

아스팔트 혼합물 반복주행 시험에서 합리적 동적안정도의 산정 방법

Development of Feasible Dynamic Stability in Wheel Tracking Test for Asphalt Concrete Mixtures

김 광 우* 도 영 수**

Kim, Kwang Woo Doh, Young Soo

Abstract

Dynamic stability (DS) in the wheel tracking (WT) test is used as a basic index of rut-resistance for asphalt mixtures. In general, the deeper rut depth is obtained from the weaker mixture, resulting in the lower DS value. On the other hand, the shallower rut depth is obtained from the stronger mixture, resulting in the higher DS. However, it is not always the case when the DS is calculated by the existing method because the DS is simply determined based on the slope at the final stage of the rut depth-cycle curve. Specifically, in the case of the depth-cycle curve showing a steeper slope in the early part but flatter slope in last part, the DS is calculated to be higher than the curve showing a ever-increasing slope throughout the test. As long as the last part of slope is flatter, the deeper final rut depth is evaluated to show a higher DS than the little final rut depth. Therefore, a reasonable method for DS evaluation need to be established. Several new methods were suggested by considering the early, middle and final parts of rut depth to determine a reasonable DS. The results have shown that those new methods have demonstrated a significant improvement in distinguishing similarly performing mixtures. The result also showed that DS_2 had better correlation with S_D than any other methods, representing the rutting resistance of asphalt mixture very well. The new DS calculation method is relatively simple and easy to follow. More validation study is required for practical application.

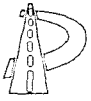
Keywords : dynamic stability (DS), wheel tracking, rut depth, existing method, new methods, correlation

요 지

휠트래킹 시험으로 얻어지는 동적안정도는 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 나타내는 기본 척도로서 사용된다. 일반적으로 아스팔트 혼합물의 침하깊이가 클수록 동적안정도는 작고 반면에 침하깊이가 얇을수록 높은 동적안정도를 얻는다. 그러나 기존의 동적안정도의 산출방법은 단지 침하깊이-주기 곡선의 마지막 단계의 기울기에 근거하여 결정하기 때문에 항상 이와 같지는 않다. 특히 초기 단계에 깊게 침하되었어도 마지막 단계에서 완만한 기울기의 곡선을 보이는 혼합물의 동적안정도는 최종적으로는 침하가 덜 깊으나 점진적으로 균등하게 침하되는 혼합물보다 더 높은 동적안정도가 산출되어 더 좋은 혼합물로 계산되는 모순이 있다. 즉, 기존 방법은 침하깊이-주기 곡선에서 마지막 부분의 기울기보다 완만하면, 최종 침하깊이가 큰 혼합물의 동적안정도가 얇은 혼합물의 동적안정도보다 더 큰 것으로 산출된다. 따라서 합리적인 동적안정도의 산출 방법의 확립이 필요하다. 본 연구에서는 합리적인 동적안정도를 결정하기 위하여 침하깊이의 초기, 중기, 마지막 단계를 고려한 몇 가지의 동적안정도의 산출 방법을 제시하였다. 제시된 새로운 산출 방법이 변형강도와 좋은 상관성 및 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 잘 나타냈다. 또한 새로운 방법은 계산이 비교적 쉽고 간단하다.

핵심용어 : 휠트래킹 시험, 동적안정도, 침하깊이, 기존 방법, 새로운 방법

* 정희원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사
 ** 정희원 · 강원대학교 석재복합신소재연구센터 책임연구원 · 공학박사



1. 서론

아스팔트 혼합물의 반복주행 (Wheel tracking: WT) 시험에서는 세로 (y)축을 침하깊이(Depth: D), 가로 (x)축을 반복회수(cycle)로 하는 D-cycle 곡선이 얻어지며 국내에서는 이 곡선으로부터 동적안정도(Dynamic stability: DS)를 계산하여 혼합물의 소성변형 저항성을 판정하는 근거로 활용한다. D는 WT 궤적의 침하깊이로 단순 길이 값(mm)이나 DS는 단위 침하깊이를 유발하는데 소요되는 바퀴의 왕복횟수를 나타내는 값으로 곡선 기울기 역수의 개념이다. 따라서 일반적으로 재질이 물러 깊게 침하되는 혼합물은 D가 크고 D-cycle 곡선의 기울기가 급하므로 그 역수인 DS는 작게 된다. 반면 혼합물이 소성변형에 강하면 D가 얇아 기울기가 완만하므로 DS가 크게 나타나는 것이 정상이다.

하지만 기존의 계산 방법으로는 D가 얇은 혼합물의 DS가 더 깊어 들어가는 혼합물 보다 적게 계산되어 더 나쁜 혼합물로 판정되는 경우가 있다^(3,5). 즉, 현재의 KS 방법은 D-cycle 곡선에서 거의 끝 단계의 데이터만을 활용하므로 이러한 문제가 일어난다. 특히 초기에 깊게 침하되었어도 말기의 곡선 기울기가 완만한 혼합물은 그에 비해 최종적으로는 덜 깊으나 점진적으로 균등하게 침하되는 혼합물보다 DS가 높으므로 더 좋은 것으로 계산되는 모순이 있다.

하지만 아스팔트 혼합물은 특성상 초기에 많은 침하가 일어나도 시간이 지나 다져지고 경화되면 추가 침하 속도가 완만해지는 것이 일반적인 현상이므로 초기에 많이 침하되는 것은 좋지 못한 혼합물이다. 즉, 다짐불량, 바인더 취약, 골재 불량 등으로 일어나는 조기 침하는 무시하고 말기 곡선의 기울기에만 근거해 DS를 산정하는 것은 문제이다. 따라서 DS 계산 방법은 개선되어야 하고 또한 최종 침하깊이 상한치를 설정하여 그 수치도 판정기준에 포함되어야 할 것이다.

이를 위해서는 혼합물의 초기 압밀을 포함한 중,

후반 변형이 모두 고려되도록 산정방법을 개선하여 DS가 공용성과 상관성이 높게 함으로써 가능할 것이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점의 해결에 착안하여 혼합물의 특성이 보다 일관되게 반영될 수 있는 합리적인 동적안정도 산정방법을 개발 제시하는 것을 본 연구의 목적으로 하고 있다.

2. 기존 동적안정도 계산의 문제점

기존 DS의 문제점을 그림 1에서 최종 침하깊이가 같은 3 그룹의 6가지 혼합물의 wheel tracking 곡선을 비교하면서 분석해 보자. 각각의 그룹에서 두 혼합물의 최종 침하깊이는 거의 같다. 하지만 위쪽의 실선 혼합물 들(그룹 1: A1, B1, C1)은 초기에 큰 침하가 일어나고 시간이 가면서 침하 변화율이 완만해지는 반면 아래 점선 혼합물들(그룹 2: A2, B2, C2)은 초기에는 침하가 적게 일어나나 침하가 지속적으로 유지된다. 이를 최종침하깊이가 5mm인 중간 그룹에서 보다 자세히 분석해 보자. B1 혼합물은 초기 500 cycle에 이미 2.5mm 이상이 들어가 최종 침하깊이의 반 이상이 침하된 반면 B2는 500 cycle에 1.5mm가 들어가 전체의 30% 이하가 침하되었다. 그리고 3,600 cycle(끝 회)에서 B2 혼합물의 침하깊이가 B1과 같으나 초기 침하 후 직선구간의 기울기는 더 크므로 기존 (KS) 방법으로는 B1이 더 좋은 것으로 나타난다.

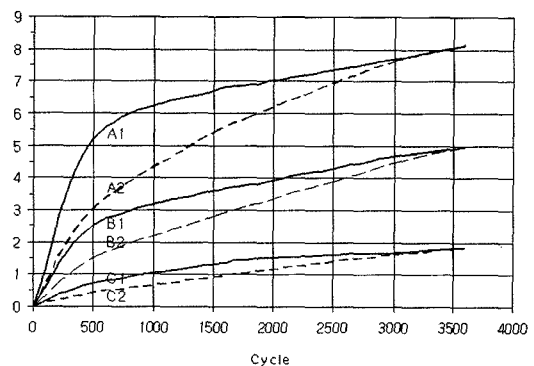


그림 1. 3그룹 6종류 혼합물의 wheel tracking 시험결과 비교



같은 방식으로 A1과 B2를 비교해 보면 더 극명하게 문제점을 알 수 있다. 즉, A1은 500cycle에서 깊이가 5.2mm 로 B1의 최종 침하보다도 깊고 전체 침하의 65% 이상이 발생하였다. 또한 최종 침하도 8mm 이상으로 B2 보다는 현저히 불량한 혼합물 입에도 후반부 곡선의 기울기가 B2 보다는 완만하므로 DS가 높게 계산된다.

만일 그림과 같은 결과가 현장에서 3년(36개월) 간에 걸쳐 일어난 소성변형이라 가정한다면 현장 공용성은 어떠할까. B1 혼합물은 초기 약 6개월 (600 cycle) 만에 3년간 발생할 소성변형의 1/2 이상이 발생하며 1년 (1,200 cycle)만에 약 2/3 정도 발생하고 그 상태에서 시간이 지남에 따라 변형 깊이가 점점 더 커진다. 반면 B2 혼합물은 6개월 만에 약 1/3 이하, 1년 만에 약 1/2 가까이 소성변형이 발생하고 그 상태에서 시간이 지남에 따라 변형 깊이가 점점 더 증가된다. 1년 정도 시간이 지나서 증가하는 정도는 B2 혼합물이 다소 더 크지만 3년까지는 여전히 B1의 침하깊이가 더 깊고 3년이 되면 거의 같아진다. 반면 A1 혼합물은 초기 약 6개월에 전체의 2/3 가 발생하며 1년 만에 약 75% 이상 발생하고 3년 후 최종 깊이도 B2보다 훨씬 깊은 8mm 이상이다.

이런 경우 공용성 측면에서 어떤 혼합물이 더 좋고 할 수 있겠는가? B1, B2 비교시 소성변형 깊이로 본다면 B1 혼합물은 초기에 깊은 변형이 발생하여 공용성이 나빠진다. 반면에 B2 혼합물은 중단기적으로는 소성변형 깊이가 낮아 공용성이 상대적으로 좋고 장기적으로는 소성변형이 증가되면서 공용성이 B1과 같아질 것이다. 따라서 최종적으로는 둘 다 소성변형 깊이가 같아지겠지만 B1은 초기부터 나쁘고, 반면에 B2는 중단기간에서는 상대적으로 더 좋고 일정 기간이 지난 후에 나빠지니 그래도 B2가 더 유리하다 하겠다. A1과 B2의 비교는 상대가 안 될 정도로 A1의 공용성이 불량한 혼합물이다.

만일 최종 침하깊이의 정도가 아주 낮아 장기적으로도 문제가 없는 C1이나 C2 같은 수준이라면 두 가지 다 큰 문제가 없겠지만 그 외 경우에는 상기의

설명이 맞을 것이다. 특히 국내와 같이 조기 소성변형이 큰 문제가 되는 현실에서 본다면 B2는 비교적 양호한 포장이고 A1과 B1은 초기부터 문제 있는 포장이 될 수 있다. 특히 A1 같은 경우는 초기에 전체 깊이의 2/3 가 들어가므로 특히 문제가 있다고 보여진다.

아스팔트 혼합물은 특성상 초기에 많은 침하가 일어나도 시간이 지나면서 다져지고 바인더의 경화가 진행되면 추가 침하 속도가 완만해지는 것이 일반적인 현상이다. 따라서 초기 침하가 심하게 일어나는 것은 근본적으로 혼합물에 문제가 있는 것이며, 그 원인으로는 다짐불량, 배합불량, 부적절한 재료 등을 들 수 있다. 하지만 기존의 동적안정도 산정 방법은 A1이 A2는 물론 심지어 B2보다도 더 높은 DS가 얻어져 조기 불량 혼합물이 오히려 좋은 것으로 간주되는 문제가 있다.

3. 새로운 동적안정도 계산 방법

이러한 문제점 해결을 위해 김광우 등⁽²⁾은 D-cycle 곡선에서 접선 기울기 변화가 최대가 되는 점을 택하여 그 부분을 중심으로 전반 곡선과 후반 곡선으로 나누어 이를 동적안정도 산정에 반영하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해서 식 (1)과 같은 지수함수 모델을 채택하여 그림 2와 같이 침하량 변위가 최대가 되는 점을 구한다.

$$y = A1(1 - e^{-\frac{x}{T1}}) + A2(1 - e^{-\frac{x}{T2}}) \quad (1)$$

여기서, : x 회 (cycle)
 T1, T2 : 시간
 A1, A2 : 상수

그림 2에서 보는 바와 같이 한 그래프에 대하여 두 개의 방정식이 나오는데, 두 방정식이 교차하는 D점이 최대 침하 변위가 되는 곳이다. 이 D점을 구하기

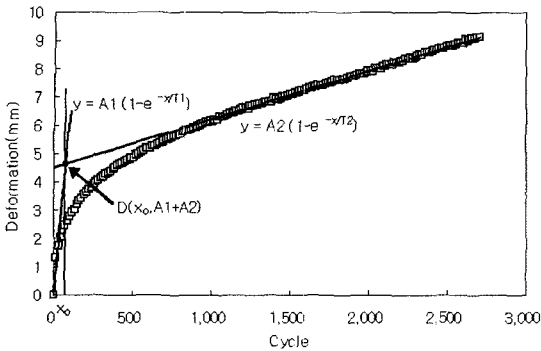


그림 2. A graph showing equation of each slope

위해서는 복잡한 과정을 수행하여야 한다. 즉,

① 식(1)를 한번 미분을 하면 $y(0)' = \frac{A1}{T1} + \frac{A2}{T2} \equiv m$

② $x \rightarrow \infty, y = A1 + A2$

③ x_0 를 $y = mx$ 와 $y = A1 + A2$ 가 만나는 점의

x 축이라고 할 때

$$\therefore x_0 = \frac{A1 + A2}{m} \quad (2)$$

여기에서 값을 구하기 위해서는 수치해석 프로그램을 이용한 곡선 맞춤(curve fitting)으로부터 $A1, A2, T1, T2$ 값을 구한 다음, 식(2)를 이용하여 구하여야 한다.

이 동적안정도 산정 방법도 또한 KS 방법(기존 방법)과 일본도로공사에서 제시된 산정 방법보다 더 정확한 것으로 나타났다. 그러나 이 방법은 수치해석 프로그램을 이용한 곡선 맞춤(curve fitting)을 하여 여러 변수를 찾아야 하는 매우 복잡하고 번거로움이 있다. 따라서 본 연구에서는 이 복잡하고 번거로운 산정 방법을 대신해서 보다 간편하고 계산이 쉬운 방법들을 제시하고자 한다.

최근 한국형 포장설계법 연구에서 제시한 WT 시험 개정(안)에서는 100psi 운하중 압력을 분당 40회 왕복(cycle)으로 총 90분간 3,600cycle을 수행하도록 하였다. 기존의 방법은 최종 15분간(본 시험방법으로는 3,000부터 3,600cycle까지)의 기울기만을 가지고 DS를 결정한다. 하지만 반복주행시험은 대부

분 초기 압밀과정이 끝난 후 일정한 기울기를 가지는 변형과정을 거치게 된다. 시험 결과 초기 압밀은 대부분 500cycle(12.5분)까지 마무리 되는 것으로 판단되었으며 그 이후 3,600cycle까지의 곡선은 선형에 가까운 형상을 가진다. 본 연구에서는 이와 같은 반복주행 시험에서 얻어진 데이터를 이용하여 몇 가지 합리적인 동적안정도 계산방법을 제시해보고자 한다.

앞 절에서 설명하였듯이 기존 KS 방법은 마지막 단계의 정보만을 사용하므로 생기는 문제점을 해결하기 위해서는 곡선의 기울기 정보를 보다 많이 활용하는 것이 필요하다. 즉, 전체곡선을 가능한 여러 구간으로 나누고 그 구간의 선형회귀분석을 통해 기울기를 구하거나, 그림 2와 같이 시점과 종점의 기울기를 구해 그 평균을 사용하면 보다 곡선의 특성이 잘 반영된 동적안정도를 구할 수 있을 것이다. 하지만 앞서 언급하였듯이 시점이 끝나는 점을 잡기가 어렵고 수치해석 등이 번거로우므로 이런 여러 가지를 고려하여 본 연구에서는 보다 간편한 몇 가지 동적안정도 계산 방법을 제시하고 이를 비교 검토하였다.

3.1 평균 침하깊이 법

본 연구에서는 원점에서 시작하여 초기 압밀이 끝나는 500cycle부터 1,000cycle 간격으로 그리고 끝점인 3,600cycle까지 4점의 침하깊이 평균치를 근거로 계산하는 방법을 사용도록 하였다. 즉, 그림 3과 같이 500, 1,500, 2,500, 3,600cycle에서의 침하깊이를 측정하고 이를 더해서 4로 나눈 평균으로 3,600cycle을 나눈 값을 동적안정도로 제시하여 초기 변형부터 전체적인 혼합물의 변형이 고려되도록 하였다. 그러므로 이는

$$DS_1(\text{cycle/mm}) = \frac{3,600}{D_{\text{mean}}} = \frac{3,600}{(D_{500} + D_{1,500} + D_{2,500} + D_{3,600})/4}$$

이며, 이는 다시 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$DS_1(\text{cycle/mm}) = \frac{14,400}{(D_{500} + D_{1,500} + D_{2,500} + D_{3,600})} \quad (3)$$



여기서 D_{500} = 500cycle 에서의 침하깊이 (mm)
 $D_{1,500}$ = 1,500cycle 에서의 침하깊이 (mm)
 $D_{2,500}$ = 2,500cycle 에서의 침하깊이 (mm)
 $D_{3,600}$ = 최종 cycle 에서의 침하깊이 (mm)

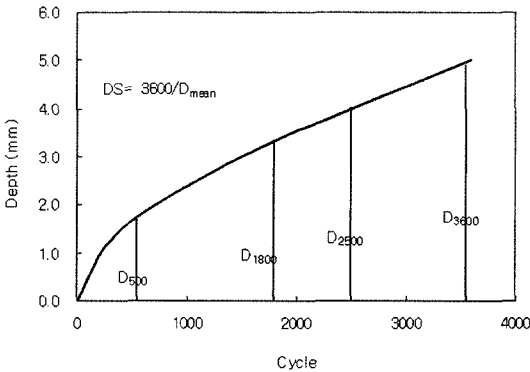


그림 3. wheel tracking 시험곡선의 4점 침하깊이

이는 기존 방법의 불합리한 점을 평균 침하깊이 개념을 도입함으로써 개선하고자 한 것이다. 즉, 초, 중기의 침하깊이는 고려하지 않고 마지막 단계의 침하진전도만이 고려되는 기존 방법보다 초기, 중기 및 최종 침하깊이를 누적해서 고려함으로써 동적안정도의 합리적인 값이 얻어지도록 하였다. 이는 결국 4점의 누적 침하깊이를 4로 나누어 혼합물의 평균 침하깊이를 산정하고 이 값으로 3,600을 나누는 개념이다.

3.2 누적 기울기 역수법

이 방법은 초기점인 500cycle, 중앙점인 1,800cycle 및 종점인 3,600cycle의 기울기 역수(m_1)

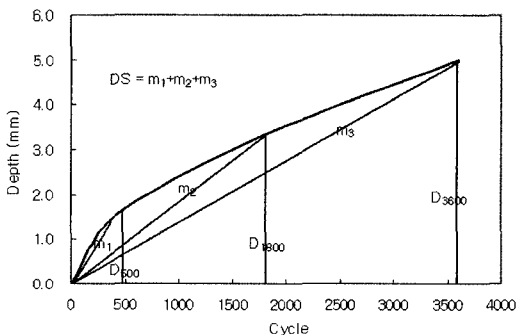


그림 4. wheel tracking 곡선의 초, 중, 말기 3점의 기울기

를 취해서 더한 값을 사용하는 방법이다. 이는 동적안정도로 그림 4와 같이 초기와 중기, 말기의 기울기를 누적 고려하기 위한 취지에서 선정한 것이다.

그러므로 이는

$$DS_2(\text{cycle/mm}) = m_1 + m_2 + m_3 = \frac{500}{D_{500}} + \frac{1,800}{D_{1,800}} + \frac{3,600}{D_{3,600}} \quad (4)$$

이는 최종단계의 동적안정도만 취하는 모순을 초기와 중기의 기울기 역수와 같이 고려함으로써 초기의 기울기가 큰 경우 조기 공용성 저하 문제를 야기하므로 이를 계산에 포함하게 한 것이다. 즉, 전체 곡선에서 중요한 3점인 초기의 기울기, 대표성을 나타내는 가운데까지의 기울기, 그리고 최종 침하깊이에 의한 기울기의 역수를 누적해서 구하는 것이다. 또한 앞의 평균 침하깊이 방법 보다 한점이 적은 3점의 침하깊이를 사용하므로 보다 계산이 간편하다.

3.3 시종(始終) 동적안정도 병산법

이 방법은 마지막 15분간의 기울기만으로 결정되는 기존 방법은 초기의 침하가 크면 그만큼 후반에 기울기가 완만해져 동적안정도가 크게 나타나므로 초기 12.5분에서의 동적안정도를 같이 고려해주는 방법이다. 즉, 초기의 침하가 크면 그만큼 조기 공용성이 나빠 문제가 되므로 초기의 변화 값을 말기의 기울기 역수로 나타내는 기존 DS 계산에 가감하기 위해 개발한 것으로 중기의 변화는 제외한 것이 앞의 것들과 다른 특징이다.

따라서 이 방법에서는 초기 500cycle 때의 침하깊이(D_{500})에 의한 동적안정도(DS_i), 최종 침하깊이($D_{3,600}$)와 D_{500} 의 비율, 그리고 기존의 동적안정도(DS_0)도 변수로 사용하였다. 우선 D_{500} 를 가지고 기울기의 역수인 DS_i (그림 5 참조)을 구하고 D_{500} 과 $D_{3,600}$ 의 비율 ($D_{3,600}/D_{500}$)을 DS_i 에 곱하고 기존 방법에 의한 말기의 동적안정도(DS_0)를 구해 이를 더해서 평균한 값으로 새로운 동적안정도를 취했다.

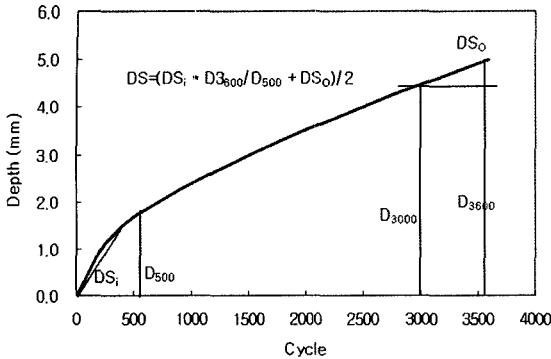
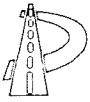


그림 5. 시(D_{500}), 종($D_{3,600}$) 침하깊이가 고려된 동적안정도

이를 수식으로 나타내면,

$$DS(\text{cycle/mm}) = \frac{1}{2} \left[DS_i \frac{D_{3600}}{D_{500}} + DS_o \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{500}{D_{500}} * \frac{D_{3,600}}{D_{500}} + \frac{600}{D_{3,600} - D_{3,000}} \right]$$

이며 이를 다시 정리하면

$$DS_3(\text{cycle/mm}) = \frac{250D_{3,600}}{(D_{500})^2} + \frac{300}{D_{3,600} - D_{3,000}} \quad (5)$$

이 방법은 기존의 동적안정도 값에 곡선 초기 변화를 병산해 넣으므로 문제시되었던 불합리한 점을 해결토록 하였다. 즉, 초기 곡선의 기울기를 가감토록 해서 말기 곡선이 완만해도 초기에 기울기가 급격한 것은 기존 동적안정도보다 적은 값이, 반면에 그 반대이면 큰 값이 얻어지도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

상기의 새로운 식들을 이용하여 그림 1에 주어진 곡선들의 동적안정도를 구하고 기존의 방법과 그 결과를 비교하여 표 1에 제시하였다. 앞서 언급하였듯이 두 그룹 혼합물의 동적안정도는 기존의 방법(DS_0)으로 계산하면 1 그룹(A1, B1, C1) 혼합물들이 더 크고 2 그룹(A2, B2, C2)이 적게 계산되어 침하가 큰 혼합물들이 더 양호한 혼합물이 된다. 표 1에서 보면 기존 방법으로는 6가지 혼합물의 동적안정도가 모두 1,000이 넘으며 그중에서도 B2가

표 1. 새로운 동적안정도 값과 기존 방법(DS_0) 동적안정도 값의 비교

Mix ture	Depth (mm) at cycle of						DS_0	DS_1	DS_2	DS_3	Final Depth (mm)
	500	1,500	1,800	2,500	3,000	3,600					
A1	5.20	6.70	6.90	7.35	7.70	8.12	1428.6	526.1	800.4	789.4	8.12
A2	3.10	5.40	5.90	6.95	7.60	8.12	1153.8	613.6	915.1	802.5	//
B1	2.50	3.60	3.80	4.30	4.70	5.00	1500.0	935.1	1,383.7	950.0	5.00
B2	1.50	2.80	3.15	3.90	4.40	5.00	1,000.0	1,090.9	1,624.8	1,055.6	//
C1	0.70	1.30	1.45	1.60	1.70	1.85	4,000.0	2,642.2	3,901.6	2,943.9	1.85
C2	0.40	0.90	1.05	1.40	1.60	1.85	2,400.0	3,164.8	4,910.2	4,090.6	//

가장 낮아 A1보다도 못한 혼합물로 판정되는 모순이 있다. 즉, 기존 방법으로는 초기에 많이 침하되는 실선 혼합물들이 모두 서서히 침하되는 점선 혼합물들보다 높게 계산된다. 이는 모두 말기의 곡선의 기울기에만 의존하므로 나타나는 모순이다. 즉, 초기에 침하가 심하게 일어났어도 말기의 곡선이 완만한 혼합물의 동적안정도가 더 높게 나타나는 단적인 예이다.

개선 안들에 의하면 최종 침하깊이도 적고 서서히 침하되는 C2 혼합물이 세 방법 모두에서 가장 우수한 것으로, 그 다음이 C1, B2, B1, A2, A1 순으로 나타났다. 특히 모두 기존 방법에 의한 동적안정도와 차이가 나는 것은 각각의 그룹에서는 초기에 침하가 덜 생기는 점선들의 DS가 실선보다 높게 나타나는 점이다. 즉, 현장 공용성 측면에서 유리한 것들이 높게 평가되도록 되어있는 것이다.

또한 A1, A2 그룹과 B1, B2 그룹이 기존 방법에서는 유사하게 1,000-1,500 정도로 대등하게 나타

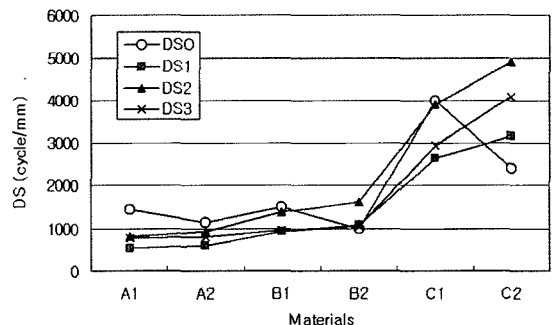


그림 6. 재료별, 방법별 DS 값의 차이 비교



났는데 새 방법들에서는 A1, A2가 500-900, B1, B2가 900-1,600 대로 1.5-1.8배 정도 확연한 차이가 났다. 특히 침하깊이가 적어 별 차이가 없는 C1, C2도 기존 방법은 C1이 월등히 높고 그 차이도 큰데 반해 새로운 방법들은 그 차이가 훨씬 줄어들었다. 그림 6에서 보듯이 기존 방법(DS₀)으로는 서서히 침하되는 C2의 값이 훨씬 작은 반면 나머지 방법들에서는 C2가 더 크며 그 차이도 적어졌다.

또한 그 수치를 보면 대략 5mm 정도의 최종 침하된 양호한 혼합물인 B1, B2의 DS가 900 - 1,600 정도로 나타나고 있으며, 8mm 정도 침하된 비교적 약한 A1, A2 혼합물은 약 500-900 정도로, 그리고 2mm 이하 침하된 우수한 혼합물의 경우 2,600 - 4,900까지로 나타나고 있다. 따라서 이 방법들은 혼합물간의 소성변형 특성을 동적안정도로 나타냄에 있어 합리적이며 유사 혼합물간의 평가에도 상당한 변별력을 가지고 있다고 할 수 있다. 한편 그림 6은 각 방법별 DS 변화를 보여주며 기존에 연구^(6,7)에서 얻어진 표2와 3의 데이터를 이용해 표 4에 새로운 동적안정도 방법들과 기존 방법을 비교하였다.

그림 7은 기존의 연구에서 얻어진 편마압 밀입도 일반, 재생 및 개질 재생 혼합물들의 동적안정도와 변형강도(S_D)의 특성을 나타낸 표 2의 데이터를 사용하여 네 가지 동적안정도(기존 방법 : DS₀, 새로운 3가지 방법 : DS₁, DS₂, DS₃)와 변형강도의 특성 관계를 나타내는 그림이다. 그림 8은 기존의 연구에서 얻어진 화강암 밀입도 일반 및 개질 혼합물들의 동적안정도와 변형강도의 특성을 나타낸 표 3의 데이터를 사용하여 네 개의 동적안정도와 변형강도의 특성 관계를 나타내는 그림이다. 그림에서 보듯이 기존 DS₀의 값들은 데이터 산포도가 커서 전반적으로 분산이 크게 나타나고 있다. 반면에, 새로운 산정방법 (DS₁, DS₂, DS₃) 들은 분산이 적은 것을 볼 수 있다. 특히 기존 방법인 DS₀는 침하깊이 8mm 이하인 화강암에서 분산이 더욱 커짐을 보였다. 이것은 기존 방법이 침하깊이가 적은 혼합물들에 대한 소성 변형 저항성의 변별력이 떨어진다는 것을 의미한다.

표 2. 화강암골재 밀입도 개질혼합물의 변형강도 및 반복주행시험 결과

Mixture	S _D (MPa)	Final D (mm)	D(mm) at cycle of					
			500	1,500	1,800	2,500	3,000	3,600
AD5R0	2.803	23.7	6.4	12.4	14.1	18.3	20.9	23.7
AD5R15A	2.799	16.6	5.8	10.1	10.9	13.3	14.9	16.6
AD5R15F	2.942	16.8	4.9	9.8	11.6	13.0	15.2	16.8
AD3R30A	-	9.1	2.2	4.2	5.3	7.0	7.5	9.1
AD3R30F	2.983	13.3	5.0	8.9	10.4	11.2	12.6	13.3
AD5L6R15A	3.065	9.3	3.1	5.5	6.3	7.4	8.5	9.3
AD5L6R15F	3.058	9.2	2.5	4.7	5.4	7.0	8.3	9.2
AD3L6R30A	3.177	5.0	1.55	2.9	3.2	4.0	4.5	5.0
AD3L6R30F	3.071	8.6	3.0	5.1	5.6	6.7	7.5	8.6

표 3. 새로운 동적안정도 값과 기존 방법에 의한 값의 비교

Mixture	S _D (MPa)	Final D (mm)	D(mm) at cycle of					
			500	1,500	1,800	2,500	3,000	3,600
BD50	2.31	7.80	5.51	6.28	6.78	7.04	7.35	7.80
BDR7	2.07	6.55	4.45	5.15	5.62	5.86	6.14	6.55
BDL6	2.66	3.40	2.79	2.99	3.13	3.20	3.28	3.40
BDWL8	3.79	0.71	0.52	0.59	0.63	0.65	0.68	0.71
BDWH8	3.40	1.02	0.87	0.92	0.95	0.97	0.99	1.02
BDS3	2.52	6.37	4.65	5.23	5.60	5.80	6.03	6.37
BDS5	2.94	2.77	2.26	2.43	2.55	2.61	2.67	2.77
BDPG	3.25	3.22	2.52	2.76	2.91	2.99	3.08	3.22

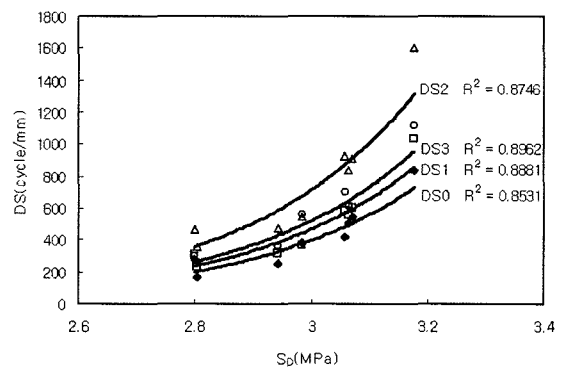


그림 7. 편마압 혼합물의 두 가지 DS와 S_D의 상관관계 비교



표 4. 새로운 동적안정도 값과 기존 방법에 의한 값의 비교

Mixture	Final D (mm)	DS ₀	DS ₁	DS ₂	DS ₃
AD5R0	23.7	269.4	230.3	353.7	251.8
AD5R15A	16.6	279.7	305.7	468.2	299.8
AD5R15F	16.8	252.6	314.6	471.5	362.4
AD3R30A	9.1	408.0	622.2	962.5	657.5
AD3R30F	13.3	379.5	446.6	543.8	561.6
AD5L6R15A	9.3	504.7	553.4	834.1	616.9
AD5L6R15F	9.2	416.3	580.3	924.6	701.3
AD3L6R30A	5.0	836.5	1,037.8	1,605.1	1,120.3
AD3L6R30F	8.6	544.0	599.6	906.7	511.6
BD50	7.80	1,313.0	527.7	817.8	730.9
BDR7	6.55	1,432.0	636.1	982.3	814.4
BDL6	3.40	4,926.0	1,130.9	1,813.1	2,609.2
BDWL8	0.71	15,960.1	5,679.5	8,889.1	10,656.4
BDWH8	1.02	19,950.0	3,704.7	5,998.9	10,336.9
BDS3	6.37	1,750.1	634.9	994.1	955.1
BDS5	2.77	5,955.0	1,389.7	2,226.8	3,135.6
BDPG	3.22	4,337.1	1,218.5	1,935.0	2,269.6

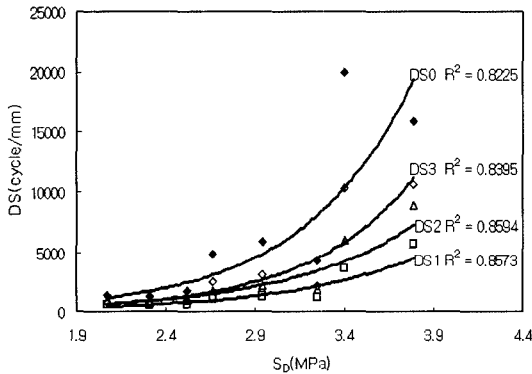


그림 8. 화강암 혼합물의 두 가지 DS와 S_D의 상관관계 비교

그림에서 보듯이 기존의 연구에서 얻어진 DS와 S_D와의 상관성을 회귀분석을 통해 비교해 본 결과 두 변수가 비교적 양호한 R²을 보였다. 하지만 그 중에서도 새로 개발된 동적안정도(DS₁, DS₂, DS₃)들의 R²이 DS₀보다 더 높은 상관관계를 보이고 있음을

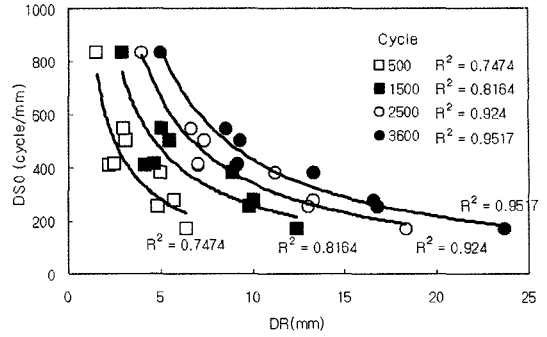


그림 9. 편마암 밀입도 재생혼합물의 cycle 별 D와 DS₂의 상관관계 비교

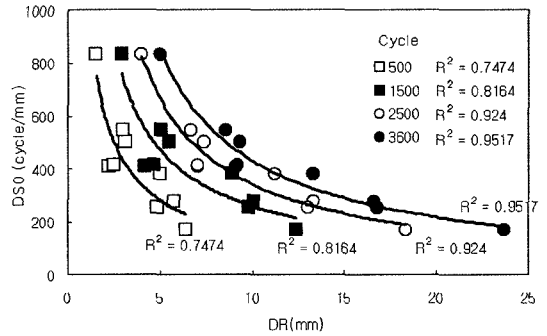


그림 10. 편마암 밀입도 재생혼합물의 Cycle 별 D와 DS₀의 상관관계 비교

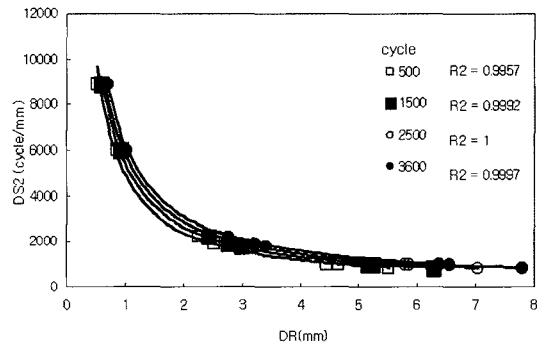


그림 11. 화강암 개질혼합물의 Cycle별 D와 DS₂의 상관관계 비교

알 수 있다.

또한 동적안정도와 침하깊이와의 상관관계를 비교해본 결과의 한 예를 그림 9~12에서 보여준다. 여기서는 각 혼합물 별로 기존 방법인 DS₀와 새로운 산정방법(DS₁, DS₂, DS₃) 중에 그림 7,8의 두 골재

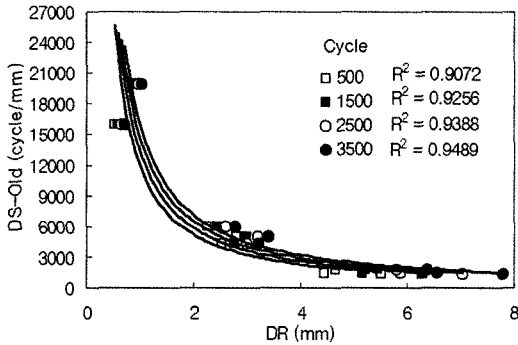


그림 12. 화강암 개질혼합물의 Cycle별 DR과 DS₀의 상관관계 비교

평균 R²이 가장 높은 DS₂의 침하 단계별(500, 1,500, 2,500, 3,600 cycle) D와 어떤 상관성이 있는지를 비교해 보았다. 일반적으로 혼합물의 동적안정도는 침하깊이와 상당한 상관관계를 보이고 있고, 전반적으로 새로운 산정 방법인 DS₂의 R²이 기존 방법인 DS₀ 보다는 더 높다. D 수준이 20mm 이상을 보인 편마암 혼합물의 그림 9에서 DS₂는 침하 단계별에 관계없이 모든 R²가 0.96 이상, 최대 R²=0.9947을 중반부인 2500 cycle에서 보였다. 반면, 그림 10에서 기존 방법인 DS₀는 초기 침하단계(500cycle)는 낮은 R²=0.7474를 보였고, 점차 R²이 증가되어 말기인 3,600cycle에서 0.95를 보였으나 DS₂의 R²=0.99 수준에 못 미치는 것이었다. 이는 기존 방법 DS₀가 초기 단계의 침하 data를 고려되지 못함을 단적으로 보여준 것이다.

D 수준이 8mm 이하를 보인 화강암 혼합물의 그림 11~12에서 DS₂는 단계에 관계없이 모든 R²가 0.99 이상 1.0에 가까운 값을 보였다. 반면, DS₀은 초기 침하단계(500cycle)는 낮은 R²=0.91이었고, 점차 R²이 증가되어 말기인 3,600cycle에서 약 0.95를 보였다. 따라서 이 그림에서도 역시 DS₀는 혼합물의 초기 침하데이터가 반영이 되지 않은 상태로 마지막 단계의 침하상태에 의존하고 있으며 DS₂에 비해 전반적으로 그 상관성도 낮은 상태임을 보여주었다.

특히 그림 11~12에서 보듯이 DR이 4mm 이하로 낮은 수준에서 DS₀는 데이터 포인트가 회귀곡선에서 많이 벗어나 분산이 큰 것을 알 수 있다. 이는 침하가 낮은 혼합물들 간에 상대 비교에서 그 변별력이 떨어지게 되는 원인이 될 것이다. 이에 비해 DS₂는 모든 단계(500, 1500, 2500, 3600cycle)에서 침하 수준에 관계없이 데이터 포인트가 회귀곡선과 일치하고 있어 D가 낮은 강한 혼합물에서도 변별력이 더욱 우수함을 보여준다.

혼합물의 소성변형 특성은 결국은 침하깊이로 나타나는 것이며 동적안정도는 단지 몇 번의 반복주행으로 단위 침하깊이가 발생되는지를 대변하는 수치이므로 동적안정도의 대소는 최종침하깊이와 상관성이 없으면 무의미하다. 다시 말해 그림 1의 A1과 같이 깊게 침하된 혼합물이 B2보다 높은 동적안정도를 가진 것으로 나타나는 방식의 계산법은 왜곡된 판정을 낳는 것이다. 따라서 본 연구에서 제시된 것과 같은 방식의 동적안정도가 계산되도록 해야 하며 특히 최종 침하깊이가 같은 경우 초기부터 깊은 침하가 일어나는 혼합물이 공용성 면에서 나쁘므로 이점이 반드시 반영되어야 한다.

표 4의 data 전체를 사용한 그림 13에 의하면 다양한 실제 데이터에 적용한 결과 새로운 방법들이 기존 방법(DS₀)보다 전체적으로 R²에서 0.07포인트 정도 높으며 그중에서도 DS₂가 가장 높은 것을 알 수 있다. 따라서 DS₂으로 일반적으로 나타나는 침하깊이 범위인 15mm 이하에서 그림 13에서 각 깊이별 대표적인 data를 이용하여 회귀분석 모델을 구한 결과를 그림 14에 보여준다. 이 결과 얻어진 모델은 식 (6)으로서 x, y 축을 대수로 하였을 경우 직선적인 관계를 나타내며 R²=0.99이상이었다.

$$y = 6250.9x^{-0.9351} \quad (6)$$

일반적으로 고무바퀴나 고무압력호스로 100psi 유효중 압력을 이용한 반복주행시험의 경우 혼합물의 소성변형 깊이가 5mm 이하이면 양호한 것으로 본

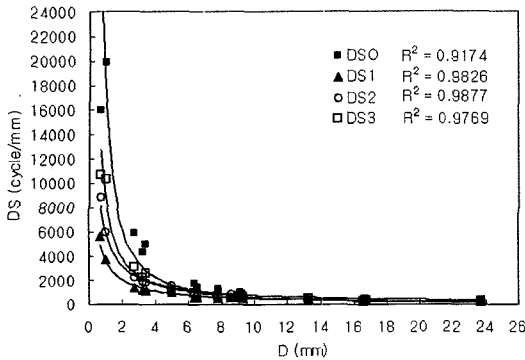
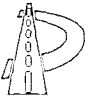


그림 13. 표4의 전체 data에 의한 DS와 D의 관계

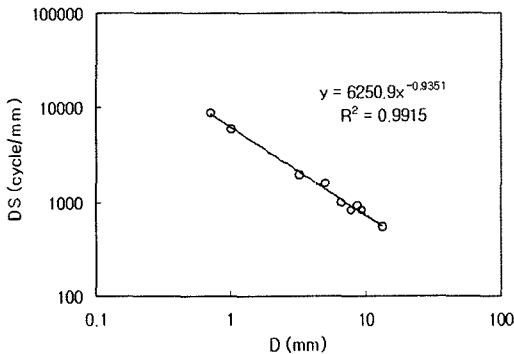


그림 14. 침하깊이 0~15mm 범위에서 DS₂에 의한 동적안정도와 침하깊이의 관계

다⁽⁸⁾. 본 연구의 경우 강재 바퀴를 사용하므로 다소 깊은 침하(약 20% 가까운 정도로 추정)가 발생하는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 이 결과를 가지고 볼 경우 약 6mm 정도의 침하를 고무바퀴의 5mm와 같은 정도로 본다면 상기 (6) 식으로부터 x 가 6mm 일때 DS를 구하면 1,170이다. 따라서 이를 근거로 DS₂를 사용할 경우 동적안정도 1,200cycle/mm, 침하깊이 6mm 정도를 일반 혼합물의 합격기준치로 제시할 수 있다.

5. 결론

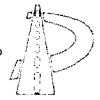
반복 주행(Wheel tracking: WT) 시험에서 기존의 동적안정도 (Dynamic stability: DS) 계산은 주

행 말기의 data만을 이용하므로 전체적으로 침하가 깊어도 말기에 침하 진전도가 낮으면 DS가 크게 되어 우수한 혼합물로 판정되는 모순이 있다. 하지만 아스팔트 혼합물은 특성상 초기에 많은 침하가 일어나며 시간이 지나면서 경화가 진행되어 추가 침하 속도가 완만해지는 것이 일반적인 현상이다. 따라서 초기 침하가 심하게 일어나는 것은 공용성을 크게 저하시키며 근본적으로 혼합물에 문제가 있는 것이다. 하지만 기존의 동적안정도 산정 방법은 초기 공용성 불량 혼합물이 오히려 좋은 것으로 간주되는 문제가 있다.

새로운 동적안정도(DS₁, DS₂, DS₃) 산정방법은 기존 동적안정도(DS) 계산방법의 모순점을 개량하여 보다 명확하게 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 판정하기 위해 개발하였다. 새로운 계산방법들에서는 초기의 침하깊이를 도입함으로써 마지막 단계의 침하 진전도만이 고려되는 기존 방법보다 초기(500cycle), 중기(1,500, 2,500cycle) 및 말기(3,600cycle)에서의 침하깊이를 고려함으로써 동적안정도의 합리적인 값이 얻어지도록 하였다. 계산 결과 이 방법들은 혼합물간의 소성변형 특성을 동적안정도로 나타냄에 있어 합리적이며 유사 혼합물간의 평가에도 상당한 변별력을 가지고 있음을 알 수 있었다.

또한 기존의 연구에서 얻어진 동적안정도로 변형 강도와와의 상관성을 회귀분석을 통해 비교해 본 결과 새로 개발된 동적안정도(DS₁, DS₂, DS₃) 들의 R²이 기존 동적안정도 (DS₀)보다 더 높은 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

동적안정도와 침하깊이와의 상관관계를 각 혼합물별로 기존 산정 방법 (DS₀)과 새로운 방법 중 DS₂의 침하단계별(500, 1,500, 2,500, 3,600cycle) D와 어떤 상관성이 있는지를 비교해 본 결과, 전반적으로 DS₂의 R²이 기존 방법인 DS₀ 보다는 더 높았다. 그리고 DS₂는 혼합물 침하 단계에 관계없이 매우 높은 상관관계를 가지고 있어 혼합물의 소성변형 특성을 근본적으로 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다. 따라



서 이의 사용은 침하깊이는 낮으면서도 DS가 낮게 나타나는 기존의 문제점을 해결 할 수 있는 방법임을 확인하였다.

참고문헌

1. Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amirkhanian, S. N., "Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete," *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 5, No. 3., Dec. 2004, 303-322.
2. 김광우, 김준은, 김변창, 도영수, "아스팔트 콘크리트 반복주행시험에서의 동적안정도 정립에 관한 연구," 한국도로학회 논문집, 제 6권 3호, 2004. 9. pp. 37-46.
3. 김광우, 김준은, 김변창, 이기호, "아스팔트 혼합물의 반복주행 시험에서 주행속도와 침하깊이의 관계 분석," 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, 2003. 10. pp. 35-40.
4. "아스팔트 포장재료 및 품질관리 기준정립," 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 1단계 2차년도 최종보고서, 건설교통부, 2003. 10. pp. C3: 51-78.
5. KS F 2374 "역청 포장 혼합물의 휠 트랙킹 시험 방법," 2000. 6
6. 이문섭, 최선주, 도영수, 김광우(2004d), "공시체 크기가 변형강도를 이용한 소성변형 추정에 미치는 영향," 한국도로학회 논문집, 제 6권 2호, pp. 1-13.
7. "한국형 포장설계법 개발 및 포장 성능 개선 방안 수립을 위한 기본 계획," (2004), 최종보고서, 건설교통부
8. Kandhal, P. S. and Mallick, R. B., (1999), "Evaluation of asphalt pavement analyzer for HMA mix design," NCAT Report No. 99-4, National Center for Asphalt Technology, Auburn, AL, USA.

〈접수:2005. 11. 30〉