

## 전기적 열제어 시스템을 사용한 에너지 소비량 감소에 관한 연구

한 규 일\*

부경대학교 기계시스템공학과

### **A study on the saving of energy consumption load using electrical heat control system**

**Kyu-II HAN\***

*Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea*

Most of steam power plant in Korea are heating the feed water system to prevent freezing water flowing in the pipe in winter time. The heating system is operated whenever the ambient temperature around the power plant area below 5 degree Centigrade. But this kind of heat supplying system cause a lot of energy consuming. If we think about the method that the temperature of the each pipe is controled by attaching the temperature measuring sensor like RTD sensor and heat is supplied only when the outer surface temperature of the pipe is under 5 degree Centigrade, then we can save a plenty of energy. In this study, the computer program package for simulation is used to compare the energy consumption load of both systems. Energy saving rate is calculated for the location of Youngweol area using the data of weather station in winter season, especially the January's severe weather data is analyzed for comparison. Various convection heat transfer coefficients for the ambient air and the flowing water inside the pipe was used for the accurate calculation. And also the various initial flowing water temperature was used for the system. Steady state analysis is done previously to approximate the result before the simulation. The result shows that the temperature control system using RTD sensor represents the high energy saving effect which is more than 90% of energy saving rate. Even in the severe January weather condition, the energy saving rate is almost 60%.

Keywords: Steam power plant, Energy consumption load, Convection heat transfer coefficient, Temperature measuring sensor, Energy saving rate

---

\*Corresponding author: [kihan@pknu.ac.kr](mailto:kihan@pknu.ac.kr), Tel: 82-51-629-6194, FAX: 82-51-629-6188

## 서 론

글로벌 경제위기를 통한 경제난은 우리나라만의 국한된 사항이 아니고 전 세계적으로 위기감을 증폭시키고 있다. 가중된 경제난에서 에너지 사용비용은 큰 비중을 차지하고 있으며 석유와 천연가스의 값은 나날이 치솟고 있어 에너지 절약은 갈수록 큰 화두로 떠오르고 있다. 또한 전 세계적인 에너지 사용량의 증가와 에너지 비용의 증가에 따라 온실가스 배출을 통한 지구온난화의 방지뿐만 아니라 에너지 비용의 절감이 매우 필요한 사항으로 대두되었다 (Faghri, 1995).

우리나라의 경우 원전으로 전기를 생산하는 비율은 전체의 40% 가량으로 아직도 반 이상의 전력을 화력발전소에서 발전하는 전기로 충당하고 있다. 원전을 통한 전력생산은 발전단가가 화력발전보다 낮다고 알려져 있다. 하지만 핵폐기물의 처리를 위한 비용과 일본 후쿠시마의 원전사고와 같은 막대한 피해시의 사고처리에 드는 천문학적 비용 등을 냉정하게 환산해 본다면 매우 낮은 발전단가는 어느 정도 부풀려져 있다고도 생각할 수 있다. 따라서 모든 발전소를 원전으로 대체하여야 하는 당위성이 있는 것도 아니기 때문에 석유, 석탄, 천연가스 등이 아직 지구상에 존재하는 한 화력발전소의 중요성은 결코 간과할 수 없다는 것을 알 수 있다.

현재 일반 화력발전소에서는 겨울철 플랜트 설비 내 배관 내부에 흐르는 물의 결빙을 막기 위하여 일정 대기온도 ( $5^{\circ}\text{C}$ ) 이하가 되면 배관을 가열한다. 하지만 이 방법은 튜브 내를 흐르는 물의 상태와 상관없이 대기온도만으로 판단하여 가열이 이루어지고 있기 때문에 불필요한 에너지 낭비의 요인이 될 수 있다 (Duffie and Beckman, 2000).

이 문제를 해결하기 위하여 대기온도 측정 기준으로 되어있는 발전소 플랜트 설비 내 배관의 가열방법을 대상물의 표면에서 직접 제어할 수 있다면 기존방식보다 에너지가 많이 절약될 수

있다는 가정을 할 수 있다. 이런 방식은 물론 설치에 들어가는 비용을 간과할 수는 없으나 기존 대비 에너지 절약율이 매우 높다면 이런 장치의 설치를 적극적으로 생각해 볼 수 있다 하겠다. 본 논문에서는 화력발전소 배관시스템에 개별 전기가열 콘트롤 시스템을 사용하였을 때와 기존의 방식을 사용하였을 때의 에너지 사용량 차이를 확인하고자 한다.

## 재료 및 방법

화력발전소 배관시스템에 개별 전기가열 콘트롤 시스템을 가동시키는 방법은 다음과 같다. 즉, 플랜트 설비 내 배관에 직접 RTD 센서를 부착함으로써 동결방지 대상물의 온도를 직접 체크하여 대상물의 실제 설정온도에서 개별로 개폐식 제어하는 방법을 사용하는 것이다. 본 연구에서는 겨울철 플랜트 설비 내 배관 내부에 흐르는 물의 결빙을 막기 위하여 대상물 표면온도를 기준으로 한 직접제어 방식과 일정 대기온도 ( $5^{\circ}\text{C}$ ) 이하가 되면 배관을 가열하는 기존 방식을 비교하였을 때, 직접제어 방식이 과연 어느 정도의 에너지 절감 효과가 있는지를 검토하기 위한 시뮬레이션을 실시하였다.

기존방식에 적용되는 대기온도 ( $5^{\circ}\text{C}$ ) 이하가 되는 시간 수는 화력발전소가 있는 장소인 영월을 선택하여 기상청 자료를 바탕으로 하여 계산하였다.  $5^{\circ}\text{C}$  이하의 온도는 가을철의 10월부터 다음해 봄철의 4월까지에서 나타났으므로 총 7개월 동안의 시간 수를 각 월별로 산출하고 이를 합하여 총합시간을 계산하였다. 즉 화력발전소 내에서 이 시간 수만큼 결빙을 방지하기 위하여 배관시스템을 가열하였다고 생각할 수 있다.

컴퓨터 프로그램으로 시뮬레이션을 하기 위한 전초단계로서, 분석에 적용할 대략적인 온도 범위, 적합한 물성치의 선택 등 연구의 방향 설정을 위한 정상상태 분석 (Holman, 1997)을 우선적으로 시행하였다. 정상상태란 말 그대로 독립변수라 할 수 있는 시간에 따른 종속변수의 변

화가 없는 상태를 말한다 (Kreyszig, 2011). 유동수가 일정한 속도를 가지고 유동할 때에는 어느 정도 튜브 내부에서의 이동거리에서는 온도변화가 없다고 가정할 수 있다. 본 정상상태 분석에서의 화력발전소 배관시스템에 유입되는 유동수의 온도는 실 상황에서 화력발전소의 경우를 조사하여본 결과 평균 15°C가 적정하다고 생각하여 이 온도를 택하였다. 대기온도는 영월의 2009년 1월중 가장 대기온도가 낮았던 날의 일평균 온도인 -9.5°C, 그리고 극단적 경우로써 -20°C로 계속 유지되는 경우를 분석하였다.

실제로 있을 수 없는 상황이지만, 대기온도가 매우 낮은 온도 (약 -20°C)로 변하지 않고 계속 지속된다고 하더라도 배관을 감싸고 있는 단열재의 열전도계수가 매우 낮기 때문에 한파가 단열재를 통과하여 튜브 외부표면까지 침투하는 데는 매우 긴 시간이 소요된다 (Myers, 2001).

튜브 내를 흐르는 물과 튜브 내 표면과의 열전달을 산출하기 위하여 사용되는 대류열전달계수는 보통 물이 흐름속도를 가진 강제대류인 경우는 100~20000W/m<sup>2</sup>K이고, 물이 정지되었을 때의 자유대류인 경우 50~1000W/m<sup>2</sup>K 범위의 값을 가지나, 강제대류인 경우에서의 가장 낮은 값인 100W/m<sup>2</sup>K을 채택하였다 (Kreith and Bohn, 2001; Incropera and Dewitt, 2013). 이는 유동속도가 없는 자유대류라 할지라도 하위범위에 해당되는 값에 해당된다 (Carslaw and Jaeger, 1959). 튜브 외부에 싸여진 단열재의 외부 표면과 대기와의 열전달산출을 위한 대기의 대류열전달계수는 강제대류인 경우 25~250W/m<sup>2</sup>K이고, 자유대류의 경우 2~25W/m<sup>2</sup>K의 범위이나, 여기에서도 냉각이 더 빨리 일어날 수 있는 조건인 바람이 많이 부는 경우를 적용하여 강제대류의 중간 범위 값 정도인 100W/m<sup>2</sup>K를 사용하였다.

이와 같은 높은 단계의 대류열전달계수의 적용은 나중에 설명되는 시물레이션을 통한 분석에서 도출된 가열시간보다 실제 상황의 가열시간이 더 높게 나올 수 있는 것을 사전에 방지하

기 위하여 일부러 극심한 기상조건을 택한 것이라 할 수 있다. Fig. 1은 분석에 사용된 튜브 및 단열재의 내부구조를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이  $r_1$ 은 튜브 내부반경을 나타내고  $r_2$ 는 튜브 외부반경 또는 단열재 내부반경, 그리고  $r_3$ 는 단열재 외부반경을 나타낸다.  $T_w$ 는 유동수온도로서 15°C와 20°C를 적용하였고,  $T_a$ 는 대기온도로서 영월의 1월중 가장 대기온도가 낮았던 날의 일평균 온도와 극단적인 경우로서 -20°C를 사용하였다.

튜브는 외경 6인치의 탄소강으로 만들어진 튜브이며 단열재의 재질은 칼슘 실리케이트 (Calcium Silicate)로 이루어져 있고, 단열재의 두께는 30mm를 사용하였다 히팅 케이블 (heating cable)은 Raychem사의 모델인 10BTV2-CR로서 제원은 단면의 가로 세로가 16.5mm×6.6mm의 크기를 갖고 있다. 탄소강과 단열재의 물성치인 열전도계수, 밀도, 정압비열 등은 참고서적 (Baumeister, 1978)을 사용하여 채택하였다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 유동수인 물에서부터 외기까지의 4단계의 열저항을 계산하여 실시한 정상상태 분석의 결과 튜브의 내부와 외부의 표면온도는 거의 같은 것을 알 수 있으며, 이는 유동수의 온도와도 큰 차이를 보이지 않는다. 따

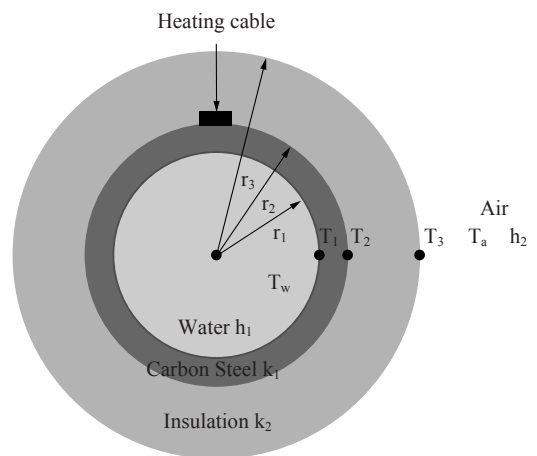


Fig. 1. Internal structure of tube and insulation.

라서 15°C 전후로 유동수가 유입되거나 계속적으로 흐르는 상황에서는 결빙에 대한 우려는 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉 튜브 내 유동수의 결빙에 대한 대비는 유동수의 유입 초기온도가 5°C 전후일 때나, 보수나 점검의 목적으로 물의 흐름속도가 없을 경우에만 고려의 대상이 될 수 있다고 하겠다. 따라서 시물레이션에서는 유동수의 흐름이 정지해 있을 경우를 분석하였다.

시물레이션은 상용 프로그램 패키지인 플루언트(Fluent)를 사용하여 분석하였다. 튜브는 종방향으로 매우 긴 상태이기 때문에 2D 방법을 적용하였다. 원통형의 튜브가 종 방향으로 길이가 길면 2차원을 적용한 결과 치와 3차원을 적용한 결과 치가 차이가 없기 때문에 2차원을 적용하며 많은 변수를 채택하여 다양하게 분석하는 것이 훨씬 효율적이라 할 수 있다. 시물레이션에서 사용한 물성치는 정상상태 분석에서 사용한 물성치와 같은 값을 사용하였다.

프로그램을 통하여 분석한 경우의 수는 다음과 같다. 장소는 영월의 기후를 사용하여 1월중 가장 추웠던 날의 평균온도와 동절기인 11월부터 3월까지 각 월별의 평균온도를 적용하였다.

탄소강 튜브 상부에 병렬로 길게 부착된 히팅 케이블의 가열 열량 공급 조건으로는 열공급이 없을 때 물, 튜브 외표면, 단열재 외표면 온도가 시간에 따라 어떻게 변하는지를 알아보기 위한  $Q=0$ 인 경우와, 일정한 열량이 공급되어 데드밴드 범위 내에서 가열 시스템이 on과 off를 반복하는 경우이다. 발열량은 히팅 케이블 (10BTV2-CR)의 단위길이 당 발열량을 단위체적 당으로 환산한 값을 적용하였다.

물의 초기온도는 10°C, 15°C, 20°C로 3가지 경우를 사용하였고  $h_2$ 값은 대기의 대류열전달계수로 정상상태 분석 시에는 통상 100W/m<sup>2</sup>K를 사용하였으나, 가장 추운 날의 평균 대기온도를 적용했을 때에는 비교를 위하여 유동수의 초기온도 15°C인 경우에 한하여 15W/m<sup>2</sup>K, 25W/m<sup>2</sup>K, 50W/m<sup>2</sup>K, 100W/m<sup>2</sup>K로서 4가지 값을 각각 적용

하여 보았다.

설정온도는 5°C±2°C로 셋팅 하였으며 이는 히팅 케이블로 가열시 데드밴드가 3~7°C사이에서 오르내리는 것이라 할 수 있다. 위에서 언급한 조건으로 분석하여 가열시간을 계산하였으며 각 상황이 초기의 조건에서부터 하루 동안 지속되었을 때와 2일 동안 지속되었을 때의 총 가열시간을 각각 구하여 보았다.

### 결과 및 고찰

먼저 히팅 케이블이 가동하지 않았을 경우의 결과는 다음과 같다. Fig. 2는 영월의 1월 중 가

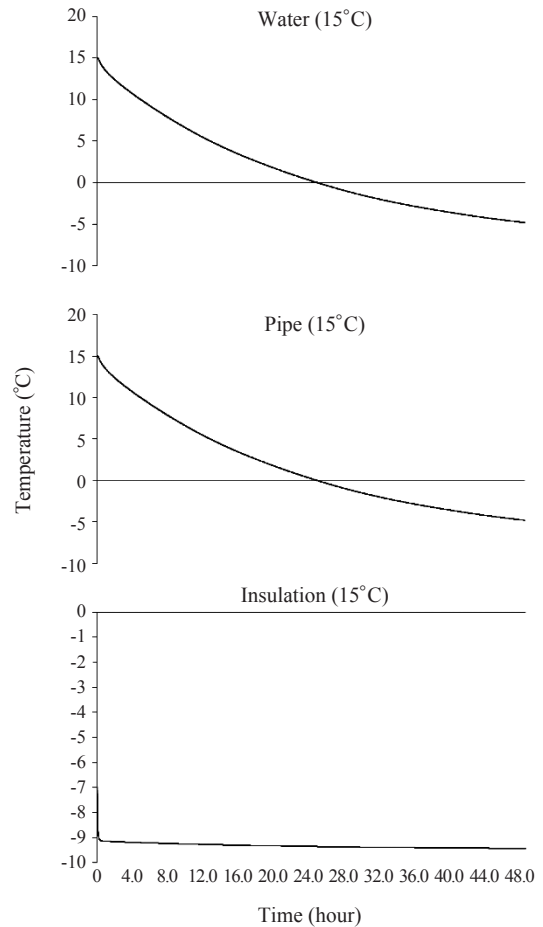


Fig. 2. Temperature vs. time (average temperature of January's coldest day, Youngweol).

장 추웠던 날 (외기온도  $-9.5^{\circ}\text{C}$ )일 때 배관 내 물의 초기온도가  $15^{\circ}\text{C}$ 로 유입된 후 배관 내에서 흐르지 않고 정지되어 있을 경우, 초기 상태에서부터 48시간이 경과하기까지의 물, 튜브 외부표면, 단열재 외부표면 온도의 시간에 관한 변화를 보여주는 그래프이다. 외기의 대류열전달계수는  $100\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 의 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 물 온도와 튜브 외부면 온도는 유사하게 변하는 것을 알 수 있다. 이는 정상상태 분석에서 빠르게 계산하여 본 결과와 같다고 할 수 있다. Fig. 3은 1월의 평균온도인  $-4.4^{\circ}\text{C}$ 인 경우이며, Fig. 4는 2월의 평균온도인  $2^{\circ}\text{C}$ 의 경우를 적용한

그래프이다.

다음은 히팅 케이블이 on과 off를 반복하며 튜브 외부면 온도가 데드밴드사이에 있을 경우이다. 배관 내 물의 결빙을 막기 위하여 히팅 케이블은 설정온도를  $5^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 하여  $3^{\circ}\text{C}$ 가 되면 작동하고  $7^{\circ}\text{C}$ 가 되면 작동을 멈춘다. 결빙 방지를 위한 가열시간을 계산하기 위하여 3가지 경우의 물 초기온도 ( $10^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ )에 대한 시뮬레이션을 하였다. 대기온도는 1월중 가장 추운 날의 평균온도, 동절기 각월의 평균온도를 적용하였다. 1월 가장 추운 날의 경우에 한하여 4가지 경우의 대류열전달 계수를 적용하였다.

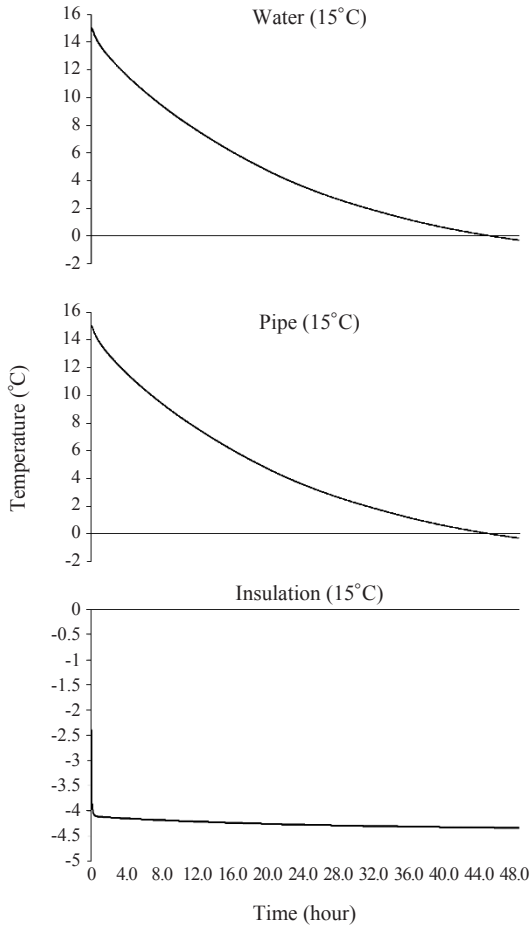


Fig. 3. Temperature vs. time (average temperature of January, Youngweol).

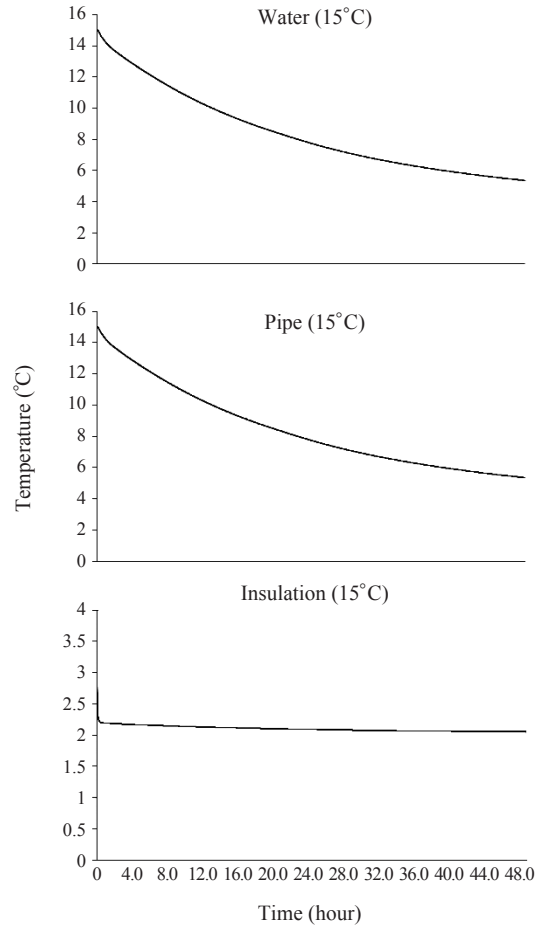


Fig. 4. Temperature vs. time (average temperature of February, Youngweol).

Fig. 5~Fig. 7은 15°C의 물 초기 온도를 사용하고 외기의 대류열전달계수의 값이 100W/m<sup>2</sup>K인 경우를 대표적으로 보여주고 있다. 각 그래프는 물이 정지된 상황에서 초기상태부터 48시간이 경과할 때까지 데드밴드 내의 온도의 변화를 나타내고 있다. 히팅 케이블이 가동하지 않을 때의 그래프와 마찬가지로 물, 튜브 외부표면, 단열재 외부표면의 시간에 따른 온도 변화를 보여주었다.

나중에 Table 2에서 나타낸 바와 같이, 본 그래프들의 분석을 바탕으로 하여 1일 기준으로의 가열시간과 2일 기준으로의 가열시간을 각각 계

산하였으며, 2일 기준으로의 가열시간은 단지 참고사항으로 행하였다.

이상 모든 경우를 종합하여 Table 1와 Table 2에 각각의 경우를 요약하였다. Table 1은 영월에서의 외기조건 6가지를 분석 요약한 것이다. 첫 번째로, 1월 중 가장 추웠던 날의 대기조건이 한 달 내내 지속한다고 보았을 경우에서 가열시간을 계산한 것에 대한 설명은 다음과 같다. 물 초기온도는 10°C, 15°C, 20°C의 세 가지 경우이며, 평균 물 초기온도를 15°C로 가정한 경우 각각 4가지의 대류열전달 계수를 채택하였다.

대류열전달 계수가 크다는 것은 작은 값의 경

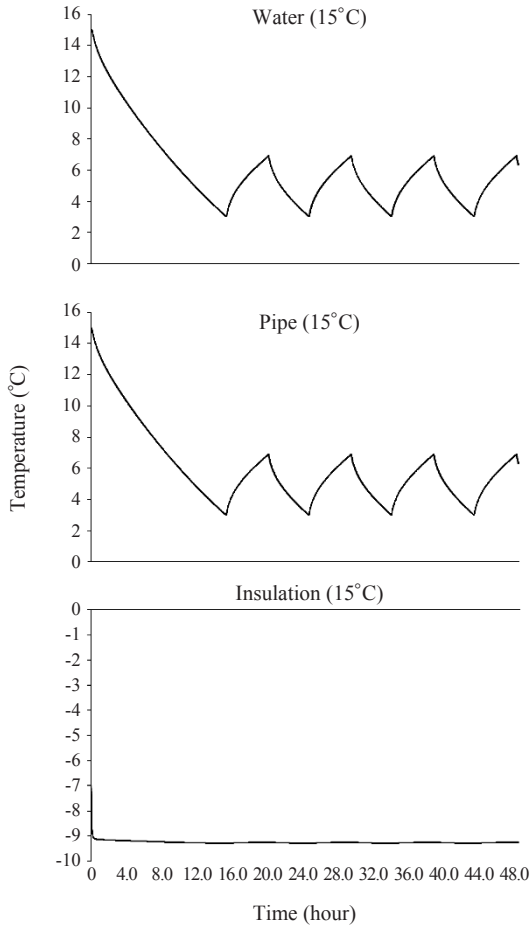


Fig. 5. Temperature vs. time with dead band (average temperature of January's coldest day, Youngweol).

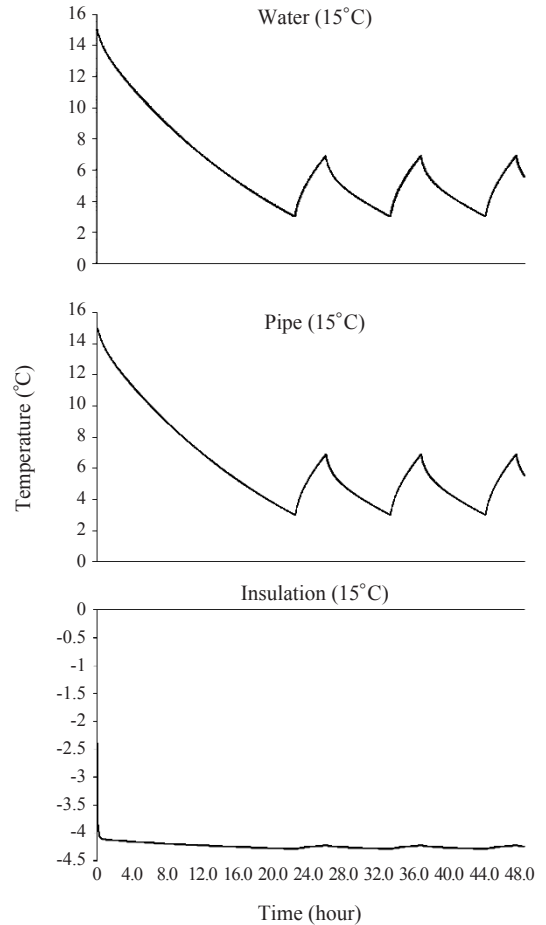


Fig. 6. Temperature vs. time with dead band (average temperature of January, Youngweol).



우보다 바람의 세기가 커서 그만큼 단열재 외부의 냉각강도가 높다는 말이다. 하지만 Table 1에서 알 수 있듯이 가열시간은 대류열전달계수가 다른 값을 취한 각 경우일 때에도 큰 차이를 보이지 않았다. 1일 기준이란 초기온도를 시작으로 1일이 경과된 상황에서의 가열시간을 계산한 것이고, 2일 기준이란 초기온도를 시작으로 48시간이 경과하였을 때 2일 동안의 총 가열 시간을 계산한 후 이를 반으로 나누어 1일로 환산한 것이다.

나머지 5가지의 대기조건은 동절기 각 월의 평균온도로 각 월마다의 가열시간을 계산한 것

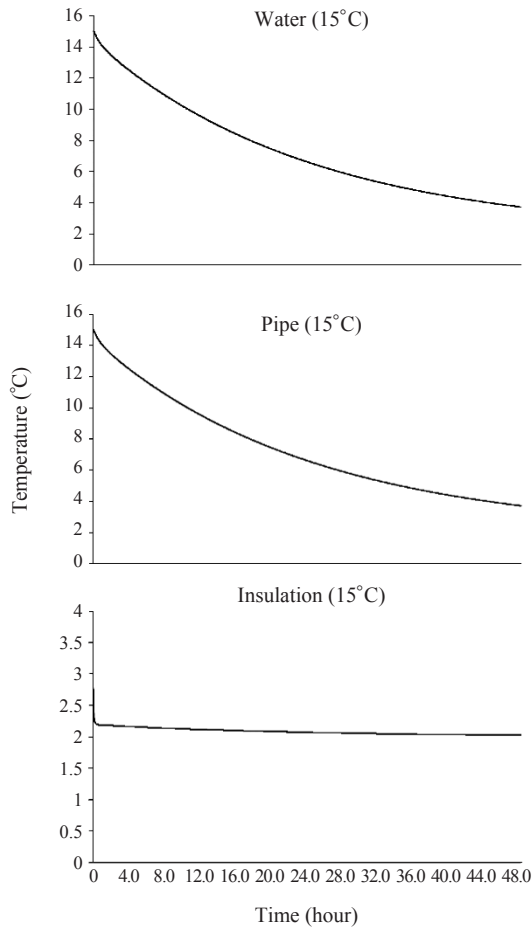


Fig. 7. Temperature vs. time with dead band (average temperature of February, Youngweol).

이다. 이때 물의 초기온도는 15°C, 대류열전달계수는 100W/m²K를 사용하였다.

Table 2는 현재 발전소에서 적용하고 있는 대기온도를 기준으로 한 가열시간과 튜브 표면온도를 기준으로 한 가열시간을 비교한 것이다. 물의 초기온도는 15°C, 대류열전달계수는 100W/m²K인 경우이며, 영월의 동절기 각 월의 평균온도를 사용한 결과를 나타내었다. 참고적으로 1월 가장 추웠던 날의 기상조건이 한달 간 지속되었다고 가정했을 때의 결과도 추가하여 표시하였다. 그와 동시에 튜브 표면온도를 기준으로 하였을 때의 절감비율도 아울러 계산하여 나타내었다. 절감 비율을 계산한 방법 (ASHRAE, 1982)은 다음 식 (1)과 같다.

$$\text{절감 비율 (\%)} = (1 - \text{튜브표면온도 기준 가열 시간} / \text{대기온도 기준 가열 시간}) \times 100 \quad (1)$$

Table 2에서 보는 바와 같이 2일 기준으로 계산했을 경우에도 90%의 높은 에너지 절감 비율을 보이는 것을 알 수 있다. 1일 기준으로 계산했을 경우에는 98%로 거의 100%에 가까운 절감 비율을 보여준다. 1월 중 가장 추웠던 날의 기상조건이 한 달간 계속된다는 가정 하에 실시한 분석 결과도 2일 기준으로 계산하였을 때 59%의 절감 비율을 나타내었으며, 1일 기준으로 계산하면 79%의 높은 에너지 절감 비율을 나타내었다.

물이 정지하고 있을 때의 결과임에도 이상의 높은 절감 비율을 보임에 따라 물의 유동 시에는 극단적으로 대기온도가 낮은 경우를 제외하고는 거의 히팅 케이블이 작동하지 않아도 결빙이 발생하지 않으므로, 튜브표면 온도 측정기준을 통한 가열 방법은 기존의 방법에 비하여 막대한 에너지를 절감할 수 있으리라 생각된다.

**Table 1. Heating time with various operation condition**

Location	Operation condition			Heating time				
	Amb. temperature (°C)	Water temperature (°C)	h [W/m²K]	1 day [min] (hr.)	2 days [min] (hr.)	1 month		
						1 day basis	2 day basis	
Y.W.	-9.5°C (January's coldest day)	10	100	570 (9.5h)	1214 (10.1h)	294.5h	313.1h	
			15	256 (4.3h)	995 (8.3h)	133.3h	257.3h	
			25	270 (4.5h)	1072 (8.9h)	139.5h	275.9h	
			50	280 (4.7h)	1116 (9.3h)	145.7h	288.3h	
			100	281 (4.7h)	1116 (9.3h)	145.7h	288.3h	
		20	100	257 (4.3h)	897 (7.5h)	133.3h	232.5h	
		-4.4°C (Jan. Average)	15	100	91 (1.5h)	613 (5.1h)	46.5h	158.1h
		2°C (Feb. Average)	15	100	0	0	0	0
		5.6°C (Mar. Average)	15	100	0	0	0	0
		5.7°C (Nov. Average)	15	100	0	0	0	0
		-1.8°C (Dec. Average)	15	100	0	389 (3.2h)	0	99.2h

**Table 2. Comparison of heating time with air temperature basis (water temperature 15°C, h=100W/m²K)**

Location	Month	Air temperature basis (hrs.)	Tube outer temperature basis (hrs.)		Energy saving rate(%)	
			1 day basis	2 days basis	1 day basis	2 days basis
Y.W.	1	694	47	158	93	77
	2	462	0	0	100	100
	3	361	0	0	100	100
	4	83	0	0	100	100
	10	23	0	0	100	100
	11	346	0	0	100	100
	12	645	0	99	100	85
	total	2614	47	257	98	90
	*(January's coldest day basis)	694	*(146)	*(288)	*(79)	*(59)

**결론**

시뮬레이션 결과를 종합하여 분석해 보았을 때, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다. 튜브 내

의 물이 일정한 흐름속도를 가지고 유동을 할 때에는 정상상태의 분석에서 알 수 있는 바와 같이 튜브 외표면의 온도는 물의 온도와 거의 차이를



보이지 않는다. 따라서 배관 내의 물이 초기 온도 10°C 이상으로 멈추지 않고 계속 유동한다면 단열재의 열 저항이 매우 높기 때문에 대기의 온도가 매우 낮아도 결빙되지 않으리라 사료된다. 실제의 초기 온도 상황에서 행해진 시뮬레이션의 결과, 영월같이 추운 지역에서도 90%의 절감 비율을 나타내었다. 1일 기준으로 계산했을 때는 거의 100% 가까운 절감 비율을 보여주었다. 1월 중 가장 추웠던 날의 기상조건이 한 달 간 계속 된다는 가정 하에 실시한 분석 결과도 2일 기준으로 계산하였을 때, 영월에서는 59%의 절감 비율을 나타내었다. 1일 기준의 경우에서는, 영월에서 79%의 절감 비율을 나타내었다.

종합적으로 보았을 때, 플랜트 설비 내 배관에 직접 RTD 센서를 부착함으로써 동결방지 대상물의 온도를 직접 체크하여 대상물의 실제 설정 온도에서 개별로 개폐식 제어하는 방법을 사용하면 현재 사용되는 대기 온도 기준의 제어 방법에 비하여 매우 높은 에너지 절감을 할 수 있다고 사료된다.

## 참고문헌

- ASHRAE handbook of 1981 fundamentals. 1982. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., USA, 4.1 – 4.7.
- Baumeister T. 1978. Marks' standard handbook for mechanical engineers. McGraw-Hill, New York, USA, 6.1 – 6.196.
- Carslaw HS and Jaeger JC. 1959. Conduction of heat in solids. Oxford Press, Great Britain, 35 – 223.
- Duffie JA and Beckman WA. 2000. Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons, Singapore, 22 – 135.
- Faghri A. 1995. Heat pipe science and technology. Taylor & Francis, USA, 41 – 55.
- Holman JP. 1997. Heat transfer. McGraw-Hill, New York, USA, 26 – 47.
- Incropera FP and Dewitt PD. 2013. Fundamentals of heat transfer. John Wiley & Sons, Singapore, 136 – 141.
- Kreith F and Bohn MS. 2001. Principles of heat transfer. Brooks/Cole, Pacific Groove, 233 – 300.
- Kreyszig E. 2011. Advanced engineering mathematics. John Wiley & Sons, Singapore, 46 – 99.
- Myers GE. 2001. Analytical methods in conduction heat transfer. McGraw-Hill, New York, USA, 105 – 155.

2013년 1월 16일 접수

2013년 2월 4일 1차 수정

2013년 2월 15일 수리