

3축 이동하중에 의한 연성포장의 동적응답

Experimental Evaluation of the Responses of Flexible Pavement, subjected to 3-axle Truck Loads

서 영 국* 이 광 호**
Seo, Young G. Lee, Kwang Ho

1. 서 론

지난 2002년 말에 준공한 한국도로공사의 시험도로는 한국의 도로환경을 현실적으로 모사하여 포장의 장기공용수명을 예측하고 역학-경험적 한국형 포장 설계법 개발을 위한 주요 응답 자료의 생성과 현장 검증을 위한 공간으로 활용되고 있다. 영동고속도로 여주 분기점에서 종주방향으로 중부내륙고속도로와 나란하게 위치하고 있는 시험도로에는 토압계, 변형률 측정기를 포함하여 총 1900여개의 센서가 33개 단면의 아스팔트 포장과 25단면의 콘크리트 포장에 매설되어 있다. 지금까지 시험도로에서는 매년 평균 두 번씩(주로 봄과 가을) 정기계측을 실시해 오고 있다. 약 한 달 정도 소요되는 정기계측에서는 최대한 다양한 환경 및 하중변수를 고려하여 포장의 변형률, 수직변위, 수직응력, 그리고 포장온도와 같은 계측자료를 수집하여 데이터베이스 형태로 정리하고 있다.

본 연구에서는 시험도로 계측을 통해 하중속도와 차축하중이 아스팔트 포장의 변형률 및 포장하부의 수직응력의 변화에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여, 시험도로 아스팔트 포장 중에서 두 단면(A5와 A8)을 선정하여 표준 3축 덤프트럭에 의한 주행시험을 실시하였다. 위의 두 포장단면은 기층의 두께(A5-180mm와 A8-280mm)를 제외하고 모든 포장층의 재료와 두께가 동일하다. 시험 중 각 차륜의 정확한 진행위치와 주행속도를 측정하기 위하여 레이저를 이용한 윈더링 측정시스템을 적용하였다(서영국 외 2인 2006). 단, 본 연구에서는 횡방향 주행이격에 따른 영향은 검토하지 않았으며, 주행이격이 큰 결과는 분석에서 제외하였다. 타이어의 압력은 가능하면 각 차축별로 현실적인 공기압을 반영하여 1축 단륜의 타이어 압력과 텐덤축의 2축과 3축 복륜 타이어의 압력은 각각 150psi(1,035kPa), 120psi(828kPa), 그리고 150psi로 설정하여 시험을 실시하였다.

2. 현장계측시험

2.1 아스팔트 포장단면과 계측기 매설

A5단면은 표층 5cm, 중간층 7cm, 그리고 아스팔트 기층 18cm로 총 30cm 두께이고 A8단면은 표층 5cm, 중간층 7cm, 그리고 아스팔트 기층 28cm로 총 40cm 두께의 아스팔트 층으로 구성되어 있다. 각 단면의 포장하부에는 보조기층, 동상방지층, 그리고 노상을 설치하였다. 두 단면 모두 아스팔트 표층은 일반 19mm 밀입도 혼합물을 사용하였으며 초기 공극률과 최적 아스팔트 함량은 각각, 4.2%와 4.9%로 설계되었다. 시험도로 건설과 동시에 매설된 주요 계측기로는 A5단면의 경우 표층과 중간층, 그리고 기층 상, 하부에 각각 6개의 중, 횡방향 아스팔트 변형률 계측기와 보조기층상부와 노상상부에 각각 3개씩 토압계가 설치되어 있으며, 포장시공 후 10cm 직경의 코어를 채취하여 포장내부의 표층에서 기층하부까지 깊이별로 온도센서를 매립하였다. A8단면에는 중간층 하부, 기층상부와 기층하부에 각각 5개의 중, 횡방향 아스팔트 변형률 계측기와 보조기층 상부에 3개의 토압계를 설치하였다. 주행차로의 차륜부를 따라 동일한 간격으로 설치된 아스팔트 변형률 계측기는 시험차량의 진입

* 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원, 공학박사, seoyg89@freeway.co.kr
** 정회원, 한국도로공사, 공학박사

과 진출에 따른 포장층의 변형률을 관찰하고자 하였다. 계측기 매설당시 토압계는 포장하부의 굽은 골재에 의한 비정상적인 신호 및 계측기 손상을 예방하기 위하여 표준모래를 이용하여 센서부를 보호하였다. 그림 1은 A5단면의 계측기 매설위치를 보여주고 있다. 각 센서의 매립과정 및 시공 후 초기응답에 관한 세부내용은 한국도로공사 연구보고서에 자세하게 기술되어 있다(한국도로공사, 2002).

2.2 이동하중재하시험

재하시험에 사용한 차량은 3축 14.5톤 덤프트럭으로 1축은 단륜이고 2축과 3축은 탠덤으로 구성된 복륜이다. 모든 타이어는 12R22.5형식으로 단륜과 복륜으로 사용될 경우 최대 권장 타이어 압은 각각 120psi(830kPa)와 110psi(759kPa)이다. 시험차량의 각 축간 거리와 차폭은 그림 1에 도식하였다. 차축하중에 의한 포장의 응답영향을 검토하기 위하여 적재함에 추가하중을 전혀 실지 않은 “공차”와 일정한 두께와 무게를 갖는 철판을 재하하여 최대 적재상태를 근사하게 모사한 “만차”의 두 가지 하중변수를

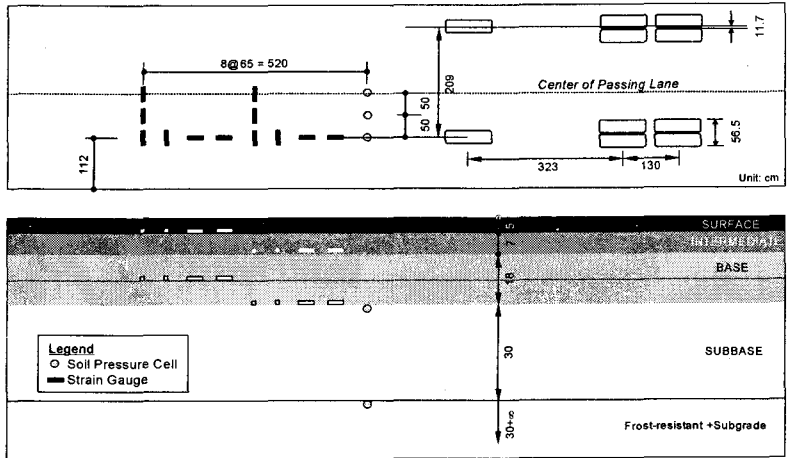


그림 1. 계측기 매설현황과 3축 이동하중의 재원 및 재하 위치

적용하였다. 만차를 모사하기 위한 재하철판의 총 무게는 약 6.6톤이고 최대한 하중의 편심이 발생하지 않도록 적재하였다. 각 차륜의 연직하중은 이동식 전자저울과 고무판으로 차량이 정지한 상태에서 측정하였다. 각 차륜의 최대하중은 공차의 경우 27.2-22.9-21.9kN 이고 만차의 경우 31.5-36.0-36.6kN이다. 공차의 경우 1축에서 가장 큰 하중이 계측되었으며 만차의 경우 탠덤축에서 최대 축하중이 재하되고 있음을 확인할 수 있다. 주행속도에 따른 아스팔트 포장의 변형률과 수직응력의 변화를 관찰하기 위하여 3단계의 주행속도(10, 50, 그리고 80km/h)로 시험을 실시하였다.

모든 주행시험은 운전자측 전륜의 중심이 종방향 아스팔트 변형률계의 중심을 지나도록 유도하였으며, 각 시험 변수별로 최소 3차례 반복시험을 실시하였다. 각 주행시험의 시간 간격은 최소 10분으로 설정하여 특히 저속주행에 의한 아스팔트 포장의 변형이 충분히 회복하도록 하였다. 실제 주행경로와 지정된 경로 사이의 차이는 레이저 워더링 측정 시스템을 이용하여 매 주행시험마다 관찰하였다. 본 시험에 적용된 워더링 시스템은 두 개의 거리측정용 레이저 센서를 아스팔트 변형률계의 시점과 종점에 설치하여 차량이 실제 주행한 경로를 측정하고 이로부터 타이어의 중심이 각 센서의 중심으로부터의 벗어난 이격거리를 계산하도록 하였다.

3. 결과분석

3.1 아스팔트의 변형률 및 연직하중의 변화

그림 2는 A5단면에서 동적하중 재하시험 후 측정된 결과로 전형적인 인장 변형률과 연직응력의 변화를 보여준다. 이 결과는 공차상태에서 80km/h 정속으로 주행하는 덤프트럭에 의해서 기층 하부에 발생하는 인장변형률과 보조기층 상부와 노상 상부에 발생한 수직응력의 변화를 보여주고 있다. 여기서 종방향 변형률(Long.)은 그림 1의 오른쪽 끝단의 아스팔트 변형률 계측기에서 측정된 값이고 횡방향 변형률(Lat.)은 위 종방향 변형률로부터 차량 진행 방향으로 약 2미터 떨어진 횡방향 변형률 계측기에서 측정된 값이다.

최대 종방향 변형률은 공차의 경우 하중이 상대적으로 큰 전륜(1축)에서 주로 발생하며 시험 조건에 따라 그

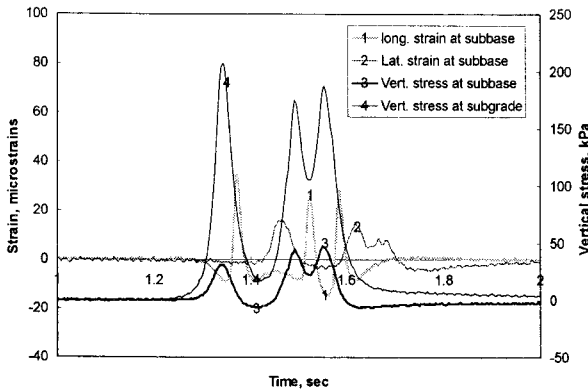


그림 2. 공차에 의한 A5 단면 보조기층 하부의 인장 변형률, 보조기층 하부와 노상상부의 연직 하중의 시간이력

축간의 길이에 비하여 짧기 때문에(약 1.3 미터) 종방향 변형의 경우 2층과 3층사이의 압축변형이 서로 중첩되어서 1층에서 발생하는 압축변형보다 크게 발생하였다. 이러한 아스팔트 포장 거동의 이방성과 중첩의 영향은 앞선 연구의 결과(Owende *et al.*, 2001; Huhtata *et al.*, 1990; Siddharthan *et al.*, 1998; Al-Qadi *et al.*, 2004)에서도 잘 보고되고 있다. 하중재하상태(공차와 만차)에 따른 축하중의 분포를 통해서도 알 수 있듯이 동일한 공기압력을 적용하여도 차량 고유의 기계적 특성(현가장치 탄성계수 및 점성계수, 차량 프레임의 구조 및 강성, 등)에 따라 매우 다름을 알 수 있다. 더군다나 이동 중에는 노면조도와 주행속도 변화에 따른 차량의 3차원 운동의 영향으로 각 차륜에서 작용하는 연직하중은 매 순간 변하므로(서영국, 1996) 특히 고속에서의 아스팔트 포장의 응답은 이러한 차량운동에 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다.

3.3 하중속도에 의한 아스팔트 하부의 변형률 변화

그림 3과 6는 차량의 속도 변화에 따른 아스팔트 포장하부에 발생하는 중, 횡방향 변형률의 최대값을 분석한 결과로 일반적으로 차속이 증가할수록 변형률이 작게 발생하여 아스팔트 혼합물의 전형적인 점탄성 거동이 포장의 구조적 응답에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 아스팔트 층의 두께가 상대적으로 얇은 A5단면의 경우 공차와 만차에 의한 시험결과를 비교하여 보면, 공차의 경우 1층 단륜 타이어에 의한 종방향 변형률이 축정속도 범위 내에서 가장 크고, 만차의 경우 텐덤축에서 종방향 변형이 약간 크게 발생하였다. 따라서 축하중의 크기가 어느 정도는 각 차축에서 발생하는 변형률의 절대/상대적 크기에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 공차 상태에서 발생한 최대 인장변형률은 만차에 비하여 그 크기가 약 89% 수준이었고, 만차상태에서 저속으로 주행한 경우 아스팔트 기층 하부에 횡방향으로 압축변형이 발생하였다(서영국 외, 2006). A5단면에서는 재하상태와 무관하게 대부분 횡방향 변형률이 종방향 변형률보다 그 크기가 작았다. A8단면과 같이 포장의 두께가 증가하면 아스팔트 층 하부의 최대 인장변형률은 상대적으로 작아지기 때문에 일반적으로 포장하부에서 시작되는 균열을 억제하는 효과가 있음을 알 수 있다. 하지만 공차의 경우 축하중이 가장 큰 1층에 의한 변형이 가장 크고 만차의 경우 텐덤축에서 변형이 크게 발생하여 포장두께와 함께 축하중의 크기가 여전히 포장내부의 최대 변형률의 발생위치와 크기에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. A5단면과 달리, A8단면에서는 기층하부에서의 압축 변형은 발생하지 않았다. 그러나 만차에 의한 최대 인장변형률은 공차에 오히려 20%작게 발생하였다. 이와 같이 제한된 시험결과를 바탕으로 공차의 경우가 만차에 비하여 더 쉽게 포장하부에서 균열에 의한 손상이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 아울러 일부 조건을 제외하고 공차의 경우가 만차의 경우에 비하여 하중속도 증가에 따른 변형률 감소효과가 컸다.

크기가 횡방향 변형률의 약 두 배 이상 크게 발생하는 경우도 있었다. 제하차량의 각 차축이 계측기위를 통과하면서 종방향 변형은 압축, 인장 그리고 다시 압축으로 변하는 응답을 보이는 반면, 횡방향 변형은 각 차륜이 통과하는 위치에서 최대인장이 발생한 직후 점차 0으로 회복되고 있음을 관찰할 수 있었다. 이러한 아스팔트 포장의 횡방향 변형은 재하조건과 포장온도에 따라 그 회복 특성이 다르고 일반적으로 선행차륜의 하중이 후륜에 의한 포장변형에 미치는 영향이 있음을 알 수 있다. 종방향 변형은 차량의 진행방향으로 인접한 차축의 영향이 상대적으로 작아 각 차축이 독립적으로 이동, 제하된 경우와 유사한 응답을 보이고 있으며 실제로 차량이 통과하고 난 후 종방향으로는 잔류변형이 거의 발생하지 않았다. 본 시험에 사용된 덤프 트럭의 2축과 3축 사이의 종방향 간격이 1층과 2

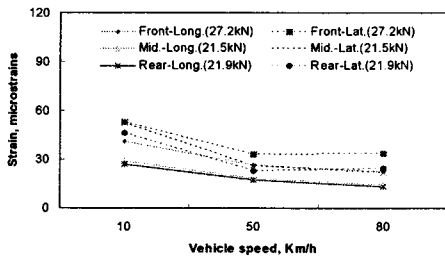


그림 3. 차량속도에 따른 중, 횡방향 변형률의 변화, A5, 공차

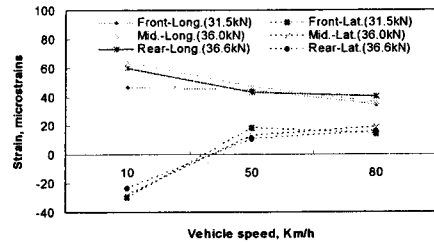


그림 4. 차량속도에 따른 중, 횡방향 변형률의 변화, A5, 만차

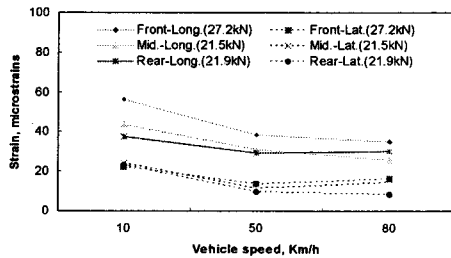


그림 5. 차량속도에 따른 중, 횡방향 변형률의 변화, A8, 공차

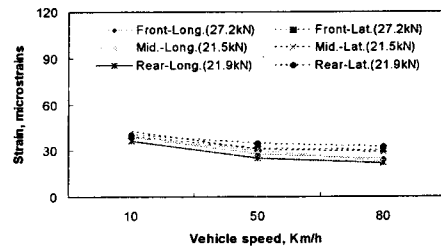


그림 6. 차량속도에 따른 중, 횡방향 변형률의 변화, A8, 만차

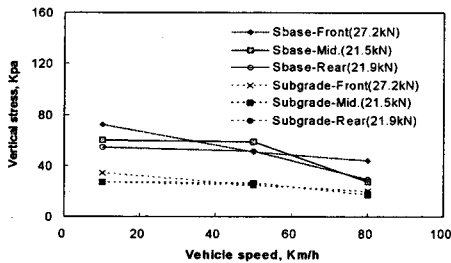


그림 7. A5단면의 수직응력의 변화, 공차

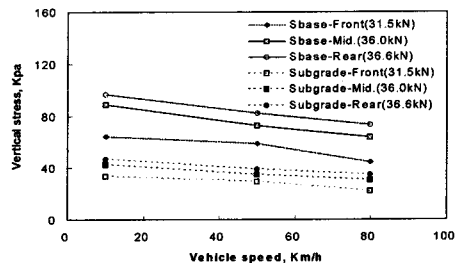


그림 8. A5단면의 수직응력의 변화, 만차

3.4 하중속도에 따른 수직응력 변화

사실 지금까지 포장하부의 수직응력은 대부분 정지 시 계속한 차축하중의 크기에 주로 지배를 받고, 주행속도에 의한 영향은 거의 없는 것으로 알려져 왔다. 하지만 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 속도의 변화와 노면조도에 의한 차량의 3차원 운동으로 주행 중 각 차축으로 분산되는 연직하중의 크기가 달라지고 이런 현상이 포장응답에도 영향을 주고 있음을 밝히고자 한다. 그림 7과 8은 A5단면의 보조기층 상부와 노상 상부의 최대 수직응력을 보여준다. 전반적으로 하중속도가 증가할수록 수직응력이 작아짐을 알 수 있다. 공차의 경우 저속에서는 1축에서 보조기층의 상부와 노상의 상부에 각각 72kPa과 34kPa의 최대수직응력이 발생하였으나 속도가 증가하면서 약 50km/h에서는 템덤축에서 최대 수직응력이 발생하였다. 이후 고속으로 갈수록 중륵과 후륵위치에서의 응력은 급속히 감소하는 반면 전륵위치에서의 응력은 비교적 완만한 속도로 감소하는 경향을 보였다. 만차의 경우 최대 수직응력은 템덤축의 후륵에서 보조기층과 노상에서 각각 96.6kPa과 46.5kPa이 발생하였고 공차의 경우와는 달리, 모든 주행속도에서 정지 시 차축하중이 가장 큰 후륵에서 항상 최대 수직응력이 발생하였다. 그리고 주행 속도별로 각 차축에서 발생하는 의한 수직응력의 차이도 공차에 비하여 크게 측정되었다. 이



와 같은 결과를 바탕으로 차량의 주행 중 운동으로 인한 하중 분배효과가 공차가 만차에 비하여 크고 속도별로 그 영향도 다르다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

아스팔트 층 하부의 인장 변형률은 동일한 포장온도에서 저속일수록 증가하여 차량 정체가 포장의 손상에 미치는 영향이 고속주행에 비하여 크다는 사실을 확인하였다. 또한 중방향 거동은 동일한 위치에서의 횡방향 거동과 다르고 이는 아스팔트 혼합물의 비등방성과 다양한 하중재하 특성에 의한 영향으로 보인다. 아스팔트 포장의 역학적 설계를 위한 응답 및 공용성 모형 개발에서 아스팔트 이러한 영향은 정확하게 반영되어야 할 것으로 생각한다.

차량의 각 축이 부담하는 하중의 크기와 분포가 포장하부의 수직응력의 발생 및 그 크기에 미치는 영향은 차량의 주행속도와 그에 따른 동적특성에 많은 지배를 받을 수 있음을 검토하였다. 특히 공차의 경우가 만차보다 차량의 동적특성으로 축하중 재분배효과가 크게 관찰되었다.

본 연구에서 적용한 동 재하시험은 모두 차륜부에서 진행되었다. 하지만 레이저 워더링 시스템으로 측정된 결과 실제 차량의 주행경로는 그림 1과 같은 지정된 주행경로의 중심에서 $\pm 50\text{mm}$ 내외의 주행이격이 있었으며 실제로 고속에서 $+100\text{mm}$ 이상 주행이격이 발생한 경우도 있었다. 여기서 (+) 부호는 실제 주행 경로가 1차로 방향으로 이격이 생긴 경우를 의미한다. 물론 $\pm 50\text{mm}$ 이상 주행이격 생긴 경우와 그에 따른 시험결과는 분석에서 제외하였다. 하지만 최근의 연구는 시험도로 계측을 통한 아스팔트 포장의 응답이 실제 주행경로와 계측기와의 상호 위치에 따라 매우 민감하게 변할 수 있다는 사실에 주목하고 있다(서영국 외 2006). 따라서 주행 속도 및 타이어 압력에 의한 포장응답의 영향을 주행이격에 의한 거동과 함께 이해되어야 한다고 생각하며 이를 향후 연구과제로 수행하고자 한다.

참 고 문 헌

1. Highway Research Board, "The WASHO Road Test Part 2: Test Data Analysis and Findings, Special Report, 1955.
2. Highway Research Board, "The AASHO Road Test: Summary Report, Report#7, 1962.
3. John P. Hallin, "Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures: Phase II," NCHRP1-37A, 2002.
4. 서영국, 권순민, 이재훈, "차량의 횡방향 주행이격에 의한 아스팔트 콘크리트 포장의 응답특성 분석," 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제26권 제3D호, pp. 453~459, 2006.
5. A. Loulizi, Imad L. Al-Qadi, G.W. Flintsch, and T.E. Freeman, "Using Field Measured Stresses and Strains to Quantify Flexible Pavement Responses to Loading, Ninth International Conference on Asphalt Pavements: Vol. II, 3: 4-5, 2001.
6. 한국도로공사 도로교통기술원, 시험도로 건설과 운영에 관한 연구, 중간연차보고서, 2002.
7. Owende, A.M. Hartman, S.M. Ward, M.D. Gilchrist, and M.J. O'Mahony, "Minimizing Distress on Flexible Pavements Using Variable Tire Pressure," Journal of Transportation Engineering, ASCE, pp.254-262, May 2001.
8. M., Huhtala, R. Alkio, J. Pihljamaki, M. Pienimaki, P. Halonan, "Behavior of Bituminous Materials under Moving Wheel Loads," Proc., Assn. of Asphalt Paving Technologists, 59, pp. 422-442, 1990.
9. R.J. Siddharthan, J. Yao, and P.E. Sebaaly, "Pavement Strain from Moving Dynamic 3D Load Distribution," J. Trans. Engrg., ASCE, 124(6), pp. 557-566, 1998.



10. I.L. Al-Qadi, A. Loulize, M. Elseifi, and S. Lahouar, "The Virginia Smart Road: The Impact of Pavement Instrumentation on Understanding Pavement Performance," *The Journal of AAPT*, Vol. 83. 2004, pp. 427-446, 2004.
11. 서영국. "3차원 차량 하중에 의한 곡선교의 동적응답 특성에 관한 연구" 공학석사 학위논문, 서울대학교, 1996.
12. F. Finn, C.L. Saraf, R. Kulkarni, K., Nair, W. Smith, and A. Abdullah, "Development of Pavement Structural Subsystems," NCHRP Report 291, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1986.
13. 서영국, 이광호, "이동하중에 의한 시험도로 아스팔트 포장의 거동 분석," *대한토목학회 논문집*, 대한토목학회, 제26권 제5D호, 9월호 게재예정, 2006.