

상변화물질(PCM)을 이용한 열교환기용 동파방지밸브에 관한 실험적 연구

윤재호*, 김종하*, 정순영*, 양윤섭**, 김성현***, 송덕용***

*한국생산기술연구원(jhyun@kitech.re.kr), (joungha@kitech.re.kr), **원광대학교 산학협력단(yys@koci.re.kr),
***성지공조기술(dy.song@sjjtec.co.kr)

An Experimental Study on the Freezing Protection Valve Using Phase Change Material(PCM) for the Heat Exchanger

Yun, Jea-ho* Kim, Joung-ha* Jeong, Soon-young* Yang, Yoon-sub**
Kim, Seong-Hyun*** Song, Duk-yong***

*Green Energy System Technology Center, KITECH(jhyun@kitech.re.kr),
**Industry-Academic Cooperation Foundation, WonKwang University(yys@koci.re.kr)
***Sungji Air-conditioning Co. Ltd.(dy.song@sjjtec.co.kr)

Abstract

This paper is an experimental study on the freezing protection valve used for solar water heating, air-conditioning systems, and plumbing systems. When the phase change occurs from liquid to solid, most of the substances except water volumetrically shrink. And referred to as PCM(Phase Change Material) a substance with such properties, the phase change temperature varies depending on the material. To prevent the freezing of the plumbing system, such as air-conditioning system in the winter season, we developed a several types of freezing protection valve using PCM whose freezing temperature are 2-4°C. The working principle of the freezing protection valve is that the fluid inside the pipe is released to prevent the system-collapse when fluid temperature reaches the freezing temperature of the PCM. And then the valve is closed and returned to the original position automatically when the temperature of the operating fluid rises. In this paper, the operating temperatures, discharge flow rate and the response characteristics of the valve during the operation are tested and investigated. From the results of this research the freezing protection valves employing PCM are expected to be commercialized in the near future.

Keywords : 동파방지밸브(Freezing protection valve), 상변화물질(PCM:Phase Change Material), 액체상태(Liquid phase), 고체상태(Solid phase), 열교환기(Heat exchanger)

1. 서 론

일반적으로 물은 온도가 0°C 이하로 낮아지면 얼음으로 변화하고 이때 부피가 팽창하게 된다. 따라서 물이 가득찬 밀폐된 공간에서 물이 얼음으로 변화될 경우 부피가 팽창하여 용기가 파괴되는 현상을 동파라 한다.

국내의 경우 겨울철 기온하강으로 인하여 가정용 및 산업용 상수도 배관에 동파사고가 빈번히 일어나 많은 경제적 손실을 발생시키고 있다. 특히 배관의 동파를 방지하는 일반적인 방안으로 배관 외부에 열선을 감아 배관 내부의 온도가 동결 온도 이상을 유지하도록 하고 있으나 장시간 사용시 유지관리나 전기 소비 등의 문제점이 있다.

Air & Coil사(미국)⁽¹⁾는 릴리프 캡 형태로 연결 금속을 캡에 설치하여 얼음이 생성되면서 배관 내부의 압력이 상승하는데, 이때 압력으로 연결금속이 파열되도록 동파방지용 릴리프 캡을 제작하여 판매하고 있다. 이 제품의 경우 구조가 간단하고 설치가 용이한 장점이 있지만, 배관압력 상승에 따라 작동하여 물 배출량이 적게 됨으로 인해서 배출도중 배출수가 얼어 캡의 입구를 막아 배관의 동파로 이어지는 경우도 있다.

그리고 Thermo-Omega-Tech⁽²⁾사의 동파방지밸브는 고체에서 액체로 상변화에 따른 부피 팽창으로 작동하므로 제품 성능은 우수하지만 고가의 가격으로 인하여 일반 소비자들이 제품구입이 어려운 실정이고 이 제품 역시 작동 후 캡을 재결합해야 하는 단점이 있다. 국내에서도 상변화 물질을 이용한 동파방지용 밸브⁽³⁾ 개발에 대한 연구가 보고 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 밸브작동시 교체가 필요하지 않은 상변화 물질(PCM : Phase Change Material)⁽⁴⁻⁵⁾을 이용한 동파방지 밸브를 개발하였으며, 상변화 물질의 특성, 밸브의 구조, 동파방지 밸브 작동 온도, 밸브의 열교환기에의 적용, 물 배출량 등에 대한 연구를 수행하였

다. 이러한 실험결과를 바탕으로 상변화 물질을 이용한 동파방지밸브의 특성에 대한 데이터를 확보하였으며, 동파방지밸브의 상용화를 위한 시제품을 제작하고 특성시험을 수행하였다.

2. 동파방지밸브

본 연구에서는 외기온도를 감지하여 배관 내부가 동결온도 이하로 내려갈 경우 밸브가 작동하는 배관 외부 설치용 동파방지밸브와 배관 내부의 온도를 감지하여 밸브가 작동하는 배관 내부 설치형 동파방지밸브를 설계, 제작하고 성능시험을 수행하였다.

2.1 배관 외부 설치형 동파방지밸브

배관 내부의 물이 순환하지 않는 상태에서 외기 온도가 낮아지면 배관 내부의 물 온도도 낮아져 동파가 발생된다. Fig. 1은 배관 외부 설치형 동파방지밸브를 나타낸다. 배관 외부 설치형 동파방지밸브의 크기는 직경 30 mm, 길이 94.2 mm의 원통형 구조이며, 동파방지밸브에 설치된 상변화 물질은 벨로우즈 내부에 넣어 상변화 물질의 수축 또는 팽창이 벨로우즈의 길이를 변화시키고 벨로우즈가 피스톤을 작동하여 밸브를 개폐하도록 하였다. 외기온도가 하강하면 벨로우즈 내의 상변화 물질이 수축하여 밸브를 개방시키고, 외기온도가 상승하면 상변화 물질이 팽창하여 밸브를 닫히도록 하는 구조이다.

2.2 배관 내부 설치형 동파방지밸브

배관 내부의 물이 정지 상태이거나 순환할 경우 배관의 물 온도가 동결점 온도 이하로 낮아지면 배관 내부에 얼음이 생성되어 동파가 발생할 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위하여 배관 내부 설치형 동파방지밸브를 설계, 제작하였으며, Fig. 2는 배관 내부 설치형 동파방지밸브를 나타낸다. 배관 내부 설치형 동파방지밸브의 크기는 직경 54 mm, 길이 196.6 mm의

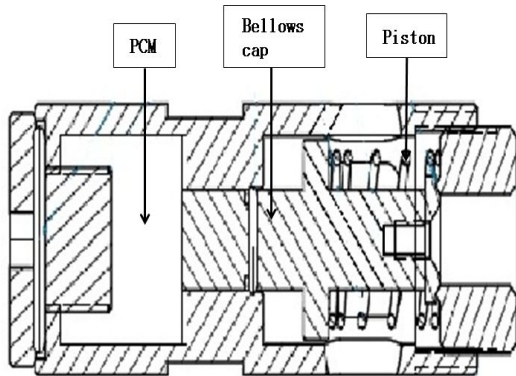


Fig 1. 배관 외부 설치형 동파방지밸브

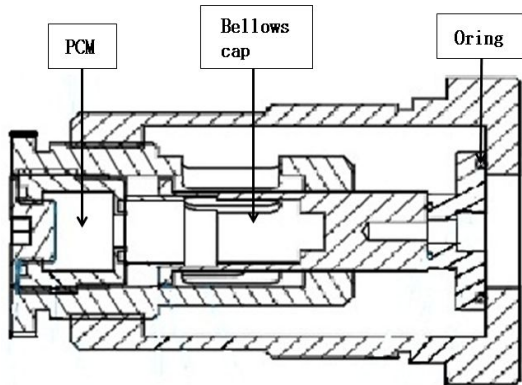


Fig 2. 배관 내부 설치형 동파방지밸브

원통형 구조이며, 배관 내부에 삽입되도록 하였으며 작동원리는 앞서 설명한 배관 외부 설치형 동파방지밸브와 유사하다.

3. 실험장치 및 실험조건

3.1 실험장치

Fig. 3은 상변화 물질을 이용한 동파방지밸브 성능시험에 사용된 실험장치를 나타낸 사진이다. 동파방지밸브의 외기조건을 조절하기 위해 4 kW급 항온항습챔버를 사용하였으며 $-40\sim 90^{\circ}\text{C}$ 의 온도 조절이 가능하도록 하였다. 항온항습챔버 내에는 직경 150 mm, 길이 500 mm 배관을 통하여 동파방지밸브를 결합할 수 있도록 제작하였다.

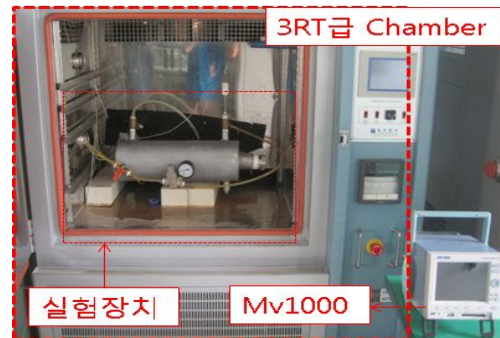


Fig 3. 동파방지밸브의 실험장치

Table 1. Experimental condition

Items	Condition
Freezing protection valve	20A, 50A
Outside temperature[$^{\circ}\text{C}$]	2
Pressure[kg/cm^2]	1.8

배관의 내부 및 항온항습챔버 내부의 온도는 RTD로 측정하였고 배관 내부 압력을 측정하기 위하여 압력센서($0\sim 20\text{ kg}/\text{cm}^2$)를 설치하여 측정하였다. 시험에서 측정된 온도, 압력 데이터는 MV100에 의해서 2초 간격으로 데이터가 저장되고 내부의 압력을 일정하게 유지하기 위하여 공급수 라인에 압력조절기를 설치하였다.

3.2 실험조건

동파방지사험은 배관 내부에 공급수 압력을 $1.8\text{ kg}/\text{cm}^2$, 외기온도 조건을 15°C 에서 2°C 로 설정하여 항온항습챔버 내부의 온도를 낮추고 배관 내부의 물 온도가 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 로 될 때까지 항온항습챔버 내부 온도를 조절하여 동파방지밸브의 작동여부를 판단하였다. 실험조건은 Table 1과 같다.

4. 동파방지밸브 실험결과 및 분석

4.1 상변화 물질 물성시험

일반적으로 액체에서 고체로 상변화 과정은 액상, 액상+고상, 그리고 고상의 상변화 완료영역으로 나눌 수 있다. Fig. 4는 액체 상

태에서 고체 상태로의 상변화 실험에서 상변화 물질의 과냉각 온도가 약 1°C로 나타났으며, 이후 고체로 상변화가 진행되었다. 외부 온도를 -3.5°C로 유지하여 상변화 물질의 이상영역의 온도는 평균 2°C 부근을 유지하였으며 실험데이터로부터 상변화 물질의 상변화 구간은 1~3°C 구간임을 알 수 있었다.

Fig. 5는 상변화 물질의 용해 실험결과를 나타낸 그래프이다. 본 실험에서는 수조온도를 초기에 4°C에서 시험을 수행하였으나 상변화 물질이 용해되지 않아 수조의 온도를 5°C로 상승시켜 실험을 수행하였다. 시간이 경과됨에 따라 상변화 물질은 고체 상태에서 액체 상태로 변화가 명확하게 드러나는 것을 확인하였다. 그러나 4°C와 5°C의 온도차이가 존재하는 것을 확인하고 정확한 용해 상변화 온도를 찾기 위해 4.5°C의 온도조건에서 실험을 실시하였다. 이때는 상변화 물질이 액체 상태와 고체 상태가 공존하는 현탁액 상태를 나타내며 이는 상변화 물질의 온도가 4.5°C가 된 시점부터 실험 종료시까지 일정하게 유지되었다. 이로서 상변화 물질의 용해온도는 4.5°C로 판단할 수 있었으며, 그 이상의 온도에서 상변화 물질의 용해가 완료된다는 것을 알 수 있었다.

Table 2는 상변화 물질의 물성치를 나타낸 것이다. 본 과제에서 사용한 상변화 물질은 상온에서 무색의 액체 상태로 존재하다가 동결시 1~3°C에서 고체 상태로 상이 변화하며, 용해시에는 2~5°C에서 액체 상태로 상이 변화하기 시작한다.

4.2 배관 외부 설치형 동파방지밸브 시험

배관 외부 설치형 동파방지밸브 성능시험은 동파방지밸브를 물탱크에 설치하고 이를 항온항습챔버에 넣고 내부 온도를 -10°C로 설정하여 1시간을 유지한 후 다시 항온항습챔버 내부 온도를 30°C로 설정하여 30분을 유지하는 반복시험을 하였다. Fig. 6은 배관 외부

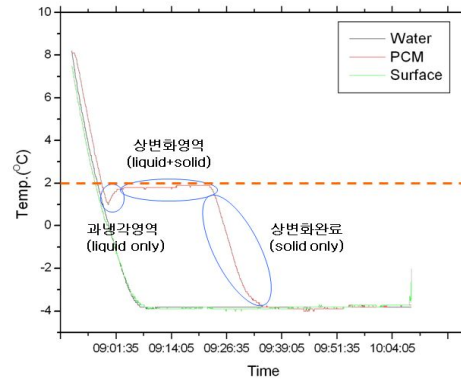


Fig 4. 상변화 물질의 동결시험

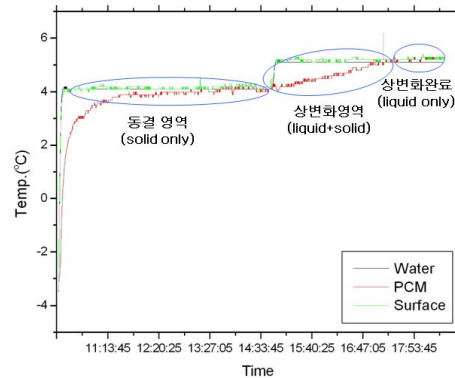


Fig 5. 상변화 물질의 용해시험

Table 2. 상변화 물질의 물성치

Melting point [°C]	2~5
Congeeing point [°C]	1~3
Thermal conductivity [W/m·K]	0.2
Flash point [°C]	112
Density (liquid/solid), [kg/l]	0.77/0.89

설치형 동파방지밸브의 작동은 시간에 따른 압력 및 온도변화로 나타낸다. 항온항습챔버 내부온도가 -10°C로 하강함에 따라 탱크 내부의 물 온도도 서서히 하강하게 되고 탱크 내부 물 온도가 3°C에서 밸브가 작동하여 물이 배출 될 때 내부 압력이 1.8 kg/cm²에서 0.8 kg/cm²로 하강하였다. 물이 배출되고 나면 15°C의 공급수가 배관으로 주입되고 온도 감지유닛이 15°C의 물을 감지하여 수축되었

던 상변화물질을 다시 팽창시켜 밸브를 닫고 내부 압력이 1.8 kg/cm²로 상승하게 된다.

항온항습챔버 온도를 -10℃에서 30℃로 반복실험 한 결과 동일한 경향으로 나타났다. 이는 일회용이 아닌 반복적으로 사용이 가능한 동파방지밸브의 내구성을 보여주는 것으로 판단된다.

4.3 배관 내부 설치형 동파방지밸브 시험

배관 내부 설치형 동파방지밸브 성능시험은 외부 설치형 동파방지밸브와 동일하게 항온항습챔버 내부에 넣어 항온항습챔버 내부의 온도를 1℃로 설정하여 배관 내부의 물 온도를 하강시키면서 동파방지밸브의 특성을 시험하였다.

Fig. 7은 배관 내부 설치형 동파방지밸브의 작동을 시간에 따른 압력 및 온도로 나타낸 것이다. 항온항습챔버 내부온도를 1℃로 일정하게 유지할 경우 배관 내부 물 온도가 하강하였으며, 배관 내부 물 온도가 3℃에서 동파방지밸브가 작동하여 물이 배출될 때 배관 내부 압력이 1.8 kg/cm²에서 0 kg/cm²로 하강하였다. 이 때 물이 배출되고 공급수가 보충되어 배관 내부 물 온도가 상승하게 된다. 배관 외부 설치형 동파방지밸브와 달리 물탱크에 상변화 온도 이상의 공급수가 공급되어 반복시험을 하지 못했다. 배관 내부 설치형 동파방지밸브는 내부 물을 직접적으로 감지하여 작동하기 때문에 외기를 감지하는 배관 외부 설치형 동파방지밸브에 비해 빠른 응답성을 갖고 배관의 동파를 방지할 수 있는 장점이 있다.

4.4 동파방지밸브의 시간당 배출량 측정

실제로 동파방지밸브가 작동할 때, 배관으로부터 물이 배출되는데, 이때 시간당 물의 배출량이 동파방지밸브의 중요한 특성이 된다. 이를 측정하기 위하여 배관의 압력을 1.8 kg/cm²로 유지하고 밸브 개방 간극에 따른

배출량을 측정하였다. Fig. 8은 밸브 간극에 따른 시간당 배출량을 나타내는 그래프로 간극이 증가하면서 배출량도 증가하는 것을 알 수 있다. Table 3은 외부 설치형과 내부 설치형에

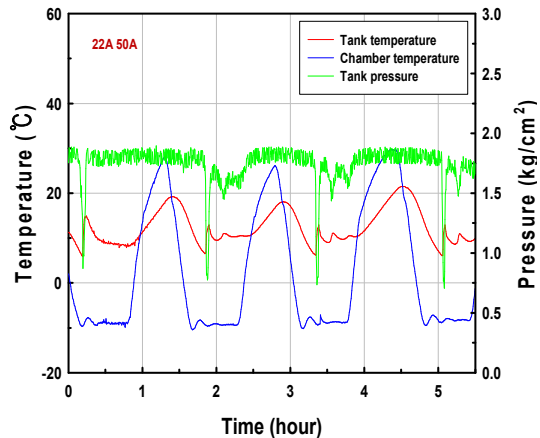


Fig. 6 배관 외부 설치형 동파방지밸브의 작동 시험

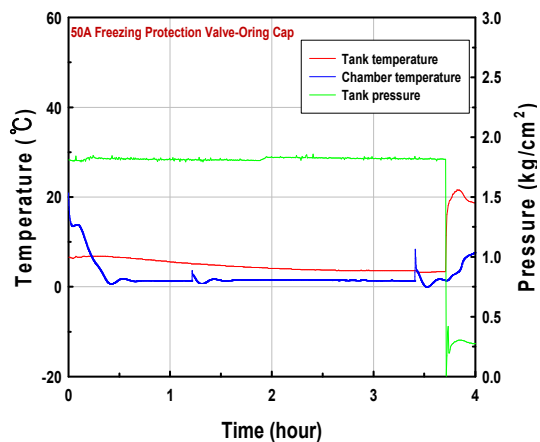


Fig. 7 배관 내부 설치형 동파방지밸브의 작동시험

대한 동파방지밸브의 개폐 길이에 따른 시간당 배출량을 요약한 것이며, 표에서 알 수 있듯이 밸브 간극이 5 mm인 경우 배관 외부 설치형 동파방지밸브는 1.5 ton/hr, 배관 내부 설치형 동파방지밸브의 경우 7.7 ton/hr의 배출량을 나타냈으며 개폐 길이 10 mm인 경우 배관 내부 설치형 동파방지밸브의 배출량이

12.5 ton/hr이 배출되었다.

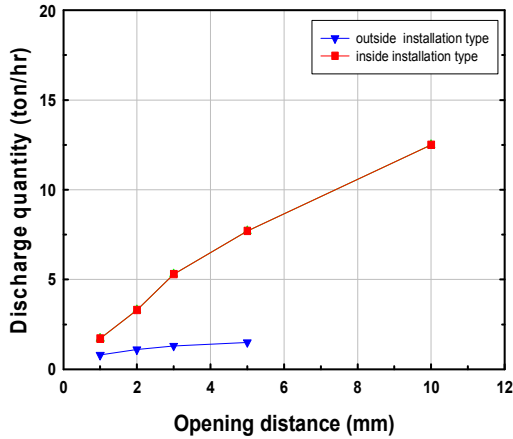


Fig. 8 동파방지밸브 개폐 길이에 따른 시간당 배출량

Table 3. 개폐 길이에 따른 시간당 배출량 요약

		개폐 길이(mm)				
		1	2	3	5	10
배출량 (ton/hr)	외부설치형	0.8	1.1	1.3	1.5	-
	내부설치형	1.7	3.3	5.3	7.7	12.5

4.5 공조용 열교환기 실증 실험

본 연구에서 개발한 동파방지밸브를 공조용 핀-튜브 열교환기에 적용하여 실증 실험을 수행하였다. 상변화를 이용한 동파방지밸브를 공조용 핀-튜브 열교환기(Fig. 9)의 입·출구 헤더에 부착하여 실제 조건과 유사한 환경인 -2°C 로 조정된 대형 챔버 내에서 실시하였다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 외기온도가 낮아지면 열교환기 내부 물 온도는 하부가 먼저 낮아지나 하부는 열교환기 내부의 온도가 동파방지밸브로 열전도되어 냉각속도가 상부보다 느려진다. 따라서 먼저 상부의 상변화를 이용한 동파방지밸브가 개방되고 추후 하부의 상변화를 이용한 동파방지밸브가 개방되어 배수가 시작되면 상부의 밸브는 열교환기 내부의 물이 배출되면서 외기온도를 따라 냉각된다. 하부의 밸브는 열교환기 내부의 물이 배수되는 동안 내부의 물 온도의 영향을

받으며 모두 배수된 후에 외기의 온도를 따라 변하게 된다.



Fig. 9. 동파방지 밸브 장착(열교환기)

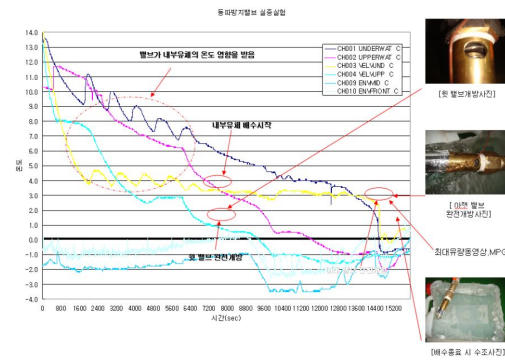


Fig. 10 열교환기 동파방지밸브 시험

5. 결 론

본 연구에서는 겨울철 배관의 동파 문제를 해결하기 위하여 상변화 물질(PCM)을 이용한 동파방지밸브를 개발하였으며, 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 상변화 물질의 특성시험 결과로부터 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 에서 상변화하는 물질을 선정하였고 이를 이용하여 배관 외부 설치형과 배관 내부 설치형 동파방지밸브를 개발하였으며 외기온도 변화에 따른 동파방지밸브의

작동특성을 확인하였다.

- (2) 배관 외부 설치형 및 내부 설치형 동파방지 밸브의 외기온도조건에 따른 작동특성과 시간당 배출량 등을 실험하였으며, 동파방지밸브의 개방 간극에 따른 시간당 배출량은 개폐 길이 5 mm에서 최대 7.7 ton/hr, 10 mm에서 최대 12.5 ton/hr이 됨을 알 수 있었으며 이는 실제 동파방지밸브의 설치시 중요한 설계변수로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구를 통하여 개발된 동파방지밸브를 열교환기에 적용하여 실증 테스트를 수행하여 검증하였으며, 동파방지밸브가 상용화 될 경우 겨울철 동파로 인한 막대한 산업적 피해를 예방할 수 있어 그 파급효과는 클 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Air & Coil사(미국) 제품 카다로그
2. Thermo - Omega-Tech사(미국) 제품 카 다로그
3. 정순영, 윤재호, 김종하, 양윤섭, 김성현, 송덕용, “상변화물질(PCM)을 이용한 공기조화 시스템용 동파방지밸브 실험적 연구”, 태양에너지학회 학술대회논문집, Vol. 32, No 2, 2012.11
4. 사업화연계 기술개발사업 “상변화 물질을 이용한 동파방지밸브 사업화 기술 개발” 연구의 최종보고서, 지식경제부, 2012. 5.
5. 부품소재전문기업기술지원사업 “배관용 동파방지밸브 개발 및 상용화 기술지원” 연구의 최종보고서, 지식경제부, 2009. 6.