

외벽측 급수관의 동결 과정에 관한 연구

강 한 기, 이 재 현**

한양대학교 대학원 기계공학과, *한양대학교 공과대학 기계공학부

The Freezing Process of the Water Supply Pipe in an Exterior Wall

Han Gi Kang, Jae-Heon Lee**

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

(Received June 5, 2007; revision received October 18, 2007)

ABSTRACT: In this paper, the freezing process of the water supply pipe in the exterior wall of an apartment house was analyzed by numerical method. The thickness of the pipe insulation and the percentage of insulation damage were considered as parameters in this paper. In the cases of the 0%, 8% and 20% damaged of the 5 mm thickness insulation, the freezing was completed after 13 hours, 10 hours and 7 hours respectively. And in cases of the 10 mm thickness insulation, the freezing was completed after 18 hours, 10.5 hours and 8 hours respectively. As a result, it is predicted that the water freezing would occurred when the water supply pipe with 8% or 20% damaged insulation are installed in the exterior wall. However, the water freezing would not occurred when the water supply pipe with 10 mm thickness insulation of 0% damage is installed in the exterior wall.

Key words: Freezing(동결), Water supply pipe(급수관), Pipe insulation(보온재), Exterior wall (외벽), Bathroom(욕실)

기 호 설 명

H : 엔탈피 [kJ/kgK]
 h : 현열엔탈피 [kJ/kgK]
 u : 잠열엔탈피 [kJ/kgK]
 β : 융해비 [-]
 k : 열전도계수 [W/mK]
 L : 물의 응고잠열 [kJ/kg]
 t : 시간 [s]
 T : 온도 [°C]
 T_0 : 시간별 외기온도 [°C]
 T_s : 물의 응고온도 [°C]

T_i : 물의 융해온도 [°C]
 T_w : 급수관내 물의 평균온도 [°C]

1. 서 론

공동주택 내부에는 급수관이 설치되어 있으나 동결기 동결에 의한 동파사고는 과거로부터 현재에 이르기까지 끊임없이 발생하고 있다.

건축물의 설비 기준 등에 관한 규칙 제18조(음수용 배관설비) 제4호 규정⁽¹⁾에 의하면 급수관이 얼어서 파손될 우려가 있는 부분에는 파손을 방지할 수 있는 조치를 할 것이라고 정하고 있다. 급수관의 동결에 의한 동파사고는 보온재를 이용한 방한공법의 발달에 따라 차츰 감소하는 경향을 보이고 있으나 아직도 서울과 같은 한랭

* Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0425; fax: +82-2-2220-4425

E-mail address: jhlee@hanyang.ac.kr

지에 살고 있는 사람들에게는 동절기에 가장 귀찮게 여겨지는 문제들 중의 하나이다. 일반적으로 공동주택에서 물이 사용될 경우에는 외기 온도가 상당히 저온이더라도 물의 유동에 의해 동결될 가능성은 비교적 적은 편이다. 그러나 22시 이후부터 새벽까지는 물의 사용량이 거의 없기 때문에 물은 정지되어 있어 동절기 찬 외기로부터 열을 잃게 된다. 이런 상태로 지속적으로 열을 잃게 되면 급수관내 물은 결국 동결될 가능성이 높다. 따라서 이러한 동결 방지를 위해 급수관에 보온재가 필수적으로 사용되도록 규정하고 있다. 대부분의 경우 파손이 없는 정상적인 보온재가 사용되지만 만약 일부라도 파손된 보온재가 사용되거나 때때로 보온재가 파손된 경우 단열성능과 관계없이 물은 동결될 가능성이 높다.

본 연구에서는 겨울철 인천 K2지구에 위치한 P 공동주택 단위세대의 외벽측에 설치된 급수관 동결과정을 이론적으로 예측하였다. 또한 보온재의 두께 및 파손정도를 변경하면서 급수관 내부의 동결과정을 비교하였다.

2. 급수관 보온재 규격

동결방지를 위한 보온재 두께에 관한 상세 규정은 건축물 설비기준 제18조(음용수용 배관설비)에는 제시되지 않고 있으며 건교부 제정 표준시방서에는 배관이 완전 노출일 경우에만 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 대한주택공사에서 제시하는 건축기계설비 표준 및 전문시방서(보온, 급수)를 참고하였다.⁽²⁾ 급수관의 경우 보온재 두께는 단위세대 배관 매립부위의 경우 5mm 이상, 단위세대 배관 노출부위의 경우 20mm 이상으로 규정하고 있다.

3. 연구 모델

공동주택 단위세대 외벽측 급수관의 동결과정을 예측하기 위한 연구모델의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 33평형 단위세대 외벽측에 위치한 욕실(Bathroom) 및 급수관 단면을 나타낸다. 욕실 좌측의 외벽은 외기와 인접하고 있다. 급수관이 매립되어 있는 상세 단면을 Fig. 1(b)에 나타내었다. 그림에서 보듯이 외벽은 콘크리트(concrete), 벽체 단열재(wall insulation) 및

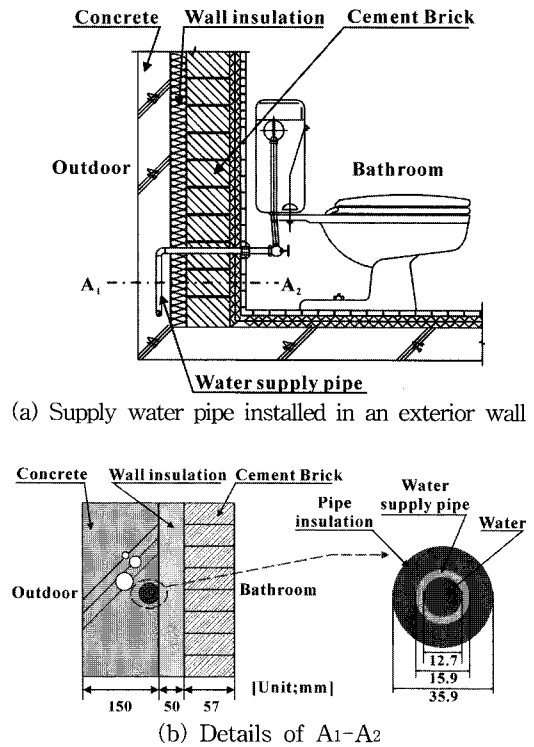


Fig. 1 Schematics of the research model.

시멘트벽돌(cement brick)로 구성되어 있으며 두께는 각각 150 mm, 50 mm 및 57 mm이다. 이때 급수관(water supply pipe)은 콘크리트와 단열재의 경계면에 매립되어 있으며 급수관 내경 및 외경은 각각 15.9 mm 및 12.7 mm으로 급수관의 두께는 2.2 mm이다. 또한 급수관에는 동절기 동결방지를 위한 두께 10 mm의 보온재(pipe insulation)가 설치되어 있다. 이는 대한주택공사에서 제시하는 배관 매립 부위의 경우 보온재 두께 5 mm 이상을 만족해야 한다는 기준보다 더 엄격하게 설계되어 있다. 급수관에 사용된 보온재 재질은 폴리에틸렌폼이며 급수관은 폴리부틸렌 재질의 파이프로 되어있다. 본 연구모델의 외벽, 급수관 보온재 및 물의 표준조건(1기압, 20 °C)에서의 물성치를 Table 1에 나타내었다.^(3,4)

4. 급수관 동결과정 예측

4.1 지배방정식

본 연구에서 급수관 내부 물의 동결과정을 예

Table 1 Material properties of the research model

Material	Density [kg/m ³]	Specific heat [J/kg °C]	Conductivity [W/m °C]
concrete	2200	840	1.4
wall insulation	43	1200	0.022
cement brick	1700	790	0.6
pipe insulation	43	1200	0.034
water supply pipe	55	1210	0.372
water	998	4182	0.6

측하기 위한 비정상 상변화 에너지 방정식은 다음과 같다.^(5,6,7)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

여기서, H 는 엔탈피, T 는 온도를 나타낸다. 엔탈피 H 는 다음과 같이 현열엔탈피 h 와 잠열엔탈피 u 의 합으로 나타나며 잠열엔탈피 u 는 다음과 같이 표현된다.

$$u = \beta L \quad (2)$$

여기서, L 은 물의 응고잠열을 나타내며 β 는 융해비(liquid fraction)를 나타내며 응고온도 T_s 및 융해온도 T_l 에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \beta &= 0 \text{ if } T < T_s \\ \beta &= 1 \text{ if } T < T_l \\ \beta &= \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \text{ if } T_s < T < T_l \end{aligned} \quad (3)$$

4.2 기상데이터

본 연구에서는 외벽 콘크리트에 급수관이 매립되어 있기 때문에 외기 온도의 영향을 크게 받게 된다. 따라서 수치해석적으로 동결과정을 예측하기 위해서는 시간에 따른 외기 온도를 고려하여야 한다. 동결기 인천지역의 외기 데이터는 산자

Table 2 Outside air temperature in a day in winter

Time[h]	To [°C]	Time [h]	To [°C]
1	-9.0	13	-6.0
2	-9.2	14	-5.4
3	-9.4	15	-5.2
4	-9.6	16	-5.7
5	-9.8	17	-6.2
6	-10.0	18	-6.7
7	-10.3	19	-7.1
8	-10.4	20	-7.4
9	-9.8	21	-7.8
10	-8.8	22	-8.2
11	-7.8	23	-8.4
12	-6.8	24	-8.9

부 수도권 동계 설계기준⁽⁶⁾을 참고하였으며 이를 Table 2에 나타내었다. 표에서 T_o 는 시간별 외기 온도를 나타낸다.

4.3 해석영역 및 경계조건

본 연구모델의 해석영역을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 좌측 콘크리트는 외기와 인접해 있으며 우측 시멘트 벽돌은 욕실과 인접해 있다. 욕실 내부는 난방이 원활하게 이루어져 실내 온도는 시간에 따라 변화하지 않는다고 가정하였다. 따라서 욕실과 인접한 시멘트벽돌 우측면에서는 실내온도 20 °C와 대류열전달계수 10 [W/m² °C]를 부여하였다. 또한 외기와 인접한 콘크리트 좌측면에서는 Table 2의 시간에 따른 외기온도와 대류열전달계수 10[W/m² °C]를 부여하였다. 해석과정은 다음과 같다. 급수관 내의 물은 22시 이후부터 동결이 완료될 때까지 사용되지 않는다고 가정하였다. 물의 경우 0 °C의 물 1kg이 0 °C의 얼음 1kg으로 되는데 필요한 응고잠열(L)은 334 kJ/kg이다. 따라서 응고잠열을 모두 잃게 되면 물은 얼음으로 상변화를 일으켜 동결되게 된다. 그런데 물은 순수물질이므로 응고온도와 융해온도는 0 °C로 동일하기 때문에 온도분포만으로 동결유무를 예측하기가 어렵다. 따라서 해석의 편리성을 위해 융해온도를 0 °C로 응고온도는 -1 °C로 설정하여 에너지방정식을 해석하였다. 수치계산의 단순화를 위해 물의 온도가 0 °C가 되면 동결

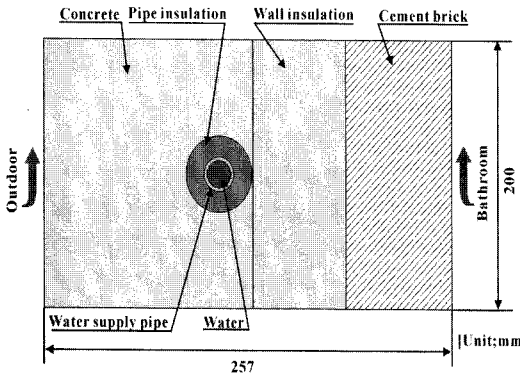
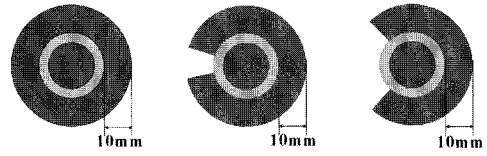


Fig. 2 Solution domain of the research model.

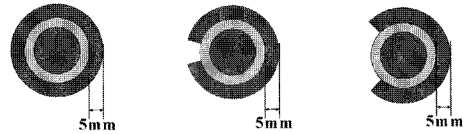
과정이 진행되기 시작하며 물의 온도가 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 가 되면 물의 응고잠열 334 kJ/kg 을 모두 잃게 되어 동결이 완료되었다고 판단하였다. 이때까지 소요된 시간을 동결시간으로 판단하였다.

4.4 보온재 두께 및 파손정도

본 연구에서 고려된 보온재의 두께 및 형태를 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다. 보온재의 두께는 5 mm, 10 mm로 분류하였고 파손정도는 각각 파손되지 않은 정상보온재, 8% 파손된 보온재 및 20% 파손된 보온재로 구분하였다. 실제로 보온재가 파손될 경우, 그림과 형태로 파손되는 경우는 현실성이 매우 떨어지지만 본 연구는 수치적인 방법을 적용하여 동결과정을 예측하고자 하였기 때문에 보온재 전체 면적의 몇 %가 파손되었다고 가정하였다. 또한 파손부위를 급수관 표면까지 파손되었다고 가정하여 그림과 같이 나타내었는데, 이는 이 경우가 동일면적 대비 보온성능이 가장 떨어지기 때문이다. 여기서 두께 10 mm 보온재는 실제 연구모델에 설치된 보온재이며 두께 5 mm 보온재는 대한주택공사에서 제시하는 최저기준이다. 보온재의 파손위치는 그림과 같이 급수관의 좌측 보온재가 파손되었다고 가정하였다. 이는 Fig. 2의 해석영역에서 보듯이 좌측의 콘크리트 벽이 외기와 바로 접해있기 때문에 콘크리트 벽에서의 온도분포는 우측에서 좌측으로 갈수록 낮아질 것이라고 판단하였다. 따라서 동일 파손면적이라도 좌측의 보온재가 파손된 경우가 외기의 영향을 비교적 크게 받을 것이라고 판단하여 보온재의 파손위치를 좌측으로 결정하였다.



(a) normal (b) 8% damage (c) 20% damage
Fig. 3 Damage percentage in pipe insulation of 10 mm thickness.



(a) normal (b) 8% damage (c) 20% damage
Fig. 4 Damage percentage in pipe insulation of 5 mm thickness.

4. 결과 및 고찰

4.1 정상 보온재

공동주택 단위세대 축벽에 두께 10 mm의 정상 보온재가 설치되었을 경우 물의 동결과정을 예측하여 온도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 t 는 물이 사용되지 않아 정지되어 있는 시점부터의 경과시간을 의미한다. 즉 Fig. 5(a)는 경과시간이 0이며 물이 정지되어 있는 상태를 의미하며 이때의 시간은 22시이다. 온도분포를 살펴보면 콘크리트의 온도는 동절기 외기의 영향으로 인해 $-4.8\sim-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 분포를 보이고 있으며 보온재 및 파이프는 각각 $1.1\sim2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 및 $5.9\sim7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 분포를 보이고 있다. 물 온도는 $9.5\sim10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도로써 물을 사용하지 않는 시점의 온도분포이다. 우측 단열재 및 시멘트 벽돌의 온도 분포는 각각 $2.5\sim15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 및 $18\sim19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도로 욕실 내부로부터 열이 전달되고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 물이 사용되지 않은 시점부터 2시간이 지났을 때, 즉 24시일 때의 온도분포를 나타내고 있다. 물 온도는 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도를 나타내며 2시간 경과후 약 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도 온도가 감소되었음을 알 수 있다. 물의 동결과정은 이때부터 조금씩 진행되고 있다. 보온재는 $-0.25\sim-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도분포를 보이고 있으며 콘크리트로부터 저온의 열이 전달되어 점차 좌측의 온도가 낮아지는 타원형 온도분포를 보이고 있다. 따라서 물의 동결과정도 좌측부터 시작

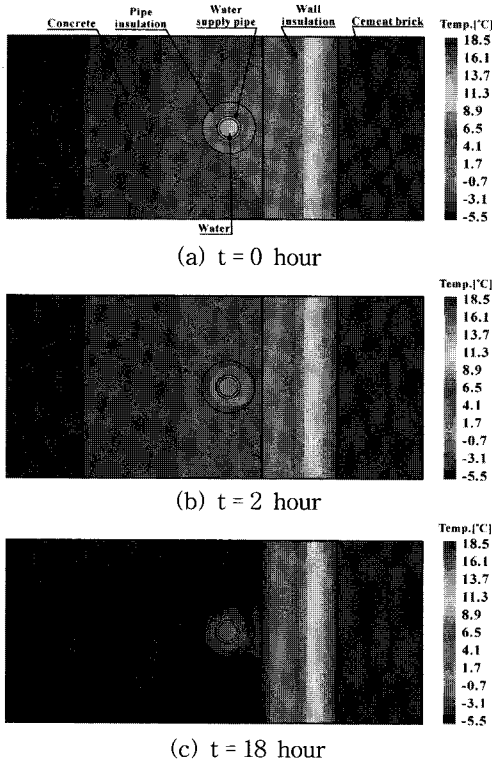


Fig. 5 Temperature distributions of 10 mm thickness of normal pipe insulation with time.

하여 우측으로 진행될 것으로 판단된다. Fig. 5(c)의 온도분포는 물이 사용되지 않은 시점부터 약 18시간이 지났을 때, 즉 다음날 16시일 때의 온도분포를 나타내고 있다. 콘크리트는 저온의 열이 지속적으로 전달되어 대부분의 영역이 $-5.2 \sim -4 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도분포를 보이고 있으며, 보온재 역시 $-4 \sim -2.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도분포를 보이고 있다. 급수관 내부의 물의 온도분포는 $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 나타나며 관외부에서부터 동결과정이 진행되어 18시간정도 경과 후에 완전히 동결되었음을 알 수 있다.

두께 5mm의 정상 보온재가 설치되었을 경우 물의 동결과정을 예측하여 온도분포를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 물이 정지되어 있는 상태를 의미하며 이때의 시간은 22시이다. 콘크리트의 온도는 $-4.8 \sim -1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 분포를 보이고 있으며 물은 $5.1 \sim 6.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도분포를 보이고 있다. Fig. 6(b)는 1시간 경과후(23시) 온도분포를 나타내고 있다. 물 온도는 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 정도를 나타내며 동결 과정은 이때부터 조금씩 진행되고 있다. Fig. 6(c)

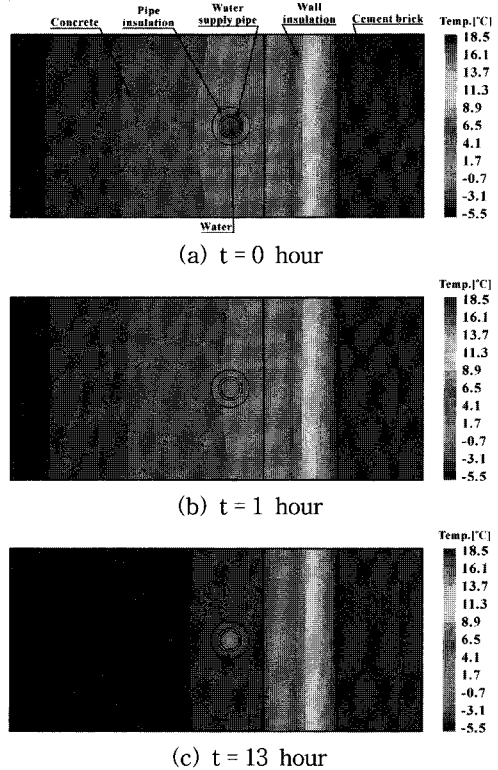


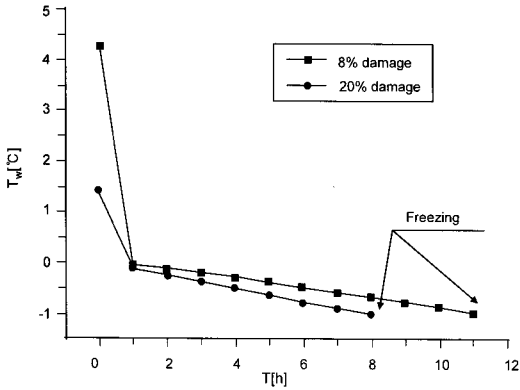
Fig. 6 Temperature distributions of 5 mm thickness of normal pipe insulation with time.

는 물이 사용되지 않은 시점부터 약 13시간이 지났을 때, 즉 다음날 11시일 때의 온도분포를 나타내고 있다. 급수관 내부의 물의 온도분포는 $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 나타나며 관외부에서부터 동결과정이 진행되어 13시간 정도 경과 후에 완전히 동결되었다.

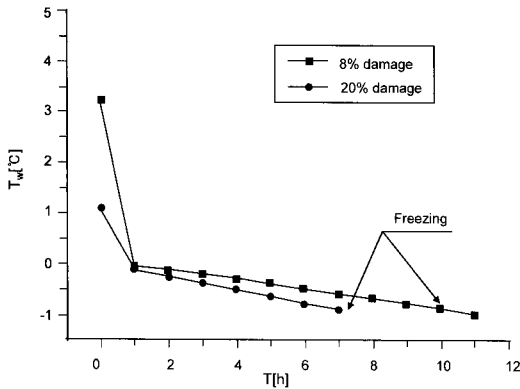
두께가 10mm 및 5mm인 정상 보온재의 경우 동결시간은 각각 18시간 및 13시간으로 예측되었다. 만약 한파가 지속되고 장시간에 걸쳐 외출을 하게 되어 물이 사용되지 않는다면 동결이 발생할 우려가 있다. 그러나 일상적인 사용조건에서라면 본 보온재로 인해 급수관이 동결되는 문제는 발생되지 않을 것이라고 사료된다.

4.2 파손 보온재

급수관 보온재의 두께 및 파손정도 변경에 따른 동결과정을 예측하여 이를 Fig. 7에 나타내었다. 그래프에서 횡축 t는 물이 사용되지 않는 시점부터 시작하여 경과된 시간을, 종축의 T_w 는 급



(a) Pipe insulation of 10 mm thickness



(b) Pipe insulation of 5 mm thickness

Fig. 7 Freezing time of the water with the damage percentage in pipe insulation.

수관내 물의 평균온도를 나타낸다. Fig. 7(a)는 두께가 10 mm이며 파손정도는 각각 8% 및 20%인 보온재의 시간에 따른 물 온도를 나타내고 있다. 물이 사용되지 않고 정지해 있는 시점이 0일때 급수관 내의 물의 평균온도는 파손정도가 8% 및 20%일때 각각 4.2 °C 및 1.7 °C를 나타내고 있다. 이는 보온재의 파손에 따른 단열성능의 차이에 의해 온도분포 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

보온재의 두께가 10 mm이며 보온재 파손 정도가 8% 및 20%일 경우 약 25~30분 정도 지난 후부터 물의 온도는 0 °C 정도로 감소되었다. 이 시간까지는 물의 현열이 제거되어 온도가 감소되는 과정이며 보온재가 파손되어 급수관의 일부가 콘크리트에 직접 접촉되기 때문에 보온재 파손 정도에 따라 0 °C까지 감소되는데 큰 차이를 보이고 있지 않음을 알 수 있다. 그리고 이 시간 이

후부터 물의 잠열이 제거되어 동결과정이 진행되고 있으며 단위질량당 물의 현열에 비해 잠열이 매우 크기 때문에 파손정도에 따라 동결과정의 차이가 발생되고 있음을 알 수 있다. 따라서 파손정도가 20%일 경우 동결과정은 빠르게 진행되어 약 8시간 경과 후에는 완전히 동결되었다. 그에 반해 파손정도가 8%일 경우 약 10시간 30분 이후에는 동결이 완료되었다.

Fig. 7(b)는 두께가 5 mm이며 파손정도는 각각 8% 및 20%인 보온재의 시간에 따른 물 온도를 나타내고 있다. 물이 사용되지 않고 정지해 있는 시점이 0일때 물의 평균온도는 파손정도가 8% 및 20%일 때 각각 3.2 °C 및 1.2 °C를 나타내고 있다. 보온재의 두께가 10 mm에서 5 mm로 감소되고 파손정도가 8% 및 20%일 경우 초기 물 온도는 각각 4.2 °C에서 3.2 °C로 1.7 °C에서 1.2 °C로 감소되었다. 이는 파손정도가 증가될수록 보온재 두께와 무관하게 비슷한 온도분포를 보이는 것으로 나타났다.

보온재가 20% 파손되었을 경우 약 25분 정도 경과 후에 물의 온도는 0 °C로 감소되었으며 이후부터 물의 동결과정은 빠르게 진행되어 약 7시간 경과 후에는 완전히 동결되었다. 파손정도가 8%의 경우 약 35분 경과 후에 0 °C로 감소되었으며 약 10시간 이후에는 동결이 완료되었다.

보온재의 두께와 상관없이 파손 정도가 8% 및 20%일 경우 동결 시간은 각각 10시간 및 7시간 정도 예상된다. 이는 급수관과 콘크리트가 접촉해 있는 면적이 동일하다면 보온재 두께는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

보온재가 파손되었을 때 동결 시간은 10시간 이내로 예측되었다. 이는 22시부터 물이 사용되지 않았다면 다음날 7시에서 8시 정도에 동결된다는 의미이다. 이 같은 상황은 실제 공동주택에서 생활할 경우 빈번하게 이루어지므로 동결문제 가능성이 충분히 높다고 판단된다. 따라서 동결방지를 위해 보온재를 사용할 경우 두께뿐만 아니라 매립시 보온재 파손을 주의해야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 겨울철 인천 K2지구에 위치한 P 공동주택 단위세대의 외벽측에 설치된 급수관의 동결과정을 보온재의 두께 및 파손정도에 따

라 이론적으로 예측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 두께가 10 mm이며 열전도계수가 $0.034 [W/m^{\circ}C]$ 인 물성치를 갖고 있는 정상 보온재가 내경이 12.7 mm인 급수관에 사용되었을 경우 물의 동결시간은 약 18시간으로 예측되었다.

(2) 동일한 물성치를 갖고 있는 두께 5 mm인 정상 보온재가 내경이 12.7 mm인 급수관에 사용되었을 경우 물의 동결시간은 약 13시간으로 예측되었다.

(3) 두께 10 mm, 5 mm인 보온재의 경우 파손 정도가 8% 및 20%일 경우 두께와 무관하게 급수관 내의 물의 동결시간은 약 10시간 및 8시간으로 예측되었다.

(4) 본 연구에서 고려된 보온재의 경우 두께와 상관없이 일부라도 파손이 발생될 경우 외벽측 급수관은 동결 문제가 발생될 것으로 사료된다. 그러나 두께가 5 mm 및 10 mm인 정상 보온재의 경우 일상적인 사용조건에서라면 동결문제는 크게 문제가 되지 않을 것이라고 사료된다.

참고문헌

1. KNHC, 2003, Building equipment design handbook, Korea National Housing Corporation
2. KNHC, 2005, Technical Guidelines: Building Equipment, Korea National Housing Corporation
3. SAREK, 2005, Building mechanical system design guidelines, Ministry of Construction & Transportation
4. Kim, Y. H. and Park, J. W., 1999, The newest air conditioning system, Bomoondang, Inc.
5. Swaminathan, C. R. and Voller, V. R., 1992, A general enthalpy method for modeling solidification process, metallurgical transactions B, Vol. 23B, pp. 651-664.
6. Hibbert, S. E., Markatos, N. C. and Voller, V. R., 1988, Computer simulation of moving-interface, convective, phase-change processes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 9, pp. 1785-1795
7. Kim, H. K., Jeong, S. Y., Hur, N. K., Lim, T. W. and Park, Y. S., 2007, Numerical analysis of the melting process of ice using plate heaters with constant heat flux, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 434-440
8. SAREK, 1996, Development of the standard computer software and weather data for cooling and heating load calculation, Ministry of Commerce, Industry and Energy