

# 포장가속시험기를 이용한 장수명 아스팔트포장 공법의 공용성 평가 연구

## Performance Evaluation of Perpetual Asphalt Pavements Using the Accelerated Pavement Tester

이정훈\* · 이현종\*\* · 송서규\*\*\*

Lee, Jung Hun · Lee, Hyun Jong · Song, Seo Gyu

### 1. 서론

포장의 공용성을 예측, 평가하는 방법으로 컴퓨터 시뮬레이션, 실내·외 시험, 포장가속시험, 시험도로, 실제 경험 등이 있다. 컴퓨터 시뮬레이션은 신뢰성이 떨어지고 시험도로는 실제 교통하중으로 주행하면서 포장 파손을 가속시키는 것으로 구간의 선정 및 시공에 대한 제약이 많으며 실제경험은 검증의 방법으로 사용하기엔 시공비용과 사용자비용 및 시간이 많이 소요된다. 반면 포장가속시험기는(이하 APT라 칭함) 20여 년간의 차량하중을 수 개 월내에 모사할 수 있는 장비로써 다른 방법들에 비해 시간과 비용에 대한 신뢰도 측면에서 효율적인 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 피로균열과 소성변형을 억제하여 포장의 설계수명을 증대시키는 장수명 아스팔트포장의 공용특성을 평가하기위해 APT를 통해 일반 아스팔트바인더(AC 60~80)혼합물과 고강성 아스팔트바인더(PG-82-22) 혼합물간의 강성과 단면두께에 따른 상대비교를 하였다.

### 2. 장수명 아스팔트 포장 공법 개요

기존의 아스팔트 포장은 반복되는 차량하중으로 인해 그림 1과 같이 아스팔트 층의 반복 휨에 의해 하단에서부터 피로균열이 발생하여 노면으로 진전되고 노상의 상부에 작용하는 압축응력에 의해 노상의 침하가 발생되어 파괴된다. 반면 장수명 아스팔트 포장의 경우 기본적인 설계개념은 기존 아스팔트포장의 피로균열과 노상의 소성변형을 억제하여 포장의 설계수명을 증대시키는 것으로 설계연한 동안 주기적으로 표층만 재시공하고 재시공 없이 40년 이상을 견딜 수 있는 포장이다.

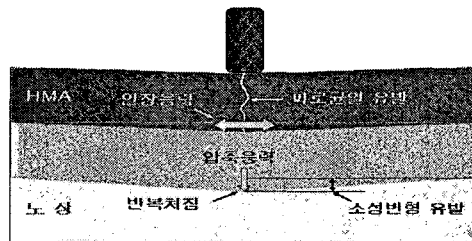


그림 1. 기존 아스팔트포장의 일반적인 파손 메카니즘

\* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 박사과정 · 02-2205-3812(Email:ugg97@korea.com)

\*\* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 · 02-3408-3812(E-mail:hlee@sejong.ac.kr)

\*\*\* 학생회원 · 세종대학교 토목환경공학과 석사과정 · 02-2205-3812(Email:aazz76@empal.com)

장수명 포장의 피로저항을 향상시키는 기본 개념은 그림 2에서 보는바와 같이 아스팔트 기층 두께를 증가시키거나 혼합물의 강성을 증가시켜 아스팔트층의 하단에 발생하는 인장변형률을 감소시킨다. 현재 영국에서 제안한 장수명 포장의 설계방식은 아스팔트 기층의 두께를 증가시키거나 강성을 증가시켜 아스팔트층 하단에 발생하는 인장변형률이 피로파괴를 유발시키지 않는 범위 이내로 제한하는 방식이다.

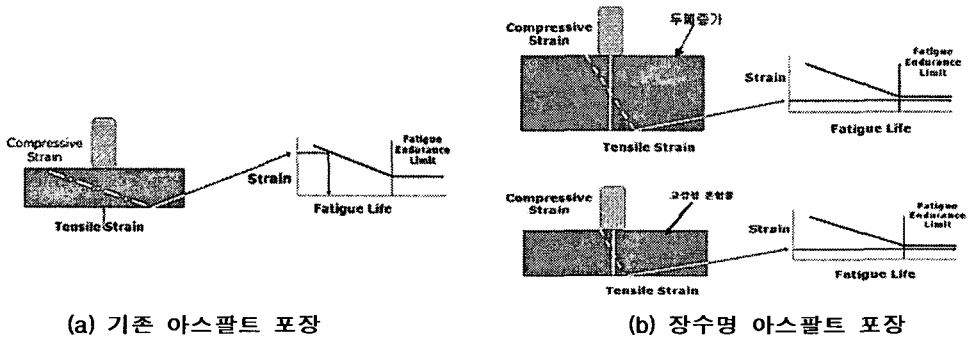


그림 2. 장수명 포장의 피로저항 개념

### 3. 한양대 포장가속시험기(HY-APT) 소개

그림 3의 한양대학교 포장가속시험기(Han-yang University Accelerated Pavement Test:HY-APT)는 한양대 안산캠퍼스에 건설되었으며 포장 단면에 실제하중과 유사한 교통하중 및 고온의 환경하중을 적용하여 단기간에 재료 및 설계법 등의 공용성을 평가하기 위한 목적으로 한국과학기술부 한국과학재단의 지원을 받아 국내 최초로 2000년~2003년까지 3년 간 개발하였으며 현재 운영 중이다.

표 1에서처럼 한양대 포장가속시험기(이하 HY-APT라 칭함)는 최대 속도 18km/h, 최대하중 11ton 복륜, 시험단면 가로 9m, 세로 12m, 깊이 3m이고 종 방향 12m를 직선 주행하도록 설계되었으며 왕복시간은 9초가 소요된다. 차량주행 경로의 다양성을 고려한 횡 방향 운동(Lateral Wandering)과 계절적 온도변화의 특성을 고려한 가열장비(Heating System)를 갖추고 있다.

표 1. HY-APT 제원

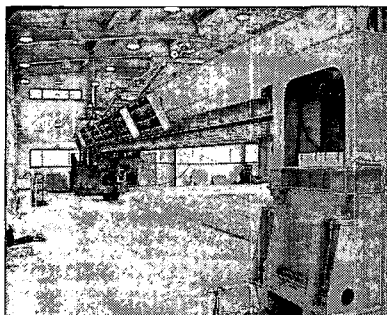


그림 3. HY-APT 장비

항 목	제 원
장비 크기	길이:20m, 폭:2m, 높이:3.4m
Wheel System	복륜 단축
운 하중	최대 11 ton
운행 속도	8~15km
횡방향 운동	최대 좌 · 우 10cm
타이어 크기	11.00R20PR or 14.00R-24PR
타이어 압	690 KPa
주행 방향	일 방향 or 양 방향 조절
온도 조절	가열 장치

### 4. APT시험 준비

일반과 고강성 아스팔트혼합물에 대한 예비물성 시험을 통하여 고강성 혼합물의 적용 타당성을 검증하고 이를 바탕으로 최종 배합설계를 실시한 후 플랜트에서 생산하였다. 아스팔트 바인더는 S사에서 개발한 기층



용 고강성바인더(PG 82-22)와 기존에 주로 적용되고 있는 일반바인더(PG 64-22)를 사용하고 골재는 경기도 시흥시에 소재한 S사에서 생산한 쇠석골재를 사용하였다. 기층의 파손을 유발하는 시간을 줄이고 파손상황을 직접적으로 관찰하기 위해 표층은 시공하지 않는다.

#### 4.1 배합 설계

현재 국내 실정으로는 영국 기층용 입도를 생산하기가 힘들며 그림 4와같이 영국의 입도가 국내 입도의 범위 내에 속하고 국내 기층용 입도인 BB-3의 제안입도가 영국의 입도를 만족하는 것으로 보여 이 입도의 골재를 사용하기로 하였다. 이후 현장의 콜드-빈(cold-bin)에서 나온 골재 25mm, 19mm, 13mm, 8mm이하의 네 가지 골재를 체 분석하였으며 합성입도는 목표입도와 어느 정도 차이가 있으나 현장 여건을 고려한다면 만족할만한 수준이었다. 또한, 콜드-빈에서 합성된 입도 비율대로 핫-빈(hot-bin)에 투입하여 나온 골재를 체 분석하였는데 목표입도와 차이가 있기는 하지만 비교적 근접한 입도를 얻었다.

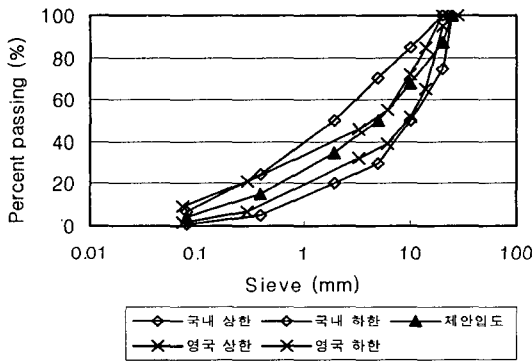


그림 4. 국내 및 영국의 입도 비교

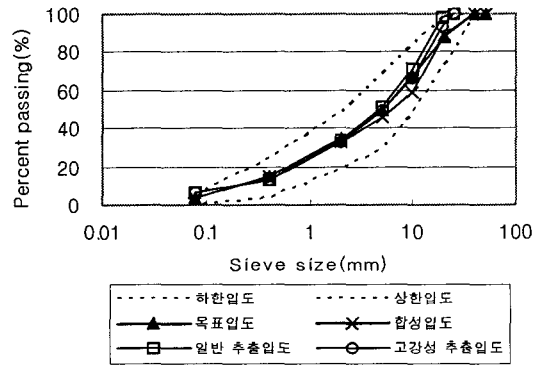


그림 5. 합성입도와 추출입도의 비교

국내 기층용 아스팔트 혼합물의 마찰배합기준은 공극률 4~6%에서 최적 아스팔트 함량을 결정하도록 되어 있다. 본 연구에서는 최적 아스팔트 함량을 공극률 5%에서 결정하였으며 3단계의 아스팔트 함량으로 일반과 고강성혼합물 각각 3개의 마찰시편을 제작하여 공극률을 측정된 결과 최적아스팔트함량이 일반혼합물은 4.5%, 고강성혼합물은 4.7%로 결정되었다. 결정된 입도와 아스팔트 함량으로 혼합물을 생산하여 그림 5와 같이 추출입도 시험을 한 결과 일반 혼합물의 추출입도와 고강성 혼합물의 추출입도는 유사한 값을 보였으며 핫-빈에서의 합성 입도와는 19mm와 10mm 골재에 대해 약 10~15% 정도의 차이를 보였다. 그러나 국내 기층용 입도의 상한 및 하한 입도의 범위에 속하여 이 입도와 함량별로 APT 시험을 위한 혼합물을 생산하였다.

#### 4.2 보조기층 시공

골재는 안산지역 채석장에서 선별하여 선정된 40mm 혼합석을 사용하였다. 20cm, 20cm로 나뉜 2층 다짐을 하였고 중간에 다짐도를 향상시키기 위해서 살수를 하였다. 본 연구과제에서 필요로 하는 보조기층 두께를 얻기 위해 기존의 보조기층을 깎거나 덧씌워서 두께를 맞추었으며 탠덤과 타이어롤러를 이용해 다짐하였고 추가로 단부의 다짐을 해주었다. 보조기층 시공 후 다짐상태를 평가하기 위해 동적콘관입시험(DCP)을 하였으며 PI 지수를 구한결과 대략 1의 균일한 다짐이 되었다. 또한 평탄성을 평가하기 위해 레벨을 측정하였으며 2~3mm의 편차로 양호한 두께로 시공되었다.

#### 4.3 기층 시공

기층 시공에 앞서 보조기층과의 결합력을 높이기 위해 프라이밍코팅(Prime Coating)을 하였고 포설은 현장조건과 동일하게 아스팔트 피니셔(Asphalt Finisher)를 사용하였으며 중방향 12.5m로 운행하였다. 일반 7cm 단면



은 한층 포설하였고 일반 30cm 단면은 10cm, 10cm, 10cm로 3층 포설하였으며 고강성 25cm 단면은 15cm, 10cm로 2층 포설하였다. 다짐은 2축 철륵 탠덤 롤러(Tandem-Roller), 고무 타이어 롤러(Tire-Roller), 3륵식 철륵 머캐덤 롤러(Macadam-Roller) 순으로 다짐을 실시하고 층 다짐시 결합력을 증진시키기 위해 텍코팅(Tack Coating)을 실시하였다.

4.4 APT시험 단면 시공 결과

본 연구에서는 일반적인 국내 기층용 입도를 적용하였고 현장배합설계를 통해 혼합물을 생산하였으며 표층을 시공하지 않았다. 하나의 레인은 아스팔트 바인더 특성에 따른 피로균열을 파악하기위해 기층단면을 일반과 고강성 7cm로 얇게 하고 두 번째 레인은 재료적 특성과 단면두께에 따른 소성변형량을 상대 비교하기 위해 일반 30cm, 고강성 25cm로 계획하였으나 시공완료 후 코어링을 통해 확인한 결과 일반 9.4cm와 26.8cm, 고강성 8.3cm와 21.5cm의 단면 두께로 시공되었다. 장수명 포장 시험단면 구성은 그림 6과 같으며 포장층의 구성은 그림 7과 같다.

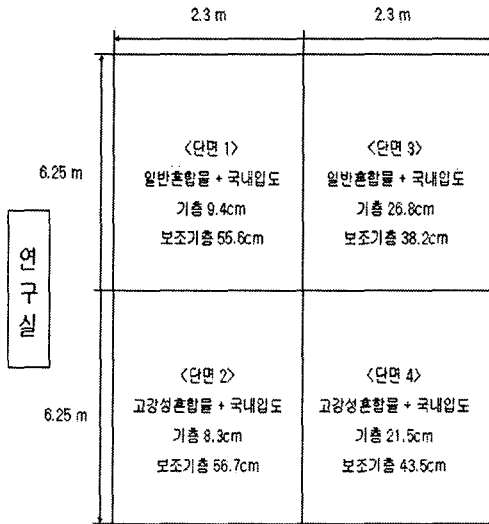


그림 6. 시험 단면 구성



그림 7. 포장 층 구성

5. 계측기 운영 및 결과

아스팔트 층의 두께 및 강성변화에 따른 인장 변형율을 측정하기 위해서 기층 시공과정 중에 아스팔트용 변형률계(Strain Gauge : KM-100HAS)를 매설하였으며 대기 및 포장 층 온도분포를 확인하고 여름철 포장 온도를 모사하기위한 가열 작업시 온도 조절을 위해 단면을 코어링(Coring)하여 T-type의 온도계측기(Thermocouple)를 매설하였다. 전반적인 계측장비의 설치 및 시험 위치에 대한 상세도를 그림 8에 나타내었다.

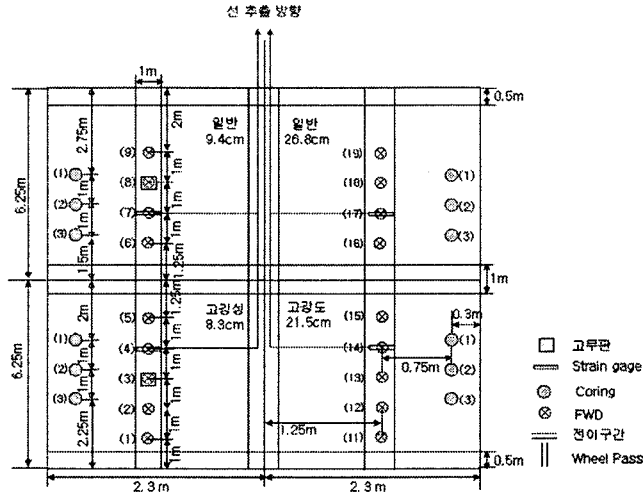


그림 8. 계측기 매설 및 시험 위치

5.1 소성변형을 계측 및 결과

일반 26.8cm와 고강성 21.5cm 단면에서의 골재종류와 입도는 동일하며 운하중 8.1ton에서의 아스팔트 바인더 특성과 단면두께에 따른 소성변형 발생량을 상대 비교하였다. 여름철 최고 포장온도 조건을 모사하기 위해 기층 표면아래 5cm를 목표지점으로 50℃까지 가열하였다. 계측은 레이저 프로필러미터(Laser Profilometer)를 사용하였으며 계측거리는 1.5m, 계측 간격은 5mm, 조사 횟수는 한 구간 1회의 조건으로 각 단면마다 3구간을 측정하였고 계측구간에서 좌·우 0.3m의 전이구간을 제외하고 계산하였다. 각 단면마다 3구간의 계측 값을 평균하였고 그 값을 구간 5의 이동평균 한 추세선에서 최고점과 최저점의 차를 변형량으로 설정하였으며 듀얼타이어로 인한 두 지점의 변형량을 평균하여 최종 변형량으로 하였다. 그림 9는 각 단면의 소성변형 계측 위치를 나타내며 그림 10은 실제시험인 휠트래킹의 20,000회 운영에 따른 소성변형 결과와 일반 26.8cm와 고강성 21.5cm 단면의 APT 90,000회 운영결과를 비교한 것이다. APT 운행횟수 90,000회 일 경우 일반단면이 대략 5.3mm, 고강성 단면이 3mm정도의 변형량이 발생했다. 골재 최대입경 25mm의 기층단면에서의 실험입을 감안할 때 적은 변형량은 아닌 것으로 판단되며 고강성 혼합물의 소성변형량이 적은 것으로 미루어 온도의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 감온성이 일반혼합물에 비해 우수한 것으로 사료된다.

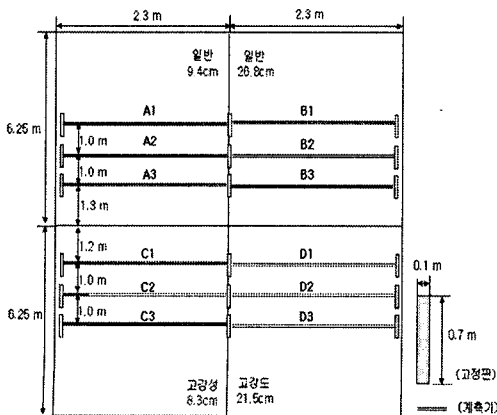


그림 9. 계측 위치

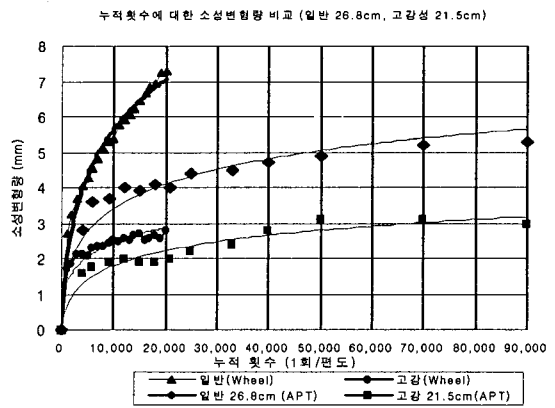


그림 10. 휠트래킹과 APT의 소성변형량



5.2 인장변형률 계측 및 결과

시공시 변형률계(Strain Gauge)의 선을 보호하기 위해 주름관(Flexible Tube)을 사용하였으며 변형률계를 보호하기 위해 사각 철제관으로 덮어주었다. 동적 데이터 로거(Dynamic Data Logger)와 Labview 프로그램을 이용하여 계측 값을 초당 500회씩 60초간 수집하였다.

표 2. 운하중별 변형률(일반 9.4cm, 고강성 8.3cm)

일반 9.4cm (기층 하부 : 22.5℃)			
횡수 \ 하중	4.2 ton	6.2 ton	7.8 ton
평균(mV)	0.161	0.195	0.201
표준 편차	0.01372	0.01323	0.01326
Strain.( $\mu$ s)	161.00	195.00	201.25
고강성 8.3cm (기층하부 : 22.7℃)			
횡수 \ 하중	4.2 ton	6.2 ton	7.8 ton
평균(mV)	0.171	0.185	0.196
표준 편차	0.00606	0.00513	0.00327
Strain.( $\mu$ s)	170.75	185.20	195.75

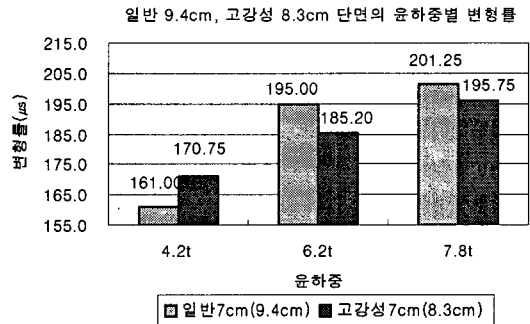


그림 11. 운하중별 변형률(일반 9.4cm, 고강성 8.3cm)

표 3. 운하중별 변형률(일반 26.8cm, 고강성 21.5cm)

일반 26.8cm (기층하부 : 22.9℃)			
횡수 \ 하중	5.6 ton	6.8 ton	8.1 ton
평균(mV)	0.057	0.064	0.071
표준 편차	0.00248	0.00183	0.00266
Strain.( $\mu$ s)	57.00	64.20	70.60
고강도 21.5cm (기층하부 : 22.9℃)			
횡수 \ 하중	5.6 ton	6.8 ton	8.1 ton
평균(mV)	0.044	0.052	0.057
표준 편차	0.00186	0.00528	0.00213
Strain.( $\mu$ s)	44.20	52.40	57.50

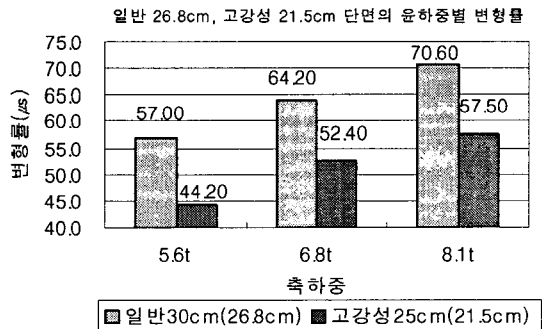


그림 12. 운하중별 변형률(일반 26.8cm, 고강성 21.5cm)

그림 11과 12를 보면 고강성 혼합물이 일반 혼합물에 비해 단면두께는 얇지만 동일 하중에 대해 기층하부에 발생하는 인장변형률이 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 일반 및 고강성 혼합물의 피로특성이 유사할 경우 동일한 단면두께의 포장에서 고강성 혼합물의 피로수명이 훨씬 증대 될 것으로 예상된다. 반면 포장의 수명을 동일하게 할 경우 고강성 혼합물을 적용하게 되면 기존 일반 혼합물에 비해 단면두께를 줄일 수 있는 것으로 사료된다.

특히 그림 12에서처럼 5.6ton의 운하중(11.2ton의 축하중에 해당)의 경우 실제 도로상의 교통하중에서 가장 큰 값에 해당된다(법정 허용 단축하중이 10ton임). 따라서 장수명 포장의 경우 아스팔트 층 하단의 허용 인장 변형률이 70 $\mu$ s이기 때문에 일반 26.8cm와 고강성 21.5cm 단면 모두 허용 인장률 범위 내에 든다고 볼 수 있다. 그러므로 일반 및 고강성 혼합물을 사용해 장수명 포장을 설계할 경우 최소 기층의 두께는 일반이 25cm, 고강성이 20cm 정도가 적절한 것으로 판단되며 이는 구조해석을 통하여 검증해야 할 것이다.

5.3 피로균열 계측 및 피로수명 예측

본 연구과제에서는 수분과 저온 환경을 모사할 수 있는 장비가 없어 시간에 따른 대기온도변화와 운하중



에 의해 발생하는 피로균열을 육안 조사하여 상대 비교하기로 하였다. 그러나 일반 9.4cm와 고강성 8.3cm 단면에서 9.4ton의 윤택중으로 30,000회 운행하였으나 피로균열 발생을 촉진시키기 위한 고무판 매설 지점에서 조차 균열이 발생하지 않았으며 이는 여름철 높은 대기온도의 영향과 무관하지 않을 것으로 판단되어 10월 초에 재운행하여 추후에 결과를 지켜볼 예정이다.

APT 시험을 통해 피로균열이 발생하는 윤택중 횡수로 포장체의 피로수명을 예측하려하였으나 균열이 발생하지 않아서 5.2절에서 측정한 기층 하부에서의 인장변형률을 가지고 피로수명을 예측하였다. 기층하부에서 발생하는 인장변형은 포장의 피로균열을 발생시키는 주원인으로서 식 (1)의 예측식을 적용하여 표 4와 같이 피로수명을 산정하였으며 그림 13에서와 같이 비교하였다.

$$N_f = a(\epsilon_0)^b \tag{1}$$

여기서,  $N_f$  : 아스팔트 혼합물의 피로수명

$\epsilon_0$  : 초기 인장변형률

a, b : 회귀분석을 통하여 얻어지는 상수

그 결과 포장층 두께가 얇은 단면의 경우 일반 아스팔트 혼합물의 피로수명이 고강성 아스팔트 혼합물의 피로수명보다 상대적으로 우수하게 나타났으며 이는 포장의 두께가 얇은 경우 포장체에 발생하는 변형률이 커지기 때문에 강성이 큰 아스팔트 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물에 비해서 취성이 크게 작용하게 됨으로 상대적으로 짧은 피로수명을 갖는 것으로 판단된다. 두꺼운 단면에서의 피로수명은 고강성 아스팔트 혼합물의 피로수명이 반영구적으로 우수하게 나타났으며 고강성 혼합물을 사용할 경우 단면두께를 20cm이상 적용하게 되면 피로저항성이 우수한 장수명 포장이 될 수 있을 것으로 판단된다.

표 4. 포장가속시험의 피로수명

혼합물종류	윤택중(t)	변형률( $\epsilon$ )	$N_f$
일반 (9.4cm)	4.2	0.000161	4009
	6.2	0.000195	1340
	8.2	0.00020125	1119
고강성 (8.3cm)	4.2	0.00017075	1474
	6.2	0.0001852	611
	8.2	0.00019575	335
일반 (26.8cm)	5.6	0.00005683	1549894
	6.8	0.00006483	729595
	8.1	0.0000715	416654
고강성 (21.5cm)	5.6	0.00004467	3057081094
	6.8	0.0000545	353457446
	8.1	0.00005617	254774237

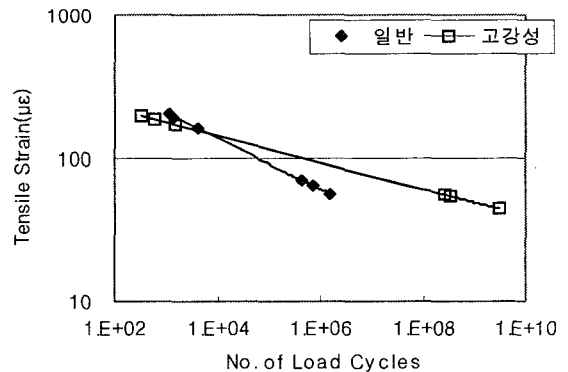


그림 13. 포장가속시험의 피로수명 예측

#### 5.4 다층 탄성 해석을 통한 탄성계수 추정

각 하중에 따른 인장변형률에 해당하는 탄성계수를 결정하기 위해 기본 물성, 각층의 두께, 하중조건 등은 포장가속시험에서의 조건과 동일하게 하고 하중마다 3개의 탄성계수를 가정하여 다층탄성해석프로그램인 Kenlayer를 사용해 구조해석을 하였다. 그림 14, 15와 같이 계측된 각 단면의 하중별 인장변형률 값을 이용해 해석결과인 3점의 인장변형률 값에서 각 포장층의 탄성계수를 추정하게 된다. 해석 결과는 표 5와 같이 일반 기층재의 평균 탄성계수는 6.5GPa, 고강성 기층재의 평균 탄성계수는 12.7GPa으로 고강성 기층재의 탄성계수가 약 2배의 큰 탄성계수를 갖는 것으로 추정되었지만 이 수치는 실내시험인 동탄성계수 시험결과와



상이한 값을 보인다. 이는 포장가속시험에 적용된 하중 측정시 하중계 측정오차에 기인한 것으로 포장가속시험의 종료 후 포장상부를 하중계 높이만큼 절삭하여 재 계측하면 실내시험과 유사한 결과를 도출할 것으로 사료된다.

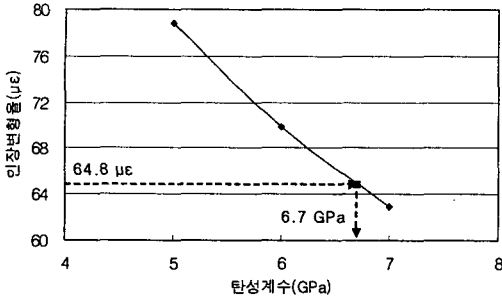


그림 14. 일반 기층재의 탄성계수 추정(6.8ton)

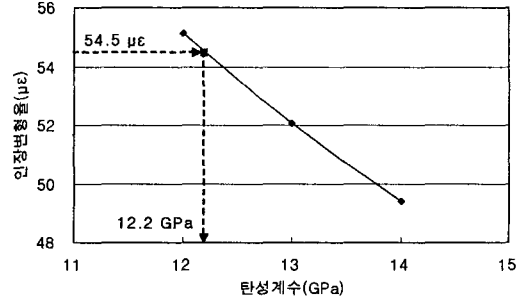


그림 15. 고강성 기층재의 탄성계수 추정(6.8ton)

표 5. 실내시험과 포장가속시험의 탄성계수 비교

	하중 (ton)	일반 아스팔트		고강성 아스팔트	
		APT시험	실내시험	APT시험	실내시험
E (GPa)	5	5.8	4.4	11.2	6.6
	5.6	6.2	4.3	12.5	6.5
	6.8	6.7	4.2	12.2	6.4
	8.1	7.4	4.1	14.7	6.3
	평균	6.5	4.25	12.7	6.45

## 6. 결론

HY-APT를 이용한 장기공용성시험결과 두꺼운 단면에서의 소성변형량은 일반단면 5.3mm, 고강성단면 3mm로 고강성 혼합물의 소성저항성이 우수하였으며 두꺼운 단면과 얇은 단면에서 기층 하부의 인장변형률을 측정된 결과 고강성혼합물이 일반혼합물보다 10~12μs 정도 낮아 고강성혼합물의 피로균열저항성이 우수하다는 것을 간접적으로 알 수 있었다. 피로균열은 30,000회 운행하는 동안 대기온도가 높아 발생하지 않았으며 계측된 인장변형률 값과 구조해석을 통해 피로수명을 예측한 결과 두꺼운 단면에서의 고강성혼합물이 반영구적으로 나타나 장수명포장의 허용인장변형률인 70μs 이하가 되는 범위의 두께로 시공한다면 고강성 아스팔트 혼합물은 공용성이 뛰어난 장수명포장의 기층재로서 적합하다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2002년 건설핵심기술연구개발 사업인 장수명 아스팔트포장공법 개발(과제번호 : 02산학연B01-02)연구의 일환으로 수행되었으며 연구를 추진함에 있어 도움을 주신 분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. "아스팔트 포장공학 원론," (1999), 미국아스팔트기술센터 편, 아스팔트포장연구회 역
2. 건설교통부/한국건설기술연구원, (2003), "특수아스팔트 포장의 장기공용성 평가 및 개선연구"
3. 한국도로공사, (2001), "모형포장가속시험기를 이용한 실용화 연구"
4. NCHRP Synthesis Highway Practice 235, "Application of Full-Scale Accelerated Pavement Testing"
5. NCHRP Report 512, "Accelerated Pavement Testing"
6. NCHRP Synthesis 325, "Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing"