

# 시험선로 결빙방지를 위한 용설시스템에 관한 연구 A Study on Snow Melting System for the Anti-freezing Testing Road

한규일 · 조동현 · 이안호  
K. I. Han, D. H. Cho and A. H. Lee

**Key Words** : Snow melting system(용설시스템), Heating energy(발열량), Preheating time(예열시간), Pitch and Depth of the heating cable(전열선의 간격과 깊이)

**Abstract** : The snow melting system by electric heating wires which is adopted in this study 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 system is designed to increase traffic safety and capacity.

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, and installation place where the system applies. It is tried to figure out that the appropriate range of required heat capacity and installation depth and intervals for solving snowdrifts and freezing problems with the minimum electric power consumption. The most important factors to design the system are calculation of heating capacity depending on weather condition and depth and interval of the electric heating wires depending on air condition respectively. The study were performed under the range of the air temperatures(-2°C, -5°C, -8°C), the intervals of the electric heating wires(70mm, 100mm, 125mm), and the installation depths(50mm, 70mm, 100mm). The ready made commercial program package was used to verify the experimental results.

## 기호 설명

## 1. 서론

$q_s$ : 영하의 눈이 0 °C 눈으로 되는데 필요한 비열	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_m$ : 용해열	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_e$ : 증발열	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_h$ : 대류와 복사에 의해 전달되는 열	[W/m <sup>2</sup> ]
$s$ : 강설강도	[mm/hr]
$t_0$ : 대기 온도	[°C]
$t_f$ : 수막온도	[°C]
$V$ : 풍속	[m/s]
$h_{fg}$ : 수막에서의 증발열	[kJ/kg]
$p_{av}$ : 증발압력	[kPa]

한국은 온대 지방에 위치하여 4계절이 뚜렷하다. 사계절이 뚜렷한 우리나라의 동절기에는 주행로상에 적설 및 결빙이 전국의 각 지역에 전반적으로 나타날 수 있으며, 동절기가 아니더라도 교량 등 특수 지역에는 비가 온 후 기온이 급강하하여 주행로 표면에 결빙이 형성될 수 있어 노면의 마찰력이 현저히 저하되고 이로 인하여 차량운행 속도 저하와 일시적 교통두절, 교통사고의 발생 등 경제적 손실이 발생한다. 이러한 손실을 해소하기 위한 주행로 용설 기술에는 태양열을 이용한 방법, 온수 히팅 방법, 전열히팅 방법<sup>1)2)</sup>, 히트 파이프를 이용하는 방법<sup>3)</sup>, 적외선 히터를 이용하는 방법, 지열에너지를 이용하는 방법<sup>4)</sup>, 용설조를 이용하는 방법, 무기염료 및 요소 등이 함유된 빙점 강하 현상을 이용하여 동결을 방지하는 방법 등 여러 가지가 있다. 현재 국내에서 가장 많이 시행되고 있는 제설 방법은 도로상의 적설량 제거, 염화칼슘과 발열량이 높은 약제살포에 의한 용설, 모래살포 등에 의

접수일 : 2005년 9월 14일  
조동현(책임저자) : 대전대학교  
컴퓨터응용기계설계공학과  
E-mail : chodh@daejin.ac.kr Tel. 031-539-197  
한규일 : 부경대학교 기계공학부  
이안호 : 한국철도기술연구원

한 노면 마찰력의 증대 등 인력과 장비에 의한 방법을 복합적으로 이용하고 있다. 하지만 이는 경제적으로는 효율적인 반면에 운영측면에서 적기에 시행이 어렵고, 도로노면의 손상과 환경측면에서의 위해요인 등의 문제점이 있다.

본 연구에서 적용하려고 하는 시스템은 전열을 이용한 융설 설비(Heating Coil) 시스템으로서 전기를 이용하므로 조작 및 보수가 간단하며 자동제어가 가능하므로 별도의 인원을 투입하지 않아도 되며, 무기염료를 사용하는 약제살포 방식과 달리 전기만을 사용하기 때문에 환경오염을 시키지 않고 차량 및 교량의 부식을 막을 수 있는 장점이 있다. 또한 노면의 온도 및 습도를 감지할 수 있는 자동 제어 장치가 설치되어 있어 인원절약이 가능하고 사용전력을 최소화하여 에너지 절약이 가능하다. 그리고 기계 장비가 들어갈 수 없는 장소 또는 인력으로 쉽게 제설할 수 없는 장소의 제설 및 결빙 방지에 적합하여 제설 작업에 의한 교통 장애를 걱정할 필요가 없는 특징이 있다.

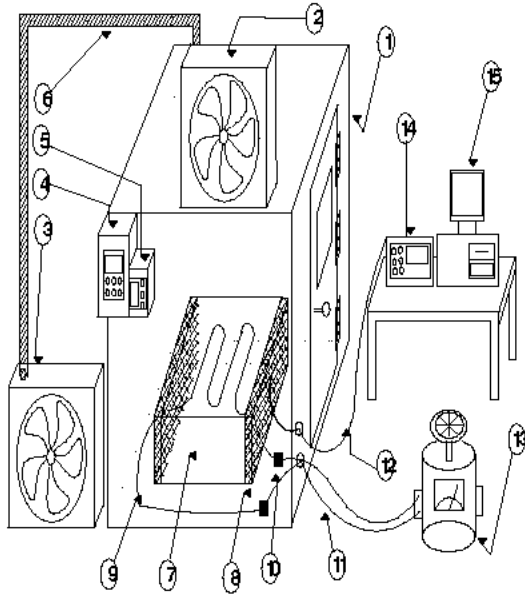
주행로의 융설 및 해빙을 목적으로 적용될 융설 설비(Heating Coil)시스템은 적설 및 결빙이 예상되는 취약지점에 효율적인 제설 작업체계를 구축하고자, 주행면 아래 일정한 깊이에 일정한 간격으로 전열선을 매설하여, 동절기에 눈이 오거나 온도차에 의하여 노면의 결빙이 발생했을 때 자동적으로 온도 및 습도를 감지하여 전원을 공급함으로써 융설 및 해빙을 하는 시스템이다. 하지만 아무리 좋은 시스템이라도 매설된 전열선의 매설 깊이와 간격이 적당하지 않으면 주행하는 차량의 중량에 의한 손상으로 수명이 단축될 수 있고 또 쓸데없는 전력 낭비로 비경제적이 될 수 있다.<sup>5)</sup> 따라서 최적의 운용조건을 찾기 위해 실험장치를 설계하여 장치를 만들고 관련된 실험을 시행하였다. 이러한 모형제작을 통한 기초실험을 통하여 전열선의 간격과 매설 깊이를 변수로 한 다양한 실험 데이터를 산출하였다. 실험장치로부터 수집되는 기초데이터의 분석을 통하여 주어진 주위환경에 따른 최적의 전열선 매설 깊이와 간격을 도출하였다. 실험장치를 통하여 얻은 데이터는 그 정확성을 검증하기 위하여 기 개발된 상용 프로그램을 사용하여 결과를 상호 비교하였으며, 미비점이 발견되면 보완하여 재실험을 실시하였다. 하지만 정확한 수치해석을 수행하기 위해서는 정확하고 상세한 실험조건과 제반 물성치에 대한 기본 자료가 선행되어야 한다.<sup>6)</sup> 따라

서 시스템을 간편하게 설치하고 저렴한 운용비와 함께 시스템이 경제성을 갖기 위해서는 적절한 설계를 바탕으로 제작된 실험장치에 다양한 실험을 실시하여 융설 및 해빙을 할 수 있는 최적의 조건을 찾아야할 필요가 있다. 구해진 분석 자료는 주위환경이 여러 장소에 적용되어 에너지 절약에 기여할 수 있을 것이다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용되어질 실험장치의 전체적인 개략도를 나타낸다. 실험장치는 항온실, 시험선로의 모형으로 제작된 실험구조물, 전력공급라인, 온도측정 및 데이터기록장치로 구성된다. 항온실은 응축기, 증발기/송풍기, 온도조절기 등으로 구성되어 있으며, 실내의 온도를 상온에서 영하의 온도까지 자유자재로 설정 및 유지할 수 있도록 제작하였으며 전력공급라인은 전력공급장치, 전열선(heating cable), 접속용 전선(cold-lead) 변압기(voltage regulator)로 구성되어 있으며, 대상지역의 기상조건에 요구되는 설계발열량 범위를 산정, 변압기를 이용하여 그 범위에 적합한 소비전력을 조절 가능토록 하였다. 융설 시설은 수동 및 자동으로 조절할 수 있다. 일반적으로 융설 시설에 있어서 노면 온도 감지기, 대기온도 감지기, 강설 감지기 등을 이용하여 전력소모량의 절감과 효율적인 운전을 피하기 위하여 눈이 오는 것을 사람이 직접 확인하지 않아도 노면의 상태(온도, 습도 등)를 종합적으로 감지하여 노면이 결빙되지 않도록 운용될 수 있는 자동제어 장치를 설치하는 것이 대부분이나 본 실험에서는 전열선의 매설 깊이 및 간격에 따른 효율성과 경제성을 파악하는 것이 주목적이므로 온도, 습도 등의 조건에 관계없이 필요한 환경을 연구자가 인위적으로 직접 조작 가능토록 ON-OFF방식의 수동 제어 방식을 선정하였다.

실험조건으로서는 본 연구가 적용될 경기도 의왕시 부근의 지난 5개년간의 기상자료와 공급된 발열선의 특성을 고려하여 로드 히팅(Road Heating) 이론을 통해 설계 발열량을 산정한 결과 교량에 의한 열 손실을 감안하여  $300W/m^2$ 로 하였으며<sup>7)</sup>, 콘크리트 실험구조물 크기는  $600 \times 600 \times 250mm$ 이며 전열선의 간격 70mm, 100mm, 125mm 깊이는 50mm, 70mm, 100mm로 총 9가지의 경우에 대하여 실험을 시행하였다.



1. Temperature-control chamber 2. Evaporator/Fan 3. Condenser 4. Temperature controller 5. Fan controller 6. Refrigerant pipe 7. Test chamber 8. Insulator 9. Heating cable 10. Connector 11. Cold-Lead 12. Sensors 13. Voltage regulator 14. Data logger 15. Personal computer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

### 3. 설계 출력 검토

Table 1은 실험이 적용될 지역의 최근 5개년간의 1, 2월의 기상자료<sup>8)</sup>를 토대로 설계 기상자료를 나타내고 있다.

Table 1 Weather condition

Outdoor air temp. ( $T_0, ^\circ\text{C}$ )	Snowfall stress for design ( $S, \text{cm/hr}$ )	Air Velocity for design ( $V, \text{m/sec}$ )
6.1	1.42	2.9

용설 시설에 필요한 열 방정식은 1952년 Chapman<sup>9)</sup>에 의해 제안되었고, 1956년 Chapman과 Katunich<sup>10)</sup>은 노면에 필요한 설계출력에 대한 이론식을 제안하였다.

설계출력 :

$$q_o = q_s + q_m + A_r(q_e + q_h) \quad (1)$$

$$q_s = -0.58s \quad (2)$$

$$q_m = 92.6s \quad (3)$$

$$q_e = h_{fg}(0.005V + 0.022)(0.625 - p_{av}) \quad (4)$$

$$q_h = 64.74(0.0125V + 0.055)(t_f - t_0) \quad (5)$$

여기서, 자유면적비율  $A_r$  = 전 면적에 대한 눈이 덮여있지 않은 면적의 비율

$$A_r = A_f / A_t$$

$A_r$  = 자유면적 비율,  $A_f$  = 자유면적 ( $\text{m}^2$ )

$A_t$  = 전면적 ( $\text{m}^2$ )

자유면적비는 0, 0.5, 1 중 하나의 값을 취한다.

$h_{fg}$  = 수막에서 발생하는 증발열 ( $\text{kJ/kg}$ )

$$h_{fg(\text{kcal/kg})} = 539 - 0.643(t_f - 100)$$

$$- 0.000834(t_f - 100)^2$$

$$= 594.72 \text{ kcal/kg} = 2483 \text{ kJ/kg}$$

$t_f$  = 수막온도( $^\circ\text{C}$ ), 보통  $0.5^\circ\text{C}$

$p_{av}$  = 증발압력 ( $\text{kPa}$ ), 보통  $0.52 \text{ kPa}$ 를 취한다.

$V$  = 풍속 ( $\text{km/h}$ )

식(1)에서 식(5)를 사용하여 필요한 열량을 산출한 결과 20%의 손실을 감안했을 때 대략  $300 \text{ W/m}^2$  정도가 적당하리라 생각된다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 Simulation

Fig. 2~4는 simulation을 위한 3-D Grid와 일정 시간 경과후의 구조물의 전체 온도분포도와 구조물 내부의 온도변화를 보기 위하여 중심부를 자른 단면에 대한 온도분포도를 각각 나타낸 것으로서 시간경과 후의 전열선으로부터 발생된 열의 흐름을 3차원 Modeling을 통해 잘 보이고 있다. 모든 변수에 대하여 이러한 방식으로 얻어진 수치적 데이터는 실험에 의한 데이터와 비교 및 검증에 위해 사용되었다.

#### 4.2 외기 설정 온도변화에 따른 온도변화

본 연구에서의 모든 실험은 외기 설정온도에 도달한 구조물에 전력을 공급함으로써 데이터를 취득하였다. Fig. 5~7는 외기 온도에 따라 구조물에 전력을 공급하여 시간변화에 대한 실험 구조물 표면과 내부 온도의 변화를 나타내었다. 전열선의 매설 간격과 깊이가 125mm와 50mm, 발열량은  $300 \text{ W/m}^2$

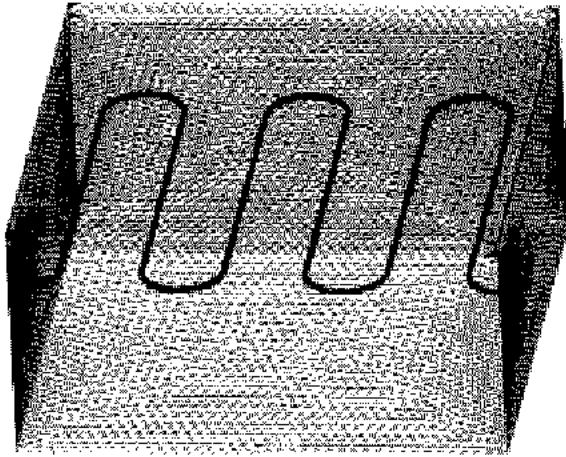


Fig. 2 3-D Grid for simulation

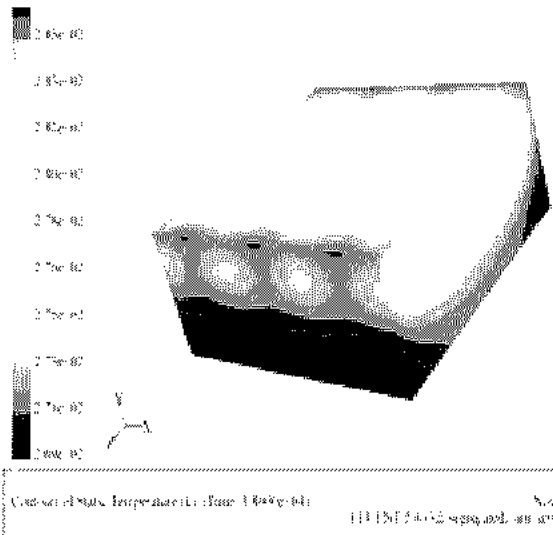


Fig. 3 A distribution chart of temperature

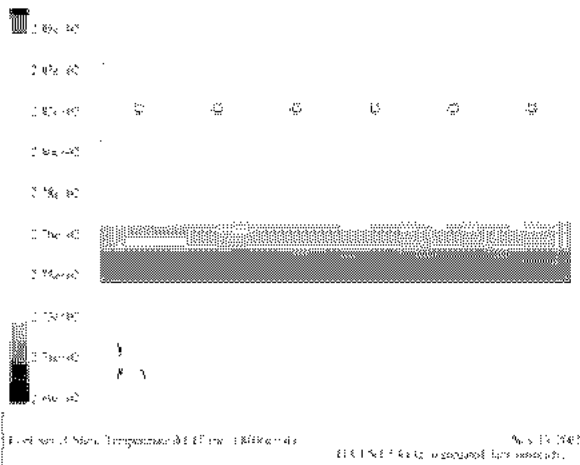


Fig. 4 Cross section of three-dimensional modeling in process of time

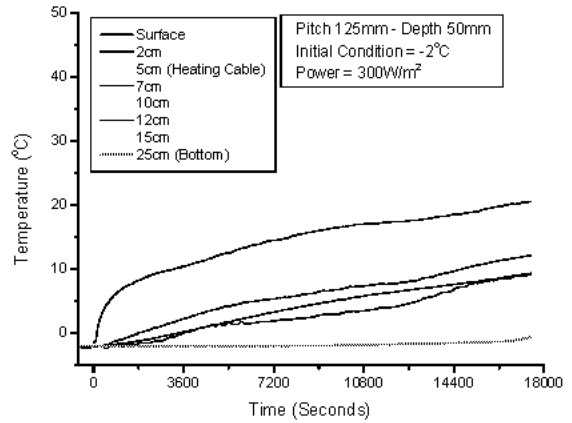


Fig. 5 A internal temperature change of test chamber in process of heating time (-2°C)

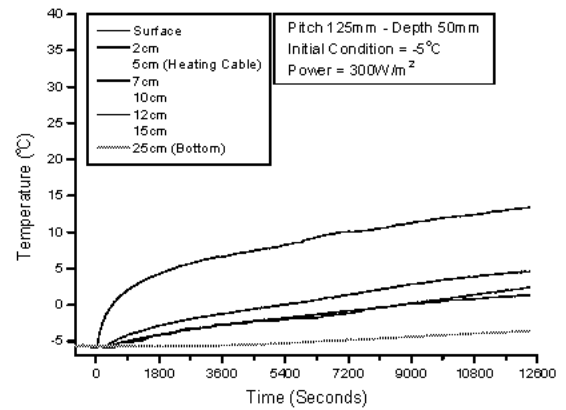


Fig. 6 A internal temperature change of test chamber in process of heating time (-5°C)

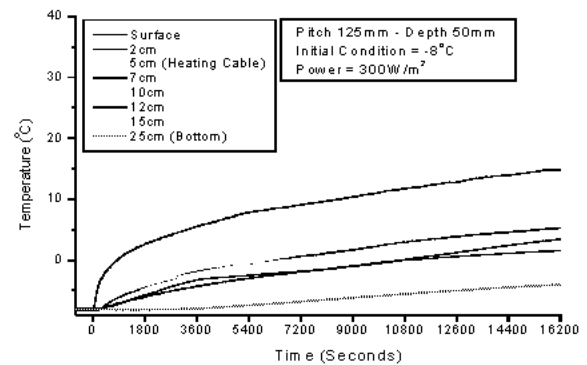


Fig. 7 A internal temperature change of test chamber in process of heating time (-8°C)

일 때 외기 온도가  $-2^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-8^{\circ}\text{C}$ 에서 시간변화에 따른 발열선 및 구조물내부의 깊이별 온도변화를 나타낸다. 표면 근처의 온도 변화를 보면, 외기 설정 온도가 높을수록 빙점 이하까지 도달 하는 시간이 짧음을 알 수 있다.

4.3 전열선의 매설깊이와 간격에 따른 예열시간 비교

Fig. 8~10은 발열선의 각 매설 깊이에 대하여 간격별 예열시간을 비교하였고, Fig. 11~12는 발열선의 각 매설 간격 대하여 깊이별 예열시간을 비교하였다. 사용된 실험값은 설계발열량이  $300\text{ W/m}^2$ , 외기 온도가  $-5^\circ\text{C}$ 인 경우에 대하여 산출하였다. 전 범위에 있어서 깊이가 100mm인 경우를 제외하고는 예열 소요시간의 차이는 있으나 동일한 형태의 순서를 형성하고 있다. 동일한 간격의 조건에서 깊

이에 따른 예열 시간을 살펴보면 매설깊이가 깊을수록 더 많은 시간이 소요됨을 알 수 있으며, 매설 깊이가 고정된 조건에 대하여 간격에 따른 예열시간을 비교해 본 결과 간격과 깊이가 125mm-100mm와 100mm-100mm인 경우를 제외하고는 간격이 넓어질수록 소요시간이 증가하였다.

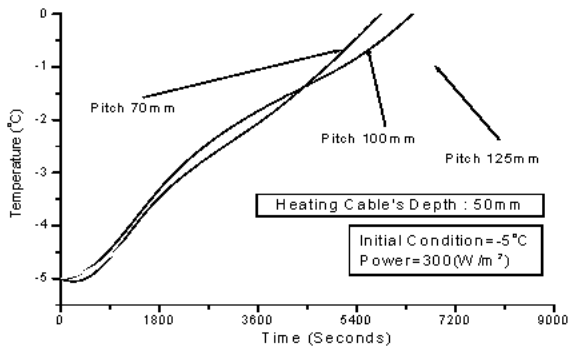


Fig. 8 Comparison of depth 50mm with preheat time

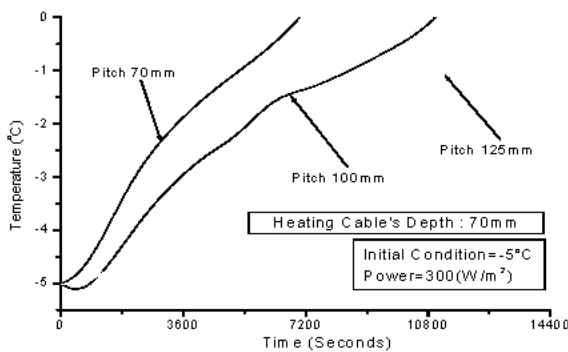


Fig. 9 Comparison of depth 70mm with preheat time

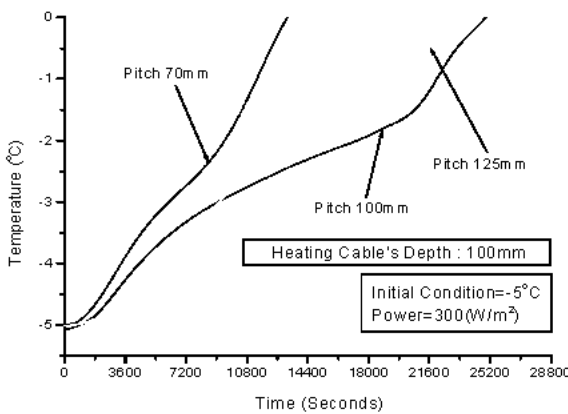


Fig. 10 Comparison of depth 100mm with preheat time

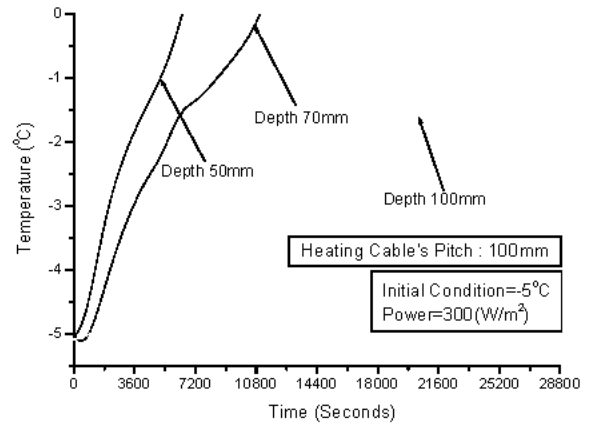


Fig. 11 Comparison of depth 50mm with preheat time

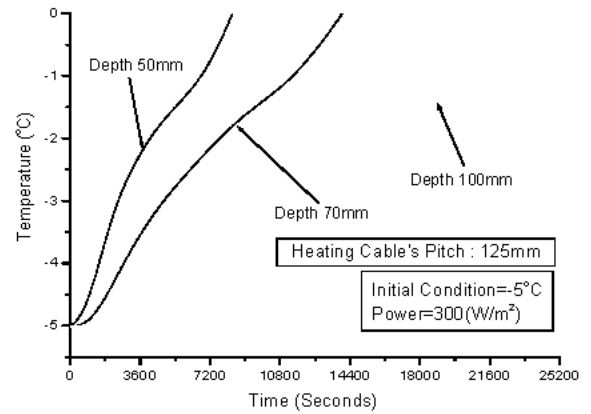


Fig. 12 Comparison of depth 70mm with preheat time

Table 2 Preheat time of heating cable for pitch and depth

Pitch \ Depth	70mm	100mm	125mm	Outdoor air temp.
50mm	2400sec	3300sec	4080sec	$-2^\circ\text{C}$
	5820sec	6420sec	8400sec	$-5^\circ\text{C}$
	7020sec	8700sec	10740sec	$-8^\circ\text{C}$
70mm	3601sec	7440sec	9240sec	$-2^\circ\text{C}$
	7080sec	10980sec	13980sec	$-5^\circ\text{C}$
	10620sec	16620sec	18240sec	$-8^\circ\text{C}$
100mm	9120sec	17220sec	13980sec	$-2^\circ\text{C}$
	13200sec	24900sec	22980sec	$-5^\circ\text{C}$
	17880sec	31800sec	30600sec	$-8^\circ\text{C}$

Table 3 Preheat time of heating cable for pitch and depth (simulation)

Pitch Depth	70mm	100mm	125mm	Outdoor air temp.
50mm	1920sec	3240sec	5400sec	-2°C
	5040sec	7320sec	8460sec	-5°C
	8880sec	11160sec	12780sec	-8°C
70mm	3000sec	4800sec	10320sec	-2°C
	9660sec	12600sec	15840sec	-5°C
	13680sec	20520sec	22260sec	-8°C
100mm	6300sec	12180sec	11640sec	-2°C
	12000sec	24240sec	21050sec	-5°C
	20880sec	32040sec	30420sec	-8°C

각 변수별(온도, 깊이, 간격) 소요된 대략적인 예열시간은 Table 2에 나타내었으며 Table 3은 동일한 조건에서 simulation한 예열시간을 나타낸다. Table 2를 종합해 보았을 때 의왕시의 평균 겨울 온도를 -5°C로 생각한다면, 전열선의 깊이가 70mm 이상인 경우는 전열선 간격을 70mm로 하는 것이 최적이며, 발열선 깊이를 50mm로 했을 때 즉, 전열선을 얇게 매설할 경우는 전열선 간격을 100mm로 하는 것이 전열선 간격을 70mm로 하는 것보다 예열시간은 조금 더 걸리나 큰 차이가 없기 때문에 더 적당하다고 사료된다. 즉, 전열선을 얇게 매설하면 차량 중량에 대한 융설 시스템의 손상 우려는 있으나 예열시간을 많이 단축하여 효율이 높고, 또 전열선 간격을 증가시킴에 의한 전열선 매설길이를 적감시킬 수 있어 매우 경제적이다 할 수 있다. Table 2와 Table 3을 비교해 보면 실험을 해서 얻은 값과 simulation의 결과값이 대체적으로 일치하는 것을 알 수 있으며, 오차는 30%이내인 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 전열선에 의한 효율적인 융빙 및 결빙방지를 위하여 매설 간격과 깊이에 대하여 9가지의 변수로 최적조건을 도출하고자 하였으며, 주위환경이 다른 여러 장소에 적용이 가능토록 여러 가지 변수를 이용하여 추가적인 자료를 구축하고자 하였다. 이와 관련하여 전열선에 의한 융설 시스템의 제반적인 사항에 대한 이론 및 실험적인 고찰을 하였으며, 또한 범용 프로그램인 Fluent를 이용하여 검증 실시하였다. 그 결과 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 융설 시스템의 설계에 있어서 중요한 요소는 발열선의 특성과 대상 지역의 기상조건에 따른 설계 발열량의 산정이다. 따라서, 경량전철 차량이 주행할 시험선로가 있는 경기도 의왕시 부근의 지난 5개년간의 기상자료와 공급된 전열선의 특성을 고려하여 로드 히팅(Road Heating) 이론을 통해 산정한 결과 교량에 의한 열 손실을 감안하여 약  $300 W/m^2$  정도의 설계발열량을 사용하는 것이 대상 지역에 적합한 것으로 나타났다.
- 2) 발열선의 매설깊이와 간격에 따라 외기 설정 온도별로 구조물의 예열시간을 비교한 결과 동일한 매설간격과 깊이의 경우에서 외기 설정 온도에 따른 예열시간을 볼 때 외기 설정 온도가 낮을수록 더 많은 예열시간이 소요되었으며, 간격과 외기 설정 온도를 고정된 조건 하에서는 깊이에 따른 예열시간은 전열선의 매설 깊이가 깊을수록 소요시간이 증가되었다. 그리고 동일한 매설깊이와 외기 설정 온도에서는 간격과 깊이가 125mm-100mm와 100mm-100mm인 경우를 제외하고는 간격이 넓을수록 더 많은 예열시간이 소요되었다.
- 3) 간격과 깊이별 변수 9가지를 동일한 외기 설정 온도 조건에서 확인해 보았을 때 간격과 깊이가 70mm-50mm 일 때가 예열시간이 가장 짧았으며, 그 다음으로는 100mm-50mm인 경우로 나타났다.
- 4) 실험 결과와 simulation을 통한 결과는 ±30%이내에서 일치하였다.
- 5) 종합적으로 보았을 때, 시험선로가 가설되는 의왕시의 경우 전열선을 50mm 이내로 얇게 매설할 경우는 전열선 매설 간격을 70mm에서 100mm사이로 하는 것이 최적이며, 매설 깊이가 70mm이상일 경우에는 전열선 간격을 70mm 이내로 하는 것이 최적이라고 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 1997, "A Study on the Criteria of Design and Construction for Snow Melting System

- Housing Research Institute Korea National Housing Corporation".
2. Wang, L. W., 1997, "An Application of Highway Snow Melting System Using Electric Heating Cable in Korea", Hanyang University
  3. Heat Pipe, Daeyu Corporation.
  4. Shin, H. J., Ahn, C. H., and Cho, C. S., 1995, "Overview for the Effective Use of Geothermal Energy The Society of Air Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea", Vol. 24, No. 4.
  5. Kim, S. G., 1997, "도로 노면 결빙방지를 위한 융설체계에 관한 연구", Dongguk University.
  6. Lee, K. S., and KO, Y. W., 1999, "An analysis of snow melting process for a study of defrosting phenomena, The Society of Air Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea", Vol. 11, No. 1, pp. 38~47.
  7. Kim, J. Y., 1995, "교량의 동결방지", Korea Concrete Institute, Vol. 7, No. 1.
  8. 기상청 자료, "Korea Meteorological Administration".
  9. Chapman, W. P., 1952, "Design of Snow Melting System, Heating and Ventilating (April)", p. 92 and, (November) p. 88.
  10. Chapman, W. P. and S. Katunich, 1956, "Heat requirements of Snow Melting Systems", ASHAE Transactions, pp. 62~359.