



고강성 기층재를 적용한 장수명 아스팔트포장 공법 개발

Development of Long-Life Asphalt Pavements Method Using High Modulus Asphalt Mixes

이 정 훈* 이 현 종**
 Lee, Jung Hun Lee, Hyun Jong

Abstract

This study suggests long-life asphalt pavement method which can save maintenance cost by increasing the design and performance period of pavements. The high modulus asphalt binder developed and then various physical tests are performed. Laboratory performance tests and accelerated pavement test are conducted for the high modulus and conventional mixtures. The test results show that dynamic modulus values of high modulus mixtures are higher than those of the conventional mixtures, The high modulus mixtures yield better fatigue, rutting and moisture damage performance than conventional mixtures. Structural analysis is performed and a database is built up for long life asphalt pavement design. Pavement response model is developed through a multiple regression analysis program, SPSS using the database. A design software for the long life pavements is developed based on the pavement response model and laboratory and field performance tests results. In addition, optimum pavement sections and materials are suggested. The suggested AC thickness of long life asphalt pavement is 29cm. A Life cycle cost analysis(LCCA) is conducted to check the economical efficiency of the long life pavement section. The LCCA result shows that initial construction costs of long life and conventional pavements are almost equal, but long life pavement is more profitable in terms of the LCCA.

Keywords : long-life asphalt pavement, high modulus binder, multiple regression analysis

요 지

본 연구에서는 포장의 설계수명과 공용년수를 증대시켜 아스팔트 포장의 유지보수비용을 감소시킬 수 있는 장수명 아스팔트 포장 공법을 제안하였다. 이를 위한 고강성 바인더를 개발하여 다양한 실내 물성시험을 수행하였으며 고강성 기층재의 평가를 위해 실내 공용성시험 및 포장가속시험을 실시하여 기존의 일반아스팔트 혼합물과 비교 평가하였다. 그 결과 고강성 기층재는 일반 아스팔트 혼합물에 비해 강성이 증가하였고 수분손상, 피로균열 및 소성변형 저항성 등에서 우수한 것으로 평가되었다. 또한, 장수명 아스팔트 포장의 설계를 위해 구조해석을 실시하여 DB를 구축하였으며 이 자료를 이용해 다중회귀분석 프로그램인 SPSS로 포장체 거동모형을 개발하였다. 여기서 개발된 포장체 거동모형과 실내·외 시험결과를 기초로 장수명 아스팔트 포장 설계를 위한 소프트웨어를 개발하였으며 포장의 최적단면 및 구성을 설정하였다. 이렇게 설정된 장수명 포장의 아스팔트 층 단면 두께는 29cm로 이 단면의 경제성을 확인하기 위하여 생애주기 비용분석을 실시하였다. 그 결과 장수명포장이 기존 고속도로(경부)와 초기시공비용이 동일하면서 생애주기 비용측면에서 유리한 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 장수명 아스팔트 포장, 고강성 아스팔트 바인더, 다중회귀분석

* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 박사과정
 ** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사



1. 서론

경제성장의 가속화로 교통량은 급속히 증가하였고 차량의 윤택중이나 타이어 접지압 등도 꾸준히 증가하여 아스팔트 포장은 보다 가혹한 환경에 노출되어 조기파손이 유발되고 있다. 이러한 파손으로 매년 도로의 유지관리비용이 증가하고 있으며 대부분이 도로포장의 파손에 따른 유지보수에 사용되고 있다. 그러나 현재 우리나라의 포장은 선진국에 비해 공용기간이 50% 이상 짧아 막대한 예산의 손실로 이어져 유지보수주기를 증대시키는 방안을 수립하는 것이 절실히 요구된다.

설계수명 20년을 기준으로 실시하는 기존의 아스팔트포장 설계개념은 공용년수 20년 이후에 재시공을 전제로 하지만 국내 여건상 재시공을 하기에는 막대한 비용이 소모되어 단순히 5cm 덧씌우기를 실시하고 있다. 실제로 선진국의 경우 덧씌우기 보수주기는 평균 10년이나 국내 일반국도의 경우 보수주기는 약 5년 미만으로 덧씌우기 효과의 감소와 함께 막대한 보수비용의 손실을 초래하고 있다. 따라서 현재 20년 주기의 아스팔트포장 설계기간을 40년 이상으로 증가시켜 아스팔트포장의 잦은 유지보수를 근본적으로 줄여 사회 및 경제적 손실을 최소화할 수 있는 첨단 아스팔트포장 공법의 개발이 필요하게 되었다.

2. 장수명 아스팔트 포장 공법 개요

장수명 아스팔트 포장은 설계연한 동안 주기적으로 표층만 재시공하고 재건설이나 대대적인 보수없이 40년 이상을 견딜 수 있는 포장공법으로서 1997년 영국의 국립도로연구소에서 기본개념을 제안한 이래 유럽과 미국 등에서 활발하게 연구 및 실제시공이 이루어지고 있다(Nunn 등, 1997).

장수명 포장공법의 기본적인 설계 개념은 아스팔트 기층의 강성과 두께를 증가시켜 피로균열과 노상의 처짐을 근본적으로 방지하여 설계수명을 증대시

키는 한편 표층은 소성변형에 대한 강한 저항성과 내구성을 확보하기 위해 개질 혹은 특수 혼합물을 적용한다. 장수명 포장의 피로저항을 향상시키는 기본 개념은 그림 1에서 보는 바와 같이 아스팔트 기층 두께나 강성을 증가시켜 아스팔트층의 하단에 발생하는 인장변형률을 감소시킨다. 본 연구에서는 경제성을 고려하여 프랑스에서 사용하고 있는 고강성 기층재를 적용한 장수명 포장 공법을 개발하고자 한다.

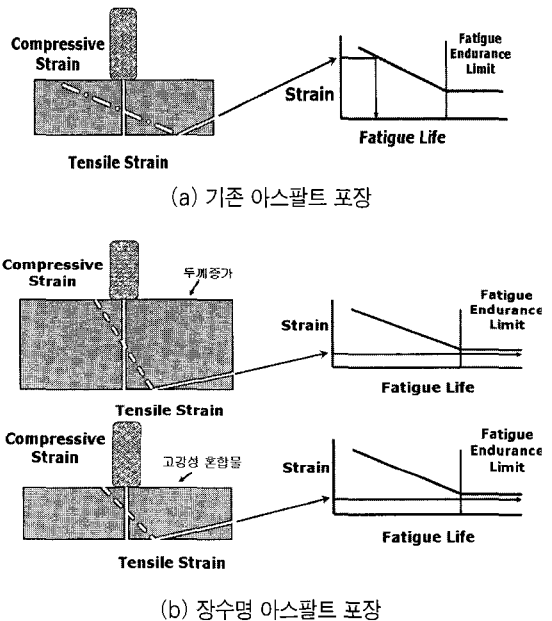


그림 1. 장수명 포장의 피로저항 개념

3. 고강성 아스팔트 혼합물 개발 및 실내공용성 시험

3.1 고강성 아스팔트 바인더 개발

본 연구에서는 고비점 유분(high boiling point petroleum)을 사용하여 바인더의 침입도를 감소시키는 방법을 통해 바인더를 생산하여 다양한 물성시험을 수행하였으며 프랑스의 고강성 바인더 물성과 함께 표 1에 정리하였다(Corte, 2001). 시험결과 고



강성 바인더의 침입도는 28인 것으로 나타났으며 복소탄성계수 G^* (complex modulus)가 일반 아스팔트 바인더(PG64-22)와 PMA에 비해 3배정도 높은 것으로 평가되었다. 저온에서의 균열발생 온도를 모사하는 시험법인 프라스 취하점은 침입도가 70인 일반 아스팔트 바인더가 -11°C 인 반면 고강성 아스팔트 바인더는 -8°C 로 확인되었으며 침입도가 낮을수록 저온균열 저항성은 저하되는 것으로 평가되었다. 또한, 프랑스(EME)에서 적용되고 있는 바인더와 비교하였을 때 침입도, 연화점, 프라스 취하점 등에서 만족할 만한 결과를 얻을 수 있으며 이는 새롭게 개발된 바인더가 프랑스에서 적용되고 있는 바인더와 근접한 물성을 갖는 것을 알 수 있다.

표 1. 일반 및 고강성 아스팔트 바인더의 물성비교

	일반AP (AC60~80)	PMA	고강성	프랑스(EME)	
				35/50	10/20
침입도, 25 $^{\circ}\text{C}$, (dmm)	70	63	28	35/50	10/20
연화점 ($^{\circ}\text{C}$)	48	100.3	89		62~70
프라스 취하점 ($^{\circ}\text{C}$)	-11	-18	-8		+3~8
G^* , 15 $^{\circ}\text{C}$ (MPa)	7.1	7	21	34.5	40~90

3.2 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 측정시험

본 연구에서는 골재 입도를 국내 기층용 입도인 BB-3 입도를 적용하였으며 아스팔트 혼합물의 강성을 평가하기 위하여 일반 아스팔트 바인더(PG64-22)와 고강성 바인더를 사용하였다. 최적 바인더 함량은 일반 혼합물 4.5%, 고강성 혼합물 4.7%로 확인되어 실내시험용 혼합물을 제작하였다. 아스팔트 혼합물의 동탄성계수 측정시험을 위한 변수로는 온도와 하중주파수이며 시험온도는 5 $^{\circ}\text{C}$, 15 $^{\circ}\text{C}$, 30 $^{\circ}\text{C}$ 이고 하중주파수는 20Hz, 10Hz, 0.5Hz, 0.1Hz에서 시험을 실시하였다(NCHRP 1-37A).

각 혼합물의 동탄성계수 시험을 통해 산정한 동탄성계수의 마스터커브를 비교하면 그림 2와 같다. 일

반 아스팔트 혼합물에 비해 새롭게 개발된 고강성 아스팔트 바인더를 사용한 혼합물의 경우 5 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 10~15%, 15 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 20~25%, 30 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 거의 2배 가까이 동탄성계수가 증가함을 알 수 있다. 이것은 고강성 아스팔트 혼합물의 폴리머 성질에 의해서 저온에서의 온도 감온성은 거의 차이가 없고 고온에서의 온도 감온성이 고강성 아스팔트 바인더가 우수하기 때문인 것으로 사료된다.

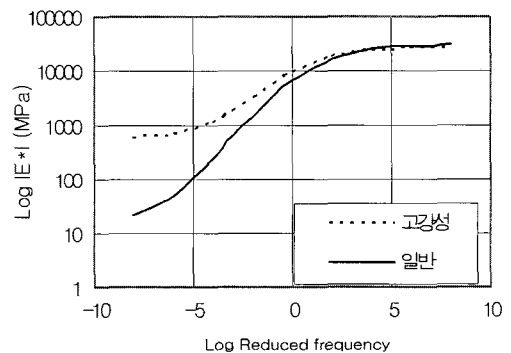


그림 2. 마스터커브(Reference Temperature 15 $^{\circ}\text{C}$)

3.3 실내 공용성 시험결과

아스팔트 혼합물의 수분 민감성을 측정하는 데에는 여러 종류의 시험이 있으나 현재 가장 많이 적용되고 있는 ASTM D4867-92의 규정에 따라 시험을 실시하였다. 각 혼합물의 수분민감성을 측정하기 위하여 마샬 공시체에 대한 건조 인장강도 및 수침 인장강도를 간접인장시험을 통해 측정하였으며 표 2에서 보는 바와 같이 각 아스팔트 혼합물의 TSR(Tensile Strength Ratio)은 모두 80% 이상을 상회하였다. 일반 아스팔트 혼합물(88.5%)보다 고

표 2. 수분손상 시험결과

	일반	고강성
Dry-Strength (kgf/cm 2)	10.92	9.67
Wet-Strength (kgf/cm 2)	15.45	15.19
TSR(%)	88.54	98.32



강성 아스팔트 혼합물(98.3%)을 사용하였을 경우 TSR이 약 10% 증가하는 효과를 볼 수 있었다. 이는 고강성 아스팔트 바인더에 첨가된 액상 바리 저감제의 효과에 기인한 것으로 사료된다.

아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 측정하기 위해 휠트래킹 시험기를 사용하여 아스팔트 혼합물의 소성변형에 대한 저항특성을 평가하였다. 시험방법은 KS F2374의 규정에 따라 시험을 실시하였으며 소성변형에 대한 상대적인 비교를 용이하게 하기 위하여 하중을 통상적인 휠트래킹 시험에 적용하는 하중(70kg)보다 2배로 증가시켜 시험을 실시하였다. 휠트래킹 시험 결과를 동적안정도로 비교하면 표 3과 같다. 일반 혼합물의 경우 반복 율하중이 20,000회 통과하였을 때 8mm정도의 러팅(rutting) 깊이가 발생하였으며, 고강성 아스팔트 혼합물의 경우는 율하중이 5,000회 이상부터는 약 2~3mm정도로 거의 변화가 없었다.

표 3. 휠트래킹 시험 결과

	일반혼합물	고강성혼합물
소성변형 깊이(mm)	7.28	2.79
율하중 통과회수(회)	20000	20000
율하중(kg)	140	140
동적안정도(회/mm)	2747	7168

피로시험은 간접인장방식에 의해 수행되었고 10Hz의 주기를 갖는 Haversine 하중을 0.1초의 하중재하 및 0.9초의 휴지기로 시편에 가하였다. 아스팔트 혼합물의 피로수명은 시편의 강성이 초기 강성의 50%에 도달할 때까지 적용된 하중회수로 결정하였다. 각 혼합물의 피로시험 데이터를 사용하여 100번째 하중재하시의 변형률 진폭과 피로수명에 대해 식 (1)과 같이 일반적인 피로수명 모델식을 사용하여 회귀분석을 수행하였다.

$$N_f = a(\epsilon_0)^b \quad (1)$$

여기서, N_f = 아스팔트 혼합물의 피로수명

ϵ_0 = 초기 인장 변형률

a, b = 회귀분석을 통하여 얻어지는 상수

일반 아스팔트 혼합물과 고강성 아스팔트 혼합물의 피로시험 결과 그림 3과 같이 피로수명에 있어서 고강성 아스팔트 혼합물의 피로수명이 일반 아스팔트 혼합물의 피로수명보다 상대적으로 우수한 것으로 나타났으며 피로균열에 대한 저항성이 5~10배 정도 우수한 것으로 나타났다.

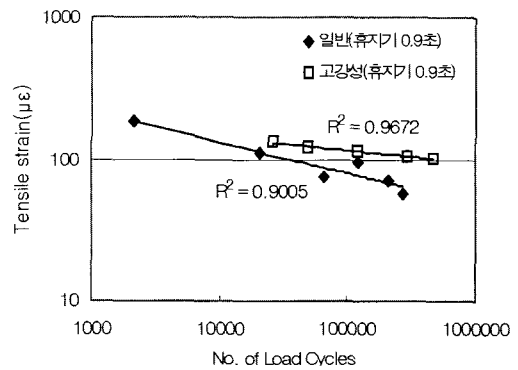


그림 3. 피로시험 결과

4. 포장가속시험

4.1 포장가속시험기와 시험단면

본 연구에서는 한양대학교의 포장가속시험기 (Accelerated Pavement Test)를 사용하였으며 그 구성은 표 4와 같다. 시험단면은 가로 9m, 세로 12m, 깊이 3m이고 종 방향 12m를 직선 주행하도록 설계되었으며 왕복시간은 9초가 소요된다.

피로균열과 소성변형량을 비교하기 위한 시험단면의 구성은 그림 4와 같으며 기층의 파손을 유발하는 시간을 줄이고 파손상황을 직접적으로 관찰하기 위해 표층은 시공하지 않았다. 시험단면의 시공에 사용된 아스팔트 기층용 혼합물은 BB-3 입도의 일반 혼합물과 고강성 혼합물을 현장 배합설계를 통해 생산하였다. 기층 시공에 앞서 보조기층과의 결합력을 높



표 4. 포장가속시험기의 제원

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/h
횡방향 운동	최대 좌·우 10cm
타이어 크기	11.00R-20PR or 14.00R-24PR
타이어 압	690 KPa
주행 방향	일 방향 or 양 방향
온도 조절	가열 장치

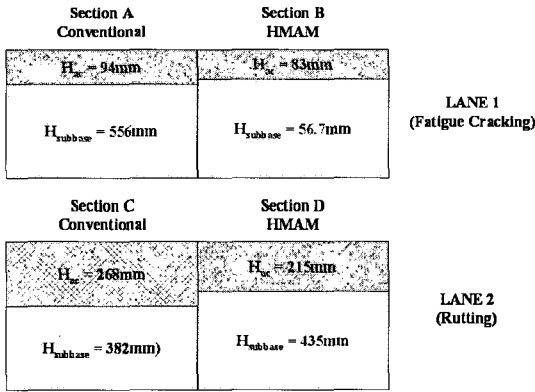


그림 4. 시험 단면 구성

이기 위해 프라임코팅(prime coating)을 하였고 현장조건과 동일한 포설과 다짐을 실시하였다.

아스팔트 층의 두께 및 강성변화에 따른 인장 변형률을 측정하기 위해서 기층 시공과정 중에 아스팔트 용 변형률계(KM-100HAS)를 매설하였으며 동적 데이터 로거(dynamic data logger)와 LabView 프로그램을 이용하여 계측 값을 초당 500회씩 60초간 수집하였다. 또한, 대기 및 포장 층 온도분포를 확인하고 여름철 포장온도를 모사하기 위해 T-type의 온도계측기(thermocouple)를 매설하였다.

4.2 인장변형률 계측결과

일반 및 고강성 혼합물 적용 단면의 구조적 지지력

을 평가하기 위하여 다양한 하중하에서 아스팔트 층의 하단에 발생하는 인장 변형률을 계측하였으며 얇은 단면 및 두꺼운 포장 단면에 대한 계측결과는 각각 그림 5, 그림 6과 같다. 고강성 혼합물이 일반 혼합물에 비해 단면두께는 얇지만 동일 하중에 대해 기층하부에 발생하는 인장변형률이 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 일반 및 고강성 혼합물의 단면두께가 동일할 경우 고강성 혼합물의 피로수명이 훨씬 증대 될 것으로 예상된다. 장수명 아스팔트포장의 경우 아스팔트 층 하단의 허용 인장 변형률이 $70\mu\text{s}$ 이며 (Samuel 등, 2003) 그림 6에서와 같이 모든 하중에 대해 기준을 만족하고 있다.

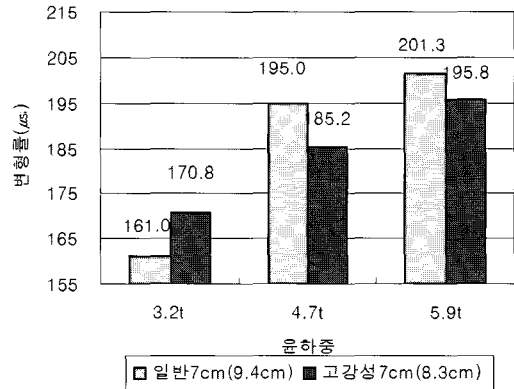


그림 5. 운하중별 변형률(얇은 단면)

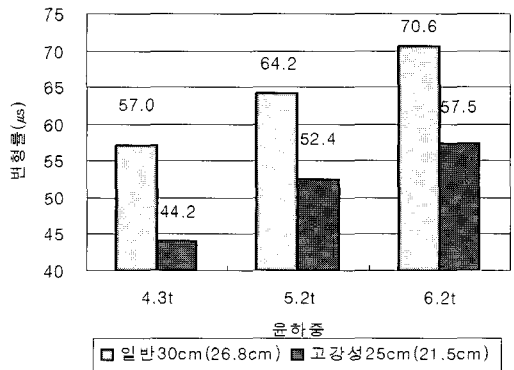


그림 6. 운하중별 변형률(두꺼운 단면)



4.3 소성변형 계측결과

일반 26.8cm와 고강성 21.5cm 단면에서 운하중 8.1ton을 적용하여 아스팔트 바인더 특성과 단면두께에 따른 소성변형 발생량을 상대 비교하였다. 여름철 최고 포장온도 조건을 모사하기 위해 기층 표면아래 5cm를 목표지점으로 50℃까지 가열하였다. 계측은 레이저 프로파일리미터(laser profilometer)를 사용하였다. 그림 7은 실내시험인 휠트랙킹의 20,000회 운영에 따른 소성변형 결과와 일반 26.8cm와 고강성 21.5cm 단면의 APT 90,000회 운영결과를 비교한 것이다. APT 운행횟수 90,000회일 경우 일반 단면이 대략 5.3mm, 고강성 단면이 3mm 정도의 변형량이 발생하였다. 휠트랙킹과 APT 시험결과를 통해 고강성 혼합물이 일반 혼합물에 비해 소성변형 저항성이 약 2배 정도 우수함을 알 수 있었다.

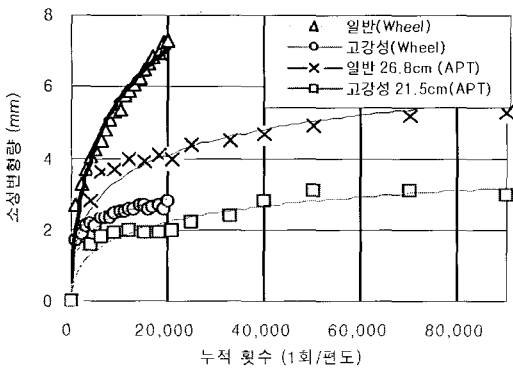


그림 7. 휠트랙킹과 APT의 소성변형량 그림

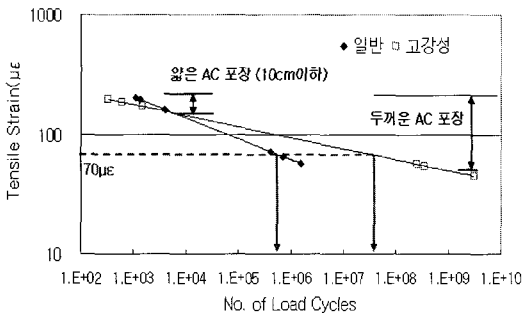


그림 8. 포장가속시험의 피로수명 예측

4.4 피로균열 계측결과

본 연구에서는 기층 혼합물의 종류에 따른 피로특성을 평가하기 위하여 두께 10cm 이하의 얇은 아스팔트 기층을 시공하였으며 피로균열을 촉진하기 위하여 1m x 1m 크기의 얇은 고무판을 아스팔트 층 하단에 매설하였다. 그러나 9.4ton의 운하중으로 180,000회 운행하였으나 고무판 매설 지점에서조차 균열은 발생하지 않았다.

따라서 기층 하부에서의 인장변형률을 사용해 식 (1)을 적용하여 피로수명을 산정하였으며 그림 8과 같이 비교하였다(건설교통부, 2003). 그 결과 포장층 두께가 얇은 단면의 경우 취성의 영향으로 고강성 아스팔트 혼합물에 비해 일반 아스팔트 혼합물의 피로수명이 상대적으로 우수하게 나타났다. 반면에 두꺼운 단면에서의 피로수명은 고강성 아스팔트 혼합물에서 반영구적으로 우수하게 나타났으며 고강성 혼합물을 사용할 경우 단면두께를 20cm 이상 적용하게 되면 피로저항성이 우수한 장수명 포장일 것으로 판단된다.

4.5 다층 탄성 해석을 통한 탄성계수 추정

각 하중 크기에 따른 인장 변형률에 해당하는 탄성계수를 결정하기 위해 기본 물성, 각층의 두께, 하중 조건 등은 포장가속시험에서의 조건과 동일하게 하였다. 보조기층의 탄성계수는 동적콘관입시험의 PI 지수를 이용하여 산정한 결과인 342MPa를 적용하였다(Louay 등, 2003). 각각의 하중 단계별로 3개의 탄성계수를 가정하여 다층탄성 해석프로그램인 Kenlayer를 사용해 아스팔트 기층 하단에 발생하는 인장 변형률을 산정한 후 각 하중크기별 실측된 인장 변형률에 해당하는 탄성계수를 역으로 추정하였다. 포장가속시험을 통해 추정된 탄성계수와 동탄성계수 시험 결과를 비교하면 그림 9와 같이 오차가 발생함을 알 수 있으며 실내시험과 포장가속시험 결과의 평균 탄성계수를 축하중 10ton에서 추정하면 일반이 4.5GPa, 고강성이 7.7GPa로 산정되었다.

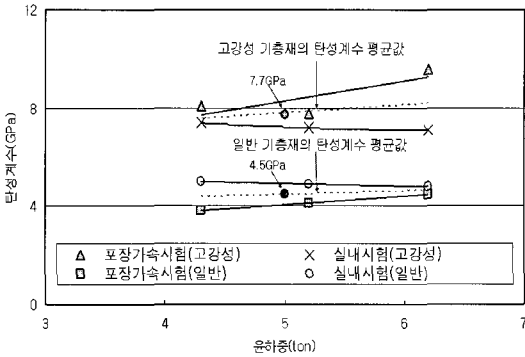
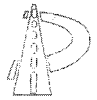


그림 9. 실내시험과 포장가속시험의 탄성계수

5. 장수명포장 설계법 개발

5.1 포장체거동모형 개발

포장체의 각층의 두께와 탄성계수를 입력변수로 하여 포장체내의 반응들을 결정하기 위해 ILLIPAVE 유한요소프로그램을 이용하여 2300여개의 데이터베이스를 구축하였다. 여기서 모든 포장재료는 선형탄성거동을 한다고 가정하였으며 10ton의 표준축하중을 모사하기 위해 복륜하중을 152.4mm 반지름의 원형접지압을 갖는 단륜하중으로 환산하여 적용하였다. 입력변수의 범위는 그림 10과 같으며

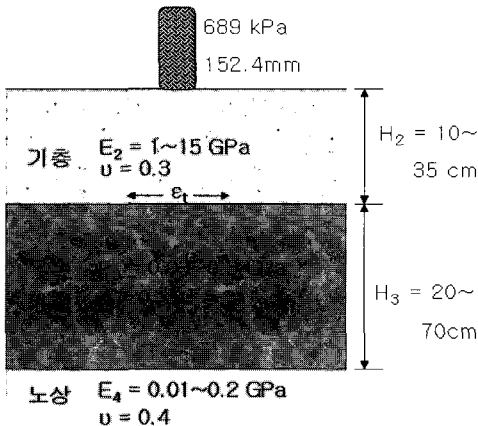


그림 10. 장수명 아스팔트 포장 단면 개요도

표층은 주기적으로 덧씌우기를 수행하기 때문에 포장의 지지력계산에서는 제외하였다.

이렇게 해석된 데이터를 이용하여 아스팔트 층 하부의 인장변형률과 노상토 상부의 압축변형률을 아스팔트 층 두께와의 관계를 정리하면 그림 11, 12와 같다. 해석결과에서 아스팔트층 하부의 인장변형률이 70 $\mu\epsilon$ 이하인 경우의 포장체는 대부분 노상토 상부의 압축변형률이 200 $\mu\epsilon$ 이하가 되는 것으로 확인되므로 인장변형률의 관계에서 장수명포장으로 간주되면 압축변형률의 기준을 만족시키는 것으로 판단된다.

앞의 결과에서 아스팔트 기층의 인장변형률이 포장의 지지력을 좌우하는 것으로 확인되므로 인장변형률과 기층의 두께, 탄성계수 관계를 그림 13, 14와 같이 정리하였다. 여기서 기층의 두께가 170mm 이하이거나 탄성계수가 3.5GPa 이하일 경우에는 90% 이상의 경우가 700 $\mu\epsilon$ 이상의 인장변형률을 나타내고

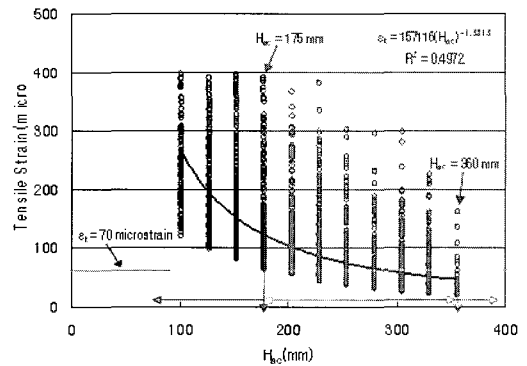


그림 11. 기층의 두께와 인장변형률

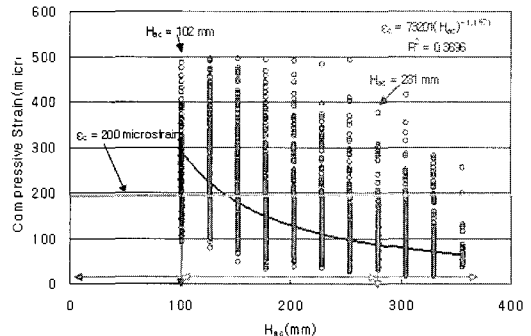


그림 12. 기층의 두께와 압축변형률

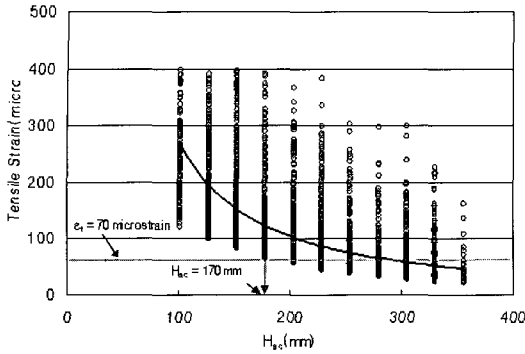
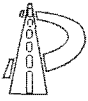


그림 13. 기층 두께의 최소기준

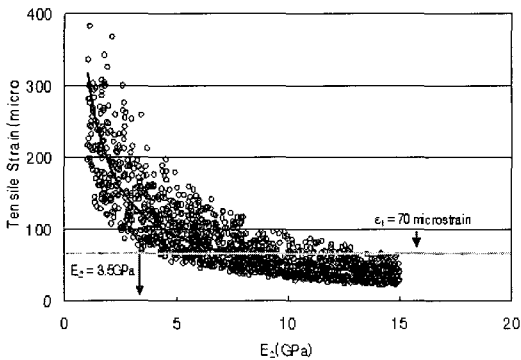


그림 14. 기층 탄성계수의 최소기준

있다. 따라서 장수명 아스팔트 포장의 최소 조건을 만족하기 위해서는 기층의 두께는 170mm 이상, 탄성계수는 3.5GPa 이상의 재료를 사용하여야 한다.

앞서 구축한 데이터베이스에서 50%의 데이터를 무작위추출(Random sampling)을 통해 식 (2), 식 (3)의 모델을 개발하였으며, 나머지 50%의 데이터를 통하여 개발된 모델에 대한 검증을 실시하였다. 본 분석을 위하여 통계 패키지인 SPSS를 사용하였으며 모델의 편의(Bais)를 줄이기 위해 모수의 추정값들은 무작위 추출을 10회 반복하여 산술평균값을 취하였다. 다중회귀분석을 통하여 도출된 모수의 추정값 및 그에 따른 t-값과 유의확률(P-value)은 인장변형률 예측 모델의 경우 표 5과 같으며 수정된 R²은 0.992, 0.962로 다중회귀분석을 통한 포장체 거동모형의 설명력이 높음을 알 수 있다.

$$\epsilon_t = 10^{9.332} H_2^{-1.682} H_3^{-0.026} E_2^{-0.788} E_3^{-0.125} E_4^{-0.027} \quad (2)$$

$$\epsilon_c = 10^{9.332} H_2^{-1.333} H_3^{-0.667} E_2^{-0.488} E_3^{0.104} E_4^{-0.487} \quad (3)$$

여기서, ϵ_t = 아스팔트층하부의 인장변형률($\mu\epsilon$)

ϵ_c = 노상토 상부의압축변형률($\mu\epsilon$)

H_2 = 기층의 두께 (mm)

H_3 = 보조기층의 두께 (mm)

E_2 = 기층의 탄성계수(MPa)

E_3 = 보조기층의 탄성계수(MPa)

E_4 = 노상층의 탄성계수(MPa)

표 5. 회귀분석 통계량(인장변형률 예측 모델)

	표준오차	표준화계수	t-값	유의확률(P-value)
상수	0.036	-	-73.878	<0.0001
H_2	0.007	0.733	196.491	<0.0001
H_3	0.007	0.016	4.216	<0.0001
E_2	0.004	0.690	185.674	<0.0001
E_3	0.004	0.135	36.472	<0.0001
E_4	0.003	0.038	10.349	<0.0001

표 5의 표준화계수는 지정된 매개변수 이외의 모든 매개변수가 변하지 않고 지정된 매개변수가 한 단위 변할 때 종속변수가 변하는 정도를 나타낸 것으로 표준화계수가 0.73으로 H_2 의 표준화계수가 0.73으로 H_3 , E_2 , E_3 , E_4 에 비해 47배 1.1배, 5.4배, 19.2배 영향력이 큰 것으로 나타났다. 또한 개발된 모델의 검증을 위해 10회 반복에서 모델개발에 사용

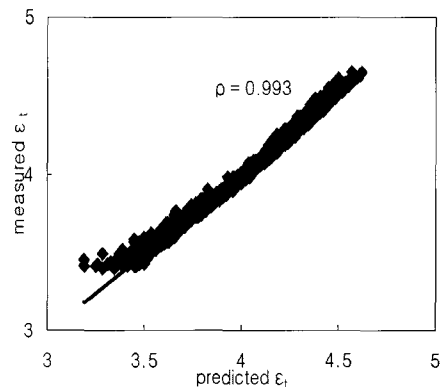


그림 15. 인장변형률 예측 모델의 검증

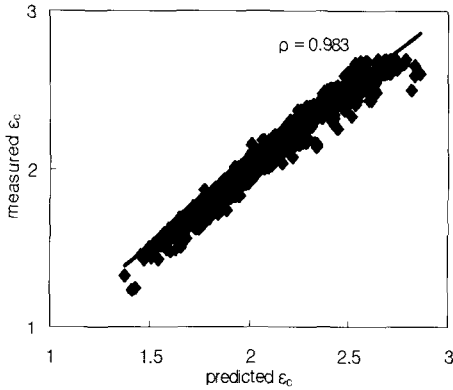
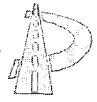


그림 16. 압축변형률 예측 모델의 검증

되지 않은 50%의 데이터를 통하여 그림 15, 그림 16과 같이 모델의 검증을 실시하였다. 그 결과 계산된 변형률과 개발된 모델로부터 도출된 예측값 사이의 상관관계수(ρ)를 통하여 예측값이 계산값과 아주 근사함을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 예측 모델을 통하여 인장변형률과 압축변형률에 영향을 미치는 인자들의 영향력을 규명하였으며, 그에 따른 변형률의 예측을 가능하게 할 수 있게 되었다.

5.2 장수명포장 설계 프로그램 개발

앞서 개발된 포장체 거동 모형을 이용하여 장수명 포장 공법의 원리에 대한 체계적인 정립과 포장설계를 일관성있게 사용하기 위해 설계프로그램을 개발하였다. Visual Studio C.net으로 프로그래밍 하였으며 프로그램 구성 및 전반적인 설계절차는 그림 17과 같다.

5.3 장수명포장 최적 단면 구성

그림 9에서 산정된 탄성계수와 다양한 기층의 두께를 설계프로그램에 적용하여 일반 아스팔트 혼합물의 피로균열 제한 기준인 70에 해당하는 두께를 결정하였다(Samuel 등, 2003). 그러나 고강성 혼합물의 피로균열 제한기준은 피로시험을 통해 실측하여야 하나 많은 시간이 소요되므로 포장가속시험과 실내시험 결과를 통해 80의 기준을 가정하여 적용하였다. 해석결과, 그림 18과 같이 기층의 두께는 일반 아스팔트 기층재의 경우 28cm, 고강성 아스팔트 기

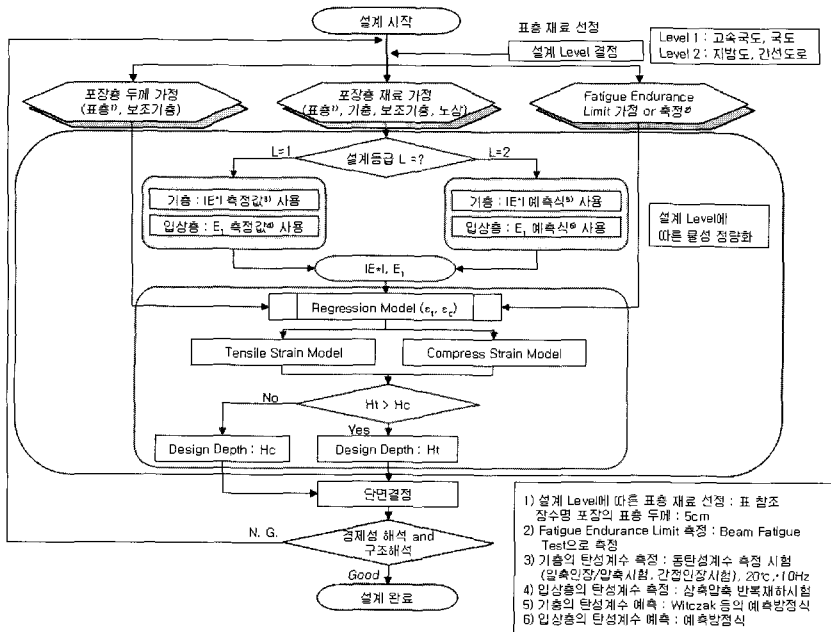


그림 17. 장수명 아스팔트 포장의 설계 순서도

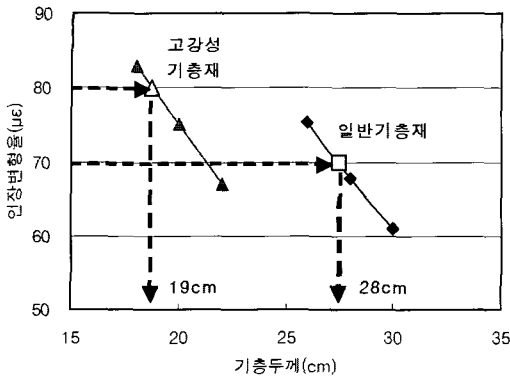


그림 18. 기층두께 산정

층재의 경우 19cm로 고강성 기층재를 사용하는 경우 9cm의 절감효과가 있는 것으로 확인되었다.

표층은 두께가 증가할수록 소성변형률의 발생 주요 인자인 전단응력이 감소하게 되며 피로균열의 발생 인자인 인장변형률이 감소하게 된다. 또한, 장수명 포장은 Top-down 균열이 포장의 주요 손상요인 중의 하나로 장수명 포장의 선진국인 영국에서는 포장의 공용기간 동안 Top-down 균열이 표층에서 하부로 10cm 까지 진전되는 것으로 확인되었다(Nunn 등, 1997). 따라서 장수명 포장에서 발생 가능한 파손 유형에 대해 위와 같이 고려한 결과 표층의 두께를 10cm로 설정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 따라서 앞서 결정된 기층의 두께에서 10cm의 표층을 고려하면 일반 아스팔트 기층재를 적용한 장수명 포장의 총 두께는 38cm, 고강성 아스팔트 기층재를 적용한 장수명 포장의 총 두께는 29cm가 된다.

영국의 장수명 포장은 재료에 따라 아스팔트 층의 두께는 상이하지만 교통량이 80msa 이상일 때는 더 이상 아스팔트층의 두께를 증가시킬 필요가 없는 것으로 간주한다. 이것은 다양한 포장체에 대한 구조해석 결과와 재료의 양생효과, Top-down 균열의 발생 등을 고려하여 결정한 것으로 본 연구에서도 이러한 개념을 고려하였다. 따라서 영국의 장수명 포장 설계도표를 참고하여 국내 장수명 포장의 교통량에 따른 단면두께를 도표화하면 그림 19와 같다. 여기서 DBM은 영국의 일반기층재를 HMB는 영국의 고강

성 기층재를 의미한다. 일반기층재를 사용한 경우에는 영국의 DBM50과 HDM 사이에 위치하게 되며 고강성 기층재를 사용한 경우에는 HMB15와 HMB25사이에 위치하게 되어 본 연구에서 개발한 설계도표의 타당성을 확인할 수 있다.

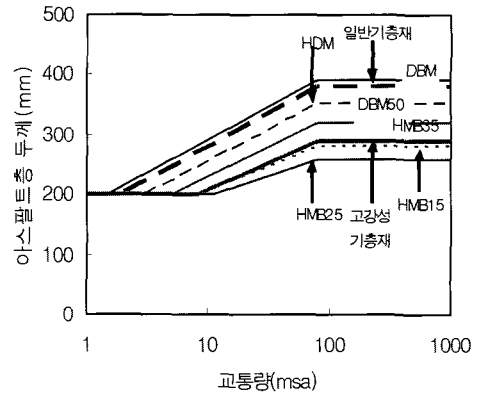


그림 19. 장수명 아스팔트 설계 단면 비교

6. 현장시험시공 및 경제성 분석

6.1 현장시험시공

장수명 아스팔트 포장 공법의 현장 공용성 검증을 위해 2005년 11월에 충청남도 덕산-예산간 도로포장 구간에 현장시험시공을 실시하였으며 고강성 혼합물과 일반 혼합물을 기층에 그림 20과 같이 시공하였다. 노상과 보조기층의 시공 후 다짐상태와 물성을 측정하기 위해 평판재하시험, 현장 CBR 시험, 콘관입시험, FWD 측정을 실시하여 하부구조의 상태를 확인하였다. 또한 기층의 시공에 앞서 아스팔트 포장체의 응력, 변형률, 처짐 등의 측정을 통한 포장체의 거동 확인을 위해 변형률계를 매설하였다. 기층은 고강성 바인더와 일반 바인더를 생산하여 현장배합을 통해 혼합물을 생산하였다. 포설 및 다짐은 일반 도로포장의 일련의 과정을 통해 이루어졌으며 수시로 혼합물의 온도를 계측하여 시공성과 품질관리를 실시하였다. 현재 시험시공구간은 중간층까지 시

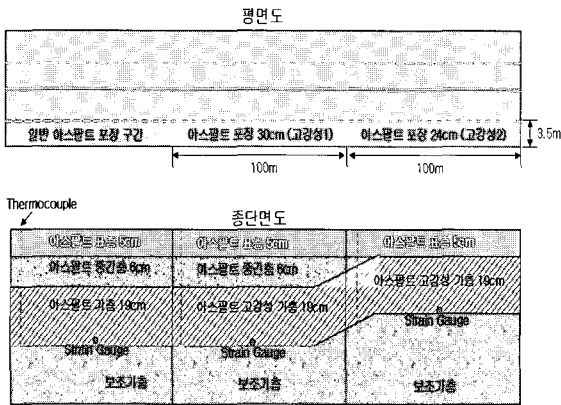


그림 20. 시험시공 계획 단면

공이 완료된 상태이며 표층은 이후에 진행될 예정이다. 장수명 아스팔트 포장과 일반 아스팔트 포장의 인장변형률은 시공이 완료되면 실제 트럭하중을 이용하여 측정할 것이며 온도계는 매설위치에 코어링을 하여 설치한 후 온도를 측정할 계획이다.

6.2 생애주기비용분석

본 연구에서 결정된 장수명 포장의 두께를 토대로 일반 장수명포장과 고강성 장수명포장의 초기시공비를 비교하여 경제적인 장수명 포장을 선택하고자 한다. 초기 시공비의 분석 결과 고강성 기층재를 적용한 장수명 포장이 일반 기층재를 적용한 장수명 포장보다 13억원 (5%) 감소하는 것으로 나타나 초기시공비 측면에서 경제적인 것으로 확인되었다. 따라서, 고강성 기층재를 적용한 장수명 포장을 기존 포장 단면과 생애주기비용 분석을 실시하였다.

분석대상은 총연장 30km의 왕복 4차로의 일반국

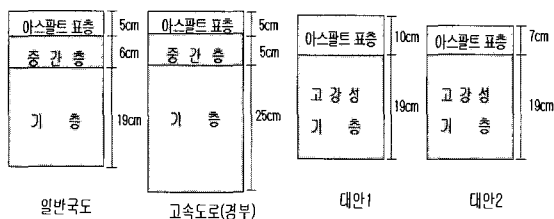


그림 21. 일반 및 장수명 포장의 단면

도로 가정하였으며 연평균 일교통량은 22,000대로 설정하였다. 포장 단면은 그림 21과 같이 일반 포장의 경우 일반국도와 고속도로(경부) 단면을 적용하였으며 대안으로는 표층 10cm, 7cm의 장수명 포장을 분석하였다. 일반국도 및 고속도로의 보수주기는 그림 22와 같이 현재 국내에서 시행되고 있는 보수주기를 적용하였으며, 장수명 포장의 보수주기는 국내의 시공실적이 전무하여 영국과 미국의 보수주기에 근거한 9년으로 설정하였다.

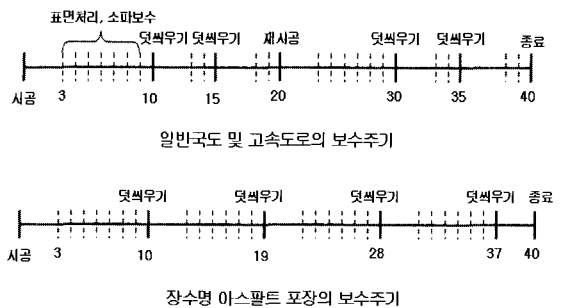


그림 22. 일반 포장과 장수명 포장의 보수주기

장수명 포장을 일반국도와 비교한 결과 표 6과 같이 장수명 포장이 대안 1에서 19%(102억원), 대안 2에서 24%(135억원)의 절감효과가 나타났다. 초기시공비의 경우 장수명 포장이 일반 포장보다 11~28% 높았지만 유지보수비 및 사용자비용 등에서 80% 이상의 감소효과를 나타내었다. 또한, 장수명 포장의 생애주기비용 분석 결과 고속도로와 비교시 대안 1에서 29%(131억원), 대안 2에서 39%(164억원)의 절감효과를 확인할 수 있었다. 특히, 초기시공비의

표 6. 생애주기비용 분석 결과(억원)

구분	일반국도	고속도로	장수명포장	
			대안1 (표층10cm)	대안2 (표층7cm)
초기시공비	211	241	269	236
유지보수비	237	234	118	119
사용자비용	95	95	56	56
해체폐기비	14	16	12	11
합계	557	586	455	422



경우 대안 1에서 고속도로 보다 12% 높았지만 대안 2의 경우 장수명 포장이 고속도로 보다 2% 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

따라서, 생애주기비용 분석 결과 장수명 포장이 일반국도와 고속도로에 비해 경제적 측면에서 경쟁력이 있는 것으로 확인되었으며 고속도로의 경우에는 초기시공비를 동일하게 할 수 있어 장수명 포장의 실용화를 앞당길 것으로 사료된다.

7. 결론

본 연구에서는 장수명 아스팔트 포장 공법을 개발하기 위하여 다양한 실내시험과 구조해석, 회귀분석, 경제성 분석 등을 실시하였으며 연구결과를 간략히 요약하면 다음과 같다.

- 침입도 30 이하의 고강성 아스팔트 바인더를 개발하여 물리 역학적 시험을 수행한 결과 일반 아스팔트에 비해 강성이 증가되고 저온에서의 물성은 유사하게 유지되는 것으로 나타났다.
- 고강성 및 일반 아스팔트 혼합물에 대해 실내 공용성 시험을 수행한 결과 고강성 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물에 비해 동탄성계수는 약 50% 이상 증대되었으며 수분손상에 대한 저항성이 10%가량 증가된 효과를 볼 수 있었다. 휠트래킹 시험에서는 소성변형 저항성이 2배 이상 우수한 것으로 나타났다으며 피로시험에서도 피로저항성이 5~10배 정도 증가하는 것으로 나타났다.
- 포장가속시험 결과 하중을 180,000회까지 운행하였지만 피로균열은 발생하지 않았으며 소성변형 발생량은 일반 단면이 고강성 단면에 비해 약 2배 정도 발생해 고강성 혼합물의 소성변형 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 인장변형률의 계측에서는 고강성 혼합물이 인장변형률에서 10~12 μ s 정도 낮아 고강성 혼합물의 강성이 일반 혼합물에 비해 상대적으로 우수하다는 것을 확인하였다.
- 장수명포장 설계법 개발을 위해 유한요소해석을

통해 데이터베이스를 구축하였으며 분석을 통해 인장변형률이 포장체의 지지력을 좌우하며 장수명 포장을 위한 기층의 최소기준은 탄성계수가 3.5GPa, 두께가 17cm으로 확인되었다. 2300여 개의 데이터를 다중회귀분석을 실시하여 포장체 거동모형을 개발하였고 이를 이용하여 장수명포장의 설계프로그램을 개발하였으며 최적단면은 일반 기층을 적용할 경우 38cm, 고강성 기층을 적용할 경우 29cm로 확인되었다.

- 현장공용성 검토를 위해 충남 덕산-예산간 도로현장에 직접 시험시공을 실시하였으며 이를 바탕으로 경제성 분석을 실시한 결과 기존 포장에 비해 생애주기비용측면에서 경제적으로 확인되었으며 특히 고속도로와 초기시공비가 거의 유사하여 장수명포장이 경쟁력이 있는 공법임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 장수명·친환경 도로포장 재료 및 설계 시공기술 개발 사업지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(2003) "아스팔트 포장 설계법 개발", 1차년도 최종보고서, 건설교통부.
2. ASTM D4867, "Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures".
3. Corte, J. F., (2001) "Development and Uses of Hard Grade Asphalt and High Modulus Asphalt Mixes in France," LCPC, draft paper prepared for TRB annual meeting.
4. KS F 2374, "역청 포장 혼합물의 휠 트래킹 시험 방법".
5. Louay N. Mohammad, Murad Y. Abu-Farsakh, Zhong Wu, and Chris Abadie.(2003) Louisiana "Experience with Foamed Recycled Asphalt Pavement Base Materials." *Transportation*



.....

Research Board.

6. NCHRP 1-37A Draft Test Method A1, "Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Concrete Mixtures and Master curves".
7. Nunn, M., A. Brown, D. Weston, and J. C. Nicholls (1997) "Design of Long-Life Flexible Pavements for Heavy Traffic" TRL Report 250, Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K.

8. Samuel H. Carpenter, Khalid. Ghuzlan, and Shihui Shen. (2003) "Fatigue Endurance Limite for Highway and Airport Pavements." *Transprot Research Board.*

접 수 일 : 2006. 4. 27
심 사 일 : 2006. 5. 10
심사완료일 : 2006. 9. 6