

아스팔트 포장 하부구조가 경험하는 응력조건

Stress Condition in the Sublayers of Asphalt Concrete Pavement

임유진* · 뉴엔티엔후** · 박재학***

Lim, Yu Jin · Nguyen, Tien Hue · Park, Jae Hak

1. 서론

노상과 보조기층을 포함하는 포장 하부구조의 거동특성은 상부 포장표면에 작용하는 차량하중과 포장단면을 구성하는 각층의 두께 및 재료특성에 의해 크게 지배받는다(그림 1). 국내에서는 1960, 70년대에 건설된 경인, 경부고속도로의 경우, 교통량 증대에 따라서 기존노선의 확포장이 광범위하게 이루어지고 있으며 아울러 기존노선의 선형을 개선하는 작업이 현재에도 계속 이루어지고 있다. 이러한 과정에서 기존 도로 단면과 새로운 도로의 단면은 서로 상이하여 각 단면의 구조적 거동특성에 대한 분석에 앞서 각 단면구성 차에 따른 포장하부에서의 응력분포 차이를 규명할 필요가 있다. 특히 한국형포장설계법에서는 포장하부의 예상 발생 응력크기를 고려하여 각 하부층의 탄성계수를 산정하는 모델을 개발하고 이를 이용하여 복합K를 계산하거나 영구변형의 계산 및 구조해석 등에 사용하도록 하였다. 따라서 국내 포장단면 특성을 고려한 응력조건의 정확한 평가는 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

통상 콘크리트 포장에 비하여 가요성(flexible)포장체인 아스팔트 층 하부에서 응력조건이 민감하게 변하는 것으로 간주되므로 하부구조의 응력조건에 대한 해석은 아스팔트포장층에 국한하여 실시하였다.

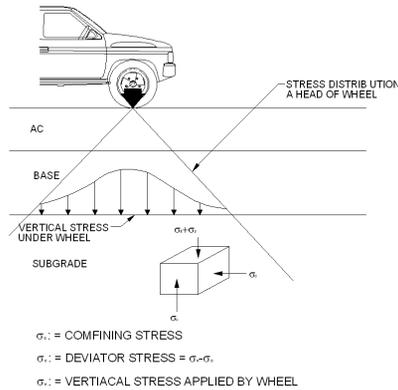


그림 1. 차량하중에 의한 아스팔트 포장 단면내의 응력발생 개념도

그림 2와 같이 차량하중이 포장체에 작용하면 포장체 내에는 기존 재료의 단위중량에 의한 지중응력 외에 추가 응력이 발생하며 추가 발생된 응력에 의해 포장체를 구성하는 각 층은 변형을 경험한다. 따라서 차량하중에 대한 포장층의 반응은 응력, 변형률 및 침하량(변형)으로 분류할 수 있으며 차량하중 외에 응력의

* 정희원 · 배재대학교 건설환경공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : yujin@pcu.co.kr)

** 비희원 · 배재대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail : tienhue@gmail.com)

*** 비희원 · 배재대학교 건설환경공학과 학부과정(E-mail : trans999@naver.com)

생성 또는 변화를 초래하는 요인으로는 하중 외에도 온도변화, 함수비 변화 등을 들 수 있다. 특히 포장층의 재료특성(E)과 층두께(t) 등은 응력의 발생크기와 분포형태에 크게 영향을 미치므로 포장층의 물성값과 두께를 변화시키면서 응력의 변화패턴을 조사하였다. 해석을 위하여 지중응력을 고려할 수 있는 유한요소해석 프로그램을 선정하여 사용하였다.

2. 해석조건설정

포장체에 대한 유한요소해석법은 초기 각 재료의 거동을 선형탄성으로 가정하는 단순한 방법이 사용되었으나 근래에 이르러 포장 구성층의 재료 특성을 다양하게 고려할 수 있는 모델이 제안되고 있다. 그림 2는 본 응력해석에서 채택한 표준단면과 작용시킨 환산타이어반경 및 타이어압력을 도시한 것이다. 타이어압력은 단축하중 80kN으로부터 환산된 것이다. 표 1 및 표 2는 해석에 사용된 국내의 대표적인 아스팔트포장(ASP)과 콘크리트포장(PCC)의 단면구성을 도로등급 즉, 지방도, 국도, 고속도로별로 구분하여 정리한 것이다.

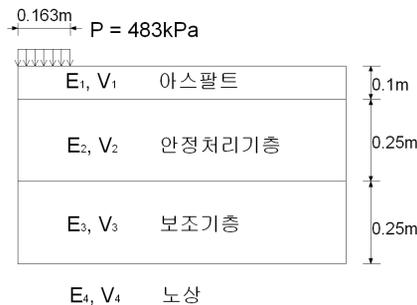


그림 2. 하부구조응력해석에 사용된 대표 표준단면

표 1. 대표적인 아스팔트(ASP)의 포장단면

구 분	대표단면			층두께 (mm)			
				표층	기층	보조기층	동상방지층
고속국도	표층	↑ 0.1m ↓	MIN	100	250	250	0
	기층	↑ 0.25-0.3m ↓					
	보조기층	↑ 0.25-0.45m ↓	MAX	100	300	450	150
	동상방지층	↑ 0-0.15m ↓					
국도	표층	↑ 0.05-0.1m ↓	MIN	50	100	200	200
	기층	↑ 0.1-0.15m ↓					
	보조기층	↑ 0.2-0.4m ↓	MAX	100	150	400	400
	동상방지층	↑ 0.2-0.4m ↓					
지방도	표층	↑ 0.05m ↓	MIN	50	100	200	200
	기층	↑ 0.1-0.15m ↓					
	보조기층	↑ 0.2-0.4m ↓	MAX	50	150	400	400
	동상방지층	↑ 0.2-0.4m ↓					

하부구조응력해석을 위하여 선형탄성모델과 비선형모델($k-\theta$) 모델 및 2선형축차응력모델(σ_d 모델)을 선택하여 사용하였으며 각 모델의 입력 물성치는 표 2 및 표 3과 같고 비선형모델은 식 (1) ~ 식 (3)과 같다.

표 2. 하부구조응력해석에 사용된 대표물성치: 선형탄성해석(LE)

구 분	탄성계수(E) (kPa)	포아송 비(ν)	단위중량 (kN/m ³)	정지토압계수 (K_0)
아스팔트 표층	3,447,500	0.4	22.8	0.4
아스팔트 안정처리기층	2,068,500	0.38	22.8	0.4
보조기층	2,413,250	0.35	21.2	0.4
노 상	68,950	0.4	18.85	0.4

표 3. 비선형해석을 위한 $k-\theta$ 모델 및 2선형축차응력모델의 입력 물성치

구 분	$k-\theta$ 모델	축차응력모델
k_1	286,900 (kPa)	8274 (kPa)
k_2	0.47	42.75 (kPa)
k_3	N/A	7653.5 (kPa)
k_4	N/A	1227 (kPa)

$$E = k_1 \theta^{k_2} \quad \text{식 (1)}$$

$$E = k_1 + k_3 [k_2 - \sigma_d], \quad \sigma_d \leq k_2 \quad \text{식 (2)}$$

$$E = k_1 - k_4 [\sigma_d - k_2], \quad \sigma_d \geq k_2 \quad \text{식 (3)}$$

표 2 및 표 3의 물성치중 노상은 세립분이 많은 국내 노상특성을 고려하여 결정하였다. 그림 3은 사용한 유한요소해석 프로그램에 의해 구성된 유한요소망이다. 주어진 물성치와 포장단면 및 표준모델을 기본으로 아래와 같은 내용에 대한 변수해석(parametric study)을 실시하여 포장하부구조층 내의 수직응력 분포 변화, 방사방향응력(또는 수평응력) 분포변화 및 축차응력 변화를 추적 조사하였다.

- (1) 상시설계 타이어압력(483 kPa)과 고(高)타이어압력(966 kPa)에 대한 비교
- (2) 노상의 강성(E_{subgrade})변화에 의한 하부구조 응력 변화
- (3) 정지토압계수(K_0)의 변화에 따른 하부구조 응력 변화
- (4) 대표적인 단면의 축차응력, 체적응력 비교

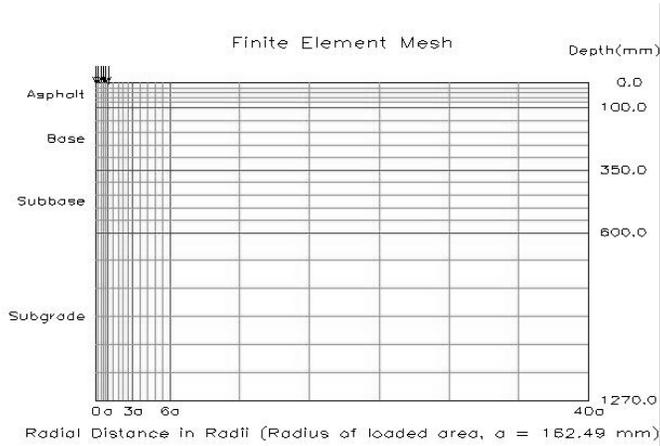


그림 3. 포장해석에 사용된 유한요소망의 구성

3. 하부구조 응력해석 결과

기준 타이어압력과 고(高)타이어압에 대한 비선형해석을 실시하여 구한 축차응력 및 체적응력을 보조기층의 중앙 및 노상의 최상부에서 구한 후 이를 표 4에 비교, 정리하였다. 계산된 모든 응력은 흙의 자중에 의한 지중응력을 포함한 것이다. 해석결과에 의하면 노상에서는 고타이어압력에 의해 축차응력 및 체적응력 모두 매우 미소한 증가를 보였으며 보조기층 중심에서는 상당한 증가현상을 보였다. 따라서 과적하중에 의해 발생하는 고타이어압은 하부노상에 미치는 영향이 매우 미소할 것으로 보이며 보조기층에는 일정정도 영향을 줄 수 있을 것으로 보인다.

표 4에 계산된 결과는 모든 포장층에 대해 정지토압계수(K_0)를 0.4로 가정한 것으로서 현장다짐에 의해 토압계수가 크게 증가할 것을 고려하면 노상토에서는 실제응력과 다소 차이가 있을 것으로 생각된다. 따라서 정지토압계수(K_0)에 따른 하부구조응력 변화의 최소값과 최대값을 조사하였다(표 5). 정지토압계수의 변화에 따른 보조기층과 노상에서의 응력수준에는 큰 차이가 발생하지 않았음을 알 수 있었다.

표 4. 고(高)타이어압이 하부구조 응력변화에 미치는 영향

구 분	보조기층 중심부		노상토 최상부	
	$\sigma_d(kPa)$	$\theta(kPa)$	$\sigma_d(kPa)$	$\theta(kPa)$
1)타이어 압력 = 483(kPa)	148.55	594.21	19.06	77.20
2)타이어 압력 = 966(kPa)	175.42	701.70	20.10	80.58

표 5. 하부구조층의 정지토압계수(K_0)가 응력변화에 미치는 영향

보조기층-중심부				노상토-최상부			
$\sigma_d(kPa)$		$\theta(kPa)$		$\sigma_d(kPa)$		$\theta(kPa)$	
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
148.27	148.69	593.09	594.76	19.06	19.39	75.23	77.20

표 6은 노상의 강성모델중 k1값을 20,822(연약), 52,953(중간), 85,084(강함) 및 2,068,500(kPa)(매우강함)로 증가시키며 노상강성에 의한 응력변화를 조사한 결과다. 이때 하부구조의 정지토압계수는(Ko)는 0.4로 낮추어 정지토압계수에 의한 응력변화의 민감도를 줄였다. 해석결과, 강성이 연약한 포장단면에서 축차응력의 발생이 상대적으로 크게 발생하였다. 또한 강성차이에 따른 응력조건의 최대값과 최소값을 비교한 결과 보조기층 중심부에서 체적응력 값은 159.79(kPa)차이를 보였으며 노상토 최상부에서는 247.67(kPa) 차이를 보였다. 또한 보조기층 중심부에서 축차응력은 39.94(kPa)차이를 보였으며 노상토 최상부에서는 61.54(kPa)차이가 확인 되었다.

표 6. 노상토의 강성변화가 응력변화에 미치는 영향 (K0=0.4)

도로포장 단면의 변화추세	구 분	레이어두께(mm)				보조기층 중심부		노상토 최상부	
		표층	기층	보조기층	동상 방지층	$\sigma_d(kPa)$	$\theta(kPa)$	$\sigma_d(kPa)$	$\theta(kPa)$
국도	1)K1=20.82 (MPa)	50	100	200	200	142.76	571.03	13.50	54.40
	2)K1=52.95 (MPa)	50	100	200	200	150.56	602.25	21.87	87.49
	3)K1=85.08 (MPa)	50	100	200	200	155.20	620.79	28.30	113.21
	4)K1=2068.5 (MPa)	50	100	200	200	182.70	730.82	75.04	302.07

표 7은 위의 해석방법을 이용하여 국내 대표적인 도로 포장단면(고속도로, 국도, 지방도)에 대한 응력조건의 발생 범위를 분석한 결과이다. 아스팔트 보조기층 중심부에서는 단면이 상대적으로 두꺼운 고속국도에서 축차응력의 발생이 가장 작았으며 국도, 지방도 순으로 축차응력의 발생이 큼을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 체적응력에서도 유사하게 발생하였다. 반면 노상토 최상부에서의 단면차이에 따른 축차응력의 발생차이는 포장단면 차이에 따라 크지 않았으며 그 크기도 보조기층 중심부에 비하여 크게 감소되었음을 알 수 있다. 이와 같이 확인된 포장 하부구조(노상 및 보조기층)에서의 응력조건은 한국형포장설계법에서 각 재료의 탄성계수를 결정하기 위한 구성모델의 응력범위로 채택이 되었다.

표 7. 아스팔트(ASP)에서 보조기층, 노상토의 응력 조건의 범위

구 분	보조기층 중심부 (MIN~MAX)		노상토 최상부 (MIN~MAX)	
	$\sigma_d(kPa)$	$\theta(kPa)$	$\sigma_d(kPa)$	$\theta(kPa)$
고속국도	29.42 ~ 38.88	117.70 ~ 155.54	6.97 ~ 22.18	24.86 ~ 27.90
국도	58.25 ~ 148.69	232.99 ~ 594.76	6.34 ~ 19.06	8.40 ~ 77.20
지방도	82.83 ~ 148.69	331.33 ~ 594.76	8.23 ~ 19.06	33.49 ~ 77.20

4. 결 론

포장 하부구조가 경험하는 응력조건을 분석하기 위하여 국내 대표 아스팔트 포장단면에 대한 유한요소해석을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 고(高)타이어압이 노상의 축차응력 및 체적응력에 미치는 영향은 매우 미약하였으나 보조기층에는 상당한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

(2) 노상의 강성이 증가함에 따라 보조기층 중심부축차응력과 체적응력은 모든 부분에서 증가하는 경향을 보였다. 노상도 최상부에서는 5배이상의 증가를 보였다.

(3) 다짐에 따라 발생하는 큰 정지토압계수는 하부구조의 구속응력 및 축차응력값에 큰 영향을 주지 못하였다.

(4) 노상도 최상부에서의 단면차이에 따른 축차응력의 발생차이는 포장단면 차이에 따라 크지 않았으며 그 크기도 보조기층 중심부에 비하여 크게 감소되었음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부로 본 연구를 지원하여준 국토해양부 및 한국건설기술연구원, 한국도로공사에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2004) “한국형포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”
2. 건설교통부 (2000), 도로설계편람, 건설교통부
3. Amara Loulizi, (2002), “Measurement of Vertical Compressive Stress Pulse in Flexible Pavement”, Transportation Research Board, TRR 1816, TRB, Washington, D.C., pp.125-136
4. Leonard, D. R. (1974), “Loads and Vibrations caused by Eight Commercial Vehicles with Gross Weights Exceeding 32 tons (32.5 Mg)”, Transport and Road Research Laboratory, TRRL 582, Crowthorne, Berkshire., pp.1-12