

## 지열 융설시스템을 적용한 포장체에서의 열전도 분석

### The Thermal conductivity analysis on the pavement applying geothermal snow melting system

이석진<sup>1)</sup>, Lee, Seok Jin, 김봉찬<sup>2)</sup>, Bong-Chan Kim, 서운종<sup>3)</sup>, Un-Jong Seo, 이승하<sup>4)</sup>, Seung Ha Lee, 이주호<sup>5)</sup>, Joo-Ho Lee

<sup>1)</sup> 롯데건설 기술연구원 책임연구원, Chief Researcher, Research & Development, LOTTE E & C

<sup>2)</sup> 롯데건설 기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Research & Development, LOTTE E & C

<sup>3)</sup> 지케이에너지 기술이사, Chief Technology Officer, GK Energy Co., Ltd.

<sup>4)</sup> 한국유지관리 SOC 사업부 과장, Team Manager, SOC Division, Korea Maintenance & Control

<sup>5)</sup> 롯데건설 기술연구원 이사, Director, Research & Development, LOTTE E & C

**SYNOPSIS:** A sliding accident on the road have a high percentage by road freezing, especially, it is often appeared at bridges and Tunnel of freezing areas. Thus, the stability of road operations is enhanced by preventing a partial freezing phenomenon. According to the geothermal snow melting system analysis, a pattern of thermal conductivity is found out about pavement materials of concrete and asphalt when it is buried. The thermal conductivity study is essential that be applied the geothermal snow melting system according to heating exchanger pipe laying of lower pavements. The model tests are conducted on low temperature in freezer using the manufactured test model which is equal to pavement materials. And Many variables are discovered from numerical analyzes of the same conditions with model test.

**Keywords :** thermal conductivity, geothermal, snow melting, road freezing

## 1. 서론

최근 급속히 진행되고 있는 지구온난화 때문에 CO<sub>2</sub>저감 대책이 범국가적인 문제로 대두되고 있다. 이러한 분위기에 편승하여 신재생에너지, 녹색성장 등 친환경 기술에 대한 관심이 증폭되고 있다.

본 고에서는 신재생에너지 분야중 지열에너지 활용에 대한 기초 연구를 수행 하였다. 지열에너지는 신재생에너지 중에서 지속적이며 효율적인 에너지로 각광 받고 있으며 그 활용성 면에서도 다양한 분야에 적용되고 있다. 지열에너지를 활용해서 도로를 융설하게 되면 도로운영 중 발생 할 수 있는 결빙에 의한 사고를 방지 할 수 있다. 도로에서 발생하는 사고 중 도로결빙에 의한 미끄러짐 사고비율이 높으며, 특히 상습 결빙 지역인 교량과 터널 입출부에서 발생 빈도가 높게 나타난다. 이렇게 부분적으로 발생하는 결빙 현상을 방지하여 도로운영의 안정성을 높이고자 한다.

본 고는 지열 융설의 기초 연구로써 일반 도로포장 재료인 콘크리트, 아스팔트 두 종류의 재료에 대한 융설시 열전도 양상을 파악하고자 한다. 지열융설 시스템 적용시 포장체 하부 열교환 파이프 매설에 따른 열전도도 연구가 필요하다. 도로 포장과 동일 재질의 시험체를 제작하여 냉동고에서 저온상태의 모형시험을 수행 하였고, 모형시험과 동일 조건의 수치해석을 통해 보다 다양한 융설에 대한 변수를 파악 하였다.

## 2. 포장체 열전도도 수치해석

### 2.1 재료의 물성치

포장체 종류별 열전도도 수치해석은 매설깊이에 따라 초기온도 조건하에서 표층의 온도가 0℃ 이상이 되는 용설 시간을 검토하기 위한 목적이 있다. 포장체 표층의 열전도도 수치해석을 위한 포장재료 및 용설 파이프의 열적 물성치를 정리하면 표 1과 같다. 콘크리트 및 아스팔트의 열적 물성치는 온도에 따라 변화하는 특성을 가지고 있으므로, 본 해석에 적용한 물성치는 변화하는 온도에 대한 평균치를 적용하였다. 또한, 용설파이프의 열전도율 및 비열은 일반적인 동파이프에 대한 열적 물성치를 적용하였다. 열전도도 수치해석에 이용한 수치해석 프로그램은 ABAQUS V6.5.1을 이용하였다.

표 1. 수치해석에 필요한 재료별 열적 물성치

구 분	열전도율 (kcal/m · hr · ℃)	비 열 (kcal/kg · ℃)	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (MPa)	포아송비
아스팔트	1.31	0.400	23.5	7,000	0.3
콘크리트	1.46	0.214	24.0	24,900	0.17
용설 파이프 (OD=6.35mm, T=0.9mm)	346.0	0.092	78.5	120,000	0.34

### 2.2 수치해석 변수

포장체 종류별 열전도도 수치해석의 변수는 초기 온도조건 -6.3℃, 포장재료 종류(콘크리트, 아스팔트), 용설 파이프 심도(5cm, 7cm) 및 용설 파이프 간격(20cm, 30cm, 35cm)별로 전체 12 CASE를 해석하였다. 초기 온도조건은 1971년부터 2000년까지 전국 최저 지면온도인 대관령 지방의 -5.3℃에서 -1℃를 더 감소시킨 -6.3℃를 적용하여 극한 조건을 선정하였다(기상청, 1971~2000년 30년 통계자료).

표 2. 열전도도 수치해석 CASE

포장체 종류	용설파이프 심도	용설파이프 간격	해석 CASE	포장체 종류	용설파이프 심도	용설파이프 간격	해석 CASE
아스팔트	5cm	20cm	CASE 1	콘크리트	5cm	20cm	CASE 7
		30cm	CASE 2			30cm	CASE 8
		35cm	CASE 3			35cm	CASE 9
	7cm	20cm	CASE 4		7cm	20cm	CASE 10
		30cm	CASE 5			30cm	CASE 11
		35cm	CASE 6			35cm	CASE 12

또한, 용설 파이프 간격은 그림 1과 같이 파이프 간격별 선행 해석(파이프 간격 20cm~50cm까지 10cm 씩 증가)을 통해 40cm 이상은 7시간 이상 온수를 순환 하여도 열전달이 미미 하여 용설 타당성이 없으므로 본 해석시 배제하였다.

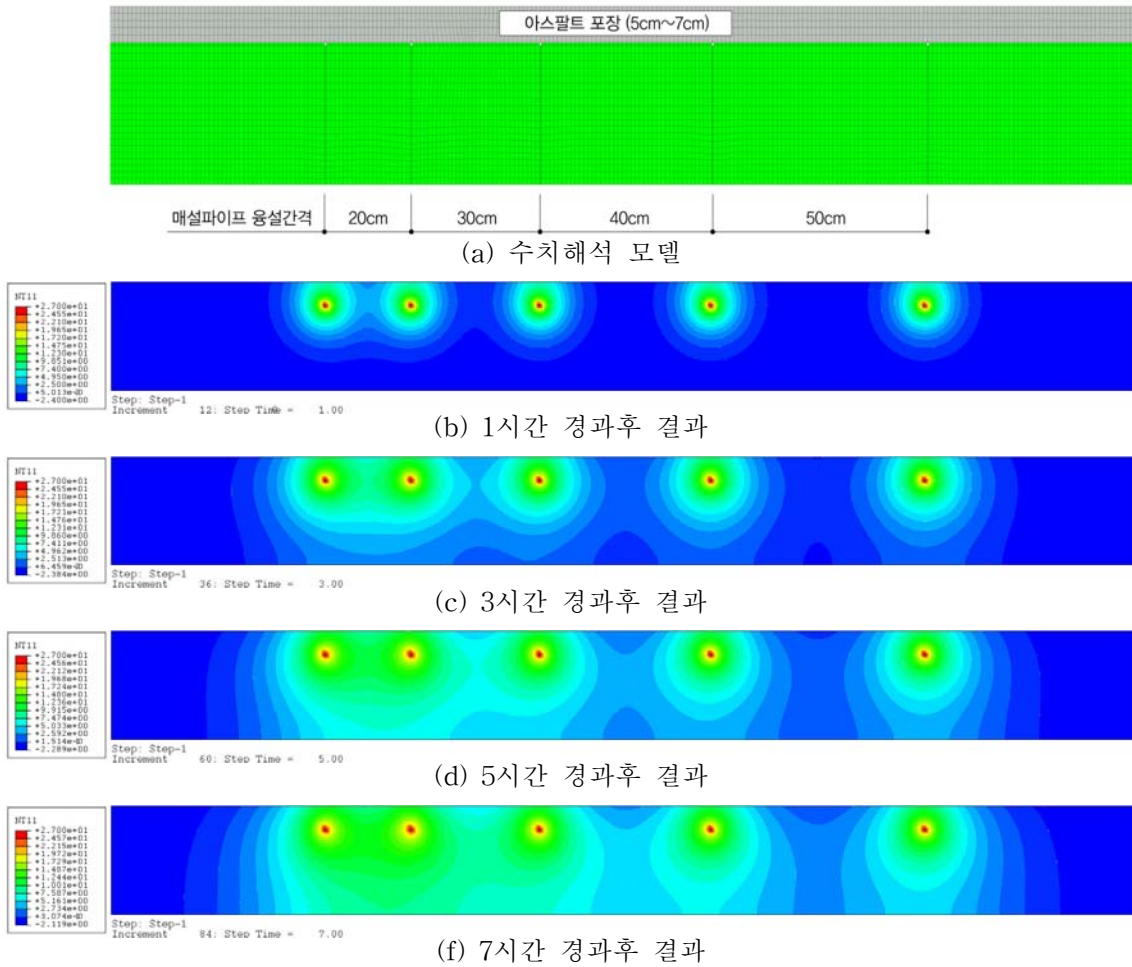


그림 1. 용설 파이프 간격별 선행 해석(시험 모형제작시 매설관 간격 설정을 위한 해석)

## 2.3 용설 파이프내 순환유체의 온도곡선

열전도 수치해석을 위한 용설 파이프내의 순환유체 온도는 30℃의 유체를 24시간 동안 순환시키는 조건을 적용하였다. 2009년 지케이에너지는 “지열원 히트펌프를 이용한 도로용설 시스템 개발에서 지열용설 시스템 운영”에 있어서 최저전력 소모량은 산출 결과 효율대비 30℃ 를 제안하였다. 당 연구에서는 제안된 30℃의 순환수를 수치해석과 실내 시험체 해석에서 공히 사용하였다..

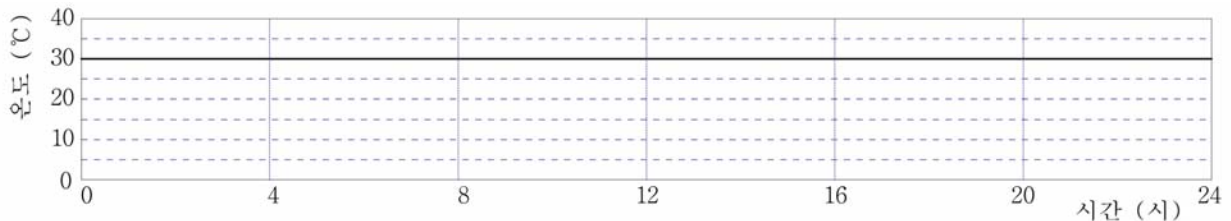


그림 2. 순환유체의 온도곡선

## 2.4 열전도 수치해석 모델

열전도 수치해석을 위한 ABAQUS 모델을 매설깊이별 포장종류별로 각각 모델링하여 열전도 해석에 적용하였다. 포장종류는 아스팔트와 콘크리트 포장을 적용 하였으며, 초기온도 조건은 앞에서 제시한 -6.3℃를 적용하고, 순환유체의 온도는 30℃를 적용하였다. 매설 심도는 5cm와 7cm 로 하였고, 파이프

매설 간격은 20cm, 30cm, 35cm 세 개 모델을 설정 하였다.

### 3. 시험체 열전도도 실내시험

#### 3.1 시험체 제작

지열 융설시스템의 현장 적용을 위한 시험체의 열전도 시험을 수행 하였다. 포장 시험체는 콘크리트와 아스팔트 두 종류의 포장재질로 제작 하였다. 각 포장재질 별로 6.3mm의 동파이프를 20cm, 30cm, 35cm 간격으로 U 타입 매설 하였다. 시험체는 목재를 이용하여 500 X 800 X 70mm의 내부 크기로 제작 되었다.



(a) 아스팔트 시험체



(b) 콘크리트 시험체

그림 3. 재질별 시험체 제작

#### 3.2 시험체 실내시험

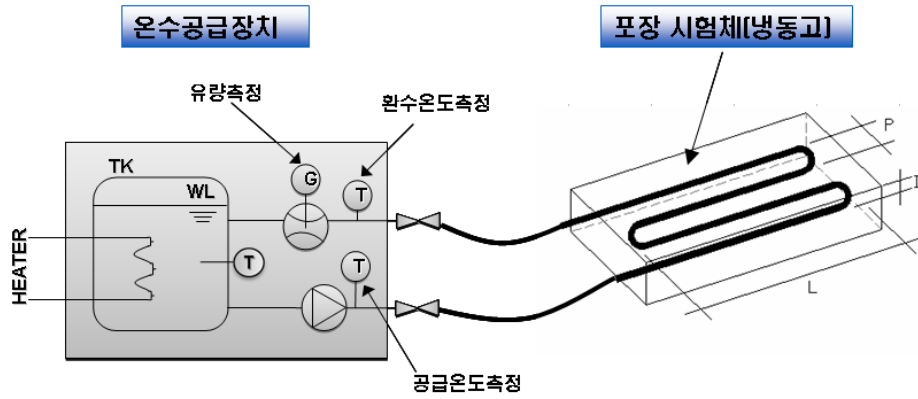
시험체 실내시험은 냉동고에서 시험체를  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서 1일간 감은 후 시험체가  $-6.3^{\circ}\text{C}$ 를 유지 할 때 열전도 시험을 수행 하였다. 온수 공급 장치 구성은 그림 4 (c)과 같이 유량계, 환수·공급 온도계, 온수기, 순환펌프 등으로 구성 되어있다. 그림 4(a)와 (b)를 연결하여 냉동상태의 시험체에  $30^{\circ}\text{C}$ 온수를 순환하여 증온 양상을 파악하였다. 시험체에 온수를 공급하고 5분 간격으로 온도를 측정하여  $0^{\circ}\text{C}$ 통과 시간을 측정하여 지열융설에 필요한 최적 융설 파이프 매설간격 찾고자 하였다.



(a) 시험체 감온을 위한 냉동고



(b) 온수공급 장치

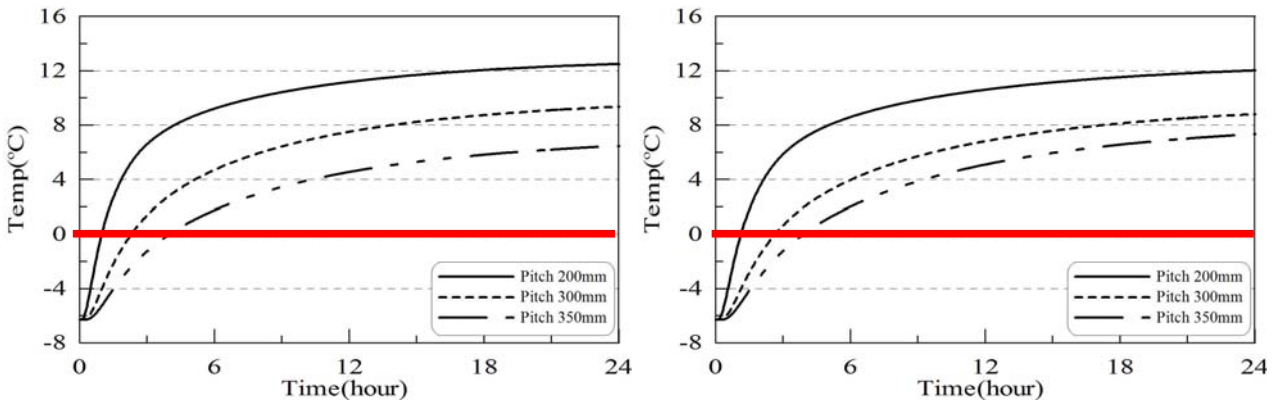


(c) 냉동 실내시험 모식도  
그림 4. 시험체 냉동 실내시험

## 4. 지열 용설을 위한 열전도 결과분석

### 4.1 수치해석 결과

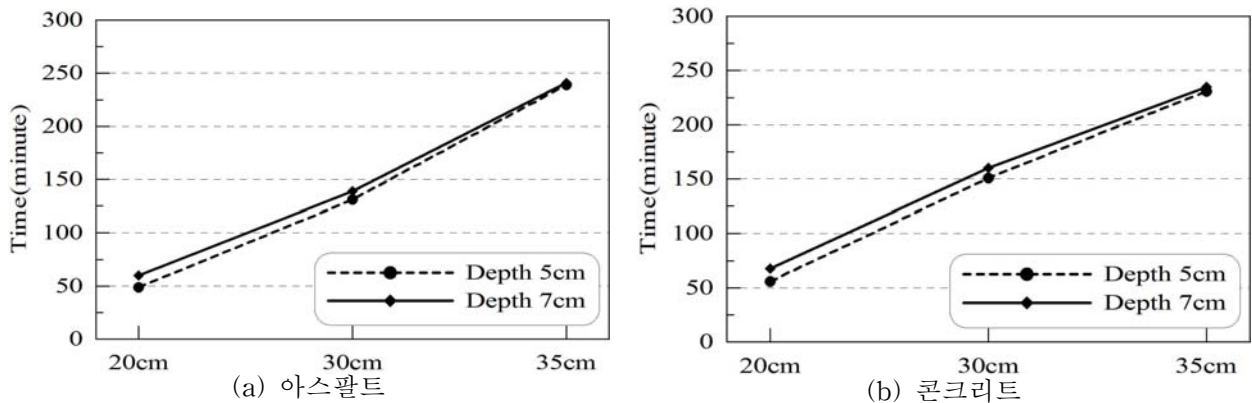
포장체 종류 및 매설심도, 파이프 간격별 열전도 수치해석 결과는 그림 5, 6과 같다. 파이프 매설깊이가 깊을수록 파이프 간격이 넓을수록 지면의 0℃ 도달시간이 길어지는 것을 볼 수 있다. 하지만 매설간격이 가장 넓은 35cm 시험체는 깊이에 따른 영향이 적게 나타났다.



(a) 아스팔트 포장(매설심도 7cm)

(b) 콘크리트 포장(매설심도 7cm)

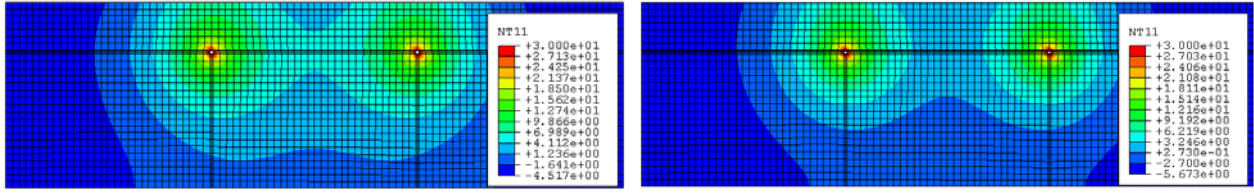
그림 5. 포장체 종류별 시간-온도 곡선



(a) 아스팔트

(b) 콘크리트

그림 6. 매설깊이별 지표면 0℃ 도달시간



(a) 매설심도 7cm, 파이프 간격 30cm  
(아스팔트 포장-2시간 경과후)

(b) 매설심도 7cm, 파이프 간격 30cm  
(콘크리트 포장-3시간 경과후)

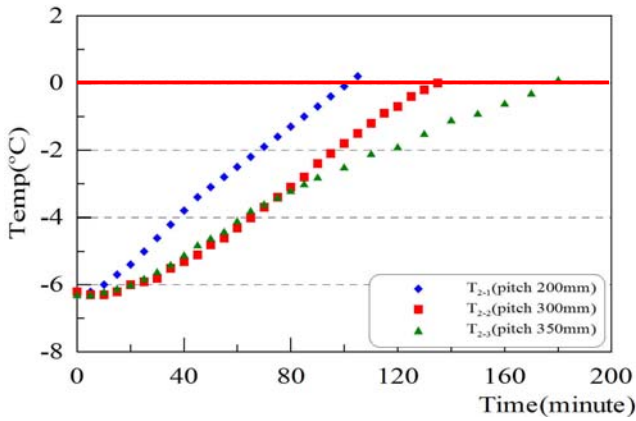
그림 7. 포장체 종류별 열전도 수치해석 결과

## 4.2 시험체 시험 결과

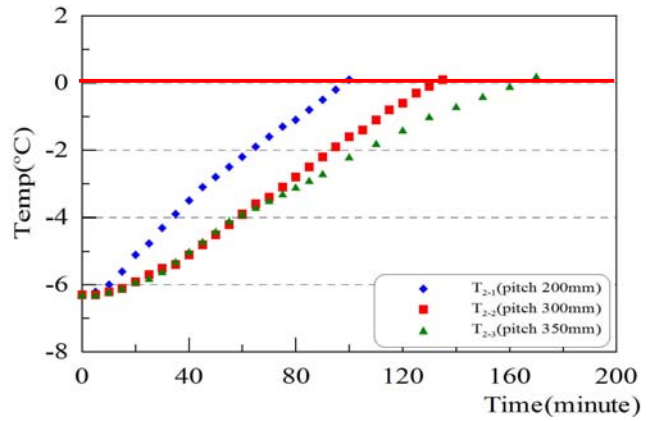
매설관 심도 7cm의 시험결과 0°C 도달시간은 표 3과 같이 나타났다. 각 시험체별로 도달 시간을 보면 아스팔트 시험체 20cm는 100분, 35cm는 135분, 35cm는 165분으로 나타났으며, 콘크리트 시험체 20cm는 105분, 30cm는 145분, 35cm는 180분으로 나타났다. 전반적인 도달시간은 두 시험체가 유사하게 나타났으며, 측정 위치는 각 매설관의 중간이다.

표 3. 아스팔트 시험체 온도측정결과(매설관 심도 : 7cm)

구분 시간	외기온도° C	아스팔트 시험체 동파이프 매설간격			콘크리트 시험체 동파이프 매설간격		
		20cm	30cm	35cm	20cm	30cm	35cm
0	-10.0	-6.3	-6.3	-6.3	-6.3	-6.2	-6.3
5	-10.0	-6.2	-6.3	-6.3	-6.2	-6.2	-6.3
10	-10.0	-6.0	-6.2	-6.2	-6.0	-6.2	-6.2
15	-10.0	-5.6	-6.1	-6.1	-5.7	-6.3	-6.1
20	-10.0	-5.1	-5.9	-5.9	-5.4	-6.3	-6.0
25	-10.0	-4.8	-5.7	-5.8	-5.0	-6.2	-5.8
30	-10.0	-4.3	-5.5	-5.6	-4.6	-6.0	-5.6
35	-10.0	-3.9	-5.4	-5.3	-4.2	-5.9	-5.4
40	-10.0	-3.5	-5.1	-5.0	-3.8	-5.8	-5.1
45	-10.0	-3.1	-4.8	-4.7	-3.4	-5.5	-4.8
50	-10.0	-2.8	-4.5	-4.4	-3.1	-5.3	-4.6
55	-10.0	-2.5	-4.2	-4.1	-2.8	-5.1	-4.4
60	-10.0	-2.2	-3.9	-3.9	-2.5	-4.8	-4.1
65	-10.0	-1.9	-3.6	-3.7	-2.2	-4.6	-3.8
70	-10.0	-1.6	-3.4	-3.5	-1.9	-4.3	-3.6
75	-10.0	-1.3	-3.1	-3.3	-1.6	-4.0	-3.4
80	-10.0	-1.1	-2.8	-3.1	-1.3	-3.7	-3.2
85	-10.0	-0.8	-2.5	-2.9	-1.0	-3.4	-3.0
90	-10.0	-0.5	-2.2	-2.7	-0.7	-3.1	-2.8
95	-10.0	-0.2	-1.9		-0.4	-2.8	
100	-10.0	0.1	-1.6	-2.2	-0.1	-2.4	-2.5
105	-10.0		-1.4		0.2	-2.1	
110	-10.0		-1.1	-1.8		-1.8	-2.1
115	-10.0		-0.8			-1.5	
120	-10.0		-0.6	-1.4		-1.2	-1.9
125	-10.0		-0.3			-0.9	
130	-10.0		-0.1	-1.0		-0.7	-1.5
135	-10.0		0.1			-0.4	
140	-10.0			-0.7		-0.2	-1.1
145	-10.0					0.0	
150	-10.0			-0.4			-0.9
160	-10.0			-0.1			-0.6
170	-10.0			0.2			-0.3
180	-10.0						0.1



(a) 아스팔트 시험결과



(b) 콘크리트 시험결과

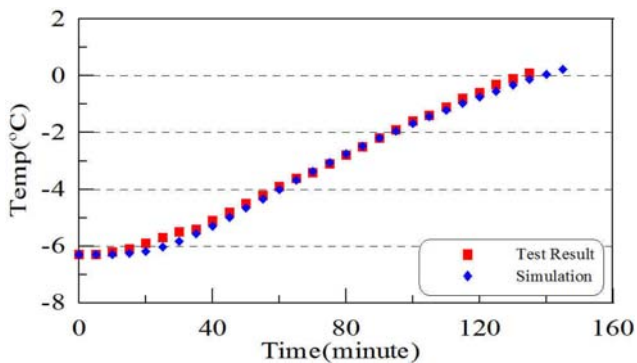
그림 8. 매설 간격에 따른 지표면 0°C 도달시간

### 4.3 분석 결과

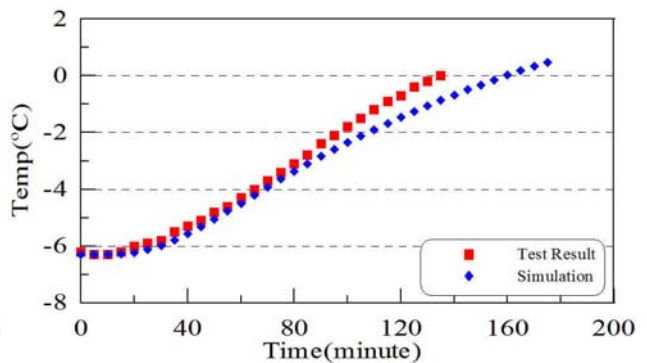
실내 시험결과와 열전도 수치해석 결과를 비교하면 다음과 같다. 비교적 시험결과와 수치해석간의 추세는 비슷한 것으로 판단되나, 시간차이는 아스팔트 및 콘크리트 포장의 열전도율 및 비열의 차이로 인한 결과로 볼 수 있다. 추후 연구를 통해 현장 지열용설에 적용 가능한 열전도도 값을 제시 할 것이다.

표 4. 시험결과 및 열전도 수치해석 결과 비교

포장체 종류	용설파이프 심도	용설파이프 간격	표층부 0°C 도달시간	
			시험결과	열전도 수치해석 결과
아스팔트	5cm	20cm	-	49분
		30cm	-	2시간 11분
		35cm	-	3시간 59분
	7cm	20cm	1시간 40분	1시간 00분
		30cm	2시간 15분	2시간 19분
		35cm	2시간 50분	4시간 01분
콘크리트	5cm	20cm	-	56분
		30cm	-	2시간 31분
		35cm	-	3시간 51분
	7cm	20cm	1시간 45분	1시간 8분
		30cm	2시간 15분	2시간 40분
		35cm	3시간	3시간 55분



(a) 아스팔트



(b) 콘크리트

그림 9. 실내시험 및 수치해석 결과비교 (매설심도 7cm, pitch 30cm)

시험 결과와 수치해석 비교 결과 아스팔트는 매우 유사하게 나타났으며, 콘크리트의 0℃ 도달 시간이 30분 정도 차이가 났다. 이는 콘크리트 수치해석에서 물성값 적용에서 차이가 나타난 것으로 판단되며 추후 연구에서 보완하고자 한다.

## 5. 결론

도로의 결빙방지과 차량 운행 안정성 향상을 위한 지열 융설 시스템 기초 연구를 위해 당 연구를 수행하였다. 포장 재료로 가장 많이 사용되는 아스팔트와 콘크리트 시험체를 냉동고에서 냉동 후 온수의 순환을 통해 0℃ 이상 온도 나타내는 시간을 알고자 하였다. 실내실험의 효율을 높이기 위해 수치해석을 수행하여 변수를 최소화 하였다.

- 냉동고 온도는 -6.3℃를 유지(대관령 겨울 평균 지면온도보다 -1℃ 낮게 설정)하고, 30℃의 온수를 순환(에너지 사용량 대비 최대 지열 활용 온도)하여 시험을 수행
- 수치해석 결과 융설파이프 매설 심도는 열전도에 큰 차이가 없으므로 포장체 안정성을 확보를 위해 융설 파이프를 7cm 에 매설함
- 시험결과 융설 파이프 간격 30cm, 매설심도 7cm, 순환수 30℃를 유지하면 -6.3℃의 포장체 온도가 135분에 아스팔트, 콘크리트 모두 0℃ 에 도달함. 즉 강설이 예상될 경우와 결빙 예상될 경우 2시간 이전에 지열 융설 시스템 가동시 결빙 방지가 가능 할 것으로 파악됨.

향후 연구에서는 운행중인 포장도로에 융설 파이프를 매설하여 포장안정성을 확인하고, 지열융설 시스템의 실제 적용성에 대한 연구가 수행 될 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 07-기술혁신-A01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 서영국, 서운중, 엄주용, 김봉찬(2009), “지열을 이용한 콘크리트 포장 융설 시스템 개발을 위한 기초 연구”, 2009 대한토목학회 정기학술대회, 도로, pp.465~468.
2. 유원상(2003), 포장체의 동상영향평가
3. Johnston, G.H at al(1981), Engineering Characteristics of Frozen and Thawing Soils, Wiley & Sons
4. K. Zwarycz, Snow melting and heating based on geothermal heat pumps at Golenios airport, Poland, Geothermal Training Programme 2002