

냉방설비 성능개선 및 에너지 절약을 위한 응결수 활용성 분석

An analysis on the utility of congealing water to improve efficiency of the air cooling equipment and save energy

박 근 수* 박 영 호** 유 정 범***
Park, Keun Soo Park, Young Ho Yu, Jeong Beom

ABSTRACT

Seoul Metro has operated the air cooling equipment established in a machine room of a station building to improve our services focused on our customers who use Seoul Metro during the summer season. However, a new set of problems has arisen with the cooling tower to support a heat exchange of cooling water. One of them is loss of efficiency in the air conditioner. The leading cause of this problem is that we use an underground type of the cooling tower. As the machine room of a station building is located in the underground of inner city because of the nature of the subway, it is difficult to establish the cooling tower on the ground. The underground structure of the No. 1~4 subway line is unsuitable for the location requirements of the underground type of the one because it has a limited space to set up the air cooling equipment, for example, the cooling tower and a ventilating opening.

As a result of such an unfavorable condition, the cooling tower doesn't work efficiently and the warmth of cooling water because of insufficiency of a heat exchange and a refrigerator's technical obstacle such as a high-temperature and a high-pressure has arisen. Accordingly, the efficiency of the air conditioning is getting lower and lower. Another problem is too wasteful with water. Each station uses the water over 30 tons every day with waterworks to replenish the cooling tower such as a evaporation, a scattering and a distribution of water. Nevertheless, the more an air conditioner increase, the more the use of water supply increase. For this reason, we can't help wasting an enormous amount of water and discharging the congelation of a low temperature(about 15℃) occurred in a heat exchanger inside an air conditioner. The purpose of this study is to analyze the utility of congealing water to improve efficiency of the air cooling equipment and save energy as a supplementary water for the cooling tower.

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

서울메트로는 하절기 이용 시민에 대한 서비스 향상을 위하여 역사 기계실에 냉방 설비를 설치하여 운영 중에 있다. 그러나 역사 기계실은 지하철 특성상 도심지역 지하에 위치하고 있어 냉각수 열 교환을 위하여 설치하여야 할 냉각탑의 설치위치가 지상부에 설치되어야 냉각효율이 향상됨에도 지상부 부지확보가 어려워 지하에 실내형 냉각탑을 설치하고 있는 실정이다. 지하철 1~4호선 지하 구조물은 냉각탑 설치 공간의 협소 및 환기구 면적 협소 등 실내형 냉각탑의 열 교환을 위한 설치조건이 부적합하여 효과적인 성능을 발휘할 수 없는 관계로 냉각수의 열 교환 부족에 따른 수온 상승과 이로 인한 냉동기 고온·고압 등 냉동기 장애 발생으로 냉방효율이 저하되고 있다. 또한, 증발·비산·배수 등의 냉각탑 보충을 위한 수량이 일일 역당 22톤 이상 사용되고 있으나, 이 보충수량을 상수도로 공급하고 있어 매년 증가하는 냉방설비에 따라 상수도 이용량도 증가하고 있으며, 공기조화기 내 열교환기에서 발생하는 저온(약 15℃)의 응결수가 상당량

* 서울메트로, 기술연구센터, 비회원
E-mail : amulet32@empal.com
TEL : (02)520-5992 FAX : (02)520-5969
** 서울메트로, 기계설비팀, 비회원
*** 서울메트로, 설비사무소, 비회원

발생되고 있으나, 집수정으로 방류시키고 있는 실정이다. 따라서 냉방설비 효율 향상 및 에너지 절감을 위하여 집수정으로 방류되고 있는 저온의 응결수를 냉각탑 보충수로의 활용성을 분석하고자 하였으며, 향후 응결수 활용을 위한 검토방향을 제시하고자 한다.

1.2 연구 내용 및 과정

1) 연구내용

본 연구에서는 공기조화기 내 열교환기에서 발생하는 응결수를 냉각탑 보충수로 활용할 수 있는지의 여부를 검토하고자 하였으며, 이를 위해 응결수 발생량을 측정하고 저온의 응결수를 활용함으로써 기대되는 상수도 사용료 절감과 냉방효율 증대 및 전력 절감 효과를 검토하고자 하였다.

2) 연구과정

공기조화기 내부에는 응결수가 발생하는 냉수코일이 설치되어 있으나, 응결수 집수(회수) 및 보급을 위한 장비설치 공간이 부족하여 공기조화기 외부에 응결수의 자연적인 집수를 위하여 공기조화기 보다 낮은 위치(승강장)에 응결수 집수를 위한 집수탱크를 설치하였고, 집수탱크 내에 냉각탑으로의 응결수 보급을 위한 수중펌프를 설치하였으며, 보급 배관에는 수도미터를 설치하여 응결수 발생량을 측정하였다. 또한, 이 측정값을 토대로 전년도 냉각탑 보충을 위한 수도사용량 및 역사 냉방온도와 전력사용량 등을 분석함으로써 저온의 응결수 활용에 따른 상수도 사용료 및 전력절감 효과와 냉방효율 증대 효과 등을 비교 검토하였다.

2. 냉방설비 운영현황 및 냉각수 수질기준

2.1 냉방설비 운영현황

서울메트로의 냉방설비는 50억에 냉동기 90대, 냉각탑 101대, 공기조화기 255대가 설치되어 운영 중에 있으며, 하절기인 6월~9월까지 4개월간 일일 15시간을 가동하고 있다.

표1. 냉방설비 현황(2006년 9월말 가동기준, 단위 : 대)

| 호 선 | 역 수 | 냉 방 설 비 | | | 비 고 |
|-----|-----|---------|-----|-------|--------------------|
| | | 냉동기 | 냉각탑 | 공기조화기 | |
| 합 계 | 50억 | 99 | 101 | 225 | 지 하 97억 미설치 47억 |
| 1호선 | 10억 | 20 | 20 | 41 | |
| 2호선 | 19억 | 37 | 39 | 87 | |
| 3호선 | 11억 | 23 | 23 | 51 | |
| 4호선 | 10억 | 19 | 19 | 46 | |

2.2 냉각탑 보충수(상수도) 사용량

2005년도 1억당 냉각탑 평균 사용량은 일일 22톤(최소 11톤~최대 32톤)으로, 50억에 129,646톤(289,570,000원)이 사용되었으며, 이 사용수량은 전량 상수도를 사용하였다.

표2. 2005년도 보충수 사용량(단위 : TON)

| 호 선 | 합 계 | 6월 | 7월 | 8월 | 9월 | 비 고 (금액[원]) |
|-----|---------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| 합 계 | 129,646 | 24,564 | 43,808 | 43,439 | 17,835 | 289,570,000 |
| 1호선 | 25,377 | 4,908 | 8,321 | 8,707 | 3,441 | 56,354,000 |
| 2호선 | 52,663 | 10,109 | 17,242 | 18,155 | 7,157 | 118,566,000 |
| 3호선 | 24,393 | 4,717 | 8,621 | 6,974 | 4,081 | 54,110,000 |
| 4호선 | 27,213 | 4,830 | 9,624 | 9,603 | 3,156 | 60,540,000 |

2.3 냉각수 수질기준

냉각수는 적정 수질기준을 충족하지 않을 경우 부식 및 스케일을 발생시킬 수 있으므로 한국공업규격에서 정한 순환수와 보급수의 수질기준(KS M 0077-1998)에 적합하여야 한다.

표3. 냉각수 수질기준(한국공업규격 M 0077-1998)

| 구분 | 항 목 | 냉각수계 | | 경 향 | |
|------------------|--|---------|---------|-----|-----|
| | | 순환수 | 보급수 | 부 식 | 스케일 |
| 기 준 항 목 | pH(25℃) | 6.5~8.0 | 6.0~8.0 | ○ | ○ |
| | 전기전도율(mS/m) (25℃) | 80이하 | 20이하 | ○ | ○ |
| | {μS/cm} (25℃) | {800이하} | {200이하} | | |
| | 염화물 이온 (mgCl ⁻ /ℓ) | 200이하 | 50이하 | ○ | - |
| | 황산 이온 (mgSO ₄ ²⁻ /ℓ) | 200이하 | 50이하 | ○ | - |
| | 산소비량(pH4.8) (mgCaCO ₃ /ℓ) | 100이하 | 50이하 | - | ○ |
| 참 고 항 목 | 칼슘경도 (mgCaCO ₃ /ℓ) | 150이하 | 50이하 | - | ○ |
| | 탁도(도) (mgFe/ℓ) | 20이하 | 5.0이하 | ○ | ○ |
| | 철 이온 (mgFe/ℓ) | 1.0이하 | 0.3이하 | ○ | ○ |
| | 암모늄 이온 (mgNH ₄ ⁺ /ℓ) | 1.0이하 | 0.2이하 | ○ | - |
| | 이온상 실리카 (mgSiO ₂ /ℓ) | 50이하 | 10이하 | - | ○ |
| | 포화지수(Saturation Index) | 0.0~1.0 | - | ○ | ○ |

3. 응결수 활용설비 시범설치 및 측정

3.1 응결수 활용설비 시범설치

1) 시범설치 역사 선정

공기조화기의 청결도, 응결수 발생량, 장비 설치 공간, 환기량 등을 고려하여 4호선 미아삼거리역 A 환기실을 선정하였다.

2) 활용설비 설치

응결수 활용을 위한 설비로는 자연구배에 의한 응결수 집수를 위하여 공기조화기보다 낮은 승강장 층의 냉각수 펌프실에 활용설비를 설치하였으며, 응결수 활용을 위해 설치한 설비는 응결수 집수용 배관(공기조화기(2대) → 응결수 집수탱크), 응결수 공급용 배관(응결수 집수탱크 → 냉각탑(1대)), 집수탱크, 응결수 공급용 수증펌프(단상 220V/1.1kW), 수도미터 및 조작반 등으로 구성하였다.

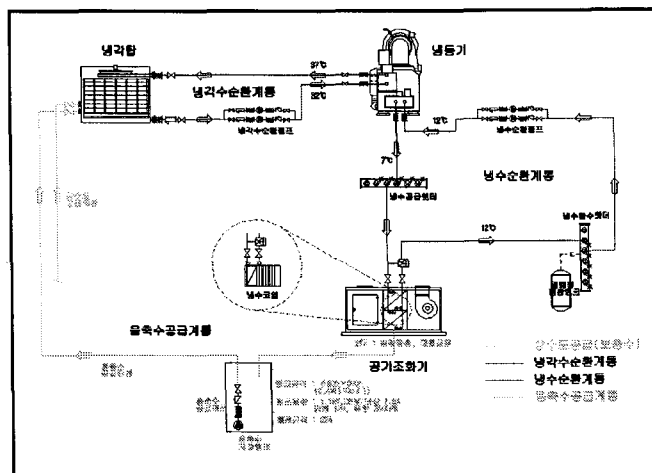


그림1. 응결수 활용배관 계통도

3.2 응결수 측정

1) 측정기간 및 측정방법

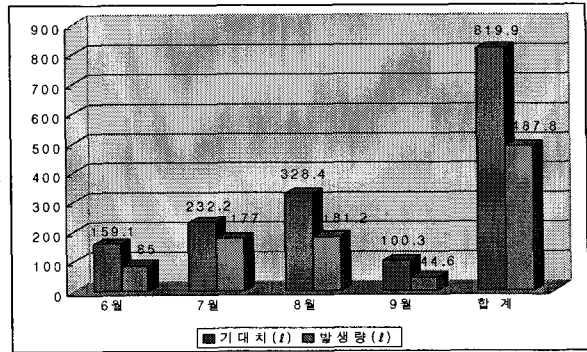
측정기간은 냉방설비 가동기간인 6월~9월 4개월간으로, 응결수 발생량은 수도미터 유량을 주 2회 측정하였고, 실내 온·습도는 설비사무소에서 일일 측정 자료를 활용하였으며, 실외 온·습도는 기상청 자료를 활용하였다.

2) 응결수 발생현황

냉방설비 가동 월별 일일 발생량을 검토한 결과, 6월과 9월에는 응결수가 약 3톤가량 발생되었으며, 혹서기인 7월과 8월에는 약 6톤가량 발생된 것으로 나타났다. 이를 통해 외기 온도가 높을수록 응결수 발생량이 증가함을 알 수가 있었다. 표4를 보면 응결수 발생 기대치는 실외 공기의 공급비율을 100%로 하여 실내외 온·습도조건 및 풍량에 따른 산출 식에 의해 계산된 것으로 지하철은 공기 혼합비를 실내(리턴) 70%, 실외 30%로 가동함으로 실제 응결수 발생량은 기대치의 60% 정도 발생된 것으로 나타났다. 참고로 응결수 온도는 승강장에 설치된 응결수 집수탱크에서 15℃로 측정되었다.

표4. 응결수 발생량(단위 : TON)

| 구분 | 일일 평균발생량 | | 월발생량 | | |
|----|----------|-----|-------|-------|-----|
| | 기대치 | 발생량 | 기대치 | 발생량 | 비율 |
| 6월 | 5.9 | 3.1 | 159.1 | 85 | 54% |
| 7월 | 8.0 | 6.1 | 232.2 | 177 | 76% |
| 8월 | 11.3 | 6.3 | 328.1 | 181.2 | 55% |
| 9월 | 6.7 | 3.0 | 100.3 | 44.6 | 45% |
| 평균 | 8.0 | 4.6 | 205.0 | 122.0 | 60% |



※ 전체 가동 일수 122일 중 실 가동 일수 100일(82%) 적용

표5. 기대치 산출(2005년도 온·습도 조건 적용)

| 구분 | 온도 (°C) | | 상대습도 (%) | 절대습도 (%) | 절대습도차 (실외-실내) | 기대치산출량 (TON) |
|----|---------|------|----------|----------|---------------|--------------|
| | 실외 | 실내 | | | | |
| 6월 | 실외 | 21.8 | 69.2 | 0.011348 | 0.001626 | 5.9 |
| | 실내 | 20.0 | 60.0 | 0.009722 | | |
| 7월 | 실외 | 23.1 | 82.7 | 0.014756 | 0.002210 | 8.0 |
| | 실내 | 22.3 | 75.1 | 0.012546 | | |
| 8월 | 실외 | 27.1 | 69.5 | 0.015671 | 0.003125 | 11.3 |
| | 실내 | 22.3 | 75.1 | 0.012546 | | |
| 9월 | 실외 | 21.9 | 60.0 | 0.009876 | 0.001845 | 6.7 |
| | 실내 | 20.0 | 55.0 | 0.008031 | | |
| 평균 | - | - | - | - | - | 8.0 |

※ 비교 : 1. 2005년도 온·습도 조건 적용

2. 기대치 산출은 (실외 절대습도-실내 절대습도)×공조기풍량(CMH)×가동시간(H)으로 함.

3. 공조기풍량 : 241,560CMH, 가동시간 : 15시간

6월~9월까지의 응결수 총 발생량이 487.8톤으로 이를 금액으로 환산한 결과, 1,112,184원 이었으며, 이는 응결수 활용에 따른 연간 상수도 절감효과가 있음을 보여준다.

표6. 월별 금액환산

| 구 분 | 기대치 | | 발생량 | |
|-----|----------|-----------|----------|-----------|
| | 계산치(TON) | 금액(원) | 측정치(TON) | 금액(원) |
| 6월 | 159.1 | 362,690 | 85.0 | 193,800 |
| 7월 | 232.2 | 529,470 | 177.0 | 403,560 |
| 8월 | 328.4 | 748,685 | 181.2 | 413,136 |
| 9월 | 100.3 | 228,633 | 44.6 | 101,688 |
| 합 계 | 819.9 | 1,869,478 | 487.8 | 1,112,184 |

4. 측정결과 분석

응결수 발생량은 산출식(2005년도 기준)에 의한 기대치보다 약 40% 적게 발생되었으며, 이에 따른 실내 및 실외 환경조건과 가동조건을 분석하였다.

4.1 환경조건 분석

1) 실내 온·습도

실내 온·습도 측정결과 하절기 실내온도 적정치인 26℃~28℃를 충족하였으며, 습도 또한 60%~70%로 적정치를 유지하였다.

표7. 실내 온도 현황

| 구 분 | 6월 | 7월 | 8월 | 9월 | 평 균 |
|-----|------|------|------|------|------|
| 대합실 | 23.9 | 24.7 | 26.7 | 24.7 | 25.0 |
| 승강장 | 24.6 | 25.3 | 27.5 | 25.5 | 25.8 |

2) 실외 온·습도

2005년도 대비 2006년도 실외 온·습도 측정결과 온도는 평균 1.1℃ 낮았으며, 습도는 평균 11.8% 낮아 응결수 발생량 감소에 영향을 주었다.

표8. 실외 온·습도 현황

| 구 분 | 온 도(℃) | | | 습 도(%) | | |
|-----|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | '05 | '06 | 온도차 | '05 | '06 | 습도차 |
| 6월 | 22.8 | 21.7 | - 1.1 | 70.1 | 69.2 | + 0.9 |
| 7월 | 25.3 | 23.1 | - 2.2 | 76.3 | 82.7 | + 6.4 |
| 8월 | 25.1 | 27.1 | + 2.0 | 75.3 | 69.1 | - 6.2 |
| 9월 | 21.8 | 22.0 | + 0.2 | 70.5 | 57.6 | -12.9 |
| 평 균 | 23.75 | 23.48 | - 1.1 | 73.05 | 69.65 | -11.8 |

4.2 가동조건 분석

1) 공기조화기 풍량

공기조화기를 60Hz로 가동시 풍량이 120,780CMH가 되어야 하나, 전력절감을 목적으로 승장장용 공기조화기는 55Hz로 가동하였으며, 대합실용 공기조화기는 50Hz로 가동하여 14,080CMH가 감소된 106,700CMH의 풍량을 공급함에 따라 응결수 발생량에 영향을 주었다.

$$\text{풍량 산출근거} : \text{풍량} = \text{기존풍량} \times (\text{변경rpm} \div \text{기존rpm})$$

- 산출 풍량 : 106,700CMH

- 승/공 : $72,660\text{CMH} \times (3,300\text{rpm} \div 3,600\text{rpm}) = 66,600\text{CMH}$
- 대/공 : $48,120\text{CMH} \times (3,000\text{rpm} \div 3,600\text{rpm}) = 40,100\text{CMH}$

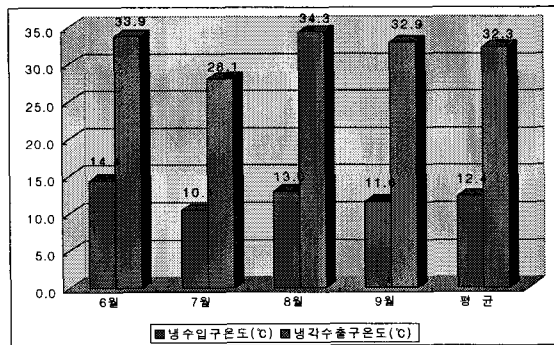
2) 냉수, 냉각수 온도

적정한 냉방효율을 위한 냉수 적정온도의 기준은 입구측 7℃, 출구측 12℃이며, 냉각수 적정온도는 입구 37℃, 출구 32℃로 설계된다. 하지만, 측정결과 냉각수 입구측 온도는 평균 32.3℃ 이었으며, 냉수 입구측 온도는 평균 12.35℃로 냉방설비 가동효율이 낮았다. 이는 냉각탑 적정 필요환기량 부족으로 인한 열 교환이 미흡에 따른 것으로 예상되며, 이 또한, 응결수 발생량이 감소에 영향을 되었다.

표9. 냉수 및 냉각수 온도 측정현황

| 구 분 | 냉수입구 | 냉각수입구 |
|-----|-------|-------|
| 6월 | 14.4 | 33.9 |
| 7월 | 10.4 | 28.1 |
| 8월 | 13.0 | 34.3 |
| 9월 | 11.6 | 32.9 |
| 평 균 | 12.35 | 32.30 |

⇒



4.3 냉수코일 표면 오염도

냉수코일 표면 청소는 6월 냉동기 가동 전 1회 시행하며 냉동기 가동 기간 중에는 시행하지 않아 냉동기 가동기간이 길어질수록 냉수 코일표면 오염도가 증가됨에 따라 응결수 발생량 감소에 영향을 준 것으로 보인다.

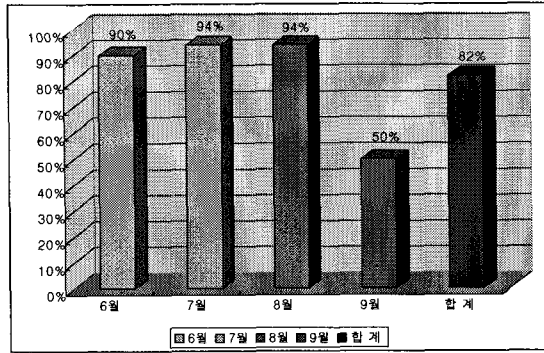
4.4 냉방설비 가동률

냉방설비의 총 가동 일수는 122일이나, 적정한 역사 온도, 냉방설비 고장 등으로 인하여 가동률 82%인 100일을 가동하였으며, 냉방설비의 일일 가동시간은 15시간(07:00~10:00) 가동하는 것이 일반적이나, 하절기 전력절감을 위하여 12:00~13:00까지 냉동기 가동을 일시 중지하였으므로 실가동률은 82% 이하가 된다.

표10. 냉방설비 가동률

| 구분 | 냉방 가동 일수(일) | | 가동율 (%) |
|----|-------------|------|---------|
| | 가동기준 | 실 가동 | |
| 6월 | 30 | 27 | 90 |
| 7월 | 31 | 29 | 94 |
| 8월 | 31 | 29 | 94 |
| 9월 | 30 | 15 | 50 |
| 평균 | 122일 | 100일 | 82% |

⇒



5. 분석결과

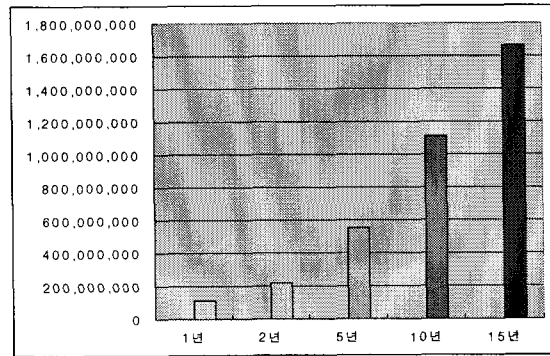
5.1 상수도 절감량

- 1) 1억 1개소의 응결수 발생량이 487.8TON(₩1,110,000원)으로 50억(역당 2개소)의 응결수를 활용할 경우 연간 48,780TON을 활용할 수 있어 ₩111,200,000원의 절약효과가 있는 것으로 나타났다.
- 2) 설치비용은 약 400만원(1억 1조)으로 투자비 회수기간은 3~4년 정도 소요되는 것으로 산출되나, 집수가 가능한 구조로 공기조화기를 설치할 경우 집수탱크 설치가 불필요하며, 펌프용량 소형화, 배관설치 거리 축소 등으로 100만원 이내의 비용으로 응결수 재활용 장치를 구축할 수 있어 투자비 회수기간을 1년 이내로 앞당길 수 있을 것으로 예상된다.

표11. 절감비용(기계설비 내구연한 15년 적용)

| 구분 | | 절감량 (TON) | 절감액 (원) |
|------------|-----|-----------|---------------|
| 1억(2개소) 절감 | 1년 | 976 | 2,220,000 |
| | 15년 | 14,640 | 33,360,000 |
| 50억 절감 | 1년 | 48,780 | 111,200,000 |
| | 15년 | 731,700 | 1,668,000,000 |

⇒



5.2 냉방효율 향상 및 전력절감

1) 냉방효율

냉방효율 비교 대상인 이전 년도와의 실외 온·습도 조건이 상이하고, 응결수를 1억 2개소 중 1개소만 활용한 관계로 가시적인 냉방효율 향상은 얻을 수 없었으나, 냉각탑 보충수를 상수도 보다 낮은 온도의 응결수 공급함으로써 적정 냉각수 온도의 공급에 따른 냉방효율 향상을 기대할 수 있을 것으로 본다.

2) 전력절감

전력절감은 산출이 난해하여 구체적인 명시는 어려우나, 냉방효율 향상에 따른 냉방설비 가동부하가 낮아짐에 따라 전력절감 또한 효과가 있을 것으로 기대된다.

6. 결 론

냉각탑 보충수량을 냉방설비 열교환시 공기조화기내 냉수코일에서 자연적으로 발생하는 저온의 응결수로 활용함으로써 에너지 절감(상수도, 전력) 및 냉방효율 증대를 목적으로 한 상기 연구로 냉방효율 증대 및 전력절감에 대하여는 가시적인 효과는 얻을 수 없었지만, 1억당 220만원의 상수도 사용료 절감 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 응결수를 냉각탑 보충수의 수질기준에 적합하지 않을 경우 배관 내부에 부식 및 스케일을 발생시켜 장비 수명저하, 배관 부식 등으로 냉방효율 저하를 초래할 수 있으므로 응결수가 냉각수 수질기준에 적합한지의 검토가 필요할 것이다.

또한, 상기 효과는 냉방효율 증대를 위하여 내·외부 공기활용 비율이 70:30으로 운전 할 경우의 효과로 만약 외부공기를 100% 활용하여 운전할 경우의 응결수 발생량은 냉각탑 보급수 전량을 충족시킬 수 있을 것으로 예상된다. 그러므로 외부공기 활용 비율에 따른 에너지 절감과 냉방효율 간의 상관성 분석 또한 검토가 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

1. 공업열역학(윤장상외 저)
2. 공기조화 및 냉동(김무환 외 Threkeld, James L 저)
3. 습기와 물의 건축적 설계(이민석 저)
4. 냉방기의 응결수 배출시스템(특허 출원인 박국현, 출원번호 10-2005-0022396)
5. 공기조화기내의 응축수를 배수시키는 방법(특허 출원인 김세환, 10-1984-0005778)