

# 아스팔트 콘크리트의 다짐도에 따른 피로 특성

## Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete Based on Compacted Density

김 광 우<sup>1)</sup>  
Kim, Kwang-Woo

이 병 덕<sup>2)</sup>  
Lee, Byong-Duck

박 용 철<sup>3)</sup>  
Park, Yong-Chul

### Abstract

This study was conducted to evaluate performance of asphalt concretes under various densities, using Marshall specimens before and after freezing-and-thawing treatment. Six different compaction blows per side (20, 30, 40, 50, 60, 70 blows) were applied to specimens to produce different densities. Test results showed that the lower density specimens had the weaker resistance to freezing-and-thawing treatment.

The density was an index of retaining fatigue life and displacement after freezing-and-thawing. Therefore, poor compaction in pavement was considered to be a major cause of early distress mechanisms such as rutting, ravelling and cracking, which were resulted in a reduced service life.

### 1. 서론

아스팔트 콘크리트 포장 (Asphalt Concrete Pavement)은 일반적으로 표층, 기층 그리고 보조기층으로 구성된 Full Depth 구조로<sup>1)</sup>, 특히 아스팔트 콘크리트 포장의 최상층인 표층 (Surface Course)은 차량의 윗하중 하에서 하부의 다른 어느 층보다도 가장 심한 하중영향 (Load Effect)을 받게 되므로 고도의 안정성과 강도 및 유연성을 가져야 한다. 그러므로 이러한 성질들을 확보하기 위하여 아스팔트 혼합물은 필요한 다짐을 받아 소요의 밀도와 공극을 유지하여야 한다.

포장에 있어서 부분적 응력집중 현상과 영구 변형, 침하, 조기파손 현상 등을 방지하기 위해서는 높은 다짐도와 균일성을 확보하는 것이 필요하다<sup>3,8)</sup>.

특히 우리 나라와 같이 4계절이 뚜렷한 기후 조건 하에서 빈약한 다짐은 포장층의 동결 융해에 따른 우수의 침투와 구성재료의 구조 결속력 저하 (Structural Disintegration)에 따른 조기 파손의 결과를 초래할 수 있다. 그러나 아직 우리 나라에서는 아스팔트 포장에 대한 연구와 지식의 부족으로 포장구조물의 조기 파손에 대한 원인규명이 미비한 상태이며, 특히 국내 자료를 이용한 다짐 분야의 연구는 거의 선무한 상태이다. 국내의 한 현장자료에 의하면 아스팔트 포장의 다짐 측정치중 약 20% 가량이 기준치(기준밀도의 96%)에 미달하는 것으로 나타났다<sup>4)</sup> 외국에 비하여 다짐도의 편차도 훨씬 큰 것으로 나타났다<sup>4)</sup>. 이와 같이 다짐이 불량한 아스팔트 콘크리트는 그 포장으로서의 성능이 상대적으로 떨어져 조기파손의 위험을 안고 있는 것으로 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 포장의 파손현상을 다짐밀도 측면에서 분석, 고찰 하고자 시행 되었다. 이를 위하여 마샬공시체 다짐 횟수를 여섯 가지로 나누어 다짐하였고, 각각에 대해 동결융해에 대한 저항성을 피로수명을 통하여 비교하였다.

본 연구의 목적은 아스팔트 콘크리트의 다짐 밀도 차이가 피로수명과 변형에 미치는 영향을

1)강원대학교 농공학과 조교수  
2)강원대학교 대학원 토목공학과  
3)강원대학교 대학원 농공학과

분석하고 무처리, 동결융해 처리 공시체에 대해 비교 분석하여 동결융해가 포장수명에 미치는 기초자료를 제시하는 것이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 사용재료

시험에 사용된 결합재인 아스팔트 시멘트는 우리 나라 추풍령 이북 지역에서 가장 널리 사용하고 있는 AP-3로써 이것의 품질시험 결과는 표1과 같다.

Table 1. Properties of Asphalt Cement

AP-3	Spec.	Penetration	Ductility	Softening	Flash Point	Penetration	Ductility	Specific Gravity
		25°C (mm)	25°C (cm)	Point (°C)		Ratio after Heat on Thin-Film (%)	after Heat on Thin-Film (cm)	
	85-100	100↑	*	230↑	47↑	75↑		
	Measured Value	91	150↑	47	280	62.5	150	1.03

본 실험에서 사용한 굵은 골재는 강원도 홍천군에서 생산되고 있는 화강암 쇄석이며, 세골재는 강원도 홍천강에서 채취한 하천모래이다. 이들을 굵은 골재의 최대 치수를 20mm하여 체가름 한후 굵은골재와 잔골재, filler로 분류하였으며, 이들의 품질시험 성과는 표2와 같으며, 골재의 합성은 도로공사 표준시방서<sup>13)</sup>의 골재 합성입도 표3에 따라 합성하여 사용하였다.

Table 2. Properties of Aggregates

Test Item		Specification Requirement	Coarse Aggregates	Fine Aggregates	Filler
Specific Gravity	Saturated Surface Dry		2.68	2.52	
	Apparent	2.45 ↑	2.72	2.54	2.07
Absorption(%)		2.5 ↓	0.54	1.4	

Table 3. Gradation of Aggregates (Surface Course)

Sieve Size		19mm	13mm	#4	#8	#30	#50	#100	#200
Percent Passing (%)	Specification	95-100	78-90	48-65	38-50	20-30	12-21	7-16	4-8
	Gradation	98	85.81	58.62	42.83	25.29	16.34	10.3	4.59

### 2.2 배합

한국 공업 규격 KSF 2349와 도로공사 표준시방서의 표층용 혼합물의 표준배합비에 따라 ASTM D1559 마찰시험의 규격에 맞는 공시체 (다짐후 공시체 높이가 63.5mm ± 1.3mm 이고 중량이 약 1200g)를 표4와 같은 배합으로 제작하였다<sup>4,13)</sup>.

각 다짐횟수별 배합 량은 표4와 같다.

Table 4. Mix Quantity(g) of Asphalt Concrete Materials

Aggregates Size	No. of Compaction						Mix Content (%)
	20	30	40	50	60	70	
19 mm	21.6	21.85	22.1	21.85	22.6	22.8	2.0
13 mm	131.4	133.2	134.9	136.5	137.8	138.9	12.19
# 4	293.2	297.1	300.9	304.8	307.4	310.0	27.19
# 8	170.3	172.5	174.8	177.0	178.5	180.0	15.79
# 30	189.1	191.6	194.1	196.6	198.3	210.0	17.54
# 50	96.5	97.8	99.1	100.3	101.2	102.0	8.95
# 100	65.2	66.1	67.0	67.8	68.4	68.9	6.05
# 200	61.5	62.3	63.1	63.9	64.4	64.9	5.70
filler	49.2	49.8	50.5	51.1	51.6	51.9	4.56
AC	56.75	57.7	58.25	59.0	59.5	60.0	5.0

### 2.3 공시체 제작

KSF 2337과 ASTM D1559의 마찰식 아스팔트 혼합물 공시체 제작 방법<sup>7)</sup>에 따라 중량 약 1200g의 준비된 골재를 용기에 넣어서 145°C ~ 155°C로 24시간 가열하였다. 그리고 가열된 아스팔트를 넣은 다음 소정의 온도에서 손비빔으로 혼합하여 몰드에 넣은 다음 다짐온도(135°C ~ 145°C)를 유지하여 마찰햄머를 이용하여 다짐하였다. 일면을 6종류의 다짐횟수(20, 30, 40, 50, 60, 70회)로 다진 다음 몰드를 뒤집어 공시체의 뒷면을 같은 횟수로 다짐하였다. 시편은 되도록 높이가 63.5mm가 되게 하였다.

각 시험 종류에 따른 시험 공시체의 수는 표 5와 같다.

Table 5. Number of Specimen for Fatigue Test on Freezing-and-Thawing Treatment

	Fatigue Test Specimens (36)
Control	6-Compaction×3-Replication
F/T(15 Cycle)	6-Compaction×3-Replication

## 2.4 실험 방법

### 2.4.1 동결융해 처리

아스팔트 포장의 표층은 골재 내부의 수분과 표면으로부터 침투된 수분이 동결기에 동결되어 체적이 팽창하므로 미소균열이 발생하여 강도 저하는 물론 표면에 박리(stripping)현상이 발생한다<sup>6)</sup>. 따라서 본 연구에서는 아스팔트 콘크리트 공시체의 다짐도에 따른 동결융해가 파괴 수명과 변형에 얼마나 영향을 주는지를 일반공시체와 동결융해 처리한 공시체에 대해 비교 조사하였다.

동결융해 실험용 공시체는 수중에서 30분간 진공하여 완전히 포화시킨 후 방습을 위하여 비닐로 완전 포장하여 동결융해 실험기에 넣었으며 동결융해 처리는 15사이클이며 1사이클에 대한 시간과 온도는 아래 그림 1과 같이 하였다.

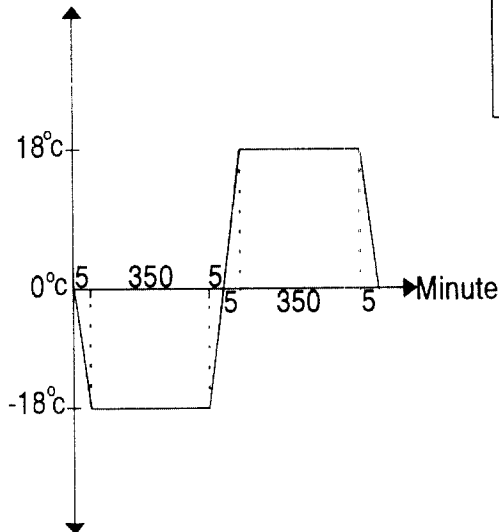


Figure. 1. Number of Cycle for Freezing-and-Thawing Test

### 2.4.2 피로 파괴 실험

이 실험은 반복재하 간접인장 시험으로 아스팔트 콘크리트 공시체에 대한 회복탄성 계수를 측정하는 시험방법과 유사하게 실시되었다<sup>11)</sup>. 피로파괴 시험의 동결 융해 처리 공시체는 동결융해 15사이클이 끝남과 동시에 시작하였고 무처리 공시체는 동결융해와 같은 기간인 재령에 실시하였다<sup>5)</sup>.

피로시험기는 Shimadza사의 피로시험기(모델 EVF-VBF 25-70)를 사용하였고, 측정기록기는 Sen-ei사의 Logger Mate DL1200을 사용하였다. 원주형 공시체의 수평직경 중앙에 2개의 LVDT와 브래킷 상단에 2개의 LVDT를 그림 2와 같이 설치하여 수평과 수직 변형을 측정하였다.

이 시험은 ASTM D 4123-82 시험법과 유사한 방법으로 마샬공시체에 대해 간접인장 시험으로 얻어진 파괴하중 평균의 40%의 하중(program하중입력)을 수직으로 반복재하 하였고 이때 실내온도는 25°C를 유지하였다. 설치된 LVDT로부터 주기적으로 변형을 측정하였고, 하중 주기는 그림 3과 같이 하중재하시간(a) : 0.1초, 회복 시간(b) : 0.9초, 주파수(c) : 1Hz로 하였다<sup>10,12)</sup>.

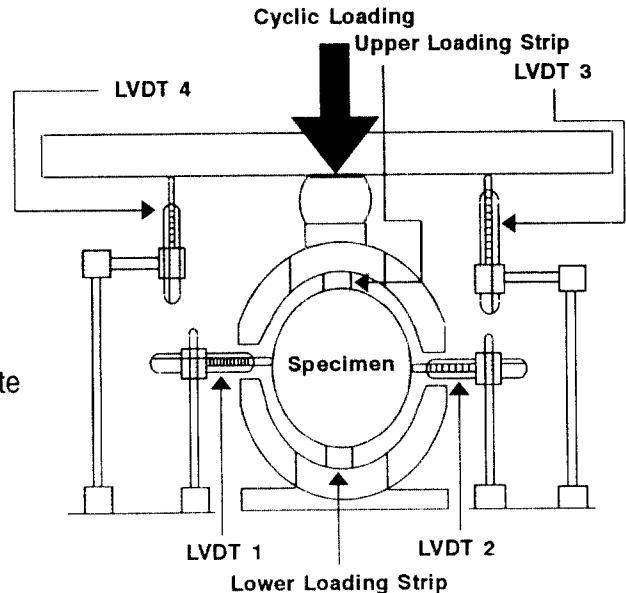
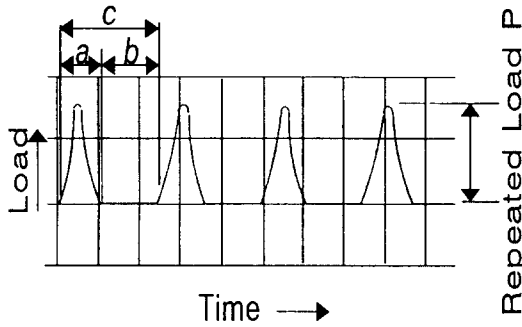


Figure 2. Schematic Diagram of Experimental Setup for Fatigue Test



a=duration of loading during one load cycle  
 b=recovery time  
 c=cycle time

Figure 3. Load-Time Pulse for Repeated Loading for Fatigue Test

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 피로 파괴 수명과 수평변형과의 관계

수평 변형을 측정한 결과는 그림 4, 5와 같다. 우선 20회 다짐 공시체의 경우 동결융해 처리가 무처리(F/T=0-cycle)보다 변형 증가 곡선의 기울기가 급하게 나타났으며 피로 수명(No. of cycle)도 짧게 나타났다. 다짐횟수의 증가는 변형 증가 곡선의 기울기를 점차 감소시켜 70회 다짐 공시체에서는 최대변형시 까지 점진적인 증가 현상을 보였으며, 피로 수명도 상대적으로 길게 나타났다. 또한 동결융해 처리 공시체와 무처리 공시체 사이의 기울기와 폭의 차이도 다짐도의 증가에 따라 점차 감소하여 70회 다짐에서는 그 차이가 매우 줄어들었다. 이러한 경향은 높은 다짐밀도로 인해 동결융해의 영향을 적게 받기 때문인 것으로 사료된다.

전체적으로는 다짐밀도가 어느 기준치 이상이 되면 변형과 파괴수명의 차이가 심하지 않게 나타났는데 이는 초기 하중 재하시(2000회 이하) 20, 30, 40회 다짐 공시체에서는 변형이 급격히 증가하나 50, 60, 70회 공시체에서는 완만한 곡선을 이루는 것을 통하여 볼 수 있었다.

이 초기의 급격한 변형 증가는 과도한 공극에 의한 영향으로 보여지며 일단 하중에 의한 공극의 침하(Depression)현상이 끝나면 완만한 곡선의 증가가 이루어 졌다. 아스팔트 혼합물의 피로 특성은 혼합물의 구성과 공극에 의해 상

당히 좌우되는데<sup>2,9)</sup>, 이러한 공극율의 감소에 대한 방안은 여러 가지가 있으나 다짐도의 증가로 확보할 수 있다. 결국 공극의 적정 수준으로의 감소는 아스팔트 콘크리트의 강도를 증대시켜 변형을 최소화 시키므로 주어진 응력 수준에서의 피로수명을 증가시키는 것으로 보여진다. 따라서 도로현장에서의 충분한 다짐은 아스팔트 포장의 강도증진 효과는 물론 피로 수명과 동결융해에 따른 저항성도 증가시키는 효과도 있음을 알 수 있었다.

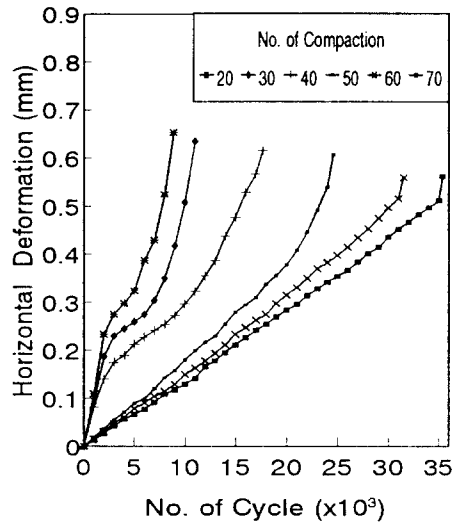


Figure 4. Horizontal Deformation under Repeated Loading (F/T=0-Cycle)

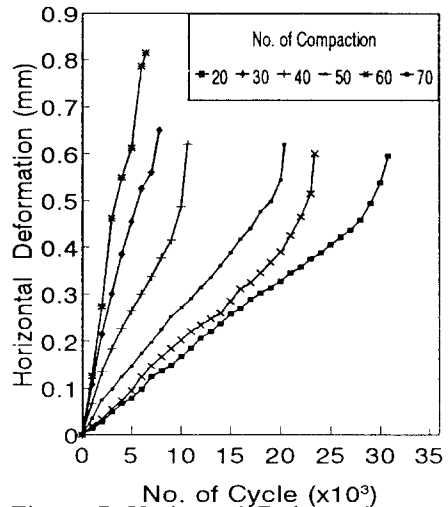


Figure 5. Horizontal Deformation under Repeated Loading (F/T=15-Cycle)

### 3.2 피로 파괴 수명과 수직변형과의 관계

다짐도와 동결융해 처리 유·무에 따른 공시체의 수직변형의 결과는 그림 6, 7과 같다. 수직변형 값은 공시체의 수직직경 방향의 변형 량으로 수평변형 값보다 약 2.5배 가량 높게 나타났으며 증가폭 또한 크게 나타났다. 최대 수직변형은 다짐밀도가 낮은 20회 공시체에서는 큰 값을 보이고 있었으며, 다짐밀도가 증가할수록 최대변형 값의 차이가 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 한편 동일한 피로 사이클 수에서는 동결융해 처리 공시체가 무처리 공시체에 비해 보다 큰 변형 값을 보였으며, 다짐밀도가 높은 공시체일수록 무처리와 동결융해 처리 변형값 차이의 폭이 좁고 다짐도가 낮은 공시체로 갈수록 그 차이가 크게 나타났다.

피로수명과 변형 및 처짐에 영향을 미치는 중요한 요소는 다짐밀도, 온도, 하중, 골재 입도, 아스팔트량 등이다. 일반적으로 입도가 조밀하고, 아스팔트 량이 상대적으로 높고, 다짐밀도가 크면 피로 파괴에 대한 저항을 증가시킬 수 있다. 그러나 다짐 밀도가 낮은 아스팔트 혼합물은 수분의 침투로 점성적 성질을 상실하여 본래 아스팔트 콘크리트의 특성을 손실하고 노화가 가속되어 조기 피로 교열을 초래한다.

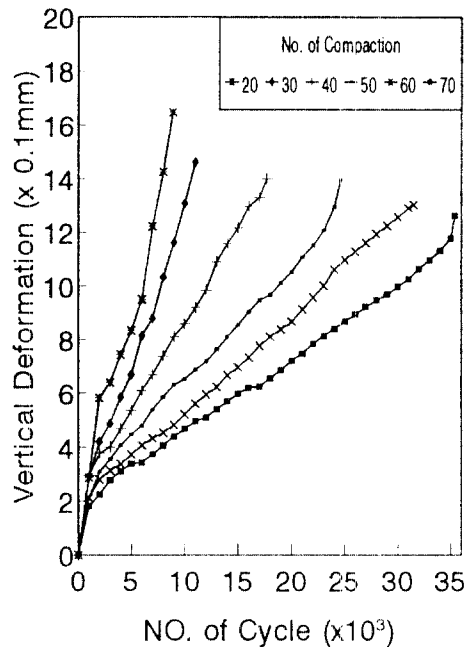


Figure 6. Vertical Deformation under Repeated Loading (F/T=0-Cycle)

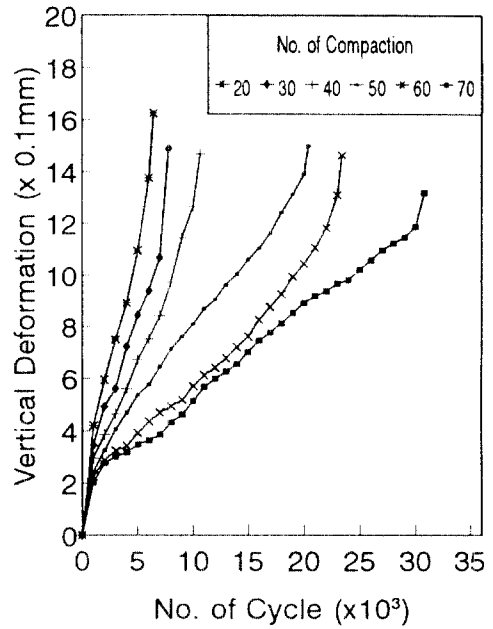


Figure 7. Vertical Deformation under Repeated Loading (F/T=15-Cycle)

### 4. 결 론

본 연구에서는 표층용 아스팔트 콘크리트의 피로 시험에서의 파괴 수명 및 변형 거동을 다짐도에 따라 고찰하였다. 원주형 마찰 공시체를 무처리와 동결융해 처리로 나누어 다짐밀도에 따른 특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피로시험 결과 다짐밀도가 낮은 공시체는 반복하중 재하에 따른 변형이 급격히 증가하며 피로수명이 짧았고 반면에 다짐밀도가 높은 공시체는 변형이 완만히 증가하며 긴 피로수명을 보였다.
2. 결국 다짐밀도가 낮은 아스팔트 콘크리트는 동결융해에 따른 손상이 상대적으로 고밀도인 것에 비하여 매우 큰 것으로 나타났다. 특히 반복하중에 의한 변형의 증가는 륜하중에 의한 소성변형의 원인이 되며 마찰 안정강도와 인장강도의 저하는 포장의 구조적 파괴(Structural Failure)로 이어지는 한 원인으로 판정되었다.
3. 현장에서 다짐이 불량한 것으로 판정되는 대다수 아스팔트 콘크리트는 본 연구 결과 포장으로써의 자체품질이 떨어지며 동결융해에 따라 성능이 더욱 저하되므로 조기 파손의 위험을 안고있는 것으로 볼 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. "Asphalt Technology and Construction Practices", Instructor's Guide Educational Series No. 1 (ES-1) Second Edition The Asphalt Institute, January, pp. J5~J9, 1983.
2. Deacon, J. M., "Fatigue of Asphalt Concrete", Graduate Report, ITT, University of California, Berkely, 1965.
3. Elliott, R. P. and Herrin, M., "Relative Life Effect of Mixture Composition and Density Variation", AAPT. Vol. 54 pp. 209~233, 1985.
4. Kandhal, P. S. and Koehler, W., "Marshall Mix Design Method : Current Practices", AAPT. Vol. 54 pp. 284~305, 1985.
5. Kennedy, T.W. Roberts, F.L. and Lee, K.W., "Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Using the Texas Freeze-Thaw Pedestal Test", AAPT Symposium on Antistripping Additives in Paving Mixtures, Kansas City, Missouri, February 1982. pp. 105~118
6. Kim, K. W. and El Hussein, H. M., "Effect of Differential Thermal Contraction on Fracture Properties of Asphalt Materials at Low Temperature", Submitted to Journal of AAPT. Vol. 64, 1994
7. "Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types", The Asphalt Institute, Manual Series No.2(MS-2), pp. 22~25, May, 1984.
8. Monismith, C. L. and Vallerger, B.A., "Relationship Between Density and Stability of Asphaltic Paving Mixtures", AAPT. Vol. 25, pp. 89~103, 1956.
9. Pell, P. S. and Tayler, I. F., "Asphalt Road Materials in Fatigue", AAPT. Vol. 38, Feb. 1969, pp. 371~422.
10. Rand, W. A., "Behavior of Asphalt Aggregate Mixes at Low Temperature", Institute für Strabenwesen, Technishe Universität Draunschweig, Germany.
11. Sayegh, G., "Viscoelastic Properties of Bituminous Mixtures", Proceedings of the Second International Conference of the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, 1967, pp. 743~755
12. "Test Methods for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixture", American Society for Testing and Material. ASTM D 4123-82, 1987.
13. "도로공사 표준시방서", 건설부. pp. 187~221. 1990.
14. 이정규, "이론 최대밀도에 근거한 아스팔트포장 다짐의 통계적 품질관리 연구", 강원대학교 석사학위 논문, 1994.