

지열 융설시스템을 적용한 포장체의 열전도분석 및 구조안전성 검토

이승하[†], 박정식, 이석진*, 김봉찬*
한국유지관리(주), *롯데건설 기술연구소

The Thermal conductivity analysis and performance evaluation on the pavement applying geothermal snow melting system

Seung-Ha Lee[†], Jeong-Sik Park, Seok-Jin Lee*, Bong-Chan Kim*
Soc Division, Korea Maintenance & Control, Seoul, Korea
*Research & Development, LOTTE E & C, Seoul, Korea

Abstract

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. For the feasibility study on geothermal snow melting system, analysis of the ground melting point when operating system, life evaluation of pavements and safety evaluation of pipes are performed.

Key words : Thermal conductivity(열전도도), Geothermal(지열), Snow melting(융설), Road freezing (노면 결빙)

기 호 설 명

D_D : 중방향 비율
 D_L : 차로분배계수
 E : 표층의 탄성계수
 N_F : 허용 차량통과대수
 MR : 파괴계수 ($= 0.63 \sqrt{f_{ck}}$)

그리스 문자

σ_t : 휨 응력
 ϵ_t : 인장변형률
 ϵ_t' : 인장변형률/106

1. 서 론

최근 급속히 진행되고 있는 지구온난화 때문에 CO₂ 저감 대책이 범국가적인 문제로 대두되고 있다. 이러한 분위기에 따라 국내에서도 신재생에너지, 녹색성장 등 친환경 기술에 대한 관심이 증폭되고 있다.

[†] Corresponding author
Tel: +82-2-830-7071, Fax: +82-2-830-7147
E-mail : pooh7401@kmctech.co.kr
접수일 : 2010년 4월 7일
심사일 : (1차 2010년 4월 15일, 2차 4월 30일)
채택일 : 2010년 5월 17일

본고에서는 신재생에너지 분야 중 지열에너지 활용에 대한 기초 연구를 수행하였다. 지열에너지는 신재생에너지 중에서 지속적이며 효율적인 에너지로 각광 받고 있으며, 그 활용성 면에서도 다양한 분야에 적용되고 있다. 지열에너지를 활용해서 도로를 융설하므로써 도로운영 중 발생할 수 있는 결빙에 의한 사고를 방지할 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.

본고는 지열 융설의 기초 연구로서 일반 도로포장 재료인 콘크리트, 아스팔트 두 종류의 재료에 대한 융설시 열전도 양상을 파악하고자 한다. 이에 따라, 지열융설 시스템의 도로매설시 지표면의 융설시점을 파악하고, 융설 파이프 매설후 도로포장의 수명평가 및 파이프의 안전성 평가를 통해 지열융설 시스템의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 본 문

2.1 포장체 열전도 수치해석

포장체 종류별 열전도 수치해석은 매설깊이에 따라 초기온도 조건하에서 표층의 온도가 0℃ 이상이 되는 융설 시간을 검토하기 위한 목적이 있다. 포장체 표층의 열전도 수치해석을 위한 포장 재료 및 융설 파이프의 열적 물성치를 정리하면 Table 1과 같다.

콘크리트 및 아스팔트의 열적 물성치는 온도에 따라 변화하는 특성을 가지고 있으므로, 본 해석에 적용한 물성치는 변화하는 온도에 대한 평균치를 적용하였다. 또한, 융설파이프의 열전도율 및 비열은 일반적인 동파이프에 대한 열적 물성치를 적용하였다. 열전도 수치해석에 이용한 수치해석 프로그램은 ABAQUS V6.5.1을 이용하였다.

포장체 종류별 열전도 수치해석의 변수는 초기 온도조건 -6.3℃, 포장재료 종류(콘크리트, 아스팔트), 융설 파이프 심도(5cm, 7cm) 및 융설 파이프 간격(20cm, 30cm, 35cm)별로 전체 12 CASE를 해석하였다.

Table 1. Thermal properties of materials

Subject	Asphalt	Concrete	Melting Pipe
Thermal conductivity (kcal/m · hr · °C)	1.31	1.46	346.00
Specific heat (kcal/kg · °C)	0.400	0.214	0.092
Weight (kN/m ³)	23.5	24.0	78.5
Modulus elasticity (MPa)	7,000	24,900	120,000
Poisson ratio	0.30	0.17	0.34

초기 온도조건은 1971년부터 2000년까지 전국 최저 지면온도인 대관령 지방의 -5.3℃에서 -1℃를 더 감소시킨 -6.3℃를 적용한 극한 조건을 선정하였다^[2].

또한, 융설 파이프내의 순환유체의 온도곡선은 초기온도 30℃를 적용하였으며, 지표면의 온도수렴을 확인하기 위해 초기순환 후 24시간까지 수치해석을 진행하였다. Table 2에 열전도 수치해석 case를 정의하였고, Fig. 1에 수치해석 모델을 도시하였다.

Table 2. Analysis case of thermal conductivity

Subject	Pipe depth	Pipe pitch
Asphalt, Concrete pavement	5, 7cm	20, 30, 35cm

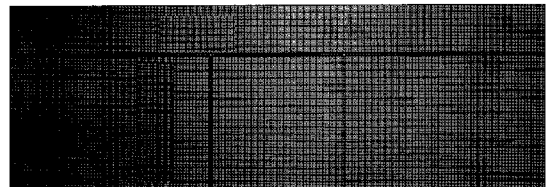


Fig. 1 Numerical analysis model for thermal conductivity analysis (Pipe depth 7cm, Pipe pitch 20cm)

2.2 포장체 수명평가 및 구조 안전성 검토

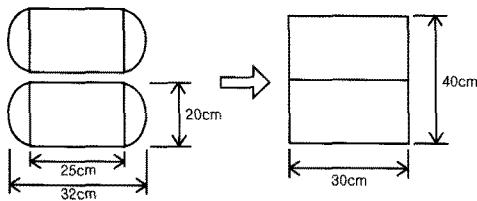
융설파이프 매설에 따른 포장체의 수명평가 및 파이프의 구조안전성 검토를 위한 해석 case는 Table 3과 같으며, 포장체 종류 및 융설 파이프 매설심도에 따라 전체 6 case의 해석을 수행하였다.

Table 3. Analysis case of performance evaluation

Subject	Pipe depth
Asphalt, Concrete pavement	5, 6, 7cm

포장구조체의 해석시 하중은 AASHTO 설계법을 기준으로 등가 표준단축하중인 8.2tonf 단축하중을 사용하였다. 실제 차량의 주행시 포장체 표면의 거칠음이나 차량의 현가장치 등에 의해서 포장체와 차량의 접지면적과 접지압은 변하게 되나 해석의 효율성을 위해서 일정한 접지면적과 접지압을 갖는 등가 직사각형 타이어 모델이 이동하는 것으로 가정하여 해석하였다.

수치해석시 실제 8.2tonf 단축 차량의 타이어모양을 구현하기 위해서는 Fig. 2와 같이 실제 타이어의 접지면적과 동일한 접지압을 받는 등가의 모델로 전환하여야 한다. Fig. 3은 등가 타이어모델의 접지압의 크기를 나타낸다.



$$A = 1200 \text{ cm}^2$$

Fig. 2 Tire model

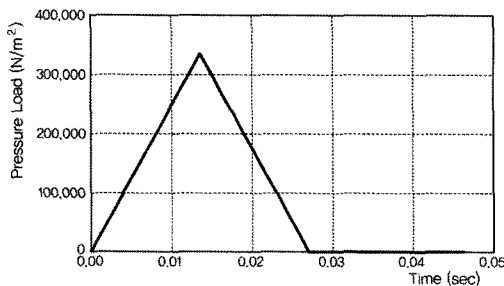


Fig. 3 Applied vehicle load

포장체에 대한 공용성 수명평가 시에는 설계교통량에 따른 표준 단축하중에 대한 등가환산교통량과 설계차로 교통하중이 필요하다. 이를 위해 호남고속도로 설계당시의 교통량을 근거로 하여

2차선 도로에 대한 수명평가를 수행하였으며, AASHTO 기준에 의거하여 중방향 비율(DD) 및 차로분배율(DL) 등을 적용하였다. 중방향 비율이란, 양방향도로에서 방향별로 이동하는 차량의 비율로서, 일반적으로 각 방향별 이동차량은 동일한 비율로 0.5로 분다. 차로분배율은 한 방향별 차선당 이용하는 차로 비율로서, 편도 1차선 도로에서는 1.00 편도 2차선 도로에서는 0.5를 분다. 본 해석시 차선은 편도 1차로로 가정하여 1.00을 적용하였다. 이를 근거로 해석시 적용한 2039년까지의 설계차로 교통하중은 Table 4와 같다.

Table 4. Designated lane traffic load

Year	D _D	D _L	Converted cumulative traffic ($\times 10^6$)	Traffic load per designated lane ($\times 10^6$)
2024	0.5	1.0	0.122	0.294
2029	0.5	1.0	0.131	0.613
2034	0.5	1.0	0.139	0.953
2039	0.5	1.0	0.147	1.311

또한, Table 5, Table 6의 콘크리트 및 아스팔트 포장체에 대한 피로파괴 기준식으로부터 포장구조체의 공용성 수명을 평가하였다. 콘크리트 및 아스팔트 포장체에 대한 피로파괴 기준식은 기존 연구자들 및 단체에 의해 많은 기준식이 발표되었으나, 본고에서는 콘크리트 포장체는 PCA 및 Vesic의 기준식을 적용하고, 아스팔트 포장체는 Finn, UK, AI의 파괴기준식을 적용하였다. 수명평가 결과, 파괴기준식이 설계교통량을 초과하면 포장체 수명이 확보되는 것으로 간주한다.

Table 5. Fatigue criterion (Concrete)

Fatigue criterion	Equation
Portland Concrete Association (PCA)	For $0.5 < \frac{\sigma_t}{MR} < 1$:
	$\log N = 11.78 - 12.11 \left(\frac{\sigma_t}{MR} \right)$
Vesic	For $\frac{\sigma_t}{MR} < 0.5$: $\log N = \text{infinite}$
	$N_f = 225,000 \left(\frac{MR}{\sigma_t} \right)^4$

Table 6. Fatigue criterion (Asphalt)

Fatigue criterion	Equation
Finn	$\log(N_f) = 15.947 - 3.291\log(\epsilon_t \times 10^6)$ $- 0.854\log(E \times 10^{-3})$
UK (United Kingdom)	$\log(N_f) = -9.78 - 4.32\log(\epsilon_t)$
AI (Asphalt Institute)	$\log(N_f) = 16.086 - 3.291\log(\epsilon_t')$ $- 0.854\log(E \times 10^{-3})$

포장체 수명평가 및 용설파이프의 구조 안전성 평가를 위한 3D 수치해석 모델은 Fig. 4와 같으며, 차량이동하중 해석을 위한 해석 프로그램은 ABAQUS V6.5.1을 사용하였다. 앞서 제시한 표준단축하중을 용설파이프 직상부에 재하하였다.

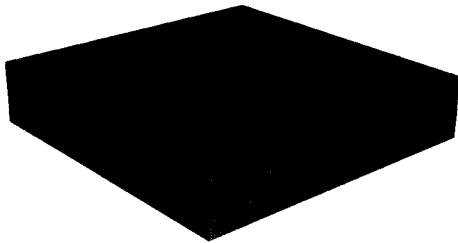


Fig. 4 Numerical analysis model for performance evaluation

2.3 수치해석 결과

2.3.1 포장체 열전도 수치해석

포장체 종류 및 매설심도, 파이프 간격별 열전도 수치해석 결과는 다음 그림 Fig. 5와 같다. 또한 Fig. 6은 포장체 종류에 따른 파이프 간격별 시간-온도 곡선을 나타내었다.

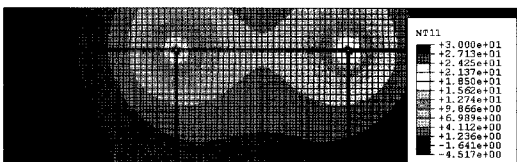


Fig. 5 Analysis result - Depth 7cm, Pipe pitch 30cm (Asphalt - after 2 hours)

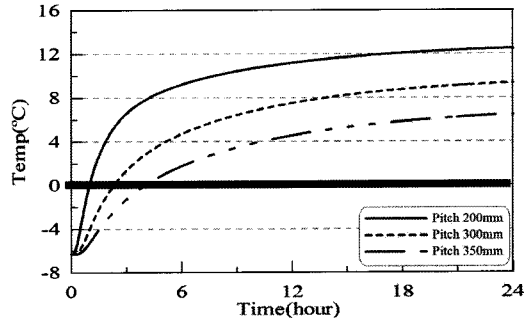
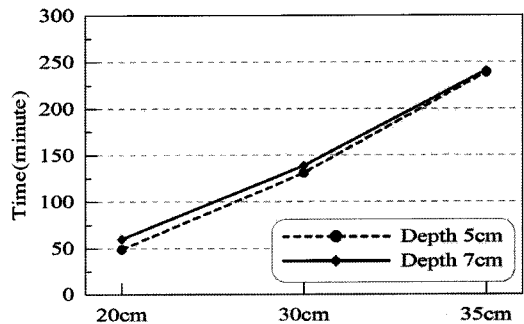


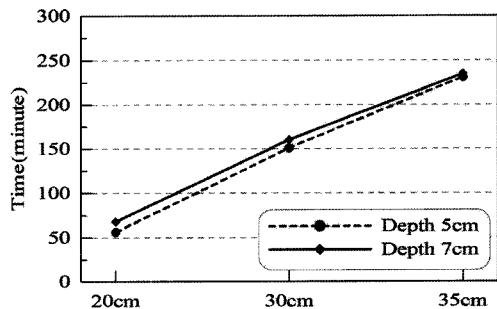
Fig. 6 Time-temperature curve of pavement types - Asphalt pavement (depth 7cm)

포장체 종류별 시간-온도 곡선(매설깊이 7cm 기준)에서는 파이프 간격이 넓을수록 지면의 0°C 도달시간이 길어지는 것을 볼 수 있으며, 매설간격이 가장 넓은 35cm의 경우는 깊이에 따른 영향이 적은 것을 볼 수 있다. 시스템 가동 후 24시간 정도 후에는 각 해석 case별로 일정온도에 수렴하는 결과도 같이 도출되었다.

다음의 Fig. 7에서 매설깊이별 지표면 0°C 도달 시간을 그래프로 도식화 하였다.



(a) Asphalt pavement



(b) Concrete pavement

Fig. 7 0°C Arrival time of pavement types

Table 7의 포장체 종류별 표층부 0°C 도달시간을 살펴보면 아스팔트 포장 및 콘크리트 포장 모두 35cm 이상의 매설깊이에서는 도달시간이 3시간을 초과하여 용설파이프에 의한 용설의 효용성이 떨어지는 것으로 확인되었다.

Table 7. Thermal analysis result

Subject	Depth	Pitch	0°C Arrival time on surface layer
Asphalt pavement		20cm	49 min
	5cm	30cm	2hr 11min
		35cm	3hr 59min
	7cm	20cm	1hr
		30cm	2hr 19min
		35cm	4hr 1min
Concrete pavement	5cm	20cm	56 min
		30cm	2hr 31min
	7cm	35cm	3hr 51min
		20cm	1hr 8min
	35cm	30cm	2hr 40min
			35cm

2.3.2 용설파이프 매설에 따른 포장체 수명평가
설계 교통량 하에서의 용설파이프 매설에 따른 포장체의 수치해석 결과는 다음과 같다.

Table 8. Performance evaluation of asphalt pavement

Depth	Nf			Designated traffic	result
	FINN	UK	AI		
7cm	3.536 ×10 ⁸	6.153 ×10 ⁹	4.869 ×10 ⁸	1.311×10 ⁶	O.K
6cm	3.284 ×10 ⁸	5.585 ×10 ⁹	4.523 ×10 ⁸		
5cm	2.095 ×10 ⁸	3.095 ×10 ⁹	2.885 ×10 ⁸		

Table 9. Performance evaluation of concrete pavement

Depth	Nf		Designated traffic	result
	PCA	VESIC		
7cm	infinite	7.927×10 ¹¹	1.311×10 ⁶	O.K
6cm	infinite	7.485×10 ¹¹		
5cm	infinite	7.468×10 ¹¹		

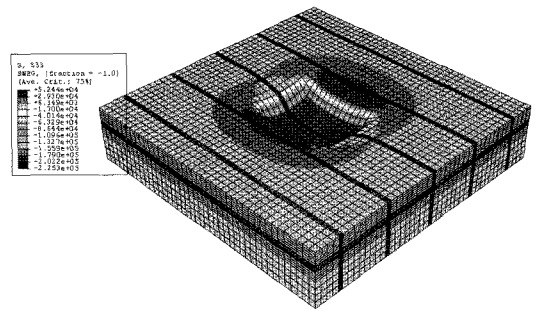
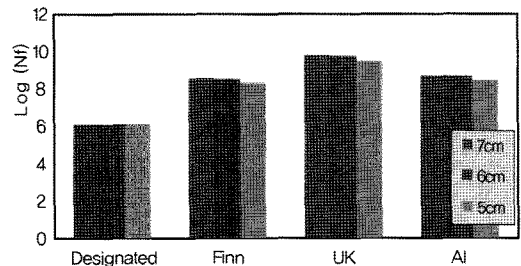


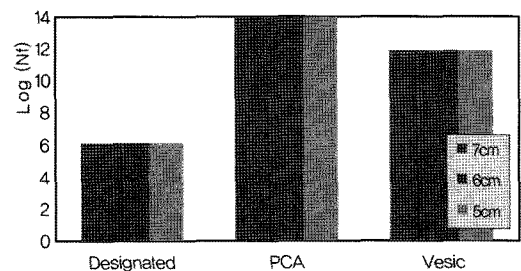
Fig. 8 Analysis result of performance evaluation (Analysis case 1)

아스팔트 포장체의 수명평가 결과, 매설심도 5, 6, 7cm 모두 30년간의 설계교통량 1.311 × 10⁶회를 초과하여 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 콘크리트 포장체의 경우도 모든 case에서 설계교통량 하에서는 파괴가 일어나지 않는 것으로 검토되었다.

Table 9를 살펴보면 PCA 파괴기준식에서는 수명평가가 불가함을 알 수 있다. 이는 5cm 이하의 콘크리트 포장에 대한 파괴기준식이 개발되어 있지 않기 때문이다. Fig. 9에 포장체 종류별 수명평가 결과를 도식화하였다.



(a) Performance evaluation of asphalt pavement



(b) Performance evaluation of concrete pavement

Fig. 9 Result of performance evaluation

2.3.3 용설파이프의 구조안전성 평가

설계 교통량 하에서의 용설파이프의 구조안전성 평가결과는 다음과 같다.

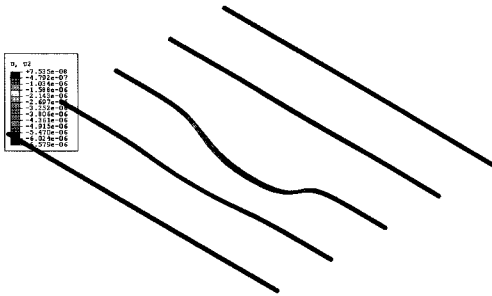


Fig. 10 Maximum deformation contour(case 1)

Table 10. Performance evaluation of snow melting pipe

Subject	Depth	Analysis case	Maximum deformation
Asphalt pavement	5cm	CASE 1	0.007mm
	6cm	CASE 2	0.007mm
	7cm	CASE 3	0.007mm
Concrete pavement	5cm	CASE 4	0.002mm
	6cm	CASE 5	0.002mm
	7cm	CASE 6	0.002mm

아스팔트 포장에 매설된 용설파이프 중앙부의 최대 변형은 매설심도 5, 6, 7cm 모두 0.007mm이하로 나타났다. 또한, 콘크리트 포장의 경우에는 모든 해석 case에서 0.002mm 이하의 미소변형으로 검토되었다.

3. 결론

도로의 결빙방지와 차량 운행 안정성 향상을 위한 지열 용설 시스템 기초 연구를 위해 당 연구를 수행하였다. 포장 재료로 가장 많이 사용되는 아스팔트와 콘크리트 포장체의 열전도 해석을 통해 지표면의 용설시점을 검토하였고, 지열용설 파이프 매설시 포장체에 대한 수명평가를 수행하였다. 또한, 용설파이프의 구조안전성 검토를 통해 지반 내 용설파이프의 변형도를 검토하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 포장체 열전도 수치해석 결과, 용설 파이프 간격 30cm, 매설심도 7cm, 순환유체의 온도 30℃를 유지하면, 초기온도 -6.3℃의 아스팔트 및 콘크리트 포장체의 표면 온도가 160분후 모두 0℃에 도달한다. 즉 강설이 예상될 경우와 결빙이 예상될 경우 2시간 이전에 지열용설 시스템 가동시 결빙 방지가 가능할 것으로 판단된다.
 - 지열용설파이프 매설 후의 포장체의 공용성 수명평가를 수행한 결과, 설계교통량 하에서 아스팔트 및 콘크리트 포장 모두 피로파괴의 파괴기준식 이내로 확인되어, 용설 파이프 매설에 따른 포장체의 수명에는 영향이 없는 것으로 나타났다.
 - 차량이동시 지반내 용설파이프에 대한 안전성 평가 결과, 아스팔트 포장체는 최대변형 0.007mm, 콘크리트 포장체는 0.002mm로, 용설파이프 외경 6.35mm에 비해 미미한 것으로 나타나, 용설파이프의 변형에 따른 유체순환의 소통에는 문제가 없는 것으로 나타났다.
- 향후 연구에서는 운행 중인 포장도로에 용설파이프를 매설하여 포장안정성을 확인하고, 지열용설 시스템의 실제 적용성에 대한 연구가 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 07-기술혁신-A01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사의 말을 전합니다.

참고문헌

1. 서영국, 서운종, 엄주용, 김봉찬(2009), “지열을 이용한 콘크리트 포장 용설 시스템 개발을 위한 기초연구”, 2009 대한토목학회 정기학술대회, 도로, pp.465~468.
2. 기상청 자료, “Korea Meteorological Administration”
3. AASHTO, “American Association of State Highway and Transportation Officials”
4. Johnston, G.H(1981), Engineering Characteristics of Frozen and Thawing Soils, Wiley & Sons