

## 국내 현장중온재생공법의 프리히터 개발을 위한 기초연구

### Fundamental Study for Development of Pre-Heater for Warm In-Place Recycling in Korea

김대훈	Kim, Dae-Hun	정회원 · 전북대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : kidsmini@hanmail.net)
김승훈	Kim, Seung-Hoon	정회원 · 전북대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : kshqkqhekd@naver.com)
권수안	Kwon, Soo-Ahn	정회원 · 한국건설기술연구원 국가건설기술센터장 (E-mail : sakown@kict.re.kr)
김용주	Kim, Yongjoo	정회원 · 한국건설기술연구원 도로포장연구실 (E-mail : yongjook@kict.re.kr)
이재준	Lee, Jaejun	정회원 · 전북대학교 토목공학과 방재연구센터 조교수 · 교신저자 (E-mail : lee2012@jbnu.ac.kr)

#### ABSTRACT

**PURPOSES :** To design a pre-heater for warm in-place recycling equipment, three different heating systems were evaluated to determine their thermal efficiency.

**METHODS :** In this study, a 30cm × 30cm × 15cm wheel-tracking specimen was used to measure the inner temperature as a function of the heating system. The inner temperature of the specimen was measured with a data logger at the surface, and at depths of 1cm, 2cm, 3cm, 4cm, and 5cm. To evaluate the thermal efficiency, the researchers used three different types of equipment, namely, IR, a heating wire, and a gas burner.

**RESULTS :** The IR heating system exhibits a higher level of performance than the others to achieve the target temperature at a depth of 5cm in the specimen. The gas burner system was capable of heating the surface to a temperature of up to 600°C. The other types, however, cannot heat the surface up to 600. The thermal efficiencies were measured based on the laboratory conditions.

**CONCLUSIONS :** To find the most effective system for application to the development of a pre-heater for warm in-place recycling, various systems (IR, heating wire, gas burner) were examined in the laboratory. As a result, it was found that the hot plate of a gas burner system provides the highest temperature at the surface of the asphalt but, of all the systems, the IR system provides the best internal temperature increase rate. Furthermore, a gas burner can age the asphalt binder of the surface layer as a result of the high temperature. However, the gas burner cannot attain the target temperature at 5cm. The IR system, on the other hand, is effective at increasing the internal temperature of asphalt.

#### Keywords

gas-burner, IR, heating wire

Corresponding Author : Lee, JaeJun, Assistant Professor  
Department of Civil Engineering, Chonbuk National University,  
567, Baekje-daero, deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 561-756, Korea  
Tel : +82.63.270.2427 Fax : +82.63.270.2421  
E-mail : lee2012@jbnu.ac.kr

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

Received Feb. 27, 2015 Revised Mar. 3, 2015 Accepted Mar. 13, 2015

## 1. 서론

도로란 보행자 및 차량이 이동하는 통로로써 경제사  
회 및 문화 등 다양한 활동에 걸쳐 국가발전에 선도적인

역할을 하는 사회간접자본 시설을 말한다. 하지만 국가  
와 시민의식의 성장으로 인해 도로는 기존의 도로 보다  
더욱 강도 면에서나 내구적으로 안정적이어야 한다. 또

한 주행에 있어 편안함을 추구해야 하며, 시공이나 보수에 있어 친환경적이고 경제적이어서 시장 경제활동에 있어서도 주목을 받을 수 있는 것이 현실이다. 현재 우리나라 도로의 90%는 아스팔트도로가 차지하고 있으며, 아스팔트 포장도로는 콘크리트 포장도로에 비해 안정된 승차감과 노면의 특성상 소음의 발생도 적게 발생하는 특징이 있다(Kim et al. 2013). 또한 아스팔트 포장공법은 유지보수가 저렴한 장점이 있어 큰 관심을 받았다. 일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장도로의 공용년수는 20년으로 측정되고 있다. 하지만 4계절이 뚜렷한 우리나라와 같은 경우, 폭우 및 혹한과 같은 환경하중 및 차량하중 등 다양한 원인으로 인해 아스팔트 콘크리트 포장도로 표면에 다양한 종류의 파손이 발생하여 도로의 기능이 많이 상실되어져 파손이 심한 구간에는 도로의 전체적인 보수가 필요한 실정이다. 현재 미국과 유럽 등 선진국에서는 포장의 종류와 도로상황 및 지역 조건들에 따라 다양한 유지보수공법 기술들이 적용되고 있다(Terrel et al. 1997). 그 중 하나인 현장가열아스팔트재생공법은 포장장비를 이용하여 가열 및 절삭단계를 거쳐 첨가제를 투입하고 현장에서 다짐을 하여 하나의 공정으로 모든 아스팔트 유지보수 작업이 이루어진다. 현장에서 모든 작업이 이루어지고 기술의 발전으로 인해 폐아스팔트를 100% 재활용하기 때문에 유지보수 작업에 있어 경제성과 친환경적인 이점이 큰 공법이다 (ARRA 2001).

하지만, 이 공법은 국내에서는 아스팔트 표면가열 시 발생하는 다량의 유증기와 악취 그리고 장비의 큰 규모 때문에 크게 주목을 받지 못하였다. 또한 기존에 국내에 도입된 현장가열재생공법 장비는 장비의 노후화 진행으로 인하여 가스 및 에너지 소비율이 증가하게 되어 작업 효율이 떨어지게 되는 단점이 있다(Cho et al. 2013). 본 연구에서는 현장재생공법의 프리히터 개발을 위한 기초연구를 위해 다양한 가열장비를 활용하여 아스팔트 시편 표면에 가하는 열량에 따른 내부온도 스펙트럼을 알아보기 위한 실내 실험을 수행하였다.

## 2. 문헌고찰 및 연구배경

### 2.1. 문헌고찰

Wang 외 2인(2011)은 현장가열재생공법의 빠른 히팅시스템 구축을 위해 뜨거운 공기에 의해 노면을 가열하는 마이크로웨이브(Microwave) 히터의 성능을 평가하였다. 이 장비는 노면의 수분이 제거된 상태에서 깊이

약 10cm까지 열전달 성능이 우수한 것으로 나타났다.

Zhang, Deyu 외 5인(2011)은 열 해석 수치 프로그램을 이용하여 가스버너장비에 의한 아스팔트시편 내부 온도 스펙트럼을 측정하여 효과적인 가열방법과 온도를 나타내고 있다. 실험에 따르면 연속적인 가열방법보다 간헐적인 가열방식을 취하는 것이 표면 가열온도를 감소시키고 내부층 온도상승률을 확보할 수 있다고 제시하고 있다.

미국과 캐나다와 같은 선진국에서는 현장재생공법의 가열장비에 대하여 꾸준한 연구를 수행하였다. 간접적인 적외선 히팅장비와 공기순환시스템을 이용하여 아스팔트의 혼합을 보다 효율적으로 할 수 있게 되었으며, 가열장비의 성능을 향상시키는데 효과적이었다고 서술하였다(Terrel 외 2인, 1997).

조흥현 외 2인(2013)은 현장가열재생공법의 버너를 이용한 기존에 가열시스템의 가스 순환 불량에 따른 장비성능의 효율성 감소에 대해 문제점을 삼고 있으며, 가열시스템의 설계조건(반사판위치, 각도) 변화를 통한 최적화에 따른 연구를 진행하였다. 반사판의 각도를 120°로 변경하였을 경우 기존의 제품보다 혼합물의 온도상승이 10℃ 상승하는 효과를 얻어 냈다. 이는 가스의 순환 흐름을 변경함에 있어서도 가열장비의 성능을 최적화시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 1은 국내에서 시행된 현장가열공법의 전경을 나타내고 있으며, 권수안 외 4인(2013)은 국내에서 적용된 현장가열재생공법에 아스팔트 혼합물의 물성을 평가하는 연구를 수행하였으며, 4가지에 대한 안정도 평가에서 기준치를 모두 만족하고 있음을 다음과 같이 서술하고 있다.

- ① Wheel Tracking Test를 통하여 아스팔트혼합물의 소성변형저항성을 알아본 결과 일반가열아스팔트 혼합물의 기준 값을 모두 만족하였다.
- ② 현장에서 채취한 현장코어를 이용하여 마샬안정도 Test를 실시한 결과 국내 GR F 4005에서 제시하고 있는 품질기준치를 모두 만족하는 결과를 얻었다.
- ③ 아스팔트하부에 전달되는 하중에 의해서 발생하는 균열저항성을 알아보기 위해 간접인장강도를 상온 25℃에서 측정하였으며, 그 결과 국내 GR F 4005에서 제시하고 있는 기준치에 만족하는 결과

를 얻어 냈다.

- ④ T 283에서 제시하고 있는 실험법에 따라 Tensile Strength Ratio Test를 수행하였으며, 국내 기준 75%를 모두 만족하는 결과를 얻어냈다.



Fig. 1 HIR Field Construction (Kwon et al., 2013)

## 2.2. 연구배경

국내 현장재생 유지보수 공법에 대한 가열방식은 가스버너, 적외선, 열선 등 다양한 장비의 형태로 운용되고 있다. 하지만 대부분의 시공은 국부적인 파손에 대하여 긴급보수용이나 일부 덧씌우기 과정에서 사용되는 실정이다. 본 연구에서는 국내 긴급보수용으로 사용되는 가열장비의 형태에 따른 아스팔트 내부 온도 스펙트럼을 알아보고자 한다. 기존의 긴급유지보수용으로 국내에서 많이 사용되는 현장가열재생공법의 과정은 HIR 공법의 공정과 동일하게 진행된다.

Fig. 2는 현재 국내의 가인인터넷서날 업체에서 시행

되고 있는 국부적인 아스팔트 파손에 의한 긴급 보수공사의 전경을 나타낸다. Fig. 2(a)는 적외선장비의 적용 형태를 보여준다. 적외선장비의 특징은 세라믹 복사열에 의한 간접적인 열전달 방식을 취하고 있다.

Fig. 2(b)는 국부적인 아스팔트 파손구간을 나타낸다. 적외선장비를 사용할 경우 표면의 상태가 수분에 의한 포화상태 일지라도 수분은 수십 초 이내에 증발시켜 시공 시 수분에 의한 바인더 분리 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다고 말하고 있다.

Fig. 2(c)와 Fig. 2(d)는 현장재생공법과 동일한 방식으로 현장을 가열한 뒤 스크레핑하는 모습을 보여준다.

현장에서 파쇄된 아스팔트 혼합물은 플랜트에서 생산된 신재 아스팔트를 투입할 필요 없이 재생첨가제의 투입과 다짐으로 공정이 이루어지는 것을 Fig. 2(e)와 Fig. 2(f)에서 보여주고 있다.



Fig. 2 Repair Work Using of Infrared Equipment (KAIN INTL, infrared patching)

## 3. 실험장비 및 실험방법

### 3.1. 실험장비

본 연구는 현장가열재생공법의 프리히터 개발을 위해 적용 가능한 형태의 가열방법에 따른 아스팔트 내부온

도 스펙트럼을 측정하였다.

Fig. 3은 실험장비와 실험방법을 보여준다. 실험장비는 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b) 그리고 Fig. 3(c)와 같이 가열 방식에 따라 분류하여 각각 적외선, 열선, 가스버너를 활용하여 아스팔트 외부 및 내부온도 스펙트럼을 측정하였다. 각각의 장비의 제원 값은 Table 1에 정리하였다.

각각의 장비의 가열방식은 열원에 의하여 주변온도를 상승시켜 아스팔트 표면을 간접적으로 가열하는 간접가열방식을 취하고 있다.

### 3.2. 실험방법

가열용량은 모든 장비에 대하여 Table 1의 제원 값에 나타나 있는 최대 용량을 사용하였으며 각각의 장비별 아스팔트 표면에 가해지는 최대 발열량과 내부온도 스펙트럼을 비교분석하였다.

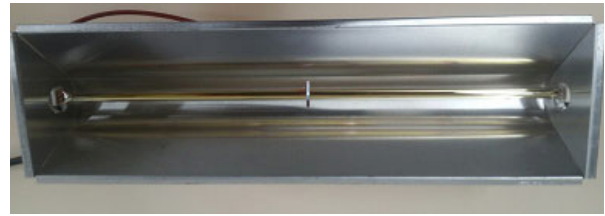
데이터 수집은 Ds-Net 정동적 데이터 로거를 사용하여 아스팔트 시편(300×300×150mm)에 표면으로부터 일정 깊이까지의 온도 스펙트럼을 측정하였으며, 실내 실험 시 외부의 영향을 최소화하기 위해 각각의 실험에 외기온도 및 아스팔트 내부온도를 20℃로 유지한 상태에서 모든 실험방법을 Fig. 3(d)와 같은 상태에서 실험을 진행하였다.

적외선장비와 열선장비의 열전달 효율을 알아보기 위해 아스팔트 시편으로부터 열원(장비)의 높이를 20cm 떨어뜨린 상태에서 두 가지 장비에 대해 깊이별 온도분포를 아스팔트시편 깊이 2.5cm까지 실험조건을 동일하게 유지한 상태에서 실시하였다.

또한 장비별 아스팔트 표면에 전달할 수 있는 최대온도를 알아보기 위해 열원과 아스팔트 시편의 높이를 조절함으로써 최적의 높이를 알아보았으며, 그에 따른 내부온도 스펙트럼을 측정하여 가열형태에 따른 효율을 분석하였다.

또한 장비별 아스팔트 내부온도 증가량을 알아보기 위해 아스팔트 골재가 파손되지 않고 분리가 가능한 온도 약 70℃를 목표 온도로 설정한 후 아스팔트 시편 5cm 깊이에서의 도달시간을 알아보았다.

그리고 아스팔트 표면 가열에 따른 내부온도 유지시간을 측정하기 위해 적외선장비를 이용하여 아스팔트 내부 5cm를 약 100℃ 정도로 올린 상태에서 아스팔트 시편 표면에 가해지는 열원을 제거하였을 경우의 내부온도 스펙트럼을 측정하여 시간에 따른 상승온도와 유지시간을 알아보았다.



(a) IR equipment



(b) Heat wire equipment



(c) Gas burner equipment



(d) Experimental method

Fig. 3 Experimental Equipment

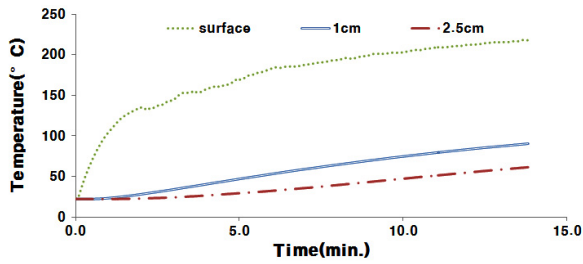
Table 1. Specification of Equipments

	IR equipment	Heat wire equipment	Gas burner equipment
Specifications	Temperature control by volume	Temperature control by resistance	Temperature control by Air pressure and gas regulation
Capacity	220V, 60Hz, 1800W	220V, 6000W	220V, 0.4Kw 15000Kcal/h
Size	315×133×100 (mm)	425×220×25 (mm)	310×180×150 (mm)
Materials	Aluminum	A slab of stone	Aluminum
Weight	0.53kg	5.4kg	3.8kg

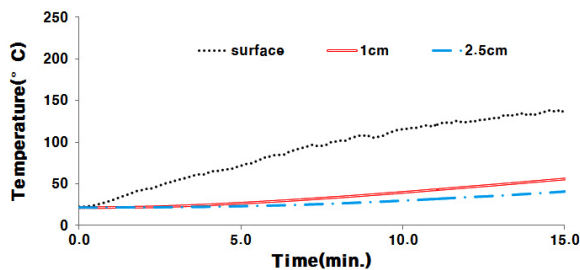
#### 4. 적외선장비 및 열선장비의 온도전달을 비교 실험결과

Fig. 4는 두 가지 장비(적외선, 열선)에 대한 동일 시간에 따른 온도 분포를 나타낸다.

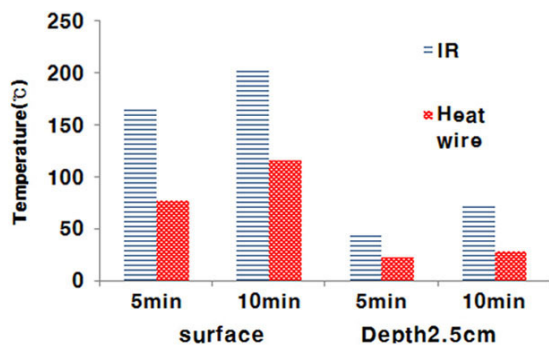
Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 깊이 2.5cm까지의 온도스펙트럼을 나타낸 결과이다. 실험결과 아스팔트 시편과 열원의 높이를 동일하게 유지한 실험에서는 적외선장비는 실험시간 15분 동안 약 215℃를 나타냈고 열선장비를 사용한 경우 약 147℃를 나타내었다. 실험결과 적외선장비가 열선장비에 비해 아스팔트 표면에 가해지는 열 전달율이 효과적인 것으로 나타났다. 또한 Fig. 4(a)의 적외선장비를 사용한 경우 아스팔트 표면에 가해지는 온도를 보면, 실험 시작 후 약 1분 동안 최대온도에 약 70% 이상 급격히 도달하는 것을 볼 수 있는 반면 열선장비는 시간별 온도의 기울기가 완만한 것을 관측할 수



(a) Experiment result of Infrared equipment



(b) Experiment result of Heat Wire Equipment



(c) Measured temperature

Fig. 4 Comparison of Heat Transmissible with IR and Heat Wire Equipment

있다. 이 결과는 실험에 사용한 장비의 최대열량은 다르지만 동일한 열량을 사용하더라도 적외선장비가 열선장비에 비하여 아스팔트 내부온도 증가에 효과적인 것으로 사료된다.

Fig. 4(c)는 실험 시작 후 5분과 10분 동안 표면과 깊이 2.5cm에서 측정된 온도 값을 보기 쉽게 막대그래프로 나타낸 것이다.

적외선장비와 같은 경우 10분 후 약 74℃의 온도 값이 측정되었고, 열선의 경우 29℃가 측정되었다. 이 결과로부터 적외선장비의 경우 열선장비에 비해 내부온도 전달이 효과적인 것으로 나타났다.

#### 5. 가열장비에 따른 아스팔트 표면 최대온도와 내부온도 상승률 비교 실험결과

Fig. 5는 실험에 사용된 아스팔트 시편과 열원의 높이를 각각 조절하여 장비별 아스팔트시편 표면에 가해지는 최대온도와 내부온도 스펙트럼을 나타낸 그래프이다.

적외선장비의 경우 아스팔트 시편과 열원과의 높이 차이는 약 6cm에서 최대 394℃의 온도가 측정되었고 열선장비의 경우 약 3cm에서 최대 387℃의 온도가 측정되었다. 그 이하의 높이에서의 온도는 거의 일정하게 측정이 되었다. 또한 가스버너장비를 사용한 실험에서는 높이 10cm에서 아스팔트 표면온도 최대 584℃가 측정되었다. 버너장비의 특성상 열원과 10cm 이하의 높이에서는 불꽃의 영향으로 온도측정이 불가능하였다.

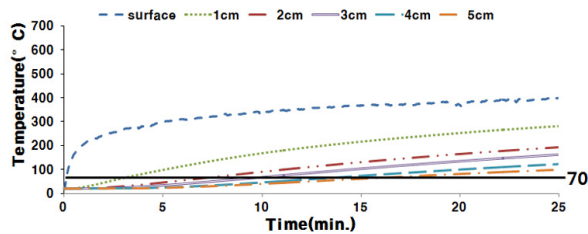
Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 적외선장비와 열선장비를 가지고 내부온도를 측정한 실험결과이다. 두 장비 모두 아스팔트 표면의 최대 발열 온도는 약 400℃까지 상승하는 것으로 나타났다.

적외선장비를 사용한 실험에서는 열선을 사용한 실험에 비해 최대온도 약 400℃까지 빠르게 도달함으로써 아스팔트 내부온도 상승률에 영향을 주었다.

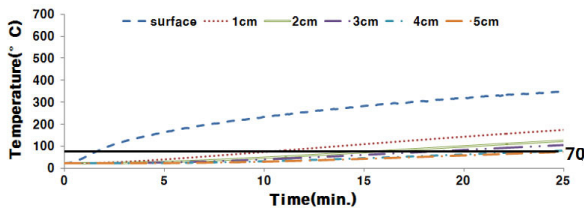
Fig. 5(c)는 가스버너장비를 활용한 아스팔트 내부온도 측정 실험결과이다. 가스버너를 활용한 실험에서는 불꽃의 영향으로 표면온도측정이 매끄럽지 못하였지만 표면최대온도 약 600℃까지 열선장비와 비슷한 경향으로 아스팔트 표면 온도가 가해지는 시간에 따라 최대온도까지 도달하는 경향을 나타 내었다.

Fig. 5의 각각의 그래프에 나타낸 실선은 아스팔트 시편으로부터 하부 5cm에 온도 70℃까지의 도달시간을 알아 본 것이다. 그 결과 적외선장비는 실험 시작시간으

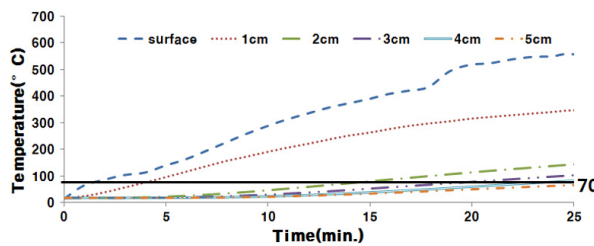
로부터 약 16분 후 70℃에 도달하였고, 열선장비의 70℃ 도달시간은 23분의 시간이 소요되었다. 그러나 가스버너장비를 활용한 실험에서는 최대온도는 실험장비 중 가장 높았으나 내부 5cm의 온도측정은 70℃까지 도달하지 못하는 것으로 나타났다.



(a) IR equipment result



(b) Heat wire result



(c) Gas burner result

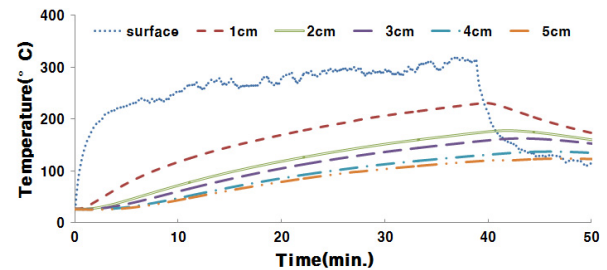
Fig. 5 Measured Inner Temperature as Function of Heating Equipment

## 6. 아스팔트 내부온도 유지시간 측정 실험결과

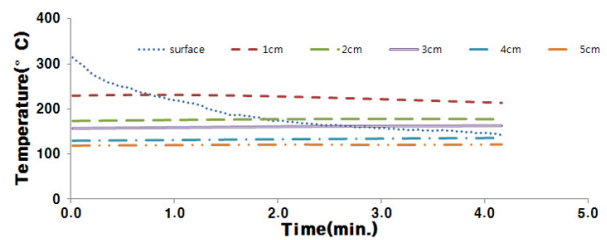
Fig. 6(a)는 전체적인 데이터 양상을 보여준다. 보는 바와 같이 실험 시작 후 약 25분이 경과하였을 때 아스팔트 시편 표면으로부터 깊이 5cm의 온도는 100℃가 되었다.

Fig. 6(b)는 실험 시작 후 38분 이후 아스팔트 표면에 가해진 열원을 제거한 상태에서 내부온도 스펙트럼의 경향을 보여준다. 실험결과 아스팔트 표면에 열원을 제거한 후에도 일정 시간동안 온도가 상승하고 유지되는 경향이 나타났다.

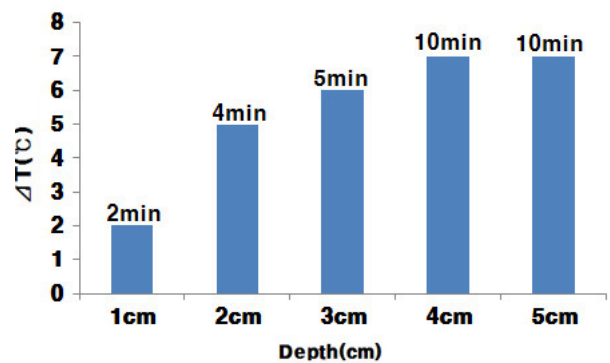
Fig. 6(c)는 관입 깊이에 따른 온도상승 변화량을 보기 쉽게 막대그래프로 나타낸 것이다. 막대그래프 위의 분단위 숫자는 온도유지시간을 나타낸다. 실험결과 아스팔트 표면으로부터 5cm의 깊이에서는 열원을 제거한 시간으로부터 10분 동안 약 7℃의 온도가 상승 유지되는 것을 확인하였다.



(a) Heating result



(b) Cooling behavior at inner specimen



(c) Changed temperature at each depth

Fig. 6 Inner Temperature Behavior After Remove Heat Source

## 7. 결론

본 연구는 국내 현장가열 재생아스팔트 장비 개발을 위한 가열시스템 기초연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 적외선장비와 열선장비의 아스팔트 시편과 동일한 높이에서의 실험 데이터를 분석한 결과 적외선장비

를 사용할 경우 열선장비와 비교하여 보았을 때 아스팔트 표면의 전달하는 열전달율이 적외선장비가 우수한 것으로 나타났다.

2. 국내에 현재 긴급보수용으로 사용되고 있는 가열장비에 대해(적외선, 열선, 가스) 각각의 장비에 대한 실내실험을 한 결과 적외선장비가 가장 효과적으로 단시간에 장비가 아스팔트 표면에 가해질 수 있는 최대온도에 도달함으로써 내부온도까지 목표온도에 빠르게 도달함을 나타내었다. 가스버너를 사용한 실험에서는 아스팔트 표면에 작용하는 최대발열온도는 가장 높았지만 최대온도까지의 도달시간이 오래 걸리는 단점이 있어 적외선장비에 비해 아스팔트 시편 내부온도 상승률의 효율이 떨어지는 경향이 나타났다. 이는 현장가열재생공법의 프리히터 개발에 대하여 적외선방식이 3가지 가열방식에 있어 가장 효율적인 장비가 될 것으로 사료된다. 또한 적외선장비는 중량이 가벼울 뿐만 아니라 프리히터의 소형화에 대한 유리한 입지를 차지할 것으로 보인다.
3. 현장재생공법의 가열공정에 있어 아스팔트 표면에 열원을 제거하여도 일정시간동안 아스팔트 내부온도가 상승 유지되는 점을 잘 이용한다면, 기존 가열장비에 비해 경제적이고 효율적인 장비개발이 가능할 것으로 판단된다. 추가적인 실험에서 가열장비의 정적인 실험 외에 동적인 실험을 진행해 봄으로써 이를 활용한 최적의 장비간의 간격이나 폭을 선정할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 논문은 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 교통물류사업인 "온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로 연구"의 연구지원으로 수행되었으며 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

## BIBLIOGRAPHY

- ARRA(Asphalt Recycling and Reclaiming Association), (2011) Basic Asphalt Recycling Manual, Annapolis, Maryland, USA
- Cho, H., Kang, B., and Cheong, C., (2013), Enhancement of Recycle Heating System of Hot in Placement Equipment, Magazine of Korean Society of Road Engineers, Vol. 14, No. 4. (조홍현, 강 변, 정찬우, 현장 가열 표층재생 아스팔트 포장공법의 재 활용 가열장비 성능향상 및 개선방안, 도로학회 제 15권4호)
- Do Wan Kim., Soo-Ahn Kwon., Yoon-Shin Bae., Sungho Mun., (2013) An Analysis of the Asphalt/Concrete Roads Noise in Seoul, Seoul Institute, Vol. 14, No. 2.(서울도시연구 제14권 제2호)
- KAIN INTL, infrared patching, <http://www.sealant.co.kr/xe/patching>
- Kwon, Sooahn., Yang, Sunghlin., Lee, Jaejun., Hong, Jaechong., Lim, Jaekyu., (2013), A Case Study of Hot In-Place Recycling Asphalt Mixture in Korea , International Journal of Highway Engineering, Vol. 15. No.1, pp.57~63
- NCHRP(National Cooperayive Highway Research Program) (2011), Recycling and Reclamation of Asphalt Pavements Using In-Place Methods, Washington, D.C. 2011 [www.TRB.org](http://www.TRB.org)
- Terrel, R. L., Epps, J. A., Sorenson, J.B., (1997), New Developments in Hot In-Place Recycling of Asphalt Pavements, the Pavement Session of the 1997, XIIIth IRF World Meeting, Toronto, Ontario, Canada
- Wang, H., Hao, P., Xue, L., (2011), Laboratory Evaluation of Microwave Heating Method for Hot In-Place Recycling., Journal of Testing and Evaluation, Vol. 39, No.6.
- Zhang, Deyu., Ma, Tao., Huang, Xiaoming., Chen, Chen., Gu, Fan., Jin, Jing., (2011), Heating Temperature Control for Hot In-Place Recycling of SMA Asphalt Pavement, TRB 2011 Annual Meeting