

아스팔트 콘크리트 변형강도 시험의 적정재하속도 선정연구

Proper loading speed for deformation strength test of asphalt concrete

백성현¹⁾ 조병진²⁾ 김현환³⁾ 박남원³⁾ 김광우⁴⁾

Sung H. Baek Byung J. Cho Hyun H. Kim Nam W. Park Kqang W. Kim

1. 서론

국내 아스팔트 혼합물의 배합설계 기준으로 이용되는 마찰안정도를 대신해서 아스팔트 포장의 변형 저항성을 반영할 수 있는 대체 특성치(Surrogate property) 개발에 대한 요구가 많은 실정이다. 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성 평가 시험법으로 회복탄성계수(Resilient modulus : M_R) 시험, 반복주행(Wheel tracking : WT)시험, 동적 크리프(Repeated load creep)시험, 삼축 동적압축 시험 등이 있다. 그러나 이들 시험들은 시험자의 숙련도에 따라 변동성이 크게 나타나게 되어 실용성이 떨어진다.

최근의 연구에서 비교적 이해가 쉽고, 장비가 간편하며, 실험결과가 현장 공용성과 상관성이 크도록 현장 상태를 최대한 모사할 수 있는 시험법을 개발하여 실용화 연구를 진행중인 Kim Test를 통한 변형강도(Deformation Strength : S_D) 방법은 현재까지의 결과 동적크리프(Repeated Load Creep)시험과 R^2 이 0.79 이상(조문진 등 2005), 반복주행(Wheel Tracking : WT)에서 R^2 이 0.90 이상의 상관성을 가지는 것을 알 수 있었다(김광우 등 2007). 현재, 실용화를 실현하기 위하여 다양한 혼합물을 이용한 상관성 연구와 현장 공용성과의 상관성 분석을 통한 타당성 입증에 위하여 현장 코어 채취를 통해 현장의 소성변형 상태와 변형강도 값을 비교하고, 실외 원형 모의 주행 시험기(Field Circular Wheel Tracking)를 이용한 혼합물의 물성변화에 대한 변형강도 값의 상관성분석과 같은 구체적인 실용화 연구가 이루어지고 있다.

이러한 연구의 일환으로 본 연구의 목적은 반복주행시험 결과와의 상관성 분석을 통해 Kim test의 최적 재하 속도를 선정하는 것이다. 이를 위하여 재하속도를 분당 10mm, 30mm, 50mm, 70mm로 구분하여 변형강도를 측정하여 이를 반복주행 시험 결과와의 상관관계를 회귀분석을 하여 최적 재하속도를 선정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

본 연구에서 사용된 기본 아스팔트는 국내에서 가장 널리 사용되는 침입도 등급 60~80 (AP-5)를 사용하였으며, 아스팔트 개질재로는 재생 LDPE(Recycled low-Density polyethylene), 페타이어를 분쇄하여 30번체를 통과한 고운 고무입자 (Crumb Rubber Modifier:CRM)를 사용하였다. 또한 Styrene-butadiene-styrene(SBS)로 개질하여 상용화되어 시중에 시판되고 있는 PG76-22 아스팔트 바인더를 사용하였고 골재는 편마암과 화강암을 2종류의 쇄석을 굵은골재와 잔골재로 사용하였으며, 채움재는 석회석분을 사용하였다. 골재의 입도는

1) 정회원 · 강원대학교 대학원 박사과정

2) 정회원 · 강원도 개발공사 토목직 사원

3) 정회원 · 강원대학교 대학원 석사과정

4) 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수 · e-mail: asphaltech@hanmail.net

Figure 1와 같다.

Table 1. Designation of binder and description

Designation	Description
AP-5	Base pen. 60-80 binder without any modifier(control)
R10	Modified binder with 10% CRM by wt. of total binder
RL6R5	Modified binder with 6% RLDPE and 5% CRM by wt of total binder
PG76-22	Modified binder with unknown content of SBS for commercial PG-76-22

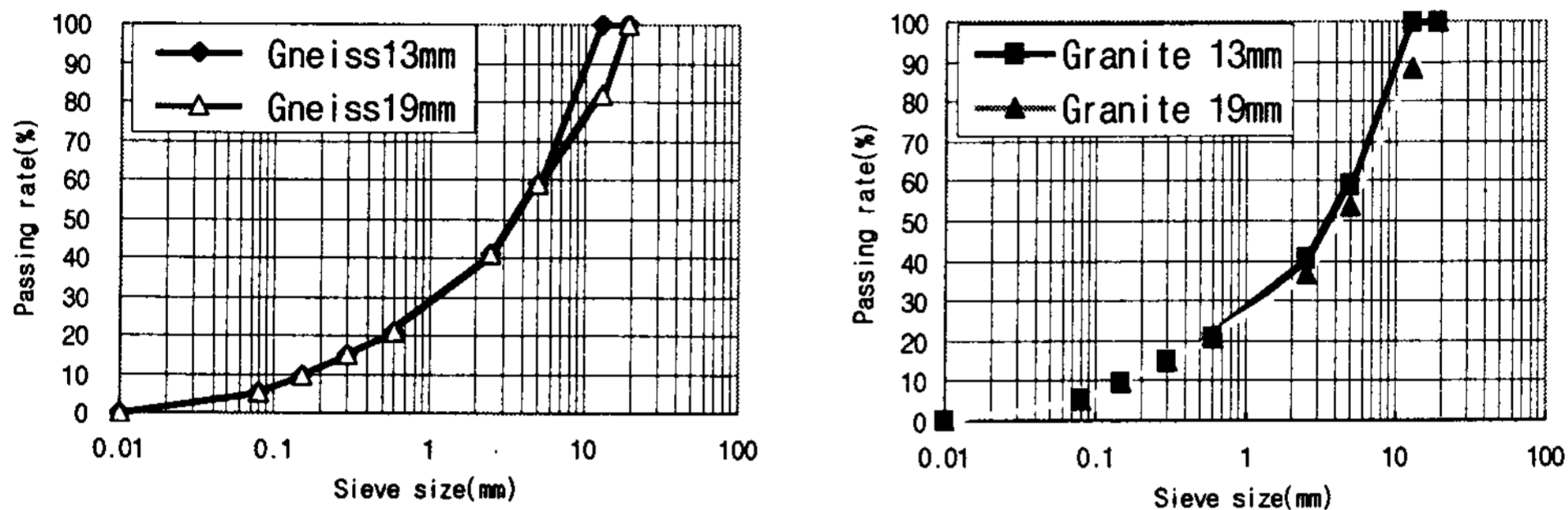


Figure 1. Gradation curves of gneiss and granite

2.2 방법

가. Kim Test 변형강도 시험

본 연구에서는 기존의 정하중 변형강도시험에서 사용된 직경(D) 40mm 절삭반경(r) 10mm의 하중봉을 사용하였다.

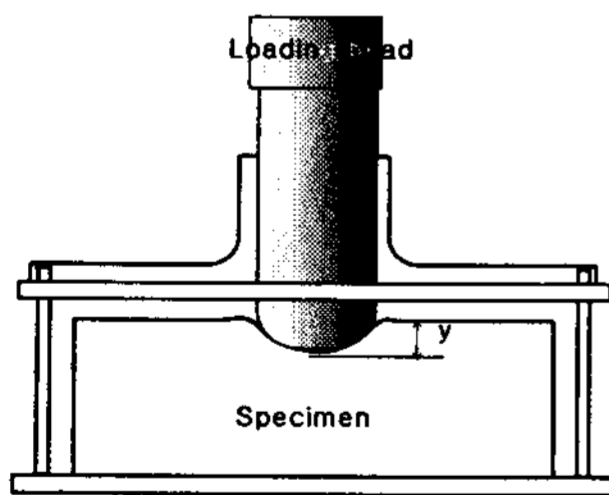


Figure 2. Schematic of Kim tester and its details loading mechanism Figure

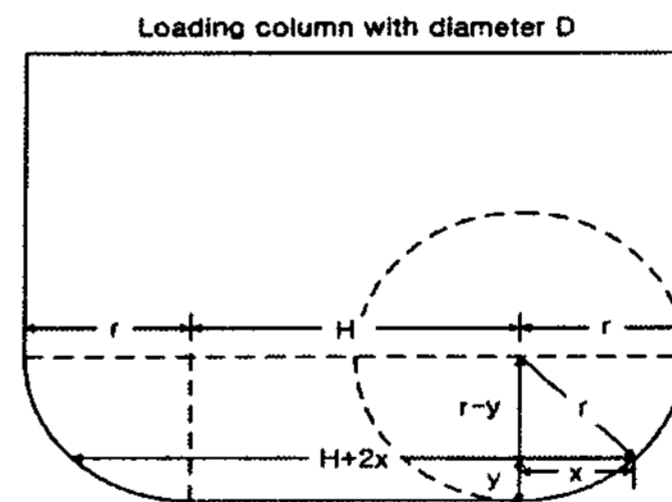


Figure 3. Configuration of round-cut at the bottom of loading head

변형강도는 하중-변형 곡선에서 최대하중과 이때 표면으로부터 y만큼 변형을 측정하여 계산하였으며 이 계산식은 다음과 같다.

$$S_D = \frac{0.32P}{[10 + \sqrt{20y - y^2}]^2} \quad \text{-----(1)}$$

여기서 S_D = 변형강도 (MPa), y = 수직변형 값(mm) 이다.



나. 반복주행(Wheel tracking)시험

본 연구에서는 한국 산업규격(KS)의 동적 안정도 (KS F2374, 2000)의 주행말기의 Data만을 이용하므로 전체적으로 침하깊이(Rut depth: RD)가 깊어도 말기에 침하 진전도가 낮으면 동적안정도 (Dynamic stability: DS)가 커서 우수한 혼합물로 판정되는 모순을 가지고 있어 최근 발표된 수정 동적 안정도 값을 이용하여 분석에 사용하였으며, Figure 4와 식(2)는 본 연구에서 사용된 동적안정도 산출 방법 식이다.

$$DS_{new}(pass/mm) = 2(m_1 + m_2 + m_3) = 2 \left[\frac{500}{D_{500}} + \frac{1,800}{D_{1,800}} + \frac{3,600}{D_{3,600}} \right] \text{-----(2)}$$

여기서, $D_{500} = 500$ cycle 에서의 침하깊이 (mm), $D_{1800} = 1,800$ cycle 에서의 침하깊이 (mm), $D_{3600} = 3,600$ cycle 에서의 침하깊이(mm)이다.

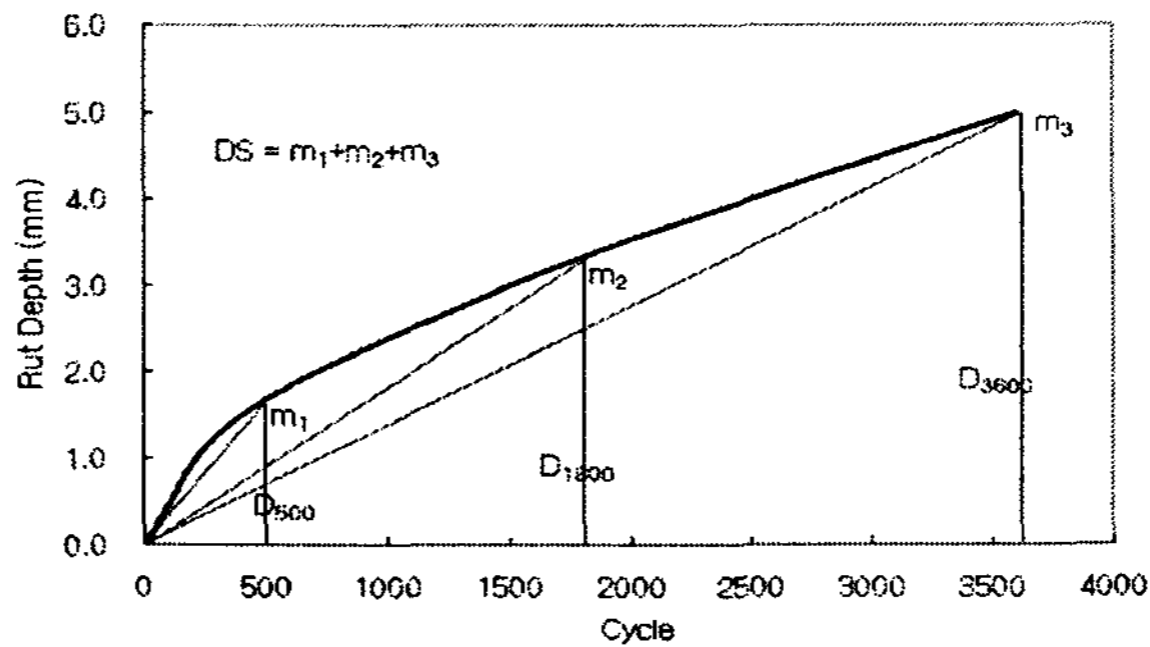


Figure 4. New dynamic stability used in this evaluation (김광우 등 2006)

3. 결과 및 고찰

3.1 재하속도 선정시험

각 혼합물 별로 1시간씩 160℃에서 단기 노화된 혼합물을 선회 다짐기로 75회 다짐하여 직경 10cm 공시체를 다짐하여 골재 2종(A 화강암, B 편마암)과 굵은골재 최대치수 2종 (13mm,19mm), 바인더 4종 (AP-5, R10, RL6R5, PG76-22)으로 16가지 혼합물을 제조하여 4가지 재하속도(10mm/min, 30mm/min, 50mm/min, 70mm/min)로 변형강도를 측정하였다. 공시체 공극률이 4%를 기준으로 하였으며 Table 2, 3은 각각의 공시체에 대한 변형강도 값을 나타낸다. 일반적으로 재하속도가 빨라지면 변형강도가 높게 나타나는 경향을 보였다.

Table 2. S_D of 4 mixtures by loading speed (13mm)

Mixture	OAC	10(mm/min)		30(mm/min)		50(mm/min)		70(mm/min)		
		Air void(%)	SD (MPa)	Air void(%)	SD (MPa)	Air void(%)	SD (MPa)	Air void(%)	SD (MPa)	
Gneiss	AP-5	5.3	4.53	2.39	4.71	2.57	4.65	3.13	4.10	3.18
	R10	6.0	4.47	2.43	4.57	2.76	5.02	3.20	3.27	3.00
	RL6R5	6.1	4.27	2.61	5.23	3.18	5.12	3.57	4.65	3.62
	PG76-22	5.3	3.84	4.15	3.86	4.13	3.82	4.66	3.77	5.43
Granite	AP-5	5.5	4.65	2.36	4.65	2.91	4.74	3.09	4.56	3.43
	R10	5.8	4.77	2.41	4.20	3.25	4.36	3.52	4.39	3.64
	RL6R5	6.1	4.38	3.38	4.34	3.76	4.33	3.95	4.52	4.28
	PG76-22	5.4	3.70	4.28	4.11	4.26	3.93	4.90	4.05	5.00



Table 3. S_D of 4 mixtures by loading speed (19mm)

Mixture	OAC	10(mm/min)		30(mm/min)		50(mm/min)		70(mm/min)		
		Air void(%)	SD (MPa)	Air void(%)	SD (MPa)	Air void(%)	SD (MPa)	Air void(%)	SD (MPa)	
Gneiss	AP-5	4.8	4.81	2.42	4.07	2.89	4.39	3.83	4.38	3.95
	R10	5.3	4.73	2.86	4.66	3.53	4.59	3.75	4.01	4.19
	RL6R5	5.4	5.11	3.11	5.25	3.79	4.70	4.14	5.02	4.17
	PG76-22	4.7	4.33	4.75	4.38	5.60	4.40	5.54	4.30	6.04
Granite	AP-5	5.0	4.92	2.55	4.25	3.14	4.64	3.44	4.39	3.57
	R10	5.6	3.11	2.66	3.68	3.28	3.83	3.41	3.96	3.78
	RL6R5	5.2	4.68	3.15	4.95	3.46	4.42	3.64	4.65	3.92
	PG76-22	4.6	4.10	3.15	4.05	3.58	4.02	3.95	3.95	4.62

3.2 반복주행 시험

반복주행 시험은 동적 하중 하에서 소성변형에 대한 혼합물의 저항성을 평가하는 일반적인 방법이다. 본 연구에서는 목표 공극률 4%의 배합설계를 거쳐 결정된 최적 아스팔트 함량으로 혼합물을 제조하여 단기 노화를 거친 후 305mm×305mm×62mm의 슬래브 공시체를 롤러 다짐기로 제작하였다. 반복주행 시험에 사용된 슬래브 공시체에 90분간(3600cycle) 60°C에서 100psi의 운하중 압력을 40cycle/min의 속도로 가하였으며, 최종 침하 깊이(Rut Depth)를 측정하였고 식(2)를 이용하여 동적안정도를 산출하였다. Table 4는 동적안정도와 최종 침하 깊이를 보여준다.

Table 4. Result of wheel tracking test

Mixture	13mm				19mm				
	OAC	Rut depth(mm)	DS _{KS} (pass/mm)	DS _{new} (pass/mm)	OAC	Rut depth(mm)	DS _{KS} (pass/mm)	DS _{new} (pass/mm)	
Gneiss	AP-5	5.3	5.54	3,250	2,451	4.8	5.47	4,456	2,363
	R10	6.0	3.67	3,709	3,710	5.3	3.54	4,620	3,703
	RL6R5	6.1	1.71	20,250	7,533	5.4	2.24	10,500	5,387
	PG76-22	5.3	1.73	12,721	7,594	4.7	1.94	12,600	6,513
Granite	AP-5	5.5	5.93	1,941	2,423	5.0	6.46	1,752	2,229
	R10	5.8	3.54	3,671	4,416	5.6	5.32	3,408	2,537
	RL6R5	5.1	2.19	12,651	6,218	5.2	2.46	12,685	6,004
	PG76-22	5.4	1.63	9,206	8,155	4.6	1.60	8,552	9,008

3.3 재하속도에 따른 변형강도와 최종침하깊이 및 동적안정도의 상관성 분석

Figure 5(a)는 재하속도에 따른 변형강도를 측정하고, 이를 반복주행 시험의 최종 침하깊이와의 상관관계를 회귀분석 한 결과의 대표적인 것이며 Figure 5(b)는 동적안정도와 상관관계를 회귀분석 한 결과의 대표적인 것이다. 4가지 조합(13mm, 19mm, 편마암, 화강암)에서 재하속도별로 얻어진 S_D 값의 반복주행시험 침하 깊이와의 상관관계를 보면 분당 30mm의 속도가 R^2 이 가장 높게 나왔다. 상대적으로 속도가 빠른 50mm나 70mm는 강도 값은 크게 나왔으나 변동성이 크고 반복주행시험과 상관성이 낮게 나타났다.

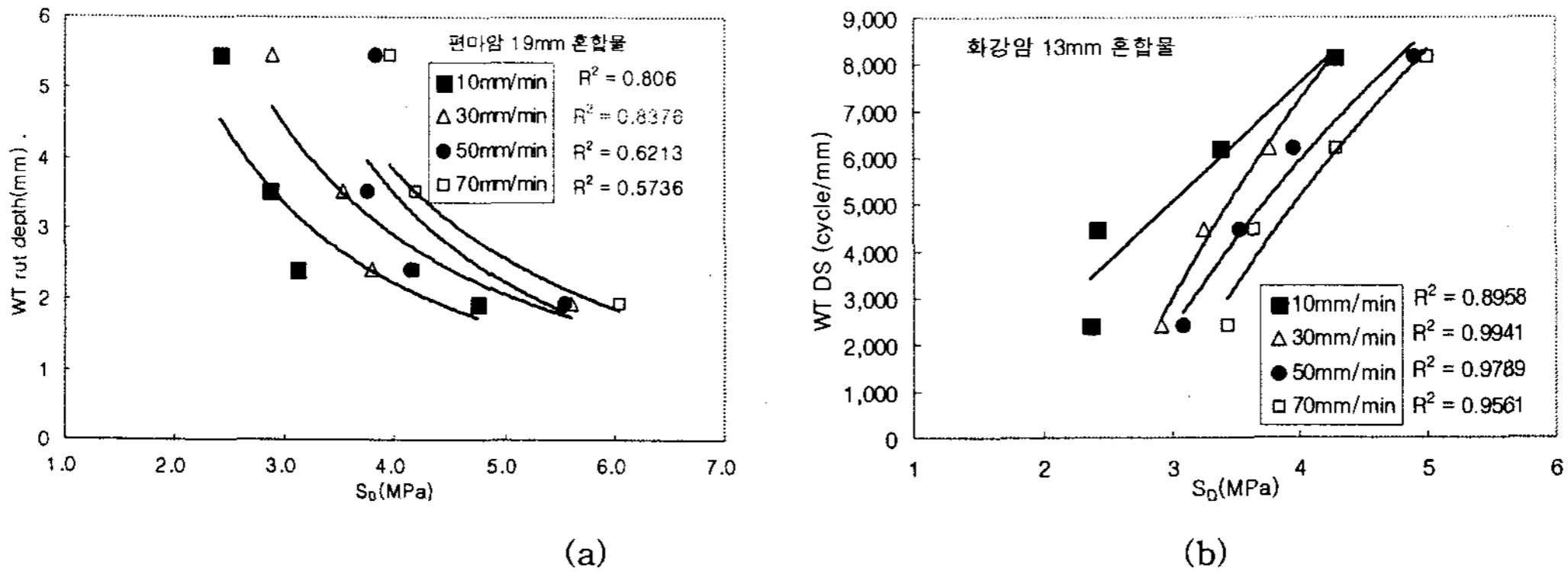


Figure 5. Typical correlation between (a) WT rut depth vs. deformation strength and (b) dynamic stability vs. deformation strength by loading speed.

또한 Figure 6은 4가지 조합에서 재하속도별로 침하깊이(RD)를 사용해 얻어진 R²의 평균치와 동적안정도(DS)를 사용해 얻은 R²의 평균치를 3차 함수로 회귀분석 하여 얻은 최적 속도를 나타낸다. 회귀분석은 3차 식으로 분석한 이유는 2차식이 일반적인 경향을 비교적 잘 나타내는 반면, 3차식은 정점부근에서의 경향을 더 잘 나타내기 때문이다. 그림에서 두 회귀분석에서의 최고 R²이 되는 점은 28.3과 30.2로 다소 차이가 있으나 이를 평균해보면 29.25이다. 따라서 이와 가까운 정수인 30mm/min를 최적 속도로 제시하는 것이 현실적으로 적용이 편리할 것으로 판단된다.

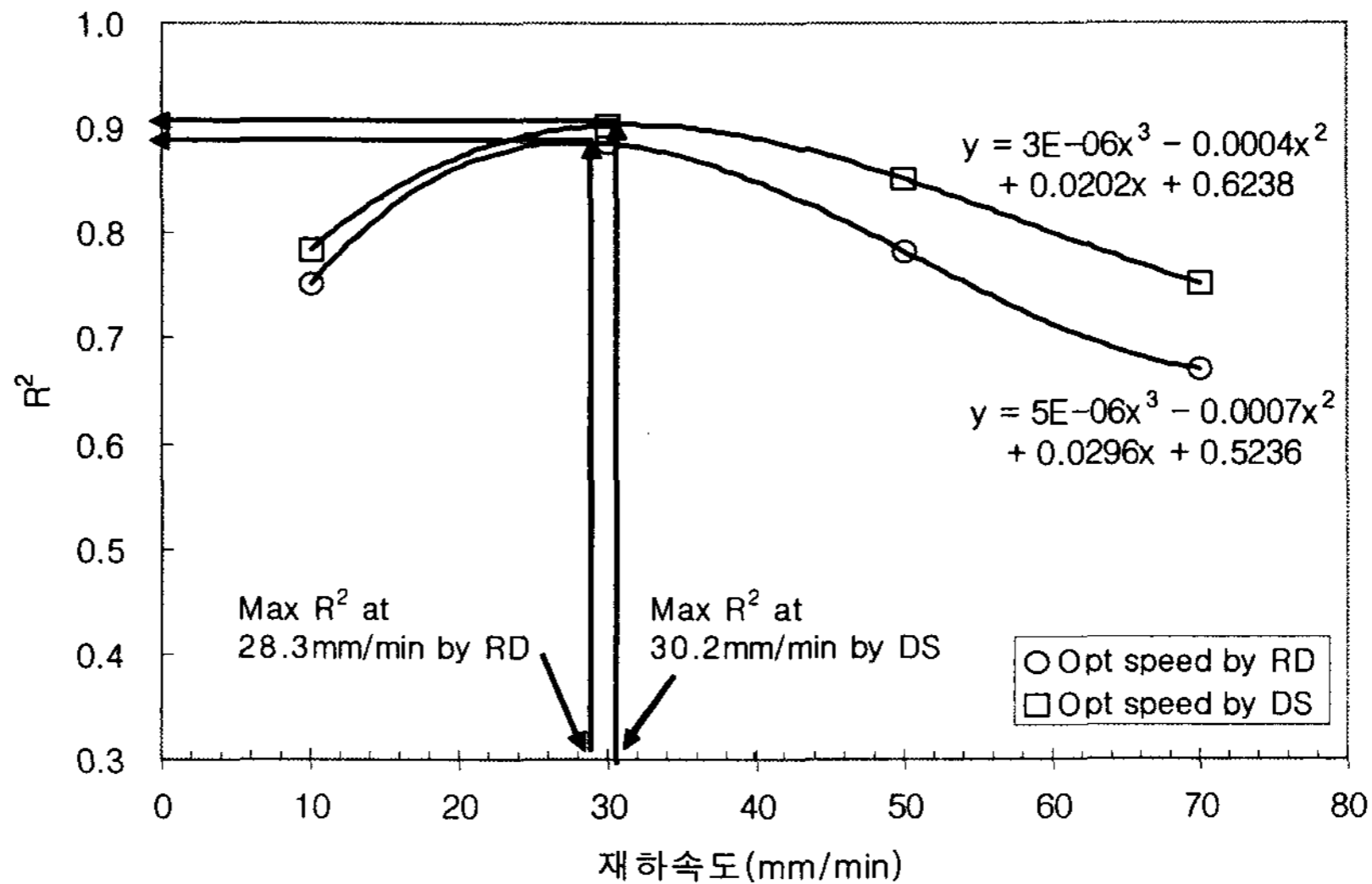


Figure 6. Regression curves and R² (based of rut depth and S_D) for cubic functions, and the optimum speed at the peak R² for regression curves

4. 결론

본 연구는 아스팔트 혼합물의 변형강도 시험법을 정립하기 위한 연구의 일환으로 하중 재하속도별 변형 강도의 차이와 반복주행 시험과의 상관성 분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 재하속도에 따른 Kim test의 변형강도 분석에서 재하속도가 증가하면 S_D 값이 커지는 경향을 보여서



재하속도가 변형강도에 영향이 큰 요소임을 알 수 있었다.

- 2) 재하속도에 따른 Kim test의 변형강도와 반복주행시험 결과와의 회귀분석에서 동적안정도와 S_D 의 관계가 침하깊이와 S_D 의 관계보다 다소 높은 R^2 을 보였다. 이는 개선된 새로운 동적안정도를 사용하여 얻어진 결과로 개선된 DS 산정 방법이 타당성이 있음을 암시하는 것이라 할 수 있다.
- 3) 침하깊이와 재하속도에 의한 R^2 과 동적안정도와 재하속도에 의한 R^2 을 통해 최적의 재하속도를 추정 한 결과 각각에 다소 차이는 있으나 실용적으로 볼 때 30mm/min이 최적의 재하속도로 얻어졌다.
- 4) 본 연구에서 제시한 변형강도 재하속도에 대한 결정은 현재까지의 시험결과를 바탕으로 얻어진 결과 이며, 추후 이에 대한 충분한 검증과정을 거쳐 보안 필요시 보완 조정이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 자유공모과제의 지원에 의해 강원대학교 석재복합건설신소재연구소의 장비를 사용하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

- 김광우, 이문섭, 김준은, 최선주 (2002), "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 강도특성 개발에 관한 기초연구," 한국도로학회 논문집, 제 4권 4호, pp.23-40.
- 김광우, 도영수, 이기호, 조문진, 권오선, 고태영 (2004a), "아스팔트 혼합물의 배합설계의 문제점 분석 및 개정방안," 대한토목학회 학술대회 4D권
- 김광우, 최선주, 이기호, 도영수 (2004b), "온도 변화에 따른 아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성변형과의 상관성 연구," 대한토목학회 논문집, 제24권 5D호 pp.37-46.
- 김광우, 도영수, (2006b) "아스팔트 혼합물 반복주행 시험에서 합리적 동적 안정도의 산정 방법," 한국도로학회 논문집 제8권 1호
- 김광우 등, "아스팔트 콘크리트의 고온 내변형 저항성 평가기법의 개발연구," 건설교통부 2차년도 연구보고서, 2007. 12.
- Bell, C. A. (1989), "Summary report on aging of asphalt-aggregate systems," Report No. SHRP-A-305. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- Collins, R., Shami, H. and Lai, J. S. (1996) "Use of Georgia Loaded Wheel Tester To Evaluate Rutting of Asphalt Samples Prepared by Superpave Gyrotory Compactor," In Transportation Research Record 1545, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 161-168.
- Cooley, Jr., A. L. and Kandhal, P. S. (2000) "Loaded Wheel Testers in the United States," Report to National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 00-04.
- Kemp, G. R. and Predoehl, N. H. (1981), "A Comparison of Field and Laboratory Environments on Asphalt Durability," Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 50, pp. 492-537.
- Tia, M., Ruth, B. E., Charai, C. T., Shiau, J. M., D Richardson and Williams J. (1988), "Investigation of Original and In-Service Asphalt Properties for the Development of Improved Specifications-Final Phase of Testing and Analysis," Final Report, Engineering and Industrial Experiment Station, University of Florida.
- Von Quintas, H., Scherocman J., Kennedy, T. and Hughes, C. S. (1988), "Asphalt Aggregate Mixture Analysis System," Final Report to NCHRP.