

## 시험 선로 결빙 방지를 위한 전기 가열식 용설 및 용빙 시스템의 최적 조건에 관한 연구

한 규 일\*

부경대학교 기계공학부

### **A study on the optimum condition of electric snow melting and deicing system for the anti-freezing testing road**

**Kyu-II HAN\***

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

The snow melting system by electric heating wires which is adopted in this research is a part of road facilities to keep surface temperature of the road higher than freezing point of water for melting the snow accumulated on it. The electric heating wires are buried under paved road at a certain depth and operated automatically and manually. Design theory, amount of heating, and installation standard vary according to economic situation, weather condition, installation place and each country applying the system. A main purpose of this study is figuring out the appropriate range of required heat capacity and installation depth and pitch for solving snowdrifts and freezing problems with minimum electric power consumption. This study was performed under the ambient air temperature(  $-2^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$ ), the pitches of the electric heating wires(200 mm, 300 mm), heating value( $250\text{ W/m}^2$ ,  $300\text{ W/m}^2$ ,  $350\text{ W/m}^2$ ).

Key words : Electric heating cable, Anti-freezing, Light weight electric traction system, Simulation

### 서 론

겨울철에 눈이 내리면 전 세계적으로 많은 지역은 이로 인한 문제점을 안고 있다. 특히 많은 눈이 내리고 음지구간이 많은 지역은 적설과 결빙으로 교통체증과 교통사고를 일으켜 인명피

해를 수반하는 대형사고로 이어지고 있으며, 경제 손실 또한 막대하다. 현재 국내에서의 제설 작업은 제설장비를 이용한 제설작업, 염화칼슘 등과 같은 화학제품의 용해잠열을 이용한 방식, 그리고 모래를 살포하는 제래 방식을 주로 사용

\*Corresponding author: kihan@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-6194, Fax: 82-51-629-6188

하고 있다(Shin and Seo, 1993). 그러나 위와 같은 방법들은 제설당시의 일시적인 효과밖에 기대할 수 없고, 반복적인 작업을 필요로 할뿐만 아니라 기온의 강하 시 노면의 결빙방지를 위한 근본적인 대책이 될 수 없으며, 경제적인 반면에 운영측면에서 적기시행이 어렵고, 도로 노면의 손상과 환경측면에서 위해요인 등의 문제점이 되고 있다. 따라서 겨울철에 도로의 결빙을 방지하기 위한 적절한 대책을 세우는 것은 겨울철의 교통사고를 줄이기 위해 제설에 못지않은 중요한 사항이다. 이에 대한 가장 효과적인 방법은 도로에 필요한 열을 지속적으로 공급하는 것이라 할 수 있다.

이러한 관점에서 지열을 활용하기 위한 연구가 미국, 일본 등 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있으며, 그 중에서 특히 관심을 끌고 있는 것이 열 사이폰을 이용하는 지열의 채열이다(Nydahl et al., 1987). 지열을 열 사이폰으로 채열하여 도로에 쌓인 눈을 녹이거나 결빙을 방지하기 위한 기본개념은 1965년에 처음으로 제안되었다(Lawrie, 1965). 이러한 용설 시스템은 일본과 유럽에서도 독자적으로 개발하여 실용화시키고 있는데, 일본에서는 1977년에 처음으로 시도되어 1982년까지 20여 곳에 설치되었고 현재까지도 시스템의 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 배경에 맞추어 본 연구에서 효율적인 용설과 해빙을 위하여 적용하려고 하는 시스템은 용설 설비 시스템으로서 전기를 이용하여 적설 및 결빙이 예상되는 취약지점에 효율적인 결빙방지를 위하여 주행면 아래 일정한 간격과 깊이로 발열선을 매설하여, 겨울철에 눈이 오거나 온도차에 의하여 노면의 결빙이 발생했을 때 자동적으로 온도를 감지하여 전원을 공급함으로써 용설 및 해빙을 하는 시스템이다. 하지만 매설된 발열선의 간격과 깊이가 적당하지 않으면 전열선의 수명이 단축될 수 있고 쓸데없는 전력낭비로 비경제적이 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 용설 및 해빙을 할 수 있는 최적의 조건을 찾기 위해 다양한 온도조건을 설정할 수 있는 항온실을 제작하였으며, 필요한 구조물을 만들어 항온실내에서 설치 지역의 기후 데이터를 바탕으로 외기온도, 발열선 간격 및 구조물 표면의 결빙유무에 따른 실험을 수행하여 많은 데이터를 도출하였으며, 이를 이용하여 겨울철 결빙에 의한 사고방지에 대한 적용가능성을 제시하고자 한다.

## 실험 장치 및 방법

### 용설 시설의 설계 이론

#### 자유면적비율

4가지 기상요소(강설강도, 대기온도, 상대습도, 풍속) 영향의 수량적 값을 공식에 의해 계산하기 전에 녹지 않은 눈에 대한 단열효과를 고려하여야 한다. 눈이 데워지는 동안과 눈이 완전히 녹기 전에는 눈이 열을 전달하지 않는 단열의 효과가 있다. 눈발이 노면의 전면적의 일부분을 덮으므로 해서 발생하는 단열효과를 편의상 면적비율로 정의한다. 전면적에 대한 눈이 덮여있지 않은 면적의 비율을 자유면적비율( $A_r$ )이라 하며 식 (1)과 같다.

$$A_r = A_f / A_t \quad (1)$$

그러므로  $0 \leq A_r \leq 1$ ,  $A_r = 1$ 을 유지하려면 눈이 내리자마자 녹아버려 쌓이지 않는 상태이다. 이것은 불가능하지만 설계목적상  $A_r = 1$ 이 최대치라 가정한다.  $A_r = 0$ 이라면 증발과 전달에 의한 열 손실이 전혀 발생되지 않을 정도로 노면에 눈이 완전히 덮힌 상태를 말한다. 눈의 단열효과를 나타내는 자유면적비의 연구결과, 실무에 적용하는 자유면적비는 0, 0.5, 1 중 하나의 값을 취한다.

#### 용설 열방정식

용설 시설에 필요한 열 방정식은 Chapman에 의해 제안되었고(Chapman, 1952), Chapman과

Katunich은 노면에 필요한 설계출력에 대한 이론식을 제안하였으며(Chapman and Katunich, 1956), 이는 식 (2)와 같다.

$$q_0 = q_s + q_m + A_r(q_e + q_h) \quad (2)$$

시험선로지역 설계출력검토

설계출력을 산정하기 위해서는 많은 기상조건에 영향을 받는다. Table. 1은 발열선이 매설되는 시공지역의 최근 3년간의 대기온도 및 평균 풍속을 나타낸 것이다. 시험선로지역의 설계출력을 계산하면 노면 온도저하가 심한 교량이라는 점을 고려, 노면의 자유면적비율을 최대치인  $A_r = 1$ 을 적용하여 식 (2)를 이용하여 산출한 결과 약  $235.1 \text{ W/m}^2$ 가 나왔으며, 20%의 손실을 감안했을 경우 대략  $300 \text{ W/m}^2$  정도가 적당할 것으로 사료된다.

Table 1. The average value of temperature and wind velocity

	2004	2005	2006	Average
Average temperature(°C)	-0.8	-2.8	0.0	-1.2
Average wind velocity (m/s)	3.7	3.5	3.6	3.6

실험 장치

Fig. 1은 본 연구에 사용되어진 실험장치의 개

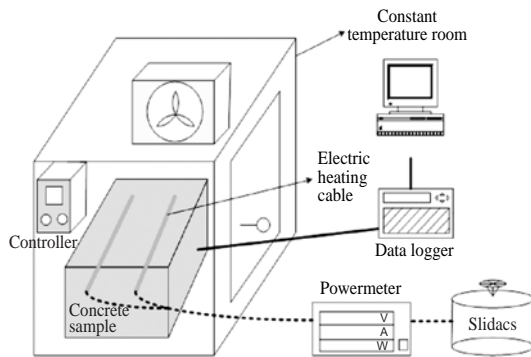


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

략도이다. 실험 장치는 실험구조물을 원하는 외기온도 조건을 유지시켜주는 항온실, 시험선로의 모형으로 제작된 구조물, 전력공급라인, 그리고 온도측정 및 데이터 기록 장치로 구성되었다. 항온실은 항시 설정온도와 내부온도를 모니터를 통하여 쉽게 확인할 수 있도록 되어있다. 전력공급라인은 전력 공급 장치, 발열선, 그리고 슬라이덱스와 파워미터(Powermeter)로 구성되었다. 파워미터를 이용하여 공급열량을 확인할 수 있으며, 슬라이덱스를 통해 공급전력을 조절하였다.

데이터 취득을 위하여 실험구조물 내부에 T-type의 열전대를 총 32지점에 설치, 데이터로거(yokogawa, DR-230)와 인터페이스를 위한 PC로 구성되어 있으며, 10초 간격으로 데이터를 취득하였다. 열전대의 설치 위치는 Fig. 2와 같다.

그리고 본 연구에서 사용된 발열선은 자율 제어 형이며, 병렬형 히터로 임의 절단 사용 가능하며 현장에서 길이 변경에 대하여 자유로이 대처할 수 있는 장점이 있으며, 발열량은  $70 - 90 \text{ W/m}$ 이다.

실험 방법

본 연구는 각 조건에 따른 시험부인 구조물의 표면 온도와 내부의 온도분포라는 두 가지 중점 사항을 두고 실험을 수행하였다. 우선적으로 발열선을 표면에서 70 mm 깊이에 매설하였으며, 발열선의 간격에 따른 특성을 알아보기 위하여 간격을 300 mm와 200 mm로 하였다.

외기 온도조건은 기상자료를 바탕으로 년 최저 평균온도를 감안하여  $-2^\circ\text{C}$ ,  $-5^\circ\text{C}$ 로 하였다. 그리고 구조물 표면에 결빙이 있는 경우와 없는 경우로 하여 실험을 실시하였다. 발열량은 설계출력 검토를 통하여  $250 \text{ W/m}^2$ ,  $300 \text{ W/m}^2$ ,  $350 \text{ W/m}^2$ 로 설정하여 열량을 공급하였다. 결빙시의 얼음두께는 10mm로 하여 실험하였다.

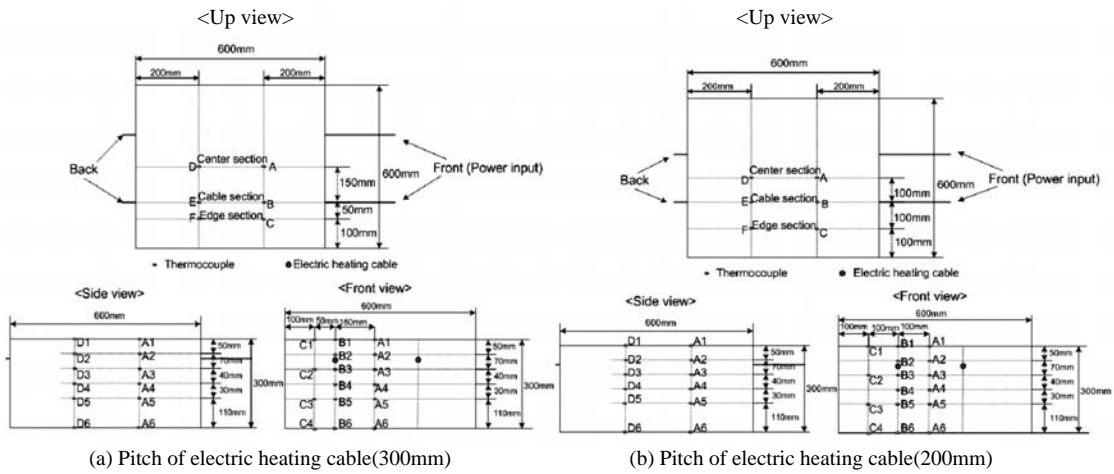


Fig. 2. A location of thermocouples.

### 실험 결과 및 고찰 외기 온도에 따른 표면온도변화

본 연구에서는 시험선로 시공지역의 최근3년

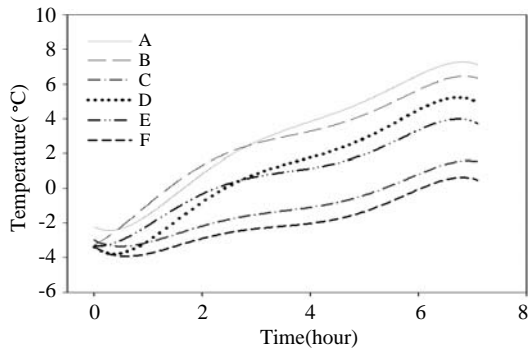


Fig. 3. Variation of surface temperature according to time(-2°C).

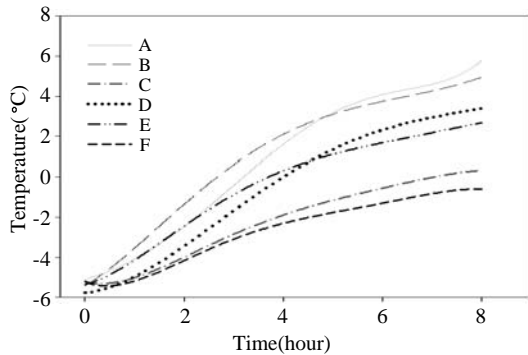


Fig. 4. Variation of surface temperature according to time (-5°C).

간의 기상자료를 토대로 외기 온도를  $-2^{\circ}\text{C}$ 와  $-5^{\circ}\text{C}$ 로 설정하여 실험을 실시하였다. Fig. 3 - 4는 발열량이  $300\text{ W/m}^2$ , 발열선 간격  $300\text{ mm}$ , 표면 결빙이 없을 경우 외기 온도에 따른 지점별 표면온도의 분포를 나타낸 것이다. 구조물 표면 전체가 융점( $0^{\circ}\text{C}$ ) 이상이 되는데 걸리는 시간은 외기온도  $-2^{\circ}\text{C}$ 인 경우가 약 20 - 30분 정도 빠른 것으로 나타났으며, 다른 조건하에서도 비슷한 경향을 나타내었다.

### 표면 결빙에 따른 표면온도변화

Fig. 5 - 6은 발열량  $300\text{ W/m}^2$ , 외기 온도  $-5^{\circ}\text{C}$ , 발열선 간격이  $300\text{ mm}$ 일 때, 표면 결빙에 따른 표면온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보

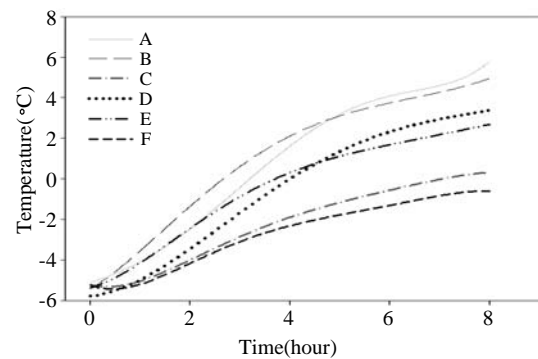


Fig. 5. Variation of surface temperature according to time(no ice condition).

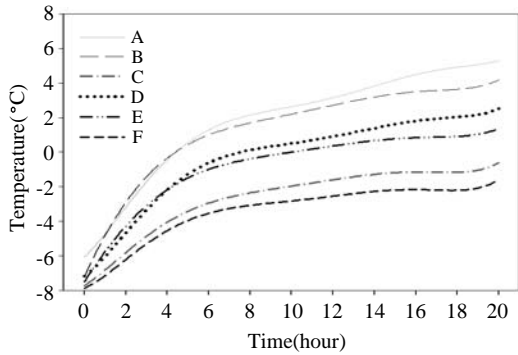


Fig. 6. Variation of surface temperature according to time (ice condition).

는 바와 같이 결빙이 있는 경우가 없는 경우에 비하여 표면온도가 각 지점별로 약 2시간 정도 늦게 융점에 도달하였다.

이는 구조물의 표면에서 결빙된 표면이 빙점에 근접하여 상변화에 필요한 열량이 필요함에 따라 결빙이 없는 경우보다 융점에 도달하는 시간이 더 오래 걸린 것으로 사료된다.

발열선 간격에 따른 내부온도변화

Fig. 7 - 8은 발열량이 300 W/m<sup>2</sup>, 외기온도 -2°C, 표면결빙이 없는 경우에 발열선 간격에 따른 내부온도변화를 나타낸 것이며, 발열선 중앙 지점의 온도 값을 평균하여 나타내었다. 우선, Fig. 7은 발열선 간격이 300 mm이며, Fig. 8은 발열선 간격이 200 mm이다. 융점 이상으로 도달

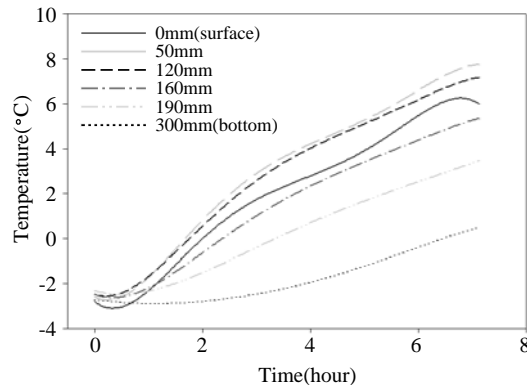


Fig. 7. Variation of temperature according to depth(pitch of heating cable : 300mm).

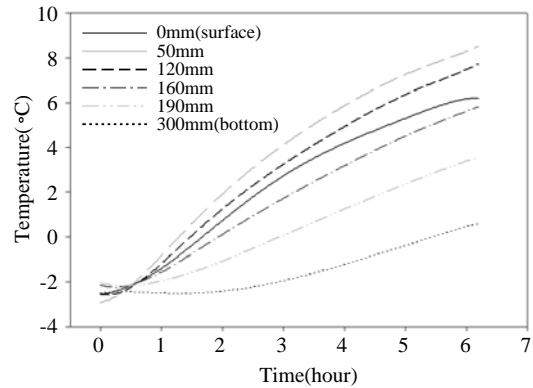


Fig. 8. Variation of temperature according to depth(pitch of heating cable : 200mm).

하는데 걸리는 시간은 발열선 간격이 300 mm인 경우보다 200 mm인 경우 약 30 - 40분 정도 적게 소요됐다 이는 간격이 200 mm인 경우 히팅 케이블이 300 mm인 경우보다 중앙으로 50 mm 만큼 내부로 설치되어 발열선은 양끝 단면을 통한 열손실이 더 작아졌으며, 중앙부로의 열 집중 현상으로 인하여 아래 같은 결과가 나타난 것으로 사료된다

융점도달시간비교

Table 2는 표면에 결빙이 없는 경우조건에 따른 표면전체가 융점에 도달하는 시간을 나타낸 것이다 융점에 도달하는 시간은 외곽부를 제외한 표면의 4 점(A, B, D, E)에서의 온도로 실험 실시 후 빙점에 도달하는 시간의 평균값으로 나타낸 것이다. 외곽부는 외부로의 많은 열손실로 인하여 도달시간이 4점에 비해서 상당히 오래 걸리는 것을 감안 도달시간을 구함에 있어 무의미한 것으로 사료되어 제외하였다.

표면이 융점에 도달하는데 걸리는 시간이 대체적으로 간격이 200 mm인 경우가 약 10 - 30분 정도 빠른 것으로 나타났다. 하지만 간격이 200 mm인 경우는 발열선이 설치된 지점과 중앙부로의 열전도는 양호하였으나, 외곽으로의 열전도가 매우 좋지 않았다. 이에 비해 간격이 300 mm인 경우는 대체적으로 열전도가 양호하였다.

**Table 2. A comparison of melting point reaching time**

Heating value (W/m <sup>2</sup> )	Width (mm)		Ambient air temperature (°C)
	200	300	
250	123min	150min	-2
	237min	255min	-5
300	70min	85min	-2
	160min	183min	-5
350	45min	54min	-2
	123min	166min	-5

**Table 3. Material properties**

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg · K)	k (W/m · K)
concrete	2700	1050	1.2
copper	8978	381	387.6

**Table 4. Test conditions**

ambient temperature(°C)	-2, -5
convection heat transfer coefficient on surface(W/m <sup>2</sup> · K)	14.4
heating value(W/m <sup>2</sup> )	250, 300, 350

### 수치 해석

#### 지배방정식

비정상상의 열전도방정식은 고체와 같이 흐름이 없는 곳에서의 열의 이동을 나타내는 방정식으로, 공학적으로 이용되는 기본적인 방정식의 하나로서 직교 좌표로 표시된 열확산 방정식(heat diffusion equation)의 일반형태이다. 이는 다음 식 (3)으로 표시된다(Incropera and Dewitt, 2007).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

여기서 시간적으로 변하지 않는 정상 상태인 경우는 우변이 영이 된다. 위의 식은 시간에 대해서 1계, 공간에 대해서는 x, y, z에 대하여 각각 2계의 방정식이므로 1개의 초기조건과 총 6개의 경계조건이 필요하다.

#### 해석조건

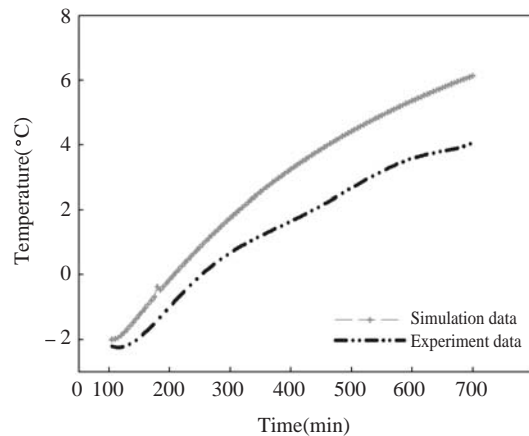
해석 모델은 시험선로의 일부분 형상을 모델링한 후 격자 생성 툴을 이용하여 비정렬격자와 정렬격자로 계산영역을 구성하였다. 발열선의 열 유속은 각각 250 W/m<sup>2</sup>, 300 W/m<sup>2</sup>, 350 W/m<sup>2</sup>으로서 시간에 따른 변화 없이 일정하게 유지시켜 시뮬레이션을 실시하였다. 가로, 세로 600 mm 높이 300 mm의 콘크리트 구조물의 상부표면을 포함한 양 측면은 대류 경계 조건을 사용하였고, 발열선이 노출된 양 측면은 연속 면을

사용한 양 단면이므로 단열조건을 사용하였다. 그리고 아랫면은 반무한 물체의 조건을 사용하여 모의 실험하였다. Table 3과 4는 해석에 필요한 물질의 물성치와 실험조건을 나타낸다.

#### 수치 해석결과

다음은 상용 수치해석 프로그램인 Fluent를 이용하여 해석한 결과와 비교 데이터이다.

Fig. 9 - 11은 앞선 실험에서의 가장 좋은 결과를 보여준 발열량이 300 W/m<sup>2</sup>, 외기온도 -2°C, 표면결빙이 있는 경우에 발열선 간격이 300mm 일 때 내부온도변화를 나타낸 것이다. 해석 결과 실험에서와 마찬가지로 시간에 따라서 내부온도가 용빙에 필요한 온도까지 오차범위 내에서 동일한 상승 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 실험



**Fig. 9. Simulation interpretation diagram.**

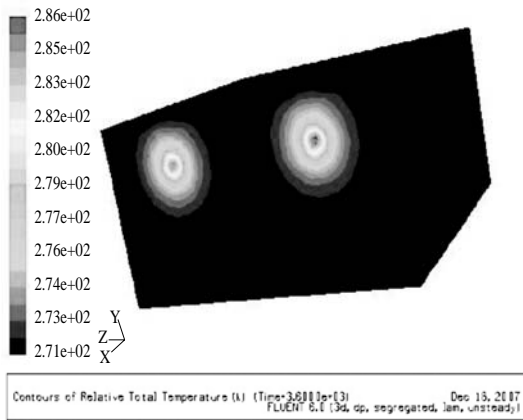


Fig. 10. 1 hour later from initial set temperature of  $-2^{\circ}\text{C}$ .

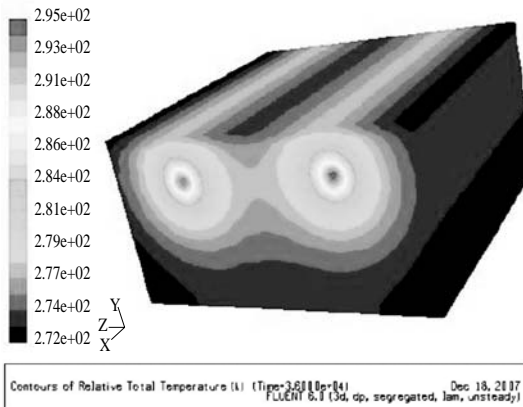


Fig. 11. 10 hours later from initial set temperature of  $-2^{\circ}\text{C}$ .

험보다 50분 정도 빠른 온도 상승을 보였으며, 100분이 경과 했을 시  $0^{\circ}\text{C}$  까지 상승함을 확인 할 수 있었고, 600분 경과 시 용빙이 종료 되었다.

이는 실험 시 실험구조물 전체를 초기 조건으로 맞추어 있어 시뮬레이션 설정보다 약간 낮은 온도에서 시작한 것에 기인한 것으로 사료되며, 전체적인 온도 증가율은 실험과 시뮬레이션이 매우 유사함을 알 수 있다.

### 결 론

본 연구에서는 효율적인 용빙 및 결빙방지를 위하여 시험선로의 설치지역 기상조건에 맞게 설계발열량을 계산하여 전열선의 간격, 외기 온

도조건, 그리고 발열량을 변수로 다양하게 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 발열량이  $300\text{ W/m}^2$ , 발열선 간격이  $300\text{ mm}$  이고, 표면 결빙이 없는 경우 구조물의 표면 평균온도가 융점 이상이 되는데 걸리는 시간은 외기 설정 온도  $-2^{\circ}\text{C}$  인 경우가  $-5^{\circ}\text{C}$  인 경우보다 약

20 - 30분 정도 빨랐다. 발열량이  $300\text{ W/m}^2$ , 발열선 간격이  $300\text{ mm}$  이고, 외기 설정 온도  $-5^{\circ}\text{C}$  일 때 결빙 유무에 따른 융점 도달 시간은 결빙이 있는 경우가 약 2시간 더 소요되었다. 발열선 간격이  $200\text{ mm}$  인 경우  $300\text{ mm}$  인 경우보다 표면이 융점( $0^{\circ}\text{C}$ )에 도달하는 시간이 약 40분 정도 빨랐다. 이는 외곽부 표면 2점(C, F)을 제외한 A, B, D, E점의 온도를 평균하였을 때의 경우이고, 외곽부 표면 2점을 포함했을 경우에는 차이가 없었다. 그러나 표면의 용빙 과정과 내부의 온도 분포를 분석한 결과  $200\text{ mm}$  인 경우보다  $300\text{ mm}$  인 경우에서 더욱 뛰어난 열전달과정이 이루어짐을 알 수 있었고, 따라서 발열선의 간격은  $300\text{ mm}$ 가 적당한 것으로 사료된다. 빙점 도달 시간은 발열량이 가장 큰  $350\text{ W/m}^2$ 가 가장 적게 걸렸으나,  $300\text{ W/m}^2$ 인 경우와의 차이가 크지 않았다. 그 결과 에너지 절약 적 측면에서 발열량이  $300\text{ W/m}^2$ 인 경우가 적합한 것으로 사료된다. 가장 좋은 실험 결과를 보여준 것은  $300\text{ W/m}^2$ , 외기 온도  $-2$ , 발열선 간격이  $300\text{ mm}$  이며, 표면 결빙이 있는 조건에서의 용빙에 필요한 온도가 되는 시간을 실험결과와 시뮬레이션 해석 결과를 비교해 보면 약간의 차이를 보였으나 온도 증가율의 전체적인 추이는 유사함을 알 수 있었다.

### 사 사

이 논문은 2007학년도 부경대학교 기성회 학술 연구비에 의하여 연구되었음.(PK - 2007 - 024)

### 참고문헌

Chapman, W.P, 1952. Design of snow melting system.

- Heating and Ventilating, 88 – 92.
- Chapman, W.P. and S. Katunich, 1956. Heat requirements of snow melting system. ASHRAE Transactions, 62 – 359.
- Incropera, F.P. and D.P. Dewitt, 2007. Fundamentals of heat and mass transfer. John Willy, 70 – 73.
- Lawrie, R.J., 1965. Electric snow melting systems. Electrical Construction and Maintenance, pp. 125 – 129.
- Nydahl, J.E., K. Pell and R. Lee, 1987. Bridge deck heating with ground-coupled heat pipes. ASHRAE Transaction, pp. 93.
- Shin, H.J. and S.J. Seo, 1993. A study on the highway snow melting and deicing system using geothermal energy. Journal of KIIS, 8(4), 139 – 148.

---

2008년 8월 12일 접수

2008년 9월 5일 1차 수정

2008년 9월 5일 수리