



시험도로 토압계 계측결과 분석

An Analysis of Soil Pressure Gauge Result from KHC Test Road

인 병 역* 김 지 원** 이 경 하*** 이 광 호****
 In, Byeong Eock Kim, Ji Won Lee, Kyong Ha Lee, Kwang Ho

Abstract

The vertical soil pressure developed in the granular layer of asphalt pavement system is influenced by various factors, including the wheel load magnitude, the loading speed, and asphalt pavement temperature. This research observed the distribution of vertical soil pressure in pavement supporting layer by investigating measured data from soil pressure gage in the KHC Test Road. The existing specification of subbase and subgrade compaction was also evaluated with measured vertical pressure. The finite element analysis was conducted to verify the accuracy of results with measured data because it can maximize research capacity without significant field test. The test data was collected from A5, A7, A14, and A15 test sections at August, September, and November 2004 and August 2005. Those test sections and test data were selected because they had best quality. The size of influence area was evaluated and the vertical pressure variation was investigated with respect to load level, load speed, and pavement temperature. The lower speed, higher load level, and higher pavement temperature increased the vertical pressure and reduced the area of influence. The finite element result showed the similar trend of vertical pressure variation in comparison with measured data. The specification of compaction quality for subbase and subgrade is higher than the level of vertical pressure measured with truck load so that it should be further investigated.

Keywords : test road, asphalt pavement, soil pressure gage, load influence, pavement temperature, finite element analysis

요 지

아스팔트 포장층은 점탄성재료로서 포장체에 발생하는 토압은 차량하중의 크기와 재하속도, 아스팔트 포장층의 온도와 하부층의 재료구성에 따라 크기와 분포 양상이 다르게 발생된다. 본 연구는 이러한 다양한 조건에 따른 포장체 하부의 토압분포를 분석하고, 기층과 보조기층의 지지력을 평가하는 평판재하시험 기준과 실제 계측된 토압과의 비교를 통해 현재 적용되고 있는 지지력기준에 대한 타당성을 검토하고자 한다. 또한 실제 포장단면을 모사한 유한요소해석을 통해 포장체 하부에 발생하는 토압을 예측하고 계측결과와 비교함으로써 포장체의 거동을 예측할 수 있는 모델을 제안 하고자 한다. 이를 위해서 시험도로의 2004년 8, 9, 11월과 2005년 8월에 계측이 수행된 아스팔트 포장 동적재하시험 결과 중 계측기 상태가 양호한 A5, A7, A14, A15 단면에 대해 계측결과의 분석을 수행하였다. 토압계의 분석은 차량하중의 크기와 속도, 아스팔트 포장의 온도, 포장하부의 재료구성에 따른 토압의 크기 변화와 차량하중으로 인한 포장체 내부의 횡방향과 깊이방향 하중의 영향 범위를 분석하였다. 포장체의 유한요소해석은 ABAQUS 프로그램을 활용하였으며, 실제 포장체의 거동을 모사하기 위해 시험도로 포장단면을 그대로 반영하고 계측이 이루어진 당시의 온도계측 자료를 활용해 아스팔트 포장의 물성을 적용하였다. 토압계의 분석결과 차량의 하중이 크고 저속으로 주행 할 때 토압의 크기는 증가하고 아스팔트층의 온도가 높을수록 하중의 영향반경이 작아지고 최대 토압크기는 증가하였다. 또한 실제 포장단면과 물성을 적용한 해석결과 계측결과와 매우 유사한 형태의 토압분포와 크기를 보였다. 그리고 기존 보조기층 및 동상방지층의 다짐관리 기준은 실측된 토압과 비교해 볼때 상당히 높은 수준으로 나타났다.

핵심용어 : 시험도로, 아스팔트포장, 토압계, 하중의 영향, 온도의 영향, 유한요소해석

* 정회원 · 토털페이브시스템 대리
 ** 정회원 · 토털페이브시스템 대표이사
 *** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 시험도로운영센터장
 **** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 연구개발실장



1. 서론

포장체의 구조적 거동은 일반적으로 교통하중의 크기 및 환경조건의 변화 그리고 포장층의 재료 구성에 따라 큰 영향을 받게 된다. 2002년 이전까지 국내에서 수행된 포장체의 구조적 거동 관련 연구성과는 대부분 수치해석 위주로 이루어진 이론적 연구와 제한적인 시험시공과 계측을 통한 실증적 연구로 구분할 수 있다. 그러나, 이론적 연구의 상당 부분은 광범위한 계측결과를 통한 검증이 미진한 경우가 많았다. 실증적 연구의 경우에도 연구비의 제약과 시험시공 여건상 상호 비교가 제한적일 수밖에 없는 연구가 대부분이었다. 이는 포장과 관련된 분야에서 국내의 연구환경이 충분히 확충되지 않았기 때문이다. 그러나 2003년 이후에는 한국도로공사의 시험도로와 포장가속시험기, 한양대학교의 포장가속시험기 등이 건설되고 한국건설기술연구원에서 포장장기공용성 관측구간 등을 확충하면서 포장체의 구조적 거동을 이론적 실증적으로 연구할 수 있는 기반이 구축되었다. 본 논문은 최근에 구축된 다수의 연구시설 중에서 한국도로공사 시험도로에서 얻어진 토압계 계측결과를 기초로 교통하중 및 환경하중과 토압계의 상호작용에 의하여 변화하는 포장체의 구조적 거동을 살펴보고자 한다.

한국도로공사의 시험도로는 이미 다수의 보고서에서 인용된 바와 같이 실제 공용중인 포장을 대상으로 차량의 하중과 속도 그리고 환경적 변화에 따른 포장체의 거동을 파악할 수 있는 시설이다. 또한 포장의 단면 구성 역시 다양하게 분포함으로써 포장체의 거동을 분석할 수 있는 최적의 조건을 갖추고 있다. 본 논문에서는 시험도로에서 수행한 재하시험 결과를 분석하여 차량하중의 크기와 속도, 아스팔트포장의 온도, 포장단면의 재료구성과 같은 다양한 조건이 변화하며 발생하는 포장체 하부의 토압분포 변화와 토압의 영향반경 변화를 분석하였다. 그리고 실제 포장단면의 두께, 크기, 및 물성 조건을 고려한 유한요소해석을 통해 해석결과와 실측된 교통하중에 의한 토압

분포를 비교함으로써 유한요소모델을 검증하였다. 이와 같은 검증 과정을 통하여 유한요소해석을 확대 적용하여 차량하중의 크기 변화에 따라서 발생할 수 있는 토압의 변화 비율을 추정하였다. 이와 같은 연구성과를 토대로 현재 고속도로 아스팔트포장의 보조기층과 동상방지층의 지지력을 평가하는 평판재하시험의 지지력 기준에 대한 타당성을 검토하였다.

2. 아스팔트포장 토압계 계측 결과의 분석 범위

본 논문에서는 시험도로에서 2003년부터 2005년까지 수행한 계측결과 중에서 2004년 8월과 11월, 2005년 9월에 수행한 계측결과를 분석하였다. 토압계에 대한 계측은 아스팔트포장 동적재하시험의 일부로 수행되는데, 본 논문에서는 변형률 등 타 계측 결과는 배제하고 순수한 토압계 계측결과만을 분석하였다. 포장체의 온도조건 등 분석에 영향을 미치는 환경적 요소는 하중 재하시험과 별도로 이루어지는 자동계측 결과에서 확보하였다. 이와 같은 계측결과를 토대로 교통하중과 환경조건의 변화에 따른 포장체 하부의 토압분포를 분석한다.

2.1 분석 단면의 재료 구성과 토압계 매설 위치

시험도로 아스팔트포장은 총 33개의 포장단면으로 이루어져 있으며, 이들 중 13개 단면에 토압계가 매설되어 있다. 토압계 계측결과 분석은 2개층 이상에 복수로 토압계가 매설되어있고 양호한 계측 결과를 보인 A5, A7, A14, A15 단면을 대상으로 수행하였다. 4개 대상 단면의 계측기 매설위치와 단면의 층 구성을 살펴보면 표 1 및 그림 1과 같다. 각 단면에 매설된 토압계는 중간층, 기층, 보조기층 하부에 위치하며, 4개 단면의 표층과 중간층은 동일한 재료로 사용되었다. 기층의 경우 A5와 A7 단면은 기층용 아스팔트 혼합물(이하 BB3), A14와 A15 단면은 쇄석골재(이하 AGG)로 사용되었다. 기층용 아스



팔트 혼합물의 경우에는 현재 고속도로 전문시방서에 기재된 BB3 입도를 사용하였고 쇄석기층의 경우에는 고속도로에 별도의 입도규정이 없어 보조기층에 일반적으로 적용하는 SB1 입도를 적용하였다. 상세한 입도 규정 및 배합 설계 결과는 2002년 시험도로 보고서에 나타나 있다.

표 1. 토압계 매설 위치

깊이 \ 단면	A5	A7	A14	A15
-12cm			●	●
-20cm				
-30cm	●		●	
-40cm		●		●
-50cm				
-60cm	●		●	
-70cm		●		

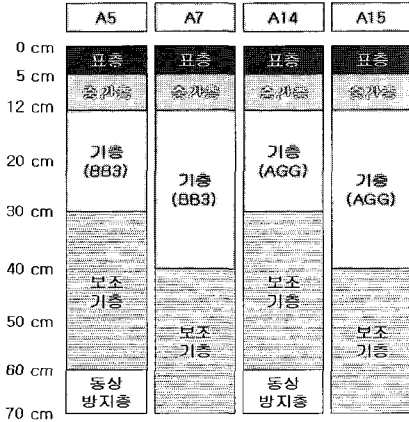


그림 1. 포장층 재료 구성

다. 시험에 사용된 차량의 제원과 하중이 재하되는 위치는 표 2 및 그림 2와 같다. 여기서 공차의 경우는 트럭의 자중에 의한 하중만이 포장체에 재하되는 경우이다. 만차의 경우는 공차상태인 시험용 트럭에 7.72톤의 철제 하중 재하판을 적재하여 얻어진다. 공차와 만차시에 차량의 하중은 시험도로팀에서 연구용으로 보유하고 있는 CAS사의 운하중측중계를 활용하여 측정하였다. 이 장비는 정지상태에서 차량의 하중을 정확하게 측정할 수 있는 장비이다.

표 2. 차량하중의 크기

구 분	하 중 (kg)	
	공 차	만 차
전륜(운전석)	2,644	3,040
전륜(보조석)	2,464	3,176
중륜(운전석)	2,104	3,680
중륜(보조석)	2,336	3,896
후륜(운전석)	2,260	3,768
후륜(보조석)	2,264	3,420

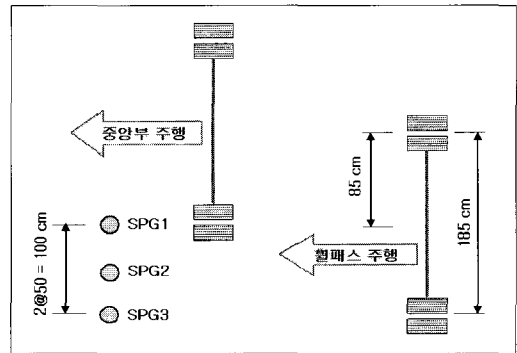


그림 2. 하중 재하 위치

2.2 시험조건

동적재하시험은 동일한 차량(15톤 덤프트럭)으로 하중크기에 따라 공차와 만차, 속도에 따라 30km/h, 80km/h 하중이 재하되는 위치에 따라 휠패스부와 중앙부로 구분하여 수행되었다. 또한, 각각의 시험조건에 대하여 계측 과정에서 발생하는 오차를 줄일 수 있도록 5회에 걸친 반복 시험을 수행하였

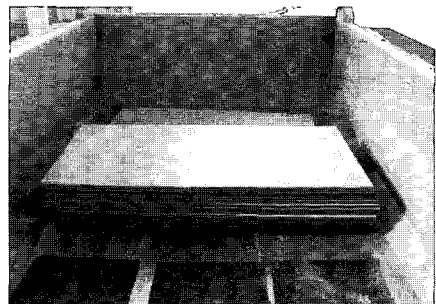


그림 3. 하중 재하판 적재

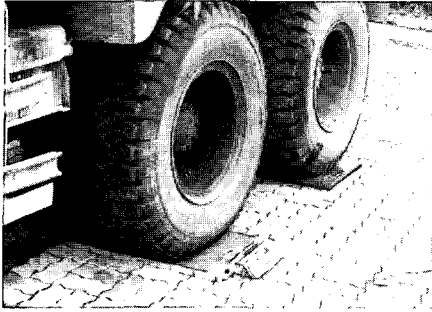


그림 4. 차량 하중의 측정

3. 토압계 계측결과 분석

본 절에서는 시험도로 아스팔트포장 단면에서 실시된 동적재하시험에서 얻어진 토압계 계측결과를 분석한 내용을 수록했다. 먼저 토압계 계측결과로 얻어진 동적 파형의 형태를 규정하고 파형에서 얻어지는 토압계 계측결과를 획득하는 과정을 결정한다. 그리고 이에 따라서 차량의 하중과 속도, 포장체의 온도, 포장체의 층 구성, 계측기의 상대적 위치 등에 따라 변화를 보이는 포장 하부층의 토압 분포를 분석하고자 한다.

3.1 토압계 파형 분포

그림 5~그림 7은 A14 단면의 휠패스부에 공차량 저속주행시 발생하는 파형분포, 그림 8은 동일 조건에서 고속주행시 발생된 파형분포를 보이고 있다. 각각의 그림은 깊이방향으로 동일선상에 위치한 토압계의 층별 파형을 중첩시켜 나타낸 그림이다. SPG1~SPG3의 파형을 살펴보면 SPG3에서 파형이 최대로 발생하는 것으로부터 차량하중이 SPG3상부를 통과함을 확인 할 수 있다. SPG103과 SPG303에서 얻어지는 깊이방향으로의 파형 크기와 SPG 103과 SPG301의 수평방향 파형 크기는 현저한 차이를 보이는 것으로부터 하중의 분산효과를 확인 할 수 있다. SPG 101을 살펴보면 타 계측결과와 반대로 포

층에 위치한 토압계임에도 불구하고 파형이 매우 불규칙하고 크기 또한 가장 작게 발생되었다. 이러한 결과는 차량하중의 영향범위에서 벗어난 것으로 판단할 수 있다.

파형 분포를 개별적으로 검토하면, 하중이 재하되기 전의 영점을 시작으로 하중이 재하 되는 순간에(즉 전륜, 중륜, 후륜이 각각 계측기 상부 또는 최근접 위치를 지나가는 순간에) 파형이 급격히 증가됨을 확인할 수 있다. 파형의 분포는 하중이 재하 되는 지점과 토압계 위치가 근접할수록, 즉 SPG3에서 뚜렷한 3개의 최대값을 보이고 최대값 사이에서는 영점으로 회귀한 반면 가장 멀리 위치한 SPG1에서

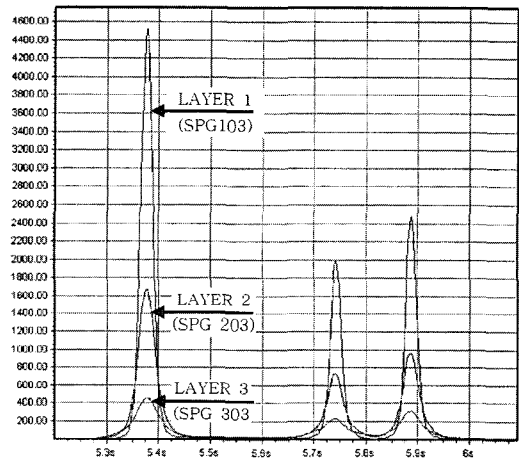


그림 5. A14단면 SPG3 파형분포(휠패스 저속 공차)

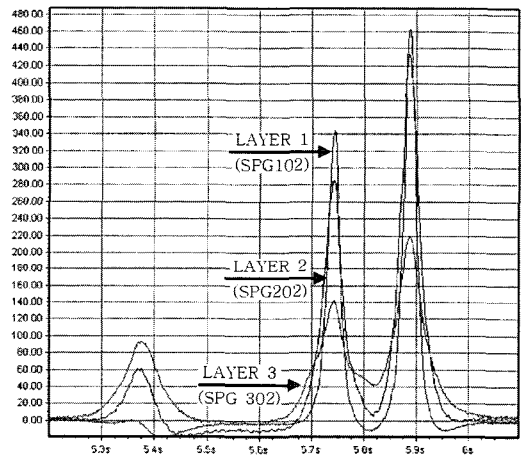


그림 6. A14단면 SPG2 파형분포(휠패스 저속 공차)

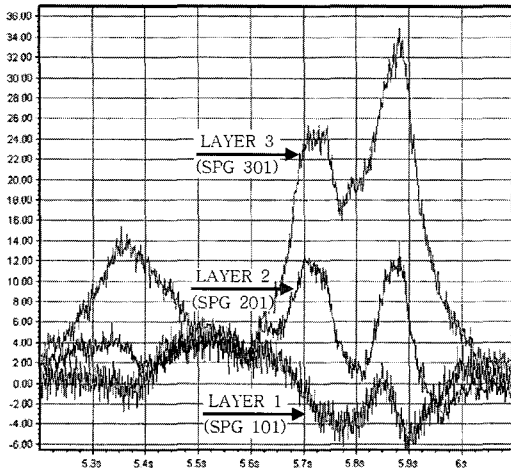


그림 7. A14단면 SPG1 파형분포(휠패스 저속 공차)

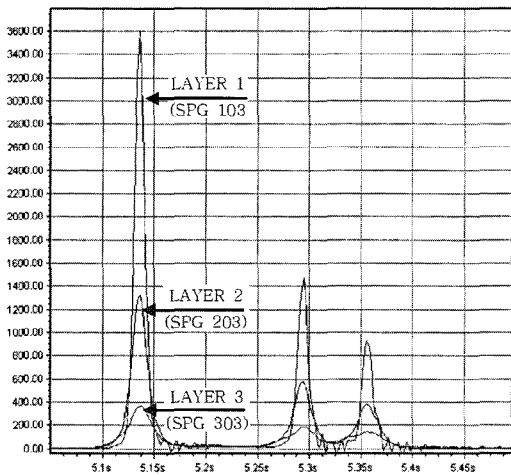


그림 8. A14단면 SPG3 파형분포(휠패스 고속 공차)

는 다소 불규칙한 파형 분포를 보이고 있다. 그림 8은 동일한 차량의 고속주행시 발생된 파형분포이며, 저속주행시 발생하는 파형과 동일한 형태의 곡선을 보이고 있으나 최대 크기는 저속주행보다 작게 발생됨을 확인 할 수 있다. 이와 같이 포장체에 발생하는 토압은 차량하중의 위치와 차량의 속도 등에 따라서 큰 차이가 발생함을 확인 할 수 있으며, 이러한 상관관계에 대한 내용을 다음 절에서 세부적으로 다루고자 한다.

3.2 차축별 토압분포

그림 9와 그림 10, 그림 11과 그림 12는 각각 A5 단면의 기층 하부(-30cm)와 보조기층 하부(-60cm)에 위치한 토압계, A14 단면의 중간층하부(-12cm), 보조기층 하부(-60cm)에 위치한 토압계 중 차량이 휠패스부 주행 시 타이어하중 바로 밑에 위치한 SPG3 계측기의 차축별 토압을 나타낸 그림이다. 차축별 토압의 차이는 포장층의 상부에 위치한 토압계(그림 9) 일수록 차축별 토압의 차이가 크게 발생되고 3개의 축 중 전륜에 의한 토압이 상대적으로 크게 발생됨을 확인할 수 있다. 차축별 토압의 차이는 3개 차륜의 하중이 유사한 반면 전륜의 접지면적이 중륜과 후륜의 1/2 수준으로 좁은 면적에 하중이 집중되기 때문이다. 중륜과 후륜에 의한 토압분포는 하중의 크기가 동일한 반면 다소 불규칙한 결과를 보였는데 이러한 원인은 전륜이 지나가며 유발시킨 아스팔트

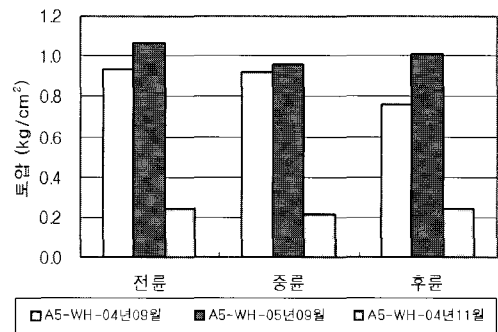


그림 9. A5단면 기층하부 차축별 토압분포

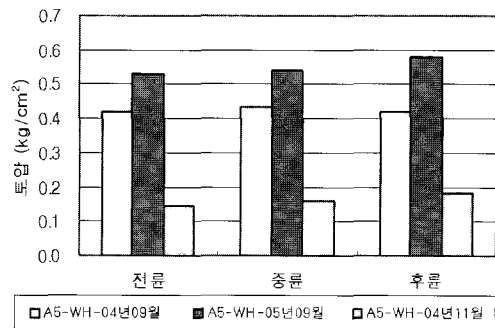


그림 10. A5단면 보조기층하부 차축별 토압분포

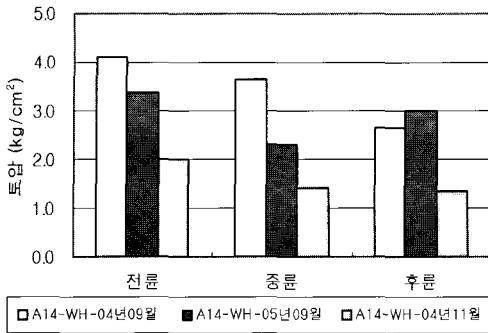


그림 11. A14단면 중간하부 차축별 토압분포

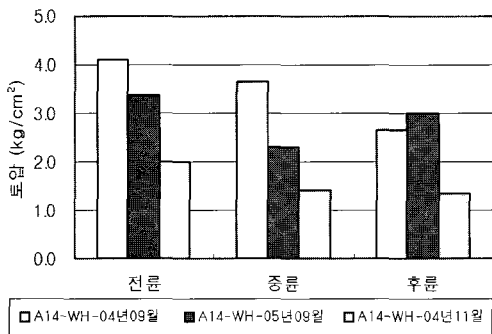


그림 12. A14단면 보조기층하부 차축별 토압분포

포장의 크리프(creep) 때문이라 판단된다. 또한 보조기층 하부의 경우에는 계측된 토압에서 차축간 편차가 적어지는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 포장층 하부로 갈수록 깊이에 따른 하중의 분산효과로 편차가 적어지는 것으로 판단된다. 이 같은 결과로부터 본 연구에서는 토압계 계측결과를 분석함에 있어 포장체의 토압에 가장 큰 영향을 미치고 아스팔트포장의 크리프 영향을 받지 않는 전륜에 의한 토압을 기준으로 분석을 수행하고자 한다.

2004년 11월에 계측한 결과는 기층 하부 및 보조기층 하부에서 모두 토압이 작게 관찰되고 있는데, 이는 겨울철에 가까워져 아스팔트 포장층의 강성이 커져서 하중 분산효과가 증대되었기 때문에 발생한 현상으로 판단된다. 이와 같은 현상은 3.7절에서 다른 사례와 함께 다시 한번 언급한다.

3.3 계측기 위치별 토압분포

그림 13과 그림 14는 A14 단면의 전륜하중에 의한 토압의 크기를 계측기 위치별로 나타낸 그림이다. 토압계는 중간층 하부, 기층 하부, 보조기층 하부의 3개 층에 걸쳐 위치하며, 각각의 층에는 횡방향 50cm간격으로 3개의 계측기가 매설되어있다. 하중은 차량의 전륜 좌측 타이어가 SPG3 상부에 위치한 상태이며, 전륜 우측의 타이어와 2m, 중륜과 3.3m 이격되어 있는 상태이다. 포장 층별 횡방향 토압분포를 살펴보면 하중이 재하 되는 지점과 계측기간의 이격거리가 증가할수록 토압의 크기는 급격히 감소됨을 확인할 수 있고, 토압계 위치별 크기의 차이는 포장체의 상부 층일수록 크게 발생됨을 확인할 수 있다. 또한 9월에 비해 11월이 토압계 위치별 토압의 차이가 다소 발생함을 확인할 수 있는데, 이러한 원인은 계측당시 9월과 11월의 포장체 온도가 각각 45

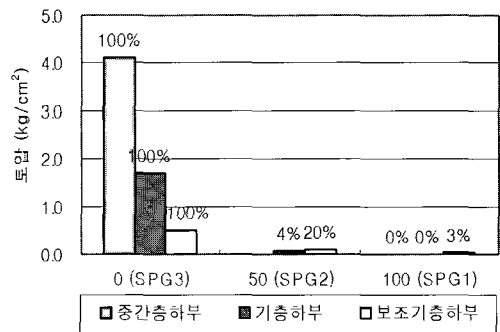


그림 13. A14단면 계측기 위치별 토압분포(9월)

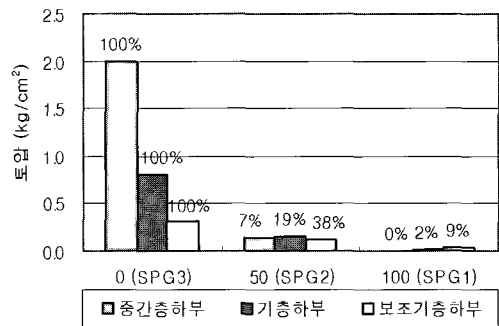


그림 14. A14단면 계측기 위치별 토압분포(11월)



℃, 18℃로 아스팔트 혼합물의 강성차이로 인한 하중의 분산효과라 판단할 수 있다. 즉 고온에서는 포장체에 전달되는 하중이 좁은 면적에 집중되고 저온에서는 넓은 범위에 걸쳐 분산되기 때문이다.

3.4 하중의 영향반경

그림 15와 그림 16은 A5, A7, A14, A15 단면에서 만차 상태의 차량이 휠패스부를 통과할 때 토압이 가장 크게 발생하는 SPG3의 층별 토압을 하중의 영향반경으로 환산한 결과이다. 토압의 영향반경은 차량의 하중은 동일하고 포장 표면에 발생된 접지압과 타이어 접지면적의 관계는 각층에 발생된 토압과 영향반경의 관계와 동일하다는 가정하에서 역산한 결과이다. 하중의 영향반경을 살펴보면 11월이 8, 9월보다 하부층으로의 하중분포가 더욱 넓게 분포됨을

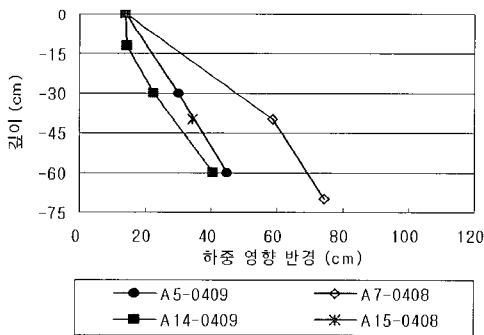


그림 15. 8, 9월 하중의 영향반경 (휠패스주행 저속 만차)

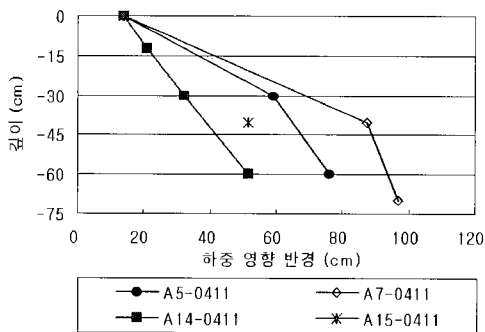


그림 16. 11월 하중의 영향반경 (휠패스주행 저속 만차)

확인 할 수 있다. 이 같은 결과는 앞서 언급한 바와 같이 온도 변화에 따른 아스팔트 포장층의 강성 차이 때문이라 판단할 수 있다. 각 포장 단면별로 하중의 영향반경이 다른 것은 포장층의 구성이 다르기 때문이다. 단면별로는 A7 단면이 가지는 아스팔트 포장층 두께가 40cm로 그림에서 비교된 단면들 중 강성이 가장 크고, A14 단면은 12cm로 강성이 가장 약하다. 그 결과 강성이 취약하여 분산효과가 작은 A14 단면이 항상 가장 작은 영향반경을 보여주고 있으며, 강성이 높아 하중 분산효과가 큰 A7 단면은 가장 큰 영향반경을 보여준다.

3.5 포장층 재료의 성질에 따른 토압분포

분석단면 중 A5와 A7 단면의 기층재료는 아스팔트 혼합물(BB3), A14와 A15 단면은 쇠석(AGG)으로 구성되어있다. 그림 17과 그림 18은 이들 4가지 단면에 대해 만차 상태의 차량이 휠패스부를 통과할

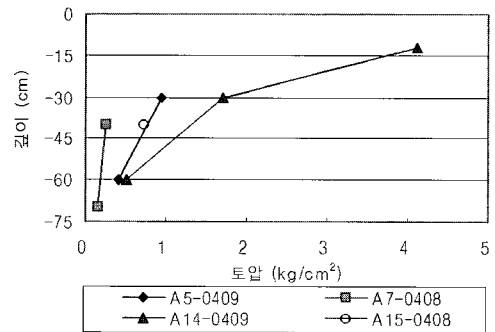


그림 17. 8, 9월 토압분포 (휠패스주행 저속 만차)

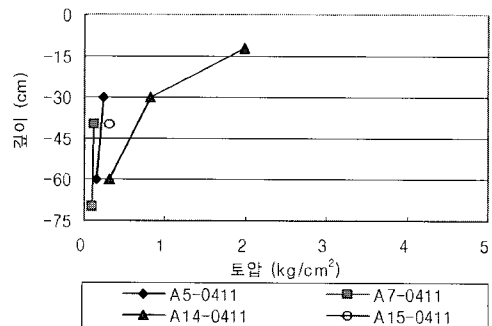


그림 18. 11월 토압분포 (휠패스주행 저속 만차)



때 토압이 가장 크게 발생하는 SPG3의 층별 토압을 나타낸 그림이다. 기층에 사용된 재료만 다르고 층별 두께가 동일한 A5와 A14 단면, A7과 A15 단면의 기층하부에 발생된 토압을 서로 비교하면 기층 재료가 아스팔트 혼합물로 구성된 A5, A7 단면에서 토압이 작게 발생함을 확인할 수 있다. 이 같은 결과는 기층에 강성이 강한 재료를 사용할수록 하중의 분산 효과가 증가하고 기층하부에 발생되는 토압이 감소됨을 의미한다. 이러한 결과는 포장체의 강성이 증가할수록 내구성이 증가된다는 의미로 받아들일 수 있는 결과이다.

3.6 하중크기와 속도에 따른 영향

그림 19와 그림 20은 차량의 하중과 속도에 따른 토압의 영향을 나타낸 그림이다. 이 결과는 A5, A7, A14, A15 단면을 대상으로 계측기가 매설된 층에서 최상부에 위치한 토압계만을 대상으로 차

량이 휠패스부(WH)와 중앙부(SC)를 통과 할 때 발생하는 최대크기를 나타낸 것이다. 이 결과에서 차량의 하중이 클수록 토압이 증가하고 차량의 주행속도가 빠를수록 토압이 감소함을 확인할 수 있다. 차량의 속도에 따라서 토압이 변하는 현상은 아스팔트 포장층의 점탄성 거동특성 때문일 것으로 사료된다 즉, 고속주행 상태에서는 아스팔트 포장층에 하중이 머무는 시간이 짧고, 점탄성 이론에 따라서 강성이 상대적으로 증가하기 때문이다. 그러나 온도가 낮아져 아스팔트 포장의 점탄성 특성이 상대적으로 감소하는 11월에는 저속과 고속에 따른 토압의 편차가 상대적으로 작아지는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과로부터 포장체에 가해지는 하중의 크기와 재하속도는 아스팔트 포장체의 점탄성 거동과 매우 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있다.

3.7 포장체 온도변화에 따른 토압분포

그림 21부터 그림 24까지는 A7 단면과 A14 단면의 8, 9월과 11월의 토압계 계측결과를 아스팔트 포장층의 평균 온도에 따라 나타낸 그림이다. 이 그림들에 나타난 토압은 트럭하중이 공차(E: Empty를 의미)와 만차(H: Heavy를 의미) 일때, 그리고 저속과 고속으로 휠패스부를 통과할 경우에 SPG3에서 계측된 결과들이다. 이 결과에서 아스팔트 포장체 내부의 온도가 증가할수록 토압의 크기는 증가

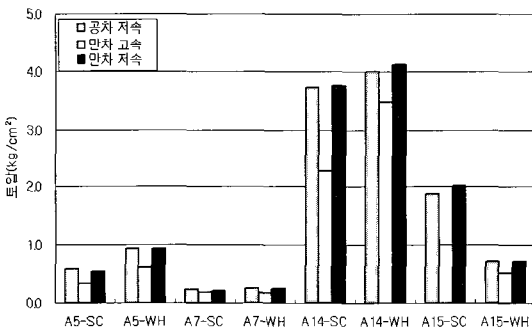


그림 19. 하중크기와 속도에 따른 토압(8, 9월)

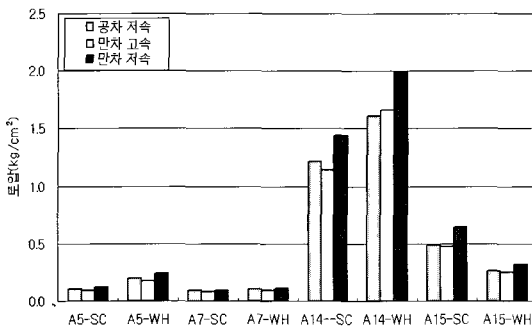


그림 20. 하중크기와 속도에 따른 토압(11월)

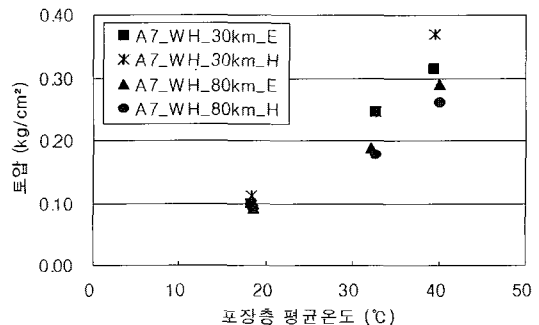


그림 21. A7 온도대역별 토압분포(기층하부)

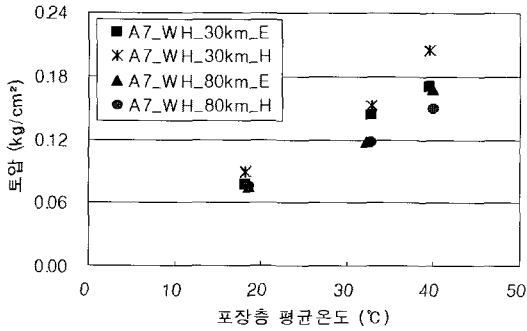
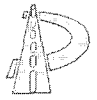


그림 22. A7 온도대역별 토압분포(보조기층하부)

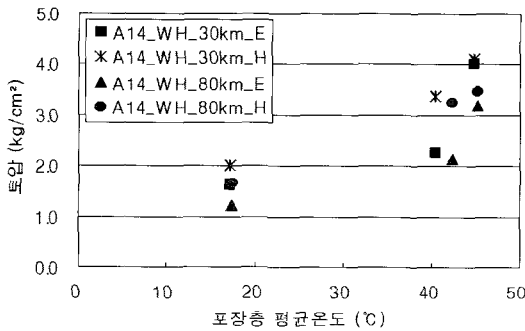


그림 23. A14 온도대역별 토압분포(중간층하부)

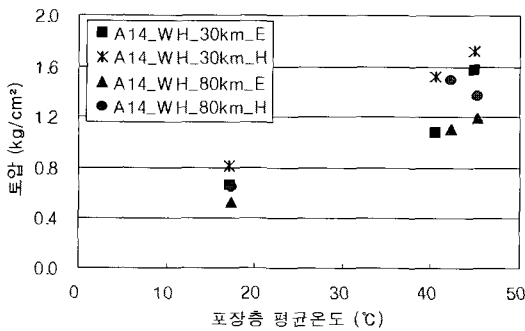


그림 24. A14 온도대역별 토압분포(기층하부)

함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 아스팔트포장 재료의 점탄성 거동으로 인한 강성의 차이에 기인한 것이다.

4. 유한요소해석

본 연구에서의 유한요소해석은 계측이 실시된 실

제 포장단면의 하중 및 물성조건을 반영해 포장체에 발생하는 수직방향 응력을 예측하여 계측결과와 비교하려는 목적에서 수행하였다. 예측된 해석결과는 실제의 포장체에서 발생된 토압과 비교를 통해 유한요소해석의 정확도가 검증된다면, 향후에는 토압의 실제 계측 없이 유한요소해석을 통하여 포장 하부층의 거동을 해석할 수 있는 기반이 만들어질 것으로 판단된다. 유한요소해석의 경우에는 실제 포장에서 발생할 수 있는 다양한 상황을 모사함으로써 현재 추진되고 있는 포장 설계법 개발 및 포장체의 거동 분석에 다양한 응용이 가능할 것으로 판단된다. 유한요소해석에는 ABAQUS 프로그램을 사용하였다.

4.1 유한요소 모델 개발

아스팔트포장 해석을 위한 유한요소 모델은 3차원 연속체요소(continuum solid element)를 사용하였으며, 본선을 포함한 실제 시험도로의 전체단면을 모사하였다. 하중은 차량의 전륜에 의한 타이어 접지압(3.2kg/cm²)을 적용하였고, 하중의 위치는 휠패스부와 중앙부 두 가지를 고려하여 모델을 개발하였다. 포장 단면의 모델 개발은 표층 5cm, 중간층 7cm, 기층 18cm, 보조기층 30cm로 구성된 A14 단면을 반영하였으며, 해석을 위한 포장체의 개념도는 그림 25와 같다. 그림 26은 만들어진 유한요소 모델을 보여주고 있다. 본 해석을 위하여 만들어진 유한요소망은 아직 적용성 검토의 수준이므로 단순한 직사각형 격자 형태로 구성하였다. 본선 구간은 연속성을 위하

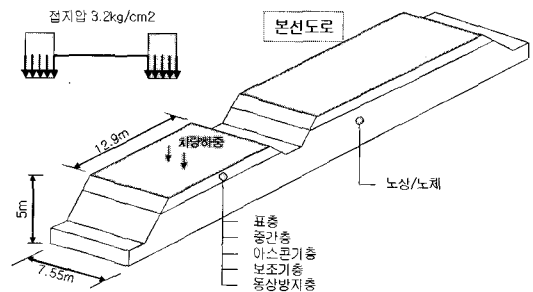


그림 25. 아스팔트포장 유한요소 모델 개념도

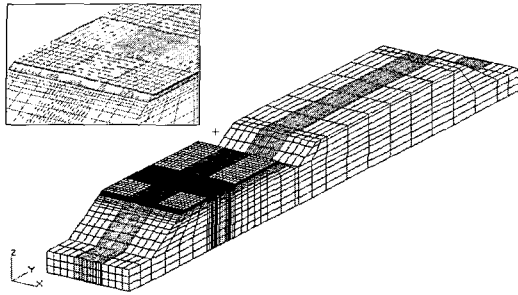


그림 26. 아스팔트포장 유한요소 모델

여 모사하였고 실제 해석의 정확도에 기여하는 부분은 미미하기 때문에 유한요소망의 밀도는 낮게 조절하였다. 시험도로의 계측기가 매설된 부분은 예측의 정확도를 높이고자 표층~보조기층까지 유한요소망의 밀도를 높게 하여 모델을 개발하였다.

구조해석은 아스팔트포장의 주요 단면 중 토압계의 계측값이 가장 크게 나타나는 A14 단면에 대해 해석을 수행 하였다. 해석단면의 아스팔트 혼합물층과 입상재료로 구성된 하부층 사이에 존재하는 경계면은 접촉면 해석 기법을 적용하였으며, 마찰계수를 Coulomb의 마찰공식에서 사용된 바와 같이 입상재료의 내부마찰각으로부터 추정하여 0.7을 적용하였다 ($\mu = \tan 35^\circ$). 아스팔트 혼합물의 점탄성 거동은 유사점탄성 해석을 통하여 고려하고자 하며, 물성치는 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안

표 3. 포장체 물성 정의 (A14 단면)

구분 (kg/cm ²)	표층 (ASTM 19mm)	중간층 (BB5)	기층 (쇄석 기층)	보조 기층	동상 방지층	
A14 단면	04년9월	온도 (°C)	48.2	41.6	3515	3515
		탄성 계수	11,217	18,880		
	04년11월	온도 (°C)	17.8	16.4		
		탄성 계수	134,127	150,636		
	05년8월	온도 (°C)	42.7	38.1		
		탄성 계수	17,004	26,290		
포아송 비	0.35	0.35	0.4	0.4	0.4	

연구”에서 수행된 온도대역별 물성치를 회귀 분석을 통해 적용하였다. 실제 점탄성을 고려한 해석은 해석 시간이 너무 길어져 다양한 포장체의 거동 확인이 불가능하기 때문에 현장시험 당시의 온도를 고려하여 그에 상응하는 아스팔트 혼합물의 동탄성계수를 유한요소해석에 적용하였다. 포장단면의 온도분포는 시험도로로 포장 단면에 매설된 온도계의 계측결과를 활용하였다. 표 3은 유한요소해석에 적용된 아스팔트 혼합물과 하부층의 물성이다.

4.2 아스팔트포장 구조해석 결과

그림 27은 A14 단면의 2005년 8월 온도 계측결과와 그에 따른 물성치를 적용해 전륜하중 만차시 발생하는 깊이방향 응력분포를 나타낸 그림이다. 그림 28~그림 30은 A14 단면의 2004년 9, 11월과 2005년 8월에 계측한 만차, 30km/h의 차량속도에 해당하는 실측결과와 유한요소해석을 통한 예측결과를 비교한 그림이다. 해석을 통한 예측결과와 깊이방향 토압분포를 살펴보면 SPG1과 SPG2는 실측결과에 비해 다소 크게 예측되었고 SPG3는 작게 예측되었다.

이 해석결과는 실내시험을 통한 아스팔트 혼합물의 온도대역별 물성치와 현장에서 토압의 계측이 이루어진 당시의 아스팔트층 온도를 바탕으로 표층과 중간층의 물성을 적용한 결과이다. 앞서 분석한 차량의 속도와 토압의 관계에서 차량의 속도가 감소할 수

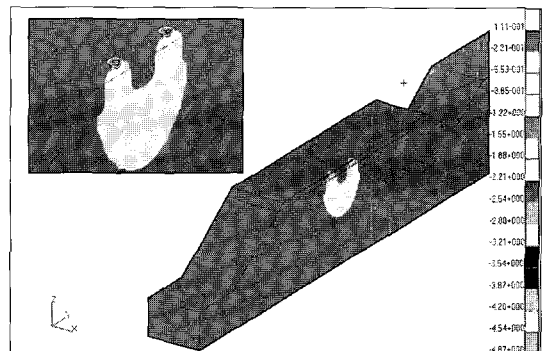


그림 27. 깊이방향 응력분포도

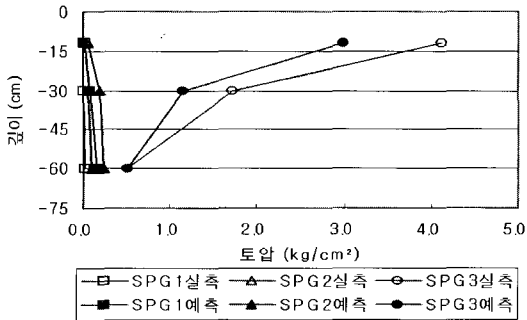


그림 28. 해석결과 비교(2004년 9월)

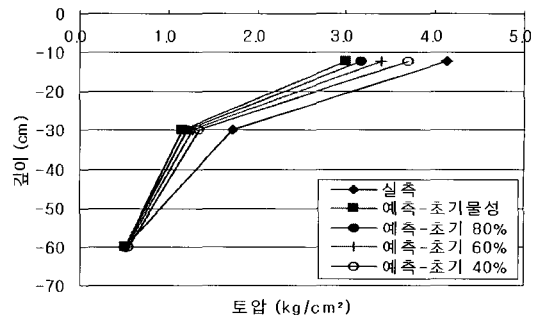


그림 31. 해석결과 비교(SP3, 2004년 9월)

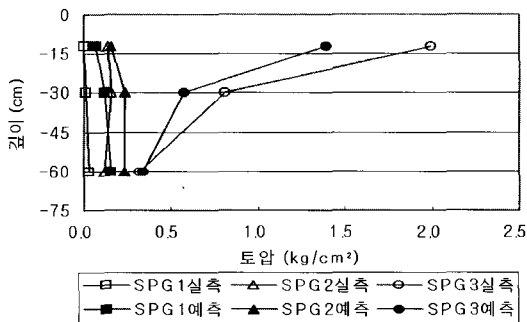


그림 29. 해석결과 비교(2004년 11월)

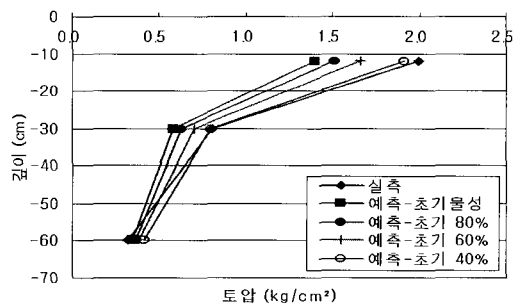


그림 32. 해석결과 비교(SP3, 2004년 11월)

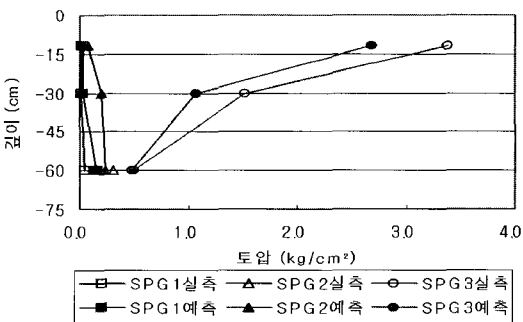


그림 30. 해석결과 비교(2005년 8월)

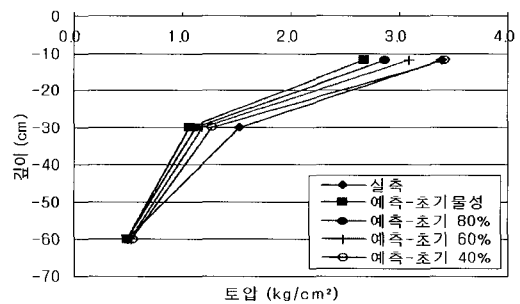


그림 33. 해석결과 비교(SP3, 2005년 8월)

록 토압이 증가함을 확인하였다. 그러나 정적하중을 적용한 유한요소 해석결과는 실측값에 비해 작은 값으로 나타났다. 이러한 결과는 아스팔트 포장층의 물성 차이라 볼 수 있다. 아스팔트층의 물성을 초기에 적용한 값에서 20%씩 감소시켜 해석을 수행한 결과 초기 물성의 40% 수준에서 실측값과 동일한 수준의 토압이 발생함을 확인하였다(그림 31~그림 33). 이때의 물성은 초기의 온도대역에서 12°C가량 높은 온도에서의 물성에 해당된다.

이같은 해석결과로부터 실측결과와의 차이는 포장체의 물성이 실제의 물성과 다소 차이가 있다는 점과, 유사점탄성 유한요소해석 방법을 적용하였기 때문으로 판단된다. 그러나 토압의 분포가 실제의 계측결과와 유사한 추세를 보이므로 좀 더 진보한 유한요소해석 기법을 도입할 경우 포장체 하부의 토압분포 예측이 충분히 가능하리라 판단된다. 장기적으로 깊이 있는 연구가 필요하다.



5. 보조기층 지지력 평가

본 장에서는 시험도로의 A5, A14 단면의 보조기층과 동상방지층에 발생한 토압크기와 평판재하시험(plate bearing test)의 지지력 기준에 의한 지반반력으로부터 현재 적용되고 있는 입상재료층의 지지력계수에 대한 타당성을 판단하고자 한다. 평판재하시험의 지지력 기준은 표 4와 같고, 여기서 지지력계수 산정식을 통해 역산한 각 층의 지반반력은 보조기층과 동상방지층에서 7.5kg/cm^2 이다. 시험도로에 적용된 시험용 차량의 만차시 아스팔트포장에 가해지는 전륜 최대 접지압이 4.0kg/cm^2 라는 점을 고려할 때 보조기층과 동상방지층에 발생하는 지지력은 허용기준에 비해 매우 작은 값이며, 표 5과 같이 실

표 4. 평판재하시험 지지력 기준

구분(k ₉₀)	보조기층	동상방지층
침하량 (cm)	0.25	0.25
지지력계수 (kg/cm ³)	30	30
지반반력 (kg/cm ²)	7.5	7.5

표 5. 보조기층과 동상방지층 상부의 토압 계측결과

구분(kg/cm ²)		보조기층 상부		동상방지층 상부	
		A5단면	A14단면	A5단면	A14단면
토압 계측결과 (전륜의 축하중 6,200kg)	04년 09월	0.94	1.72	0.42	0.51
	04년 11월	0.24	0.81	0.15	0.32
	05년 08월	1.07	1.52	0.53	0.49

표 6. 과적하중에 의한 보조기층과 동상방지층의 토압 예측결과

구분	보조기층 상부		동상방지층 상부	
	응력 (kg/cm ²)	침하량 (cm)	응력 (kg/cm ²)	침하량 (cm)
전륜의 축하중	6,200kg	1.16 (실측:1.72)	0.18	0.51 (실측:0.51)
	10,000kg	1.84	0.21	0.74
	20,000kg	3.56	0.28	1.31
	30,000kg	5.24	0.35	1.85
	40,000kg	6.90	0.41	2.36

제 보조기층과 동상방지층에서 발생한 토압과 비교할 때 더욱 큰 차이를 보이게 된다.

시험에 적용된 차량하중 외에 과적하중에 의한 토압을 비교하고자 A14 단면의 2004년 9월에 해당되는 물성을 적용해 하중의 크기를 증가시켜 유한요소 해석을 수행하였다(표 6). 해석을 통한 결과는 실제 값과 차이가 있으나 개략적인 비교를 통해 기존의 평판재하시험기준에 대한 평가를 수행하고자 한다. 현재 우리나라에서 시행되고 있는 과적차량의 축하중 기준은 $10,000\text{kg}$ 으로 규정하고 있다. 이 과적하중을 적용한 유한요소 해석결과는 보조기층과 동상방지층 모두에서 평판재하시험의 지반반력 기준인 7.5kg/cm^2 비해 매우 작은 수치이며, 축하중이 $40,000\text{kg}$ 일 때 기준 값에 근접함을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터 현재 적용되고 있는 평판재하시험의 기준이 매우 높은 수준임을 확인 할 수 있다. 동상방지층의 경우 실측을 통한 토압이 보조기층에 비해 2배가량 차이가 난다는 점을 고려할 때 두개 층에 대한 지지력계수의 수준을 달리 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 여기서 실시된 유한요소해석은 기층이 쇄석으로 구성된 A14 단면에 대한 결과로서 일반적인 포장단면인 A5 단면일 때를 고려한다면 지지력계수의 기준은 더욱 낮은 수치를 반영하는 것이 바람직하다는 결론을 내릴 수 있다. 향후에 추가적인 연구를 통하여 적절한 지지력 관리 수준을 검토할 필요가 있다.

6. 결론

한국도로공사 시험도로의 아스팔트포장 동적 계측 결과를 이용해 하중 및 환경적 조건에 따른 포장체 하부의 토압분포를 살펴보았다. 포장층의 온도, 차량의 하중, 주행속도, 토압 측정 깊이 등 다양한 변수에 의하여 토압의 분포가 어떤 변화를 보이는지 확인하였다. 또한 실제 포장단면과 하중조건을 동일하게 적용한 유한요소해석을 통해 포장체에 발생하는 응력



을 예측하고 실측결과와 비교를 실시하였다. 이러한 과정을 통해 차량하중으로 인한 포장체의 토압분포를 확인할 수 있었으며, 유한요소해석결과와 비교를 통해 실제 포장체에 대한 예측의 타당성을 판단해 보았다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 포장체에 발생하는 토압은 차량의 하중이 크고 차량의 주행속도가 느릴수록 증가한다.
2. 11월과 8, 9월의 아스팔트층 하부에 발생하는 토압의 크기를 비교한 결과 아스팔트층의 강성이 큰 11월이 강성이 낮은 8, 9월보다 토압이 작게 나타났다.
3. 11월의 최대토압은 8월보다 작게 발생되나 수평방향으로의 하중분산은 8월보다 넓은 범위에 걸쳐 분산된다. 이 같은 결과는 아스팔트 혼합물의 온도 차이로 인한 강성의 변화 때문이다.
4. 기층재료가 아스팔트 혼합물과 같이 강성이 강한 재료를 사용할수록 기층하부에 발생하는 토압은 감소한다.
5. 유한요소해석을 통한 결과와 실측결과를 비교한 결과 해석을 통한 예측결과가 실측결과보다 다소 큰 값을 보였으며, 이같은 원인은 물성의 차이와 차량의 속도를 고려하지 않았기 때문이라 판단된다. 그러나 깊이방향 토압분포는 매우 유사한 형태의 분포를 보였기 때문에 추후 물성과 차량의 속도에 따른 고려가 이루어진다면, 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.
6. 실측된 토압의 크기로 판단할 때 현재 보조기층 및 동상방지층의 지지력 기준은 필요 수준보다 높은 것으로 나타났으며, 동상방지층이 보조기층에 비해 토압이 절반가량 작게 발생된다는 점을 고려하면 두 개 층에 대한 기준을 별도로 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통기술원 시험도로운영센터의 연구비 지원으로 이루어졌습니다. 본 논문의 지면을 통하여 감사의 말씀을 전달합니다. 또한 본 논문에 저자로 이름이 등재되지는 않았지만, 시험도로 현장에서 실질적인 계측과업을 수행하고 계측결과를 제공해 준 TM E&C의 임직원 여러분께도 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. 김지원 외, 2002, 시험도로의 건설과 운영에 관한 연구, 연구보고서, 한국도로공사, 도로교통기술원
2. Kim, Jiwon, 2000, "Three-dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Multi-layered System," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
3. 최준성, 서주원, 김수일, 2004, 온도 및 응력 비선형을 고려한 아스팔트포장 구조해석 모형 개발, 한국도로학회 학술발표회, pp75-82.
4. 최준성, 김수일, 유지형, 2000, 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 내부처짐에 의한 물성추정과 주행속도에 따른 거동분석, 한국도로포장공학회지, pp135~145
5. 건설교통부, 2004, 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구
6. 한국도로공사 도로교통기술원, 2002, 시험도로의 건설과 운영에 관한 연구
7. 한국도로공사, 2004, 고속도로공사 전문시방서

접 수 일: 2006. 6. 8
 심사 일: 2006. 7. 6
 심사완료일: 2006. 9. 6