

축냉시스템의 산업용 생산설비 적용에 대한 고찰

박 창 현, 홍 승 수*, 김 중 룰†, 박 승 상**, 황 형 식***

(주)에프티앤이, *(주)성일이앤씨, **한국생산기술연구원, ***(주)노루페인트

Study on TES system application for industrial production facility

C. H. Park, S. S. Hong*, J. R. Kim†, S. S. Park**, H. S. Hwang***

FT EnE Inc., Seoul 137-819, Korea

*Sungil E&C Co., Ltd., Seoul 135-875, Korea

**Korea Institute of Industrial Technology, Chonan 330-825, Korea

***NOROO Paint & Coating Co., Ltd., Anyang 430-849, Korea

ABSTRACT: The TES (Thermal Energy Storage) cooling system utilizing cheaper off-peak electricity has been applied just for building air-conditioning currently and causes limitation of usage rate and inefficiency of national resources utilization. In this regard, more says the necessity to apply TES system in industrial cooling system which is longer using period and wider usage. In this study, we will approve the technical and economical improvement in efficiency of industrial cooling system applied TES system by utilizing cheaper off-peak electricity and it will attribute the promotion of TES system and stabilization of supply and demand of electric power by proving the necessity to develop more efficient industrial cooling system by combining TES system.

Key words: Thermal energy storage(축냉시스템), Industrial cooling technology(산업용 냉각기술), Cold water storage system(수축열시스템), Cooling load(냉방부하), Unloading(무부하), Thermal storage efficiency(축열조 효율), Electric power load(전력부하), Turbine inlet air cooling system(터빈공기냉각시스템), Temperature Stratification(온도성층화), 디퓨저(Diffuser)

기 호 설 명

QN_s : Total heat storage [kcal/day]
 ΔT : Temperature difference [°C]
 η : Thermal storage efficiency [%]

1. 서 론

축냉시스템은 당초 국가 정책적인 차원에서 하절기 전력수급의 안정화를 주목적으로 금융지원, 법적 강제규정 등의 여러 가지 장려책을 통하여

보급을 촉진시키고 있으며, 여기에 냉동기의 운전특성 변화에 따른 효과가 추가되어 소비자 측면에서 여러 가지 경제적 효과가 있는 것은 익히 알려져 있다.

축냉시스템의 가장 큰 용도는 건물 냉방용이지만, 심야전력 요금제도를 이용하여 사용자의 운전비용을 절감하거나, 일정한 온도를 유지시켜주어 생산 제품의 품질을 향상시켜 고부가가치화하는 등의 차원에서는 그 응용분야를 각종 산업 및 상업분야에서 다양하게 찾을 수 있다. 축냉시스템을 이용한 건물 냉방용 이외의 응용분야는 현재까지 국내에서는 거의 적용되지 않고 있으나, 축냉시스템을 다양하게 적용하고 있는 일본에서는 여러 가지의 적용 사례가 발표되고 있다.

산업용에의 응용은 각종 냉각수 공급시스템에

† Corresponding author

Tel.: +82-2-523-0543; fax: +82-2-523-0544

E-mail address: jrkim@ftene.com

의 적용을 대표적인 예로 들 수 있다. 단순히 냉각탑을 운전하여 냉각수를 공급하는 경우에는 축냉시스템의 도입이 시설투자비 및 운전비용면에서 매우 불리하게 되어 적용이 곤란하지만, 냉각수의 온도가 낮아 냉동기를 운전하여야만 하는 경우에는 적절한 시스템 및 운전방법의 선정을 통하여 경제성을 확보할 수 있으며, 냉각수의 온도를 항상 일정하게 유지하여 생산제품의 품질을 향상시키는 효과를 거둘 수 있다. 현재 국내에서도 일부 대기업을 중심으로 원가절감 차원에서 빙축열 또는 수축열시스템을 냉각수시스템에 적용하기 시작하였으며, 많은 기업에서 타당성을 검토하고 있다. 또한 일정한 온도에서 매우 큰 냉각열량을 필요로 하는 산업 공정용 냉각수 시스템의 경우, 슬러리형 빙축열시스템의 빠른 해빙속도 및 슬러리 직접반송 특성을 적절히 활용하면 매우 큰 효과를 거둘 수 있다. 그러나, 슬러리 직접 이용의 경우 부하측에 공급되는 슬러리의 온도가 일반적으로 0°C 이하이므로, 높은 온도대의 냉각수가 요구되는 경우에는 적용이 수월하지 않으며, 슬러리 직접반송에 대한 충분한 연구가 수행되지 못한 관계로 실제 적용 사례는 매우 적다. 축냉시스템의 또 다른 산업용 적용 예로는 화력발전시설의 터빈에 공급되는 연소용 공기의 온도를 낮추어 발전효율을 향상시키는 Turbine Inlet Air Cooling System을 들 수 있다.

상업용에의 응용은 각종 저장시설에의 적용을 대표적인 예로 들 수 있다. 일반적으로 5°C 이상의 냉장온도가 요구되는 냉장시설에는 빙축열시스템의 적용이 무난하며, 슈퍼마켓의 쇼-케이스, 꽃 저장고, 냉장창고 등에의 적용이 활발히 추진되고 있다. 0°C 이하의 온도가 요구되는 냉동 저장시설에는 물을 축열매체로 이용하는 빙축열시스템은 제빙온도가 0°C 이어서 적용이 불가하지만, 물에 적절한 첨가제를 추가하여 제빙온도를 0°C 이하로 조절한 시스템은 일부 적용이 가능할 것으로 판단된다. -10°C 이하의 저온 냉동창고에는 첨가제를 추가하여 제빙온도를 낮춘 빙축열시스템 보다는, 낮은 온도대의 상변화 온도를 갖는 잠열축열식 시스템의 적용이 더 효과적일 것으로 판단된다.

농수축산업에의 응용은 가장 적극적으로 타당성이 검토되고 있는 분야로, 고급 야채류, 버섯류

및 화훼류의 재배시설에 대한 냉방, 수산물 양식장의 냉각, 축사 냉방 및 축산물 가공시설의 냉방, 농수축산물의 냉장저장 및 유통시설, 농수산물의 냉풍건조시설 등등 매우 다양한 분야에 적용되고 있으며, 매우 활발한 연구가 진행되고 있다.

이와 같이 다양한 분야에서 응용 가능한 축냉시스템을 산업용 생산설비에 적용한 결과를 살펴 보려고 한다.

2. 시스템 설계 및 부하구성

2.1 시스템 설계

수축열 시스템은 냉열을 저장하는 수축열조와 냉열을 생산하는 냉동기 그리고 냉동기의 응축열을 배출하는 냉각탑으로 구성되며 일반적인 구성은 Fig. 1에 나타난 것과 같고 본 연구에서는 도료 생산설비의 냉각시스템에 적용한다. 적용 설비 목록은 Table 1과 같고 설비에서 총 요구되는 열량은 278.1 kW로 약 80 USRt이다. 따라서 생산설비 공장에 설치할 용량은 최대부하로 80 USRt로 적용하며 각 도료설비에 요구되는 냉각수의 양은 적게는 0.9 m³/h에서 많게는 10.9 m³/h로 많은 차이가 있으며, 각 도료설비에 요구되는 양도 매우 작아 각 도료설비에 요구되는 정유량을 만족하도록 구성해야 한다.

2.1.1 축열량 설계

설비의 총 용량 (최대부하)는 80 USRt로 최대 부하에 축냉시간을 곱하여 산출된다.

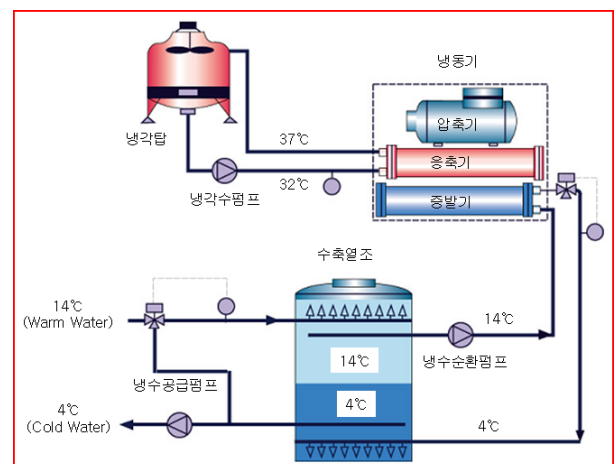


Fig. 1 Schematic of cooling storage system.

$$\begin{aligned}
 QN_s &= \text{최대부하} \times 10(\text{hr}) \times \text{여유율} \\
 &= 80 \text{ RT} \times 10(\text{hr}) \times 0.95 \\
 &= 760 \text{ RT-hr}
 \end{aligned}$$

주간에 필요한 냉방부하는 야간에 냉동기를 가동하여 저장하는 축열조의 축열량으로 모두 담당한다. 따라서 주간에 수축열시스템의 냉동기는 가동되지 않는다. 본 수축열시스템에서는 주간에 냉동기가 가동이 되지 않으므로 주간 최대전력을 억제할 수 있다.

2.1.2 냉동기 냉각용량 설계

수축열시스템은 야간 축열조의 열량을 만족할 수 있는 용량으로 선정하며 생산설비의 축열조 용량을 만족할 수 있는 용량 76 USRt보다 높은 냉동기를 선정해야 하므로 설비 및 부분부하의 안정화를 위해서 43 USRt x 2대로 냉동기 냉각용량을 산정하였다.

$$\begin{aligned}
 QN_s &= 80 \text{ RT} \times 10(\text{hr}) \times 0.95 \\
 &= 760 \text{ RT-hr}
 \end{aligned}$$

또한 냉동기 용량은 축열조 용량을 축냉시간과 냉동기 대수의 곱으로 나누어 구하므로

$$\begin{aligned}
 \text{냉동기 대수} &= 760 \text{ RT-hr} \div (10 \text{ hr} \times 2 \text{ 대}) \\
 &= 38 \text{ RT/대 이상} \\
 &= 43 \text{ RT} \times 2 \text{ 대 (로 설계)}
 \end{aligned}$$

2.1.3 수축열조 용량 설계

수축열시스템에서의 축열조 체적은 물의 현열량으로 이루어지며, 전체 시스템의 효율을 최대화하기 위해서는 수축열조의 상하부 온도 차이를 최대화하는 것이 매우 중요하다. 즉 온도차이가 클수록 탱크용량이 작아져도 되며 온도차이가 작을 경우에는 탱크용량이 크게 되어 경제성이 떨어진다. ASHRAE에서 수축열조의 상하부 온도차이를 $\Delta T = 10 \sim 12^\circ\text{C}$ 로 추천하고 있다. 본 생산설비에 설계된 수축열시스템에서는 냉수온도를 4°C 로 하고, 온수(Return)온도를 14°C 로 하여 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 로 선정하였다. 이를 기준으로 수축열조의 체적(V)을 산출하면 다음과 같다.

$$V = \frac{QN_s}{1000 \times \Delta T \times \eta} = \frac{2,298,240}{1000 \times 10 \times 0.95} = 242 [m^3]$$

2.1.4 디퓨저 설계

성층화(Stratification)방식 수축열시스템에서 가장 중요한 디퓨저(Diffuser)는 물의 흐름을 균일

하고 낮은 속도로 수평방향으로 유입되게 하여야 한다. 시스템 설계에서 책정된 설계유량을 유지하며 디퓨저에서의 유속을 최소화하기 위하여 개방구의 면적을 증가시키면 균일한 흐름을 얻을 수 없으므로 물의 관성력을 최대한 약화시켜 밀도차에 의한 부력만으로 물이 수평방향으로 흐르게 하는 디퓨저 설계는 이미 알려진 바와 같이 Inlet densimetric, Froude number, Fr_1 의 개념을 도입하여 설계 할 수 있다.

2.2 설계 부하 패턴

생산설비가 구축된 현장의 예상 생산설비 냉각부하를 Fig. 3~4에 나타내었다. 부하패턴-1은 생산설비의 정상적 가동을, 부하패턴-2는 생산설비의 일부 가동을 가정한 냉각부하이다.



Fig. 2 Expected heating load (Pattern I).



Fig. 3 Expected heating load (Pattern II).

2.3 장치 구축

본 연구를 통하여 설계, 제작, 설치된 수축열시스템에 대한 성능평가 시험으로, 설치된 수축열시스템의 축냉 및 방냉 운전시의 각종 운전상태를 측정할 수 있도록 측정시스템을 구축하였

다. Fig. 4는 시험대상 수축열 시스템의 설치전경을 나타낸 것이며, Fig. 5에 시험대상 수축열 시스템에 설치되는 각종 계측기기의 설치도 및 설치모습을 나타내었다. 수축열 시스템의 성능평가를 위해서는 다음과 같은 사항들이 측정되어야 한다.

- ① 축방냉 운전시의 배관내 물온도 : 온도변화에 따른 저항변화를 이용하여 온도를 측정하는 RTD 센서를 배관 내에 삽입하여 배관 내부를 흐르는 물의 온도 측정
- ② 수축열조 내부 물온도 : 수축열조 내부에 그림3.39에서 보는 바와 같이 10개의 위치에 이중급속간의 기전력 발생을 이용하여 온도를 측정하는 열전대(T-type) 센서를 설치하여 축방냉 운전시간 경과에 따른 축열조 내부 온도변화 측정
- ③ 냉동 Cycle 온도 : 냉동 Cycle의 운전상태를 파악하기 위하여 냉동 Cycle 주요 부분에서의 온도를 측정. 냉동 Cycle은 매우 정밀한 기밀을 요구하는 관계로 냉매관 내부에 온도센서를 삽입하는 대신에 냉매관 표면에 열전대 센서를 밀착 부착하고 주위를 단열하는 방법으로 냉매온도를 측정
- ④ 냉동 Cycle 압력 : 냉동 Cycle의 운전상태를 파악하기 위하여 냉동기 입출구에서의 압력을 Strain Gauge Type 압력계를 이용하여 측정
- ⑤ 축방냉 운전시의 냉수 유량 : 축냉 및 방냉 배관표면에 초음파를 이용하여 유량을 측정하는 초음파 유량계를 설치하여 냉수의 유량을 측정
- ⑥ 소비전력량 : 전체 소비전력 측정을 위하여 심야전력 인입선에 Watt Transducer를 설치하여 전체 소비전력을 측정

3. 시험 내용 및 방법

3.1 시험내용

본 현장은 수축열 시스템을 도로설비에 적용하였으므로 생산설비의 운전과 부하를 고려하여야 하므로 다음과 같이 시험 내용을 결정하였다.

- 시간대별 설계 부하패턴 적용
- 냉동기 운전상황 분석을 위한 계측시스템 구



Fig. 4 Site view of cooling system.

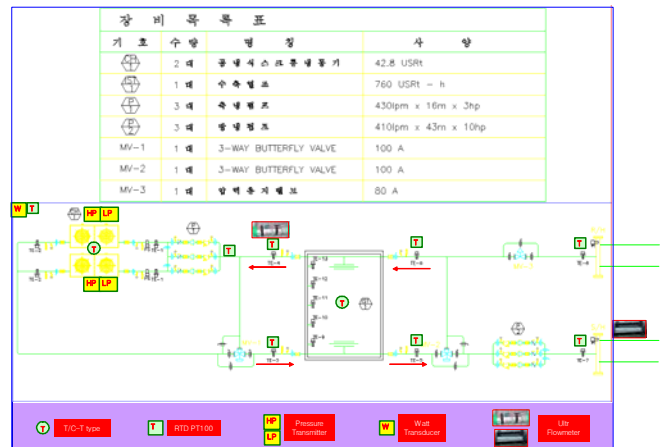


Fig. 5 Schematic of cooling storage system

축 및 데이터 수집

- 축냉운전 : 23시~09시
- 방냉운전 : 09시~19시

3.2 시험방법

3.2.1 수축열시스템 축·방냉 자동운전 설정

- 야간 축냉운전은
 - 심야시간(23시~09시)을 고려 축냉 운전시간 설정
 - 수축열조 하부온도가 설정온도(4℃)에 도달하면 축냉운전 정지
 - 수축열조 하부온도가 설정온도에 가까워지면 냉동기 무부하(Unloading) 운전
- 주간 방냉운전은
 - 주간 도로생산설비 가동시간(09시~19시)을 고려 방냉 운전시간 설정

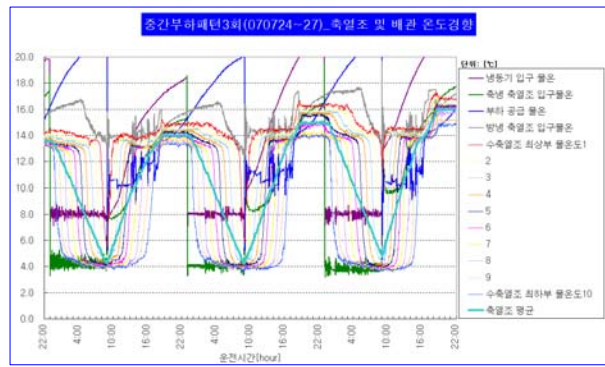
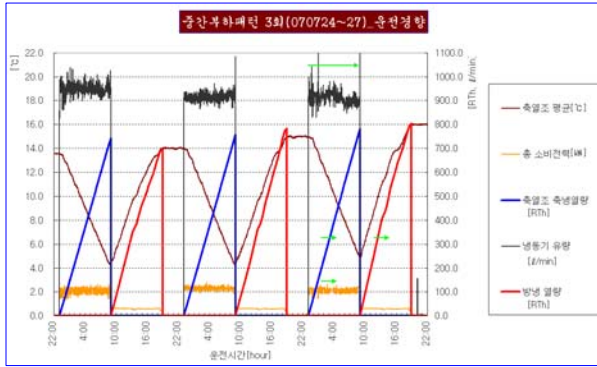


Fig. 6 3-day running trend of load pattern I. Fig. 7 3-day temp. trends of load pattern I.

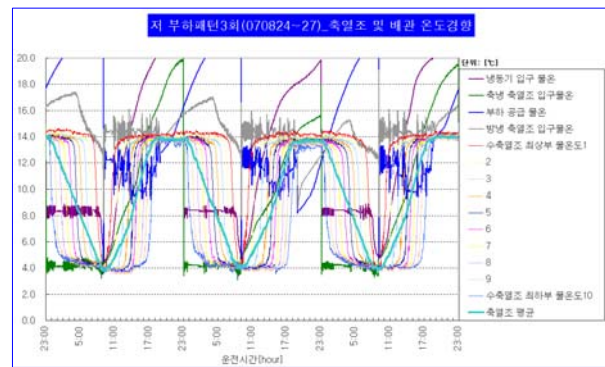
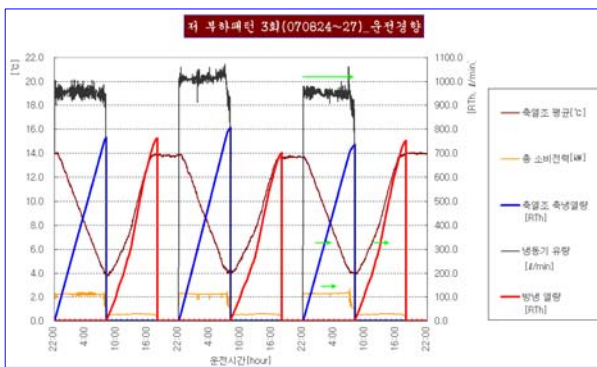


Fig. 8 3-day running trend of load pattern II. Fig. 9 3-day temp. trends of load pattern II.

- 모의부하로 2대의 50RT급 FCU를 이용하여 외기에 냉방
- 각 FCU에 설치된 2대의 Fan을 기동/정지로 제어하여 부하량 조절

3.2.2 모의부하(FCU)이용 부하패턴 구현

도료생산설비는 부하량에 따라 필요냉각열량이 달라진다. 부하량은 요구 생산량에 따라 결정되므로 도료생산설비의 2개 부하패턴을 모사하기 위한 실험을 수행하였고 이를 토대로 모의부하 패턴이 요구 부하량을 적절히 추종 가능하도록 25%, 50%, 75, 100%의 4가지 패턴으로 방냉운전을 수행할 수 있도록 하였다.

4. 시험 결과

4.1 축방냉 운전 경향

Fig. 6과 Fig. 7은 부하패턴 I 운전모드에서 3일간 연속시험한 시험결과를 축방냉 열량과 소비전력 및 축열조 내부온도를 기준으로 나타낸 것이며, Fig. 8과 Fig. 9는 부하패턴 II 운전모드에

서 3일간 연속시험한 시험결과를 축방냉 열량과 소비전력 및 축열조 내부온도를 기준으로 나타낸 것이다.

- 축냉 운전 : 자동제어 시스템의 운전제어에 따른 운전으로 지정된 심야 23시부터 아침 09시 이내의 운전조건과 수축열조 상부온도가 4℃에 도달할 경우에 정지라는 운전조건에 따라 매우 양호하게 운전되었으며, 축냉 운전시 수축열조 입구온도가 축냉운전 초기 일부 시간을 제외하고는 전체 축냉운전 시간 동안 설계온도인 4℃에 매우 근접하게 운전되어 전체적으로 설계에 따른 양호한 운전상태를 나타냄.
- 방냉 운전 : 자동제어 시스템의 운전제어에 따른 운전으로 지정된 아침 09시부터 저녁 19시 이내의 운전조건과 수축열조 하부온도가 14℃에 도달할 경우에 정지라는 운전조건에 따라 매우 양호하게 운전되었으며, 방냉 운전시 수축열조 입구온도가 부하패턴에 따라 부하가 변동되는 일부 시간을 제외하고는 전체 방냉운전 시간동안 설계온도인 14℃ 전후로 운전되어 전체적으로 설계에 따른 양호

한 운전상태를 나타냄.

- 수축열조 성층화 : 수축열조 내부에 설치된 10개의 온도센서가 운전시간 경과에 따라 순차적으로 변화하는 매우 양호한 성층화 유지 상태를 나타냄.
- 부하측 공급온도 : 수축열 내부의 성층화 유지를 위하여 방냉운전시 수축열조로 돌아오는 물온도를 일정하게 유지시켜야만 하는 수축열 시스템의 운전특성에 따라, 부하측 공급온도는 부하변동 경향에 따라 변화하는 경향을 나타냄.
- 축방냉 열량 : 축방냉 열량은 모의부하를 통해 설계용량에 맞도록 나타나고 있으며, 축방냉 열량은 각일의 모의부하량에 따라 변화가 있음.

4.2 부하패턴 적용 방냉운전

Fig. 10과 Fig. 11은 부하패턴-1 및 부하패턴-2 운전모드에서 측정된 부하변화 경향을 설계 부하패턴 및 시험에 사용된 모의부하 패턴과 비교하여 나타낸 것으로, 전반적으로 주어진 부하패턴에 유사하게 변화하는 경향을 나타내어, 실제 사용시 부하변동에 대한 대처능력이 충분할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 실제 도로 생산설비에 축냉시스템을 적용하고 성능평가지험을 수행하여, 산업용 냉각설비에 축냉시스템 적용시의 장단점을 종합적으로 분석하는 것을 최종 목표로 연구를 진행하였고, 적용기업의 공사일정 지연으로 모의부하를 이용한 성능평가지험 평가 결과 연구목적에 부합하는 결과를 얻었다. 향후 산업용에 적용된 축냉시스템의 표본으로 산업용 적용 확대에 기여하고자 한다.

- (1) 산업용 냉각시스템의 특성분석하고 이에 적합한 시스템 설계 기술을 도출하였다.
- (2) 산업용 냉각시스템 제작 및 운전특성을 분석하여 최적 운전기술을 도출하였다.
- (3) 비축냉식 대비 초기투자비 회수기간은 약 2.8



Fig. 10 Heat load trends of load pattern I.



Fig. 11 Heat load trends of load pattern II.

년으로 나타났다.

후 기

본 연구는 전력산업연구개발사업(관리번호 : R-2005-0-062) 연구비지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Yoo, J. I. et al., 2007, Studies on industrial cooling technology using cold thermal energy storage system (Cold water storage system for cooling system of paint production facilities), Final Report of Ministry of Industry & Resource.
2. Park, S. S., 2001, 축냉시스템 산업 및 상업용 응용 사례, 2001 축냉기술세미나, 한국생산기술연구원.
3. Lim, H. M., 2004, 축냉시스템의 산업공정 적용 사례, 빙축열냉방시스템 강연회, 한국설비기술협회.