

# 노출된 배관 및 장비의 동결 방지 기법 (The dynamic of freeze)

김 영 호  
씨엔티코퍼레이션

## 1. 서언

대부분의 사람들은 전공에 관계없이 동결(凍結, freeze)의 기본 요소가 무엇 인지를 알고 있다. 다만 왜, 어떤 과정으로 동결이 이루어지며 그 결과가 어떻게 나타나는지에 대하여 완벽하게 알고 있는지 또는 어렴풋이 알고 있는지의 차이가 있을 뿐이다.

무슨 일이든 원인을 알면 대책 수립도 쉽다. 마찬가지로 동결의 기본원리를 잘 이해하면 동결방지 방법을 터득하는 일도 쉽다. 그런 다음에는 과거에 경험한 적이 있는 일화(逸話)와 같은 예나 자료를 통하여 어떠한 형태의 동결도 방지할 수 있는, 산업적으로도 유용한 방법을 찾아낼 수 있게 된다.

본고(稿)는 동결역학(凍結力學, Dynamic of Freeze)의 입문서로써, 그동안 여러가지 상황, 예를 들면 기관차 냉각설비(locomotive cooling system)의 동결, 제조공정 설비의 동결, 태양열 집열기의 동결, 노출된 장비나 배관의 동결 등등 흔히 경험하는 사고에 대하여 어떻게 이를 방지할 것인가에 대한 해답을 제시하고 나아가 선진 국가들이 오래전부터 사용하여 동파(凍破)사고로 인한 막대한 손실을 줄임으로써 크게 경제적 효과를 누리고 있는 동결방지밸브(Freeze Protection Valve, FPV)에 대한 정보를 제공할 것이다.

동결 방지 또는 동결로 인한 피해를 줄이기 위하여 고민해 오던 일들로부터 자유로워 질 수 있기를 기대하는 바이다.

## 2. 동결에 대한 역학적 해석

### 2.1 동결에 대한 잘못된 이해

물이 언다는 것은 액체에서 고체로의 상변화를 뜻한다. 온도가 하강하면 분자(molecule)의 운동은 점점 더 억압되어 움직임이 느려지다가 어떤 온도에 도달하면 결국 분자운동이 멈춘다. 이러한 결과는 얼음 또는 고체상태의 물을 보고 알 수 있다.

이와 같은 현상은 물 분자 활동을 감소시키며 또한 유동 속도가 느려진 물이나 얼음이 팽창하는 원인이 된다. 팽창이 되므로 온도가 높을 때의 액체 형태에서 보다 더 넓은 공간이 필요하게 된다. 반대의 개념으로 물을 가열하면 물 분자의 운동은 점점 더 활발해져서 어느 온도에 도달하게 되면 기화가 이루어지며 결국에는 증기가 된다.

이런 과정에 대하여 잘못된 관념이 하나 있다. 그것은 『물이 계속 흐를 수 있다면 동결되지 않는다』는 것이다. 그러나 이러한 생각은 틀린 것이다. 더 말할 필요 없이 『물은 0℃에서 동결된다』

물이 얼면 팽창한다는 평범한 것 같은 지식을 잘 이용하면 산업에 유용하게 활용할 수 있는 동결방지 방법을 찾을 수 있다. 배관 내의 물이 얼면 그 배관계통에는 장애가 발생되고 물의 흐름은 차단된다. 얼음은 물보다 체적이 크기 때문에 더 큰 공간을 필요로 하므로 배관처럼 제한된 공간에서 물이 얼게 되면 엄청난 내압을 발생시켜 관은 물론 배관계를 구성하고 있는 관이음쇠 밸브 등을 파괴 시키는 것이다. 이것이 동파(凍破)이다.

관이나 밸브의 파단으로 인한 피해는 망가진 부분을 복구하기 위한 인건비뿐만 아니라 시설을 사용할 수 없는 기간 동안의 불편과, 특히 공장의 경우에는 영향을 받은 구간에서의 생산 차질로 인한 소득의 감소 등 여러가지로 막대한 경제적 손실이 뒤 따른다.

그러므로 사전에 이러한 피해를 방지하기 위한 효과적인 조치를 취하기 위해서는 동결에 대한 이해를 확실히 할 필요가 있다.

## 2.2 동결의 원리

배관이나 밸브와 같은 설비시설이 동결되는 기본원리는 무엇인가?

물은 0℃ 또는 그 이하의 온도에서 동결된다. 물이 동결되는 온도에 도달하기 위해서는 가진 열을 모두 이동 즉 열교환해야 한다. 열은 온도가 높은 쪽에서 온도가 낮은 쪽으로 이동하는 특성을 가지므로 관내 물의 온도가 7℃이고 외기 온도가 -4℃ 라면 물이 가진 열은 외기로 이동하게 된다.

이렇듯 한 장소에서 다른 장소로 열이 전달되거나 이동하는 현상은 자연의 법칙이다. 열은 에너지의 한 형태이고 열 이외에도 화학적, 전기적, 기계적 및 핵 에너지 등이 있으며, 각각은 한 형태에서 다른 형태의 에너지로 변환될 수 있다.

열은 Kcal로 나타내며, 1Kcal는“1Kg의 물을 1℃ 상승시키는데 필요한 열량”으로 정의된다. 바꾸어 말하면 1Kcal의 열을 빼내면 물 1Kg의 온도는 1℃ 낮아 지게 될 것이고, 충분한 열전달이 이루어지도록 하면 물의 온도는 0℃까지 떨어질 것이고 결국은 얼게 된다. 즉 물의 양을 조절하면 온도의 변화에 영향을 줄 수가 있다.

1L와 2L 짜리 2개의 용기가 있다. 1Kcal의 정의를 적용하면 물을 전부 기화 시키거나 얼게 하기 위해서 큰 용기는 작은 용기에 비하여 두 배의 열이 필요하다. 자연적인 형태로서의 연못을 예로 들어보자. 연못이란 땅이 침하되고 거기에 물이 채워진 것인데, 가장자리는 수 cm의 깊이로부터 중앙은 수십, 수백 cm의 깊이이다. 물이 깊은 부분은 어느 속도가 느리다. 연못 중앙부근에는 물의 양이 많고, 많은 물이 얼기 위해서는 또한 많은 열의 이동이 필요하여 동결 온도에 도달하는 시간이 길어지기 때문이다.

여기서 동결의 핵심이 『존재하는 물의 양과 물로부터 발생하는 열손실율』임을 알 수 있고, 이것으로 동결에 소요되는 시간을 계산할 수 있다.

열손실이 일어날 수 있는 주요 요인은

\*관내 수온과 외기온도 차

\*배관이나 장비 주변의 풍속

\*관의 외표면적

\*관 벽의 열저항 등이며

열손실은 이들 중 관의 외표면적과 온도차에 정비례한다. 그러므로 외표면적과 온도차가 2 배로 증가한다면 열손실 또한 두배로 증가된다. 관내의 물이 흐르지 않는 상태인 배관에 두껍게 보온을 해준다면 관벽의 열저항이 커지게 되므로 열손실율은 크게 저하되고 동결에 소요되는 시간은 길어지게 될 것이다.

### 3. 동결방지 기법

내 외부에 온도차가 존재하는 상태에서의 전혀 보온되지 않은 관이라면 열손실이 계속적으로 이루어져서 결국 관내의 물은 동결될 것이다. 그러면 과연 동결에 대한 해법은 무엇인가? 산업분야에서 배관계통의 동결을 방지하는 데에는 두 가지의 기본적인 기술이 사용된다.

\*트레이싱 방법(The tracing technique)

\*물을 빼는 방법(The bleed or drain technique)

#### 3.1 트레이싱 방법

일반적으로 다음의 두 가지 방법이 사용된다.

(1)전기적 방법(Electric tracing)

배관길이 만큼의 열선(熱線, electric heating cable)을 배관의 하부에 붙들어 맨 다음 보온하는 방법이다. 열선에서 발생하는 열로 배관으로부터의 열손실을 상쇄시켜 관내의 물과 배관을 동결온도 이상으로 유지하는 것이다. 그러나 이 방법은 규모가 큰 시설에서는 실용적이지 못하다. 열선 자체의 코스트는 물론 동결을 방지하기 위하여 발열되어야 할 만큼의 전기료도 그렇고, 열선자체도 손상되기 쉽다는 단점이 있기 때문이다. 이에 더하여 인화될 수 있는 물질이라 전기적 스파크가 일어날 경우에는 화재의 위험을 안고 있다.

(2)증기를 사용하는 방법(Steam tracing)

증기 공급원으로부터 소구경의 동관을 인출하여 동결을 방지해야 하는 배관 계통을 따라 배관한 다음 보온하는 방법이다. 트레이싱 배관 끝에는 응축수에 의하여 증기의 공급이 차단되지 않도록 증기트랩을 설치해 주어야 한다.

이 경우, 온수난방방식을 적용하는 시설에서는 증기대신 온수를 사용할 수도 있다.

#### 3.2 물을 빼는 방법

증기를 사용하는 것처럼의 트레이싱 배관 비용이 없어도 되는 방법. 즉 온도변화에 민감한 밸브를 사용하여 해당 구간 배관 내의 물을 빼내는 방법이다. 어떻게 물을 뺄 것이냐 하는 것은 다음과 같이 물을 공급하는 시스템에 따른다.

\*물의 공급이 별도로 이루어지는 시스템(A fixed volume system)

\*물의 공급이 계속되는 시스템(A re-supply system)

(1) 물의 공급이 별도로 이루어지는 시스템

시스템 내 물의 양에 변화가 없는 시스템으로, 동결 온도에 도달하기 직전에 퇴수가 되면 시스템 내는 비워지게 된다. 물을 재충전 하기 위해서는 별도의 장치를 사용하지 않으면 안 된다. 이런 시스템의 예는 미국이나 캐나다에서 사용 하는 디젤기관차(diesel locomotive)용 냉각장치(cooling system)를 들 수 있다.

그러나 이런 냉각장치는 냉각수의 유동량(750- 1900LPM)이 적기 때문에 철도 차량의 냉각계통에 적용하는 동결방지에 비하여 매우 비경제적이다.

철도차량에서는 엔진 보호를 위하여 수냉각(all-water cooling)방식을 적용 한다. 이 엔진 냉각시스템은 하나의 폐회로(closed loop)이며, 엔진과의 열교환에 의해 고온으로 가열된 냉각수는 순환펌프에 의해 냉각기(radiator)에 보내져 냉각된 후 다시 엔진으로 보내지는 연속 사이클이다. 그러므로 어떠한 이유로든지 영하의 온도에서 엔진이 정지(shut down)되면 엔진 동파라는 심각한 피해를 당할 수가 있다. 그리고 그 피해를 복구하기 위해서는 막대한 비용과 노동력이 수반된다.

바로 이런 철도차량에서의 동결방지 전용으로 사용되는 밸브가“GURU Plug”이다. 이 밸브는 특별히 제작된 티(tee)나 플랜지 등을 사용하여 냉각계통의 최하단부에 설치하면 되고, 이 밸브(또는 플럭)는 엔진이 가동 중일 때 내부의 물이나 외부의 공기 온도를 감지하여 물의 온도가 높으면 폐쇄되도록 설계된 것이다. 엔진이 정지 되면 이어서 전 냉각시스템도 멈추게 되고, 소구경 배관으로부터 동결이 시작되기 직전에 GURU Plug의 기온 감지 결과에 따라 밸브는 민첩하게 열리게 된다. 따라서 전체 배관계통에서도 급격히 배수가 이루어지게 되므로 동결되지 방지 된다.

이런 형태의 밸브는 더운 물(warm water, 여기서는 동결 직전의 냉각된 물보다 아직은 온도가 높은 상태의 물을 말한다)이 퇴수되고 난 후에는 별도의 설비에 의하지 않고서는 재공급 할 수 없는 배관계통이나 장비에 설치한다. 그러므로 물이 완전하게 빠질 수 있도록 배관계통의 가장 밑 부분에 설치해야 한다.

그림 1은 실제 산업분야에 사용되고 있는 제품의 예를 보여주는 것으로, 물이 설정된 동결 직전의 온도(40°F 또는 47°F<4.4℃ 또는 8.3℃>)에 도달하면 카트리지가 자체적으로 몸통에서 분리되어, 단 시간의 퇴수로 동결이 방지된다. 물을 재충전하기 전에 카트리지를 가열하는 간단한 조치로 밸브는 원래의 상태로 되돌아간다.

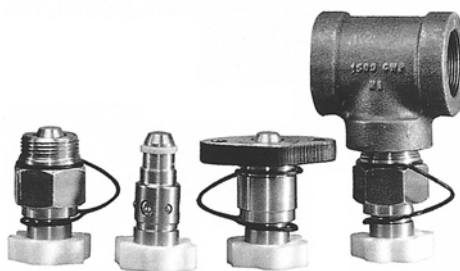


그림 1. Freeze Protection Plug

## (2) 물의 공급이 계속되는 시스템

물이 빠지면 빠지는 만큼이 계속하여 다시 채워지는 즉 압력이 작용하는 물 공급원과 연결된 시스템을 말하는 것으로, 일반적인 급수공급 시스템을 생각하면 된다. 예로 정원이나 잔디밭에 물주는 호스를 들 수 있다. 호스의 물이 노즐을 통해 빠져나가거나 없어져도 수도나 다른 물 공급원에 의하여 다시 그만큼이 채워진다. 이처럼 물의 공급이 계속되는 시스템으로써 동결방지를 철저히 해야 하는 경우는 다음의 세가지를 들 수 있다.

\*실험실이나 사무실에서 음용수 공급시스템

\*위험한 작업구간에 설치된 세이프티 샤워(safety shower)

\*석유화학 공장 등에서의 소방용 급수시스템

이런 배관계통에 공급되는 물은 저수탱크나 우물 물을 원천으로 한다. 그리고 고저차를 이용하거나 펌프로 가압하여 사용 기구가 설치된 장소까지 공급된다. 그래서 사용기구 주변의 어떤 구간에는 동결을 방지해야 하는 조치가 필요해 진다.

그림 2와 같은 지상에 노출된 배관은 외기온도가  $-12^{\circ}\text{C}$  이므로 열손실이 일어나 관 내 물의 온도는 낮아지고 만약 밸브가 폐쇄된 상태라면 A-B 구간은 동결 된다. 그러면 여기서 노출된 배관 끝에 설치된 밸브가 어떤 기능을 가지고 어떻게 동작 하게 된다면 동결이 방지되는 지를 살펴보자.

B지점에서의 물의 온도가  $4.4^{\circ}\text{C}$  ( $40^{\circ}\text{F}$ )에 도달하면 밸브는 아주 천천히 개방되고 매립되어 있는 주관 내의  $7^{\circ}\text{C}$  물은 유동을 시작하여 지상에 노출된 배관을 통해서 밸브 밖으로 흐르게 된다. 물이 잘 흐른다면 관 내의  $7^{\circ}\text{C}$  물은 밸브에서처럼  $4.4^{\circ}\text{C}$  이하로는 냉각되지 않을 것이다. 만약 온도차가 더 커졌거나 노출된 배관 주변에 바람이 강하게 불면 밸브의 개도는 더 커지고 따듯한 물이 흐르는 양이 증가하여 토출부에서의 물의 온도는  $4.4^{\circ}\text{C}$  이상으로 유지될 것이다.

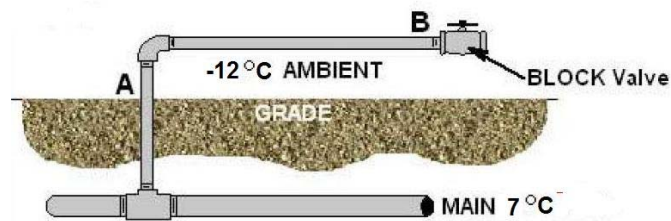


그림 2. 노출 배관의 예

매립된 관의 더운 물( $7^{\circ}\text{C}$ )이 시스템내의 냉각된 물( $4.4^{\circ}\text{C}$ )을 밸브 밖으로 배제 시킨 결과이다. 이 과정은 온도계를 지참한 시험자로 하여금 물의 온도변화에 따른 밸브 조작을 통하여 확인할 수 있다.

이상에서 온도변화를 감지하여 물의 유동을 제어함으로써 노출된 배관이나 장비의 동결을 방지하는 용도로 개발된 것이“동결방지밸브(Freeze Protection Valve, FPV)”이다. 그림 3은 바로 이 FPV를 설치하여 위의 과정이 자동적으로 이루어지도록 한 예를 보여주는 것이다.

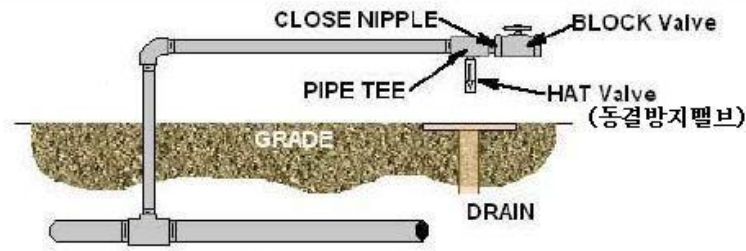


그림 3. 노출된 배관에 동결방지밸브를 설치한 예

동결방지밸브는 관 내 물의 온도를 감지하여 동결이 방지될 수 있을 만큼의 물이 흘러나가도록 개도를 조절한다.

전술한 바와 같이 배관으로부터의 열손실에 영향을 주는 인자는 외기 온도와 바람의 속도 외에도 여러 가지가 있다. 따라서 FPV는 상황에 따라 자동적으로 동결되지 않게 수온이 유지되도록 퇴수량을 조절한다. 밸브 내부에 있는 온도 감지부는 센서(thermostat)인 동시에 밸브의 플럭을 움직여 주는 동작부(actuator) 임으로 외부의 동력이 불필요 하다. 이점이 또한 FPV의 특징이다.

그림 4는 실제 산업분야에 사용되고 있는 제품의 모델을 보여주는 것이다.



a) 내부 물의 온도 감지식      b) 외기 온도 감지식

그림 4. 배관 및 제조 산업분야 사용되는 동결방지밸브

그림 4의 a는 내부의 유체의 온도를 감지하는 형태로, 내부유체가 동결온도에 가까워지면 Thermal actuator가 작동하여 밸브가 개방되고, 동결에 안전한 범위가 되면 밸브는 다시 폐쇄되는 밸브이다. 이 밸브는 외기 온도에 영향을 받지 않고 내부유체가 동결의 위험이 있을 때에만 개방된다.

그림 4의 b는 외기 온도를 감지하는 형태로, 내부의 Thermal actuator에 의해 외부 온도가 감지되어 4.4℃(40°F)가 되면 밸브가 개방되기 시작하여 퇴수가 되고, 다시 기온이 4.4℃(40°F)를 초과하면 폐쇄되어 계통이 다시 정상으로 유지 되게 하는 밸브이다. 그림 5는 이런 제품들이 적용되는 사례와 설치 방법을 보여 주는 것이다.

FPV의 용도별 설치 시의 유의점은 ■FPV는 가능한 한 노출된 관의 말단에 근접 하도록 설치한다. 이는 밸브 하류에 냉각된 물이 빠지지 않아 동결될 수 있는 부분이 없도록 하기 위함이다. 또한 주관으로부터 분기된 지관이 여러 개 일 경우에는 매 지관마다 FPV를 설치해야 하며, FPV 토출 측에는 퇴수관을 두어야 하고, 이 퇴수관 또한 동결되지 않도록 해야 한다. ■FPV는 난방배관 등과 같은 열원(전도, 대류 및 복사 포함)으로 인하여 밸브의 작동에 영향을 줄 수 있는 부근에 설치해서는 안 된다. ■FPV는 동절기에 접어들기 전에 작동 여부를 간

단히 검사할 수 있다. 검사 방법은 적당한 크기로 얼음 주머니를 만들어 이것으로 밸브를 감싸면 수분 후에 퇴수가 시작되고 얼음 주머니를 제거하면 서서히 퇴수량이 줄다가 드디어 멈추게 된다. 이로써 밸브의 개폐가 확인된다.

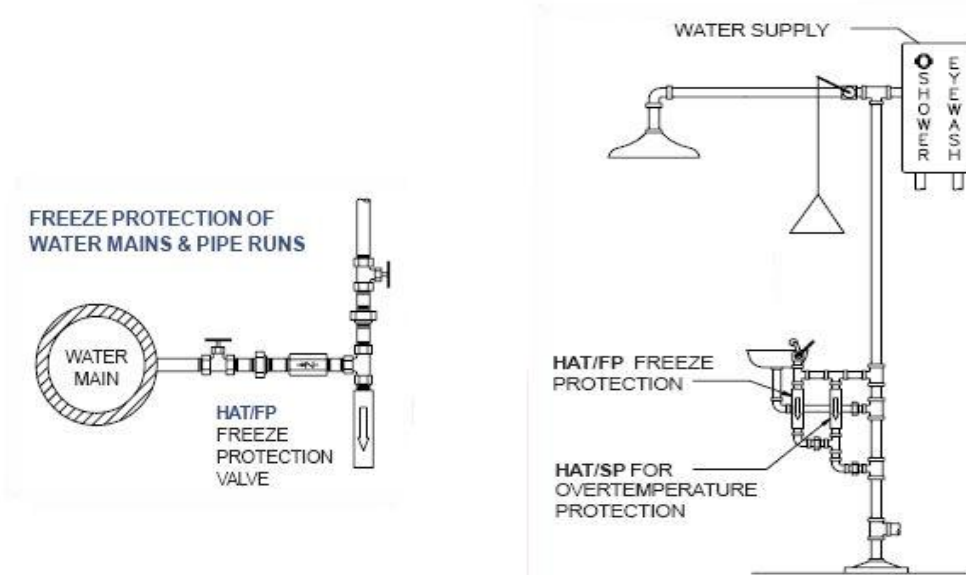


그림 5. FPV적용 사례와 설치방법

#### 4. 결언

1온스의 예방은 1파운드의 치료만큼 가치가 있다—An ounce of prevention is worth a pound of cure. Benjamin Franklin. "예방이 치료보다 낫다"는 등의 명언 들은 사고를 당하기 전에 사고에 대비해야 함을 강조하는 교훈이다.

사계절이 뚜렷하고 특히 동계에는 극심한 추위가 찾아오는 우리나라의 경우 배관이나 장비들을 동파로부터 보호한다는 것은 막대한 경제적인 손실을 방지 하는 것이다.

동결방지밸브는 아주 적은 비용으로 확실하게 동결을 방지하는 방법으로 선진국 에서는 이미 오래전부터 사용하고 있는 기술이다. 그러므로 신기술이라고까지 말 할 수는 없지만 우리에게 아직 생소한 품목임에 틀림이 없다.

동결방지밸브는 온도변화를 민감하게 감지하여 자동으로 정확하게 개폐가 이루어 지는 고성능을 가진 정밀한 제품이다.

지면의 제약 상 언급하지 못한 규격선정법 등의 구체적인 기술정보는 추후 강연회나 학회지를 통하여 다룰 기회가 있을 것이다.

#### 참고문헌

1. www.ctcorp.co.kr/동결 및 과열방지밸브
2. Therm Omega Tec. Inc. The physical principles of freezing.2003.6
3. Chemical Engineering March 26.1979. "Steam Tracing Basics"