

# 아스팔트 혼합물의 실제 변형특성이 반영된 동적안정도의 산정 방안

## Dynamic Stability Calculation based on Actual Deformation of Asphalt Mixture

김광우\* · 도영수\*\* · 이문섭\*\*\* · 고태영\*\*\*\*  
Kim, Kqang W. · Doh, Youngs S. · Lee, Moon S. · Ko, Tae Y.

### 1. 서론

아스팔트 혼합물의 반복주행(Wheel tracking: WT) 시험에서는 세로(y)축을 침하깊이(Depth of rut: DR), 가로(x)축을 반복회수(cycle)로 하는 DR-cycle곡선이 얻어지며 국내에서는 최종침하깊이와 동적안정도(Dynamic stability: DS)를 결과로 활용한다. DR은 WT 궤적의 침하 깊이로 단순 길이 값(mm)이나 DS는 단위 침하 깊이를 유발하는데 소요되는 바퀴의 왕복횟수를 나타내는 값으로 곡선 기울기 역수의 개념이다. 따라서 일반적으로 재질이 물러 깊게 침하되는 혼합물은 DR이 크고 DR-cycle 곡선의 기울기가 급하므로 그 역수인 DS는 낮게 된다. 반면 혼합물이 소성변형에 강한 것은 낮은 DR을 보이므로 기울기가 완만해 DS가 높게 나타나는 것이 정상이다.

하지만 기존의 계산 방법으로는 DR이 낮은 혼합물의 DS가 DR이 더 깊은 혼합물보다 적게 계산되어 더 불량한 혼합물로 판정되는 경우가 있다(3,5). 즉, 현재의 KS 방법은 DR-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 높아 더 좋은 것으로 계산되는 모순이 있다. 하지만 아스팔트 혼합물은 특성상 초기에 많은 침하가 일어나도 시간이 지나면서 경화가 진행되면 추가 침하 속도가 완만해지는 것이 일반적인 현상이므로 상기의 모순은 해결해야 할 문제이다.

이는 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 동적안정도 산정방법을 개발 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

### 2. 기존 동적안정도 계산 체계의 문제점

기존 DS의 문제점을 그림 1에서 최종 침하깊이가 같은 3 그룹의 6가지 혼합물의 Wheel tracking 곡선을 비교하여 보면서 분석해 보았다. 각각의 그룹에서 두 혼합물의 최종 침하깊이는 거의 같다. 하지만 위쪽의 실선 혼합물들(그룹 1: A1, B1, C1)은 초기에 큰 침하가 일어나고 시간이 가면서 침하 증가 변화율이 완만해지는 반면 아래 점선 혼합물들(그룹 2: A2, B2, C2)은 초기에는 침하가 적게 일어나 변화율이 지속적으로 유지된다. 이를 중간에 있는 B그룹에서 보다 자세히 분석해 보면 B1 혼합물은 초기 500cycle에 이미 2.5mm가 들어가 최종 침하깊이의 반이 침하된 반면 B2 혼합물은 500cycle에 1.5mm가 들어가 전체의 30% 정도가

\* 정회원· 강원대학교 지역기반공학과 교수· 공학박사 · 033-250-6467 (E-mail:asphalt@hanmail.net)

\*\* 정회원· 강원대학교 지역기반공학과 강사· 공학박사 · 033-250-7284 (E-mail:youngsdoh@hanmail.net)

\*\*\* 정회원· 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 033-910-0690 (E-mail:truepath@korea.net)

\*\*\*\* 정회원· 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정 · 033-250-7284 (E-mail:babytokil@hanmail.net)



침하되었다. 그리고 3,600cycle(최종 반복횟수)까지 B2 혼합물의 침하깊이가 B1보다 더 적으나 초기 침하 후 직선구간의 기울기는 더 크므로 기존 방법으로는 B1이 더 좋은 것으로 나타난다.

같은 방식으로 A1과 B2를 비교해 보면 더 극명하게 문제점을 알 수 있다. 즉, A1은 500cycle에 5mm로 전체 침하의 60% 이상이 발생하고 최종 침하도 8mm 이상으로 B2보다는 현저히 불량한 혼합물 임에도 후반부 곡선의 기울기가 B2보다는 완만하므로 DS가 높게 계산된다.

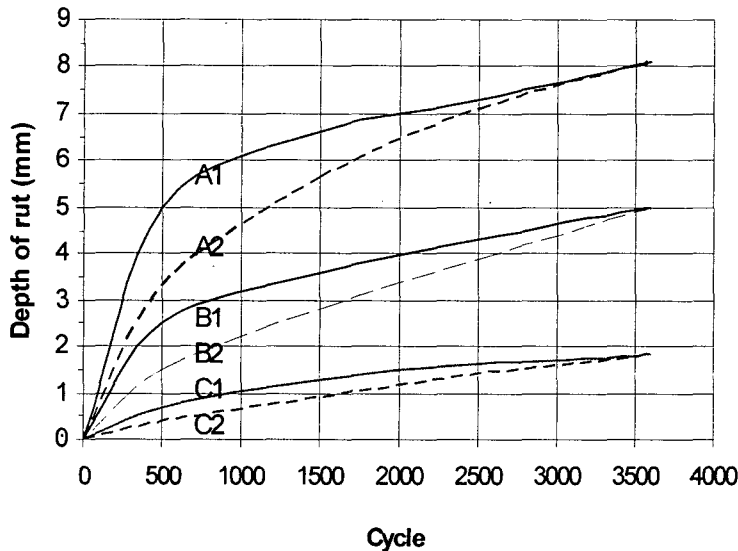


그림 1. 세 그물 6종류 혼합물의 Wheel tracking 시험결과 비교

만일 그림과 같은 결과가 현장에서 3년(36개월)간에 걸쳐 일어난 소성변형이라 가정한다면 현장 공용성은 어떠할까. B1 혼합물은 초기 약 6개월(600cycle) 만에 3년간 발생할 소성변형의 1/2이 발생하며 1년(1,200cycle)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 침하 깊이가 더 깊고 3년이 되면 거의 같아진다. 반면 A1 혼합물은 초기 약 6개월에 전체의 2/3가 발생하며 1년 만에 약 75% 이상 발생하고 3년 후 최종 깊이도 B2보다 훨씬 깊은 8mm 이상이다.

이런 경우 공용성 측면에서 어떤 혼합물이 더 좋다고 할 수 있겠는가? B1, B2 비교시 소성변형 깊이로 본다면 B1 혼합물은 조기에 깊은 변형이 발생하여 공용성이 나쁘다. 반면에 B2 혼합물은 조기에 적게 발생하므로 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 중·단기간에서 상대적으로 더 좋고 일정 기간이 지난 후에 나빠지니 그래도 B2가 더 유리하다고 하겠다. A1과 B2의 비교는 상대가 안 될 정도로 A1이 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 정당할 것이다. 특히 국내와 같이 조기에 소성변형이 큰 문제가 되는 현실에서 본다면 B2는 비교적 양호한 포장이고 A1과 B1은 초기부터 문제가 있는 포장일 수 있다. 특히 A1 같은 경우는 조기에 전체 깊이의 2/3가 들어가므로 특히 문제가 있다고 보여 진다.

아스팔트 혼합물은 특성상 초기에 많은 침하가 일어나도 시간이 지나면서 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 초기 불량 혼합물이 오히려 좋은 것으로 간주되는 문제가 있다.

**3. 누적 평균 침하깊이에 의한 동적안정도 계산 방법**

이러한 문제점을 해결하기 위해서는 곡선의 기울기 정보를 보다 많이 활용하는 것이 필요하다. 즉, 전체 곡선을 가능한 여러 구간으로 나누고 그 구간의 선형회귀분석을 통해 기울기를 구하거나, 각 구간의 시점과 종점의 차이에 의해 기울기를 구해 그 평균을 사용하면 보다 곡선의 특성이 잘 반영된 동적안정도를 구할 수 있을 것이다. 하지만 이는 회귀분석을 해야 하고 또한 너무 여러 구간으로 나누는 것은 계산이 복잡해진다.

최근 한국형 포장설계법 연구에서 제시한 WT 시험 개정(안)에서는 100psi 운하중 압력을 분당 40회 왕복(cycle)으로 총 90분간 3,600 cycle을 수행토록 하였다. 반복주행시험은 대부분 초기 압밀과정이 끝난 후 일정한 기울기를 가지는 변형과정을 거치게 된다. 시험 결과, 초기 압밀은 대부분 500 cycle까지 마무리되는 것으로 판단되었으며 그 이후 3500 cycle까지의 곡선은 선형에 가까운 형상을 가진다.

그러므로 본 연구에서는 초기 압밀이 끝나는 500cycle부터 1000cycle 간격으로 3500cycle까지 4점의 누적 침하깊이를 근거로 계산하는 방법을 사용토록 하였다. 즉, 500, 1,500, 2,500, 3,500 cycle에서의 침하깊이를 측정하고 이를 더해서 4로 나눈 평균으로 3,500cycle을 나눈 값을 동적안정도로 제시하여 초기 변형부터 전체적인 혼합물의 변형이 고려되도록 하였다. 이는

$$DS(\text{cycle/mm}) = \frac{3,500}{(D_{500} + D_{1500} + D_{2500} + D_{3500})/4}$$

이며 이는 다시 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$DS(\text{cycle/mm}) = \frac{14,000}{(D_{500} + D_{1500} + D_{2500} + D_{3500})} \text{----- (1).}$$

- 여기서  $D_{500}$  = 500 cycle 에서의 침하깊이 (mm)
- $D_{1500}$  = 1500 cycle 에서의 침하깊이 (mm)
- $D_{2500}$  = 2500 cycle 에서의 침하깊이 (mm)
- $D_{3500}$  = 3500 cycle 에서의 침하깊이 (mm).

이는 기존 방법의 불합리한 점을 누적 평균 침하깊이 개념을 도입함으로써 개선하고자 한 것이다. 즉, 초, 중기의 침하깊이는 고려하지 않고 마지막 단계의 침하 진전도 만이 고려되는 기존 방법보다 초기(500cycle) 중기 (1,500, 2,500cycle) 및 말기(3,500cycle)에서의 침하깊이를 누적해서 고려함으로써 동적안정도의 합리적인 값이 얻어지도록 하였다.

**4. 결과 및 고찰**

상기의 새로운 식을 이용하여 그림 1에 주어진 곡선들의 동적안정도를 구하고 기존의 방법과 그 결과를 비교하여 표 1에 제시하였다. 앞서 언급하였듯이 두 그룹 혼합물의 동적안정도는 기존의 방법(표 1에서 Old DS)으로 계산하면 1 그룹 (A1, B1, C1) 혼합물들이 더 크고 2 그룹 (A2, B2, C2)이 적게 계산되어 초기 침하가 큰 혼합물들이 더 양호한 혼합물이 된다. 이 표에서 보면 기존 방법으로는 6가지 혼합물의 동적안정도가 모두 1,000이 넘으며 그중에서도 B2가 가장 낮아 A1이나 A2보다도 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. 이것이 초기에 침하가 심하게 일어났어도 말기의 곡선이 완만한 혼합물의 동적안정도가 더 높게 나타나는 이유이다.

표 1. 새로운 동적안정도(New DS) 값과 기존 방법(Old DS)에 의한 값의 비교.

Mixture	DR (mm) at cycle of				DS-Old	DS-New	Final DR (mm)
	500	1500	2500	3500			
A1	5	6.60	7.30	8.03	1369.9	519.9	8.12
A2	3.30	5.65	7.07	8.00	1075.3	582.9	//
B1	2.50	3.60	4.30	4.95	1538.5	912.1	5.00
B2	1.50	2.80	3.90	4.90	1000.0	1068.7	//
C1	0.70	1.30	1.60	1.80	5000.0	2592.6	1.85
C2	0.40	0.90	1.40	1.75	2857.1	3146.1	//

개선된 안에 의하면 침하깊이로 가장 우수한 C2 혼합물과 중간인 B2 경우는 기존의 동적안정도와 값이 유사하다. 하지만 나머지 것들에서는 모두 기존 방법에 의한 동적안정도(Old-DS)와 큰 차이가 나며 각각의 그룹에서는 초기에 침하가 덜 생기는 점선들의 DS가 실선보다 높게 나타났다. 즉, 현장 공용성 측면에서 유리한 것들이 높게 평가되도록 되어있는 것이다. 또한 A1, A2 그룹과 B1, B2 그룹이 기존 방법에서는 유사하게 1000 - 1500 정도로 대등하게 나타났는데 새로운 방법에서는 500대와 1000 전후로 2배에 가깝게 확인한 차이가 났다. 따라서 이 방법은 혼합물간의 소성변형 특성을 동적안정도로 나타냄에 있어 합리적이며 유사 혼합물 간의 평가에도 상당한 변별력을 가지고 있다고 할 수 있다. 한편 이를 기존에 연구에서 얻어진 표2와 3의 데이터를 이용해 두 방법을 비교하였다.

표2. 편마암골재 밀입도 재생 혼합물의 변형강도 및 반복주행시험 결과

Mixture	SD (MPa)	Final DR (mm)	DR (mm) at cycle of				DS-Old	DS-New
			500	1500	2500	3500		
AD5R0	2.803	25.0	6.4	12.4	18.3	23.7	169.4	230.3
AD5R15-A	2.799	16.8	5.8	10.1	13.3	16.6	279.7	305.7
AD5R15-F	2.942	17.5	4.9	9.8	13.0	16.8	252.6	314.6
AD3R30-A	-	10.3	2.2	4.2	7.0	9.1	408.0	622.2
AD3R30-F	2.983	13.7	5.0	8.9	11.2	13.3	379.5	364.6
AD5L6R15-A	3.065	9.7	3.1	5.5	7.4	9.3	504.7	553.4
AD5L6R15-F	3.058	10.2	2.5	4.7	7.0	9.2	416.3	580.3
AD3L6R30-A	3.177	5.2	1.55	2.9	4.0	5.0	836.5	1037.8
AD3L6R30-F	3.071	8.7	3.0	5.1	6.7	8.6	544.0	599.6

표3. 화강암골재 밀입도 개질 혼합물의 변형강도 및 반복주행시험 결과

Mixture	SD(MPa)	DR(mm)	DR (mm) at cycle of				DS-Old	DS-New
			500	1500	2500	3500		
BD50	2.31	7.82	5.51	6.28	7.04	7.80	1313	527.7
BDR7	2.07	6.75	4.45	5.15	5.86	6.55	1432	636.1
BDL6	2.66	3.42	2.79	2.99	3.20	3.40	4926	1130.9
BDWL8	3.79	0.72	0.52	0.59	0.65	0.71	15960	5679.5
BDWH8	3.40	1.03	0.87	0.92	0.97	1.02	19950	3704.7
BDS3	2.52	6.40	4.65	5.23	5.80	6.37	1750	634.9
BDS5	2.94	2.78	2.26	2.43	2.61	2.77	5955	1389.7
BDPG	3.25	3.23	2.52	2.76	2.99	3.22	4337	1218.5

그림 2는 기존의 연구에서 얻어진 밀입도 일반, 재생 및 개질 재생 혼합물들의 동적안정도와 변형강도의



특성을 나타낸 표 2의 데이터를 사용하여 두 동적안정도와 변형강도의 특성의 관계를 나타내는 그림이다. 그림 3은 기존의 연구에서 얻어진 밀입도 일반 및 개질 혼합물들의 동적안정도와 변형강도의 특성을 나타낸 표 3의 데이터를 사용하여 두 동적안정도와 변형강도의 특성의 관계를 나타내는 그림이다. 그림에서 보듯이 DS-Old의 값들은 같은 침하에서 더 크며 데이터 산포도가 커서 전반적으로 분산이 크게 나타나고 있다. 반면, DS-New는 그 수준이 좀 낮은 반면 분산이 적은 것을 볼 수 있다.

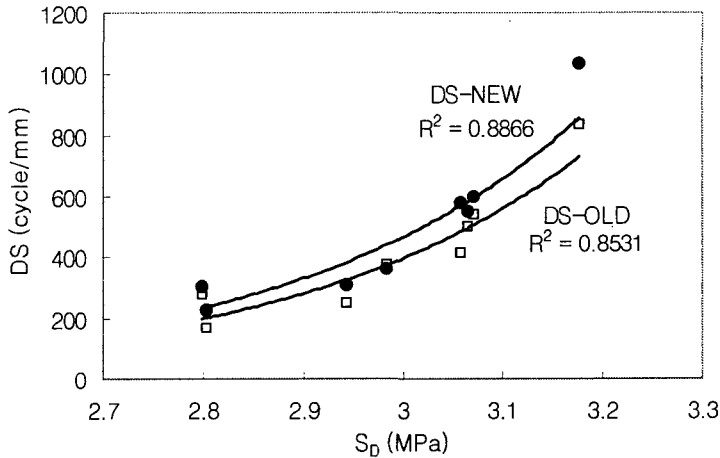


그림 2. 편마암 혼합물의 두 가지 DS와 S<sub>0</sub>의 상관관계 비교

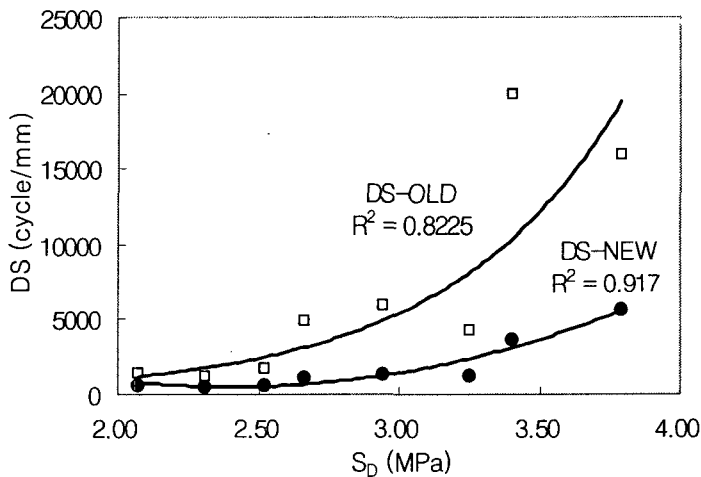


그림 3. 화강암 혼합물의 두 가지 DS와 S<sub>0</sub>의 상관관계 비교

그림에서 보듯이 기존의 연구에서 얻어진 동적안정도로 변형강도와의 상관성을 회귀분석을 통해 비교해 본 결과 동적안정도와 변형강도가 비교적 양호한 R<sup>2</sup>을 보인다. 하지만 둘 중에서도 새로 개발된 동적안정도 (DS-New)의 R<sup>2</sup>이 더 높은 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

또한 동적안정도와 침하깊이와의 상관관계를 비교해 본 결과를 그림 4~7에서 보여준다. 여기서는 각 혼합물 별로 DS-Old와 DS-New가 침하 단계별(500, 1500, 2500, 3500 cycle) DR과 어떤 상관성이 있는지를 비교해 보았다. 일반적으로 혼합물의 동적안정도는 침하깊이와 상당한 상관관계를 보이고 있고, 전반적으로



DS-New의  $R^2$ 이 DS-Old보다는 더 높다. DR 수준이 20mm 이상을 보인 편마암 혼합물의 그림 4, 5에서 DS-New는 단계에 관계없이 모든  $R^2$ 가 0.95이상, 최대  $R^2=0.9974$ 를 중반부인 2500 cycle에서 보였다. 반면, DS-Old는 초기 침하단계 (500cycle)는 낮은  $R^2=0.7474$ 를 보였고, 점차  $R^2$ 이 증가되어 말기인 3500 cycle에서 0.95를 보였다. 이는 DS-Old가 초기 단계의 침하 data를 고려하지 못함을 보여준 것이다.

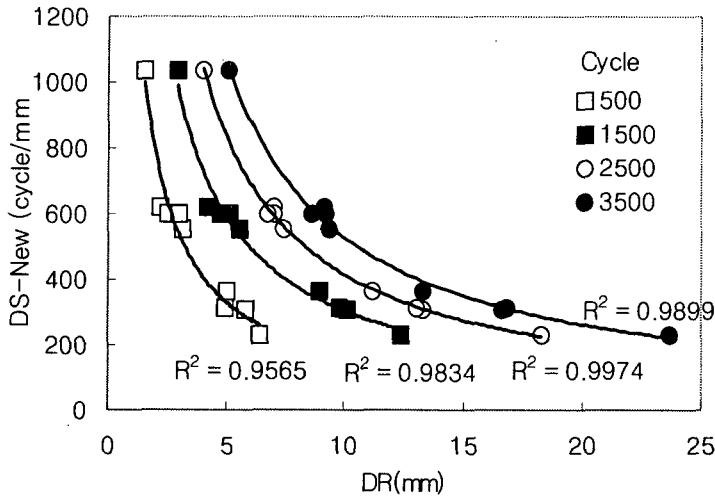


그림 4. 편마암 밀입도 재생혼합물의 Cycle 별 DR와 DS-New의 상관관계 비교

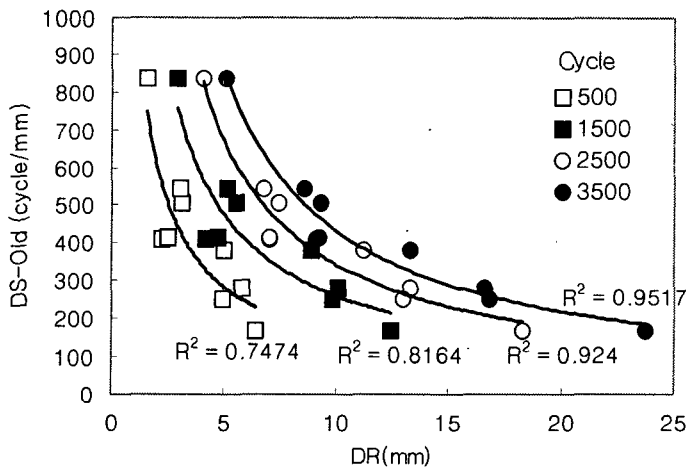


그림 5. 편마암 밀입도 재생혼합물의 Cycle 별 DR와 DS-Old의 상관관계 비교

DR 수준이 8mm 이하를 보인 화강암 혼합물의 그림 6, 7에서 DS-New는 단계에 관계없이 모든  $R^2$ 가 0.99이상 1.0에 가까운 값을 보였다. 반면, DS-Old는 초기 침하단계 (500 cycle)는 낮은  $R^2=0.91$ 이었고, 점차  $R^2$ 이 증가되어 말기인 3500 cycle에서 약 0.95를 보였다. 따라서 이 그림에서도 역시 DS-Old는 혼합물의 초기 침하 데이터가 반영이 되지 않은 상태로 마지막 단계의 침하상태에 의존하고 있으며 DS-New에 비해 전반적으로 그 상관성도 낮은 상태임을 보여주었다.

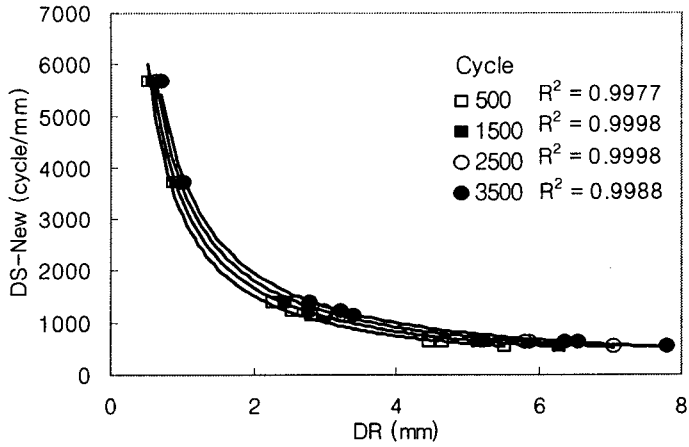


그림 6. 화강암 개질혼합물의 Cycle 별 DR와 DS-New의 상관관계 비교

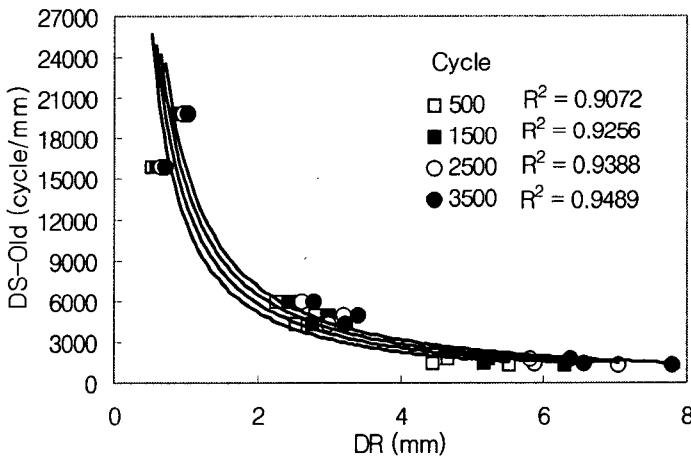


그림 7. 화강암 개질혼합물의 Cycle 별 DR와 DS-Old의 상관관계 비교

특히 그림 6, 7에서 보듯이 DR이 4mm 이하로 낮은 수준에서 DS-Old는 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 DS-New는 모든 단계 (500, 1500, 2500, 3500 cycle)에서 침하 수준에 관계없이 data가 고르게 나타나 DR이 낮은 강한 혼합물에서 변별력이 더욱 더 우수함을 보여준다.

5. 결론

반복 주행(Wheel tracking: WT) 시험에서 기존의 동적안정도 (Dynamic stability: DS) 계산은 주행 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 침하속도가 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(DS-New)는 기존 동적안정도(DS-Old) 계산 방법의 모순점을 개량하여 보다 명확하게



아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 판정하기 위해 개발하였다. 새로운 계산 방법에서는 누적 평균 침하 깊이를 개념을 도입함으로써 마지막 단계의 침하 진전도만이 고려되는 기존 방법보다 초기(500cycle) 중기(1,500, 2,500cycle) 및 말기(3,500cycle)에서의 침하깊이를 누적해서 고려함으로써 동적안정도의 합리적인 값이 얻어지도록 하였다. 계산 결과 이 방법은 혼합물 간의 소성변형 특성을 동적안정도로 나타냄에 있어 합리적이며 유사 혼합물간의 평가에도 상당한 변별력을 가지고 있음을 알 수 있었다.

또한 기존의 연구에서 얻어진 동적안정도로 변형강도와와의 상관성을 회귀분석을 통해 비교해 본 결과 새로 개발된 동적안정도(DS-New)의  $R^2$ 이 기존 동적안정도 (DS-Old)보다 더 높은 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

동적안정도와 침하깊이와의 상관관계를 각 혼합물 별로 DS-Old와 DS-New가 침하 단계별(500, 1500, 2500, 3500 cycle) DR과 어떤 상관성이 있는지를 비교해 본 결과 전반적으로 DS-New의  $R^2$ 이 DS-Old보다는 더 높았다. 그리고 DS-New는 혼합물 침하 단계에 관계없이 매우 높은 상관관계를 가지고 있어 혼합물의 소성변형 특성을 근본적으로 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 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. 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