

# 아스팔트 콘크리트 반복주행 시험용 고무바퀴와 강재바퀴의 성능 비교 연구

## Comparison of Performance of Rubber Wheel & Steel Wheel for Wheel Tracking Test of Asphalt Concretes

홍준표<sup>\*</sup> · 조문진<sup>\*\*</sup> · 고태영<sup>\*\*\*</sup> · 김광우<sup>\*\*\*\*</sup>

Hong, Joon Pyo · Cho, Mun Jin · Ko, Tae Young · Kim, Kwang Woo

### 1. 서론

우리 나라는 아스팔트 포장의 전 도로의 약 90%를 차지하고 있으나 교통하중 및 정체구간의 증가, 기후 환경의 변화 등으로 1990년대 이후 소성변형(permanent deformation or rut)발생이 급증하게 되었다. 소성변형이 발생하면서 강우시 바퀴궤적(Wheel path)에 수막(Hydroplaning)이 발생하여 미끄럼 저항성이 상실되며 평탄성 불량으로 운전자의 조향 능력이 감소되는 등 교통 안전에 심각한 장애를 초래한다. 따라서 이의 처리를 위한 유지보수비용이 상당히 큰 비중을 차지하게 되었으며 이제는 국가적 차원에서 해결해야 할 문제점으로 대두되었다.

현재 국내 아스팔트 혼합물 배합설계 기준으로 이용되는 마찰시험법의 안정도나 흐름치는 혼합물의 역학적 특성을 제대로 반영하지 못하며 소성변형과 상관성이 낮다. 따라서 안정도나 흐름의 기준을 통과하는 배합으로 제조한 혼합물에서도 소성변형이 많이 발생하고 있어서 마찰시험법을 대신해서 아스팔트 포장의 소성변형 저항성을 어느 정도 반영할 수 있는 대체 특성치(Surrogate property)의 개발이 필요하다.

또한 배합설계후 OAC로 혼합물을 제조하여 소성변형 저항성을 예측하기 위해 반복주행시험(Wheel tracking : WT)을 하는 경우가 많다. 하지만 반복주행시험법은 시험방법이 아직 표준화가 되어있지 않아 본 연구에서는 반복주행시험에서 핵심요소가 될 수 있는 바퀴의 재질에 관한 연구를 하였다. 따라서 본 연구의 목적은 대체특성으로 개발중인 Kim test와 바퀴 재질에 따른 반복주행시험(Wheel tracking test)을 수행하고 소성변형과 변형강도와와의 상관성을 분석하여 소성변형 저항성 판정에 사용되는 최적의 반복주행 시험용 바퀴 재질을 변형강도의 상관성에 근거하여 선정하는 것이다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 실험 재료

본 연구에서는 강원 춘천시 A사(편마암), 강원 횡성군 B사(화강암)의 골재를 사용하였다. 이들을 각기 KS F에 규정된 방법에 따라 품질 시험을 수행하였고, 모두 규정에 만족하였다. 골재는 굵은골재 최대치수 13mm로 하여 잔골재, 채움재와 혼합하여 건설교통부 13mm 표준용 밀입도 규격에 적합한 입도로 조정하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 폴리머는 LDPE (Low-density polyethylene), SBS (Styrene-butadiene-styrene), SBR (Styrene-butadiene-rubber), PG76-22, 재생 LDPE와 HDPE이다. 재생 LDPE(Recycled LDPE : RLDPE)와 재생 HDPE(Recycled HDPE : RHDPE)는 폐비닐을 수거하여 자원재생공사에서 펠렛으로 만든 것을 분쇄하여 NO.8~30 크기로 만든 것이다. 표 1은 본 실험에 사용된 혼합물의 종류를 보여준다.

\* 정회원 · (주)현대산업개발 토목기술영업팀/부장 · 02-2008-8909(E-mail : 5452@hyundai-dvp.com)  
\*\* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-7284(E-mail : cmi7710@hanmail.net)  
\*\*\* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-7284(E-mail : xoduddia@hotmail.com)  
\*\*\*\* 정회원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사 · 033-250-6467(E-mail : kwkim@kangwon.ac.kr)



표 1. Designation of dense-graded mixtures

Designation	Description of mixture
AD50	Dense (D)-graded gneiss (A) agg. AC 60-80 mix.
AD3R7	D graded A agg. AC 80-100 with SBR 7% mix.
AD3S3	D graded A agg. AC 80-100 with SBS 3% mix.
AD3S5	D graded A agg. AC 80-100 with SBS 5% mix.
AD3L6	D graded A agg. AC 80-100 with LDPE 6% mix.
ADPG76	D graded A agg. PG76-22 mix
AD3RL8	D graded A agg. AC 80-100 with RLDPE 8% mix.
AD3RH8	D graded A agg. AC 80-100 with RHDPE 8% mix.
BD50	Dense (D)-graded granite (B) agg AC 60-80 mix.
BD3R7	D graded B agg. AC 80-100 with SBR 7% mix.
BD3S3	D graded B agg. AC 80-100 with SBS 3% mix.
BD3S5	D graded B agg. AC 80-100 with SBS 5% mix.
BD3L6	D graded B agg. AC 80-100 with LDPE 6% mix.
BDPG76	D graded B agg. PG76-22 mix.
BD3RL8	D graded B agg. AC 80-100 with RLDPE 8% mix.
BD3RH8	D graded B agg. AC 80-100 with RHDPE 8% mix.

## 2.2 Kim test

김광우 등 (2002a,b,c)은 다양한 종류의 아스팔트 혼합물에서 소성변형 저항성과 밀접한 관계가 있는 변형강도(Deformation strength;  $S_D$ )를 정하중하에서 측정하는 Kim test를 개발하였다. 이 시험법은 하중을 혼합물이 다져진 방향과 같은 방향으로 가하고 재하에 의해 혼합물이 소성변형과 유사하게 압밀·전단에 의한 변형이 유발되도록 바닥이 둥근 하중봉을 사용하였다. 시험온도는 소성변형 저항성을 측정하는 반복주행(Wheel tracking) 시험에서와 같은 온도인 60°C에서 수행하고, 그림 1과 같은 장치를 통해 수직으로 정하중을 가하도록 하였다.

Kim test에서 얻어지는 강도치는 아스팔트 혼합물이 고온에서 변형에 저항하는 정도를 나타내는 특성치로서 변형강도( $S_D$ )라 정의하였다. 변형강도의 계산은 그림 1과 같은 한  $D(r)$  하중봉이 재하하중에 의해 표면으로부터  $y$ 만큼 아스팔트 혼합물로 눌러 들어갈 경우의 최대하중과 변형을 사용하여 식(1)로 계산하였다.

$$S_D = \frac{4P}{\pi(D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2}))^2} \dots\dots\dots(1)$$

여기서  $P$  = 최대하중 (N)  
 $D$  = 하중봉의 직경 (mm)  
 $r$  = 하중봉의 원형절삭반경 (mm)  
 $y$  = 변형값 (mm)

이고,  $S_D$ 의 단위는 MPa이다.

그림 1(a)는 직경 10cm 마샬식 공시체와 Kim tester를 마샬시험기에 얹어 놓고 시험을 하는 모습이며 이로부터 얻어지는 하중-변형곡선은 그림 1(b)와 같다.

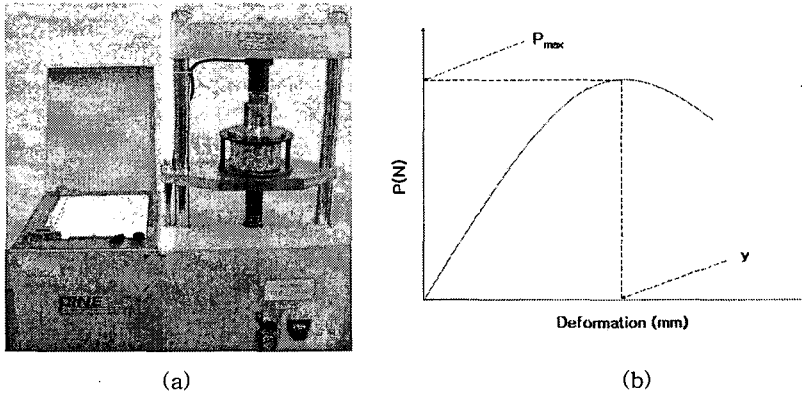


그림 1. Illustration of (a) Kim tester setting on a Marshall press and (b) a typical load-deformation curve from Kim test.

**2.3 반복주행시험**

본 실험에서는 배합설계를 거쳐 결정된 최적 아스팔트 함량으로 305mm × 305mm × 62mm의 슬래브 공시체를 공극률 4±0.5 %를 목표로 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 양생 후 반으로 잘라 시험온도에서 6시간 이상 저장 후 반복주행 시험기로 시험을 수행하였다.

본 연구에서는 반복주행 시험에 사용되는 고무바퀴의 두께에 따른 혼합물의 침하깊이 차이를 분석하기 위하여 2종류(7.5mm, 15mm)의 고무바퀴와 강제바퀴를 사용하였고, 고무바퀴의 재질은 KS F 2374 에서 규정한 IRHD 경도 84±4(20℃), 78±2(60℃)를 사용하였다. 바퀴의 지름은 200mm, 바퀴의 너비는 53mm로 하였으며 바퀴의 반복주행에 따른 수직 침하량을 측정하였다. 그림 2는 강제바퀴와 고무바퀴의 형상을 보여준다. 실험은 60℃에서 90분동안 수행하였고, 주행속도는 40cycle/min, 차륜 축하중은 140psi 로 하였다. 1회 주행거리는 200mm로 하고 축에 LVDT를 설치하여 반복주행에 따른 침하량을 컴퓨터를 통해 측정·기록하고 최종 침하 깊이(Rut depth: DR)와 동적안정도(Dynamic stability: DS)를 분석에 사용하였다.

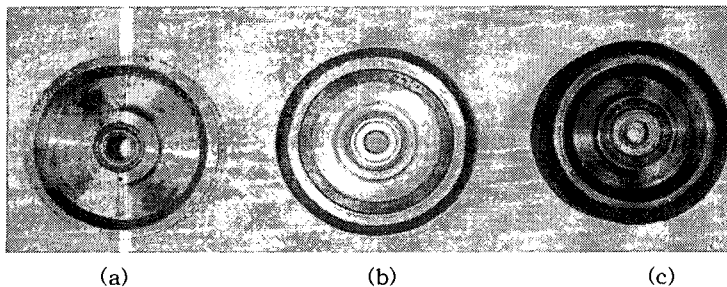


그림 2. Illustration of (a) steel wheel without rubber, (b) steel wheel with a 7.5mm thick rubber, and (c) steel wheel with a 15mm thick rubber

**3. 결과 및 고찰**

**3.1 배합설계**

마살배합설계 결과로부터 결정된 각 혼합물의 최적 아스팔트 함량 (OAC)으로 공시체를 제조한 혼합물의 강도 특성은 표 2와 같다. 최적 아스팔트 함량은 개질 아스팔트 혼합물이 일반 밀입도 혼합물보다 다소 높게 나타났고, 마살안정도나 간접인장강도 역시 개질 아스팔트 혼합물이 일반 밀입도 혼합물보다 높게 나타나 종류별로 차이는 있지만 개질에 다른 효과가 크게 나타났다. 최적 아스팔트 함량의 경우 골재의 종류에 관계없이 5.6 - 6.0% 범위 내에서 결정 되었고 간접인장강도에서 낮게는 7.7kgf/cm<sup>2</sup>부터 12.5kgf/cm<sup>2</sup> 까지 양호하게 나타났다. 이 혼합물들은 향후 반복주행시험과 변형강도 시험에 사용되었다.



표 2. Marshall and tensile properties of dense-graded mixture at OAC

Mixture types	OAC (%)	Stability (kgf)	Flow (0.01cm)	ITS (kgf/cm <sup>2</sup> )	SI (kgf/mm)
AD5O	5.6	999	39	8.1	338
AD3R7	5.7	1,106	34	8.2	508
AD3S3	6.0	1,196	36	7.7	508
AD3S5	5.9	1,134	37	9.8	672
AD3L6	5.9	1,157	34	8.7	634
ADPG76	5.8	1,263	46	10.6	513
AD3RL8	5.8	1,311	33	10.4	761
AD3RH8	5.9	1,348	32	10.8	717
BD5O	5.6	1,162	32	10.3	511
BD3R7	5.7	1,139	36	7.9	496
BD3S3	5.8	1,190	39	9.9	682
BD3S5	5.9	1,256	39	10.2	713
BD3L6	5.7	1,266	33	11.6	801
BDPG76	5.7	1,239	31	10.4	671
BD3RL8	5.8	1,490	35	11.9	847
BD3RH8	5.9	1,563	38	12.5	835

### 3.2 반복주행시험 결과

본 연구에서는 두 가지 골재별 8가지 혼합물을 가지고 슬래브 공시체를 제조하여 시험온도 60℃에서 70kgf 하중하에 주행속도는 40cycle/min로 실험을 수행하였다. 표 3~4에서 바퀴 재질 및 회수별 반복주행 시험결과를 보면 강재바퀴는 1차와 2차의 최종침하깊이가 거의 같은 값을 보여 시험 결과의 반복성이 우수하게 나타났다. 그러나 고무바퀴를 사용한 결과는 7.5mm와 15mm 모두 1차와 2차의 최종침하깊이가 서로 큰 차이를 보여 시험 결과의 반복성이 떨어지는 것으로 나타났다. 그림 3은 바퀴재질에 따른 반복주행시험의 최종침하깊이를 보여준다. 동적안정도도 마찬가지로 강재바퀴를 사용하였을 때가 고무바퀴를 사용하였을 때보다 동적안정도의 값의 차이가 작음을 알 수 있었다. 따라서 고무바퀴는 최종침하깊이와 동적안정도에서 반복성이 떨어져 데이터에 신빙성이 낮고 유사한 성능을 보이는 혼합물 간에는 성능 차이를 구분해내는데 어려움이 있어 보다 깊은 연구가 있어야 할 것으로 보여 진다. 위의 실험 결과로부터 반복주행 시험시 강재바퀴가 고무바퀴보다 실험횟수를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 혼합물별 변별력이 더 우수하므로 향후 반복주행시험에 적합한 것으로 판단되었다.



표 3. 밀입도 혼합물의 바퀴재질에 따른 반복주행시험의 최종침하깊이(mm) 비교

Mixture	Steel wheel			7.5mm rubber wheel			15mm rubber wheel		
	1차	2차	변동계수 (%)	1차	2차	변동계수 (%)	1차	2차	변동계수 (%)
AD5O	14.68	14.72	0.19	5.59	9.44	36.23	4.09	7.68	43.14
AD3R7	17.90	18.73	3.20	7.50	9.21	14.47	10.41	6.54	32.29
AD3S3	10.50	11.60	7.04	6.20	8.55	22.53	4.59	7.71	35.87
AD3S5	7.10	7.65	5.27	2.00	3.09	30.28	1.36	2.53	42.12
AD3L6	6.90	6.35	5.87	1.79	1.84	1.95	1.12	2.00	39.89
ADPG76	5.41	5.24	2.26	5.01	2.17	55.94	4.42	3.00	27.06
AD3RL8	1.12	1.09	1.92	0.89	1.05	11.66	1.20	1.22	1.17
AD3RH8	1.89	2.01	4.35	1.45	1.20	13.34	1.11	0.84	19.58
BD5O	19.62	22.19	8.69	11.40	8.80	18.20	11.5	7.82	26.94
BD3R7	24.50	25.99	4.17	14.73	10.58	23.19	9.74	6.57	27.49
BD3S3	12.40	15.28	14.71	4.62	6.12	19.75	3.40	6.40	43.29
BD3S5	9.50	11.52	13.59	3.14	2.98	3.70	1.78	2.78	31.01
BD3L6	8.96	9.75	5.97	6.10	4.09	27.90	1.44	3.42	57.62
BDPG76	6.75	6.93	1.86	4.76	3.53	20.98	4.39	3.23	21.53
BD3RL8	2.12	2.28	5.14	0.89	0.55	33.39	0.84	0.72	10.88
BD3RH8	2.00	1.89	4.00	1.70	0.92	42.10	1.11	1.03	5.29
Mean	-	-	5.52	-	-	23.48	-	-	29.10

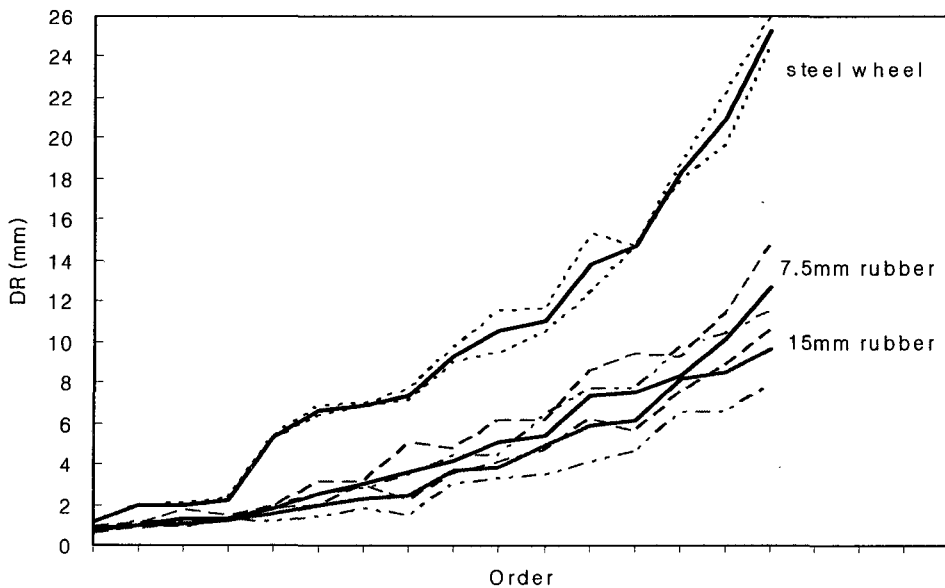


그림 3. 바퀴재질에 따른 반복주행시험의 최종침하깊이의 편차 비교

표 4. 밀입도 혼합물의 바퀴재질에 따른 반복주행시험의 동적안정도(cycle/mm) 비교

Mixture	Steel wheel			7.5mm rubber wheel			15mm rubber wheel		
	1차	2차	변동계수 (%)	1차	2차	변동계수 (%)	1차	2차	변동계수 (%)
AD5O	499	512	1.82	1,946	976	46.95	3,244	1,366	57.61
AD3R7	402	390	2.14	1,065	830	17.54	602	1,462	58.93
AD3S3	980	580	36.26	1,260	855	27.08	2,542	1,609	31.79
AD3S5	2,574	2,046	16.16	2,564	4,337	36.33	7,518	6,763	7.48
AD3L6	3,996	3,764	4.23	4,950	4,807	2.07	18,520	15,690	10.50
ADPG76	2,988	1,995	28.18	1,705	7,528	89.19	2,714	23,471	112.11
AD3RL8	15,635	18,136	10.47	21,000	15,960	19.28	11,083	13,300	12.86
AD3RH8	12,560	14,250	8.91	8,867	11,735	19.69	9,068	36,273	84.85
BD5O	609	401	29.12	1,015	1,157	9.25	825	1,313	32.28
BD3R7	560	308	41.06	397	728	41.61	679	1,432	50.45
BD3S3	896	687	18.67	2,168	1,649	19.23	4,185	1,750	58.02
BD3S5	765	625	14.24	3,990	6,541	34.26	9,500	5,955	32.44
BD3L6	1,568	1,010	30.61	2,890	3,244	8.16	6,985	4,926	24.45
BDPG76	3,488	3,004	10.54	1,712	5115	70.49	3,764	4,337	10.00
BD3RL8	8,765	5,542	31.86	18,136	79,800	89.04	49,875	15,960	72.85
BD3RH8	13,685	11,735	10.85	5,783	18,136	73.04	11,735	19,950	36.67
Mean	-	-	18.45	-	-	37.70	-	-	43.33

### 3.3 반복주행시험과 Kim test와의 상관성분석 결과

그림 4~6은 소성변형 특성인 DR값과 DS값을  $S_D$ 와의 관계를 회귀분석 하여 얻어진 결과를 바퀴별로  $R^2$  값과 같이 보여주고 있다. DR 과  $S_D$ 의 상관성은  $R^2$  값이 0.8 이상, DS 와  $S_D$ 의 상관성은  $R^2$  값이 0.7 이상으로 우수한 상관성을 나타냈다. 그 중에서도 강재바퀴는 DR의 경우  $R^2$  값이 0.95 이상, DS의 경우  $R^2$  값이 0.94 이상으로 매우 높은 상관성을 나타냈다.

바퀴 재질에 따른 상관성은 침하깊이와 동적안정도 모두 강재바퀴 > 7.5mm 고무바퀴 > 15mm 고무바퀴 순으로 나타났다. 고무바퀴의 두께가 상관성에 미치는 영향은 두께가 두꺼울수록 상관성은 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 고무바퀴의 두께의 증가에 따라 응력흡수현상이 증가하기 때문이라 판단된다.

표 5에서 보듯이 골재별로 상관성을 분석해 보면 편마암이  $R^2 = 0.8990$  로 화강암  $R^2 = 0.8562$  보다 우수한 것으로 나타났다. 특히 편마암에서 강재로 실험한 값이  $R^2 = 0.9537$  로 가장 우수한 상관성을 나타냈다. 전체적으로 볼 때 편마암이 화강암보다 높은 상관성을 보였는데 이는 편마암과 화강암의 골재특성 때문인 것으로 보여진다.

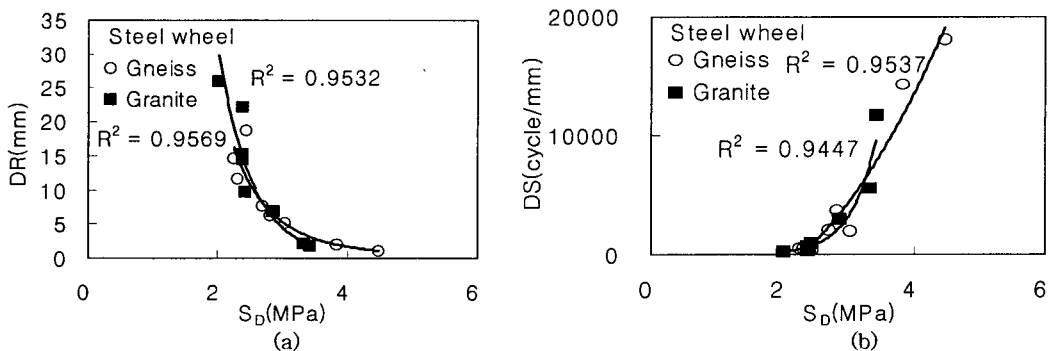


그림 4. Relationship of (a) DR vs.  $S_D$  and (b) DS vs.  $S_D$  by using loading head 4(1.0) (Steel wheel)

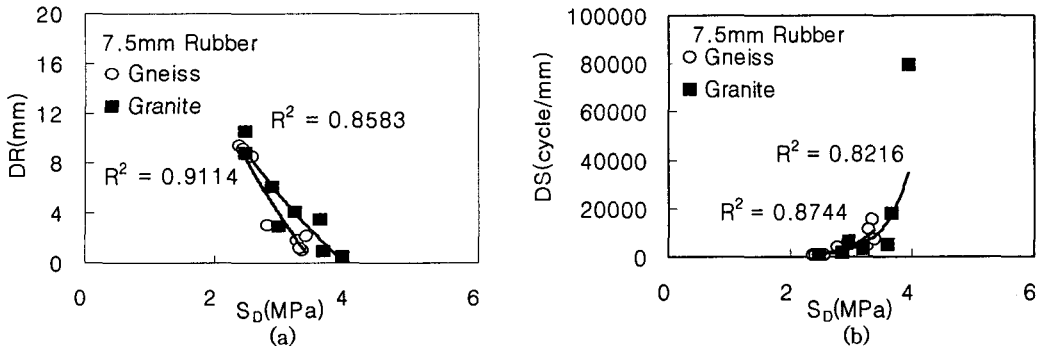


그림 5. Relationship of (a) DR vs.  $S_D$  and (b) DS vs.  $S_D$  by using loading head 4(1.0) (7.5mm rubber wheel)

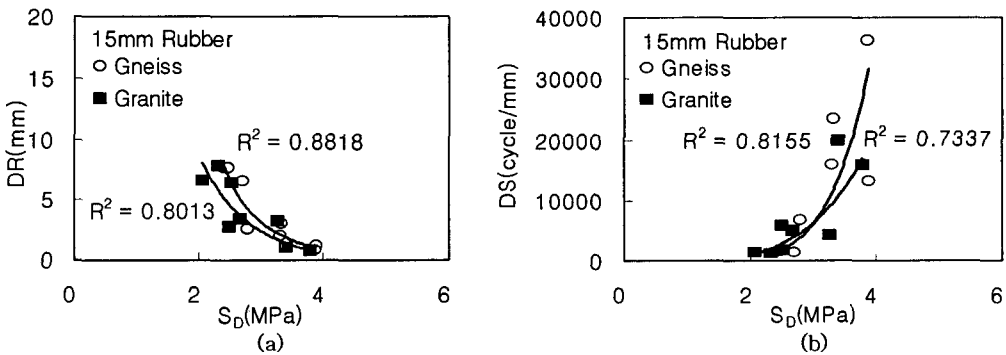


그림 6. Relationship of (a) DR vs.  $S_D$  and (b) DS vs.  $S_D$  by using loading head 4(1.0) (15mm rubber wheel)

표 5. Coefficient of determination ( $R^2$ ) between  $S_D$  and rutting properties, DR and DS

Type		4(1.0)		Mean $R^2$	
Aggregate	Wheel thickness and type	$R^2$ for DR	$R^2$ for DS		
Gneiss	Steel	0.9569	0.9537	0.96	0.8990
	7.5mm rubber	0.9114	0.8744	0.89	
	15mm rubber	0.8818	0.8155	0.85	
Granite	Steel	0.9532	0.9447	0.95	0.8562
	7.5mm rubber	0.8825	0.8216	0.85	
	15mm rubber	0.8013	0.7337	0.77	

#### 4. 결론

- 반복주행시험시 바퀴재질에 따른 최종침하깊이와 동적안정도의 변동계수를 비교해보면 최종침하깊이 및 동적안정도 모두에서 가장 낮은 값을 보여주었다. 이는 시험시 강재바퀴의 사용이 반복성이 좋음을 뜻하므로 향후 반복주행 시험시 강재바퀴의 사용이 혼합물을 소성변형특성을 평가함에 있어 유리함을 알 수 있다.



2. 휠트래킹 바퀴에 따른 소성변형과 김테스트를 통하여 구한 변형강도를 가지고 회귀분석한 결과 골재와 상관 없이 강재바퀴가  $R^2$ 이 0.9 이상으로 고무바퀴들 보다 가장 높은 상관성을 보여주었다. 특히 강재바퀴는 편마암 골재를 사용하였을 때  $R^2=0.96$ 의 상관성을 보여주어 대단히 높은 값을 나타냈다.
3. 본 논문에서는 바퀴재질에 따른 소성변형 값과 변형강도 값과의 상관성 분석을 위한 기초적인 실험을 수행하였다. 보다 일반화된 결론을 내리기 위해서는 다양한 혼합물을 제조하여 기존의 결과와 비교하여야 할 것이다. 특히 최적의 고무바퀴 두께 결정을 위해서는 바퀴두께 뿐만이 아니라 고무의 경도에 따른 연구도 필요할 것이다.

### 참고 문헌

1. 김광우, 이문섭, 김성태, 이순제, (2002a), "소성변형과의 상관성 및 추정 모델을 통한 변형강도 시험 장치변수 분석," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, 41-52.
2. 김광우, 이문섭, 김준은, 최선주, (2002b), "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 변형강도 개발을 위한 기초연구," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, 23-40.
3. 김광우, 이문섭, 김중열, 최선주, (2002c), "소성변형과의 상관성을 향상시킨 변형강도측정법의 개발," 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 67~74.
4. 홍준표 (2004), "변형강도와의 상관성에 근거한 역청 콘크리트 반복주행 시험용 바퀴의 제원 선정 연구," 공학석사학위논문, 강원대학교 대학원 pp. 1-53
5. Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amerkhanian, S. N. (2004), "Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete," In-press, International Journal of Road Materials and Pavement Design.