

환경모사포장가속시험기(HEART Environmental Simulator)의 개발

The newly developed Heart Environmental Simulator(HES)

조윤호* · 김인태** · 성병민*** · 차경재****

Cho, Yoon Ho · Kim, In Tai · Sung, Byoung Min · Cha, Gyeong Jae

1. 서론

본연구진은 "친환경 4S(safe, Silence, aeSthetic, and Satisfaction) 포장시스템 개발 연구"라는 과제를 통해 기존 포장형식과 다른 투/배수성 포장을 국내에 적용하기 위한 연구를 수행 중에 있다. 이러한 투/배수성 포장 형식은 차량 주행시 발생하는 소음을 감소할 수 있고 우천시 빗물을 포장체로 침투시켜 수막현상(hydroplaning)을 방지할 수 있고 미끄럼 사고를 방지하고 야간 시인성을 향상시킬 수 있는 등 여러 장점이 있어 다른 여러 나라에서도 현장적용을 위한 활발한 연구가 진행되고 있다. 도로의 기본요건인 구조적인 안정성 뿐만 아니라 기능성을 겸비한 차세대 포장형식의 공용성을 단기간에 평가하기 위해서 새로운 개념의 포장가속 시험기인 HEART Environmental Simulator(이하, HES)를 개발하게 되었다. HES는 그림 1에 나타내듯이 실제 현장의 환경조건을 모사할 수 있는 실내실험 장비(항온항습 챔버 및 강우 모사장치)를 이용하여 현장의 결과와 유사한 값을 최소한의 비용으로 얻어낼 수 있는 장비이다. 또한 기본적으로 교통하중을 제어할 수 있고 추가적으로 물, 온도, 습도 등의 환경하중을 제어할 수 있도록 개발하였다. 이를 통해 투/배수성을 포함한 새로운 기능을 갖춘 포장체의 교통하중뿐 아니라 포장체에 미칠 수 있는 환경요소들을 제어하여 장/단기 공용성을 평가할 수 있을 것이라 기대된다.

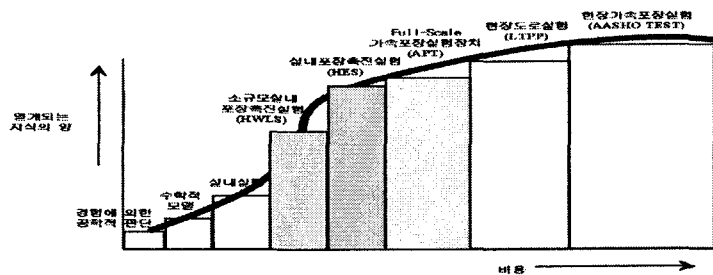


그림 1. HES 개발의 의의

- * 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 · 공학박사 · 02-820-5336(E-mail : yhcho@cau.ac.kr)
- ** 비회원 · 명지대학교 교통공학과 조교수 · 공학박사 · 031-330-6505(E-mail : kit1998@mju.ac.kr)
- *** 비회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 석사 · 공학석사 · 02-816-0251(E-mail : 98jovful2@hanmail.net)
- **** 비회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 석사과정 · 공학박사 · 031-330-6505(E-mail : thickeyebrows20@hanmail.net)

2. 국내외 포장가속시험기와 비교

2.1 국내 포장가속시험기

2004년에 개발/완성된 한국도로공사 포장가속시험기(KALES, Korea Accelerated Loading and Environment Simulator)의 카트중량은 16.5ton에서 36ton까지 가능하다. 또한 자동 윈더링(wandering) 기능을 사용하여 실제 차량의 하중분포를 모사할 수 있다. 한 쪽 구간에 온도챔버를 두어 환경에 의한 포장체의 거동 특성을 분석하도록 하였다. 지하수위를 조절할 수 있는 시설을 구축하여 현장과 동일한 지하수위를 모사할 수 있도록 하였다.

한양대학교에서 개발한 포장가속시험기(HAPT, Hanyang Accelerated Pavement Tester)는 원적외선을 사용한 heating 시스템을 설치함으로써 포장체의 온도를 자동으로 적절하게 유지하도록 하였다. 또한 횡방향의 주행위치를 감지하기 위한 encorder를 설치하여 wandering을 모사할 수 있다. 주행부 카트를 제어하는 시스템과 포장 내/외부의 계측 센서를 제어하는 시스템으로 제어계측시스템을 나누어 이 두 가지 시스템의 정보가 실시간으로 조합되도록 설계하였다.

중앙대학교의 소규모 포장가속시험 장비(HEART Wheel Load Simulator, 이하 HWLS)에서 제작가능한 공시체는 600mm×600mm×(50~700)mm로써 공시체의 제작 또한 장비 내에서 가능하도록 설계되었다. 또한 바퀴의 자중으로부터 약 1000kg까지 하중재하가 가능하도록 제작되었다. 바퀴의 위치와 속도, 실험시 횡방향 이동을 위한 실험판은 포텐샤미터를 통해 프로그램 상에서 제어가 가능하게 설계되었다.

2.2 국외 포장가속시험기

INDOT/Purdue-APT는 원형 두께의 포장 단면에서 트럭 교통량을 모사하기 위해 제작되었으며 포장가속 시험기 시험 단면에 사용되는 재료, 하중 조건 및 환경 조건 등의 모든 조작이 가능하도록 설계되었다. 또한 물을 실험색선 내에 투입하고 수위조절이 가능하다. 차량의 타이어로는 일반적인 복축의 트럭 바퀴나 광폭의 단축 트럭 바퀴가 사용되고 8km/h까지 속도를 증가시킬 수 있도록 개발되었다.(Khaled A.Galal외 1명, 1999)

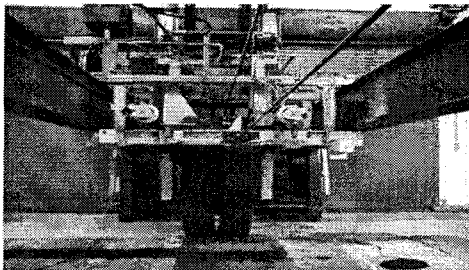


그림 2. INDOT/Purdue-APT

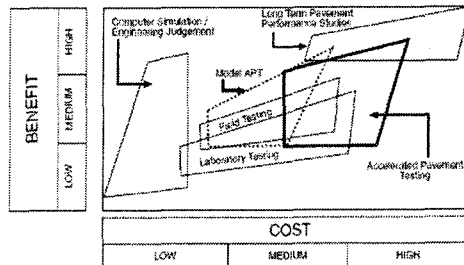


그림 3. 모델 APT의 비용/효과 그래프

실제 포장체 크기의 1/3로 제작한 MMLS3는 full-scale 장비에서 사용한 표준 트럭 타이어보다 작은 지름(300mm)의 단축 타이어에 하중을 재하하고 실험실과 현장에 모두 적용할 수 있다. 환경 모사에 있어서는 포장의 습한 조건이나 온도 조절 등이 모두 가능하도록 제작되었다.(Pavement Response and Rutting for Full-Scale and scaled APT) MMLS3는 저렴하지만 부정확한 데이터를 가져오는 실내 실험장비와 정확한 데이터를 얻을 수 있지만 실험 비용이 상대적으로 비싼 Full-scale 포장가속시험기에 대한 대체 실험장비로서 미국 텍사스에서 개발되었다. 그림 3은 모델 실험 장비의 장점에 대해서 나타낸 것으로 소규모 모델 장비를 이용하여 적절한 비용으로도 일정 수준 이상의 결과값을 가질 수 있음을 보여준다. 본 연구에서 개발하는 환경모사 시험 장비도 이와 같은 목적에서 개발하려고 한다.



3. HEART Environmental Simulator 제작

3.1 교통하중의 모사

3.1.1 타이어 압력/접지 응력, 단축/복축

차량하중은 포장의 공용성에 큰 영향을 미치지만 실제 포장에 있어서는 제어되지 않는 변수이다. 다양한 차량의 하중을 포장가속시험기에서 구현하는 것은 한계가 있다. 본 장비에서도 모든 차량하중을 고려하지는 못했지만 Load Cell을 이용하여 하중재하범위를 바퀴의 자중에서부터 약 12,000lb(5.44tonf)까지 구현할 수 있게 하였다. HES에서는 우레탄타이어와 고무타이어를 각각 싱글과 듀얼로 제작하여 총 4가지의 바퀴에 의한 다양한 실제하중의 모사가 가능하도록 제작하였다.

3.1.2 교통하중의 재하 방향

교통하중의 재하방향은 일방향과 양방향 제어방식이 있는데 영국의 Brown은 양방향 교통 시스템이 상대적으로 공용성 측면에서 더 심각하다고 본 반면, 핀란드의 Huhtala은 두 경우에 대해서 공용성에 차이가 없다고 보고했다. 이론적인 해석은 잔류응력의 영향으로 두 경우에 공용성에 차이가 있다고 나타난다. 이렇게 장비의 운영방향에 대한 해석이 엇갈리는 가운데 HES는 일방향과 양방향이 모두 가능하도록 제작하였다.

3.1.3 교통속도

포장가속시험기에서 교통속도에 따른 영향은 다른 요소들에 비해 많은 관심을 받지 않았다. 왜냐하면 대부분의 포장가속시험은 공간적인 제약과 안전상의 문제로 넓은 범위의 속도에 대해 실험을 실시하지 않는다, 물론 동적인 하중의 포장체에 대한 영향이 없는 것은 아니나 고속의 하중재하는 실내에서 불가능하기 때문에 본 연구에서는 제작하는 HES도 포장체의 길이에 따른 가감속의 안전성을 위해 최대 5km/h의 속력을 낼 수 있도록 제작하였다.

3.1.4 Wandering, Tilting에 의한 효과

White는 포장가속시험기에서 윈더링을 적용하였을 경우 아스팔트 포장의 주요 파손인 러팅이 많이 감소된다고 주장했다.(White, 1999) 실험치에 따르면 윈더링이 약 250mm의 폭으로 분포할 경우 러팅 깊이는 30~40%정도 감소된다고 한다. 포장의 파손에 주된 영향은 중차량에 의한 것이므로 모사해야 하는 차량은 대형차량(7종)으로 95%신뢰수준으로 계산을 하면 $1.96 \times 18.7 = 36.652\text{cm}$ 가 나온다. 그러므로 HES에서 모사해야 하는 wandering 간격을 한쪽으로 40cm(양쪽으로는 80cm)로 정하였다. 도로의 크라운(crown)과 곡선 주로의 편경사의 모사를 위해 공시체 지그를 최대 3.5%로 기울이는 tilting을 모사할 수 있게 하였다.

3.2 환경하중의 모사

3.2.1 온도

Lister는 포장가속시험기를 이용하여 하중과 온도를 변화시키면서 포장의 거동을 분석하였다. 그 결과는 그림 4와 같으며 온도가 10~20℃ 변화함에 따라 포장의 영구 변형에 큰 영향을 미칠을 알 수 있다.(Lister, 1972) 하지만 저온에서의 포장거동에 대한 연구는 포장가속시험에서 많이 이루어지지 않고 있다. Zhang은 저온에서의 포장체 거동에 대한 Full scale 포장가속시험을 실시하였다. 포장단면 주위의 온도챔버를 -10℃로 유지함으로써 포장체를 동결시킬 수 있었으며 동결을 멈춘 후 표면의 프로파일을 측정하였다. 동결의 영향으로 얼음이 형성되어 포장표면이 6~26mm 정도까지 융기하였음을 알 수 있었고 온도를 천천히 25℃까지 올려서 포장체에 대한 융해실험도 실시하였다.(Zhang, Macdonald, 1999)

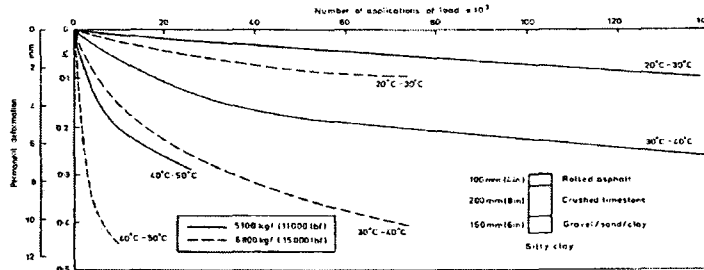


그림 4. 영구변형에 대한 온도와 하중의 영향

본 장비에서는 실제 포장이 겪을 수 있는 최악의 상황을 모사할 수 있도록 하기 위해 -20~60°C까지 온도 조절이 가능하도록 하였다.

3.2.2 강우조건

Maree는 HVS(Heavy Vehicle Simulator)를 이용하여 포장에 물이 들어갈 경우 포장의 변형에 큰 영향을 미친다는 것을 알아내었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 포장체에 비가 오거나 인공적으로 물을 뿌려주었을 경우 변형이 급격히 증가하였다.(Maree, 1982) 또한, Vuong는 함수비에 따른 노상과 기층에서의 거동 특성을 포장가속시험기를 이용하여 조사하였다. 다른 하중조건과 함수비 상태에 따른 사암(sandstone)기층의 탄성계수 변동은 그림 6과 같다. 또한 포장표면의 균열을 통과한 물은 기층재료의 팽팽이나 약화를 야기하여 포장 구조를 더 취약하게 한다. 하지만 일본 국토교통성 중부지방정비국과 아이찌현에서는 '빗물침투형 도로구조의 개발' 연구를 위해 투수포장 시험시공을 실시하였다. 이 연구에서 노상 및 보조기층의 시공단계와 주행시험 후 동적평판시험기로 지지력을 측정된 결과 살수주행 후에도 지지력의 변화가 없었다고 보고되었다.(Nemeto Nobuyuki, 2001)

이러한 관점에서 본 연구가 시작되었으며 본 장비를 이용하여 좀 더 체계적인 연구를 진행하고자 한다. 강우조건을 모사하는 것은 본 장비의 개발 의의와도 관련 있는 것으로 스프링클러를 이용해 전면적에 대해 강수조건을 모사하고 포장체 내부에 포화파이프를 넣음으로써 노상의 포화를 촉진시킬 수 있는 방법을 적용하였다.

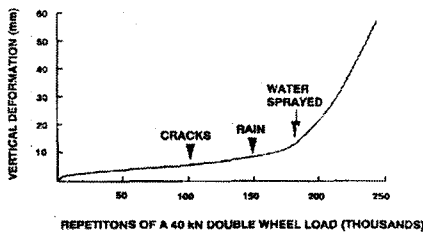


그림 5. 물에 의한 포장체의 변형 특성

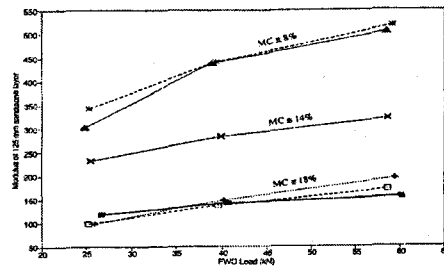


그림 6. 함수비와 하중조건에 따른 사암 기층의 탄성계수 변화

3.2.3 습도

Jon Tarleton는 포장표면의 온도변화는 대기중의 습도에 영향을 받는다고 하였다. 습도에 의해 이슬점의 온도가 변화하는 것이 그 이유인데 습도가 높으면 이슬점은 상대적으로 높아지고 습도가 낮으면 이슬점은 상대적으로 낮아진다고 한다.(Jon Tarleton, 2006) 향은 챔버를 영하로 내리기 전에 습도를 일정하게 유지 시켜주는 것이 정확한 실험결과를 이끌 수 있다고 판단하여 향은 챔버에 향습 기능을 추가적으로 설치하였다.



4. HEART Environmental Simulator 개발 및 단면 제작과정

본 장비의 건설 기간은 기초토목 공사가 2006년 2월에 시작되어 2006년 7월에 장비제작이 완료되었다. HES완성 후 장비 검증을 위해 투수성 포장 시험단면을 8월에 제작하였으며 현재 장비검증을 위한 실험을 진행중에 있다.

4.1 제작 부지 및 장비 크기

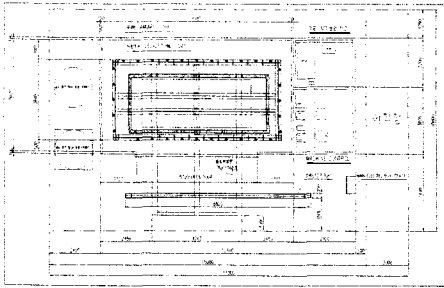


그림 7. HES 평면도

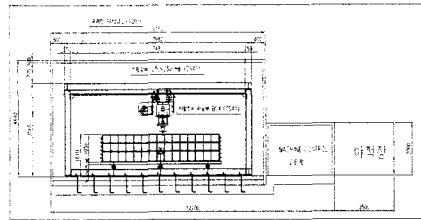


그림 8. HES 정면도

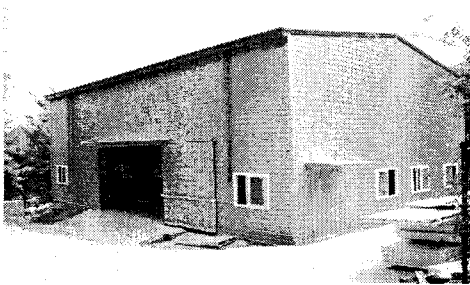


그림 9. 실험실 전경

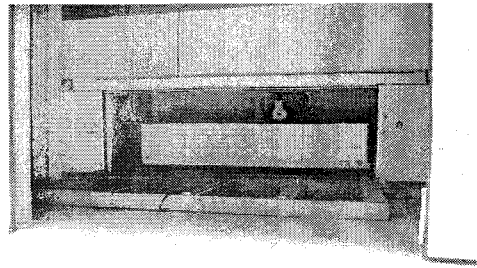


그림 10. HES 항온항습 챔버

그림 7과 그림 8은 HES 설계 단면도로 HES 전체 부지 면적은 골재야적장을 포함하여 가로 약 17m, 세로 약 10m이며, 실험을 위한 온도 챔버의 설치 면적은 가로 약 9m, 세로 약 5m, 높이 약 4.5m이다. 챔버안에 공시체 제작을 위한 토조의 크기는 가로 5m, 세로 2m, 높이 1m로 제작 되었으며 내구성을 위해 스틸로 제작되었다. 그림 9와 그림 10은 실제 제작된 HES의 전경과 항온항습 챔버 사진이다.

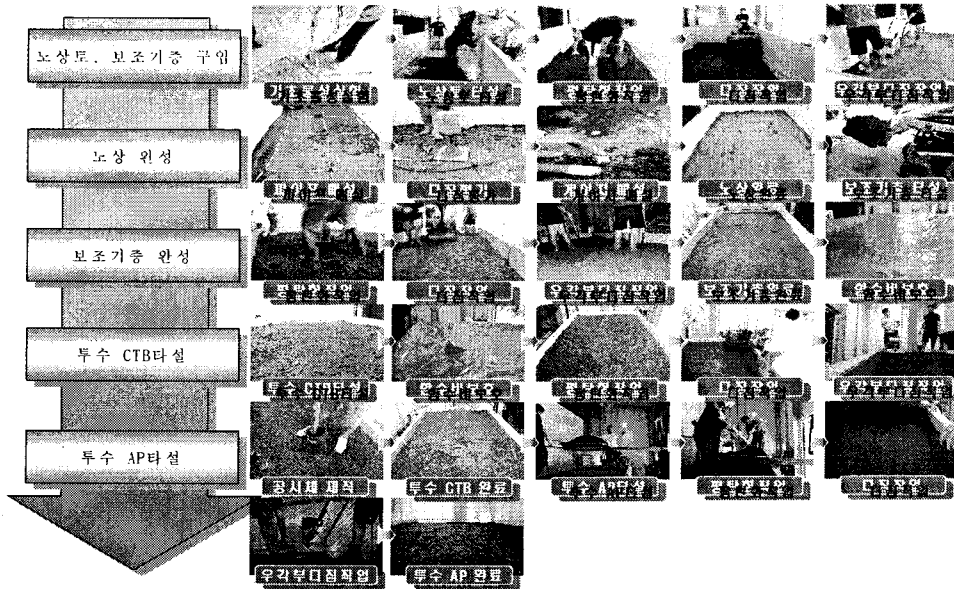


그림 11. HES 단면설치 과정

4.2 노상, 보조기층의 타설

각 층에 타설될 재료를 수급하고 기초물성 실험을 실시하였다. 각 층은 15cm씩 설치되었는데 노상은 3회, 보조기층은 2회로 나누어 재료를 타설하였고 최적함수비 상태에서 진동롤러를 이용하여 다짐을 하였다. 현장에서 들밀도 실험과 함수비 측정을 하여 다짐을 정량화하였고 노상토에는 포화률 위한 파이프와 함수비의 변화를 측정하기 위한 TDR을 매설하였다.

4.3 기층, 표층의 타설

기층은 투수 CTB를 11cm 높이로 설치하였고, 표층은 투수 AP를 5cm 높이로 설치하였다. 추후 장비의 강우모사를 평가하고자 투수층을 설치하였고, 각층의 공극률은 검증실험 이후에 코어를 채취하여 평가할 예정이다. 그림 11은 각 층의 설치과정을 요약해 놓은 것이다.

5. 결론

포장의 공용성과 거동특성을 평가하고 새로운 공법이나 신재료를 검증할 수 있는 신개념 포장가속시험기의 필요성이 대두됨에 따라 새로운 장비에 대한 연구가 시작되었다. 본 연구를 통해 개발된 환경모사포장가속시험기는 도로의 환경 및 차량 하중을 가장 유사하게 모사하여 도로 포장의 상태에 따른 거동과 공용성을 분석하고 평가할 수 있다는 것에 그 의의가 있다 하겠다. HES 제작에 있어 고려해야할 사항으로는 강우 및 온도조건 모사, wandering 및 tilting, 습도 등이 있으며, 이에 대해 살펴봄으로써 장비제작시 이를 바탕으로 최대한 반영하였다.



참고문헌

1. 배성호, 포장의 장기 공용성 평가를 위한 포장가속시험기 도입 연구, 한양대학교 석사학위논문, 2003
2. 백우현, HWLS 및 관련 실험법 개발에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위논문, 2001
3. Nemoto Nobuyuki, 수지 코트형 투수성 아스팔트포장의 차도형 적용, 2001
4. Khaled A. Galal, Thomas D. White, **INDOT-APT Test Facility Experience**, Intenational Conference on Accelerated Pavement Testing, CS8-4, 1999
5. Hugo F., **Texas Mobile Load Simulator Test Plan**, Center for Transportation Research and University of Texas at Austin, Texas, Research Report 1978-1, 1996
6. White, T. D., J. Hua, K. Galal, **Analysis of Accelerated Pavement Tests**, Proceeding of the First International Conference on Accelerated Pavement Testing
7. Lister, N. W. **The Assessment of the Long-Term Performance of Pavements in Relation to Temperature** Proceeding of the Thired International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, 1972
8. Zhang, W. and R. Macdonald **Modeling Pavement Response and Estimating Pavement Performance : Pavement Subgrade Performance Study in the Danish Road Testing**, Proceeding of the First International Conference on Accelerated Pavement Testing
9. Maree, J. H., C.R. Freeme, and E. G. Kleyn **Heavy Vehicle Simulator Testing in South Africa**, International Colloquium Full-Scale Pavement, 1982
10. Jon Tarleton, **Road Weather: Pavement Forecasting**, APWA North American Snow Conference, 2006