아스팔트 도로포장에 물순환 파이프 시스템을 이용한 표면온도저감에 관한 연구

A Study of the Surface Temperature Reduction Using Pipe Cooling System in Asphalt Pavement

윤 용 규 Yoon, Yong Kyu
박 경 원 Park, Kyung Won
이 석 근 Lee, Suk Keun

경희대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (E-mail: yongku85@naver.com)
정회원 · U.S Army corps of engineers (E-mail: pkw4425@naver.com)
정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail: skrhee@khu.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of asphalt pavement reducing surface temperature by using Pipe cooling system is to make pleasant city life environment.

METHODS : We considered building condition to lay the pipes under asphalt pavement and figured out that temperature reducing effect with pipe cooling system. In addition, we guessed rutting through wheel tracking test with a laid the pipes under asphalt mixture and performed fatigue cracking through a flexural fatigue test for performance evaluation of pipe cooling system.

RESULTS : When pipe cooling system worked, the temperature of pavement model reduced quickly in test. The system can turn down the degree by 4 or 5 quickly as well. It didn't affect rutting to lay the pipes under the pavement, but it can get damaged to asphalt pavement in early stage by the result of performance evaluation.

CONCLUSIONS : We figured out that pipe cooling system can turn down the temperature of asphalt pavement surface through tests. We suggest that pipe cooling system should be considered one of the effective way to solve urban heat island problem.

Keywords

heat island effect, temperature, pipe cooling system, laboratory performance

Main Author : Yoon, Yong Kyu
Highway Laboratory, Kyung Hee University, 1732 Deogyong daero,
Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 446-701, Korea
Tel : +82.31.201.2923
email : yongku85@naver.com

International Journal of Highway Engineering
http://www.ijhe.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 서론

열용량이 큰 아스팔트 구조물로 뒤덮여 있는 도시는 인근교외 지역에 비해 태양열로 쉽게 달궈지며 도시 내에는 공장, 주택, 자동차 등이 많아 연료를 연소시킬 때 많은 열이 발생하므로 주변의 다른 지역보다 2~5℃ 가

량 높은 온도를 형성하게 되는데 이때 기온이 같은 지점을 등온선으로 연결시켜보면 높아진 도시 내 기온분포도가 섬의 등고선 같은 형태를 띠고 있어 열섬현상(Heat Island)이라고 불리고 있다. Fig. 1과 같이 16년의 시차를 둔 두 지도는 서울의 삼림이 줄고 개발 면적이 확대되면서 지역별로 기온이 크게 변하고 있다는 사

실을 한눈에 보여주고 있다. 집중 개발이 이뤄진 동대문, 용산, 강서구 등은 16년 전에 비해 붉은색 부분(지표 온도 24℃ 이상 지역)이 많이 늘었다. 아파트 단지과 고층 건물이 대거 들어선 서초, 강남구도 열섬현상이 심해졌다. 반면 마포구 상암동 지역은 지표 온도가 87년에 비해 떨어졌다. 이는 인근의 난지도 쓰레기 매립지가 94년 이후 공원녹지로 탈바꿈했기 때문으로 분석됐다.

Fig. 1 The Surface Temperature Change of Seoul

특히 대도시의 도심부에서는 도로 및 주변 환경이 대부분 다양한 포장 재료로 도포되어 인공적인 상태로 바뀌었고 그로 인해 자연상태의 태양에너지 순환이 원활히 이루어지고 있지 못함으로써 국지적인 열섬현상이 빈번히 발생되어 왔으며 도심지를 비롯한 인구 밀집지역에서는 밤에도 기온이 떨어지지 않는 열대야가 지속되어 거주민의 생활환경에 막대한 지장을 초래하고 있다. 열섬현상의 원인으로는 인간의 사회·경제활동으로 인해 발생하는 많은 배열량, 지표면이 흙과 식생에서 아스팔트 및 콘크리트 포장으로 바뀐 것, 그리고 건물이 밀집되어 통풍이 되지 않는 것 등이 있다. 이러한 열섬현상의 대책으로 인공배열의 축소, 지표면 피복의 개선 그리고 도시환경 형태의 개선 등을 들 수 있는데, 이 중 도심면적의 10~20%를 차지하는 도로에 노면온도의 저하를 가져오는 도로포장을 통하여 도로주변의 열 환경 부하의 경감을 기대할 수 있는 포장공법에 대한 연구의 필요성이 절실한 실정이다(이석근 등, 2011).

1.1. 연구내용 및 방법

도심지 열섬완화를 위한 포장공법은 하절기 포장온도의 저감과 동시에 표면의 공극으로 인한 소음저감 효과와 도심지 집중 강우 시 포장층의 저류작용으로 호우피해를 예방 가능한 포장 공법이다. 열섬완화를 위한 포장공법은 크게 두 가지 기술로 나눌 수 있다. 우선 강우 및 인공 살수를 통하여 포장에 수분을 침투시켜 하절기 도심지를 비롯한 도시지역의 열섬현상을 저감하는 기술과 두 번째로 차열재를 포장표면에 도포하여 태양복사열에

의한 포장체의 축열을 줄여서 노면 온도 감소 효과를 얻는 기술로 나누어진다. 본 논문에서는 도심지 열섬완화를 위한 물 순환 시스템을 개발하려고 한다. 개발된 시스템의 온도저감 효과 및 내구성에 영향을 줄 수 있는 인자를 확인하고 그 변수를 실내시험으로 결정하였다.

아스팔트 포장 하부에 관을 매설하기 위한 시공조건을 고려하였으며, 물 순환 시스템을 이용하여 포장구조체 온도 저감효과를 모형실험을 통해 파악하였다. 또한 물 순환 시스템의 공용성 평가를 위해 관이 매설된 아스팔트 혼합물을 제작하여 휠트래킹 시험을 통한 소성변형을 예측하고, 힘 피로시험을 통한 피로수명 예측을 수행하였다.

2. 연구동향 및 필요성

2.1. 연구동향

현재 도로 이용자들의 요구사항은 경제력 향상과 함께 고급화, 다양화 되고 있는 추세이며, 특히 환경과 관련되어 특수기능을 갖는 포장의 필요성이 증대되고 있다. 이 필요성에 따라 도로포장은 일반 아스팔트 콘크리트 포장과 시멘트 콘크리트 포장 외에도 다양한 특수포장이 개발되어 시공되고 있다. 이들 특수포장 중에서 최근 많이 시공되고 있는 배수성포장은 주로 소음감소와 주행쾌적성 향상을 목적으로, SMA포장과 PMA포장은 소성변형 감소를 통한 주행쾌적성, 주행안정성 향상을 목적으로 시공되고 있다(김대성, 2011). 열섬저감효과를 갖는 보수성 포장의 경우 향후 10년 후 환경 및 특수포장에 대한 국민들의 인식이 향상되어 그 필요성이 더욱 늘어날 것으로 판단된다. 일본의 경우 현재 약 10ha의 보수성 포장이 시공된 것으로 알려져 있으며, 일본의 경우와 한국을 비교할 경우 일본에서의 보수성 포장의 실용화 연구가 2000년에 시작되었으며, 관련 기반기술 및 특수 환경포장에 대한 여건의 성숙도가 약 10년 정도 앞서 있다.

대부분의 국가에서는 열섬저감 연구의 필요성에는 공감하며 종합적인 환경프로그램으로 대처하고 있으며 직접적으로 도로포장부분의 대책까지 연구하는 국가는 일본과 유럽 일부국가를 제외하면 거의 없었다. 주로 일본을 중심으로 파악된 연구동향은 다음과 같다.

일본에서 포장되는 열섬저감포장(보수성 및 차열성 포장)의 90% 이상이 관동지방정비국에서 시행되며 그 물량은 2005년 기준으로 보수성포장의 경우 15만 m^2 , 차열성포장의 경우는 일본의 시공물량 전부인 5만 m^2 를 시공

하였다. 지난 2000년부터 열섬현상의 억제에 국가적인 역량을 집중한 “환경포장 도교 프로젝트”를 실시하여 실용화를 목표로 지속적인 연구를 추진 중이다(국토교통성, 2005). 상기 프로젝트를 통하여 보수성포장과 열섬저감포장의 기술 공모와 현장실험을 2년 이상 실시하여 최적 성능이 확인된 공법을 실제 시공에 적용하였다. 또한 세부적인 기술로 보수성 포장에 지속적인 수분공급을 위한 살수 시스템도 풍력을 이용하여 전력소모를 감소시키는 방법을 강구하였으며 살수되는 물도 우수를 이용하여 친환경적 이용이 될 수 있도록 하였다. 상기에서 본 바와 같이 일본은 포장공법별로 일본 정부의 큰 관심과 지원으로 다양한 기관(국토교통성, 지자체, 토목연구소, 대학연구소, 민간기업 등)에서 열섬저감포장 연구를 활발하게 수행하고 있다(국토교통성, 2004).

2.2. 연구의 필요성

2.2.1. 기술적 측면

도시 열섬화를 유발하는 가장 큰 원인 중의 하나가 아스팔트 도로포장으로 알려져 있다. 기존의 아스팔트 포장도로는 여름철 맑은 날 낮에는 60℃ 이상에 이른다. 아스팔트의 표면 온도가 이렇게 높게 나타나는 원인은 크게 2가지로 설명된다. 첫째는 천연의 지표면에 비하여 태양복사에너지에 대한 알베도(albedo)가 낮아서 일사량의 흡수가 많다는 것이다. 두 번째는 기존의 아스팔트도로는 강우 시에 빗물을 신속하게 배수시켜 버리기 때문에 증발에 따른 표면온도 냉각효과가 거의 없다는 것이다.

따라서 아스팔트의 표면온도가 높게 나타나게 되는 위의 2가지 원인을 없앤 새로운 도로포장재를 개발하여 보급하게 된다면 도시열섬을 저감시킬 수 있는 효과를 가져올 수 있을 것이다. 이 점에 착안하여 개발하고 있는 신도로포장재가 차열성 포장재와 보수성, 포장성 포장재이다. 차열성 포장재는 태양복사에너지에 대한 알베도(albedo)를 향상시켜 일사량의 흡수를 줄인 것이다. 그리고 보수성 포장재는 강우 시의 빗물 또는 인공적으로 뿌려준 물을 흡수하였다가 대기 증으로 증발시키는 기능을 갖는 것이다. 이러한 신도로 포장재의 개발과 보급을 통하여 도시열섬화를 억제하는 효과를 가져 올 수 있다.

2.2.2. 경제·산업적 측면

여름철 맑은 날의 경우 아스팔트 도로의 표면온도는 60℃ 내외에 이른다. 일본에서 조사된 자료에 의하면, 보수성과 차열성 포장재의 경우에는 동일한 기상조건

하에서 이 보다 약 12℃ 정도 낮게 나타났다. 사람이 실제로 감지하는 체감온도에는 풍속과 습도 및 열복사량이 영향을 미치는데, 신도로포장재로 인하여 표면온도가 12℃ 정도 하강하면 지표로부터의 열복사량이 감소되어 체감온도가 양지에서는 4.5℃, 음지에서는 약 2.5℃ 낮아진다. 또한 도시 전체의 도로를 전부 보수성 또는 차열성 포장재로 교체한다면 도시기온의 저감효과가 1~2℃에 미칠 것으로 평가되었다. 기온이 1℃ 낮아진다면, 그다지 큰 효과가 아닌 것으로 생각될지 모르겠지만 실제로 기온이 1℃ 낮아지면 냉방용 에너지 소비가 약 10% 낮아지는 효과가 있다고 한다. 그리고 지구온난화로 인하여 지난 100년 동안에 나타난 지구온난화 효과를 상쇄하고도 남을 정도의 효과가 유발되는 것이다. 도시지역의 여름철 기온을 도로표면에서부터 저하시켜가는 것이 에너지 소비절약과 도시열섬 문제 해결에 가장 효과적인 방법의 하나일 것이다. 이러한 이유로 일본에서는 지난 20여 년간 신도로포장재의 기술개발에 지속적인 투자를 하고 있으며, 향후에는 더욱 적극적인 투자가 계획되고 있는 상황이다.

2.2.3. 국내·외 기술현황

아스팔트의 열적 특성을 개선하고자 하는 연구는 일본에서 지난 1993년부터 시작되어 오늘에 이르고 있으며, 국내에서는 2005년부터 기술개발사업이 시작되었다. 그 이외에 이 분야의 기술개발을 추진 중인 국가는 아직 없는 것으로 알려져 있다.

3. 실내시험

3.1. 기본실험

3.1.1. 관의 종류 결정

아스팔트 포장도로에 매설하는 열회수 관의 경우 초기 관 매입에 투입되는 경제성도 고려해야 하지만 시공성, 열전도율 등도 고려하여야 한다. 이를 위해서는 열회수를 위해 매설되는 관의 재질에 따라 많은 차이가 있다. 따라서 동관, PB관, Teflon관 등 세 종류의 관을 선정하였다.

Table 1은 각 관의 특성을 비교하였다. 동관은 단가가 비교적 고가이며 아스팔트 포장도로에 매설할 때 이음부의 용접 등의 어려움이 있다. 또한 부식이 일어나 유지관리하기 어려움이 있다. 열전도율이 높아 다른 관에 비해 높은 효율을 보일 것으로 예상하지만 Fig. 2의 실험 결과를 보면, 매입 관 종류에 따른 열회수율에는

큰 차이가 없었다. 그래프를 살펴보면 초기 열공급 후 30분 전·후로 동관이 2℃~3℃ 정도의 높은 온도를 보이는 하였지만 이후의 온도는 다른 관 모두 거의 비슷하게 나타났으며, 오히려 열공급 제거 후 아스팔트가 냉각하는 과정에서 역시 동관이 초기 일찍 냉각하는 듯하였으나, 이후 거의 차이를 보이지 않았다. 이는 동관 자체의 열전도율이 높긴하나 열관류율은 큰 차이가 없기 때문에 열회수율에는 차이가 없는 것으로 보인다(조병완 등, 2011). 따라서 동관은 열회수 파이프로 부적합할 것으로 보였다.

Table 1. Specifications of Three Pipes Evaluated

Type	Copper pipe	PB pipe	Teflon pipe
Constituent	copper	polypropylene	high-density polyethylene
Economics	expensive	cheap	expensive
Compression Strength	normal	low	high
Corrosion	O	X	X
Thermal resistance	strong	weak	strong
Heat conductivity Kcal/m hr℃	332	0.32~0.33	0.32

Fig. 2 Return Temperature According to the Type of Buried Pipes

PB관과 Teflon관은 시공이 간편하고 부식의 염려가 없다는 장점이 있다. PB관은 다른 관에 비해 단가가 저렴하지만 아스팔트 포장 시공 중에 발생하는 고온에 의해 관의 변형이 일어날 수 있고, 아스팔트 포장도로에 매설 후 다짐 시 관의 파손이 될 우려가 있다고 판단된다. Teflon관은 PB관에 비해 고가이지만 동관의 단가와는 비슷하다. 압축강도가 높아 다짐 시 관의 파손과 변형이 일어나지 않으며, 약 240℃에서도 열에 의해 변형이 일어나지 않는 장점이 있다. 따라서 아스팔트 포장도로에서 사용되는 관의 재질은 동관, PB관 보다는

Teflon관이 시공성 및 유지관리 등에서 적합한 것으로 판단되어진다.

3.1.2. 관의 직경 결정

아스팔트 포장도로의 하부에 관을 매설할 때 직경이 클수록 포장체의 열을 빠르게 흡수하기 유리하지만 구조적 안정성을 확보하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 구조적 안정성에 영향을 최소화하도록 최소의 직경인 6mm를 선정하였다.

3.1.3. 고온에서의 안정성 검토

아스팔트 포장도로 하부에 매설할 관은 시공 중 높은 온도에 대한 안정성 및 다짐에 대한 저항성을 평가하기 위하여 실내실험을 수행하였다. 지름 150mm, 높이 100mm의 시험체 중간에 6mm의 Teflon관을 매설하였다. 약 180℃의 가열 아스팔트 혼합물 다짐은 선회다짐기(Gyratory testing machine)를 사용하였다. 선회다짐은 건설현장의 롤러작용을 재현하는 니딩(Kneading) 방법으로 가열 아스팔트 혼합물을 다지는 특성을 지니고 있다. 아스팔트 혼합물을 실내에서 다지는 방법도 실제 현장에서 다지는 방법과 유사하게 재현하기 위하여 선회다짐기를 사용하였다.

관을 매설하기 위해 약 5cm정도 혼합물을 넣고 적당히 고른 다음 관을 매설하고 추가로 혼합물을 넣어 약 180℃의 가열 아스팔트 혼합물을 선회다짐기를 이용하여 약 600Kpa의 압력으로 약 75회 선회다짐한 샘플의 관에 통수시험을 실시하였다. 실험결과 매설된 Teflon관은 변형이 생기지 않았으며, Fig. 3 오른쪽 그림과 같이 물이 잘 흐르는 결과를 도출할 수 있었다. 이 결과 온도에 대한 안정성과 다짐에 대한 저항성이 우수한 것으로 판단되었다.

Fig. 3 A Pipe Hole Well Maintained in a Specimen after Gyratory Compaction at 180℃

3.1.4. 발열 시험

태양열을 바로 실내실험에 적용하기 어려운 문제로 있어 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 태양열 모사 시험기

를 제작하였다. 실내시험에서 태양열을 모사하기 위해 사용된 500w 할로겐램프 3개를 포장체의 상부에 설치하여 열 온도를 제어하도록 제작하였다. 본 연구에서는 할로겐램프를 이용하여 태양열을 모사해 아스팔트 포장체에 열원이 얼마나 축적되는지 측정하였다.

Fig. 4 Simulated Solar Lighting System

3.1.5. 관의 간격 결정

본 연구에서는 배관의 설치간격을 주요 변수로 평가하고 최적 배관간격을 결정하기 위하여 유한요소 (Finite Element) 해석을 이용하였다. Fig. 5와 같이 두께 200mm, 폭 500mm, 길이 2500mm인 직사각형 시편을 모델링하여 표면으로부터 50mm 하부에 동일하게 직경 6mm의 관을 100mm, 200mm, 300mm, 500mm 간격으로 배치하였다. 유한요소해석 결과, 관의 간격이 약 100mm~200mm인 경우가 가장 적절한 배관 간격인 것으로 판단되었다.

Fig. 5 Pipe Interval Analysis by FEM

FE분석을 통하여 관의 간격이 100~200mm가 열을 회수하는데 적절하다고 판단되어 Fig. 6과 같이 배관의 설치간격에 따른 열회수의 차이를 좀 더 명확하게 규명하기 위하여 시편 1000mm×100mm×200mm의 시편을 제작하여 열회수 관은 표면으로부터 약 50mm 깊이에 매설되도록 하였다. 설치 간격은 100mm, 200mm를 적용하였고, 포장 깊이별 열회수 온도를 검토하기 위하여 포장 온도 계측센서를 일정 깊이에 매설하였다. Table 2는 각 매설 간격과 매설된 센서의 위치를 보여준다.

Fig. 6 Pipe Interval Arrangement

Table 2. Heat Recovery Condition of Buried Pipes

Pipe Pitch (mm)	Area (mm ²)	Burial Depth (mm)	Temperature Sensor	Sensor Position
100mm	1000×700	50	T1	Surface -10mm
			T2	Surface -50mm
200mm	1000×700	50	T3	Surface -10mm
			T4	Surface -10mm

관의 간격을 결정하기 위해 FE분석을 통하여 간격이 100mm~200mm일 때 최대 열회수 효과를 얻을 수 있다는 결과를 찾을 수 있었다. 이에 따라 실내 실험에서 관의 배치간격을 100mm와 200mm 두 종류를 비교한 결과 Fig. 7과 같은 결과를 얻었다. 실험 결과를 분석해 보면, 초기 온도에서는 관의 간격과 상관없이 동일하게 점차 온도가 올라가는 것을 알 수 있다. 열을 흡수하는 속도는 초기 시작부터 약 1시간까지는 약 35℃ 정도 동일하게 온도가 상승하다가 약 1시간 이후부터 관 배치간격 200mm인 포장체의 온도가 관 배치간격 100mm인 포장체 보다 약 2~3℃ 차이를 보이며 온도가 높게 나오기 시작하였다. 이후 온도의 차이는 커졌고 시험 시작 3시간 후 태양열 모사 시험기의 전원을 끄고 포장체의 온도를 측정하였다. 시험 시작 3시간 후 관에 물을 순환시킴으로써 포장체가 가지고 있는 열을 얼마나 회수하는지를 측정하기 위해 실험하였다. 열원을 제거한 후 T1과 T3의 낮아지는 속도에는 큰 차이를 보였다. T1은 열원을 제거한 후 2시간동안 약 38.6℃가 떨어진 반면에 T3은 2시간 동안 약 36.8℃ 약 2~3℃가 빨리 낮아졌다. 열원을 제거한 후 3시간 이후에는 T1, T3의 온도가 같아지는 것을 알 수 있다. Fig. 7의 그래프를 보면 총 시험 시간 6시간 동안 온도 변화는 관의 간격이 200mm인 포장체에서는 열원의 흡수를 관의 간격 100mm의 포장체 보다 빠르게 흡수하는 것을 알 수 있다. 반면 열회수는 관의 간격 200mm는 관 간격 100mm보다 열회수가 더디게 됨을 알 수 있다. 다시 말해 관의 간격 100mm인 포장체가 상대적으로 열흡수를 적게 하고, 물을 순환시켰을 때 열회수 능력이 더 좋다는 결과를 얻을 수 있었다.

다. 따라서 최종 관의 간격을 100mm로 결정하여 포장체의 온도변화를 측정하였다.

Fig. 7 T1 & T3 Temperature Change

3.2. 시스템 설계 실험

3.2.1. 시험체 제작

본 연구에서는 관의 배치간격을 100mm으로 결정하고 포장체를 제작하여 물 순환을 시켰을 때와 물 순환이 없을 때의 포장체의 온도를 분석하고자 한다. 기본 실험에서 제작한 바와 같이 1000mm×700mm×200mm의 시편을 제작하여 간격을 100mm로 한 열회수 관을 표면으로부터 약 50mm 깊이로 매설되도록 하였다. 배관은 기본 실험에 사용한 6mm 직경의 Teflon 관을 사용하였으며, 포장체 깊이별 온도 변화를 검토하기 위하여 포장 온도 계측 센서를 일정 깊이로 매설하였다. Fig.8에

Fig. 8 Pipe Arranged in a 100mm Space on the Test Pit Pavement and Sensor Position by Depth

서 보는 바와 같이 온도 센서는 3위치를 나누어 포장체의 표면, 포장체의 표면 아래로 50mm의 위치, 포장체의 표면 아래로 100mm의 위치로 총 6개를 매설하여 온도를 측정하였다.

3.2.2. 시험결과

본 연구에서는 태양열 모사 시험기를 이용하여 아스팔트 포장체에 열을 주어 온도 변화를 분석하고 물 순환 시스템을 이용해서 포장체의 열을 회수하여 아스팔트 포장면의 온도를 얼마나 낮추는가에 그 목적을 두고 시험하였다. 한 여름을 가정했을 때 아스팔트의 온도가 60~70°C를 가정하여 낮 동안 열을 흡수하고 해가 저문 후 아스팔트의 온도가 어떻게 변화하는지 시험으로 측정해 보았다.

모든 시험은 시험 시작과 동시에 태양열 모사 시험기를 작동하여 아스팔트 포장체에 열을 3시간 동안 주고, 3시간 열원을 제거하여 총 6시간 동안 아스팔트 포장체의 온도를 측정하였다. Table 3과 Table 4는 총 6시간 동안 아스팔트 포장체에 열원을 주었을 때 물 순환 시스템을 작동하지 않았을 때와 작동했을 때의 결과 값을 나타낸 것이다. Fig. 9는 시험한 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

표면온도를 측정한 그래프를 보면 초기 포장체의 온도는 약 15°C에서 3시간 동안 태양열 모사 시험기를 작동하여 포장체의 표면 온도를 약 80°C까지 높아졌다. 열원을 제거하고 포장체의 온도는 급격히 낮아지는 것

Table 3. Temperature Change Which Doesn't Use Water Circulation System(°C)

Temperature Sensor Time (Min)	T1			T2		
	T1-1	T1-2	T1-3	T2-1	T2-2	T2-3
0	15.7	16.4	17.0	15.5	15.9	16.4
30	41.7	21.8	17.0	44.3	23.0	17.9
60	59.4	33.4	20.6	59.8	34.7	22.2
90	69.3	42.3	25.4	68.3	43.0	26.9
120	75.6	48.8	29.5	73.8	49.0	31.0
150	80.3	54.0	33.6	77.8	53.6	34.6
180	80.3	57.9	37.0	81.2	57.5	37.8
210	62.6	56.3	39.9	56.2	53.3	39.0
240	49.2	48.7	39.5	44.4	45.3	37.6
270	41.7	43.0	37.9	37.6	39.6	35.4
300	36.5	38.6	35.8	33.2	35.4	33.2
330	33.0	35.2	34.1	30.1	32.3	31.3
360	30.3	32.6	32.3	27.8	29.9	29.6

Table 4. Temperature Change Which Does Use Water Circulation System(°C)

Temperature Sensor Time (Min)	T1			T2		
	T1-1	T1-2	T1-3	T2-1	T2-2	T2-3
0	15.7	16.0	16.3	15.6	13.5	14.9
30	39.4	20.0	15.1	44.6	22.9	17.2
60	56.4	30.8	18.3	59.7	34.5	22.0
90	66.3	39.6	22.9	68.0	42.7	26.7
120	72.8	46.0	27.1	73.6	48.6	30.9
150	77.4	51.1	31.1	77.6	53.3	34.7
180	81.3	56.0	35.9	76.8	57.6	38.0
210	58.2	52.0	37.7	51.5	49.1	37.2
240	44.1	42.9	36.0	39.0	39.7	34.4
270	35.7	36.4	33.3	32.1	33.6	31.5
300	30.5	31.8	31.0	27.9	29.5	29.2
330	27.1	28.6	29.0	25.1	26.6	27.1
360	24.7	26.3	27.3	23.1	24.6	25.5

Fig. 9 Water Circulation System According to the Presence or Absence of Change in the Temperature of the Pavement

을 알 수 있다. 물 순환 시스템을 이용하지 않았을 경우, 약 80°C의 포장체 표면의 온도를 약 30°C로 낮추기 위해선 2시간 30분에서 3시간 정도가 소요된 것을 알 수 있다. 반면 물 순환 시스템을 이용한 경우, 포장체의 표면온도를 약 30°C까지 낮추는데 약 2시간 정도 소요되는 것을 알 수 있다. T1과 T2는 외기 온도를 비롯한 여러 환경조건에 따라 다소 차이는 있지만, 온도변화는 크

게 차이를 보이지 않았다. 표면으로부터 50mm 아래의 관이 매설된 깊이에 온도의 변화를 측정해 보았다. 관이 매설된 깊이의 온도는 초기 표면의 온도와 거의 같은 온도에서 시작하여 3시간 동안 열원을 주었을 때 약 60°C까지 높아지는 것을 알 수 있다. 가열된 포장체 온도를 20°C 낮추기 위해 물 순환 시스템을 이용한 경우가 약 40분 정도 빨리 온도를 낮추는 것을 알 수 있다. 표면으로부터 100mm 아래의 온도 변화를 나타낸 그래프를 보면, 포장체 하부의 위치이기 때문에 다른 센서에 비해 온도 변화는 작게 나타났다. 다른 센서 온도 변화와 마찬가지로 물 순환 시스템을 이용했을 때의 포장체 온도가 빠르게 낮아짐을 알 수 있었다. 따라서 시험을 통하여 가열된 아스팔트 포장체의 온도를 저감하기 위해서 물 순환 시스템을 이용하면 아스팔트 포장체의 온도를 약 4°C~5°C까지 빨리 낮아지는 효과를 알 수 있었다.

4. 실내 공용성 평가

아스팔트 시멘트 도로 포장은 많은 종류의 파괴경향이 있다. 그 중 피로균열과 소성변형의 파괴경향에 대하여 실내 실험을 진행하였다. 소성변형과 피로균열은 도로 포장의 초기 및 사용도중 흔히 발생하는 파괴유형으로서 도로의 수명을 감소시켜 유지보수 비용의 증가를 초래한다. 본 연구에서는 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 평가하기 위해 휠트래킹 시험을 수행하였고, 도로 포장하부에 관을 매설함으로써 매설된 부분이 피로에 취약하여 균열이 발생할 수 있으므로 균열에 대한 저항성을 평가하기 위하여 휨 피로 시험을 수행하였다.

4.1. 사용재료

4.1.1. 아스팔트

본 연구에 사용된 아스팔트는 국내 S정유회사에서 생산되는 일반 아스팔트 바인더(AP-5)로서 침입도 기준 60~80 등급 및 PG등급 58-16을 가지는 포장용 아스팔트를 사용하였다.

4.1.2. 골재

본 연구에서는 전국적으로 분포되어 있는 화학적·물리적 성질이 우수하며 현재 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 화강암을 선정하여 실험에 사용하였다. 본 연구에서 사용된 19mm, 13mm, 잔골재, 채움재 등을 체가름 시험하여 입도표를 구하였고, WC-3의 시방기준에 만족하는 입도곡선을 Fig. 10에서와 같이 시방기준에

만족하는 입도곡선을 구하였다.

Fig. 10 Aggregate Particle Size

4.1.3. 배합설계

본 연구의 배합설계에서는 WC-3 입도에 대하여 설계 입도와 AP-5 아스팔트를 사용하여 최적 아스팔트 함량을 결정하였다. 배합설계 시 아스팔트량을 골재 총 중량의 5%를 기준으로 $\pm 0.5\%$ 와 $\pm 1\%$ 씩 변화시켜 각 함량별 공시체를 각 4개씩 제작하여 최적 아스팔트 함량의 산출에 이용하였다. 최적 아스팔트 함량(OAC)를 확인하기 위해서 흐름값, 공극률, 포화도, VMA, 안정도 테스트를 진행하였으며 본 혼합물의 최적 아스팔트 함량(OAC)는 배합설계 결과 5.1%로, 설계공극률은 4.0%로 결정하였다.

4.2. 휠트래킹을 이용한 소성변형 예측

4.2.1. 시험장비

휠트래킹 시험은 동적 반복 크리프 시험의 일종으로, 영국의 도로교통운수연구소(TRRL)에서 개발되었으며, 실제 도로가 고온 환경조건일 때 중차량 주행으로 인한 소성변형이나 니딩 작용을 시뮬레이션 시킴으로써, 아스팔트 혼합물의 내유동성을 평가하는데 사용된다. 아스팔트 혼합물에 대해서는 마찰 안정도를 이용하여 유동 저항성을 어느 정도 평가할 수 있으나 휠트래킹 시험은 실제 공용상태를 모사한 차륜을 주행시키므로 보다 직접적인 평가방법으로 간주되고 있다.

본 연구에서 사용한 휠트래킹 시험은 일본의 건설성에서 사용하고 있는 시험절차를 적용하였으며, 시험장비로는 Fig. 11과 같이 크랭크 방식의 변속 구동형 시험기(휠트래킹 시험장비)를 사용하였다. 이를 통해 포장의 표층과 동일한 형상으로 제작된 아스팔트 혼합물의 빔 표면을 소정의 접지압과 고무 경도를 가진 솔리드 타이어로 주행시켜 차륜 침하량의 시간 변화를 측정하였다.

이러한 시험 결과를 계산하여 아스팔트 혼합물의 소성 변형 저항성을 평가할 수 있다.

Fig. 11 Wheel Tracking Test Equipment

4.2.2. 시험 방법

본 실험을 하기 전 시편을 24시간 동안 상온에서 양생 시간을 거친 후 시험개시 6시간 전에 크기가 $300 \times 300 \times 50$ 인 정사각형 시편을 몰드체 휠트래킹 시험장비에 설치된 항온실에 넣어 시편 전체의 온도가 $60 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 가 되었을 때 시편을 몰드체 휠트래킹 시험기에 정착한 후 6.4kg/cm^2 의 전지압을 가진 시험용 차륜(지름 200mm, 폭 50mm, 고무두께 15mm)을 시편의 중심에 위치시킨 후 $230 \pm 10\text{mm}$ 의 거리를 총 2,520회(60분 소요) 수평 왕복하도록 시험하였다. 최초 시험용 차륜이 시편의 표면에 닿았을 때를 원점으로 하여 1분, 5분, 10분, 15분, 30분, 45분, 60분이 경과한 때의 침하 깊이를 측정하여 총 변형량, 변형속도, 동적안정도를 구하였다.

시험의 결과를 분석하기 위해서 아래와 같은 식들을 이용해 시편의 물성을 측정할 수 있다. 변형속도를 구하는 식에서 d_{60} 은 60분에서의 변형량을 d_{45} 는 45분에서의 변형량을 나타낸다.

$$\text{변형속도}(RD) = \frac{d_{60} - d_{45}}{15}$$

총변형량은 최초 시험차륜이 중심부를 통과한 1회를 0으로 정하고 다짐횟수가 왕복 2,520회(60분)일 때 침하깊이(총변형량, mm)를 기록한다.

그리고 소성변형 저항성을 나타내는 동적안정도(DS : Dynamic Stability)는 공시체의 표면으로부터 1mm 변형하는데 소요되는 시험차륜의 통과 횟수로서 다음식으로 구한다. 여기서 t_1 , t_2 는 시험을 시작한 후 45분, 60분을 의미하며, d_1 및 d_2 는 45분, 60분에서의 변형량(mm)를 의미한다. 그리고 계수 C는 크랭크에 의한 변속 구동형 시험기일 경우 1.0을 사용하며, 그 이외에 구

동형 시험기일 경우 크랭크형 시험기와의 비교시험을 실시하여 보정계수를 구한다.

$$\text{동적안정도(DS)} = 42 \times \frac{t_2 - t_1}{d_2 - d_1} \times C$$

4.2.3. 시험 결과 및 분석

휠트래킹 시험 시편은 Fig. 12와 같이 아스팔트 함량과 입도, 공극률(4%)로 동일하게 고정하였고 관의 매설 유무와 간격을 100mm, 200mm로 편차를 두어 시험을 진행했다. 총 3종류의 시편으로 분류하여 각각 2번의 휠트래킹 시험을 하여 변형속도(RS)와 동적안전도(DS)의 변화를 측정하였다.

Fig. 12 Wheel Tracking Test Sample

휠트래킹 시험은 실제 포장에 가해지는 교통 하중을 실내에서 모사하는 시험방법으로서, 아스팔트 혼합물의 소성변형에 대한 저항성을 판단할 수 있는 물성들을 측정한다. 이러한 물성에는 변형률과 동적안전도가 있으며, 이 중에서 동적 안전도는 시험 결과 값이 클수록 소성변형에 대한 저항성이 큰 혼합물로 평가되고 있다.

휠트래킹 시험 시편의 변형속도(RD)와 동적안전도(DS)의 결과치를 Table 5에 나타내었고, Fig. 13은 3종류의 평균치를 그래프로 나타내었다.

Table 5에서 알 수 있는 바와 같이 3종류의 변형속도와 동적안전도에서 큰 차이를 볼 수 없었다. 관이 매설된 시편이 비매설된 시편보다 동적안전도가 조금은 낮게 나오긴 했지만 이 정도의 차이로는 관이 매설됨으로써 포장면에 큰 영향을 미치지 않을 것을 판단되었다.

Table 5. Wheel Tracking Test
(Rate of Deformation & Dynamic Stability)

Pipe Type	Rate of Deformation (mm/min)	Dynamic Stability (Inning/mm)
NO Pipe	0.032	1399
Pipe Pitch 100mm	0.039	1344
Pipe Pitch 200mm	0.032	1312

Fig. 13 Wheel Tracking Test Result
(Rate of Deformation & Dynamic Stability)

4.3. 4점 휨 피로시험을 이용한 피로수명 예측

4.3.1. 시험장비

하중재하 및 조절은 기존의 INSTRON장비를 사용하였으며, 4점 휨 피로시험을 위하여 하중재하 장비를 새로 제작하였다. 시험데이터의 수집 및 저장은 National Instruments사의 SCXI 사시와 LabVIEW 프로그램을 사용하였다. 하중재하 장비는 큰 사이즈의 시편을 시험할 수 있도록 크게 제작되었으며, 시편의 고정을 위하여 4개의 DC모터를 장착하였다. 4점 휨 피로시험을 위하여 다음의 Fig. 14와 같이 시스템을 구성하였다. 시험을 수행하기 위한 변형률계는 INSTRON컨트롤러에 연결된 컴퓨터에서 MAX프로그램을 사용하였고, 시험 중 사이클마다 발생하는 하중, 보의 처짐, 바닥판과 아스팔트 혼합물의 변형률은 National Instruments사의 SCXI 사시를 통하여 수집되도록 하였다. SCXI 사시는 센서의 특성에 맞는 각각의 모듈을 설치하여 시그널 컨디셔닝을 할 수 있는 장비이다. 이렇게 수집된 데이터는 SCXI 사시에 연결된 컴퓨터에서 LabVIEW 프로그램으로 각 센서의 측정값과 강성, 위상각 및 손실에너지가 계산되어 화면에 보여진다. Fig.15은 시험데이터를 수집중인 LabVIEW의 모니터 화면으로서, 각각의 하중주기마다 하중, 시편중심에서의 처짐값을 그래프로 보여주고 있다. 또한, 수집된 데이터를 바탕으로 실시간으로 시편의 강성(Stiffness)과 위상각(Phase angle), 소산에너지

(Dissipated energy)를 계산하여 저장할 수 있다.

Fig. 14 Schematic Diagram of Flexural Fatigue Test

Fig. 15 Flexural Fatigue Test Equipment

4.3.2. 피로시험 데이터 해석

아스팔트 혼합물의 피로수명을 평가하는 가장 일반적인 방법은 혼합물에 대해 피로시험을 수행하여 얻어진 데이터로부터 강성(stiffness)을 계산하고 이를 통해 시편의 강성이 초기 강성의 50% 도달했을 때까지 시편에 가해진 하중재하 횟수를 피로수명으로 결정하는 방식, 그리고 하중재하 횟수에 따른 변형을 진폭의 변화를 그래프로 그린 다음 최소 곡률반경이 되는 지점의 하중재하 횟수를 피로수명으로 결정하는 방식이 있다(SHRP-A-404, 1994). 본 연구에서는 시편의 강성이 초기 강성의 50%에 도달할 때까지 적용된 하중재하 횟수를 피로수명으로 결정하였다.

피로수명을 산정하기 위해서는 시편의 강성을 사용하게 되는데 시편의 강성은 수평 인장 변형률의 진폭을 사용하여 계산하게 된다. 피로시험이 진행되는 동안 일반적으로 인장 변형률은 초기에 큰 폭으로 증가되다가 한참동안은 큰 변화가 없으며 파괴에 도달할 때 다시 큰 폭으로 변화하게 된다.

하중재하는 변형률 제어방식으로, 10Hz의 Haversine 파로 재하하였다. 시험온도는 20℃로, 시편은 20℃에서 2시간 이상 방치후 시험을 실시하였다. 시험 데이터는 시험초기의 50cycles의 값을 계산하여 초기 강성값(S_{mi})을 구하고, 매 500cycles 마다 데이터를 계산 및 저장하여 초기 강성값 40%가 되면 시험이 끝나도록 하였다.

4.3.3. 시험 결과 및 분석

본 시험은 일반 아스팔트 혼합물, 관의 간격이 100mm로 매설된 혼합물, 관의 간격이 200mm로 매설된 혼합물 3종류의 시편을 제작하여 4점 휨 피로 시험을 실시하였다. 피로수명은 초기 강성의 50%에 도달하였을 때로 정의하였으며, 각 관 매설 종류별로 피로수명을 측정하기 위해 스트레인 레벨을 100~300 $\mu\epsilon$ 의 중간 범위, 150 $\mu\epsilon$ 정도로 하여 시험을 진행했다. 시편의 크기에 따라 변형률이 조금씩 다르게 나타났다. Fig.16, Fig. 17, Fig. 18은 각 관 매설 종류별 휨 피로시험 결과이다.

Fig. 16 Flexural Fatigue Test Result(No Pipe)

Fig. 17 Flexural Fatigue Test Result(Pitch 100mm)

Fig. 18 Flexural Fatigue Test Result(Pitch 200mm)

Fig. 16은 일반 아스팔트 혼합물로 시편을 제작, 스트레인 레벨을 163 $\mu\epsilon$ 으로 휨 피로시험을 진행한 결과이다. 초기강성은 14178.7MPa이며, 피로시험 결과 피로수명 Nf는 250,002회이다. Fig. 17은 아스팔트 혼합물에 관의 간격을 100mm로 매설한 시편을 제작, 스트레인 레벨 164 $\mu\epsilon$ 으로 휨 피로시험을 한 결과이다. 초기강성은 13536.9MPa이며, 피로시험 결과 Nf는 141,006회이다. Fig. 18은 아스팔트 혼합물에 관의 간격을 200mm로 매설한 시편을 제작, 스트레인 레벨 167 $\mu\epsilon$ 으로 휨 피로시험을 한 결과이다. 초기강성 13865.7MPa이며, 피로시험 결과 Nf는 219,001회이다.

Table 6. Flexural Fatigue Test Result

Pipe Type	Micro Strain ($\mu\epsilon$)	Initial Stiffness	Nf
NO Pipe	163	14178.7	250,002
Pipe Pitch 100mm	164	13536.9	141,006
Pipe Pitch 200mm	167	13865.7	219,001

시험으로 구한 결과 값을 보면, 초기강도는 관의 매설 유무에 관계없이 비슷하지만, 아스팔트 혼합물에 관을 100mm로 매설한 시편에서 피로수명의 값이 다른 시편에 비해 절반정도 낮게 나오는 것을 알 수 있다. 혼합물 내의 공극은 공용성과 밀접한 관계가 있는 물리적 성질로서, 본 시험을 통해 아스팔트 혼합물에 관을 많이 매설하게 되면 아스팔트 포장의 파손이 조기에 발생할 수 있음을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 아스팔트 포장 하부에 관을 매설하기 위한 시공조건을 고려하였으며, 물 순환 시스템을 이용하여 포장 구조체 온도 저감효과를 모형실험을 통해 분석하였다. 아스팔트 포장면에 관을 매설함으로써 아스팔트 포장의 공용성에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고자 소성변형시험과 피로균열시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1. 포장도로에 매설하는 관은 경제성, 시공성과 열전도율을 고려하기 위해 동관, PB관, Teflon관 3종류의 관을 선정하여 비교하였다. 실험결과 매설된 관의 종류에 따라 열회수율에는 큰 차이가 없었다. 동관은 고가이면서 시공성이 떨어지고, PB관은 아스팔트 포

장 시공 중에 발생하는 고온에 의해 관이 변형이 일어난다. Teflon관은 PB관 보다 고가이긴 하지만 압축강도가 높고, 다짐 시 관의 파손이나 변형이 일어나지 않는 장점을 보였다. 따라서 Teflon관이 시공성과 유지관리 등에서 적합한 것으로 판단되었다.

2. 배관의 설치간격을 주요 변수로 평가하고 최적 배관 간격을 결정하기 위하여 유한요소 해석을 이용하였다. 유한요소 해석 결과, 배관의 간격이 100mm~200mm가 열을 회수하는데 적절하다고 판단되었다. 열회수 차이를 좀 더 명확하게 규명하기 위해 시편 1000mm×700mm×200mm의 시편을 제작하여 온도변화를 측정하였다. 시험결과, 배관 간격이 100mm인 시편이 상대적으로 열회수를 적게 하고, 흡수된 열을 보다 빨리 회수할 수 있었다.
3. 배관의 간격을 100mm로 결정하고, 포장체를 제작하여 물 순환을 시킴으로써 아스팔트 포장체의 온도변화를 측정하였다. 태양열 모사 시험기를 3시간 작동하여 아스팔트 포장 표면의 온도를 80℃까지 올린 후 물 순환 시스템을 작동하였다. 그 결과 표면의 온도를 30℃까지 냉각하는데 2시간 정도 소요됐다. 이는 일반 포장체의 냉각되는 시간보다 1시간 정도 빠르게 낮아짐을 알 수 있었다.
4. 휠 트랙킹 시험을 통해 변형속도(RD)와 동적안정도(DS)를 측정해 보았다. 일반 아스팔트 혼합물, 관의 배치간격이 100mm인 혼합물, 관의 배치간격이 200mm인 혼합물 총 3종류의 시편을 만들어 시험한 결과, 변형속도와 동적안정도 결과 값이 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 포장하부에 관을 매설함으로써 포장체의 소성변형에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.
5. 4점 휨 피로시험을 통해 피로수명을 측정해 보았다. 휠트랙킹 시험과 마찬가지로 총 3종류의 시편을 만들어 시험한 결과, 3종류 모두 다 초기강성은 비슷하지만 배관의 간격을 100mm로 했을 때 다른 두 종류의 시편에 비해 피로수명의 값이 절반정도 낮게 나오는 것을 알 수 있었다. 이는 아스팔트 혼합물에 관을 많이 매설하게 되면 아스팔트 포장의 파손이 조기에 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

This research was supported by a grant from the cooperative R&D program (B551179-12-06-00) funded by MKE (Ministry of Knowledge Economy) and ISTK (Korea Research Council Industrial Science and Technology), Republic of Korea.

References

- Cho, Jae man, Kim, Hae Dong, Kim, In soo, 2008, A Study on the Surface Temperature Reduction of New Road Asphalt Pavement, *Conference of Korean Society of Road Engineers*, pp.79~87.
- Kim, In soo, Han, Eui seok, 2006, A Study on the Surface Temperature Reduction of Thermal Insulation Asphalt Pavement, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 8, pp.71~74.
- Kim, In soo, Kim, Hae Dong, 2008, A Study on the Surface Temperature Reduction of Heat-Island Pavements, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 10, pp.555~560.
- K. Brian Diefenderfer, Imad L. Al-Qadi, D. Stacey, 2006, Model to Predict Pavement Temperature Profile, *The Journal of Transportation Engineering, ASCE*, Vol. 132, No 2, February 1.
- Gang, Minsoo, Rhee, Sukgeun, 1994, A Study on the Variation of Temperature and the Deformation Characteristics in Asphaltic Concrete Pavement by Air Temperature, *Korean Society of Civil Engineers, 15th ed.* pp.1115~1128.
- Ichinose, T., 1999, Local climate change related with land use change since the near modern period, *Environmental system research*, Vol. 27, pp.115~126
- NAPA, FHWA(2001), *HMA Pavement Mix Type Selection Guide*, Information Series 128.
- (접수일 : 2012. 12. 20 / 심사일 : 2012. 12. 20 / 심사완료일 : 2013. 1. 22)