

PHP를 이용한 도로용설 시스템에 관한 기초연구 A Basic Study of the Snow Melting System for the Anti-Freezing Road using the Pulsating Heat Pipe

김종수 · 하수정 · 손길재
J. S. Kim, S. J. Ha and K. J. Son

(접수일 : 2010년 3월 4일, 수정일 : 2010년 5월 27일, 채택확정 : 2010년 6월 4일)

Key Words : Pulsating Heat Pipe(진동형 히트파이프), Snow Melting System(용설 시스템)

Abstract : The purpose of this study is to develop a snow melting system using the pulsating heat pipe(PHP). The experimental apparatus is consisted of a PHP, a concrete structure, a constant water thermostatic bath and a flowmeter. The experiment was performed at the outdoor air temperature of -8°C and inlet temperature of hot water of 75°C. PHP is the closed and non-loop type heat exchanger which is charging R-410A as an operating fluid. As experimental results, the temperature profile of vertical and horizontal orientation of concrete structure was measured with operating time. The heat flux of the snow melting was required more than 300 W/m². We confirmed that the snow melting system using the PHP was useful for anti-freezing road.

기 호 설 명

1. 서 론

- T : 시간 [min]
- s : 강설강도 [mm/hr]
- m : 강설량 [cm/hr]
- V : 풍속 [m/s]
- q_o : 설계 출력 열유속[W/m²]
- q_s : 영하의 눈이 0°C 눈이 될 때 필요한 열유속 [W/m²]
- q_m : 0°C 눈이 0°C 물이 될 때 필요한 용해열유속 [W/m²]
- A_r : 전면적에 대한 자유 면적의 비율
- q_e : 증발잠열[kJ/kg]
- q_h : 대류와 복사에 의해 전달되는 열유속[W/m²]
- C_p : 비열 [J/kg · K]
- ρ : 밀도 [kg/m³]
- h_f : 눈의 용해열 [334 kJ/kg]
- h_{fg} : 수막에서 발생하는 증발잠열[kJ/kg]
- P_{av} : 증발 압력 [kPa]

오늘날의 산업과 기술개발은 유동 인구나 물동량의 급격한 증가를 가져왔고 이는 폭발적인 자동차 증대와 도로망 확충으로 이어지고 있다. 이로 인하여 도로의 유지·관리비용도 급격히 증가하고 있는 추세이다. 특히, 동절기는 제설작업 등으로 인한 도로 유지에 막대한 비용이 소요될 뿐만 아니라, 결빙으로 인하여 도로 파손의 직접적인 원인이 되어 관리 비용이 증가된다.

우리나라 겨울철의 도로면 결빙에 따른 자동차의 전복사고 및 영동 산간지방에서의 폭설로 인한 교통 두절의 문제는 막대한 에너지 손실을 일으키며, 곧 도로상의 눈이나 결빙의 효과적인 처리는 국가의 경제적인 측면과 공공의 안정을 위하여 필수적인 문제라 할 수 있다^{1,2)}.

현재 국내의 제설 방법에는 제설장비를 이용한 방식, 염화칼슘 등과 같은 화학제품의 용해잠열을 이용한 방식, 모래를 살포하는 재래방식이 주로 사용되고 있으며 적설량이 많은 영동지역에서는 전기 열선을 이용하기도 한다. 이와 같은 방법들은 제설시의 일시적인 효과 및 반복적인 작업을 필요로 할 뿐만 아니라 적설 및 노면 결빙 시 초기대응이 어렵다. 특히 전기 열선의 경우 전력공급을 위한 전력변

김종수(교신저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : jskim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6176
하수정, 손길재 : 부경대학교 대학원

환장차시설비 및 전기요금으로 인한 경제적 운용 등의 문제점이 제기 되므로, 겨울철 노면의 결빙을 방지하기 위해 경제적·효과적으로 도로면에 필요한 열을 지속적으로 공급하는 것이 가장 적절한 대책이라 할 수 있다³⁻⁵⁾. 해외에서는 지구 온난화와 관련하여 지열, 온천수 폐열 등의 자연에너지를 이용한 도로 융설에 관한 연구가 적극적으로 진행되고 있다. 예로 들면 일본의 히트파이프 협회의 “실용 히트파이프 제 2판”에 따르면 일본 나고야 지역의 도로 비교 실험을 통해 히트파이프를 노면으로부터 5cm이하에 매설하여 융설을 실시한 경우 동절기 적설 기간중 2/3이상 노면에 눈이 적설되지 않는 반면에, 히트파이프를 매설하지 않은 도로의 경우 동절기부터 그 다음해 3월까지도 눈이 계속해서 적설되는 것으로 보고되고 있다⁸⁻¹⁰⁾. 이와 같은 자연에너지를 활용 할 경우 온수를 높이기 위하여 Heat Pump시스템을 사용 할 수밖에 없다.¹¹⁾ 따라서, 경제적으로 효과적인 융설과 해빙을 위하여 진동형 히트파이프(이하 PHP라 함)를 이용한 융설 시스템을 개발하고자 한다. 즉, 적설 및 결빙이 예상되는 노면 아래에 일정한 간격과 깊이로 PHP와 열공급 배관을 매설하여, 겨울철 눈이 내리거나 기온강하에 의하여 노면의 결빙이 발생하였을 때 자동적으로 온도를 감지하여 온수를 공급함으로써 융설 및 해빙이 이루어지는 시스템이다. 따라서 본 연구에서는 융설 및 해빙을 할 수 있는 최적의 조건을 찾기 위해 설치 지역의 겨울철 기후 데이터를 바탕으로 콘크리트 구조물 표면의 결빙유무에 따른 실험을 통하여 겨울철 도로 결빙 방지와 융설에 이용할 수 있는 효율적인 시스템 개발을 통해 그 적용 가능성을 제시하고자 한다.

2. PHP의 작동원리와 도로융설 시스템의 구조

2.1 PHP의 작동원리

PHP의 기본적인 열전달 메카니즘은 증발부와 응축부 사이에서 발생하는 작동유체의 진동으로 인해 작동유체가 가지고 있는 잠열을 수송하여 열을 전달하게 된다⁶⁾. PHP의 기본적인 작동 개념도는 Fig. 1에 나타내었다. 관내를 진공시킨 후 적정량의 작동유체를 봉입하면 작동유체는 모세관내에서 액슬러그와 증기슬러그가 불규칙적으로 분포하며 유동이 없는 평형상태로 유지된다. 이 상태에서 PHP 한쪽

부분을 가열하거나 양단에 온도차를 주면 증발부에서는 핵비등(nucleate boiling)에 의해 기포들이 발생 및 성장하고, 증발부내의 증기압이 상승하게 된다. 이 때 발생하는 기포들의 체적팽창에 의해 작동유체를 저온부(응축부)로 밀어내어 결국 평형상태가 붕괴된다. 또한, 응축부로 이동한 기포들은 저온부에서 응축됨으로써 증발부와 응축부 사이의 압력차를 더욱 증가시킨다. 결국 PHP는 하나의 관으로 연결되어 있기 때문에, 한 쪽에서의 유동은 결국 관 전체의 유동에 영향을 주게 된다. 즉, 응축부에서의 액슬러그 및 기포군들의 유동이 증발부의 기액운동에 영향을 주게 되며, 이러한 영향은 양단에서의 압력을 증폭시키거나 상쇄시키는 결과를 가져온다. 이러한 현상을 Akachi⁷⁾등은 복원력(restoring force)이라 하였다. 액의 진동이 발생되며, 액슬러그의 현열과 기포의 응축에 의한 잠열이 동시에 축방향으로 수송된다고 할 수 있다.

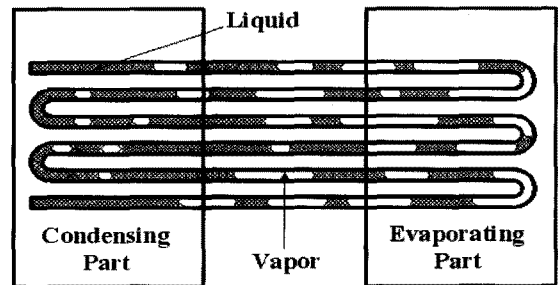
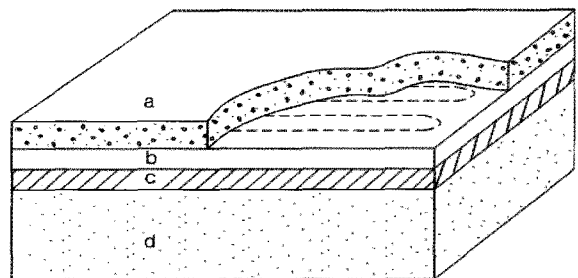


Fig. 1 Basic operating principle of PHP

2.2 PHP 융설시스템의 구조

PHP를 이용한 도로 융설 시스템은 콘크리트 구조체(1 m × 1 m × 0.25 m)내부에 밀폐형 2상 페루프 히트파이프(closed heat pipe of two-phase)를 ASHRAE handbook에서 제시한 노면에서부터 최



- a : 콘크리트 노면(5cm)
- b : 히트파이프 매설층(3cm)
- c : 단열층(3cm)
- d : 콘크리트 기반부

Fig. 2 Detailed diagram of concrete structure

소 매설 깊이인 약 5 cm 하부에 매설시켜¹²⁾ 히트파이프의 작동시 노면부로 열을 전달시킴으로서 융설이 가능한 구조로 되어 있다. 히트파이프의 열원은 온수 순환을 통해 공급되며 온수 밸브를 이용하여 유량 조절이 가능하게 되어 있다. Fig. 2는 본 연구에 적용한 콘크리트 구조체의 상세 단면도를 나타내었다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 연구에서는 콘크리트 구조물(1m × 1m × 0.25m) 내부에 PHP를 매설하여 도로 융설 시스템으로서 PHP의 적용가능성을 알아보았다.

Fig. 3은 실험장치의 전체적인 개략도를 나타낸 것으로, PHP가 매설된 시험부, 온수 공급을 위한 열원부, 온수의 유량과 온도를 조절하기 위한 제어부 및 계측부로 구성된다.

PHP의 성능 실험의 열원부로는 약 75℃의 열원 공급을 위해 항온조가 사용되었으며, 제어부는 원활한 유량을 공급하기 위해 순환 펌프와 인버터로 펌프 회전수를 조정하여 공급유량을 제어하였다. 또한 계측부는 T-type 열전대를 사용하여 다점의 온도를 측정하기 위하여 데이터로거와 인터페이스를 위한 PC로 구성되어 있다.

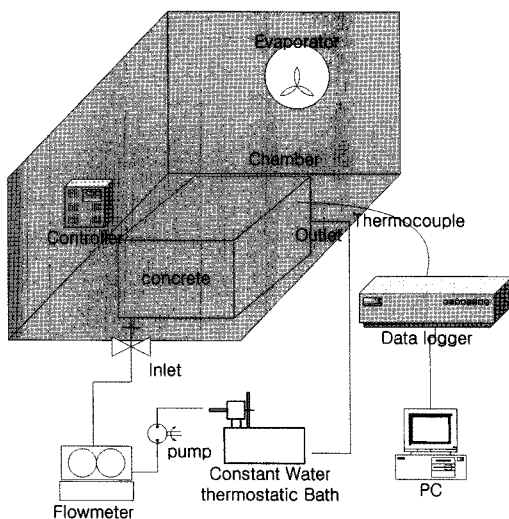


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

Fig. 4는 실험체의 구체적인 형상을 나타낸 그림이다. 실험 장치의 전체적인 형상은 수배관부에 XL-파이프를 결합한 형태로 외경 4.0 mm, 내경 3.1

mm인 강관을 서펜타인(serpentine)형태로 만든 PHP를 결합한 구조이다. PHP는 강관 사이의 피치가 24 mm, 길이는 900 mm의 16턴(32단)으로 폐루프형으로 제작하였다. 항온조의 온수 입·출구 측에 T-type 열전대를 1개씩 부착하여 온수의 입·출구 온도를 측정하였다. PHP 온도를 측정하기 위해 총 12개의 T-type의 열전대를 부착하였으며, 콘크리트 구조체 내부에도 총 42개의 T-type 열전대를 부착하여 시간에 따른 깊이와 표면에서의 온도 변화를 알아보았다.

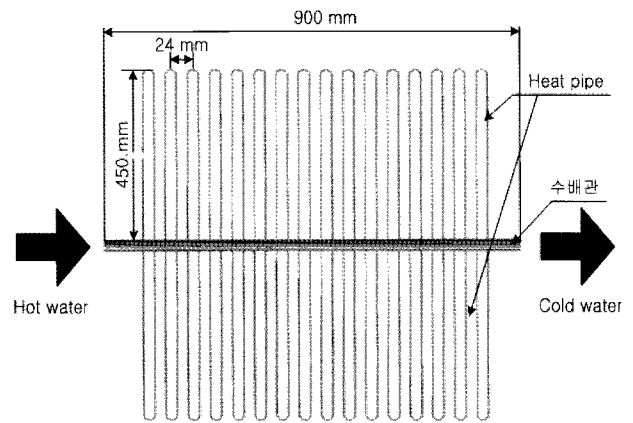


Fig. 4 Schematic diagram of test section

Table 1 Experimental conditions

Parameters	Values
Outdoor air temperature	-8℃
air velocity	1 m/s
Inlet temperature of hot water	75℃
Mass flow rate of hot water	2 kg/min
Initial temperature of PHP operation	0℃ (융점온도)

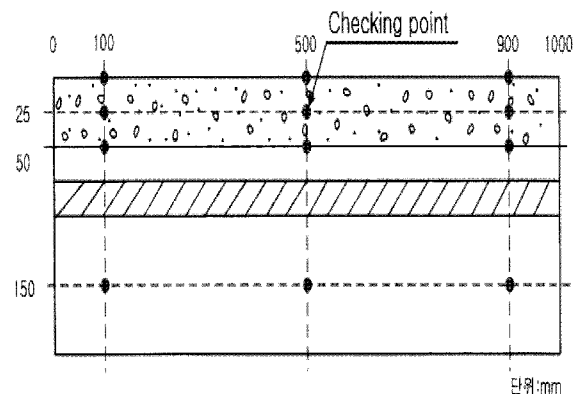


Fig. 5 Measurement location of T-type thermocouple for vertical orientation of concrete structure

Fig. 5와 Fig. 6은 깊이에 따른 온도변화와 표면에서 온수배관과의 간격에 의한 온도 변화를 측정하기 위한 열전대 부착 상세도를 나타낸 것이다.

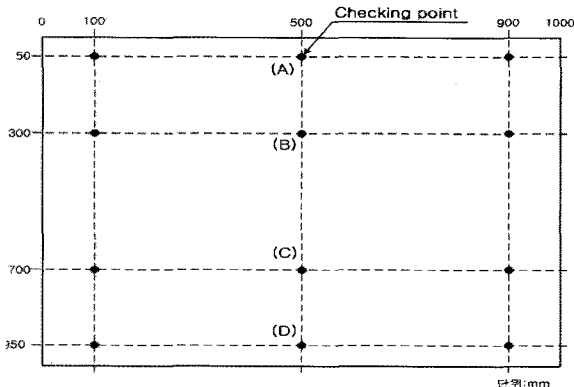


Fig. 6 Measurement location of T-type thermocouple for horizontal orientation of concrete structure

3.2 실험방법

PHP에 작동 유체를 충전하기 전에 로터리 펌프(RP)와 디퓨저 펌프(DP)로 구성된 고진공 펌프로 1시간 동안 5.0×10^{-6} torr까지 진공상태로 만들었다. 그 후 작동유체는 작동유체 R-410A를 PHP의 전체 체적에 대해 40%로 봉입하였다. 온수 순환 수량 및 열전대로부터 얻어진 데이터의 처리는 2초 간격으로 약 10시간 동안 측정하였다. Table 1은 본 연구의 실험조건을 나타낸 것으로, 강원도의 겨울철 평균 외기온도를 고려하여 -8°C 를 외기로 설정하였다.

PHP에 공급되는 온수 온도는 75°C 이고, 온수의 유량은 2 kg/min 로 일정하게 공급하였다.

3.3 PHP 융설시스템의 실험결과 처리 방법

본 실험에서 도로 융설 시스템을 설계하기 위해서 영하의 눈을 0°C 의 눈으로 만드는데 필요한 열유속을 Chapman과 Katunich^{1,2)}의 융설 열방정식을 이용하여 구하였다. 설계 강설강도는 강원도의 일 최대강설량의 1/20값인 2.0 cm/hr 을 적용하였으며, 지난 3년 동안 일 최고 적설량 (33.3cm : 원주)을 기준으로 하였다.^{13,14)}

Chapman과 Katunich의 융설 열방정식에서 눈을 0°C 의 눈으로 만드는데 필요한 열유속(q_s)은 다음과 같은 식을 이용하여 계산한다.

$$q_s = sc_p \rho (0 - t_a) / c_1 = -0.58st_a \quad (1)$$

$$c_1 = \text{단위환산계수} = 3.6 \times 10^6$$

$$\rho = \text{눈을 물의 밀도로 환산, } 998 \text{ kg/m}^3$$

0°C 의 눈을 녹이는 용해열유속 (q_m)은 식 (2)로 구한다.

$$q_m = sh_f \rho / c_1 = 92.6s \quad (2)$$

눈의 증발 잠열 (q_e)은 식 (3)으로 계산한다.

$$q_e = h_f(0.005V + 0.022)(0.625 - p_{av}) \quad (3)$$

그리고 대류와 복사열에 의한 열전달 손실률 (q_h)은 식 (4)로 구한다.

$$q_h = 64.74(0.0125V + 0.055)(t_f - t_a) \quad (4)$$

따라서, 설계 출력열유속(q_o)은 위에서 구한 식 (1)~(4)를 이용하여 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$q_o = q_s + q_m + A_r(q_e + q_h) \quad (5)$$

위의 식 (1)~(5)를 이용하여 눈에 대한 단일 효과를 고려한 자유면적 비율 (A_r)은 설계목적상 최대치인 $A_r=1$ 로 가정하였으며, 강설강도 2.0 cm/hr , 대기온도 -8°C , 풍속 1 m/s 일 경우, 설계 출력 열유속(q_o)은 다음과 같다.

$$q_o = 9.28 + 185.2 + 1(10.43 + 55.029) \\ \approx 260 \text{ W/m}^2$$

이때, 설계출력열량은 토공부를 기준으로 하고 교량 및 고가도로인 경우 10~30%의 손실을 감안하므로¹⁴⁾ 설계출력열유속은 300 W/m^2 으로 한다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 실험 결과

본 연구의 실험값은 Table 1의 운전조건하에서 PHP 작동시 콘크리트 구조체의 수직 방향(깊이 방향)과 수평 방향(온수배관과의 간격)으로 나누어 콘크리트 구조체의 온도분포를 나타내었다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이, 수직 깊이 50 mm와 25 mm 일 때의 온도분포는 융점(0°C)이상의 온도까지 상승하는데 걸리는 시간은 약 60분 정도 소요되었다. 그리고 콘크리트 구조체의 표면 온도가 융점(0°C)이상의 온도까지 상승하는데 약 130분 정도가 소요되었다. 약 150 mm 깊이인 지반부의 온도가 가장 낮게 측정되는 것은 지반부로의 열손실을 방지하기 위해 매입한 단열층의 기능이 제대로 발

휘된 것으로 판단된다. Fig. 8은 Fig. 6의 열전대 설치 위치에서 측정된 콘크리트 구조체 표면의 온도 분포를 나타낸 것이다. 온수가 흐르는 수배관 외곽부표면 (표면 A, D 지점)의 온도배관에 가까울수록 (표면 B, C지점) 온도가 높게 측정되었다. 온수 배관 외곽부표면 (표면 A, D)의 온도는 최고 약 4 ~ 6°C 정도 측정되었으며 융점이상의 온도까지 도달하는데 약 180분가량이 걸림을 알 수 있다. 즉, 콘크리트 구조체 표면온도가 0°C에 도달하기 위해서는 대략 120분가량이 소요됨을 알 수 있다. PHP에서 공급되는 온수의 입·출구 평균 온도차가 2.6°C, 공급되는 온수의 양은 2 kg/mim 이므로 PHP에 의해 312 W/m²의 열유속이 도로 융설에 공급됨을 알 수 있다. 따라서, 본 PHP를 이용한 도로 융설 시tm

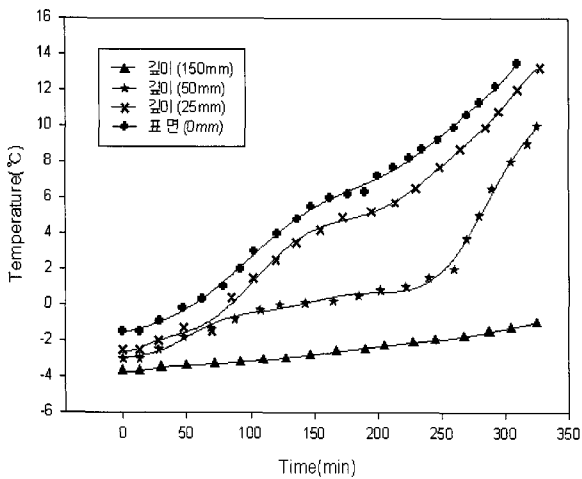


Fig. 7 Surface temperature profile for vertical orientation of concrete structure according to the PHP operation time

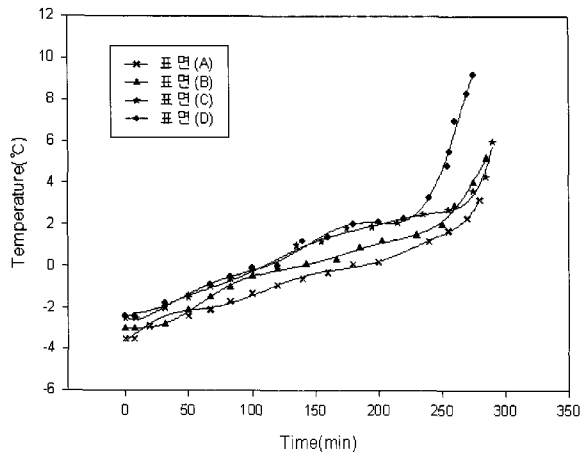


Fig. 8 Surface temperature profile for horizontal orientation of concrete structure according to the PHP operation time

템의 출력열유속은 설계출력 열유속 300 W/m² 보다 크므로 작은 온수 온도차를 이용하여 온수배관을 1 m간격으로 설치하더라도 도로 융설이 가능하다는 것을 확인하였다.

5. 결 론

Table 1의 운전조건하에서 도로 융설 시스템으로 PHP를 사용하여 콘크리트 구조체의 수직 방향(깊이 방향)과 수평 방향의 온도분포를 측정하였다. 이에 대한 PHP의 적용 가능성 여부에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 콘크리트 구조체의 수직 방향(깊이 방향)에 따른 온도분포 실험결과로부터 콘크리트 구조체의 표면 온도가 융점(0°C)이상의 온도까지 상승하는데 약 130분 정도로 많이 시간이 소요되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 표면에 눈이 쌓인 후 보다는 눈이 쌓이기 전에 미리 PHP를 작동하여 도로표면온도를 상승시켜 눈이 쌓이는 것을 방지하는 것이 더욱 효과적일 것으로 사료된다.

2) 온수 수배관(수평방향)과의 간격에 따른 콘크리트 구조체 표면 온도가 0°C에 도달하는데 소요되는 시간이 콘크리트의 열전도 계수가 낮음에도 불구하고 대략 120분가량이 소요되는 것으로 보아 PHP의 열전달에 의해 도로 융설이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

3) 융설에 필요한 설계열유속은 강원도의 3년간의 일 최대 강설량의 1/20을 기준으로 강설강도 2.0 cm/hr 일 때 300 W/m²로 계산되었다. 본 실험에서 사용한 PHP를 이용한 도로 융설은 입·출구온도가 2.6°C, 공급되는 온수유량은 2 kg/min이므로, 312 W/m²의 열유속이 공급되어 충분한 융설 성능을 발휘함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2007학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (과제번호: PK-2007-023)

참고문헌

1. W. P. Chapman, 1952, "Design of Snow Melting System, Heating and Ventilating", p. 92, p. 88.

2. W. P. Chapman, S. Katunich, 1956, "Heat requirements of Snow Melting System", ASHRAE Transactions, pp. 62~359.
3. J. P. Frier, 1964, "Design Requirements for Infrared Snow Melting System", Illuminating Engineering, p. 686.
4. C. H. Witsken, 1965, "Snow Melting with Electric Wire", Plant Engineering, p. 129.
5. R. J. Lawrie, 1965, "Electric Snow Melting Systems", Electrical Construction and Maintenance, p. 129.
6. J. E. Nydahl, K. Pell and R. Lee, 1987, "Bridge Deck Heating with Ground-Coupled Heat Pipes", ASHRAE Transaction, Vol. 93.
7. L. R. Ingersoll, D. J. Zobel, 1948, "Heat Conduction with Engineering and Geological Application", McGraw-Hill, p. 7.
8. 일본 히트파이프 협회, 2001, "실용히트파이프 제 2판", pp. 215~220.
9. 日本土木學會誌, 1991, Vol. 76, No. 5.
10. 日本土木技術, 1991, Vol. 46, No. 9.
11. Chiasson, A. D. et al., 1999, "A model for Simulating the performance of a Pavement Heating System as a supplemental Heat Rejecter With Closed-loop Ground-Source Heat Pump Systems", ASME journal of solar Energy.
12. "ASHRAE HAND BOOK", 1995, pp. 46~47
13. 임석진, 2007, "경량전철 시스템 선로 결빙방지에 관한 실험적 연구", 부경대학교 대학원 석사 학위논문, p. 46.
14. 최진국, 1996, "용설시설의 설계와 시공 기준에 관한 연구", 한국건설기술연구원, p. 28.