

아스팔트 혼합물의 반복주행시험에서 주행속도와 침하 깊이의 관계 분석

Analyses of Relationship between Wheel Speed and Rut Depth in Wheel Tracking Test of Asphalt Mixture

김광우* · 김준은** · 김변창** · 이기호***
Kim, Kwang-Woo · Kim, Jun-Eun · Kim, Bun-Chang · Lee, Gi-Ho

1. 서 론

국내에서 가열 아스팔트 혼합물 포장을 본격적으로 시공하게 된 것은 경부고속도로의 건설 이후이나 비포장이었던 국도를 우선적으로 포장하던 초기의 공사는 대부분 아스팔트 혼합물의 배합설계는 물론 층상구조도 약식으로 수행되었다. 고정식 플랜트가 귀한데다 아스팔트가 고가이던 상황에서 제대로 혼합이 이루어지지 못하였던가 바인더 량이 부족한 상태여서 초기에 건설된 포장의 대부분은 균열 등 취성 관련 손상으로 파손되었다. 이러한 균열 방지를 위해 다량의 아스팔트를 넣기 시작하면서 flushing, bleeding 등이 심하게 발생하여 한 여름에는 표면에서 아스팔트를 뜯어 낼 수 있을 정도의 상황이 되기도 하였다. 그럼에도 불구하고 차량의 숫자가 적었던 80년대까지는 대부분 도로에서 소성변형이 별문제가 되지 않았다. 하지만 90년대 초·중반부터 차량의 급격한 증가와 중차량의 증가 및 지·정체의 상습화로 고속도로는 물론 시가지 도로에서도 소성변형(permanent deformation or rut)이 발생하기 시작하였고 그것이 지금도 문제가 되고 있다.

현재 이러한 소성변형을 예측하기 위해 가장 널리 사용되고 있는 반복주행(Wheel tracking: WT) 시험법은 표준화된 방법이 정해지지 않은 상태이어서 국제적으로도 서로 다른 시험법을 사용하고 있다. WT 시험은 측정된 결과치를 배합설계 규정의 한 변수로 사용한다거나 포장구조설계의 한 변수로 사용하기보다는 아직까지는 주어진 재료의 상대비교용으로 사용하고 있다. 하지만 미국의 일부 주(Georgia, South Carolina 등)에서는 아직 문서화되지는 않았지만 특정 WT 시험기로 측정하여 최종 침하 깊이가 일정수치 이하인 혼합물만을 사용토록 추천하는 방안을 검토하는 단계에 있다. 이와 같이 이를 규정의 일부로 적용하기 위해서는 표준화된 장비와 표준화된 시험법이 필요하다. 그러므로 본 실험은 우선 우리에게 필요한 표준화된 반복주행 시험장치를 개발하기 위한 기초연구의 일환으로 수행되었다. 따라서 본 연구의 목적은 장비개발에 있어서 핵심 요소가 될 반복 주행속도를 변수로 놓고 여러 가지 혼합물에 대한 시험을 수행하여 적정 주행속도를 구하고자 하는 것이다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 강원 횡성군의 A사(화강암), 충북 음성군 B사(화강암)를 선정하였다. 이들을 각기 KS F에 규정된 방법에 따라 품질 시험한 결과 규정 내에 모두 만족하였다. 또한 굵은골재 최대치수 13mm로 잔골재, 채움재와 혼합하여 건설교통부 밀입도 규격에 적합하도록 조정하였다. 또한 아스팔트 바인더로는 일반적으로 국내에서 많이 사용되고 있는 AC60-80 한 종류와 개질 아스팔트인 PG76-22 한 종류를 사용하였다.

본 연구에서는 WT 시험을 위해 각 혼합물 별로 해당 OAC에서 크기 305×305×70mm, 공극율 4±0.5%의 슬래브 공시체를 롤러 가압 다짐기(roller press compactor)로 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 상온 양생 후 시험에 사용되었다. 슬래브 공시체를 제조한 후 WT 시험기를 사용하여 다양한 조건하에서 소성변형 저항성을 측정하고 그 결과를 비교 분석하였다. 공시체에 작용된 WT용 바퀴는 재질이 일반 강철인 직경 200mm, 폭 52mm로서 왕복 거리 200mm이었다. 반복주행실험 중 LVDT로 읽어들이는 침하량은 컴퓨터를 통

* 정희원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 공학박사 · 033-250-6467 (E-mail : kwkim@kangwon.ac.kr)
** 정희원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정 · 공학사 · 033-250-7284
*** 정희원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 박사과정 · 공학석사 · 033-250-7283



하여 자동 기록되었다.

본 연구에서는 사용된 시험장비의 적합성(Validity)을 확인하기 위하여 동일혼합물을 모두 공극을 4±0.5%로 제조하여 국내외 4개 기관의 장비를 이용하여 WT 시험을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 그 결과 장비의 특성에 따른 다소의 차이를 제외하고는 골재별, 바인더별, 온도별 혼합물간의 차이를 모두 유사하게 나타내어 사용된 시험기가 타당함을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 아스팔트 혼합물의 기본 특성

본 연구에 사용된 두 가지 골재와 두 가지 바인더로 제조한 혼합물의 명칭은 Table 1에서 보여준다. 마찰 배합설계에 의한 각 혼합물의 제조는 공시체 상·하 양면을 각각 50회씩 다짐하여 직경 100mm의 공시체를 제작하였으며, 수퍼페이브 혼합물은 선화다짐기로 100mm 공시체를 104회 다짐하였다. 각각의 혼합물에 대한 배합설계 결과로부터 최적 아스팔트 함량(OAC)을 결정하였으며 그 혼합물로 제조한 혼합물의 역학적 특성은 Table 2와 같다. 마찰방법을 통하여 제작한 혼합물보다는 수퍼페이브 혼합물의 안정도 및 인장강도가 다소 높게 나타났다.

Table 1. Designation of mixtures

Classification	Designation of mixtures
AD-AC	A: source, D: dense-graded, AC: AC60-80 mix.
AD-PG	A: source, D: dense-graded, PG: PG76-22 mix.
BD-AC	B: source, D: dense-graded, AC: AC60-80 mix.
BD-PG	B: source, D: dense-graded, PG: PG76-22 mix.
AG-AC	A: source, G: Superpave gap grade, AC: AC60-80 mix.
AG-PG	A: source, G: Superpave gap grade, PG: PG76-22 mix.
BG-AC	B: source, G: Superpave gap grade, AC: AC60-80 mix.
BG-PG	B: source, G: Superpave gap grade, PG: PG76-22 mix.

Table 2. Fundamental properties of each mixture (AC60-80, PG76-22)

Binder	Mixture	OAC (%)	Air void (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (kgf)	Flow (0.1mm)	ITS (kgf/cm ²)	SI (kgf/mm)
AC60-80	AD-AC	5.6	4.0	17.0	75.9	1,116	32	10.9	586
	BD-AC	5.6	4.2	17.1	74.7	1,143	32	10.3	511
	AG-AC	5.4	3.9	16.4	76.3	1,250	30	11.2	552
	BG-AC	5.7	4.2	17.5	75.8	1,096	32	10.8	524
PG76-22	AD-PG	5.7	3.7	16.8	78.3	1,306	31	13.4	529
	BD-PG	6.0	3.8	16.5	76.7	1,337	40	12.9	510
	AG-PG	5.7	4.0	17.1	76.4	1,306	31	13.4	587
	BG-PG	5.6	4.2	16.6	74.7	1,348	39	13.8	590

3.2 반복 주행 시험 (Wheel tracking Test)

본 연구에서는 아스팔트 콘크리트의 WT 시험의 최적 분당 주행횟수를 결정하기 위해 여러 가지 조건에서 실험을 수행하였다. 이를 위해 배합설계를 거쳐 결정된 최적아스팔트 함량으로 7cm 두께의 슬래브 공시체를 제작하고 25℃에서 24시간 동안 놓아둔 후 소요온도로 조절된 시험기에 6시간 전에 넣어 공시체 내부까지 완전히 온도가 같이 되도록 하였다. 침하 깊이(Depth of rut: DR)가 많이 들어가는 경우, 25mm (1 인치) 깊이만큼 들어갈 때까지만 수행하고 정지했으며 그렇지 않은 것은 소요횟수까지 수행하였다. Table 3과 Table 4는 WT 시험 결과를 보여준다. 여기서 Last cycle은 각각 10, 20, 40, 60cycle/min의 Max. cycles 900, 1800, 3600, 5400중 최종 진행된 cycle까지의 수를 나타내며 DS는 동적안정도(Dynamic stability)이다.



Table 3. WT test results of AC60-80, PG76-22 mixtures using wheel pressure 100psi for 90min

Binder	Speed (cycle/min)	Mixture	Sumkang Aggregate			Mixture	Uemsung Aggregate		
			DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last* cycle		DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last* cycle
AC 60-80	10	AD-AC	23.6	44	900	BD-AC	19.6	60	900
	20		18.8	150	1,800		22.8	100	1,800
	40		19.2	198	3,600		24.9	177	3,600
	60		16.9	678	5,400		17.6	429	5,400
	10	AG-AC	19.7	52	900	BG-AC	16.1	66	900
	20		17.1	120	1,800		17.2	125	1,800
	40		19.6	210	3,600		22.8	185	3,600
	60		20.8	300	5,400		23.3	286	5,400
PG 76-22	10	AD-PG	13.5	98	900	BD-PG	8.6	169	900
	20		11.7	225	1,800		9.6	347	1,800
	40		15.4	302	3,600		12.8	401	3,600
	60		20.1	282	5,400		13.7	502	5,400
	10	AG-PG	10.9	140	900	BG-PG	3.3	506	900
	20		11.8	251	1,800		7.1	558	1,800
	40		12.5	400	3,600		9.0	806	3,600
	60		15.8	396	5,400		7.1	1,219	5,400

Table 4. WT test results of AC60-80, PG76-22 mixtures using wheel pressure 125psi for 90min

Binder	Speed (cycle/min)	Mixture	Sumkang Aggregate			Mixture	Uemsung Aggregate		
			DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last* cycle		DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last* cycle
AC 60-80	10	AD-AC	25.4	10	264	BD-AC	25.2	13	330
	20		25.1	19	348		24.7	31	612
	40		25.0	38	804		24.7	61	1,212
	60		25.3	48	936		24.9	86	1,614
	10	AG-AC	26.2	21	480	BG-AC	25.1	25	480
	20		25.2	23	480		25.1	43	960
	40		25.3	45	960		25.3	89	2,040
	60		25.2	54	1,140		25.0	107	2,220
PG 76-22	10	AD-PG	25.3	58	900	BD-PG	4.7	356	900
	20		20.3	113	1,800		4.9	611	1,800
	40		20.4	227	3,600		7.8	677	3,600
	60		24.9	273	5,400		7.1	1,368	5,400
	10	AG-PG	16.1	69	900	BG-PG	4.7	368	900
	20		18.8	150	1,800		5.5	553	1,800
	40		16.5	668	3,600		7.8	694	3,600
	60		17.9	546	5,400		7.1	1,460	5,400

A 골재의 경우는 반복주행 속도에 따른 DR의 차이를 판단할 수가 없었으나 B골재의 경우는 10cycle/min 보다는 더 높은 속도에서의 DR이 더 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 대부분의 경우에서 나타났는데, 이는 일반적으로 속도가 낮을수록 변형이 더 심하리라는 통념과 다른 점이다. 왜냐하면 저속의 경우는 같은 시간에 주행횟수가 적고 휴지기간이 길어지기 때문에 오히려 더 침하가 적어진 것으로 보여진다.

이러한 점이 실제도로와 다른 점이다. 도로에서는 차량의 속도가 시속 5~10km/hr 이하로 내려가면 지속적으로 운행이 되지 못하고 지체와 정체로 이어지므로 소성변형이 심하게 나타난다. 이에 비해 WT 시험에서는 시속 1km/hr (42cycle /min) 전후로 바퀴가 움직이면서도 계속적으로 속도를 유지하기 때문에 생기는 현상이라 보여진다. 그러나 주행속도가 더 빨라진다고 DR이 그 이상 더 커지지 않는 것도 알 수 있었다. 따



라서 사용된 속도 중 효율적인 속도의 범위를 찾을 수 있을 것으로 판단되었다.

3.2.1 주행속도별 DR 차이(ΔDR)

Figure 1은 주행속도별 침하 깊이의 차이를 나타내는 대표적인 그림이다. 이 그림의 y축은 단순 DR이 아니라 ΔDR로 주행속도가 10에서 20 또는 20에서 40cycle 등으로 증가함에 따른 침하 깊이의 차이 값을 나타내는 것이다. 곡선의 정점의 좌표를 찾으면 횡수의 증가에 따른 DR의 변화가 최대가 되는 점을 찾을 수 있다. 하지만 DR이 20mm 이상 되는 경우는 주행속도별 차이는 물론 혼합물별 차이에 혼돈이 커서 거의 구분이 어려워 분석에서 제외하였다. 이렇게 각 혼합물별 온도별 효율이 최고가 되는 점을 분석하여 찾은 결과를 Table 5에 ΔDR로 나타내었다. 이로부터 얻어진 주행속도 자료의 평균치는 34.03으로 분당 약 34회 주행을 할 경우가 가장 침하의 변화량이 많은 횡수로 나타났다.

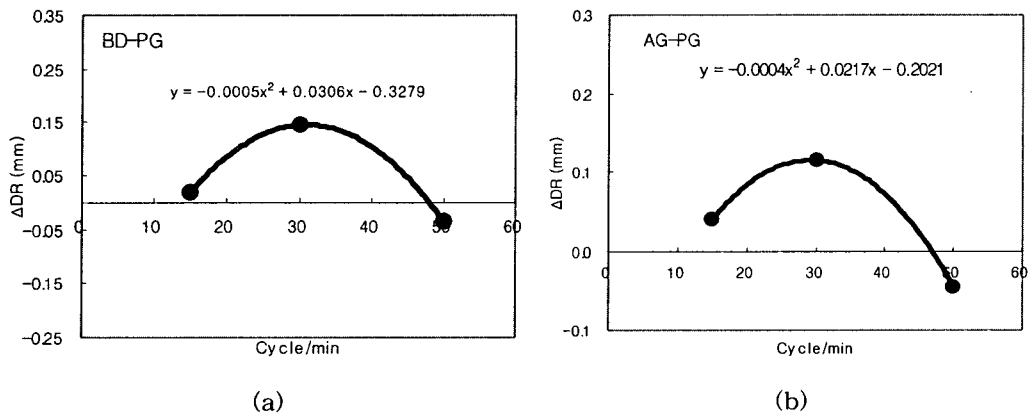


Figure 1. ΔDR change according to WT cycle/min for (a) BD-PG, (b) AG-PG

Table 5. Optimum WT speed (cycle/min) for most efficient WT test for each mixture

Pressure	Agg.	Grade	Binder	ΔDR	Max DR	DR=25 ⁺	Note
100psi	A	Dense	AC60-80	38.59	10	**	
		Gap	AC60-80	39.25	60	**	
	B	Dense	AC60-80	19.58	40	**	
		Gap	AC60-80	30.21	60	**	
	A	Dense	PG76-22	50.00	60	**	
		Gap	PG76-22	44.30	20	**	
	B	Dense	PG76-22	50.00	60	**	
		Gap	PG76-22	15.00	20	**	
125psi	A	Dense	PG76-22	*	*	60.0	
		Gap	PG76-22	27.10	20	47.5	
	B	Dense	PG76-22	30.60	40	45.6	
		Gap	PG76-22	29.70	40	57.9	
Mean				34.03	39.09	52.75	

+ the WT speed (cycle/min) reaching at DR=25mm at least run time,

*data is not valid, ** no test value is available.

3.2.2 최대 DR 주행속도

각 혼합물별 WT 시험에서 주행속도에 따라 최종 DR이 다르게 나타난다. 그러나 같은 혼합물을 같은 조건에서 시험한 것이 단지 주행속도에 따라 차이가 나므로 최대의 DR을 일으키는 주행속도를 사용하는 것이



보다 효과적이라 할 수 있다. 그리고 이를 평균하면 전반적으로 침하를 효과적으로 내는 주행속도를 얻을 수 있게 될 것이다. 하지만 이 경우도 초기에 25mm이상이 침하되어 중지된 것은 분석에서 제외하였으며 그렇지 않은 것들에 대한 분석결과는 Table 5의 Max DR에서 보여준다.

대부분의 DR 은 사이클 수가 더 많은 것에서 더 깊이 들어갔으며 중간인 경우도 많고 평균은 약 39 cycle/min이었다. 즉, 10 cycle/min에서 최대 깊이가 나타나는 경우는 드물어 앞서 언급하였듯이 주행속도가 느리다고 침하가 더 심하게 일어나는 것은 아님을 재차 확인할 수 있었다.

3.2.3 최대 DR=25mm 도달 시간

일반 바인더를 사용한 혼합물의 경우 윤하중을 125psi로 시험하였을 경우 DR이 거의 모두 25mm를 초과하였다. 따라서 시험을 25mm 도달할 때까지만 수행하고 중지하였으며 몇 회에 그 깊이에 도달하였는지를 통해 최종 주행수(Table 3, 4에서 Last cycle)을 기록하였다. 그리고 같은 윤하중에서 25mm 깊이에 도달한 주행속도에 cycle time을 곱해 총 주행시간을 구하고 이를 통해 어떤 cycle/min이 더 효과적인지를 분석하였다. Figure 2는 DR=25mm 도달시간의 변화를 나타내는 대표적인 예이다. 이 그림에서뿐만 아니라 전반적으로 갭입도(수퍼페이브 입도) 혼합물의 DR=25mm 도달시간이 더 길었으나 주행속도에 따른 곡선의 경향은 유사하였다.

Figure 2의 곡선에서 주행속도가 10cycle/min부터 빨라지면서 25mm 깊이에 도달하는 시간이 감소하였으나 어느 정도가 지나서는 오히려 더 증가가 되어 최저점을 이루는 부분이 생겼다. 이 최저 점은 같은 윤하중으로 시험을 할 경우 가장 짧은 시간에 가장 큰 소성변형을 일으키는 주행속도가 될 것이며, 같은 온도, 같은 하중 하에서라면 이 주행횟수를 택하는 것이 가장 효과적인 시험이 될 것이다. AC60-80 바인더를 사용한 각 혼합물별 최저점을 구한 것을 Table 5의 DR=25로 나타내었다. 이 자료의 평균치는 53cycle/min로 비교적 빠른 속도인 분당 평균 53회 주행이 가장 먼저 25mm 깊이에 도달하는 것으로 나타났으나 이를 적용할 시험 data가 많지 않았다.

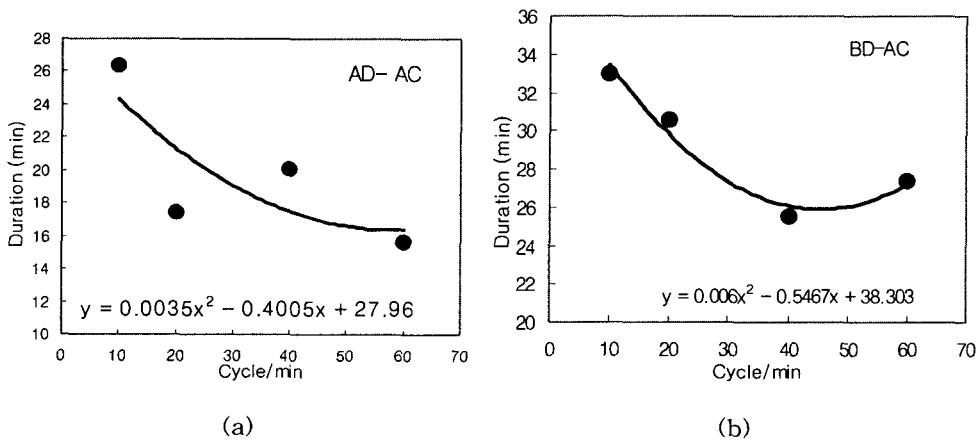


Figure 2. Correlation between DR=25mm approach time and WT cycle (a) AD-AC, (b) BD-AC

4. 결론

본 연구에서는 현재 국내에서 일반적으로 수행되고 있는 WT 시험방법 가운데 가장 큰 변수로 고려되는 주행속도별로 일반적으로 통용되는 온도인 60℃에서 각 혼합물에 대하여 총 70개 이상의 반복주행 공시체를 제작하여 반복주행시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 반복주행 장비의 표준화시 적정 주행속도는 지금까지 분석한 자료를 종합하여 산술평균을 구해보면 $\{(34.03 \times 11) + (39.09 \times 11) + (52.75 \times 4)\} / 26 = 39.05$ 로 계산되어, 즉 이에 근접하는 십 단위 수치인 40cycle /min 정도



가 적합할 것으로 사료되며 이를 근거로 적정 범위를 설정할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 본 연구결과로 도출된 주행속도를 실제 적용하기 위해서는 보다 많은 종류의 혼합물(개질아스팔트 혼합물 포함)에 대한 추가실험과 실제 장비 제조사와 토목재료이의 측면에서의 문제점 및 실용성에 대비한 공동 연구가 있어야 할 것으로 보여진다.
3. 본 연구는 반복주행시험 장비의 국내 규격화에 우선적으로 필요하다고 판단되는 주행속도에 대해 중점적인 연구를 수행한 것이다. 이 결과를 바탕으로 표준화된 WT 시험법을 제시하기 위해서는 여러 실험 온도, 바퀴의 재질, 공기체의 형태 및 크기 등의 다양한 변수에 대해서도 실험을 수행하고 변별력 등을 고찰하기 위해 보다 다양한 재료를 통해서도 심도 있는 연구가 있어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 1단계 2차년도 연구비의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. “소성변형 저감을 위한 시방지침개발,” 한국도로공사, 2002.
2. 김광우, 김중열, 김변창, 정규동, (2002), “수퍼페이브 방법과 마샬방법에 의한 배합설계 결과 차이점 분석,” 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집.
3. 김광우, 이문섭, 김중열, 최선주, (2002), “소성변형과의 상관성을 향상시킨 변형강도측정법의 개발,” 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 67~74.
4. 김광우, 이순제, 오홍락, 이영관, 김중열, (2001), “마샬특성치의 측정 및 적용상의 문제점.” 2001 학술발표회 논문집, 한국도로포장공학회, pp. 173~180.
5. 김남호, (2000), “소성변형의 발생원인 및 영향인자,” 도로포장공학회 특집논문.
6. 박동엽, (2002), “미국 캘리포니아주 교통국 포장가속시험기 소개,” 한국도로포장공학회지, 제 4권 1호, pp. 73~74.
7. 박태순, (2000), “국내 아스팔트 포장의 소성변형 원인 및 대책,” 특집 논문, 한국도로포장공학회지, 제 2권 2호, pp. 13~24
8. 양성철, 유태석, 엄주용, (2000), “한국형 포장가속시험시설의 개발현황,” 한국도로포장공학회지, 제 2권 2호, pp. 139~148.
9. 이상범, (2001), “아스팔트 혼합물의 공극 및 강도 특성을 이용한 소성변형 추정연구,” 박사학위논문, 강원대학교.