

## 하나로 2차 냉각탑의 냉각능력 평가

박용철\* · 우종섭\* · 조영갑\* · 류정수\*

### Evaluation for the Cooling Capability of Secondary Cooling Tower in HANARO

Yong-Chul Park, Jong-Sup Wu, Yeong-Gurb Cho, Jeong-Soo Ryu\*

*Key Words:* Cooling Tower (냉각탑), Cooling Capability (냉각능력)

#### ABSTRACTOR

The heat produced by the fission in the fuel of HANARO, 30 MW research reactor, is transferred from the primary cooling water to the secondary cooling water through heat exchangers, and the heat absorbed by the secondary cooling water is released into the atmosphere by the 33 MW cooling tower which is a mechanical induced draft and counter flow type. If the outlet temperature of cooling tower exceeds 33 °C due to the loss of the cooling tower performance under reactor operation above 50 % of the full power, the reactor power should be reduced to half of the full power for safe operation. Therefore, the cooling capability of cooling tower should be maintained for the reactor to be normally operated. To predict the capability of cooling tower for full power reactor operation of 30 MW, the performance test of cooling tower was done at the reactor present power of 24 MW and the capability was respectively evaluated by characteristics and performance curves methods in accordance with the Code of Cooling Tower Institute of U.S.A. to confirm the reliability of evaluation. As a result, it was confirmed, through the results of each evaluation, that the cooling capability of cooling tower meets the design required heat load. Also, the equations of the performance and the characteristics curves of the cooling tower, based on the collected data during this performance test, was obtained for developing the calculation program to predict the cooling capability during reactor operation.

#### 1. 개 요

30 MW 연구용 원자로인 하나로에서 핵분열에 의해 발생된 열은 1차 냉각수에 흡수되고 열교환기를 통하여 2차 냉각수에 열전달되며, 2차 냉각수에 흡수된 열은 33 MW의 유인통풍 향류식 (induced draft counter flow type) 냉각탑에서 냉각된다. 원자로가 전출력의 50 % 이상으로 운전하고 있는 경우 냉각탑 성능이 상

실되어 냉각탑 출구온도가 33 °C를 상회하면 안전운전을 위해 원자로 출력을 전출력의 반으로 줄여서 운전하여야 하므로 원자로가 정상적으로 운전되기 위해서는 냉각탑의 냉각능력이 유지되어야 한다<sup>(1)</sup>. 전출력 운전을 대비하여 원자로가 24 MW로 운전중일 때 미국 냉각탑 협회의 시험규격<sup>(2)</sup>에 따라 냉각탑 입출구의 냉각수 온도와 순환유량, 냉각팬의 전류와 전압 및 냉각탑 인입공기의 습구온도를 각각 측정하여 특성곡선 방식으로 냉각탑 성능을 평가하고, 이 평가의 신뢰성을 확인하기 위해 성능곡선 방식으로도 평가하여 비교해

\* 한국원자력연구소

보았다. 두 방법 모두 유사한 결과를 보였으며 설계 요구열량을 상회하는 능력을 보여 하나로 냉각탑은 충분한 냉각능력을 가지고 있는 것으로 평가하였다. 그리고 원자로 운전 중에 냉각능력을 예측하기 위한 계산 프로그램을 개발하기 위해 성능시험 기간 중에 수집한 자료를 바탕으로 냉각탑 특성곡선과 성능곡선의 관계식을 구하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 냉각탑 특성

하나로 냉각탑은 상부에 설치된 송풍기로 냉각탑 하부 양편에 있는 개구부를 통해 외부공기를 흡입하여 상부로 송출하고, 냉각펌프로 열을 흡수한 냉각수를 냉각탑 상부의 분배기로 흡입하여 고루 분배된 상태에서 낙하시키면 찬 공기와 교차하면서 열전달된다<sup>(3)</sup>. 이러한 관계를 그림 1에 나타내었으며 냉각수가 잃은 열량은 찬 공기가 흡수한 열량과 같으므로 열 평형 방정식을 세우면 식 (1)과 같다.

$$L C_p dT = Ka(h_w - h_a)dV \quad (1)$$

여기서,  $L$ ,  $C_p$ ,  $dT$  및  $K$ 는 각각 단위시간당의 냉각수 순환량, 물의 비열, 냉각수의 온도 변화량 및 냉각탑 내에서 물의 표면적에서 일어나는 전도 열전달 계수의 평균값이며  $a$ ,  $h_w$ ,  $h_a$ , 및  $V$ 는 각각 상수, 송출되는 포화공기의 물의 온도에서의 엔탈피, 흡입되는 공기의 습구온도에서의 엔탈피 및 냉각탑 내부에서 냉각에 사용되는 공기의 체적,  $ft^3$ 이다. 냉각탑이 정상적으로 가동하고 있는 경우 물의 비열, 냉각탑 내에서

냉각에 사용되는 공기체적 및 냉각탑 내에서 물의 표면적에서 일어나는 전도열전달계수의 평균값은 일정하게 유지되므로 식 (1)을  $KaV/L$ 에 대해 정리하고 냉각수의 냉각탑 입구의 온수온도 ( $T_{hw}$ )와 출구의 냉수온도 ( $T_{cw}$ )에 대해 적분하면 식 (2)와 같으며 이를 냉각탑 특성값이라 한다.

$$KaV/L = \int_{T_{hw}}^{T_{cw}} \frac{dT}{h_w - h_a} \quad (2)$$

이 특성값의 적분해는 냉각수온도와 습구온도를 4등분하여 식 (3)과 같이 Tchebycheff method의 수치계산에 의해 구할 수 있다<sup>(4)</sup>.

$$\begin{aligned} KaV/L &= \int_{T_{hw}}^{T_{cw}} \frac{dT}{h_w - h_a} \\ &= \frac{T_{hw} - T_{cw}}{4} \left( \frac{1}{dh_1} + \frac{1}{dh_2} + \frac{1}{dh_3} + \frac{1}{dh_4} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $dh_1$ ,  $dh_2$ ,  $dh_3$  및  $dh_4$ 는 등분된 구간온도  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  및  $T_4$ 에서 물과 공기의 엔탈피 변화량 ( $h_w - h_a$ )을 의미하며 등분된 온도구간은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} T_1 &= T_{cw} + 0.1(T_{hw} - T_{cw}) \\ T_2 &= T_{cw} + 0.4(T_{hw} - T_{cw}) \\ T_3 &= T_{hw} - 0.4(T_{hw} - T_{cw}) \\ T_4 &= T_{hw} - 0.1(T_{hw} - T_{cw}) \end{aligned}$$

그리고 냉각탑 특성값은 낙하하는 냉각수를 열전달 효율을 좋게 하기 위해 작은 물방울로 분산시키는 내장된 필 (fill)의 특성을 실험하여 실험식으로도 표시할 수 있으며 하나로 냉각탑 특성값은 식 (4)와 같이 냉각수량 ( $L$ )과 찬 공기량 ( $G$ )의 비인  $L/G$ 에 대해 지수함수식으로 표시된다.

$$KaV/L = 2.4148(L/G)^{-0.8} \quad (4)$$

### 2.2 냉각능력 평가방법

냉각탑의 냉각능력을 평가하는 방법은 제작자의 실제 시험에 의한 특성곡선이나 성능곡선에 의한 것이 있다. 특성곡선 방식은 냉각 특성값이  $L/G$ 에 지수함수로 변하므로  $L/G$ 의 측정값과 설계값의 비율로 평가되며 냉

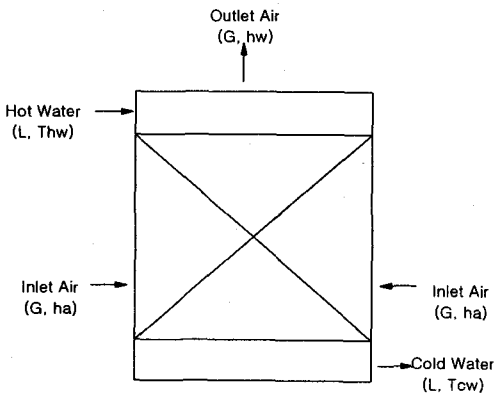


Fig. 1 Cooling Concept of Cooling Tower

각탑의 냉각팬 설계동력 ( $HP_d$ )과 냉각수 설계유량 ( $F_d$ )이 정해지면 실험에 의해 냉각수 순환유량 ( $F_t$ )과 냉각팬의 입력동력 ( $HP_t$ )을 측정하여 식 (5)와 같이 상사법칙으로 L/G 측정값,  $(L/G)_t$ 을 구할 수 있다.

$$(L/G)_t = \left( \frac{F_t}{F_d} \right) \left( \frac{HP_d}{HP_t} \right)^{\frac{1}{3}} (L/G)_d \quad (5)$$

측정값,  $(L/G)_t$ 와  $(KaV/L)_t$  값이 정해지면 설계 냉각범위에 상응하는 측정값을 구하기 위해 냉각탑 특성곡선에 의해 설계 냉각범위 (cooling range, R)에 해당하는 교차점에서의 L/G 값, 즉,  $(L/G)_i$ 를 구하여 식 (6)과 같이 백분율로 표시하면 특성곡선 방식에 의한 냉각능력 (cooling tower capability,  $Q_c$ )을 평가할 수 있다.

$$Q_c(\%) = \frac{(L/G)_i}{(L/G)_d} \times 100 \quad (6)$$

한편, 성능곡선 방식은 냉각수 순환유량의 측정값과 설계값의 비율로 표시되며 냉각팬의 입력동력과 냉각수 순환유량이 측정되면 식 (7)과 같이 상사법칙으로 냉각팬이 설계동력으로 가동될 때의 조정유량 ( $F_{at}$ )을 계산할 수 있다.

$$F_{at} = F_t \left( \frac{HP_d}{HP_t} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

그리고 냉각탑 성능곡선을 이용하여 설계 냉각온도에 상응하는 예상유량 ( $F_p$ )을 구하고 식 (8)과 같이 백분율로 표시하면 성능곡선에 의한 냉각능력 ( $Q_p$ )을 평가할 수 있다.

$$Q_p(\%) = \frac{F_{at}}{F_p} \times 100 \quad (8)$$

### 3. 시험방법

#### 3.1 시험조건

냉각탑 성능은 운전조건이 설계조건과 유사할수록 정확하게 예측할 수 있고, 운전조건의 변화가 일정한 범위를 유지할수록 실제에 가까운 운전조건을 찾을 수

있어 그 결과도 정확해지므로 관련 규격<sup>10)</sup>에서 시험조건과 균일성을 지정하고 있으며 하나로와 같이 냉각팬에 의한 강제 통풍방식인 경우 시험조건은 표 1과 같이 정해진다. 특히, 성능곡선 방식의 경우 습구온도와 냉각범위는 설계값에 가까울수록 정확하게 냉각능력을 예측할 수 있지만 이 범위를 벗어나면 제작자의 성능곡선 범위를 벗어나게 된다.

Table 1 Test Condition and Contingency

Description	Design Value	Operating Range of Design Value	Variation of Operating Condition
Wet Bulb Temperature	28 °C	± 5 °C	≤ 1 °C/h
Cooling Range	8 °C	± 20 %	≤ 5 %
Circulating Flow	1000 kg/s	± 10 %	≤ 5 %
Heat Load	-	-	≤ 5 %

#### 3.2 시험장치

냉각탑 성능평가에 필요한 측정사항은 냉각수의 순환유량, 온수 및 냉수온도, 습구온도 및 냉각팬의 동력을 측정하기 위한 전압과 전류이며 각 측정장비는 그림 2와 같이 설치하였다. 냉각수 순환유량은 유량계가 ±1.25 %이내의 정확도를 유지하여야 하고, 총유량을 측정할 수 있어야 하므로 냉각펌프의 송출 공동관에 설치된 유량계 (711-FE-009)로 측정하였다. 냉각수 온도는 저항 온도계나 수은 온도계로 측정하여야 하며 온도계의 눈금은 0.1 °C (0.2 °F)이하이어야 하고, 온도 감지기가 물에 완전히 잠기고 잘 혼합된 위치에서 측정하여야 하므로 온수온도는 냉각탑 우회관에 설치된 온도계 (711-TI-169)로 측정하고, 냉수온도는 공동 송출관에 설치된 온도계(711-TE-008)로 측정하였다.

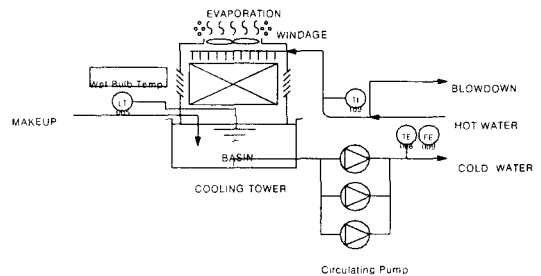


Fig. 2 Arrangement of Measuring Equipment

냉각탑에 강제 인입되는 찬 공기의 실제 습구온도를 구하기 위해 흡입구로부터 1.2 m 이내에 설치하도록 제한하고 있으므로 냉각탑 하부의 개구부 중앙에 아스만 (Asman) 습구 온도계<sup>(5)</sup>를 설치하여 측정하였다. 그리고, 냉각팬 모터는 3상이므로 각 모터의 입력동력을 측정하기 위해 MCC에서 각 상에 대하여 전압과 전류를 측정하였다.

### 3.3 시험방법

대기변화를 평균화하고, 측정오차를 최소화하기 위해 운전 중에 시간당 측정회수를 표 2와 같이 규정<sup>(2)</sup>하고 있으며 그 평균치를 적용하여야 한다. 이에 따라 냉각수 온도 및 습구온도는 각각 5분 단위로 12회를 측정하였으며 매번 측정시 10초 간격으로 세 번 읽어 그 평균을 적용하고 시험시간에 구한 각 평균치를 다시 평균을 구하여 적용하였다. 냉각팬의 모터 입력동력은 최소한의 냉각능력 변화를 확인하기 위해 순환유량과 마찬가지로 20분 간격으로 측정하고, 식 (9)와 같이 동력계수 (power factor)를 고려하였다.

$$HP = \sqrt{3} \times V \times A \times P_f \div 750 \quad (9)$$

여기서, HP, V, A 및  $P_f$ 는 각각 입력동력 (마력), 전압 (Volt), 전류 (Ampere) 및 동력계수이며 750은 Watt를 마력으로 환산하기 위한 상수이다.

Table 2 Testing Frequency

Description	Minimum number	Period, min
Wet Bulb Temp., °C	12	5
Cold Water Temp., °C	12	5
Hot Water Temp., °C	12	5
Circulating water flow, kg/s	3	20
Fan driver power input, Hp	3	20

Table 3 Power Factor/Efficiency of Fan Motor

Cooling Fan	Power Factor	Efficiency
F-01	0.8836	0.9145
F-02	0.8834	0.9141
F-03	0.8834	0.9143
F-04	0.8835	0.9142

냉각탑성능을 축동력을 기준으로 보증하는 경우에는 모터효율 ( $E$ )을 고려하여야 하며 각 냉각팬의 동력계수와 효율을 표 3에 기술하였다.

## 4. 시험결과 및 고찰

### 4.1 시험조건과 균일성 검토

냉각탑 성능실험은 원자료가 24 MW로 가동 중일 때 1 시간 동안 실시하여 측정값의 변화를 그림 3에 도시하였으며 냉각범위는 작은 값이므로 다른 값들과 비교하기 위해 3배로 늘리고, 냉각수 순환유량은 큰 값이므로 10배로 축소하여 나타내었다. 이들 측정값의 평균과 최대변화량을 표 4에 정리하였으며 기준값의 설계값 및 변화율에 표시된 백분율은 설계참값에 대한

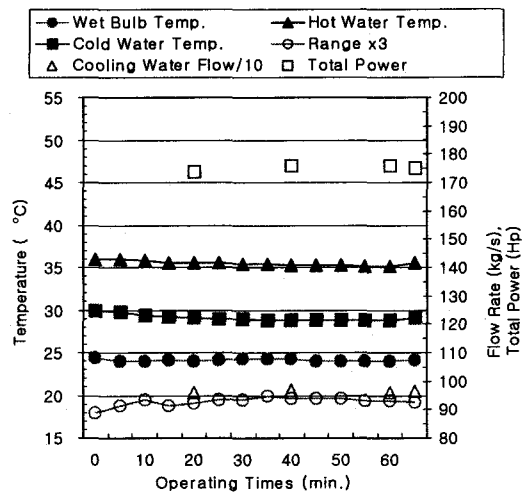


Fig. 3 Measuring Data for Cooling Tower

Table 4 Average Measuring Data

Description	Criteria		Test Result	
	Design	Variation	Test	Variation
Water Flow, kg/s	1000 ± 1 0 %	5 % below	960	1 %
Hot Water Temp., °C	40 ± 5	-	35.5	-
Cold Water Temp., °C	32 ± 5	-	29.1	-
Cooling Range, °C	8 ± 5 %	5 % below	6.4	4 %
Wet Bulb Temp., °C	28 ± 5	1 °C/h below	24.1	0.4 °C/h
Fan Motor Power, Hp	200	-	175	-

비율이고 시험값의 변화율에 표시된 백분율은 측정값에 대한 것이다. 각 측정값은 표 1의 시험조건과 균일성을 모두 만족하였다.

#### 4.2 냉각탑 특성곡선에 의한 냉각능력 평가

냉각탑 설계시 L/G의 값은 1.6이므로 L/G의 시험값과 KaV/L의 설계값 및 측정값은 표 4의 평균값을 적용하여 식 (5), (4) 및 (3)에 의해 각각 구하였으며 각각 1.61, 1.60 및 1.49이다. 그리고 계산된 (L/G)<sub>t</sub>를 설계조건으로 조정하기 위해 그림 4의 냉각탑 특성곡선을 이용하였다. (L/G)<sub>t</sub>와 (KaV/L)<sub>t</sub>를 특성곡선 상에 도시하여 교차점을 구하고, 식 (4)에 의해 구해진 사선으로 표시된 설계선도와 평행선을 그었을 때 설계점근온도 4 °C (7.12 °F)와 교차점이 생긴다. 이 교차점의 L/G 값이 설계조건으로 조정된 값이며 1.505로 계산되었고, 이 값을 이용하여 식 (6)으로 계산된 냉각능력은 94.06 %이며 이는 하나로 냉각탑이 10 % 여유 있게 설계되어 있어 설계요구열량에 대해 103.5 %의 냉각능력을 가지므로 요구성능을 만족함을 의미한다.

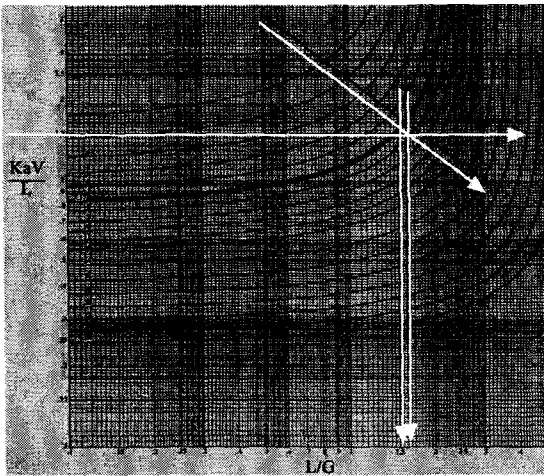


Fig. 4 Characteristics Curve

#### 4.3 성능곡선에 의한 냉각탑 성능평가

시험조건 하에서 측정된 표 4의 냉각수 순환유량 (960 kg/s)을 식 (7)에 의해 냉각팬의 설계입력동력으로 조정된 유량은 1004 kg/s로 계산되었다. 그리고 설계조건하의 냉각온도로 냉각할 수 있는 유량은 제작자의 성능곡선(6)을 이용하였다. 제작자의 성능곡선은 설계유량의 90 %, 100 % 및 110 %에 대한 것이며 각 성능곡선은 습구온도에 대하여 냉각범위의 120 %, 100 % 및 80 %에 해당하는 냉각온도를 도시하고 있다. 각

성능곡선의 시험 습구온도 (24.1 °C)에서 수직선을 그으면 각 순환유량과 설계 냉각범위 별로 3개씩 9개의 교점이 구해지고, 이 교점의 y좌표가 예상 냉각온도이며 이를 냉각범위별로 나타내면 그림 5와 같이 예상 냉각온도선도가 구해진다. 이 선도에서 시험 냉각범위 (6.4 °C)에서 수직선을 그으면 냉각유량선과 교점이 생기며 각 교점의 y좌표가 냉각온도이므로 그림 6과 같이 예상유량 선도가 구해진다. 이 선도에서 시험냉각온도 (29.1 °C)에서 수직선을 그으면 예상유량 선도와 교점이 생기고, 이 교점의 y좌표가 예상유량이며 1063 kg/s이다. 이를 냉각탑 성능계산식 식 (8)을 적용하면 94.4 %로 계산되며 이는 설계요구열량에 대해 103.8 %의 냉각능력을 나타내었다.

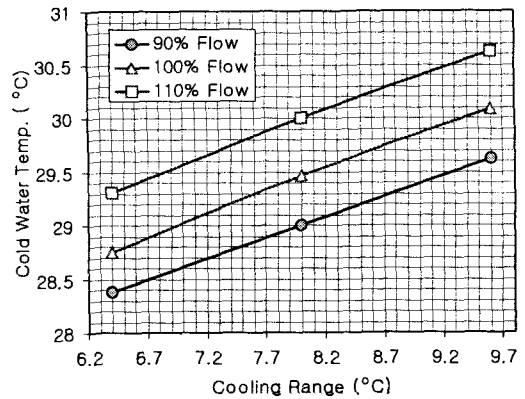


Fig. 5 Predicted Cold Water Temperature Curve

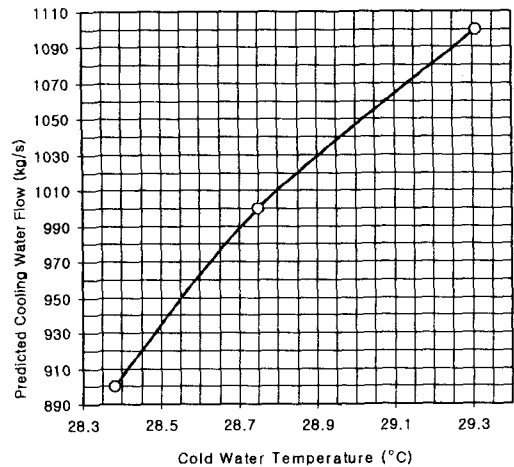


Fig. 6 Predicted Circulating Flow Rate

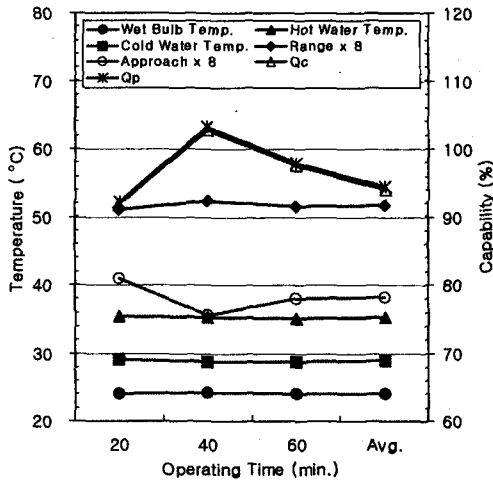


Fig. 7 Variation of Cooling Capability

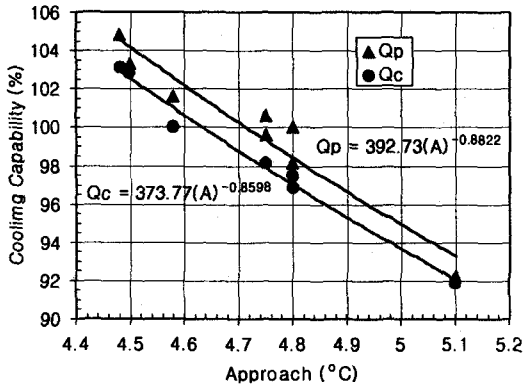


Fig. 8 Variation of Cooling Capability

#### 4.4 냉각탑의 냉각능력의 변화

성능시험 기간 중에 수집된 자료를 근거하여 각 측정점에 대하여 동일한 방식으로 냉각능력을 계산하여 그림 7에 도시하였으며 냉각범위와 냉각접근온도 (approach, A)는 작은 값이므로 다른 값과 비교하기 위해 8배한 값으로 나타내었다. 성능곡선으로 구한 냉각능력( $Q_p$ )은 특성곡선으로 구한 것 ( $Q_c$ )보다 약 0.3 % 높게 지시하였지만 동일한 경향을 보였다. 가동 후 40분이 경과하였을 때 냉각능력이 가장 높았고 냉각접근온도는 가장 낮았으며 이는 냉각접근온도의 의미가 온수온도와 습구온도의 차로 표시되므로 이 차이가 적을수록 냉각탑은 온수를 대기온도에 가깝게 냉각할 수 있기 때문이다. 이러한 현상을 구체화하기 위해 냉각

능력의 변화를 그림 8에 도시하였으며 냉각능력은 냉각접근온도에 대해 아래식과 같이 지수함수로 표시되었다. 이 함수식으로 계산한 냉각능력은 특성곡선방식과 성능곡선방식에 계산된 값과 비교하여 각각 평균 0.3 % (최대 1 %, 최소 0.2 %)와 0.8 % (최대 1.6 %, 최소 0.2 %)의 오차를 나타내어 측정값과 잘 일치하므로 간편하게 냉각능력을 계산할 수 있다.

$$\text{특성곡선: } Q_c = 373.77(A)^{-0.8598}$$

$$\text{성능곡선: } Q_p = 392.73(A)^{-0.8822}$$

#### 5. 결론

냉각능력을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하나로 냉각탑의 냉각능력은 특성곡선 방식으로 평가하였을 때 94.06 %를 나타내었고, 요구열량에 대해 103.5 %의 냉각능력을 나타내어 냉각능력을 만족함을 확인하였다.
- 2) 성능곡선 방식으로 평가하였을 때 특성곡선 방식과 비교하여 약 0.3 % 높게 나타내었으며 동일한 경향을 나타내어 특성곡선 방식으로 계산한 냉각능력을 검증할 수 있었다.
- 3) 냉각접근온도로 냉각능력을 계산하는 관계식을 구하였으며 이 관계식을 이용하면 측정치와 잘 일치하므로 운전 중에 냉각능력을 간편하게 계산할 수 있다.

#### 참고 문헌

- (1) "하나로 안전성 분석 보고서", KAERI/TR-710/96, 한국원자력 연구소.
- (2) "Acceptance Test Code for Water-Cooling Towers, CTI Code ATC-105, Jan. 1975.
- (3) "Design Manual of Secondary Cooling System", KM-711-DM-P01, KAERI, July. 1992.
- (4) "Cooling Tower Manual-Basic Concepts of Cooling Tower Operation", CTI, 1977. 1.
- (5) SATO, "User Manual of Asman Psychrometer-Model 7400/7440".
- (6) 박용철, "냉각탑 성능시험 절차서", HANTAP-05-OD-ROP-PI-34, KAERI, 2000. 7.