

교통하중에 의한 연성포장체의 장기변형 예측을 위한 수치해석

Numerical Analysis for Predicting Traffic-Induced Long-Term Permanent Deformation in Flexible Pavements

안동석* · 박성완** · 박희문***

An, Dong Seok · Park, Seong-Wan · Park, Hee-Mun

1. 서론

최근 들어 아스팔트 포장도로에 장기변형(Long-Term Permanent Deformation)이 자주 발생함에 따라 장기변형의 방지 및 도로의 유지보수 측면에서 중요한 문제로 제기되고 있다. 장기변형은 여름철의 높은 아스팔트 온도와 과적차량 등과 같은 외부요인 뿐만 아니라 아스팔트 및 아스팔트 혼합물, 포장 하부구조의 기층이나 노상층의 변형과 관련된 여러 내부요인이 주요 발생 원인으로 알려져 있다(박희문, 2005).

또한 아스팔트 포장체의 장기변형은 장기적인 관점에서 도로의 공용성을 직접적으로 평가할 수 있는 요인으로 활용된다. 아스팔트 포장체에서 장기변형에 대한 예측은 도로의 전체적인 공용성 유지 및 보수대책 수립에 매우 중요한 역할을 하므로 포장설계시 장기변형 발생을 고려해야 하는 것은 필수적이다.

본 연구에서는 반복재하 삼축압축시험(Triaxial Compressive Repeated Loading Test)의 결과로 얻을 수 있는 영구변형 예측모델(VESYS)의 계수를 아스팔트 포장체 각 층의 입력값으로 적용하는 2차원 유한요소해석법을 활용하여 장기변형을 간접적으로 예측하였다. 장기변형에 대한 분석은 기층의 두께변화, 하부층의 함수비 변화에 따라 비교 및 분석하였으며 본 연구에서 활용된 아스팔트 포장체의 물성을 적용하여 장기변형 해석을 실시할시 장기 공용성 유지에 적합한지 평가해 보았다.

2. 장기변형 예측모델

아스팔트 포장체의 장기 공용성을 평가하기 위해서는 응력조건과 하중반복회수의 두 가지 요소에 의해 지배되는 영구변형을 정확하게 예측하기 위한 재료모델이 필요하다. 일반적으로 1차적인 변형을 잘 나타내는 모형으로 Power-law 형태를 활용한다(Zhou et al. 2004). Kenis(1978)에 의해 제시된 VESYS(Visco-Elastic system)모델이 대표적인 경우로 변형에 대한 공용성 예측모델로 널리 활용되고 있다. VESYS 모델의 α , μ 는 반복재하 삼축압축시험 결과로부터 얻어지는 영구변형상수이고 μ 값은 영구변형률과 탄성변형률 사이의 비례상수, α 값은 하중재하회수에 따른 영구변형 증가량의 감소율로써 α 값이 증가할수록 영구변형에 대한 저항성이 증가되며 α 값이 작을수록 영구변형발생량이 증가한다고 볼 수 있다. ϵ_r 은 200번째 하중재하시 회복변형률을 뜻하며 ϵ_{pm} 은 N번째 하중재하시 발생하는 영구변형률을 의미한다. VESYS 모델계수는 반복재하 삼축압축시험 결과데이터를 선형회귀분석하여 구할 수 있으며 다음 식 1과 같이 표현된다.

* 정희원 · 단국대학교 토목환경공학과 석사과정 · 공학사(E-mail : skypiki@dankook.ac.kr)

** 정희원 · 단국대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : spark@dankook.ac.kr)

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 선임연구원 · 공학박사(E-mail : hpark@kict.re.kr)

$$\epsilon_{pm} = \mu \epsilon_r N^{-\alpha} \quad (\text{식 1})$$

3. 실내시험

반복 교통하중에 의한 아스팔트 포장체의 장기변형을 예측하기 위한 변형입력변수는 각 하부재료에 대한 반복재하 삼축압축시험 결과를 활용하였다. 아스팔트재료의 경우는 기존 자료를 활용하였는데 SHRP 입도의 PG64-22(AP-5) 배합으로 공극률 4%와 온도조건 55°C에서 실시된 삼축압축 변형시험 결과이다(이현중, 2000). 하부재료의 경우는 강원도 00지역 현장에 사용된 GW계열의 기층과 SM계열의 노상토를 각각 구속응력 120kPa, 축차응력 120kPa과 구속응력 45kPa, 축차응력 45kPa조건에서 반복재하 삼축압축시험으로 시험값을 획득하였다. 반복재하 삼축압축시험에 사용된 장비는 UTM-25 시험기이며 현장전단다짐의 원리를 이용하여 실제 현장의 다짐 상태를 잘 구현하는 것으로 알려진 선회다짐기를 활용하였다(Lee et al. 2007). 해석에 사용된 각 지반재료의 기본물성은 다음 표 1과 같다.

표 1. 포장재료의 기본물성

구 분		기층	노상토
비 중		2.709	2.677
소성지수(%)		NP	NP
입도시험결과	#200 통과율(%)	4.28	18.84
	#4 통과율(%)	35.62	73.55
분류	통일분류	GW	SM
다짐시험결과	최적함수비(%)	6.20	10.10
	최대건조밀도(kN/m ³)	20.54	20.68

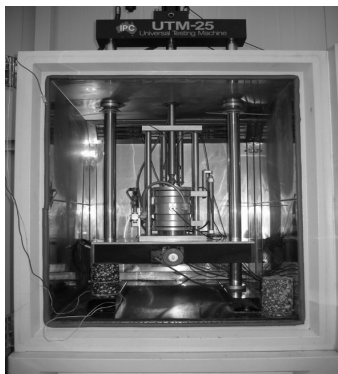


그림 1. UTM-25



그림 2. Gyrotory Compactor

4. 수치해석

해석은 2차원 축대칭으로 아스팔트 포장구조체를 모델링하였으며 체적응력과 축차응력의 영향을 동시에 고려할 수 있는 회복탄성계수 예측모델인 Universal 모델의 K_1 , K_2 , K_3 계수를 활용한 회복탄성계수와 VESYS 모델계수를 주 입력값으로 적용하여 아스팔트 포장체의 장기변형 및 현장응력상태 예측시 이미 국내외에서 검증된 유한요소해석 프로그램 FERUT을 사용하였다(Park and Lytton, 2004; 박성완 등 2009). 차

랑접지압은 827kPa로 고정하고 아스팔트의 온도가 일정할 때 기층의 두께변화 및 하부구조층의 함수비변화에 따른 아스팔트 포장체의 장기변형을 살펴보았다. 아스팔트층은 탄성체로 가정하였기 때문에 Universal 모델계수 중 K_2 , K_3 는 0으로 적용하였으며, 하부재료는 비선형 응력의존모형으로 식 2에, 그리고 세부조건은 표 2와 같다.

$$M_R = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{k_3} \quad (\text{Uzan, 1985}) \quad (\text{식 2})$$

여기서, θ = 체적응력($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa)

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (\text{kPa})$$

P_a = 대기압 (100kPa)

$k_1 \sim k_3$ = 모델계수

표 2. 유한요소해석조건

구분	층두께	온도 및 함수비조건	회복탄성계수조건			VESYS 모델계수		접지압
			K_1	K_2	K_3	α	μ	
AC	10cm	55℃	12191.6	0	0	0.745	0.961	827 kPa (120 psi)
Base	20cm 40cm	OMC-2%	889.7	0.734	-0.144	0.884	0.153	
		OMC	874.6	0.669	-0.093	0.911	0.181	
		OMC+2%	753.7	0.720	-0.121	0.873	0.261	
Subgrade	∞	OMC-2%	519.0	0.502	-0.292	0.866	0.063	
		OMC	422.6	0.436	-0.226	0.944	0.098	
		OMC+2%	414.5	0.332	-0.197	0.916	0.155	

5. 해석결과

그림 3과 4는 아스팔트 포장하부재료의 최적함수비±2% 조건에서 기층의 두께가 20cm일 때와 40cm일 때 각 층별 및 전체 장기변형을 나타내고 있다. 기층의 두께변화에 관계없이 하중회수가 증가함에 따라 전체 장기변형 발생량이 증가함을 알 수 있었고 또한 기층의 두께가 증가할수록 기층의 장기변형 발생량이 증가하나 노상층의 장기변형 발생량은 오히려 감소함을 파악할 수 있었다. 이는 기층의 두께가 증가함으로써 차량 반복하중을 최종적으로 지지하는 역할을 하는 노상층에 전달되는 하중이 감소되어 장기적으로 영구변형을 발생시키는 노상층 상단에 대한 하중부담을 덜어주는 효과를 줄 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 노상층과 기층의 장기변형 증가패턴을 볼 때 선형이 아닌 비선형으로 증가하고 있음을 알 수 있었는데 이것은 VESYS 모델과 같이 각 포장층의 변형을 선형으로 예측하는 모델보다 비선형으로 예측하는 모델이 실제 변형예측에 합리적임을 간접적으로 살펴볼 수 있다.

기층의 두께가 20cm일 경우 장기변형이 최소로 발생하였으나 이는 온도가 감소함에 따라 탄성계수가 큰 폭으로 증가하는 아스팔트층의 재료적 특성을 반영하지 않은 결과로서 기층의 두께를 줄일수록 장기변형발생량이 감소한다고 볼 수 없다. 결국 아스팔트층의 온도와 기층의 두께가 포장체 전체의 장기변형에 영향을 미치는 중요한 요소임을 알 수 있었으며, 아스팔트층의 온도는 환경적인 요인이 크게 작용하므로 설계 공용성을 유지하기 위해 동일한 재료조건에서 기층의 두께나 아스팔트층의 두께를 합리적으로 조절한다면 현실적으로 발생하는 장기변형을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

도로하부층의 함수비가 증가할수록 포장체의 장기변형 또한 증가함을 알 수 있고 최종적으로 약 5mm의 장기변형량 차이를 보였다. 이는 도로하부의 함수상태가 불량하여 함수비가 증가할 때 장기변형 발생이 비교적 큰 폭으로 증가함에 따라 도로의 공용성 저하의 증대한 원인을 제공하게 됨을 알 수 있다. 해석결과상으로는 미미한 차이이지만 실제 공용되는 도로에서 사용자 입장을 고려할 때 설계기준치 이하의 약간의 변형도 주행 안정성이나 중단평탄성을 불량하게 하고 도로의 전체적인 공용성 유지 및 보수대책 수립에 큰 영향을 미치므로 정확한 장기변형 예측이 필요하다. 또한 본 연구에서 유한요소해석은 포장재료에 대한 실내시험 결과값을 바탕으로 수행되었으므로 실제 현장의 탄성계수나 영구변형모델계수는 큰 차이가 있을 것으로 판단되기 때문에 현장보정연구가 필요하다고 판단된다.

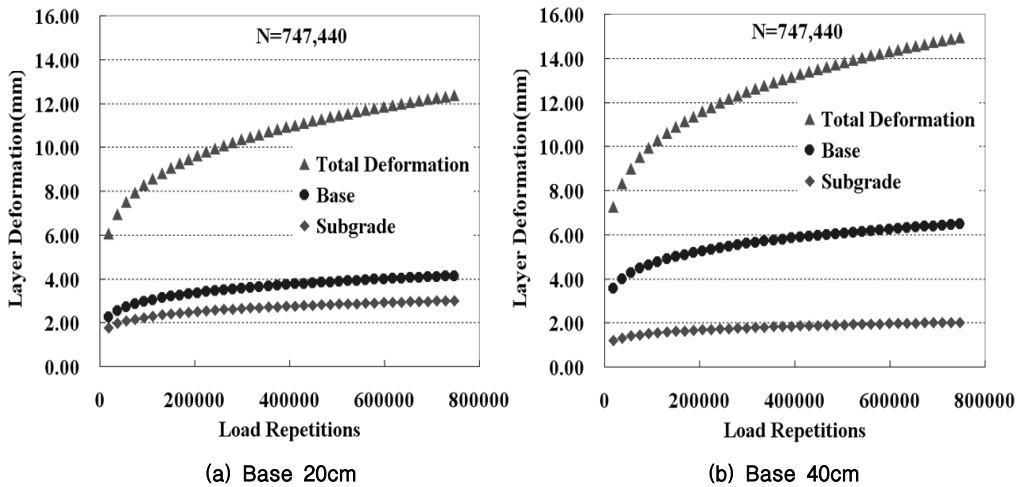


그림 3. OMC-2% 조건일 때 각 층별 장기변형

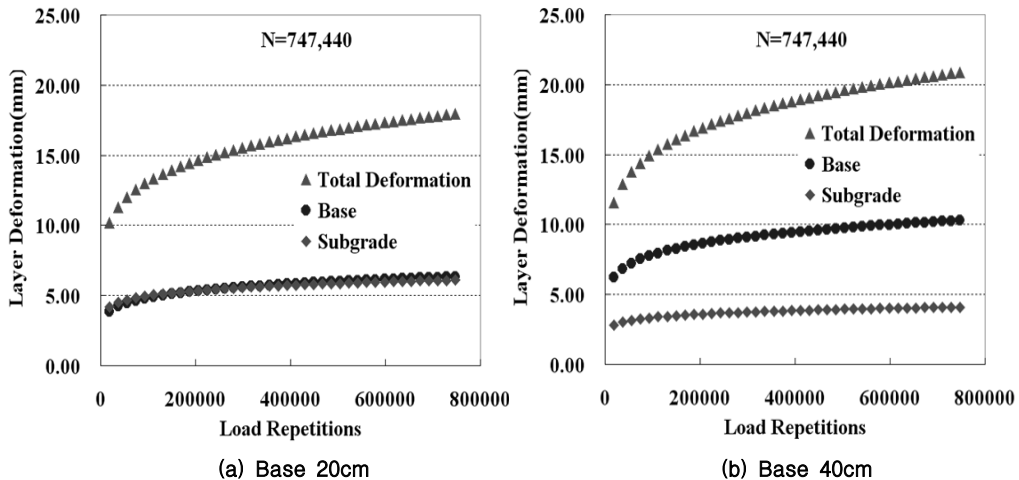


그림 4. OMC+2% 조건일 때 각 층별 장기변형

그림 5와 6은 차량하중이 가해지는 지점에서 수평방향으로 2.5cm 떨어진 곳의 기층두께가 40cm, 하부재료의 함수비가 OMC-2%일 때의 포장깊이별 수직응력 및 수직변형률을 나타내고 있다. 주어진 조건에서 수

직변형률이 가장 크게 나타난 곳은 기층으로 상부구조에서 전이되는 대부분의 하중을 받는 역할을 함으로써 최종적으로 하중을 지지하는 노상층의 수직변형을 감소시키는 효과를 얻는 것으로 판단된다. 따라서 기층의 역할이 복잡한 포장체 거동에 있어 매우 중요함을 알 수 있다.

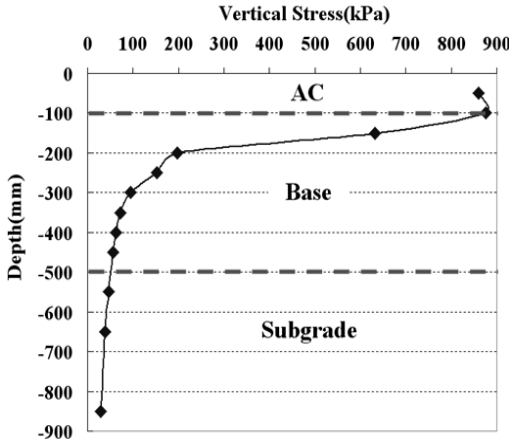


그림 5. Base 40cm일 때 깊이별 수직응력

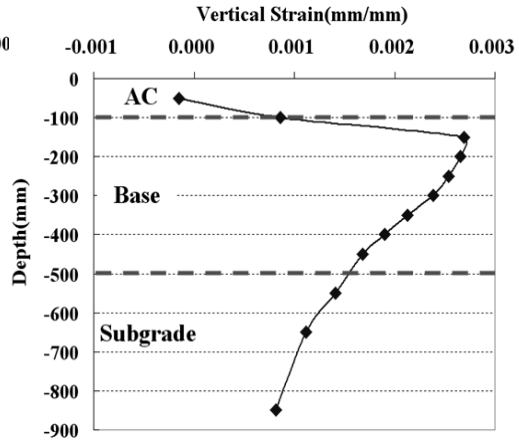


그림 6. Base 40cm일 때 깊이별 수직변형률

6. 종합

아스팔트 포장체에서의 장기변형을 예측하기 위하여 GW 및 SM계열의 재료에 대한 반복재하 삼축압축시험을 수행하고 일반적인 장기변형 예측모델로 쓰이는 VESYS 모델을 적용한 유한요소해석 후 아스팔트 포장체의 장기변형을 예측 및 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 기층의 두께가 증가할수록 전체 장기변형 발생량이 증가하였으나 대부분의 하중을 지지하는 기층의 공학적 특성을 반영한 합리적인 장기변형 예측은 도로하부층에 대한 함수상태 등 여러 가지 요인을 복합적으로 고려함이 요구된다.
- (2) 도로하부층의 장기변형 패턴으로 보아 장기변형 발생에 대한 선형예측모델 보다는 비선형예측모델의 적용이 더욱 적합할 것으로 판단된다.
- (3) 향후 현장 보정연구 및 비선형성을 고려한 장기변형 예측모델의 수립을 위한 추가적인 연구들의 수행이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 “2009년 도로하부 지지력과 동상민감성 상관관계 정립연구(2차년도)”의 일부 결과로, 연구를 가능케 한 국토해양부와 한국건설교통기술평가원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 박성완, 황규영, 정문경, 서영국(2009), “도로기초에서 교통 및 환경하중에 의한 비선형 현장응력 평가”, 한국지반공학회논문집, 제25권 7호, pp.47~54
2. 박희문, 최지영, 박성완(2005), “19mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 소성변형 예측 모델 개발”, 한국도로학회



논문집, 제7권 4호, pp.1~8

3. 이현중(2000), "SBS PMA(슈퍼팔트)의 공용성 및 경제성 평가연구", 강릉대학교 공학연구소, pp.14~89
4. Kenis, W. J.(1978) "Prediction Design Procedure, VESYS User's Manual : An Interim Design Method for Flexible Pavement Using the VESYS Structural Subsystem." Final Report No. FHWA-RD-77-154, Federal Highway Administration, Department of Transportation, Washington, D.C.
5. Lee, K., Prezzi, M. and Kim N., (2007), "Subgrade Design Parameters from Samples Prepared with Different Compaction Methods." Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 133, No. 2, pp.82-89.
6. Park, S. and Lytton, R. L. (2004), "Effect of Stress-Dependent Modulus and Poisson's Ratio on Structural Responses in Thin Asphalt Pavements." Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 3, pp.387-394.
7. Uzan, J. (1985), "Characterization of Granular Material", Transportation Research Record No. 1022, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp.52-59
8. Zhou, F., Scullion F., and Sun, L. (2004), "Verification and Modeling of Three-Stage Permanent Deformation Behavior of Asphalt Mixes." Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 4, pp.486-494.