

고탄성 장수명 아스팔트 포장 공법 실용화 연구

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

이정훈* · 이현종**

Lee, Jung Hun · Lee, Hyun Jong

1. 서론

경제성장의 가속화로 교통량은 급속히 증가하였고 차량의 유휴중이나 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 그림 1과 같이 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. 따라서 본 연구에서는 고탄성 장수명 포장 공법의 현장 적용성 평가 및 실내시험 결과와의 비교분석, 경제성 분석 등을 실시하고 장수명 포장의 설계 및 시공 지침을 개발하여 실용화 기술을 개발한다.

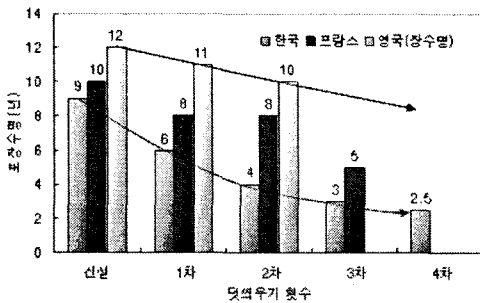


그림 1. 덧씌우기 보수주기 비교

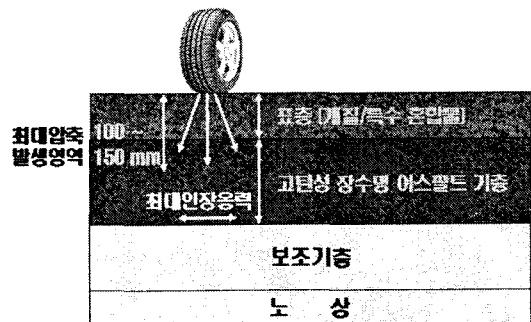


그림 2. 고탄성 장수명 포장의 설계 개념

2. 장수명 아스팔트 포장 공법 개요

장수명 아스팔트 포장은 설계연한 동안 주기적으로 표층만 재시공하고 재건설이나 대대적인 보수 없이 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 그림 2와 같이 아스팔트 기층의 강성과 두께를 증가시켜 피로 균열과 노상의 처짐을 근본적으로 방지하여 설계수명을 증대시키는 한편 표층은 소성변형에 대한 강한 저항

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

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

성과 내구성을 확보하기 위해 개질 혹은 특수 혼합물을 적용한다. 장수명 포장의 피로저항을 향상시키는 기본 개념은 그림 3에서 보는바와 같이 아스팔트 기층 두께나 강성을 증가시켜 아스팔트층의 하단에 발생하는 인장변형률을 감소시킨다. 본 연구에서는 경제성을 고려하여 고탄성 기층재를 적용한 장수명 포장 공법을 개발하고자 한다.

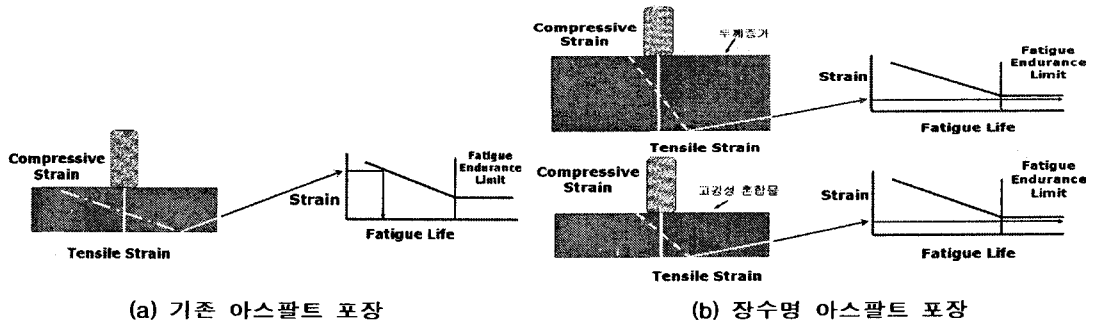


그림 3. 장수명 포장의 피로저항 개념

3. 고탄성 아스팔트 혼합물 개발 및 실내공용성 시험

본 연구에서는 고비점 유분(high boiling point petroleum)을 사용하여 바인더의 침입도를 감소시키는 방법을 통해 바인더를 생산하여 다양한 물성시험을 수행하였으며 프랑스의 고탄성 바인더 물성과 함께 표 1에 정리하였다(Corte, 2001). 시험결과 고탄성 바인더의 침입도는 28인 것으로 나타났으며 복소전단계수 G^* (complex modulus)가 일반 아스팔트 바인더(PG64-22)와 PMA에 비해 3배정도 높은 것으로 평가되었다. 저온에서의 균열발생 온도를 조사하는 시험법인 프라스 취하점은 침입도가 70인 일반 아스팔트 바인더가 -11°C 인 반면 고탄성 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 고탄성 아스팔트 바인더의 물성비교

	일반AP (AC60~80)	PMA	고탄성	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

본 연구에서는 골재 입도를 국내 기층용 입도인 BB-3 입도를 적용하였으며 아스팔트 혼합물의 강성을 평가하기 위하여 일반 아스팔트 바인더(PG64-22)와 고탄성 바인더를 사용하였다. 최적 바인더 함량은 일반 혼합물 4.5%, 고탄성 혼합물 4.7%으로 확인되어 혼합물을 제작하였으며 각 혼합물의 실내시험 결과를 정리하면 표 2와 같다.

고탄성 아스팔트 혼합물의 동탄성계수는 일반 아스팔트 혼합물에 비해 5 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 10~15%, 15 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 20~25%, 30 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 거의 2배 가까이 동탄성계수가 증가하였다. 이것은 고탄성 아스팔트 혼합물의 폴리머 성질에 의해서 저온에서의 온도 감온성은 거의 차이가 없고 고온에서의 온도 감온성이 고탄성 아스팔트 바



인더가 우수하기 때문인 것으로 사료된다. 수분 민감성은 일반 아스팔트 혼합물(88.5%)보다 고탄성 아스팔트 혼합물(98.3%)을 사용하였을 경우 TSR이 약 10% 증가하는 효과를 볼 수 있었다. 이는 고탄성 아스팔트 바 인더에 첨가된 액상 박리 저감제의 효과에 기인한 것으로 사료된다. 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 측정하기 위해 휠트래킹 시험을 실시하였으며 그 결과 일반 혼합물의 경우 반복 윤하중이 20,000회 통과하였을 때 8mm정도의 러팅(rutting) 깊이가 발생하였으며, 고탄성 아스팔트 혼합물의 경우는 윤하중이 5,000회 이상 부터는 약 2~3mm정도로 거의 변화가 없었다. 간접인장방식에 의해 수행된 피로시험 결과 고탄성 아스팔트 혼합물의 피로수명이 일반 아스팔트 혼합물의 피로수명보다 상대적으로 우수한 것으로 나타났으며 피로균열에 대한 저항성이 5~10배정도 우수한 것으로 나타났다.

표 2. 실내 공용성 시험 결과

	일반 혼합물	고탄성 혼합물
강성(동탄성계수 시험)	1	50% 이상 증가
수분손상 저항성	1	10~15% 증가
소성변형 저항성	1	2~3배 증가
피로수명	1	5~10배 증가

4. 포장가속시험

피로균열과 소성변형량을 비교하기위한 시험단면을 그림 4와 같이 구성하였으며 아스팔트 층의 두께 및 강성변화에 따른 인장 변형률을 측정하기 위해서 기층 시공과정 중에 아스팔트용 변형률계를 매설하였다.

일반 및 고탄성 혼합물 적용 단면의 구조적 지지력을 평가하기 위하여 다양한 하중하에서 아스팔트 층의 하단에 발생하는 인장 변형률을 계측하였으며 두꺼운 포장 단면에 대한 계측결과는 그림 5와 같다. 고탄성 혼합물이 일반 혼합물에 비해 단면두께는 얇지만 동일 하중에 대해 기층하부에 발생하는 인장변형률이 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 일반 및 고탄성 혼합물의 단면두께가 동일할 경우 고탄성 혼합물의 피로수명이 훨씬 증대 될 것으로 예상된다.

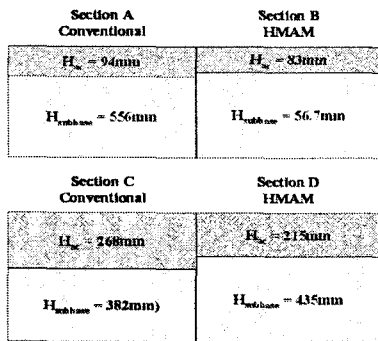


그림 4. 시험 단면 구성

LANE 1 (Fatigue Cracking)

LANE 2 (Rutting)

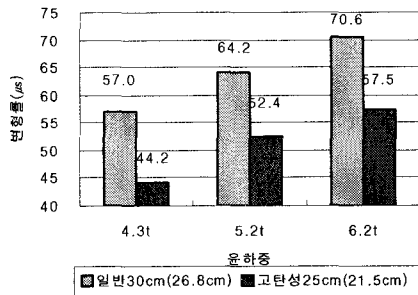


그림 5. 윤하중별 변형률(두꺼운 단면)

일반 26.8cm와 고탄성 21.5cm 단면에서 윤하중 8.1ton을 적용하여 소성변형 발생량을 상대 비교하였다. 여름철 최고 포장온도 조건을 모사하기위해 기층 표면아래 5cm를 목표지점으로 50℃까지 가열하였으며 레이저 프로필리미터를 사용하여 계측하였다. 그림 6은 실내 휠트래킹 시험 결과와 포장가속시험의 90,000회 운영결과를 비교한 것으로 포장가속시험의 경우 일반 단면이 대략 5.3mm, 고탄성 단면이 3mm 정도의 변형량이 발생하였다. 휠트래킹과 APT 시험결과를 통해 고탄성 혼합물이 일반 혼합물에 비해 소성변형 저항성이 약 2배 정도 우수함을 알 수 있었다.

포장가속시험으로 피로특성을 평가하기 위하여 9.4ton의 율하중을 180,000회 율행하였으나 균열은 발생하지 않았다. 따라서 기층 하부에서의 인장변형률을 사용해 피로수명을 산정하였으며 그림 7과 같이 비교하였다(건설교통부, 2004). 그 결과 포장층 두께가 얇은 단면의 경우 취성의 영향으로 고탄성 아스팔트 혼합물에 비해 일반 아스팔트 혼합물의 피로수명이 상대적으로 우수하게 나타났다. 반면에 두꺼운 단면에서의 피로수명은 고탄성 아스팔트 혼합물에서 반영구적으로 우수하게 나타났으며 고탄성 혼합물을 사용할 경우 단면두께를 20cm이상 적용하게 되면 피로저항성이 우수한 장수명 포장이 될 수 있을 것으로 판단된다.

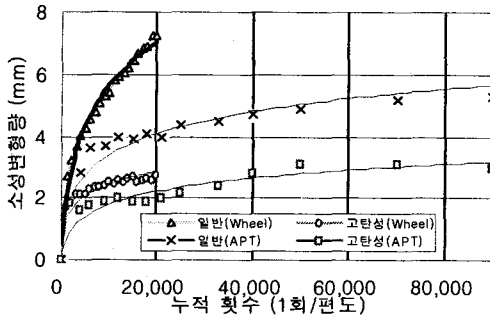


그림 6. 휠트래킹과 APT의 소성변형량

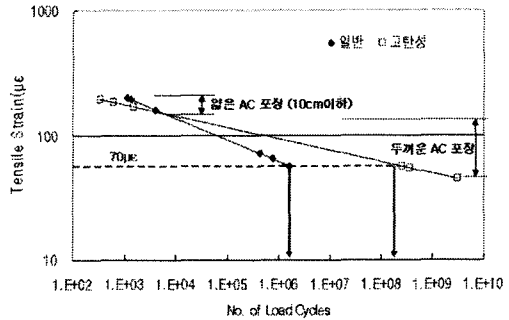


그림 7. 포장가속시험의 피로수명 예측

5. 현장 공용성 평가

고탄성 장수명 아스팔트 포장의 현장 시공은 2005년 11월에 충청남도 덕산-예산간 도로포장 구간에 그림 8과 같이 실시하였으며 2006년 5월에 경부고속도로 영동-김천간 확장공사(황간 요금소) 구간에 고탄성 아스팔트 혼합물과 일반 아스팔트 혼합물을 그림 9와 같이 시공하였다. 또한, 현장 포설에 앞서 기층하부의 인장 변형률을 계측하기 위한 변형률계를 그림 10과 같이 설치하였다.

현장시험시공을 통한 공용성 평가를 위하여 영동-김천 구간에서 추적조사를 실시하였다. 정하중과 동하중을 적용하여 변형률을 측정하였으며 동적 데이터 로거(dynamic data logger)를 이용하여 계측 값을 수집하였다. 계측하고자 하는 타이어를 하중판에 위치하게 하고 인접한 타이어들은 하중판과 동일한 높이의 고무판에 위치하게 하여 율하중 측정의 정밀도를 높였다. 율하중을 계측한 결과 4620kg으로 확인되었다. 또한, 포장의 두께를 확인하기 위해 그림 12와 같이 코어작업을 실시한 결과 고탄성 기층은 당초 19cm로 계획되었으나 18cm로 포설되었음을 확인하였고 일반 아스팔트 기층은 26cm로 계획되었으나 32cm로 시공되었음을 확인할 수 있었다.

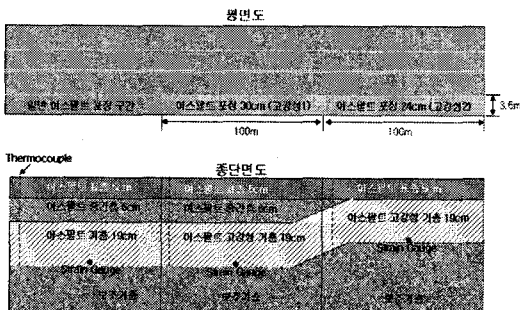


그림 8. 시험시공 계획 단면(덕산-예산)

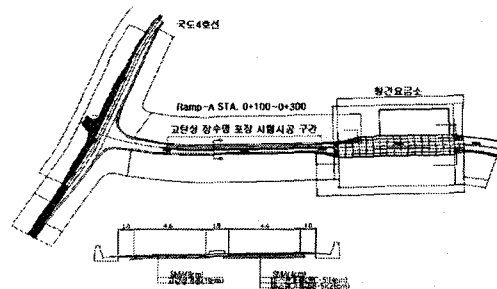


그림 9. 시험시공 계획 단면(영동-김천)

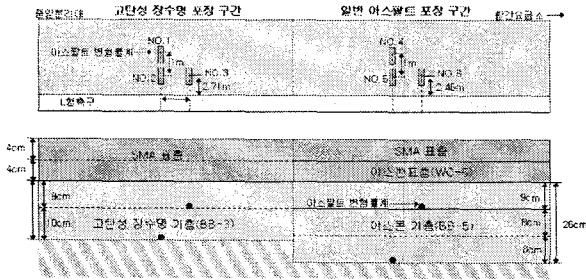


그림 10. 계측기 매설 위치

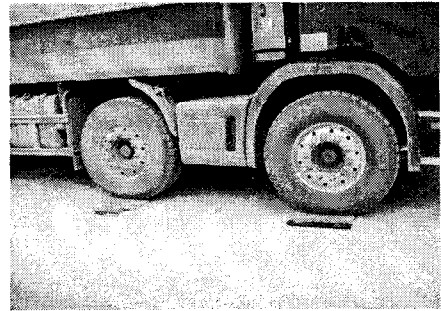


그림 11. 차량의 운하중 계측

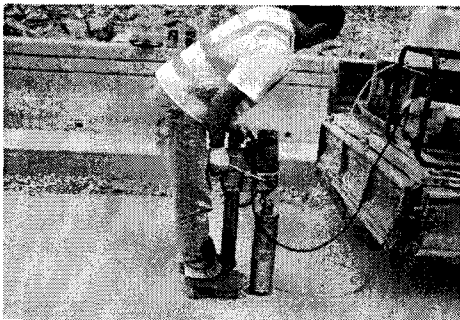


그림 12. 코어 작업

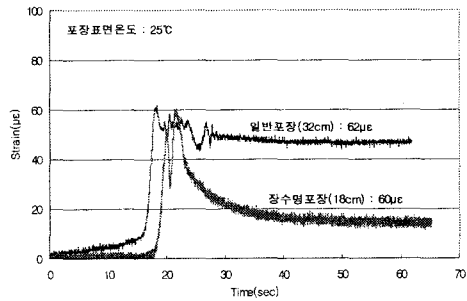


그림 13. 변형률 계측 결과(정하중)

그림 13은 정하중을 적용하였을 경우 포장의 기층하단에서 발생하는 변형률을 비교한 결과로 각각의 포장에서 인장변형률 제한기준인 $70\mu\epsilon$ 이하로 변형률이 발생하였다. 고탄성 장수명 포장은 일반 아스팔트 포장에 비해 두께가 14cm 가량 얇지만 인장 변형률은 동일하거나 더 작게 측정되어 두 혼합물의 피로특성이 유사할 경우 동일한 단면두께의 포장에서 고탄성 혼합물의 피로수명이 훨씬 증대 될 것으로 예상된다. 또한, 이 결과로 고탄성 장수명 포장의 기층 두께(19cm)가 추가적으로 감소할 수 있는 것으로 판단된다.

6. 고탄성 혼합물 포장공사 지침서 개발

앞서 수행된 장수명 포장의 시험시공 결과를 바탕으로 장수명 포장의 설계, 시공, 품질 지침을 작성하였다. 본 연구에서 작성한 지침서는 새롭게 개발된 고탄성 바인더와 혼합물의 품질관리, 장수명 포장의 시공 관리에 관한 내용을 SBS개질 아스팔트 지침서를 기초로 작성하였으며 중요 부분을 요약하면 다음과 같다.

고탄성 아스팔트 바인더는 폴리머 개질 아스팔트 바인더에 침입도 저감제를 혼합하여 생산하게 되며 표 3에 나타난 바인더 품질 기준을 충족하여야 한다. 시험 항목 중 침입도 시험은 시험자의 조작에 따라 그 결과가 상이하여 기준을 10~40dmm으로 다소 크게 설정하였다. 그러나 본 연구에서는 침입도가 28dmm의 바인더를 사용하였으며 재료의 공용성 측면에서 침입도의 영역을 20~30dmm으로 권고한다. 또한, 고탄성 아스팔트 바인더의 품질 규격에서는 기존 아스팔트 바인더와의 차별된 성능을 나타내는 15°C의 G^* 를 표 3과 같이 포함시켰으며 그 기준을 20MPa로 설정하였다.

고탄성 아스팔트 혼합물에 대한 배합설계는 마샬설계법 및 슈퍼패브 설계법 중에서 택일하여 설계 가능하며, 국내 여건상 마샬설계법을 사용하는 것을 원칙으로 한다. 배합설계는 사용재료 선정, 골재합성입도 결정, 마샬공시체용 골재배합, 마샬공시체 제작 및 물성측정, 최종 배합비 결정의 순서로 진행한다. 이러한 일련의 과정을 거쳐 생산되는 고탄성 아스팔트 혼합물은 표 4의 품질 기준을 만족하여야 하며 만약 불합격일 경우 골재합성입도를 변경하여 상기 실험을 반복하여야 한다.



표 3. 고탄성 아스팔트 바인더 품질 규격

시험 항목 및 방법	기준
침입도, 25℃(dmm)	KS M 2252 10~40
연화점(℃)	KS M 2250 60 이상
용해도(%)	ASTM D 2042 98 이상
점도, 60℃(Pa·s)	KS F 2392 1,000 이상
인화점(℃)	KS M 2010 260 이상
저장안정성, 48hr, 163(℃)	ASTM D 5976 2.0 이하
탄성회복율, 25℃(%)	ASTM D 6084 70 이상
G*, 15℃(Mpa)	AASHTO TP5 20 이상

표 4. 고탄성 아스팔트 혼합물의 품질 기준

시험 항목 및 방법	품질 기준
입도	KS A 0507 BB-3 (25mm 밀입도)
공극률(%)	KS F 2364, 2366, 2446 3~5
포화도(%)	65~75
아스팔트 함량(%)	4.0 이상
골재간극률(%)	12 이상
동탄성계수 20℃	KS F 2485, 2486 7600 이상
10Hz(MPa) 50℃	KS F 2485, 2486 600 이상
간접인장강도비(%)	ASTM D4867-92 80 이상

공극률은 3~5%의 중앙값인 4%를 기준으로 하며 여기에 해당하는 최적 아스팔트 함량을 산정하되 최소 4%이상의 바인더 함량을 적용하여야 한다. 이것은 공극률을 최소화하여 기층에 침투하는 수분을 억제하고 노화를 방지하여 포장체의 내구성을 40년 이상 확보하기 위함이다.

또한, 기층재의 동탄성계수와 간접인장강도비를 품질기준에 포함시켜 고탄성 기층재의 필수 요소인 강성의 확보 여부와 40년 이상의 공용기간 동안 견게 되는 수분손상에 대한 저항성을 확인하게 하였다. 동탄성계수는 본 연구에서 수행된 실내시험 결과를 바탕으로 시험결과 90%에 해당하는 결과를 평균으로 적용하였으며 연평균기온(20℃)과 하절기 포장체온도(50℃)에서 성능을 평가하도록 설정하였다.

고강성 기층재의 시공기준은 기존의 개질 아스팔트 시공과 유사한 형태로 이루어지며 중요부분을 정리하면 다음과 같다. 고강성 아스팔트 혼합물은 포설되는 즉시 소정의 밀도가 얻어지도록 충분히 다져야 하며 다짐장비의 조합, 회수 및 중량은 다음 표 5와 같으나 현장 상황에 따라 변경할 수 있으며, 시험포장을 통하여 적절히 조정하여야 한다.

표 5. 다짐작업 순서 및 내역

다짐 구분	다짐 장비	중 량	다짐 횟수	다짐 속도
1차 다짐	머캐덤(철륵)	12톤 이상	4회 이상	2~3km/h
2차 다짐	타이어	15톤 이상	10회 이상	6~10km/h
3차 다짐	텐덤(철륵)	8톤 이상	4회 이상	2~3km/h

7. 경제성 분석

본 연구에서는 고탄성 장수명 포장과 기존에 시공된 일반국도, 고속도로의 초기시공비용을 비교하여 경제적인 타당성을 확인하고 적용 가능성을 검토하였다. 포장 단면은 그림 14와 같이 일반 포장의 경우 일반국도와 고속도로(경부) 단면을 적용하였으며 대안으로는 표층 5cm의 고탄성 장수명 포장과 표층 4cm, 중간층 4cm의 고탄성 장수명 포장을 분석하였다. 고탄성 장수명 포장의 표층은 특수 혼합물을 적용할 경우 일반아스팔트 혼합물에 비해 공용성이 우수하여 설정하였다.

고탄성 장수명 포장을 일반국도와 비교한 결과 표 6과 같이 고탄성 장수명 포장1의 초기시공비용이 일반국도의 초기시공비용과 유사하게 나타났다. 또한, 고탄성 장수명 포장2의 초기시공비용은 고속도로의 초기시공비용 보다 다소 큰 것으로 나타났으나 앞선 시험시공추적조사에서 확인할 수 있듯이 기층의 두께가 추가적으로 감소할 수 있기 때문에 초기시공비 측면에서 경쟁력이 있는 포장으로 판단된다.



그림 14. 일반포장과 장수명포장의 단면

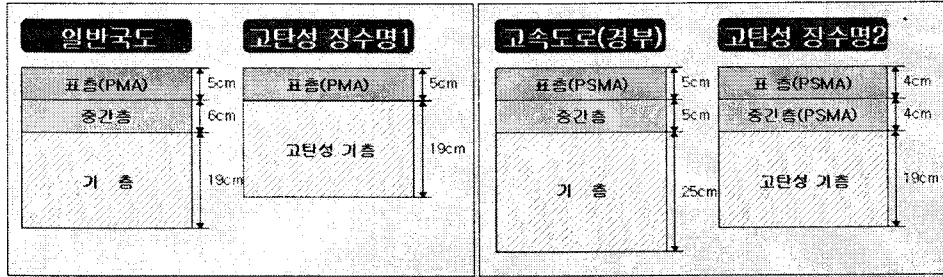


표 6. 초기시공비용 분석 결과(단위 : 억원)

	일반국도	고탄성장수명1	고속도로	고탄성장수명2
초기시공비(억원)	195	196	241	248

본 연구에서 결정된 장수명 포장의 두께를 토대로 고강성 기층재를 적용한 장수명 포장을 기존 포장 단면과 생애주기비용 분석을 실시하였다. 분석대상은 총연장 30km의 왕복 4차로의 일반국도로 가정하였으며 연평균 일교통량은 22,000대로 설정하였다. 포장 단면은 그림 15와 같이 일반 포장의 경우 일반국도와 고속도로(경부) 단면을 적용하였으며 대안으로는 표층 10cm, 7cm의 장수명 포장을 분석하였다. 일반국도 및 고속도로의 보수주기는 그림 16과 같이 현재 국내에서 시행되고 있는 보수주기를 적용하였으며, 장수명 포장의 보수주기는 국내의 시공실적이 전무하여 영국과 미국의 보수주기에 근거한 9년으로 설정하였다.

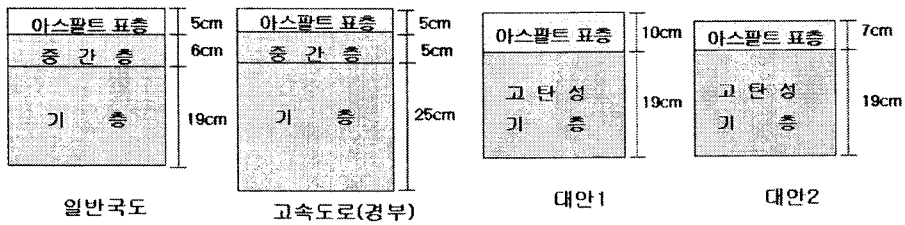


그림 15. 일반 및 장수명 포장의 단면

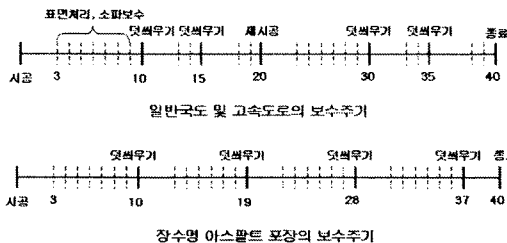


그림 16. 포장의 보수주기

표 7. 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

장수명 포장을 일반국도와 비교한 결과 표 7과 같이 장수명 포장이 대안 1에서 19%(102억원), 대안 2에서 24%(135억원)의 절감효과가 나타났다. 또한, 장수명 포장의 생애주기비용 분석 결과 고속도로와 비교시



대안 1에서 29%(131억원), 대안 2에서 39%(164억원)의 절감효과를 확인할 수 있었다.

따라서, 생애주기비용 분석 결과 장수명 포장에 일반국도와 고속도로에 비해 경제적 측면에서 경쟁력이 있는 것으로 확인되었으며 교통량이 일정 수준 이상이 되는 일반국도와 고속도로에 적합한 고탄성 장수명 포장 공법은 초기시공비를 기존의 포장과 동일하게 할 수 있어 공법의 실용화를 앞당길 것으로 사료된다.

8. 결론

본 연구에서는 장수명 아스팔트 포장 공법을 개발하기 위하여 다양한 공용성 평가, 현장시험시공, 추적조사, 경제성 분석 등을 실시하였으며 연구결과를 간략히 요약하면 다음과 같다.

침입도 30 이하의 고탄성 아스팔트 바인더를 개발하여 혼합물을 생산하여 실내 공용성 시험을 수행한 결과 고탄성 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 나타났으며 피로시험에서도 피로저항성이 5~10배 정도 증가하는 것으로 나타났다.

포장가속시험 결과 하중을 180,000회까지 운행하였지만 피로균열은 발생하지 않았으며 소성변형 발생량은 일반 단면이 고탄성 단면에 비해 약 2배 정도 발생해 고탄성 혼합물의 소성변형 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 인장변형률의 계측에서는 고탄성 혼합물이 인장변형률에서 10~12 μ s 정도 낮아 고탄성 혼합물의 강성이 일반 혼합물에 비해 상대적으로 우수하다는 것을 확인하였다.

현장공용성 검토를 위해 덕산-예산 구간과 영동-김천 구간에 시험시공을 실시하였으며 계측기를 매설하여 시공후 현장공용성 평가를 수행하였다. 그 결과 고탄성 장수명 포장의 피로저항성을 확인하였으며 추가적인 기층의 두께 감소가 가능한 것으로 확인되었다. 또한, 시험시공결과를 바탕으로 바인더의 품질기준, 혼합물의 품질기준, 시공기준 등을 정립하였다.

현장시험시공을 바탕으로 경제성 분석을 실시한 결과 기존 포장의 초기시공비와 유사하였으며 생애주기비용 분석에서 고탄성 장수명 포장이 일반포장에 비해 경제적인 것으로 나타나 고탄성 장수명 포장이 경쟁력이 있는 공법임을 확인하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 건설교통부, 아스팔트 포장 설계법 개발, 2004.
2. ASTM D4867, Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures.
3. Corte, J. F., "Development and Uses of Hard Grade Asphalt and High Modulus Asphalt Mixes in France, 2001.
4. KS F 2374, 역청 포장 혼합물의 휠 트래킹 시험 방법.
5. Nunn, M., A. Brown, D. Weston, and J. C. Nicholls, Design of Long-Life Flexible Pavements for Heavy Traffic, 1997.
6. Transportation Research Circular No. 503, 2001.