

아스팔트 포장층의 단면 두께별 빔피로 특성에 관한 연구

A Study on The Characteristics of Beam Fatigue Cracking in Thickness of Asphalt Concrete Pavement

옥창권*, 서정혜**, 안진홍***

Ock, Chang Kwon · Seo, Jeonghae · An, Jin Hong

1. 서 론

본 연구는 국내에서 일반적으로 사용되는 아스팔트 혼합물에 대하여 변형을 제어 방식의 빔피로 시험(Flexural Beam Fatigue Test)을 실시하여 피로시험에 사용할 적합한 변형을 주기를 선택하였으며, 또한 국내에서 지방도에서 고속도로까지 사용되는 아스팔트 포장단면을 다양하게 변화시키면서 단면 구조해석을 실시하여 아스팔트 혼합물 상면과 하면에서 발생하는 최대 수평변형율을 계산하였다. 이러한 결과를 이용하여 피로수명에 강한 포장단면의 산정을 위하여 각 단면에 대하여 도출된 표층의 최대 수평변형율을 빔피로 시험결과에 적용하여 각 단면별 빔피로 수명에 대한 상대수명비를 계산하였다.

이러한 계산결과 $100\mu\epsilon$ 이하의 변형율에서 피로수명이 급격히 증가하는 결과를 알 수 있었다.

2. 포장 구조해석

본 연구에서는 국내 지방도 국도 및 고속도로에 사용하는 포장구조 단면에 대한 포장구조 해석을 통하여 각 포장단면에서 발생하는 수평변형율을 구하여 각종 아스팔트 혼합물의 빔피로 시험을 통하여 분석된 피로수명 추정식을 사용하여 각 혼합물에 대한 피로수명의 상대적인 비교를 실시하고자 하였다. 본 구조해석에는 Kenlayer computer program을 사용하여 포장구조 단면을 선형탄성으로 해석하였다.

2.1 해석조건

본 해석에 사용된 포장단면은 국내 지방도 국도 및 고속도로에 사용하는 다양한 포장단면을 표 1과 같이 가정하여 포장 구조해석을 실시하였다. 또한 각 포장단면에 사용될 물성치는 표 2에 나타난 값들을 사용하였다. 여기에서 사용된 아스팔트 포장층의 탄성계수는 아스팔트 혼합물에 대한 빔 피로시험이 상온 20°C 에서 실시되는 것을 고려하여 기존의 연구성과(이경하 등, 1995)로부터 20°C 에 해당하는 탄성계수를 추출하여 사용하였다.

표 1. 해석에 사용된 포장 단면

단면 번호	1	2	3	4	5	6	7
표층	5cm	5cm	10cm	5cm	5cm	10cm	10cm
아스팔트기층	10cm	15cm	15cm	25cm	30cm	30cm	35cm
보조기층	40cm	40cm	40cm	40cm	40cm	40cm	40cm
합계	55cm	60cm	65cm	70cm	75cm	80cm	85cm

* 정희원 · 한국도로공사 도로교통기술원 포장연구그룹 · 연구원 · ock@freeway.co.kr

** 정희원 · 한국도로공사 도로교통기술원 포장연구그룹 · 위촉연구원 · liz98@shinbico.com

*** 학생회원 · 경희대학교 토목공학과 · 석사과정 · gate44@empal.com



표 2. 포장 단면별 입력 물성치

단면	탄성계수(psi)	poisson' ratio	비고
아스팔트 표층	526,000	0.35	
아스팔트 기층	498,000	0.30	
보조기층	15,000	0.40	
노상	5,000	0.45	

2.2 하중 산정

본 해석에 사용된 축하중은 그림 1에 나타낸 바와 같이 하중이 두 개의 wheel을 axle 한 개의 차축에 가해지고 타이어가 닿는 면적이 30cm×30cm라고 가정하였다. 이러한 차축에 작용하는 축하중의 산정은 고속도로에서 축하중 측정기의 오차를 감안하여 허용하는 축하중 11ton 으로 계산한 7.78 kg/cm²을 적용하여 계산하여 적용하였다.

해석위치는 평면상으로는 가로 세로 축대칭을 고려하여 차륜 접지면의 중앙부터 7.5cm 간격으로 5개의 Node에 대하여 고려하고, 포장면에서의 깊이에 따라 표층 표면으로부터 노상 하면의 위치까지 19개 위치에 대하여 해석을 실시하였다.

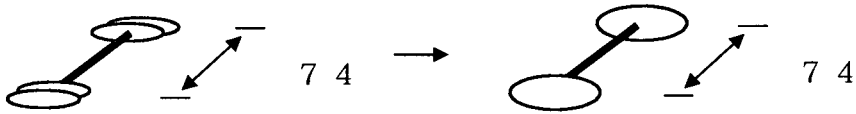


그림 1. 본 해석에 사용된 복륜 차축

2.3 해석 결과

본 연구에서 가정한 단면에 대한 해석 결과는 평면상의 5개 Node에 대하여 포장 표면의 깊이에 따른 수직 응력과 수평 변형율의 변화를 분석한 결과 차륜 접지면 중앙인 Node 1 번 위치에서 수직응력과 수평 변형율이 대부분 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

표 3의 수직 응력의 결과를 살펴보면 차륜 접지면 중앙인 Node 1 번과 Node 2 번 위치에서 포장 표면으로부터의 깊이 0~1.0cm 정도의 위치에서 가장 큰 수직응력이 발생함을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 수직 응력이 가장 크게 발생하는 지점인 포장 표면으로부터의 깊이 0~1.0cm 정도의 위치에서 소성변형의 발생이 시작될 확률이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 또한, Node 1 번과 Node 2 번 위치 하부에서 발생된 최대응력의 크기가 차륜 접지압인 7.78 kg/cm² 보다 다소 크게 발생하는 단면이 있다는 것도 알 수 있었다.

표 3. 포장 단면별 최대 수직응력의 크기 및 발생 위치

단면 번호		1	2	3	4	5	6	7
단면별 최대수직 응력	크기(kg/cm ²)	7.9	9.3	7.7	10.9	8.0	7.8	10.0
	깊이(cm)	0.51	0.76	1.02	0.76	1.02	1.02	1.02

표 4와 그림 2의 분석 결과를 살펴보면 깊이별 수평 변형율의 변화 결과는 차륜 접지면 중앙인 Node 1 번과 Node 2 번 위치에서 포장 표면으로부터의 깊이 0~0.5cm 정도의 위치에서 가장 큰 압축 수평변형율이 발생하고 아스콘 기층 하단에서 가장 큰 인장 수평변형율이 발생됨을 알 수 있다. 또한, 포장 표면 부근 하단에서 발생하는 압축 수평변형율이 아스콘 기층 하단에서 발생하는 인장 수평변형율 보다 더 작은 값을 나타냄을 알 수 있으며, 아스팔트 표층과 아스팔트 기층의 두께가 얇을수록 아스콘층 상단과 하단에서 발생하는 압축과 인장 수평변형율의 크기가 크고 아스팔트 표층과 아스팔트 기층의 합이 커질수록 압축과 인장 수평 변형율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 표 4의 포장 단면별 최대 수평변형율의 크기를 살펴보면 57~361µε의



변형을 범위에 있는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 아스팔트 표층과 기층의 두께의 합이 아스팔트 포장체에서 발생하는 균열에 절대적인 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다.

이러한 사실은 본 연구에서 수행된 빗피로 시험 결과와 결부하여 해석하게 될 때 교통조건에 따른 적절한 단면 두께를 결정하는 데 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

표 4. 포장 단면별 최대 수평변형률의 크기 및 발생 위치

단면번호		1	2	3	4	5	6	7	
아스팔트 단면별 최대수평변형률	상부	크기	3.28E-04	2.00E-04	1.58E-04	1.15E-04	1.11E-04	9.22E-05	5.66E-05
		깊이(cm)	0.51	0.00	0.12	0.00	0.12	0.12	0.00
	하부	크기	3.61E-04	2.55E-04	1.90E-04	1.47E-04	1.17E-04	9.52E-05	7.90E-05
		깊이(cm)	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00	45.00

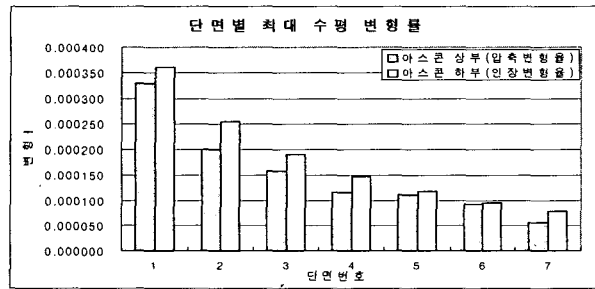


그림 2. 아스팔트 콘크리트층의 상부와 하부의 단면별 수평변형률의 변화 비교

3. 실내시험

본 연구에서는 빗피로 시험을 실시한 혼합물로 국내에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 WC-3(19mm)입도에 대하여 일반적인 아스팔트 함량 5%를 적용하여 빗피로 시험용 공시체를 제작하고 시험을 실시하였다.

3.1 입도합성

본 시험에서는 WC-3 입도에 대하여 입도합성을 위하여 표 5에 나타난 쇄석골재를 사용하여 입도합성을 실시하였다. 표 5와 그림 3은 본 연구에 사용된 아스팔트 혼합물의 골재의 입도합성 및 합성 입도곡선을 나타낸 것이다.

표 5. 본 시험에 적용된 혼합물의 합성 입도

각 골재 부분	사 용 백분율	체 크 기 통 과 백 분 율								
		19mm	13.2mm	9.5mm	#4	#8	#30	#50	#100	#200
19mm	32	32	19.6	8.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1
13mm	10	10	9.8	7.1	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
6mm이하	50	50	50	50	47.5	33.0	16.3	10.7	7.0	4.3
모래	5	5.0	5.0	5.0	5.0	4.9	2.5	0	0.2	0
Filler	3	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.9
합성입도	100	100	87	73.5	56.3	41.3	22.2	14.1	10.4	7.3
입도기준	상한	100	90	80	65	50	30	21	16	8
	하한	95	75	60	45	35	18	10	6	4

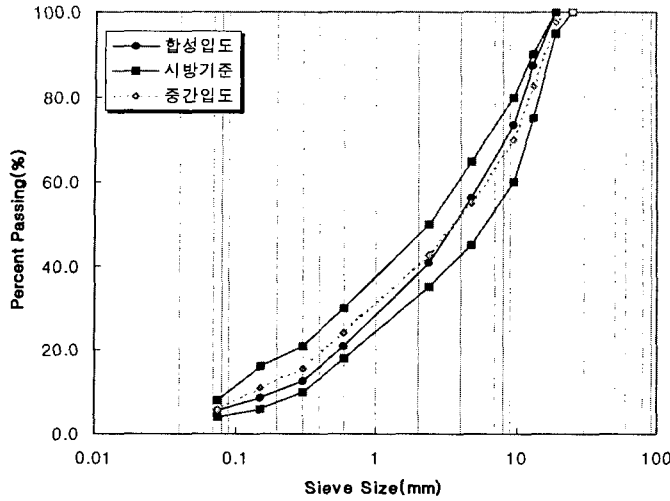


그림 3. WC-3(19mm) 일반 혼합물에 적용된 입도 곡선

3.2 빙피로시험 결과 및 분석

본 연구에서는 이전에 설정된 WC-3 입도에 대하여 아스팔트 함량 5%를 적용하여 제작된 아스팔트 혼합물에 대하여 빙피로시험을 실시하여 피로균열에 대한 공용성을 비교 평가하였다. 본 피로시험은 20°C에서 실시하였고, 시험을 실시하는 동안 정밀한 온도조절을 위하여 온도조절 챔버를 사용하였다. 하중은 5Hz의 주기를 갖는 Haversine 하중을 변위제어(controlled-strain) 방법으로 각 혼합물에 대하여 3개의 하중단계(Load Level)에서 시험을 실시하였다. 시험동안 휴지기(rest period)는 적용하지 않았으며 하중은 혼합물 시편의 휨강성(flexural stiffness)이 초기 휨강성의 50%에 도달할 때까지 연속적으로 가하였다. 이때 초기 휨강성은 시험 시작 후 50번째 사이클에서 시편의 강성을 의미한다.

각 혼합물의 피로시험 데이터를 사용하여 변형률 진폭과 피로수명에 대해 아래 식 1과 같은 일반적인 피로수명 모델식을 사용하여 회귀분석을 실시하였다.

$$N_f = a(\epsilon)^b \quad (\text{식 1})$$

여기서, N_f 는 아스팔트 혼합물의 피로수명이고, ϵ_0 는 초기 인장 변형률이다. a 와 b 는 회귀분석을 통하여 얻어지는 상수들이며, 각 혼합물에 대한 값들을 표 6~표 8에 인장변형률 주기 변화에 따른 시험 결과를 수록하였다.

표 6~표 8과 그림 4의 WC-3 5.0% 아스팔트 혼합물의 피로수명 곡선에 대한 회귀분석 결과를 살펴보면, 2Hz의 주기에서는 시험시간이 낮은 변형률 범위에서 약 6~7일 정도 소요될 뿐만 아니라 10Hz와 5Hz에 비하여 동일한 변형률 레벨에서도 다소 과대 평가되는 것으로 나타났다. 또한 시험결과의 R^2 값이 0.5705로 나타나서 시험결과의 신뢰성도 상당히 떨어지는 것으로 나타났다. 10Hz와 5Hz의 주기에서는 R^2 값이 0.8586와 0.8172로 나타나서 상대적으로 시험결과의 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 또한, 10Hz와 5Hz의 경우도 높은 스트레인 레벨에서는 분산정도가 낮았지만 낮은 스트레인 레벨에서는 다른 스트레인 레벨에 비해 분산정도가 큰 것으로 나타났다.

그러므로 시험시간의 적절성과 분산분석 결과가 가장 좋은 10 Hz의 주파수로 실험을 하는 것이 가장 적합한 것으로 나타나서 이후의 각종 혼합물에 대한 빙피로 시험은 모두 10 Hz의 주기로 실시하기로 하였다.

2장의 포장구조 해석에서 다양한 단면에 대한 Kenlayer computer program을 사용한 해석 결과로부터 본 연구의 빙피로 시험의 피로 수명 예측을 위하여 사용될 물성치로써 각 설정 단면의 수평 변형율을 그림 4의 10Hz에 대한 회귀 분석식에 적용하여 예상 피로수명을 계산하였다. 이러한 계산 결과를 표 9와 그림 5에 나타내었다. 분석결과 그림 5에서 알 수 있는 것처럼 수평변형율이 약 100 $\mu\epsilon$ 이하에서는 가장 두께가 얇은 1번



단면의 피로수명결과 비로써 나타낸 상대수명비가 현저하게 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 현재 국내에서 일반적으로 생산되는 아스팔트 혼합물로서 표층을 시공하고 규정된 차륜의 최대 축하중을 고려할 경우 아스팔트 표층과 기층의 최소 두께가 30cm 이상에서 높은 피로 저항성을 나타내는 것을 알 수 있다.

표 6. 빔 피로시험 결과(10Hz)

주기	시편번호	공극률	Flexual Strain($\mu\epsilon$)	Fatigue Life	a	b	R ²
10Hz	I2	1.1	400	298730	5444.7	-0.1957	0.8586
	I3	0.8	400	429060			
	G3	1.0	400	755150			
	A4	0.6	500	364810			
	E4	0.9	500	116220			
	F4	1.5	500	215010			
	L3	0.9	500	286670			
	C4	0.8	700	57290			
	G1	0.7	700	30960			
G2	0.9	700	38950				

표 7. 빔 피로시험 결과(5Hz)

주기	시편번호	공극률	Flexual Strain($\mu\epsilon$)	Fatigue Life	a	b	R ²
5Hz	D4	1.2	300	809200	9181.9	-0.2386	0.8172
	H4	1.1	400	899480			
	I4	1.1	400	304840			
	A3	1.0	500	176730			
	E1	1.3	500	486170			
	I1	1.5	500	140810			
	L1	1.0	500	148360			
	A2	0.7	700	53470			
	D3	1.4	700	59260			
H4	1.1	700	60530				

표 8. 빔 피로시험결과(2Hz)

주기	시편번호	공극률	Flexual Strain($\mu\epsilon$)	Fatigue Life	a	b	R ²
2Hz	D1	0.7	800	33390	8043.4	-0.2097	0.5705
	F2	0.9	800	46670			
	H2	1.0	800	156400			
	L4	1.0	800	165350			
	L3	0.9	800	225360			
	D2	0.6	600	265380			
	F1	0.8	600	115240			
	K2	0.9	600	247160			
	F3	1.1	400	664680			
	J3	0.9	500	396300			
K1	1.2	500	317860				

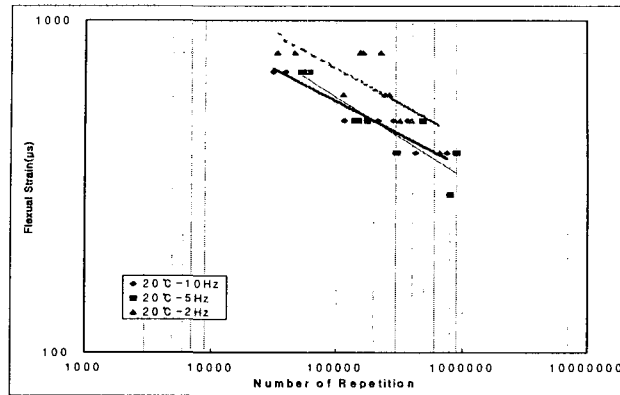


그림 4. 각 혼합물에 대한 피로수명 비교

표 9. 포장 단면별 최대 수평변형율의 크기 및 발생 위치

단면번호	1	2	3	4	5	6	7
아스콘층 두께(cm)	15	20	25	30	35	40	45
포장표면최대수평변형율	3.28E-04	2.00E-04	1.58E-04	1.15E-04	1.11E-04	9.22E-05	5.66E-05
피로수명	1.24E+06	1.08E+07	3.05E+07	1.23E+08	1.44E+08	3.24E+08	2.76E+09
상대수명	1.0	8.8	24.7	99.4	116.1	262.0	2229.6

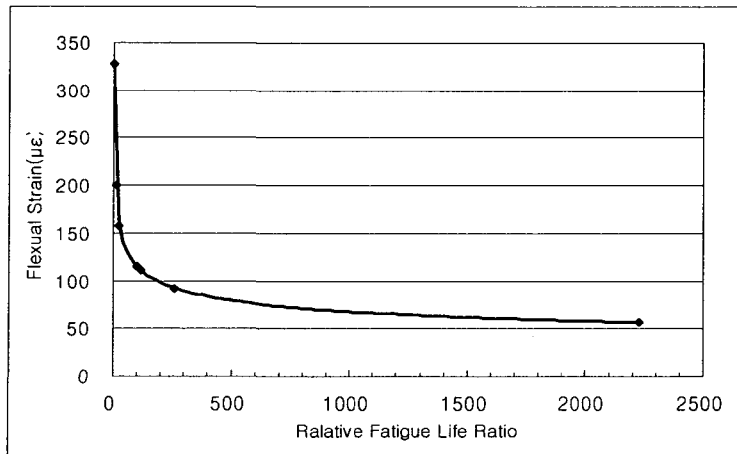


그림 5. 아스팔트 콘크리트층의 상부와 하부의 단면별 수평변형율의 변화 비교

3. 결론

본 연구를 통하여 도출한 결론적인 사항을 언급하면 아래와 같다.

1. WC-3 5.0%의 아스팔트 함량에 대하여 온도 20°C에서 10Hz, 5Hz, 2Hz의 각각의 주기에 대하여 빔피로 시험을 실시한 결과 시험결과의 R² 값이 2Hz의 경우 0.5705로 나타났으며, 10Hz와 5Hz의 주기에서는 R² 값이 0.8586과 0.8172로 나타나서 상대적으로 시험결과의 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 그러므로 시험 시간의 적절성과 분산분석 결과가 가장 좋은 10 Hz의 주파수로 실험을 하는 것이 가장 적합한 것으로 나타나서 이후의 각종 혼합물에 대한 빔피로시험은 모두 10 Hz의 주기로 실시하기로 하였다.



2. 가정된 포장단면에 대한 구조해석 결과 수직 응력의 결과를 살펴보면 차륜 접지면 중앙 위치에서 포장 표면으로부터의 깊이 0~1.0cm 정도의 위치에서 가장 큰 수직응력이 발생함을 알 수 있었다.
3. 가정된 포장단면에 대한 구조해석 결과 깊이별 수평 변형율은 차륜 접지면 중앙 위치에서 포장 표면으로부터의 깊이 0~0.5cm 정도의 위치에서 가장 큰 압축 수평변형율이 발생하고 아스콘 기층 하단에서 가장 큰 인장 수평변형율이 발생됨을 알 수 있다. 또한 포장 표면 부근 하단에서 발생하는 압축 수평변형율이 아스콘 기층 하단에서 발생하는 인장 수평변형율 보다 더 작은 값을 나타냄을 알 수 있으며, 아스팔트 표층과 아스팔트 기층의 두께가 얇을수록 아스콘층 상단과 하단에서 발생하는 압축과 인장 수평변형율의 크기가 크고 아스팔트 표층과 아스팔트 기층의 합이 커질수록 압축과 인장 수평 변형율이 낮아지는 것을 알 수 있었다.
4. 다양한 단면의 포장구조 해석 결과로부터 구해진 각 설정 단면의 수평 변형율을 10Hz에 대한 회귀 분석식에 적용하여 예상 피로수명을 계산한 결과 수평변형율이 약 100 $\mu\epsilon$ 이하에서는 가장 두께가 얇은 1번 단면의 피로수명결과 비로써 나타낸 상대수명비가 현저하게 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 현재 국내에서 일반적으로 생산되는 아스팔트 혼합물로서 표층을 시공하고 규정된 차륜의 최대 축하중을 고려할 경우 아스팔트 표층과 기층의 최소 두께가 30cm 이상에서 높은 피로 저항성을 나타내는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. 이경하, 아스팔트 혼합물의 회복탄성계수 추정모델 개발, 성균관대학교 박사학위논문, 1995
2. 한국도로공사, 골재입도변화에 따른 아스팔트 혼합물 개선 연구, 한국도로공사, 1996
3. 김주원, 최신 아스팔트 포장, 세종문화원, 1993
4. 신공항건설공단, 대본 엔지니어링, 인천국제공항 포장시험시공용역 종합보고서, 신공항건설공단, 대본 엔지니어링, 1998
5. 한국도로공사, 고속도로공사 전문시방서(토목편), 한국도로공사, 1998
6. Asphalt Institute, Mix Design Methods, Asphalt Institute, 1995
7. Asphalt Institute, Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, Superpave Series No.1(SP-1), 1994.
8. Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Lee, P.Y., and Kennedy, T.W., Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, NAPA Education Foundation, 1996.