

오르막 차로의 주행차량 속도변화를 고려한 아스팔트 포장구조체 해석기법 개발

Development of Asphalt Pavement Analysis System under Decreasing Vehicle Speed on Climbing Lanes

서주원¹⁾ · 김보경²⁾ · 최준성³⁾ · 김수일⁴⁾ · 김형배⁵⁾

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

1. 서 론

오르막차로란 상향 구배에서 속도가 저하된 차량을 분리하여 주행시키기 위해 본선에 부가된 차로를 의미하는 것이라고 '도로의 구조·시설 기준에 관한 규정' 제2조 6항에 정의되어 있다. 평지부 도로에서는 차종간의 속도차가 적어서 차종에 관계없이 일정한 속도를 유지할 수 있어 교통 용량과 서비스수준을 일관되게 유지할 수 있다. 그러나 오르막구간에서는 단위 마력당 중량이 높아 오르막능력이 떨어지는 대형차가 저속 주행을 함으로써 전체 교통류에 영향을 주게 되며 구배, 구배 길이, 대형차 혼입률 등에 따라서는 심각한 정체 현상을 초래하기도 한다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 오르막구배부에 화물차 등 오르막능력이 떨어지는 저속 차량을 다른 차량과 분리하여 통행시키기 위하여 오르막차로를 설치한다.

오르막 차로의 경우 주행속도 저하와 더불어 중대형 중차량의 통행이 주로 이루어지므로 이에 따른 아스팔트 포장구조체 조기파손 확률이 커지게 된다. 따라서 오르막 차로의 경우 원래의 설계수명에 크게 못미치고 있는 현실이나, 현재 많이 사용하고 있는 포장설계법에서는 주행차량의 속도변화에 따른 영향을 고려하지 못하므로 오르막 차로 구간에서의 해석 및 평가가 이루어 지지 않는 실정이다.

본 연구에서는 주행차량의 속도변화에 따른 아스팔트 포장구조체의 해석기법을 개발하고, 개발된 해석기법을 활용하여 오르막 차로 구간의 포장구조해석을 실시한 후 실제 일반 고속구간과의 거동차이를 살펴보고자 한다. 또한 산정된 거동에 의한 공용성 평가를 실시하여 오르막 차로 구간과 일반 고속구간에서의 잔존수명을 비교하고자 한다.

2. 주행속도 변화를 고려한 아스팔트 포장구조체 해석기법

2.1 차량 주행속도에 따른 하중주파수 산정식 개발

Amara Loulizi(2002)의 연구결과에 의하면 주행차량의 속도변화에 의한 하중주파수는 포장 깊이에 따라 변화하지만 아스팔트 포장 재료와 온도에 의한 하중주파수 변화는 거의 없다고 밝혔다. Amara Loulizi(2002)의 현장에서의 여러 가지 시험결과를 이용하여 본 연구에서는 차량속도 변화에 따른 깊이별 하중주파수 산정식을 Bell-shaped 정규분포곡선으로 제안하였다. 하중지속시간을 이용하여 회귀분석을 통해 깊이별 하중주파수 산정식 식 (1)을 제안하였고, 표 1은 식 (1)의 계수 a, b를 나타낸다. 제안된 식 (1)을 이용하여 그림 1

*정회원, 연세대학교 토목공학과·박사과정·02-312-5101 (E-mail : pooh@yonsei.ac.kr)

**비회원, 연세대학교 토목공학과 석사과정·공학사·02-312-5101 (E-mail : brosbobo201@yonsei.ac.kr)

***정회원, 인덕대학 토목환경설계과 부교수·공학박사·02-950-7565 (E-mail : soilpave@induk.ac.kr)

****정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수·공학박사·02-2123-2800 (E-mail : geotech@yonsei.ac.kr)

*****정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원·공학박사·031-371-3437 (E-mail : kimhyun3@freeway.co.kr)

에 깊이 변화에 따른 속도별 하중주파수를 나타내었다.

$$\text{Frequency}(f) = ae^{bd} \quad (1)$$

여기서, a, b = 하중주파수 함수의 영향 계수

d = 포장 표면에서의 깊이 f = 하중주파수 (Hz)

표 1. 속도변화에 따른 해석 입력변수

속도(km/h)	10	20	30	40	50
a	8.2083	17.0644	26.1878	35.4908	44.9309
b	-0.00382	-0.00383	-0.00376	-0.00394	-0.00373
속도(km/h)	60	70	80	90	100
a	53.3884	64.1274	73.425	83.6579	94.0141
b	-0.00369	-0.0037	-0.00375	-0.00378	-0.0038

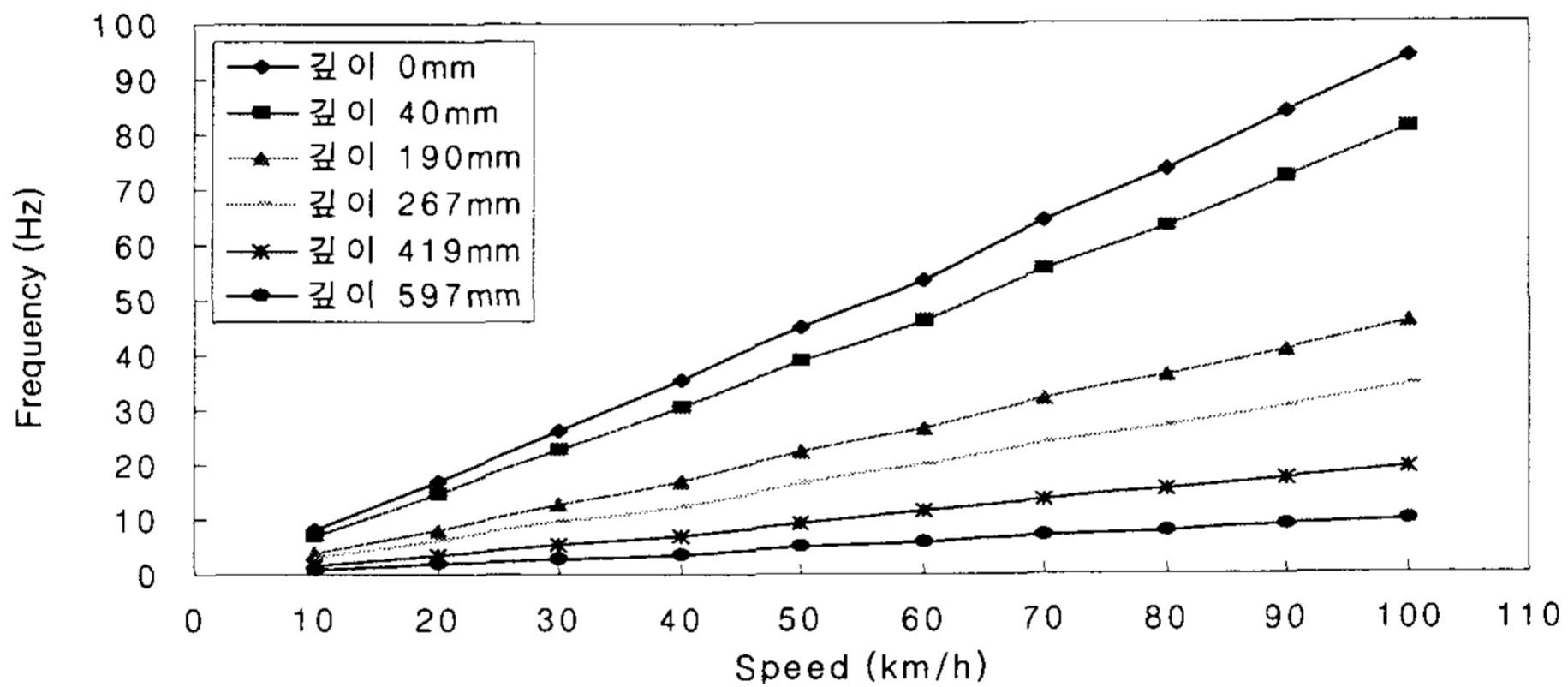


그림 1. 깊이 변화에 따른 속도별 하중주파수

2.2 온도 및 하중주파수에 의한 영향을 고려한 아스팔트 층분할 기법 제안

아스팔트 콘크리트 포장구조체의 아스팔트층 거동특성에 영향을 미치는 요인은 크게 온도와 하중주파수 변화에 의한 아스팔트층의 물성변화이다. 아스팔트 콘크리트층의 내부온도는 기상, 아스팔트 콘크리트층 하부구조 상태 등의 환경요인에 의한 외부조건, 그리고 아스팔트 콘크리트층 자체의 고유물성에 의한 내부조건에 의하여 영향을 받는다. 아스팔트 콘크리트층의 응력-변형률 관계를 나타내는 물성은 온도와 하중주파수에 밀접한 관련을 갖고 있다. 따라서 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 해석시에는 아스팔트 콘크리트층의 온도와 하중주파수에 따른 물성의 변화를 고려하여야 한다. 즉, 아스팔트 콘크리트층의 탄성계수는 온도변화와 하중주파수에 따라 그 물성을 달리하며, 이와 같은 변화특성은 다양한 실내 동탄성시험을 통한 마스터커브와 쉬프트팩터로 이루어진 탄성계수 변화모델로부터 추정될 수 있다. 아스팔트층은 온도변화가 매우 큰 I 구간, 변화기울기가 완만한 II 구간, 변화정도가 미비한 III 구간등 세 구간으로 구분되어질 수 있다. 본 연구에서는 도로설계시 아스팔트층의 온도변화와 하중주파수 변화에 따른 물성의 비선형성을 다층탄성해석에서 고려하기 위한 방법으로, 다음과 같은 방법을 이용하고자 한다(최준성, 2004).



- ① I 구간 : 온도 영향이 큰 10cm구간으로 2.5cm씩 구분하여 온도의 영향을 고려하도록 한다. 단 표층과 중간층 또는 기층 경계선이 걸리는 경우, 중간층과 기층의 탄성계수 차이가 크지 않은 점으로 고려하여 표층 경계면에서 구분되도록 하였다.
- ② II구간 : 온도변화 기울기가 완만한 10cm 구간으로, 5cm 씩 구분하도록 하였다.
- ③ III구간 : 변화정도가 미비한 구간으로, 10cm 씩 구분하도록 하였으며, II구간과 경계면이 될 경우 5cm 이하는 5cm 구간에 흡수되며, 5cm 이상에서는 그대로 하나의 층을 형성하도록 하였다.

2.3 온도 및 하중주파수에 의한 아스팔트층 물성산정

2.3.1 동탄성계수

아스팔트 혼합물은 하중재하 속도와 온도에 따라 강성이 달라지는 점탄성 혼합물이다. 따라서 시간별 온도의 변화 및 차량의 속도 등을 고려하여야 보다 정확히 혼합물의 탄성계수를 산정할 수 있으며, 이를 아스팔트 혼합물의 동탄성계수(Dynamic Modulus)라 한다.

2.3.2 동탄성계수 시험

동탄성계수 시험은 5개의 다른 온도 및 5개의 하중주파수를 이용하여 표 2와 같은 시험온도, 하중조건 및 변형량을 적용하였다. 시험에 이용된 시편은 선회다짐기를 이용하여 직경 150mm, 높이 160mm 원통형 시편을 제작한 후, 코어링(coring)하여 직경 100mm, 높이 150mm 원통형 공시체를 시험용 시편으로 이용하였다.

2.3.3 마스터 곡선

동탄성계수 시험으로부터 얻어지는 동탄성계수는 시험온도 및 하중의 조합에 따라 각각의 값을 얻을 수 있다. 이것을 하중시간과 온도의 중첩(Superposition Principle)원리를 적용하여 마스터곡선(Master Curve)을 작성할 수 있다. 표준온도에서의 동탄성계수 곡선을 선택한 후 다양한 온도에서 시험한 동탄성계수를 하나의 매끈한 곡선이 될 때까지 하중 시간에 관하여 변환(shift)한다. 본 연구에서는 시험도로 재료에 대한 실내동탄성계수시험을 참조하여 표준온도를 5°C 로 하였다. 이러한 방법으로 생성된 하중주파수의 함수로서의 마스터 곡선은 하중시간에 관련된 재료특성을 나타낸다. 마스터곡선을 생성하기 위하여 각 온도에서 변이된 양은 온도에 관련된 재료특성을 나타낸다. 그러므로 하중주파수와 온도의 영향을 고려한 재료입력 물성치를 나타내기 위해서는 마스터곡선과 변환함수(shift factor)의 결정이 필요하다. 위에서 기술한 방법으로 생성된 한국도로공사 시험도로 재료에 대한 마스터곡선과 변환함수를 그림 2에 나타내었다(한국도로공사 도로교통기술원, 2006).

표 2. 동탄성계수 시험항목 및 시험조건

시험항목	시험온도(°C)	주파수(Hz)	응력상태	변형량(μ strain)
Dynamic Complex Modulus	-10, 5, 20, 40, 55	25, 10, 1, 0.1, 0.05	선형	< 150

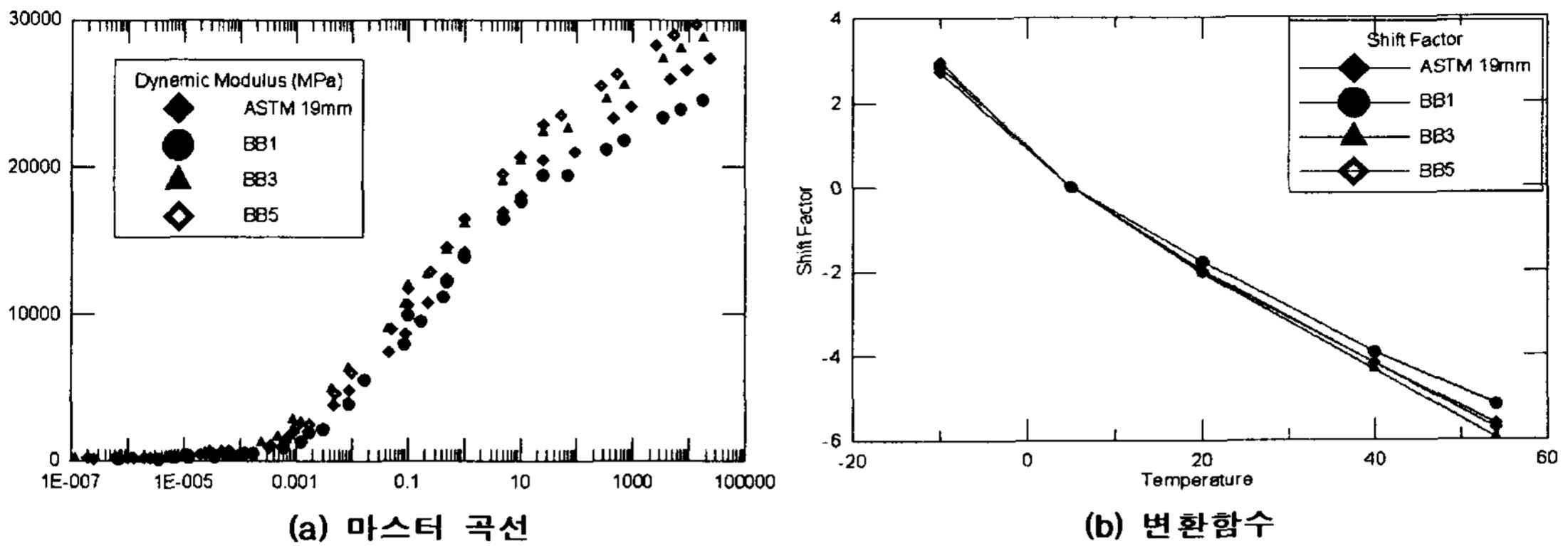


그림 2. 한국도로공사 시험도로 아스팔트 재료의 동탄성계수 시험결과

2.3.4 동탄성계수 기본 방정식

Pellinen(2001)에 의해 제안된 새로운 방법은 Sigmoidal 함수를 이용하여 마스터곡선을 결정하는 것으로, 이 함수는 측정된 동탄성 계수를 비선형최소자승법을 이용하여 처리하며, 기본방정식은 식 (2)와 같다.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp^{\beta - \gamma \log(f_r)}} \quad (2)$$

여기서, $\log(|E^*|)$ = 로그 함수값의 동탄성 계수 f_r = 기준온도에서의 하중 주파수

δ, α = 회귀분석계수

β, γ = sigmoidal 함수의 shape parameter

회계변수인 δ 와 α 는 골재의 분포도, 아스팔트 함량, 공극률에 관련이 변하며, sigmoidal 함수의 shape parameter인 β 와 γ 는 아스팔트특성과 δ 와 α 의 크기에 관련되어 있다. 본 연구에서는 한국도로공사 시험도로의 아스팔트 재료에 대한 실내 동탄성계수 시험자료를 이용하여 각 재료에 대한 파라미터인 δ , α , β , 그리고 γ 값을 회귀분석을 통하여 산정하였으며, 회귀분석을 통해 산정된 각 파라미터를 표 3에 정리하였다.

표 3. 회귀분석을 통한 시험도로 아스팔트 재료의 동탄성계수 방정식 파라미터

아스팔트 재료	δ	α	β	γ
ASTM 19mm	4.406514	-2.3213916	2.195622	-0.73791
BB1	4.351934	-2.3762177	2.443006	-0.84755
BB3	4.440245	-2.5725973	2.393264	-0.67078
BB5	4.456671	-2.5775309	2.345364	-0.70833

2.3.5 변환함수 (Shift Factor)

변환함수는 다양한 온도에서 수행된 동탄성계수를 기준온도에서의 마스터 커브를 생성하기 위하여 커브의 변이가 발생하는데 이 변환량을 함수로 나타낸것을 변환함수라고 한다. 본 연구에서는 기준온도와 임의의 온도에서의 아스팔트 점성을 이용하여 변환함수를 정의하였으며, 식 (3) 과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 시험도로 아스팔트 재료의 동탄성계수 시험 시 기준온도인 5°C 를 기준온도로 정하였다. 본 연구에서는 한국도로공사 시험도로의 아스팔트 재료에 대한 실내 동탄성계수 시험자료를 이용하여 각 재료에 대한 파라미터인 a, b, c 그리고 d 값을 회귀분석을 통하여 산정하였다. 3차 Polynomial 함수를 이용한 회귀분석을 통



해 산정된 각 파라미터를 표 4에 정리하였다.

$$\text{Shift Factor} = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (3)$$

여기서, Shift Factor = 변환함수 a, b, c, d = 회귀분석계수 T = 임의의 온도 (°C)

표 4. 회귀분석을 통한 시험도로 아스팔트 재료의 변환함수 파라미터

아스팔트 재료	a	b	c	d
ASTM 19mm	8.77E-01	8.96E-01	8.53E-01	8.25E-01
BB1	-1.83E-01	-1.71E-01	-1.77E-01	-1.70E-01
BB3	2.26E-03	1.95E-03	1.93E-03	1.73E-03
BB5	-2.08E-05	-1.61E-05	-1.81E-05	-1.43E-05

2.3.6 동탄성계수 예측방정식을 이용한 아스팔트 물성 산정

아스팔트 혼합물은 온도와 차량속도에 의해 지대한 영향을 받으므로 이를 이들 온도요소와 차량에 의한 하중 주파수를 고려한 재료물성을 입력변수로 사용하는 것이 중요하며 이는 각기 다른 온도와 하중주파수에 의해 결정되는 아스팔트 혼합물의 탄성계수로서 동탄성계수를 이용하였다.

본 연구에서는 주행차량의 속도를 고려한 아스팔트층의 물성을 산정하기 위하여 먼저 아스팔트 층분할 기법을 이용하여 아스팔트 층을 최대 10개의 층으로 분할을 실시한 후, 각 층에서의 실측 온도 혹은 깊이별 온도 예측식으로부터 산정된 온도를 입력하였다. 또한 주행차량 속도와 분할된 각 층의 중앙지점에서의 깊이 에 따라 변화하는 각 층에서의 하중주파수를 하중주파수 산정식으로부터 계산하였다. 산정된 하중주파수를 그림 3과 같이 각 층에서의 온도에 따라 변환함수를 이용하여 5°C 기준에서의 하중주파수로 변환한 후 동탄성계수 방정식을 이용하여 동탄성계수를 산정한다. 산정된 동탄성계수는 주행차량 속도와 아스팔트층 내부 온도를 고려한 아스팔트층의 물성으로, 이를 이용하여 포장구조해석을 실시하게 된다.

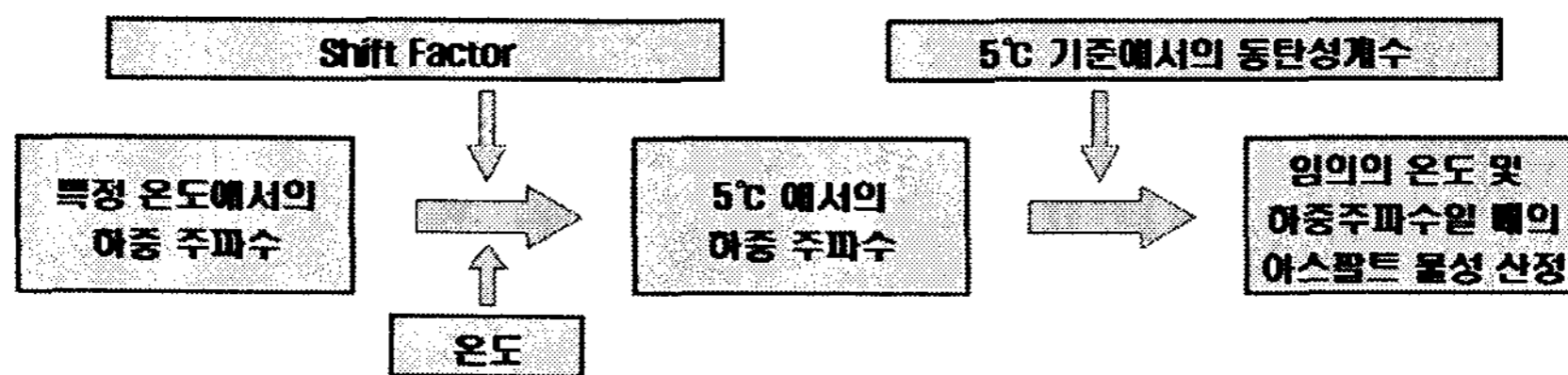


그림 3. 동탄성계수 방정식과 변환계수를 이용한 물성산정 흐름도

3. 오르막 차로의 주행차량 속도변화를 고려한 아스팔트 포장구조체 해석기법

3.1 오르막 차로에서의 화물차 성능곡선

오르막 차로에서의 중차량 속도변화를 고려하기 위해서는 먼저 오르막 차로를 오르는 중차량의 성능곡선에 의한 차량속도변화를 추정해야 한다. 우리나라에서 현재 사용하고 있는 화물차성능곡선은 기본적으로 미국 '84 AASHTO 지침과 동일하다. 그림 4는 국내에서 지금까지 사용해오고 있는 감속곡선을 보여주고 있는데, 표준트럭 300lbs/HP의 성능을 기준으로 작성되었다(한국도로공사 도로연구소, 1996).

그림 4를 살펴보면 오르막 차로는 최대 9%의 경사를 가지며, 300lbs/HP의 성능을 가지는 표준트럭이 오르막 경사가 3, 6, 및 9%인 길이 1km 의 오르막 차로를 주행 할 경우 주행속도는 각각 55, 25 및 17km/h로 감속됨을 알 수 있다.

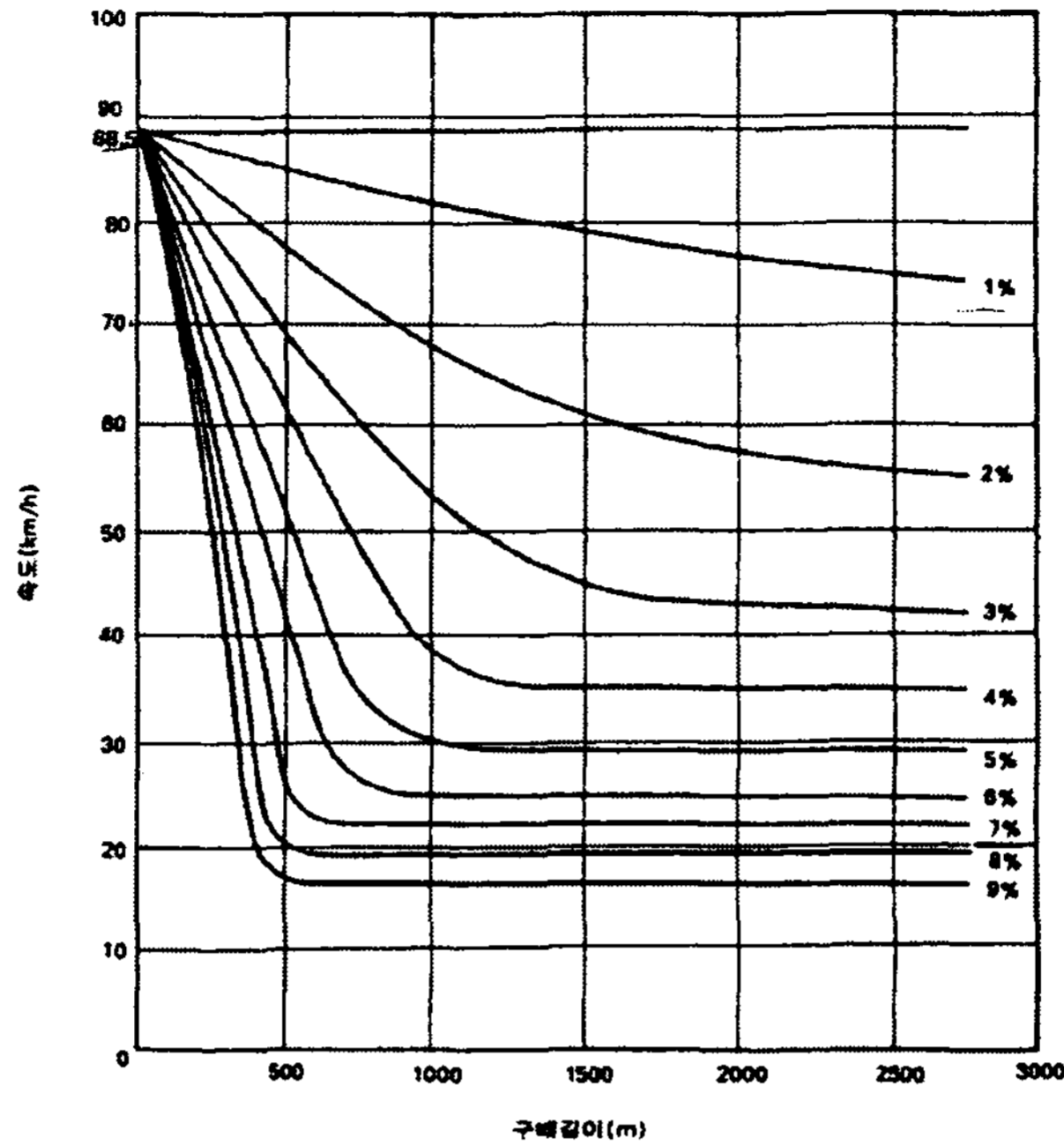


그림 4. 우리나라의 오르막 차로 감속곡선

3.2 오르막 차로 속도변화를 고려한 해석방안 제시

본 연구에서 개발한 주행차량의 속도변화에 따른 아스팔트 포장구조체의 해석시스템을 이용하여 오르막 차로 구간의 주행속도 변화를 고려한 포장구조해석을 실시하여, 실제 일반 고속구간과의 거동차이를 살펴보기 위하여 그림 5와 같은 해석 및 비교절차를 제안하고자 한다. 300lbs/HP의 성능을 가지는 표준트럭이 오르막 경사가 3, 6, 및 9% 인 길이 1km 의 오르막 차로를 주행 할 경우 주행속도는 각각 55, 25 및 17km/h 로 감속됨을 알 수 있었고, 이때의 포장구조해석결과를 일반 고속구간에서의 100km/h 속도일 때와 비교를 실시하고자 한다. 그림 5에서 보이는 바와 같이 오르막 차로의 경사 변화에 따른 주행차량의 속도변화에 따라 아스팔트 포장구조해석을 실시 한 후, 구조해석결과를 이용하여 공용성 평가를 실시한다. 공용성 평가결과로 산정된 잔존수명을 이용하여 일반 고속구간과 오르막 차로 구간과의 차이를 살펴보고자 한다.

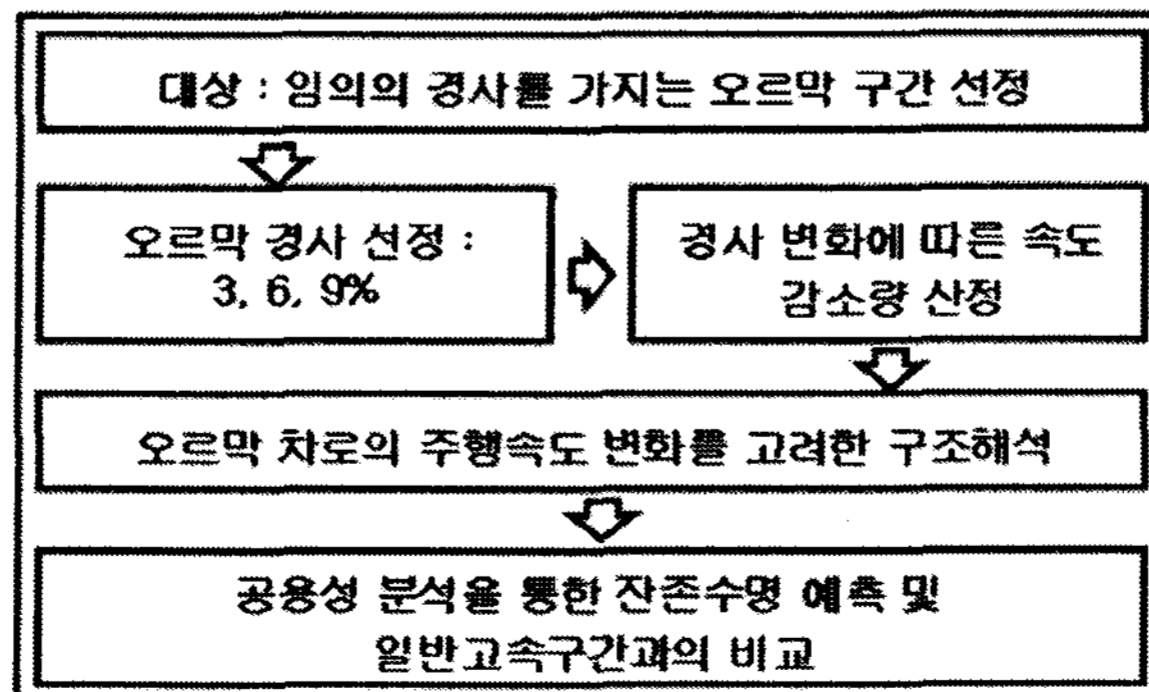


그림 5. 오르막 차로 속도변화를 고려한 해석방안



그림 5의 과정을 통해 아스팔트 공용성 분석을 실시하였다. 공용성 분석은 Asphalt Institute에서 제시한 파괴기준식을 이용하여 변형률 결과에 의한 잔존수명 평가를 실시하였으며, 공용성 분석결과를 표 5에 나타내었다(Asphalt Institute, 1982). 일반 구간에서 900만대의 잔존수명을 보이는 아스팔트 포장구조체라도, 오르막 경사가 9%가 될 경우 주행차량의 속도 감소효과로 인해 450만대로 잔존수명이 감소하여, 원래의 설계 수명보다 50% 감소하는 효과가 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 해석결과를 바탕으로 오르막 차로 설계 시 비슷한 공용성을 갖도록 하기 위해서는 평균 구간속도 개념을 도입하여 설계를 하고 평가를 실시하는 것이 필요하다고 판단된다.

표 5. 오르막 차로 구간에서의 공용성 분석 결과

파괴기준식	잔존수명 (백만대)			
	오르막 차로 구간 경사			일반구간
	9 %	6 %	3 %	0 %
Asphalt Institute	4.5	5.4	7.2	9.0

4. 결 론

본 연구에서는 주행차량의 속도변화에 따른 아스팔트 포장구조체의 해석기법을 개발하기 위하여 실제 현장시험결과를 이용한 주행속도 변화에 따른 하중주파수 산정식을 개발하였다. 또한 한국도로공사 시험도로의 아스팔트 재료에 대한 동탄성계수 시험결과로부터 온도와 하중주파수 변화에 따른 아스팔트 물성추정식을 산정하였다. 주행차량 속도변화를 고려할 수 있는 다층탄성해석기반의 아스팔트 포장구조체 해석기법을 개발한 후, 개발된 해석기법을 활용하여 다양한 경사를 가지는 오르막 차로 구간의 화물차 성능곡선을 기반으로 오르막 차로에서의 주행차량 속도변화에 따른 포장구조해석을 실시한 후 실제 일반 고속구간과의 거동차이를 살펴보았다. 또한 산정된 거동에 의한 공용성 평가를 실시하여 오르막 차로 구간과 일반 고속구간에서의 잔존수명을 비교하였다. 잔존수명 비교결과 오르막 차로 구간경사가 9% 일 때 공용성은 일반 평지구간에 비해 절반 수준으로 감소하는 것을 알 수 있었고, 이러한 해석결과를 바탕으로 오르막 차로 설계 시 비슷한 공용성을 갖도록 하기 위해서는 평균 구간속도 개념을 도입한 두께설계 및 평가를 실시하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2007년 한국도로공사 도로교통기술원과의 공동연구과제인 “차량의 주행속도 변화에 따른 아스팔트 포장체의 공용성 평가기법 연구(3차년도)”의 일부 결과로서, 본 연구가 성공적으로 수행되도록 지원하여준 한국도로공사 도로교통기술원에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Amara Loulizi. (2002), "Measurement of Vertical Compressive Stress Pulse in Flexible Pavement", Transportation Research Board, TRR 1816, TRB, Washington, D.C., pp.125-136.
2. Asphalt Institute (1982), "Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1)", Asphalt Institute, Research Report 82-2.
3. Yang, H.H. (1993), Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall.
4. 최준성 (2004), "온도 및 응력의 비선형성을 고려한 해석방안 개발", 아스팔트 포장 설계법 개발 연구 최종보고서, G5, 건설교통부.
5. 한국도로공사 도로교통기술원 (2006), 시험도로 아스팔트포장의 장기공용수명 예측을 위한 점탄소성 유한요소모델의 개발, 한국도로공사 도로교통기술원.
6. 한국도로공사 도로연구소 (1996), 화물차 성능 조사 분석 연구, 한국도로공사 도로연구소