하여 다음식으로 비산손실율을 산출한다.

$$\text{비산손실율}(\%) = \frac{(\text{감소수량} - \text{펌프누수량})}{\text{순환수량}} \times 100$$

소음시험

시험장소는 될 수 있는 대로 평탄하고 바닥면 이외로부터의 반사음 영향이 충분히 적은 장소로서, 측정대상의 음과 암소음의 차이가 10dB(A) 이상인 장소로 한다. 위에서 지정한 조건과 위치에서 KS A 0701에 따라 측정을 하며 소음도의 크기에 관계없이 소음계의 같은 특성의 완(slow)과 주파수 보정 회로의 A특성으로서 측정한다. 그리고 참고로서 C특성으로서 측정하는 것이 바람직하며 측정치에는 사용된 특성명을 부기한다. 소음의 주파수 분석이 필요할 때는 음압레벨 측정기와 옥타브 밴드필터 또는 1/3옥타브 밴드필터로서 측정한다. 그리고 음압도의 측정기는 지시소음계를 사용할 때는 주파수 보정 회로의 C특성으로 측정한다.

절연저항 시험방법

절연저항 시험은 냉각능력 시험의 직전과 직후에 500V의 절연 저항계로서 충전부와 접지할 염려가 있는 비충전 금속부 사이의 절연 저항을 측정한다.

소비전력 · 운전 전류 시험방법

소비전력 · 운전전류 시험은 냉각능력시험을 할 때, 시험용 기기가 소비하는 전력과 운전전류를 측정한다. 또한, 측정치로부터 운전 역률을 산출한다.

내전압 시험방법

내전압 시험은 절연 저항시험을 한 후에 행한다. 시험은 정격 전압이 110V의 시험용 기기는 1000V, 정격 전압이 220V인 시험용 기기는 1500V로서, 주파수 60Hz의 정현파에 가까운 전압을 충전부와 비충전 금속부 사이에 연속해서 1분간 가하며, 겸용인 경우

는 110V 및 220V에 대하여 각각 시험한다.

그리고, 이와 동일 설계의 제품을 여러 개 시험할 경우 이상이 생기지 않을 때는 시험 전압의 120%의 전압을 1초간 가해서 내전압 시험을 대신할 수 있다.

시동전류 시험방법

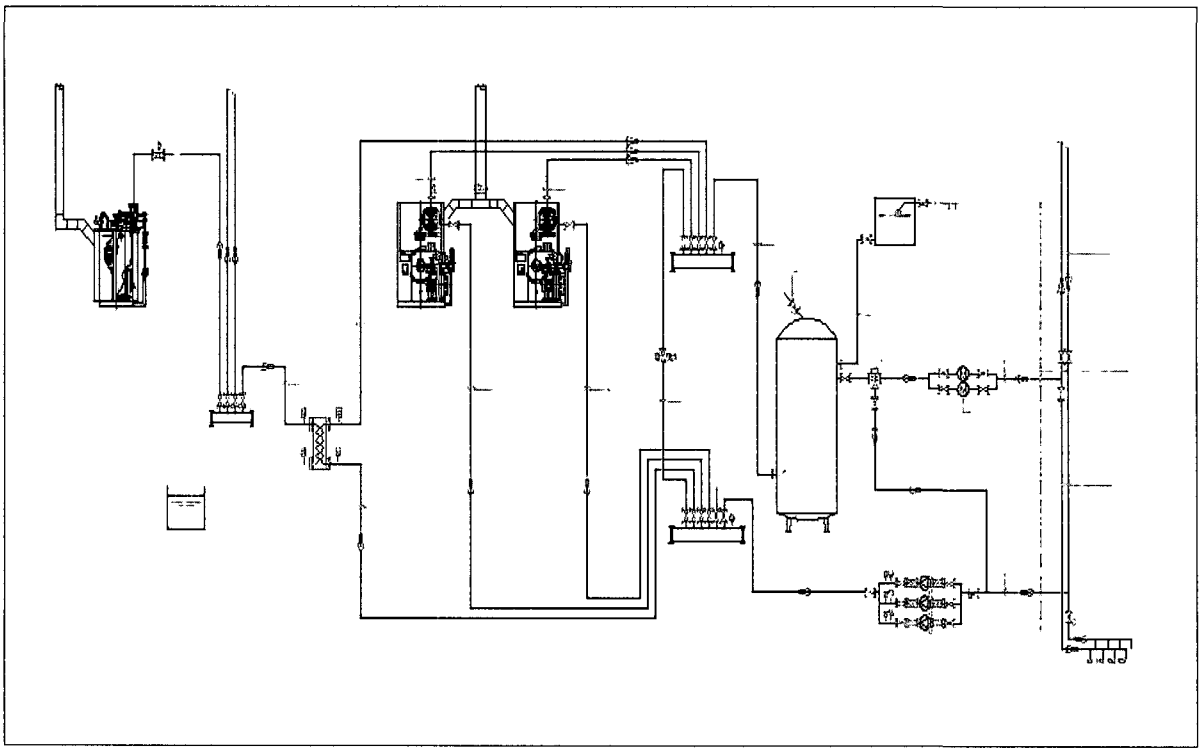
시동 전류 시험은 전동기의 회전자를 구속한 상태에서 정격 전압 및 정격 주파수를 가하였을 때의 전류를 측정한다. 다만, 전동기의 회전자를 구속할 수 없을 때는 전동기의 회전자를 정지시킨 상태로 정격 주파수의 전압을 가하고, 소비전력 · 운전 전류 시험에서 측정한 운전 전류에 가까운 전류를 통하여 전압을 측정하여 시동 전류를 계산한다.

냉각탑 성능시험설비 구축현황

냉각탑 성능시험 설비의 설계를 위하여 국내 냉각탑 생산업체를 대상으로 성능시험장치의 용량 · 시험 항목 등에 대한 사전 설문조사를 수행하였으며, 이 설문조사 결과를 토대로 시험장치의 용량, 시험항목 등의 기본 사양을 결정하고 이를 기준으로 종합 성능시험 시스템을 설계 및 제작하였다(**표 1**).

<표 1> 시험설비 사양

	시험항목	사 양
1	냉각능력시험	용량 : max. 1,560,000kcal/hr 수온 : 상온 ~ 70℃ 수량 : max. 320 m³/hr
2	비산 손실시험	KS B 6364 시험방법
3	소음시험	5 ~ 140dB
4	소비전력 · 운전전류시험	전압 : 15 ~ 600 V 전류 : 0.5 ~ 20A(2,000A)
5	절연저항시험	100 ~ 1,000VDC 0 ~ 9.9GΩ
6	내전압시험	0 ~ 5KVAC/DC
7	시동전류시험	0.5 ~ 20A(2,000A)



[그림 1] 냉각탑 성능시험장치 개념도

시험설비

냉각탑에 온수를 공급해 주기 위한 장치로 **그림 1**에 기본 개념도를 나타내었다. **그림**에서 보는 바와 같이 냉각수에서 순환되어 돌아온 냉수의 온도를 상승시키기 위한 가열원, 온수탱크, 온수를 냉각탑으로 순환시켜 주기 위한 펌프, 냉각탑에 공급되는 온수의 온도 및 유량을 조절해 주기 위한 조절장치 및 관련 배관으로 구성되어 있다.

• 가열원 [그림 2]

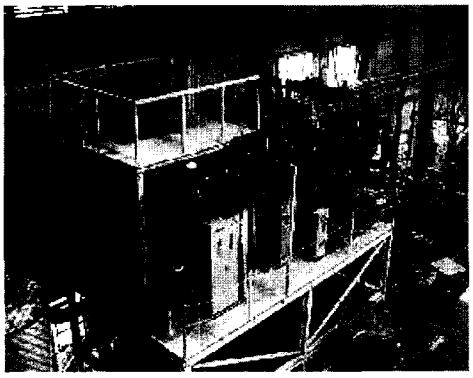
현재 구축된 냉각탑시험설비에서는 1.5ton/hr의 스팀보일러와, 운전 및 유지관리가 간편한 정격용량 열출력 1,000,000kcal/hr 진공온수보일러를 설치하여 250RT 이하의 냉각탑 성능시험에는 스팀보일러 한 대를 사용하고 그 이상의 냉각탑의 경우 두 대의 보일러를 사용한다.

- 온수탱크[그림 3]

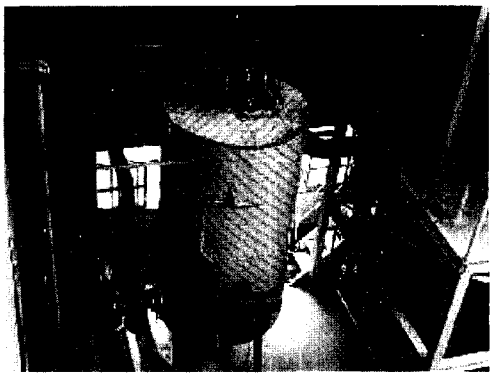
보일러에서 가열된 물은 일정한 온도로 유출되지 않기 때문에 온수탱크에서 충분히 혼합되도록 10톤 용량의 탱크를 설치하여, 일정한 온도로 냉각탑에 공급되도록 하였다.

- 펌프[그림 4]

펌프는 용량 3.0m^3/min(양정 : 30m, 접속구경 : 150A×125A, 모터 : 4P 1750rpm) 2대와 6.0 m^3/min(양정 : 29m, 접속구경 : 200A×150A, 모터 : 4P 1750rpm, 60 HP) 1대를 보일러, 온수탱크, 냉각탑 사이의 냉각수 순환하도록 설치하였으며, 냉각탑 용량에 따라 유량에 따른 펌프의 대수 제어로 순환수량 조절하도록 하였다. 또한 바이패스를 두어 적은 유량의 냉각탑 성능시험을 수행할 수 있도록 하였다.

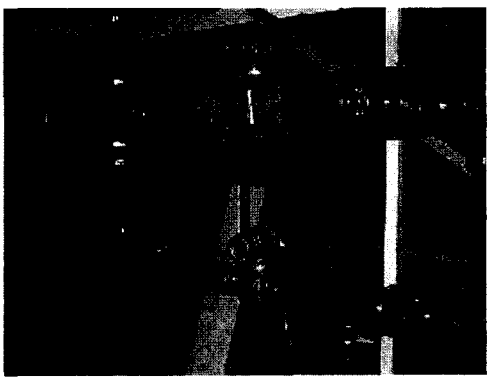


[그림 2] 보일러 및 주요배관



[그림 3] 온수탱크

[그림 4] 펌프



[사진 4] 마그네틱 유량계

• 관련 배관

본 냉각탑 성능시험설비에서 모든 배관 및 연결기기들은 녹이 슬지 않도록 스테인레스 재질을 사용 하였다. 배관 중간 중간에 온도 · 압력 측정을 위한 센서 설치용 포트를 설치하였으며, 펌프 입구에는 스트레이너를 설치하여 냉각탑에서 유입되어 들어올 수도 있는 이물질을 제거할 수 있도록 하였으며, 진동의 영향을 받을 수 있는 곳에는 플랙셔블 연결부(flexible joint)를 설치하였다. 또한 펌프순환이 중지되었을 때 역류를 방지하기 위하여 체크밸브와 컨트롤 밸브를 설치하여 순환수의 역류를 방지하였다. 또한 향후 충전재 특성시험장치에의 연결 및 용량 증대에 손쉽게 대처하기 위하여 예비 연결구를 설치하였다. 모든 배관은 주변 공기와의 열전달에 의한 배관내 물의 온도변화를 최소화하기 위하여 50mm 두께로 단열처리 하였다.

측정장치

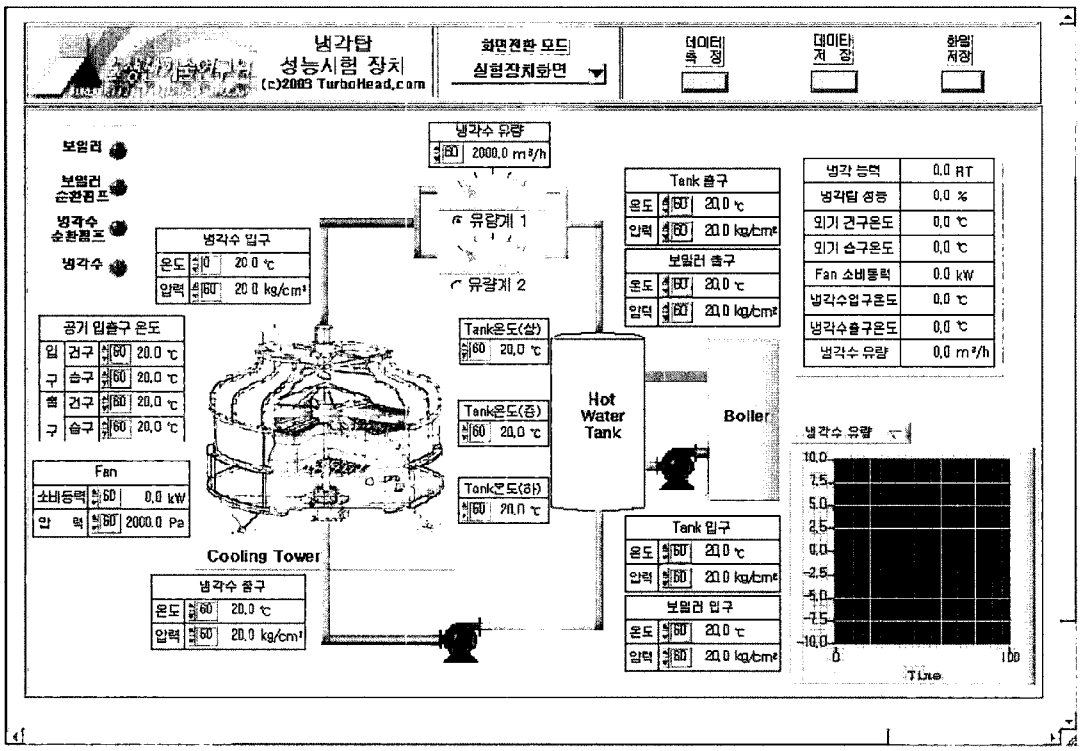
냉각탑 성능시험에는 기본적으로 물의 온도, 압력, 유량측정 및 공기의 풍향, 풍속, 온도, 압력, 습도 및 유량측정 등이 요구된다. 또한 냉각능력 이외의 성능을 측정하기 위하여 소음, 전기량 등의 측정 설비를 구축하였으며, 모든 측정 데이터는 컴퓨터로 저장하였다.

• **온도측정 센서**
- 형식 : Pt 100Ω RTD, T-type thermocouple
- 정밀도 : ±0.1℃(검교정)

• **온도 검교정 장치**
- 정밀항온조 : 안정도 ±0.2℃
- 정밀 온도계 : Pt 100ΩRTD, ±0.02℃

• **압력측정 센서**
- 형식 : strain gage type
- 측정범위 : 0 ~ 5 kgf/cm^2
- 정밀도 : ±0.2 %

• **물유량 측정 센서[그림 5]**
- 형식 : magnetic flow meter
- 측정범위 : 0 ~ 19 m^3/min×1 set



[그림 6] 냉각탑 성능시험 자동계산 프로그램

0 ~ 4.7 m^3/min×1 set
0 ~ 0.75 m^3/min×1 set
- 정밀도 : ±1 %

• **소음 측정장치**
- 측정범위 : 5 ~ 140 dB
- Band : octave & 1/3 octave band

• **공기유량측정**

공기유량 측정은 열선식 풍속계를 사용하여 동일면적분활법에 의해 풍속을 측정하고 이를 이용하여 공기유량을 계산한다.

데이터 분석 시스템

기존에는 냉각탑 성능시험장치로부터 측정된 데이터를 취득한 후 별도로 여러 가지 계산을 통하여 냉각탑 성능을 평가하였다. 그러나 본 종합성능시험 시스템은 **그림 3**과 같이 냉각탑 성능시험 자동화 시스템을 구축함으로서 냉각탑 성능시험 및 평가 결과를 현장에서 직접 확인할 수 있도록 하였다.

냉각탑 성능시험 자동화 시스템은
- 건, 습구 온도 측정에 의한 대기온도, 습도계산
- 대기압 측정과 계산된 대기온도, 습도에 의한 공기밀도계산
- 온수 입출구 온도 측정과 물유량 측정으로부터 열교환량 계산
- 냉각탑의 성능 계산
- 실시간 측정온도, 유량, 냉각탑 냉각능력, 냉각탑 성능 및 효율 그래프 도시
- 성능시험조건 입력 : 냉각탑 사양, 시험조건 등 입력
- 시험결과 파일 및 그래프 출력

등의 기능을 가진 소프트웨어로 구성되어 있다.

맺음말

본 원고에서는 산업기기 및 냉동공조설비의 핵심기기인 냉각탑의 성능시험의 필요성, 성능시험방법 및 성능시험구축 현황 등에 대한 개요를 설명하였다. 향후 냉각탑의 고효율화, 저소음화 및 환경친화적 제품개발의 필요성이 점점 더 요구될 것으로 판단되며 이러한 점을 감안할 때 냉각탑 종합성능시험 설비구축의 중요성은 그 어느 때보다도 크다고 할 수 있다. 또한 본 설비의 효율적 활용과 냉각탑에 대한 산학연의 체계적인 연구개발을 통하여 냉각탑 제조업체는 사용자가 신뢰할 수 있는 설계용량의 냉각탑을 제공하고 궁극적으로는 냉각탑 관련기술의 국제 경쟁력 향상에 이바지할 수 있기를 기대한다.