

# 반복주행시험에서 침하깊이에 대한 적정 시험온도의 분석

## Analysis of Optimum Test Temperature for Rut Depth in Wheel tracking Test of Asphalt Mixture

도 영 수\* · 정재현\*\* · 임동섭\*\* · 김 광 우\*\*\*

Young S. Doh, Jae Hun, Jung Dong Sub, Lim Kwang W. Kim

### 1. 서론

소성변형의 발생은 크게 내부요인과 외부요인으로 구분한다. 내부요인은 재료에 관련되고 외부요인은 교통량 및 기후조건에 관련된 것이다. 결국 소성변형의 정도는 여러 가지 재료 특성의 관련 변수와 교통량 및 기후의 관련 함수로 나타난다. 그러나 모든 변수를 고려하여 소성변형을 추정하는 것은 거의 불가능한 일이며, 대부분 이 변수들 중에서 상당수를 고정하거나 가정한 모델을 설정하게 된다. 그러므로 실제 상황을 예측하는 데는 거리가 있어 결국 소성변형은 반복주행(wheel tracking: WT) 시험기와 같은 장치로 실험하여 그 결과를 상대·비교 평가하는 것이 관행이다. 전 세계적으로도 소성변형 평가를 위해서 이러한 반복주행 시험기가 여러 모형으로 개발되어 사용되고 있다. 국내의 경우는 소성변형 저감을 위한 WT 시험을 통해 우수 재료의 구분 등 재료에 대한 연구는 많이 수행되고 있으나 장비를 위한 체계적인 연구개발은 미비한 실정이다.

현재 이러한 소성변형을 예측하기 위해 가장 널리 사용되고 있는 반복주행시험법은 표준화된 방법이 정해지지 않은 상태이어서 국제적으로 서로 다른 시험법을 사용하고 있다. WT 시험은 측정된 결과치를 배합설계 규정의 한 변수로 사용한다거나 포장구조설계의 한 변수로 사용하기보다는 아직까지는 주어진 재료의 상대·비교용으로 사용하고 있다. 하지만 미국의 일부 주에서는 아직 문서화되지는 않았지만 이를 규정으로 사용하기 위한 움직임으로 4±1%로 다진 혼합물을 특정 WT 시험기로 측정하여 최종 침하깊이가 일정수치 이하인 것만을 사용토록 추천하는 방안을 검토하는 기초단계에 있다. 이와 같이 이를 규정의 일부로 적용하기 위해서는 표준화된 장비와 시험법이 필요하다. 그러므로 본 실험은 우리에게 필요한 표준화된 시험법을 제시하기 위한 기초 연구의 일환이며 본 연구의 목적은 표준화된 시험법 개발에 있어 시험온도를 변수로 놓고 국내 재료를 사용한 다양한 혼합물에 대하여 시험을 수행하여 적정 시험온도를 제시하고자 하는 것이다.

### 2. 재료 및 방법

본 연구에서는 강원도 횡성군의 A사(화강암), 충북 음성군 B사(화강암)를 선정하였다. 이들을 각기 국내의 KS F에 규정된 방법에 따라 품질 시험한 결과 규정 내에 모두 만족하였다. 또한 골재입도는 굵은골재 최대치수 13mm, 잔골재, 채움재를 혼합하여 건설교통부 밀입도 규격 및 수퍼페이브 혼합물 기준에 적합하도록 조정하였다. 또한 바인더로는 AC60-80과 개질 아스팔트인 PG76-22 를 사용하였다. 따라서 두 가지 골재와 두 가지 바인더로 두 가지 배합설계 방법(마살과 수퍼페이브)에 따라 총 8가지 혼합물을 제조하였다(표 1).

WT 시험을 위해 각 혼합물 별로 해당 최적 아스팔트 함량(Optimum asphalt content: OAC)에서 공극률 4±0.5%의 305×305×70mm 크기의 슬래브 공시체를 몰러 가압 다짐기로 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 상온 양생 후 시험에 사용되었다. 슬래브 공시체를 제조한 후 WT 시험기를 사용하여 다양한 조건 하에서 소성변형 저항성을 측정하고 그 결과를 비교 분석하였다. 본 연구에 사용된 필트랙킹 장비는 바퀴의 재질이 강철로 직경 200mm, 폭 52mm, 주행 거리 200mm이었다. 반복주행실험 중 LVDT로 읽어 들인 침하량은 컴퓨터를 통하여 자동·기록되었다.

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

\*\* 정희원 · 강원대학교 대학원 지역기반공학과 석사과정 · 033-250-7284

\*\*\* 정희원 · 강원대학교 지역기반공학과 교수 · 033-250-6467 (E-mail : asphalttech@hanmail.net)

표 1. 혼합물의 명칭

구분	혼합물 명칭
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.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 아스팔트 혼합물의 기본 특성

마살 배합설계에 의한 각 혼합물의 제조는 공시체 양면을 각각 50회씩 다짐하여 직경 106mm의 공시체를 제작하였으며, 수퍼페이브 혼합물은 선회다짐기로 106mm 공시체를 104회 다짐하였다. 각각의 혼합물에 대한 배합설계 결과로부터 OAC를 결정하였으며 그 혼합물로 제조한 혼합물의 역학적 특성은 표 2와 같다. 마살 방법을 통하여 제작한 혼합물보다는 수퍼페이브 혼합물의 안정도 및 인장강도가 다소 높게 나타났다.

표 2. 각 혼합물의 물리·역학적 특성

Mix.	Item	OAC (%)	Air void (%)	VMA (%)	VFA (%)	Stability (kgf)	Flow (0.1mm)	ITS (kgf/cm <sup>2</sup> )	SI (kgf/mm)
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
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 반복주행시험

본 연구에서는 아스팔트 콘크리트의 반복주행시험의 최적온도를 결정하기 위해 여러 가지 조건에서 반복주행시험을 수행하였다. 이를 위해 배합설계를 거쳐 결정된 OAC로 두께 7cm의 슬래브 공시체를 제작하고 25℃에서 24시간 동안 놓아둔 후 시험 온도로 조절된 시험기에 6시간 동안 넣어 공시체 내부까지 완전히 시험 온도가 된 후에 실험을 수행하였다. 침하깊이가 많이 들어가는 경우, 25mm 깊이만큼 들어갈 때까지만 수행하고, 그렇지 않은 것은 소요횟수까지 수행하였다. 표 3 ~ 6은 WT 시험 결과를 보여준다. 여기서 Last cycle은 10, 20, 40, 60cycle/min로 90분 동안 수행할 최대 cycles 900, 1800, 3600, 5400 중 최종 진행된 cycle의 수를 나타낸다.

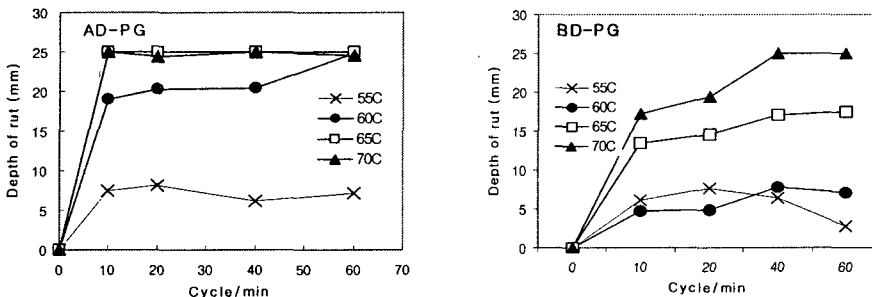


그림 1. 온도·cycle/min별 PG 밀입도 혼합물의 최종 침하깊이 (DR) 비교



표 3. 90분 동안 100psi 압력을 사용한 AC60-80 혼합물들의 WT 시험 결과

Mixture	Temp.	Speed (cycle/min)	DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last cycle	Mixture	DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last cycle
AD-AC	55℃	10	21.5	49	900	BD-AC	17.4	70	900
		20	18.5	113	1,800		19.0	118	1,800
		40	19.1	222	3,600		18.5	231	3,600
		60	18.5	333	5,400		19.4	334	5,400
	60℃	10	23.6	44	900		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
	65℃	10	25.0	30	660		25.0	32	720
		20	25.0	39	900		25.0	52	1,140
		40	25.0	67	1,320		25.0	90	1,805
		60	25.0	69	1,440		25.0	112	2,280
AG-AC	55℃	10	18.5	55	900	BG-AC	17.7	70	900
		20	18.3	111	1,800		16.7	141	1,800
		40	19.1	214	3,600		18.1	266	3,600
		60	19.4	316	5,400		19.7	362	5,400
	60℃	10	19.7	52	900		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
	65℃	10	25.0	37	780		25.0	37	794
		20	25.0	58	1,200		25.0	65	1,380
		40	25.0	82	1,740		25.0	97	2,100
		60	25.0	97	2,160		25.0	112	2,520

표 4. 90분 동안 100psi 압력을 사용한 PG76-22 혼합물들의 WT 시험 결과

Mixture	Temp.	Speed (cycle/min)	DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last cycle	Mixture	DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last cycle
AD-PG	60℃	10	7.6	188	900	BD-PG	6.2	267	900
		20	7.5	429	1,800		5.9	472	1,800
		40	6.5	926	3,600		5.3	1,492	3,600
		60	8.1	1,015	5,400		7.5	1,058	5,400
	65℃	10	13.5	98	900		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
	70℃	10	20.1	62	900		18.0	64	900
		20	19.5	109	1,800		21.9	106	1,800
		40	25	117	2,760		23.9	171	3,600
		60	25	193	4,560		24.4	250	5,400
AG-PG	60℃	10	9.1	179	900	BG-PG	4.3	711	900
		20	7.4	397	1,800		6.4	606	1,800
		40	8.0	684	3,600		5.1	1,966	3,600
		60	9.8	992	5,400		5.7	3,113	5,400
	65℃	10	10.9	140	900		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
	70℃	10	15.1	77	900		16.4	89	900
		20	20.7	106	1,800		16.8	133	1,800
		40	21.7	194	3,600		17.7	231	3,600
		60	22.3	273	5,400		13.2	524	5,400



표 5. 90분 동안 125psi 압력을 사용한 AC60-80 혼합물들의 WT 시험 결과

Mixture	Temp.	Speed (cycle/min)	DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last* cycle	Mixture	DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last* cycle
AD-AC	55°C	10	25.0	18	378	BD-AC	20.0	64	900
		20	25.0	20	414		25.0	65	1,100
		40	25.0	49	728		25.0	105	1,632
		60	25.0	97	1,134		25.0	121	1,800
	60°C	10	25.0	10	264		25.0	13	330
		20	25.0	19	348		25.0	31	612
		40	25.0	38	804		25.0	61	1,212
		60	25.0	48	936		25.0	86	1,614
	65°C	10	25.0	13	276		25.0	16	324
		20	25.0	23	498		25.0	31	624
		40	25.0	31	624		25.0	32	678
		60	25.0	31	690		25.0	64	1,320
70°C	10	25.0	19	360	25.0	17	324		
	20	25.0	24	480	25.0	26	552		
	40	25.0	26	550	25.0	29	612		
	60	25.0	24	600	25.0	46	870		
AG-AC	60°C	10	25.0	21	480	BG-AC	25.0	25	480
		20	25.0	23	480		25.0	43	960
		40	25.0	45	960		25.0	89	2,040
		60	25.0	54	1,140		25.0	107	2,220
	65°C	10	25.0	22	420		25.0	52	469
		20	25.0	35	720		25.0	48	840
		40	25.0	72	1,440		25.0	64	1,140
		60	25.0	160	2,880		25.0	76	1,500
	70°C	10	25.0	14	300		25.0	22	378
		20	25.0	26	540		25.0	28	570
		40	25.0	32	678		25.0	35	720
		60	25.0	33	741		25.0	41	780

표 6. 90분 동안 125psi 압력을 사용한 PG76-22 혼합물들의 WT 시험 결과

Mixture	Temp.	Speed (cycle/min)	DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last* cycle	Mixture	DR (mm)	DS (cycle/mm)	Last* cycle
AD-PG	55°C	10	7.5	191	900	BD-PG	6.1	465	900
		20	8.1	503	1,800		7.6	600	1,800
		40	6.1	1,036	3,600		6.4	1,024	3,600
		60	7.1	1,486	5,400		2.8	2,408	5,400
	60°C	10	18.0	58	900		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
	65°C	10	25.0	34	624		13.5	54	900
		20	25.0	97	1,758		14.6	140	1,800
		40	25.0	180	3,408		17.1	258	3,600
		60	25.0	161	3,378		17.5	425	5,400
70°C	10	25.0	35	792	17.2	72	900		
	20	25.0	81	1,572	19.5	99	1,800		
	40	25.0	89	1,842	25.0	135	2,880		
	60	25.0	173	3,432	25.0	179	3,660		
AG-PG	60°C	10	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
	65°C	10	13.4	82	900		14.3	99	900
		20	15.9	159	1,800		11.9	292	1,800
		40	17.0	173	2,340		13.0	415	3,600
		60	19.2	214	3,600		14.0	539	5,400
	70°C	10	20.4	55	900		16.6	75	900
		20	23.4	64	1,260		19.6	123	1,800
		40	22.2	81	1,440		22.1	150	2,820
		60	25.0	97	2,460		25.0	172	3,720



그림 1은 PG76-22를 사용한 밀입도 혼합물의 온도별 소성변형 깊이를 보여준다. 이는 시험 결과를 cycle 별로 나누어서 나타낸 것이다. 여기서 B 골재(BD-PG)는 온도에 따라 소성변형 깊이에 어느 정도 차이가 나타났으나, A 골재(AD-PG)는 60℃ 이상에서는 그렇지 못했다. 그림 1(a)의 A 골재의 경우 55℃ 시험의 DR이 여타 온도들 보다 크게 낮아 B 골재와 유사하였으나, 60℃ 이상에서는 65℃나 70℃에서와 같이 모든 주행속도에서 큰 차이가 없었다. 이는 혼합물이 소성변형에 취약하여 온도에 따른 변별력을 보여주지 못하는 예라고 할 수 있으며, 이러한 경우는 AC60-80을 사용한 혼합물의 경우에 보다 심하게 나타났다.

한편 55℃에서의 시험은 주행속도에 따라 그 차이가 별로 없고, 국내 하절기 포장표면의 최고 온도가 60℃ 이상 올라가는 등 여러 가지 이유 때문에 실용성에 의문이 있었다. 따라서 55℃에서의 시험은 상대 비교 확인을 위해 수행한 것으로 향후 구체적인 시험에서 55℃는 제외하였고 또한 70℃는 너무 높아 변별력이 떨어질 수 있으므로 제외하여 60℃와 65℃를 주 시험온도로 하여 국내의 장비에 관하여 분석하였다.

### 3.3 시험 장비의 적합성 평가 및 고찰

본 실험에서는 사용하는 시험기가 기존에 사용되는 타 시험기와 비교하여 적합한 것인지 확인하기 위하여 두 가지 혼합물을 국내(건설기술연구원, 서울산업대학교)·외(Clemson University) 기관의 장비로 같은 조건에서 실험을 수행하였다. 그림 3 ~ 6, 표 7은 각 기관별 시험기에 따른 WT 시험 결과를 나타낸다. 시험 결과는 모든 장비가 비슷한 경향을 보이고 혼합물별 차이도 유사하게 나오는 것을 알 수 있어 본 연구에 사용한 장비는 적합한 것이라 할 수 있고 이를 통한 WT 장비의 표준화 가능성에 대한 분석도 타당한 것으로 판단되었다.

본 연구에서 총 200개 이상의 반복주행 실험용 공시체를 제작하여 수행한 결과에 근거하여 각종 분석을 통해 얻어진 결과를 요약해보면 몇 가지 특징을 볼 수 있다. 온도별로 보면 55℃의 실험은 60℃의 결과와 약간의 차이를 보이고 있으며, 보다 강한 바인더나 SMA 등의 혼합물을 사용한다면 변별력이 떨어질 것으로 보인다. 그리고 70℃의 경우 밀입도 일반 아스팔트를 사용할 경우에는 침하깊이가 너무 깊어 전혀 변별력이 없고 65℃도 일반 혼합물의 경우는 너무 취약하여 60℃ 보다는 크게 침하를 일으켜 취약한 혼합물시험에는 변별력이 떨어질 것으로 추정되었다.

또한 윤하중 압력은 125psi 보다는 100psi의 적용이 적합하여 보이며 그보다 낮은 압력은 온도가 60℃ 이상인 경우 필요하겠지만, 60℃의 온도에서는 고려해보지 않아도 될 것으로 판단된다.

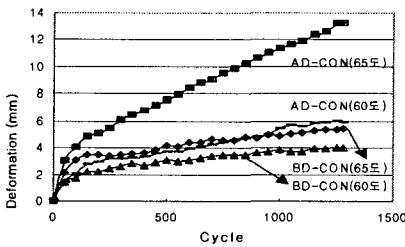


그림 3. 건설기술연구원 WT 결과

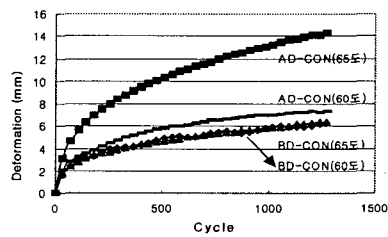


그림 4. 서울산업대학교 WT 결과

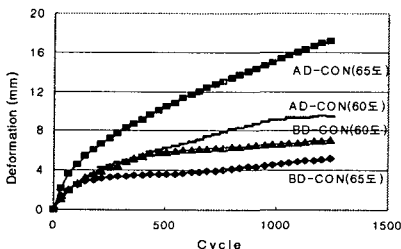


그림 5. 광원대학교 WT 결과

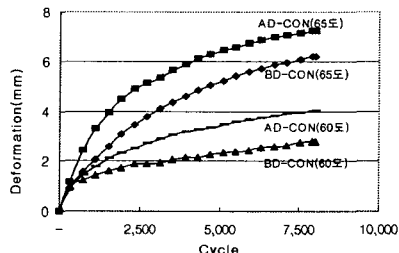


그림 6. Clemson Univ. WT 결과



표 7. 각 기관별 WT 비교

기 관	글 재	실험 온도 (°C)	최종 깊이 (mm)	최종 횟수 (cycle/hr)	동적 안정도 (DS)
건설기술연구원	AD-AC	60°C	5.4	1,260	535
		65°C	13.2	1,260	132
	BD-AC	60°C	4.0	1,260	595
		65°C	5.9	1,260	292
서울산업대학교	AD-AC	60°C	6.3	1,260	357
		65°C	14.3	1,260	141
	BD-AC	60°C	6.4	1,260	338
		65°C	7.4	1,260	285
강원대학교	AD-AC	60°C	5.2	1,260	492
		65°C	17.1	1,260	103
	BD-AC	60°C	7.1	1,260	291
		65°C	9.5	1,260	159
Clemson Univ.	AD-AC	60°C	4.0	8,000	5,000
		65°C	7.2	8,000	2,000
	BD-AC	60°C	2.8	8,000	5,000
		65°C	6.2	8,000	2,000

5. 결론

본 연구에서 총 200개 이상의 반복주행 실험용 공시체를 제작하여 시험 온도를 변수로 하여 반복주행시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 향후 반복주행 장비의 표준화시 시험온도는 60°C가 적합할 것으로 판단된다.
2. 윤하중 압력은 타 장비에서도 많이 도입하여 사용하고 있는 100psi가 본 연구 시험을 통해서도 적절한 것으로 판단되었다.
3. 본 연구는 반복주행시험 장비의 국내 규격에 우선적으로 필요하다고 판단되는 시험온도에 대해 중점적인 연구를 수행한 것이다. 따라서 제시하는 수치들도 표준화 이전에 지속적인 연구를 통하여 확인하는 과정을 거쳐야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것이다.

참고문헌

1. Aschenbrener, T., (1995), "Evaluation of the Hamburg Wheel-Tracking Device to Predict Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt." Transportation Research Record 1492, Transportation Research Board, Washington, DC, pp. 193~201.
2. British Standards Institution, (1998), "Methods of test for the determination of wheel-tracking rate and depth", Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas, BSI, London, BS598: Part 110.
3. John Epps, (1998), "Westrack Performance-Interim Findings," Presented at the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, Journal Volume 67.
4. S F Brown and B V Brodrick, (1981), "Nottingham Pavement Test Facility," Transportation Research Record 810, pp 67~72.
5. 김광우, 김중열, 김변창, 정규동, (2002), "수퍼페이브 방법과 마샬방법에 의한 배합설계 결과 차이점 분석," 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집.
6. 김남호, (2000), "소성변형의 발생원인 및 영향인자," 도로포장공학회 특집논문.
7. 박태순, (2000), "국내 아스팔트 포장의 소성변형 원인 및 대책," 특집 논문, 도로포장공학회지, 한국도로포장공학회.
8. 양성철, 유태석, 엄주용, (2000), "한국형 포장가속시험시설의 개발현황," 2000 도로포장공학회지, 한국도로포장공학회, pp. 139~148.