

오르막 경사구간에서 중차량 속도감소를 고려한 아스팔트 포장구조체 내부거동 분석

Estimation of Asphalt Pavement Internal Behavior under Decreasing Truck Speed on Uphill Lanes

서주원 Seo, Joowon | 정희원 · 한국도로공사 도로교통연구원 박사후연수자 (E-mail : pave@ex.co.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study estimated an asphalt pavement internal behavior under uphill lanes considering reducing speed of heavy truck on uphill slope.

METHODS : Truck performance curve which has been adapted to "Korea Highway Capacity Manual" was analyzed. And asphalt pavement internal behaviors were estimated with Multi-layered elastic analysis using KPRP(Korea Pavement Research Program) dynamic modulus prediction equations.

RESULTS : As a result, it is shown that when the standard truck drives 2.0 km at a speed of 80 km/h in 8% climbing slope, it's speed reduced to 25.4 km/h, at same time frequency in asphalt layer decrease to 67.2% and it's dynamic modulus degrades to 30.9%. Based on these results, internal behavior as decreasing vehicle speed on uphill lanes were estimated.

CONCLUSIONS : From the results of Multi-layered elastic analysis, internal behavior showed that when the standard truck drives 2.0 km at a speed of 80 km/h in 8% slope on uphill lanes, vertical strain was increased to 44.4% at the bottom of surface course, and lateral tensile strain was increased to 20.5% at the bottom of base course.

Keywords

climbing lanes, truck performance curve, loading frequency, asphalt dynamic modulus, multi-layered elastic analysis

Main Author : Seo, Joowon, Researcher
Pavement & Material Research Division, Korea Expressway
Corporation Research Institute, 208-96, Dongbu-daero 922 beon-gil,
Dongtan-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 445-812, Korea
Tel : +82.31.371.3487 Fax : +82.31.371.3369
e-mail : pave@ex.co.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Feb. 17, 2014 Revised Feb. 19, 2014 Accepted Mar. 03, 2014

1. 서론

우리나라는 국토의 70%가 산악지대로 기존 도로 또는 신설되는 대부분의 도로는 종단경사구간을 가지고 있다. 최근 자동차의 오르막 주행능력은 상당히 향상되어 소형 자동차는 오르막경사의 영향을 받는 일이 적어졌지만, 대형 자동차는 오르막경사의 크기와 오르막 주행능력에 따라 주행속도 감소의 정도가 크게 변화하

로 같은 설계속도 구간을 갖는 오르막에서 중·대형 차량의 속도저하는 도로의 지·정체현상의 원인이 되기도 하며, 포장 내부온도가 높을 경우 중차량에 의한 소성변형이 발생하여 포장 조기파손의 원인이 될 수 있다.

도로는 같은 설계속도 구간에서 동일한 주행상태가 유지될 수 있도록 함이 바람직하나, 오르막 경사구간에서는 같은 설계속도 구간이라 할지라도 중차량의 성능

에 따라 동일한 주행상태를 유지시켜 주기 어렵다. 오르막구간의 경우 중차량 혼입률이 높은 구간에서는 중차량 주행속도의 저하로 인해 소성변형 등 아스팔트 포장구조체의 조기파손 확률이 커지게 된다. 이로 인해 오르막구간은 원래의 설계수명에 크게 못 미치고 있는 현실이나, 포장구조설계 시 중차량의 속도감소에 따른 영향을 고려하지 않으므로, 오르막구간에서의 해석 및 공용성 평가가 이루어지지 않는 실정이다.

본 연구에서는 오르막구간에서의 중차량 속도감소 영향을 고려한 아스팔트 포장구조체의 거동분석을 위하여, 오르막구간 경사도에 따라 감소되는 중차량 속도와 하중주파수 및 각 층의 동탄성계수를 산정하고, 이를 이용한 아스팔트 포장구조체의 해석기법을 제안하고자 한다. 제안된 해석기법을 통하여 오르막구간의 포장구조 해석을 실시한 후 실제 일반 고속구간과의 거동변화를 분석하고자 한다.

2. 오르막구간 중차량 속도감소식 산정

오르막차로에서의 중차량 속도변화를 고려하기 위해서는 먼저 오르막차로를 오르는 중차량의 성능곡선에 의한 차량속도변화를 추정해야 한다. 본 연구에서는 중차량의 중량-마력비가 200lb/hp(121.65kg/kw)인 트럭을 표준으로 하여 만들어진 화물차 성능곡선을 이용하여 오르막구간의 중차량 속도변화를 산정하였다(건설교통부, 2006).

Fig. 1은 현재 사용되고 있는 오르막차로 종단길이 산정을 위한 화물차 성능곡선으로서, 최대 8%의 경사를 가지며 200lb/hp의 성능을 갖는 표준트럭이 오르막경사를 진입한 시점부터 속도감속 변화정도를 나타내고 있다. 곡선을 통하여 1~8% 경사도를 갖는 오르막차로에서 표준트럭이 80km/h로 진입했을 시 경사길이에 따른 주행속도 감소정도를 알 수 있으며, 경사길이 2km

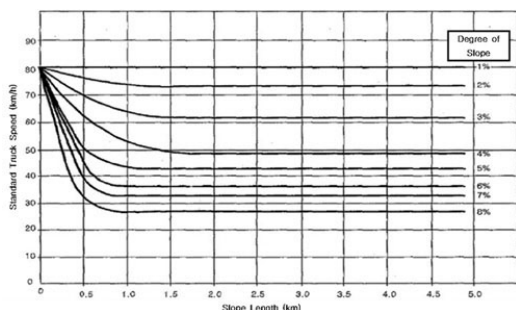


Fig. 1 Performance Curve on Uphill Slope (200lb/hp, Standard Truck)

부근에서 감속속도는 각 경사도에 수렴됨을 알 수 있다. 경사도 1% 구간에서 표준트럭은 속도감속 없이 오르막을 주행할 수 있으며, 2~8% 경사도를 갖는 오르막에서는 속도감속 기울기가 점차적으로 증가하여 8% 경사도에서 최대가 되는 것을 알 수 있다.

오르막차로구간 중차량 속도감소가 아스팔트 포장체에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 1의 곡선을 회귀분석하여 Eq. (1)에 나타내었다.

$$V = c + A_1 \cdot \exp[-(L-b)/t_1] + A_2 \cdot \exp[-(L-b)/t_2] \quad (1)$$

여기서, V : 오르막 차량속도, b, c : 상수, 경사길이

L : 경사길이, A_1, A_2, t_1, t_2 : 영향 계수

경사도에 따른 계수들과 R^2 값은 Table 1과 같다. Eq. (1)의 R^2 값은 0.98 이상으로 이 식을 이용하여 아스팔트 오르막차로를 분석하기 위한 적합성에 문제가 없을 것으로 판단되며 Table 2는 Eq. (1)을 이용하여 나타낸 각 경사도별 경사길이에 따른 속도이다. Table 2를 살펴보면

Table 1. Coefficient of Truck Speed Eq. (1)

Slope Coeff.	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
c	71.8506	60.3001	46.8006	40.8260	33.9018	30.9819	25.3895
b	-0.1353	-0.1082	-0.1196	-0.0670	-0.0667	-0.0654	-0.0667
A_1	5.3410	11.1945	19.2053	41.8003	48.2717	53.8960	45.8085
t_1	0.6435	0.5745	0.5848	0.3736	0.3375	0.2695	0.2416
A_2	4.8573	13.1624	22.0456	6.1716	8.9114	8.7543	26.3105
t_2	0.6435	0.5745	0.5848	0.3736	0.3375	0.2695	0.2416
R^2	0.9954	0.9916	0.9960	0.9879	0.9825	0.9957	0.9987

Table 2. Truck Speed according to Uphill Slope

Slope length (km)	Truck speed according to uphill slope (km/h)							
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
0.5	80.0	75.7	68.8	61.1	51.3	44.6	38.7	32.3
1.0	80.0	73.6	63.8	52.9	43.6	36.3	32.2	26.3
1.5	80.0	72.7	61.8	49.4	41.6	34.5	31.2	25.5
2.0	80.0	72.2	60.9	47.9	41.0	34.0	31.0	25.4
2.5	80.0	72.0	60.6	47.3	40.9	33.9	31.0	25.4
3.0	80.0	71.9	60.4	47.0	40.8	33.9	31.0	25.4
3.5	80.0	71.9	60.4	46.9	40.8	33.9	31.0	25.4
4.0	80.0	71.9	60.3	46.8	40.8	33.9	31.0	25.4
4.5	80.0	71.9	60.3	46.8	40.8	33.9	31.0	25.4
5.0	80.0	71.9	60.3	46.8	40.8	33.9	31.0	25.4

중량 대 마력비가 200lb/hp인 표준트럭이 80km/h의 속도로 아스팔트 오르막차로 경사도 8% 구간을 주행할 경우, 중차량 속도는 점차 감속하여 25km/h에 가까워짐을 알 수 있다. 각 경사도별 오르막차로에 의한 수렴속도는 경사길이 2.0km에서 수렴된다고 가정할 때, 1%에서 80km/h, 2%에서 72km/h, 3%에서 60km/h, 4%에서 47km/h, 5%에서 41km/h, 6%에서 34km/h, 7%에서 31km/h, 8%에서 25km/h에 근접함을 알 수 있다. 또한 경사도가 1% 미만의 경우 속도감소의 영향은 없는 것을 알 수 있다.

3. 오르막구간 중차량속도감소를 고려한 하중 주파수 산정

오르막경사도에 따라 감소되는 중차량의 속도는 아스팔트 포장체 내부에 전달되는 하중지속시간을 길어지게 만들고, 하중지속시간의 증가로 인하여 동일한 포장구간 임에도 불구하고 아스팔트 포장체의 동탄성계수가 감소하게 된다. 따라서 아스팔트 포장구조해석 시 주요 입력 변수인 하중주파수와 온도에 의해 변화되는 아스팔트 동탄성계수를 예측하는데 있어서 속도와 깊이에 따라 변화되는 하중주파수의 크기를 비교하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 중차량의 오르막경사도에 따른 감속속도를 바탕으로 하중주파수 감소곡선을 산정하였다.

Amara Loulizi(2002)는 차량속도 변화가 아스팔트 포장체에 미치는 하중주파수의 영향을 연구하기 위해 Virginia Smart Road에서 12개의 아스팔트 시험도로 구간에 대한 시험계획을 실시하였다. 차량주행속도는 8km/h, 24km/h, 40km/h, 70km/h로 선정하였으며, 계측된 결과를 이용하여 포장 깊이별 하중주파수 영향을 분석하였다. Amara Loulizi(2002)의 연구결과에 의하면 차량속도 변화에 의한 하중주파수가 포장 깊이에 따라 변화하지만 아스팔트 포장 재료와 온도에 의한 하중주파수 변화는 미미하다는 것이 판명되었다.

Joowon Seo et al. (2013)는 Amara Loulizi(2002)의 시험결과를 이용하여 주행차량 속도 변화에 따른 하중지속시간 t 를 이용하여 아스팔트 포장 표면으로부터 42mm, 190mm, 267mm, 419mm, 597mm 깊이에 해당하는 하중주파수를 산정하였다. Fig. 2는 급수형태의 회귀 분석식을 이용하여 차량속도 변화에 따른 깊이별 하중주파수 변화를 나타내었다. 또한, Fig. 2를 이용하여 회귀분석을 통해 깊이별 하중주파수 산정식 Eq. (2)를 제안하였고($R^2=0.99$), 제안된 Eq. (2)를 이용하여 Fig. 3

에 깊이 변화에 따른 속도별 하중주파수를 나타내었다.

$$f_q = 0.919V \times 0.996^d \quad (2)$$

여기서, d 는 표면으로부터의 깊이(mm), V 는 주행차량의 속도(km/hr), f_q 는 하중주파수(Hz)를 각각 나타낸다.

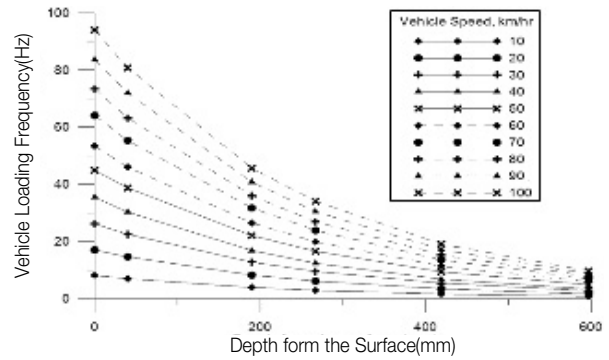


Fig. 2 Vehicle Loading Frequency Along the Depths

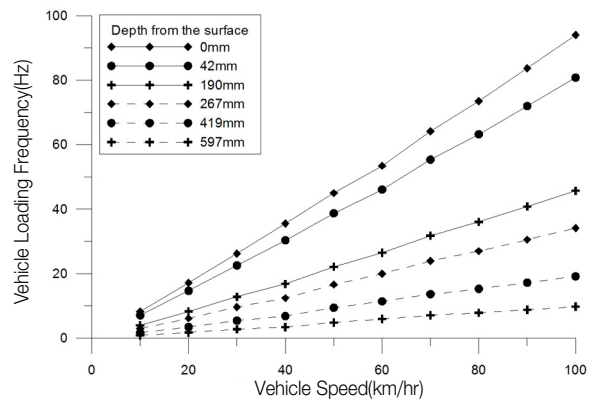


Fig. 3 Vehicle Loading Frequency Along the Vehicle Speeds

Table 3. Example of Loading Frequency under Various Slope (200lb/hp Truck, Surface Course, $d=25$ mm)

Slope length (km)	Loading frequency (Hz) under various slope							
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.0	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5
0.5	66.5	62.9	57.2	50.8	42.7	37.1	32.1	26.9
1.0	66.5	61.2	53.1	44.0	36.2	30.2	26.8	21.8
1.5	66.5	60.4	51.4	41.1	34.5	28.6	25.9	21.2
2.0	66.5	60.0	50.6	39.8	34.1	28.3	25.8	21.1
2.5	66.5	59.9	50.3	39.3	34.0	28.2	25.8	21.1
3.0	66.5	59.8	50.2	39.1	34.0	28.2	25.8	21.1
3.5	66.5	59.8	50.2	39.0	33.9	28.2	25.8	21.1
4.0	66.5	59.8	50.1	38.9	33.9	28.2	25.8	21.1
4.5	66.5	59.7	50.1	38.9	33.9	28.2	25.8	21.1
5.0	66.5	59.7	50.1	38.9	33.9	28.2	25.8	21.1

제안된 Eq. (2)를 이용하여 오르막구간에서 화물차 감속에 따른 하중주파수의 변화 값을 산정할 수 있다. 일반적으로 표층의 두께를 50mm라고 가정할 경우 표층 중앙부에서 오르막차로 중차량의 속도감소로 인한 하중 주파수의 값은 Table 3과 같으며 경사도와 속도에 따른 하중주파수 감소곡선을 그려보면 Fig. 4와 같다. Fig. 4를 살펴보면 표준트럭이 경사도가 가장 높은 8% 오르막을 2.0km 주행 시 하중주파수는 66.5Hz에서 21.1Hz로 67.2% 만큼 감소됨을 알 수 있었다.

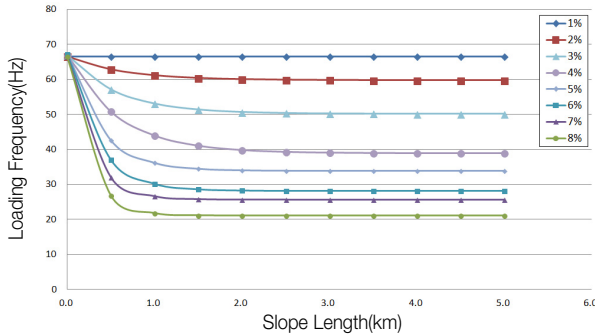


Fig. 4 Example of Loading Frequency Decreasing Curves (200lb/hp Truck, Surface Course, d=25mm)

4. 오르막구간의 중차량 속도감소에 의한 아스팔트층 동탄성계수 산정

4.1. 동탄성계수 기본방정식

한국형포장설계법에서는 국내 아스팔트 재료에 대한 동탄성계수 예측식을 개발하였다(국토해양부, 2011). 동탄성계수 예측식의 각 파라미터들은 표층용 혼합물, 기층용 혼합물 및 SMA 혼합물을 대상으로 산정되었으며, 아스팔트 바인더의 경우 PG 58-22, 64-22 및 76-22에 대하여 산정되었다. 한국형포장설계법에서 개발된 동탄성계수 예측방정식은 Eq. (3)에 나타내었다.

$$\log_{10}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma(\log_{10} f_r + c(\log_{10} \eta - \log_{10} \eta_{fr}))}} \quad (3)$$

여기서, E^* : 동탄성계수, $\delta, \alpha, \beta, \gamma, c$: 재료상수,

f_r : 하중주파수, η : 관심온도에서의 점도,

η_{fr} : 21°C에서의 점도

4.2. 포장구조해석을 위한 표준단면 선정

현재 신설되는 아스팔트 고속도로포장은 대부분 표층 50mm, 중간층 70mm의 단면을 가지며, 아스팔트 기층

은 교통량 및 중차량 혼입비율에 따라 최소 100mm 부터 최대 250mm의 두께를 가진다. 보조기층은 일반적으로 400mm의 두께를 가지며 노상은 최소 1000mm 이상의 두께를 가진다. 본 연구에서는 아스팔트 포장구조체의 내부거동이 가장 클 것으로 예상되는 최소단면을 Table 4와 같이 선정하였다. 또한 각 층의 재료로는 일반적으로 많이 사용되는 입도를 사용하였고, 바인더 등급은 고속도로용 혼합물에서 가장 많이 사용되는 PG 64-22로 가정하였다.

포아송비는 아스팔트층(표층, 중간층 및 기층) 0.3, 보조기층 0.35 및 노상 0.4로 가정하였고, 아스팔트 동탄성계수 추정 시 사용한 온도는 여름철 최고온도를 모사하기 위하여, 표층, 중간층 및 기층 중앙부의 온도를 각각 60°C, 50°C 및 40°C로 가정하였다. 선정된 단면의 혼합물 종류, 두께, 포아송비 및 각 층 중앙부의 대표온도는 Table 4에 정리하여 나타내었다.

Table 4. Standard Cross-Section for MLE Analysis

Layers	Thickness (mm)	Poissons' ratio	Types of mixture	Temp. (°C)
Surface course	50	0.30	13mm HMA	60
Intermediate course	70	0.30	20mm HMA	50
Base course	100	0.30	25mm HMA	40
Subbase	400	0.35	-	-
Subgrade	1000	0.40	-	-

* Using PG 64-22 AP Binder

4.3 오르막구간의 중차량 속도감소에 의한 아스팔트층 동탄성계수 산정

오르막구간 중차량 속도감소에 의한 아스팔트층 각 층의 동탄성계수를 산정하기 위하여 한국형포장설계법에서 개발된 동탄성계수 예측식과 재료상수를 이용하였다(국토교통부, 2011). 표층과 중간층 및 기층은 Table 4에 나타난 바와 같이 13mm 밀입도, 20mm 밀입도 및 25mm 밀입도 혼합물로 가정하였고, 각 혼합물에 대한 재료상수

Table 5. Coefficients of Dynamic Modulus of Each Layer (MLTM, 2011)

Coefficients of dynamic modulus	13mm HMA	20mm HMA	25mm HMA
δ	2.2990	3.0621	3.3064
α	2.2755	1.4655	1.3077
β	-1.0054	-0.2013	0.0214
γ	0.5677	0.8517	0.7355
c	1.1230	0.9328	0.8334

δ, a, β, γ 및 c 를 Table 5에 정리하여 나타내었다. 각 층의 공극률은 평균 공극률인 4%를 적용하였다. 각 층의 혼합물에 대한 재료상수를 이용하여 동탄성계수 예측방정식으로부터 산정된 동탄성계수 마스터커브는 Fig. 5와 같다.

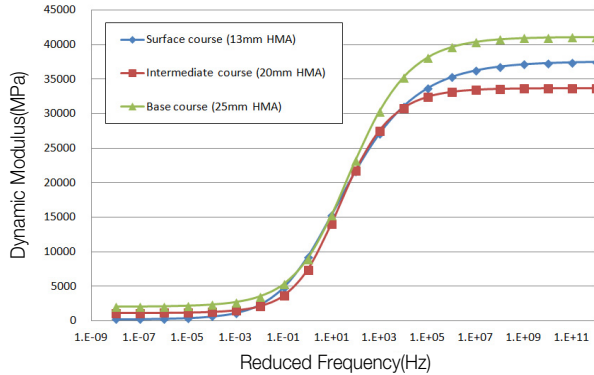


Fig. 5 Dynamic Modulus Master Curves of Each Layer

Table 4 및 Table 5를 이용하여 표층과 중간층 및 기층 각 층에서 오르막구간 중차량 속도감소에 의한 동탄성계수를 산정하여 Table 6~Table 8에 나타내었다. 동탄성계수는 오르막경사, 오르막경사의 지속길이, 각 층의 온도 및 혼합물 종류에 따라 각각 다른 값을 보이며, 경사도가 높을수록, 경사 지속길이와 길수록 작은 값으로 산정되었다. 특히 온도가 가장 높고 표면에서 가장 가까운 표층의 경우, Table 6을 살펴보면 일반 평지 구간에서 시속 80km로 주행하는 중차량에 의한 동탄성계수는 3037MPa로 산정된 반면, 오르막경사 8%를 2km 정도 주행한 후의 동탄성계수는 2098MPa로 약 31% 감소하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 6은 표준트럭의 성능곡선을 이용한 오르막구간 경사도에 따라 변화하는 동탄성계수의 일례를 나타내었다.

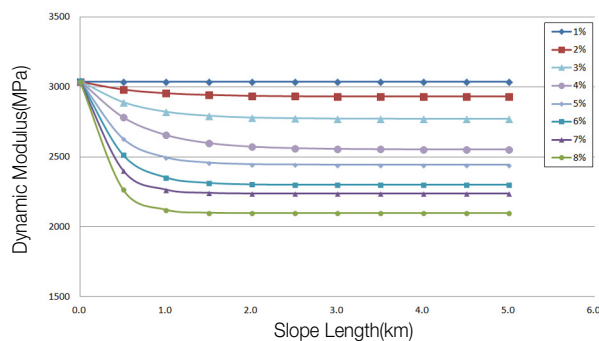


Fig. 6 Example of Dynamic Modulus Decreasing Curves (200lb/hp Truck, Surface Course, T=60°C)

Table 6. Dynamic Modulus of Surface Course(MPa)

Slope length (km)	Degree of uphill slope							
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.0	3037	3037	3037	3037	3037	3037	3037	3037
0.5	3037	2983	2892	2784	2631	2515	2402	2267
1.0	3037	2956	2823	2657	2496	2353	2264	2122
1.5	3037	2944	2794	2599	2459	2315	2241	2101
2.0	3037	2938	2781	2573	2447	2304	2237	2098
2.5	3037	2935	2776	2563	2445	2302	2237	2098
3.0	3037	2934	2773	2558	2444	2302	2237	2098
3.5	3037	2934	2773	2556	2444	2302	2237	2098
4.0	3037	2934	2772	2554	2444	2302	2237	2098
4.5	3037	2934	2772	2554	2444	2302	2237	2098
5.0	3037	2934	2772	2554	2444	2302	2237	2098

Table 7. Dynamic Modulus of Intermediate Course(MPa)

Slope length (km)	Degree of uphill slope							
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.0	4132	4132	4132	4132	4132	4132	4132	4132
0.5	4132	4066	3955	3822	3637	3499	3366	3207
1.0	4132	4033	3870	3669	3477	3308	3205	3041
1.5	4132	4018	3834	3599	3433	3264	3178	3017
2.0	4132	4010	3818	3569	3419	3251	3173	3014
2.5	4132	4007	3813	3556	3417	3249	3173	3014
3.0	4132	4006	3809	3550	3414	3249	3173	3014
3.5	4132	4006	3809	3548	3414	3249	3173	3014
4.0	4132	4006	3808	3546	3414	3249	3173	3014
4.5	4132	4006	3808	3546	3414	3249	3173	3014
5.0	4132	4006	3808	3546	3414	3249	3173	3014

Table 8. Dynamic Modulus of Base Course(MPa)

Slope length (km)	Degree of uphill slope							
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
0.0	8262	8262	8262	8262	8262	8262	8262	8262
0.5	8262	8153	7969	7747	7433	7192	6958	6673
1.0	8262	8099	7827	7487	7154	6855	6668	6367
1.5	8262	8075	7768	7367	7076	6775	6620	6322
2.0	8262	8061	7741	7314	7052	6752	6610	6317
2.5	8262	8056	7732	7292	7048	6747	6610	6317
3.0	8262	8053	7726	7281	7044	6747	6610	6317
3.5	8262	8053	7726	7278	7044	6747	6610	6317
4.0	8262	8053	7723	7274	7044	6747	6610	6317
4.5	8262	8053	7723	7274	7044	6747	6610	6317
5.0	8262	8053	7723	7274	7044	6747	6610	6317

5. 오르막구간의 중차량 속도감소에 의한 아스팔트층 내부거동 분석

다층탄성이론은 1943년 Burmister에 의해 개발된 이론으로 개발 당시에는 두 층으로 구성된 단면을 해석할 수 있도록 만들어졌으나 컴퓨터의 발달과 더불어 다층해석이 가능하도록 발전하였다(Huang, 1993). 다층탄성이론은 수평방향으로 무한하다는 가정과 다층해석이 가능하다는 점 때문에 아스팔트 포장을 해석하는 가장 일반적인 방법으로 사용되었으며, 이 이론을 토대로 한 수치해석 프로그램으로 CHEVRON, DAMA, ELSYM5, BISAR, KENLAYER 등이 개발되어 널리 사용되고 있다. 본 연구에서도 현재 아스팔트 포장구조 해석에 기본적으로 사용되는 다층탄성해석기법을 활용하였으며, 사용된 프로그램은 차량의 주행속도 변화에 따른 아스팔트 포장체의 공용성 평가기법 연구(한국도로공사, 2007)에서 개발된 다층탄성해석 프로그램을 이용하였다.

한국형포장설계법의 개발이 완료되었으나, 현재까지도 우리나라의 도로 설계 및 해석에 주로 사용되고 있는 AASHTO 설계법은 차륜의 접지압이 5.8km/cm²인 8.2ton 단축하중을 표준 축하중으로 하고 있다. 본 연구에서는 접지반경이 15cm이고, 접지압이 5.8kg/cm²인 원형 등분포하중이 작용하는 해석모델을 이용하여 표면, 아스팔트 각 층 하단부 및 노상상단 총 5개소에서 수직변위, 수직변형률, 수평변형률을 산정하였다.

Table 2에 나타낸 바와 같이 오르막차로 성능곡선을 참조하여 주행속도 변화를 계산한 후, 주행속도별 하중주파수를 산정하고, 산정된 하중주파수와 각 층의 혼합물 재료 및 온도를 이용하여 아스팔트 동탄성계수를 산출하였다. 이렇게 산정된 동탄성계수를 다층탄성해석에 사용하여 아스팔트 포장구조해석을 실시하였다. 다층탄성해석 프로그램을 이용한 아스팔트 포장구조해석 결과를 Table 9~Table 11에 나타내었다. 해석위치는 표면과 아스팔트 각 층의 하단부 및 노상 상단부로 선정하였으며, 수직변위와 수직변형률 및 수평변형률을 각각 산정하였다. Fig. 7은 시속 80km 주행구간에서의 포장체 내부거동을 기준으로, 오르막경사도 증가에 따른 아스팔트 표면의 수직변위, 표층 하단과 노상 상단의 수직변형률 및 기층 하단 인장변형률의 증가율을 나타낸다.

Fig. 7을 살펴보면 오르막경사도가 증가할수록 변위와 변형률이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 오르막경사 증가에 따른 수직변형률의 증가가 가장 민감한

것으로 나타났다. 수직변위의 경우 모든 수직변위가 중첩되는 표면에서 가장 큰 값이 나오며, 8% 경사를 가지는 오르막구간 주행 시 최대 10.5% 증가하는 것을 알 수 있었다. 아스팔트 포장구조체 소성변형에 가장 큰 영향을 미치는 수직변형률의 경우에는 표층 하단에서 최대 44.4%의 증가를 보였다. 또한 아스팔트 포장구조체 균열에 가장 큰 영향을 미치는 수평 인장변형률의 경우, 기층 하단에서 최대 20.5%가 증가함을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 도출된 거동분석 결과로부터, 중차량 혼입률이 높은 구간의 오르막경사구간에서 여름철 고온상태의 아스팔트포장체는 중차량에 의하여 최대 1.44배에 달하는 수직변형률의 증가를 가져옴을 확인할 수 있었고, 이는 소성변형 발생확률을 증가시킬 수 있으므로 포장두께의 설계 재검토 및 개질아스팔트 사용 등을 통한 소성변형저감대책이 특히 고려되어야 할 것으로 판단된다.

Table 9. Results of Displacement under Various Uphill Slopes(mm)

Uphill slope Location	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Surface	0.205	0.207	0.210	0.215	0.217	0.221	0.223	0.226
Bot. of Wearing	0.201	0.203	0.206	0.210	0.212	0.215	0.217	0.220
Bot. of Intermediate	0.196	0.198	0.201	0.204	0.206	0.209	0.210	0.213
Bot. of Base	0.192	0.193	0.196	0.199	0.201	0.204	0.205	0.208
Top of Subgrade	0.136	0.137	0.138	0.139	0.140	0.141	0.142	0.143

Table 10. Results of Vertical Strain under Various Uphill Slopes ($\mu\epsilon$)

Uphill slope Location	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Surface	137.2	141.8	149.8	161.6	169.2	178.9	184.3	195.5
Bot. of Wearing	141.8	147.0	155.4	168.5	175.6	187.2	191.9	204.7
Bot. of Intermediate	67.6	69.9	73.9	79.9	83.3	88.0	90.3	95.6
Bot. of Base	70.2	71.7	74.1	77.8	79.8	82.5	83.9	87.0
Top of Subgrade	130.0	132.0	134.0	138.0	140.0	142.0	143.0	146.0

Table 11. Results of Lateral Strain under Various Uphill Slopes (Tensile strain : (+), $\mu\epsilon$)

Uphill slope Location	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
Surface	-91.3	-93.1	-96.1	-100.0	-103.0	-106.0	-108.0	-111.0
Bot. of Wearing	-44.2	-45.0	-46.4	-48.5	-49.6	-51.2	-51.9	-53.7
Bot. of Intermediate	-5.9	-6.1	-6.5	-7.1	-7.4	-7.8	-8.0	-8.5
Bot. of Base	74.1	75.5	77.7	81.1	82.9	85.4	86.6	89.3
Top of Subgrade	51.3	51.9	52.9	54.4	55.1	56.2	56.7	57.8

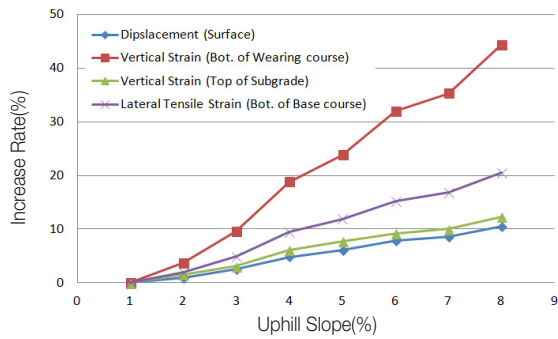


Fig. 7 Increase Rate of Internal Behavior under Uphill Slope (%)

6. 결론

본 연구에서는 오르막구간 경사도에 따라 감소되는 중차량 속도를 고려한 아스팔트 포장구조체의 해석기법을 제안하고, 제안된 해석기법을 통하여 오르막구간의 포장구조해석을 실시한 후 실제 일반 고속구간과의 거동차이를 살펴보았다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 중차량 성능곡선을 이용하여 오르막구간 중차량 감소에 따른 하중주파수의 변화를 산정한 결과 두께 50mm를 가지는 아스팔트 표층의 중앙부에서 경사도와 속도에 따른 하중주파수 감소는 경사도 8%의 오르막에서 일반 고속구간 대비 66.5Hz에서 21.8Hz로 67.2% 만큼 감소됨을 알 수 있었다.
2. 한국형포장설계법 동탄성계수 예측방정식을 활용하여 오르막구간 중차량 속도감소에 의한 동탄성계수를 산정하였다. 동탄성계수는 오르막경사, 오르막경사의 지속길이, 각 층의 온도 및 혼합물 종류에 따라 각각 다른 값을 보이며, 경사도가 높을수록, 경사 지속길이가 길수록 작은 값으로 산정되었다. 특히 온도가 가장 높고 표면에서 가장 가까운 표층의 경우, 일반 평지구간에서 시속 80km로 주행하는 중차량에 의한 동탄성계수는 3037MPa로 산정된 반면, 오르막경사 8%를 2km 정도 주행한 후의 동탄성계수는 2098MPa로 약 31% 감소하는 것을 볼 수 있었다.

3. 동탄성계수 예측식에 의하여 산정된 아스팔트층 각 층의 동탄성계수를 이용하여 다층탄성해석을 실시하였다. 오르막경사도가 증가할수록 변위와 변형률이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 오르막경사 증가에 따른 수직변형률의 증가가 가장 민감한 것으로 나타났다. 수직변위의 경우 모든 수직변위가 중첩되는 표면에서 가장 큰 값이 나오며, 8% 경사를 가지는 오르막구간 주행 시 최대 10.5% 증가하는 것을 알 수 있었다. 아스팔트 포장구조체 소성변형에 가장 큰 영향을 미치는 수직변형률의 경우에는 표층 하단에서 최대 44.4%의 증가를 보였다. 또한 아스팔트 포장구조체 균열에 가장 큰 영향을 미치는 수평인장 변형률의 경우, 기층 하단에서 최대 20.5%가 증가함을 확인할 수 있었다.

References

- Amara Loulizi, 2002. "Measurement of Vertical Compressive Stress Pulse in Flexible Pavement", Transportation Research Board, TRR 1816, TRB, Washington, D.C., pp.125-136.
- Huang, Y. H., 1993. Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall Inc.
- Joowon Seo, Youngho Kim, Jaeyeon Cho and Sangseom Jeong, 2013. "Estimation of in situ dynamic modulus by using MEPDG dynamic modulus and FWD data at different temperatures", International Journal of Pavement Engineering, vol. 14, no. 4, pp. 343-353.
- Korea Expressway Corporation, 2007. Development of Analysis System for Asphalt Pavement Structures under Various Vehicle Speeds, Korea Expressway Corporation.
- Ministry of Construction and Transportation, 2006. Highway capacity Manual, Ministry of Construction and Transportation.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011. Quantification of the design input variables, KPRP-D-11, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- (국토해양부, 2011. "설계입력변수 정량화", 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 3단계 3차년도 최종보고서.)