

주행하중의 정량화기법을 이용한 아스팔트 포장구조체 하부구조의 응력조건 산정

Development of Analysis System for Asphalt Pavement Structures under Various Vehicle Speeds

서주원¹⁾ · 최준성²⁾ · 김수일³⁾ · 김형배⁴⁾

Seo, Joo Won · Choi, Jun Seong · Kim, Soo Il · Kim, Hyung Bae

1. 서 론

본 연구에서는 주행차량의 속도에 따른 아스팔트 포장구조체 해석모델을 개발하기 위한 기초연구로서, 본 연구에 앞서 개발된 주행하중 정량화기법을 이용한 차량주행속도에 따른 하부구조의 응력조건 범위를 산정하고자 한다. 하부구조 응력조건 범위를 산정하기 위하여 아스팔트층의 입력물성은 FWD의 역산탄성계수가 아닌 탄성계수 예측방정식을 이용하였다. 또한 하부구조의 탄성계수는 응력의 비선형성을 고려하기 위하여 한국형 포장설계법(2004)에서 제안한 K- θ 모델을 사용하여 반복 해석을 통한 입력물성 결정을 실시하였다. 결정된 동적물성을 이용해 국내고속도로 단면에 대하여 주행차량 속도에 따른 비구속응력의 응력조건을 제시하고자 한다.

2. 주행차량의 속도에 따른 차량하중 정량화기법

2.1 주행속도에 따른 하중 정량화

Amara Loulizi 등(2002)은 여러 가지 시험결과를 토대로 차량속도에 따른 깊이별 하중주파수 산정식을 Bell-shaped 정규분포곡선으로 제안하였다. 본 연구에서는 주행차량 속도에 따른 하중지속시간 t 를 이용하여 아스팔트 포장 표면으로부터 42mm, 190mm, 267mm, 419mm, 597mm 깊이에 해당하는 하중주파수를 산정하였다. 그림 1은 비선형 회귀분석식을 이용하여 차량속도에 따른 깊이별 하중주파수 변화를 나타내었다.

그림 2는 영국 자동차 공업협회 (SMMT: the Society of Motor Manufacturers and Traders Limited)에서 일반적인 차량 종류(32.5~44.7 tons)에 대해 아스팔트 콘크리트 시험도로에서 strain gauged load cells로 주행속도 변화에 따른 동적하중을 측정된 결과를 접지압의 형태로 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 시험도로에서 측정된 결과로부터 차량의 하중이 가장 많이 전달되는 트레일러(Trailer Axle)에 대한 측정데이터를 기준자료로 이용하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 실제 주행속도 증가에 따라 포장체에 가해지는 하중이 증가하는 경향을 볼 수 있었으며, 이로 인해 차량속도에 의한 거동이 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다.

주행속도변화가 포장구조체에 미치는 영향을 정량화 하기 위하여 속도에 따른 동적 하중계수를 산정하였고 면적계산을 통해 기준속도에 대한 에너지 영향계수로 환산하였다. 산정된 결과들을 이용하여 차량 속도에 따른 하중과 에너지의 관계를 표 1에 나타내었다. 표 1에서의 기준속도는 비파괴시험장비인 FWD의 하중주파수에 해당하는 37km/h로 선정하였다.

* 정희원, 연세대학교 토목공학과 · 박사과정 · 02-312-5101 (E-mail : pooh@yonsei.ac.kr)
** 정희원, 인덕대학 토목환경설계과 교수 · 공학박사 · 02-950-7565 (E-mail : soilpave@induk.ac.kr)
*** 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 · 공학박사 · 02-2123-2800 (E-mail : geotech@yonsei.ac.kr)
**** 정희원, 한국도로공사 도로교통기술원 · 공학박사 · 031-371-3351 (E-mail : khb@freeway.co.kr)

그림 3은 주행차량 속도에 따라 아스팔트 포장체에 미치는 차량하중 에너지를 나타내고 있다. 그림 2와 그림 3에서 볼 수 있듯이 차량속도가 증가함에 따라 하중의 크기는 증가하지만, 하중지속시간이 감소함으로써 주행차량이 아스팔트 포장체에 미치는 영향은 감소함을 알 수 있었다.

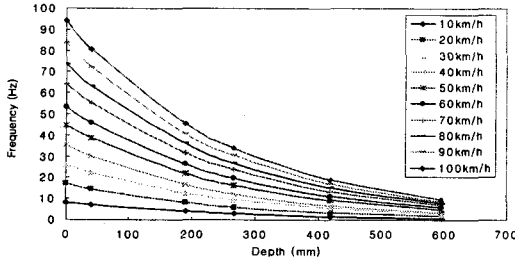


그림 1. 차량 속도에 따른 깊이별 하중주파수

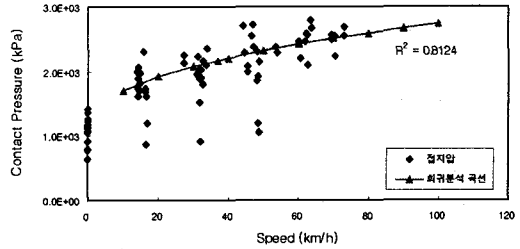


그림 2. 차량속도에 따른 동적 접지압

표 1. 차량속도에 따른 차량하중 에너지 변환계수

속도 (km/h)	에너지 변화계수 (Frequency 변화에 따른 면적 S)	동적하중 변환계수 (하중크기 D)	차량하중 영향계수 (S×D)
10	3.81	0.79	3.00
30	1.29	0.96	1.23
37	1.00	1.00	1.00
60	0.59	1.11	0.65
80	0.49	1.19	0.58
100	0.39	1.26	0.49

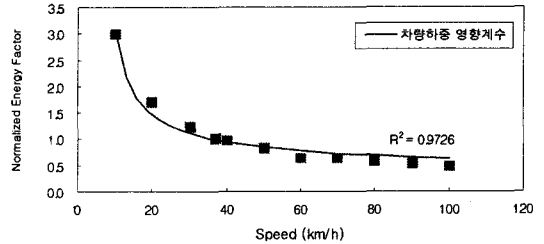


그림 3. 차량속도에 따른 차량하중 영향계수

2.2 차량주행속도 영향을 고려한 해석시스템 구축

본 연구에서는 주행차량의 속도에 따른 동적영향을 정량화하기 위하여 주행차량의 속도에 따른 국내외 현장시험데이터로부터 하중의 지속시간 변화와 하중크기의 변화를 분석한 후 주행차량 속도변화에 따른 영향계수를 개발하였다. 또한 포장체 해석시스템을 구축하기 위하여 아스팔트층의 온도에 의한 비선형성 및 포장하부구조의 응력 비선형성을 고려할 수 있는 충분한 모델링을 실시하였다. 층 분할 모델링은 아스팔트층을 최대 10층으로 분할하여 비선형성을 고려할 수 있도록 하였고, 보조기층은 2층, 노상은 하나의 층으로 해석을 실시하였다. 아스팔트층의 물성은 이관호 등이 제안한 동탄성계수 예측모델을 이용하였다(최준성, 2004). 그림 4는 차량주행속도에 따른 아스팔트 콘크리트 포장체의 거동을 분석하기 위한 해석시스템 흐름도이다.

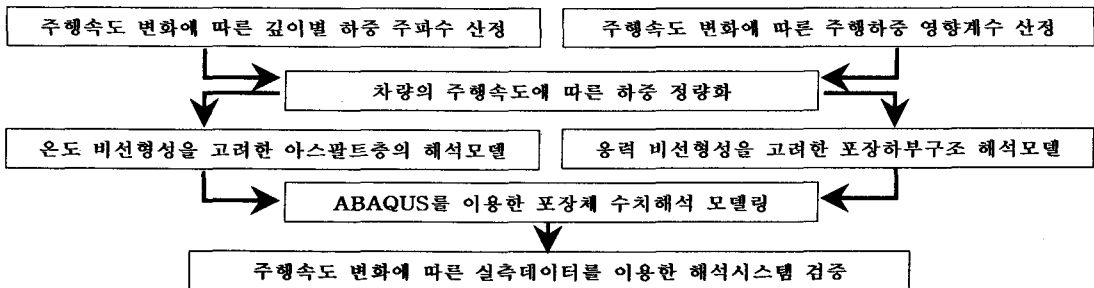


그림 4. 주행차량을 고려한 아스팔트 포장체의 해석시스템 흐름도



3. 주행하중 민감도 분석을 통한 포장체 하부구조의 응력조건 산정

하부구조 응력조건을 범위산정을 위하여 아스팔트층의 입력물성은 FWD의 역산탄성계수가 아닌 탄성계수 예측방정식을 이용하였다. 하부구조의 탄성계수는 응력의 비선형성을 고려하기 위하여 한국형 포장설계법(2004)에서 제안한 K- θ 모델을 사용하여 반복 해석을 통한 입력물성 결정을 실시하였다. 결정된 동적물성을 이용해 국내 고속도로 단면에 대하여 주행차량 속도에 따른 비구속층의 응력조건을 제시하고자 한다.

3.1 국내외 회복탄성계수 시험의 포장하부구조 응력조건

현재 국내에 적용되고 있는 포장설계법은 하부구조의 설계 입력 물성치를 반복삼축실험인 M_R 시험이나 동탄성계수시험으로 추정하여 사용하고 있다. 표 2는 각국에서 개발된 M_R 시험법을 나타낸다. 국내에서 가장 많이 사용되는 AASHTO M_R 시험법은 사질토 및 점성토에 대하여 각각의 도로조건과 환경적 조건에 따라 실제 하중이 작용하기 전 도로 하부구조의 응력상태를 구현하기 위한 시편안정단계와 실제 하중이 작용할 때의 응력상태를 구현하기 위한 데이터 획득단계로 구분하여 규정하고 있다. 표 2에서 나타낸 바와 같이 시편안정단계와 데이터 획득단계로 구분되어 구속압과 축차응력의 각각 조합별로 반복재하 횟수가 200회이며 총 반복재하수는 1,000~1,200회인데 사질토는 시험종료까지 총 6,600회, 점성토는 총 4,000회이다. 그러나 AASHTO 시험기준의 경우 구속압과 축차응력 조건이 매우 넓은 범위(7~137kPa)를 나타내므로, 수행되는 시험의 개수는 많아지지만 실제 필요한 값에서의 시험은 이루어 지지 않는다는 문제점을 가지고 있다.

실제 보조기층과 노상재료의 실내시험에서 수행되는 하중주파수는 시험방법에 따라 서로 다를 뿐 아니라 실내 및 도로평가 시험에서 적용되는 하중주파수와 실제 차량주행속도에 대한 하중주파수가 서로 다르다. 따라서 실제 주행하중 조건에서의 하중주파수 영향과 환경인자 영향을 고려한 시험 응력조건은 하부구조의 모델링시 실제 하중 전달량을 고려할 수 있는 중요한 요소이다.

본 연구에서는 국내 아스팔트 포장도로의 여러 가지 단면조건에서 아스팔트포장표면의 온도가 여름철 최고온도일 경우와 겨울철 최저온도일 경우에 대하여 차량주행속도에 따른 국내 아스팔트 포장체 하부구조의 응력조건 범위를 제안하고자 한다.

표 2. 국외의 주요 기관별 M_R 시험법 (σ , kPa)

시험법	단계	σ_c (구속압)	σ_d (축차응력)	재하횟수(회)	비고
AASHTO	시편안정	34, 69, 69, 103, 103, 137	34, 69, 69, 103, 137	각 200	사질토
	데이터획득	137, 103, 69, 34, 7	7, 14, 34, 69, 103, 137	각 200	
	시편안정	41	7, 14, 28, 55, 69,	각 200	점성토
	데이터획득	41, 21, 0	7, 14, 28, 55, 69,	각 200	
ASTM	시편안정	41	7	1000	
	데이터획득	41, 21, 7	7, 14, 34, 69	각 200	
SHRP	시편안정	41	28	200	
	데이터획득	7, 14, 14, 34, 34	14, 14, 28, 14, 34	각 200	

3.2 국내 아스팔트포장을 고려한 단면모델 결정

현재 사용중인 아스팔트 콘크리트 포장체는 3층 또는 4층으로 구성된 다층 구조체이다. 본 연구에서는 아스팔트 콘크리트 포장체를 표층, 기층, 보조기층, 노상으로 구분하여 4층으로 해석을 수행하였다. 또한 일정한 시험하중 하에서 발생하는 다층탄성구조체의 응력 및 변형률은 각 층의 두께 및 탄성계수에 의존하므로 포장 내부에 발생하는 응력조건을 고찰하기 위하여 탄성계수는 차량하중 및 하중주파수 영향을 고려하였고, 두께는 상·중·하 3개의 수준으로 나누어 수행하였다. 각 층의 두께는 국내에서 공용중인 고속도로 중 아스팔트 콘크리트 포장체의 표준단면을 고려하여 표 3과 같이 선정하였다(건설교통부, 2000).

해석시 사용된 단면은 표층, 기층, 보조기층, 노상으로 구성된 아스팔트 콘크리트 포장체로 4층 해석을 실



시하므로 표층은 5, 10, 20cm, 기층은 15, 25, 35cm, 보조기층은 30, 40, 60cm의 두께로 선정하였다. 일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장체에 사용되는 각 층의 재료에 대한 포아송비는 아스팔트층을 0.30, 보조기층을 0.35, 노상을 0.40으로 가정하였으며, 단위중량은 각 층에 대하여 각각 0.00235kg/cm³, 0.00230kg/cm³, 0.00191kg/cm³로 가정하였다(유지형, 1989).

표 3. 국내 아스팔트 포장단면을 고려한 단면모델 구성

층		표층	기층	보조기층	노상	참고사항
물성	하	5	15	30	-	* 암반층 : 8m (가정)
	중	10	25	40	-	
	상	20	35	60	-	
탄성계수 (kg/cm ²)	하	하중주파수 및 온도에 따른 탄성계수		K-θ 모델을 이용한 비선형 탄성계수		
	중					
	상					
포아송비		0.3	0.3	0.35	0.40	
단위중량(kg/cm ³)		0.00235	0.00235	0.00230	0.00191	
온도 (°C)		시험도로 표면온도 : 52.5°C (2004.7.22), -4.5°C (2004.1.3)				
Speed (Km/h)		10, 30, 60, 100				

3.3 주행속도에 따른 실험 응력조건 범위 결정

표 4는 포장표면의 온도가 최고와 최저일 경우, 각 단면 두께별 차량주행속도에 따라 발생하는 하부구조의 하중전달량을 나타내었다. 표 4를 통해 각 단면별 차량주행속도에 따라 비구속층에서 발생하는 수직응력을 분석한 결과, 최고온도일 경우에는 아스팔트층의 두께가 하수준에서 주행차량의 속도가 10km/h에서 100km/h로 증가함에 따라 보조기층 상단의 수직응력이 83.6%감소하였고, 하단이 77.6%감소하였다. 또한 최저온도일 경우에는 아스팔트층의 두께가 하수준에서 주행차량의 속도가 10km/h에서 100km/h로 증가함에 따라 보조기층 상단의 수직응력이 79.4%감소하였고, 하단이 73.3%감소하였다. 노상의 경우 주행차량 속도 및 온도변화에 따른 수직응력 변화가 크지 않았다. 아스팔트 포장의 두께가 두꺼워 질수록 주행차량 속도에 따른 보조기층의 수직응력 변화량은 감소하였고, 노상의 수직응력은 아스팔트층 두께와 변화에 의한 영향이 크지 않았다. 따라서 차량의 주행속도가 증가할수록 아스팔트 포장 보조기층에 가해지는 하중전달량은 감소함을 알 수 있었다.

표 4. 비구속층의 수직응력 (σ_v, kPa)

단면 두께	층	최고온도				구속압의 변화량 (Δσ _v)	최저온도				구속압의 변화량 (Δσ _v)
		차량주행속도					차량주행속도				
		10km/h	30km/h	60km/h	100km/h		10km/h	30km/h	60km/h	100km/h	
하	보조기층상단	228.84	90.09	48.89	37.59	191.25	120.29	52.54	30.79	24.80	95.49
	보조기층하단	137.13	62.38	37.67	30.72	106.42	87.32	42.54	27.55	23.36	63.96
	노상상단	51.05	38.66	34.50	33.38	17.67	47.71	37.31	33.77	32.82	14.89
중	보조기층상단	120.20	50.41	29.06	23.18	97.02	66.34	31.04	19.65	16.49	49.85
	보조기층하단	86.67	41.00	26.31	22.21	64.47	54.78	28.78	20.18	17.78	37.00
	노상상단	47.20	37.04	33.63	32.68	14.52	43.50	35.52	32.84	32.09	11.41
상	보조기층상단	80.24	38.13	25.14	21.56	58.69	48.58	26.64	19.54	17.57	31.01
	보조기층하단	64.96	34.87	25.28	22.63	42.33	43.96	26.96	21.36	19.80	24.16
	노상상단	48.79	40.31	37.56	36.81	11.97	45.06	38.89	36.83	36.26	8.80

표 5는 포장표면의 온도가 최고와 최저일 경우, 각 단면 두께별 차량주행속도에 따라 발생하는 하부구조의 구속압을 나타내었다. 표 5를 통해 각 단면별 차량주행속도에 따라 비구속층에서 발생하는 구속압을 분석한 결과, 최고온도일 경우에는 아스팔트층의 두께가 하수준에서 주행차량의 속도가 10km/h에서 100km/h로 증



가함에 따라 보조기층 상단의 구속압이 81.5%감소하였고, 하단이 74.2%감소하였다. 또한 최저온도일 경우에는 아스팔트층의 두께가 하수준에서 주행차량의 속도가 10km/h에서 100km/h로 증가함에 따라 보조기층 상단의 구속압이 70.4%감소하였고, 하단이 58.9%감소하였다. 노상의 경우 주행차량 속도에 대한 구속압의 변화가 크지 않았다. 표 5를 살펴보면 아스팔트 포장의 두께가 두꺼워 질수록 주행차량 속도에 따른 보조기층의 구속압 변화량은 감소하였고, 노상의 구속압은 아스팔트층 두께 및 차량속도에 의한 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

표 5. 비구속층의 구속압 (σ_c , kPa)

단면 두께	층	최고온도					최저온도				
		차량주행속도				구속압의 변화량 ($\Delta\sigma_c$)	차량주행속도				구속압의 변화량 ($\Delta\sigma_c$)
		10km/h	30km/h	60km/h	100km/h		10km/h	30km/h	60km/h	100km/h	
하	보조기층상단	88.44	31.52	19.92	16.40	72.04	41.29	22.07	14.42	12.21	29.08
	보조기층하단	58.18	23.74	17.10	14.99	43.19	30.58	18.99	14.06	12.57	18.01
	노상상단	29.84	25.97	24.63	24.26	5.58	29.11	25.64	24.46	24.12	4.99
중	보조기층상단	41.22	20.64	13.35	11.25	29.97	26.58	14.51	10.12	8.87	17.70
	보조기층하단	29.32	18.09	13.41	11.99	17.34	22.90	14.53	11.32	10.40	12.50
	노상상단	28.97	25.60	24.47	24.15	4.83	28.04	25.21	24.26	23.99	4.05
상	보조기층상단	30.44	17.80	13.24	11.96	18.48	21.85	14.06	11.30	10.53	11.32
	보조기층하단	26.23	17.70	14.41	13.46	12.77	21.01	15.21	13.06	12.45	8.56
	노상상단	31.74	28.87	27.92	27.65	4.09	30.78	28.49	27.72	27.50	3.28

표 4와 표 5의 결과를 종합적으로 정리하여 주행차량 속도에 따른 축차응력과 구속압의 범위를 표 6에 나타내었다. 입상토의 M_R 시험법중 가장 대표적인 AASHTO(미국도로교통안전협회) M_R 시험법의 구속압과 축차응력의 범위는 7~137kPa로 정하고 있으며, 본 연구에서 실시한 차량주행속도를 고려한 해석 결과, 보조기층의 축차응력범위는 7.04~140.40kPa, 구속압조건은 포장두께에 따라 8.56~88.44kPa 범위에 있었고, 노상의 축차응력조건은 8.10~21.21kPa, 구속압조건은 24.26~31.74kPa로 AASHTO에서 제안한 구속압 범위에 있음을 알 수 있었다.

표 6. 속도에 따른 비구속층의 응력 범위 (kPa)

응력종류	층	차량주행속도			
		10km/h	30km/h	60km/h	100km/h
축차응력 범위	보조기층	22.95~140.40	11.75~58.57	8.24~28.97	7.04~21.19
	노상	15.46~21.21	10.31~12.69	8.58~9.37	8.10~9.16
구속압 범위	보조기층	21.01~88.44	14.06~31.52	10.12~19.92	8.56~16.40
	노상	28.04~31.74	25.21~28.87	24.26~27.92	27.65~23.99

4. 결론

본 연구에서는 선행된 연구에서 제안하고 검증한 주행차량 속도에 따른 포장구조 해석시스템을 이용하여 아스팔트 포장체의 거동을 정량적으로 평가하고 그 결과를 이용하여 비구속층의 구속압 조건을 제시하였다. 그 결과, 여름철 최고온도일 경우 주행속도에 따라 비구속층에서 발생하는 구속압은 아스팔트층 두께가 20cm인 하수준일 경우 주행차량의 속도가 10km/h에서 100km/h로 증가할 때 보조기층 상단과 하단에서의 구속압은 각각 81.5% 와 74.2%가 감소하였고, 노상의 경우에는 주행차량 속도에 대한 축차응력과 구속압의 영향은 크지 않았다. 입상토의 M_R 시험법중 가장 대표적인 AASHTO(미국도로교통안전협회) M_R 시험법의 구속압과 축차응력의 범위는 7~137kPa로 정하고 있으며, 본 연구에서 실시한 차량주행속도를 고려한 해석 결과, 보조기층의 축차응력범위는 7.04~140.40kPa, 구속압조건은 포장두께에 따라 8.56~88.44kPa 범위에 있었고, 노상의 축차응력조건은 8.10~21.21kPa, 구속압조건은 24.26~31.74kPa로 AASHTO에서 제안한 구속압 범위에 있음을 알 수 있었다.



감사의 글

본 연구는 2005년 한국도로공사 도로교통기술원과의 공동연구사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케한 한국도로공사 도로교통기술원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부 (1988), **AASHTO 도로포장 구조설계 지침서**, 건설교통부.
2. 건설교통부 (2000), **도로설계편람**, 건설교통부.
3. 권기철 (2004), “하부구조 물성정량화”, **아스팔트 포장 설계법 개발 연구 최종보고서**, G3, 건설교통부.
4. 김수일, 최준성, 이강진 (1999), “차량 주행속도에 따른 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 거동분석”, 대한토목학회논문집, 제19권, 제3-6호, **대한토목학회**, pp.41-52.
5. 유지형 (1989), “치짐 곡선에 의한 아스팔트 콘크리트포장 구조체의 층별 탄성계수 추정에 관한 연구”, **연세대학교 박사학위 논문**.
6. 이관호 (2004), “아스팔트 포장재료 물성정량화”, **아스팔트 포장 설계법 개발 연구 최종보고서**, G2, 건설교통부.
7. 서주원, 최준성, 김수일, 김도형, 김형배 (2001), “주행차량의 내부거동을 통한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성 추정에 관한 연구”, **한국도로포장공학회 학술발표회논문집**, 한국도로포장공학회, pp. 33~38.
8. 최준성 (2004), “온도 및 응력의 비선형성을 고려한 해석방안 개발”, **아스팔트 포장 설계법 개발 연구 최종보고서**, G5, 건설교통부.
9. Amara Loulizi. (2002), “Measurement of Vertical Compressive Stress Pulse in Flexible Pavement”, Transportation Research Board, *TRR 1816*, TRB, Washington, D.C., pp.125-136.
10. 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