

장수명 아스팔트 포장 공법에 대한 기초연구

A Basic Study on Long-Life Asphalt Pavements

김명재* · 이정훈** · 송서규*** · 이현종****

Kim, Myoung Jae · Lee, Jung Hun · Song, Soe Kyu · Lee, Hyun Jong

1. 서 론

기존의 아스팔트 포장 설계개념은 공용년수 20년 이후에 재시공을 전제로 하지만 실제로 재시공을 하기에는 막대한 비용이 소모되어 단순히 5cm 덧씌우기를 실시하고 있고 이는 덧씌우기의 효과를 현저히 감소시켜 막대한 보수비용의 손실을 초래하므로 이를 근본적으로 해소할 수 있는 공법의 개발이 시급한 실정이다. 이러한 문제의 해결을 위해 1990년대 후반 영국을 중심으로 장수명 아스팔트 포장 공법이 개발된 이래 프랑스와 미국 등에서 활발히 이에 대한 연구를 진행하고 있다. 국내에서의 장수명 포장에 대한 연구나 자료가 전무하여 본 연구에서는 도로기술 선진국에서의 연구 및 실제 시공 자료를 조사, 분석하며 국내에서 시공되어지고 있는 도로의 유지보수기간과 포장 두께 그리고 비용들을 비교해 국내에는 어떠한 형태의 장수명 포장이 적합한가에 대한 분석을 수행하였으며 고강도 기층재와 Top-down 균열에 대한 기초적인 연구를 수행하였다.

2. 장수명 아스팔트 포장 공법 개요

장수명 포장이란 설계연한 동안 주기적으로 표층만 재시공하고 재건설이나 대대적인 보수 없이 40년 이상을 견딜 수 있는, 공용성이 기존 아스팔트 포장의 2배 이상 되는 포장으로 정의된다. 1997년 영국의 국립 도로연구소에서 장수명 아스팔트 포장 공법의 기본개념을 제안한 이래 유럽과 미국 등에서 활발한 연구가 진행 중에 있다.

2.1 장수명 아스팔트 포장의 설계개념

일반적으로 기존의 아스팔트 포장은 반복되는 차량하중으로 인해 그림 1과 같이 아스팔트층의 반복됨으로 하단에서부터 피로균열이 발생하고 노상의 상부에 작용하는 압축응력에 의해 노상의 침하(소성변형)가 발생되어 파괴된다.

이와는 달리 장수명 포장공법의 메커니즘은 아스팔트층의 강도와 두께를 증가시켜 피로균열과 노상의 처짐을 근본적으로 방지하여 설계 수명을 증대시키는 한편 내유동성과 내구성이 우수한 표층을 시공하여 보수 주기를 증대시킴으로 포장의 설계 연한을 40년 이상으로 연장 시키는 것이다(APA 101, 2002).

2.2 장수명 아스팔트 포장의 단면 구성

장수명 아스팔트 포장의 단면 구성은 그림 2와 같으며 각층의 역할은 다음과 같다.*

- 표층 : 혼합물의 소성변형과 Top-down 균열은 주로 아스팔트 포장 표면에서 하부 10cm 구간에 발생되기 때문에 이러한 파손에 저항성이 큰 혼합물로 표층을 시공하여야 하며 내구성, 불투수성 및 내마모성 등을

* 비회원 · 세종대학교 토목환경공학부 석사과정 · E-mail:modern95@hotmail.com-발표자
** 비회원 · 세종대학교 토목환경공학부 박사과정 · E-mail:ugg97@korea.com
*** 비회원 · 세종대학교 토목환경공학부 석사과정 · E-mail:aazz76@hanmail.net
**** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학부 조교수 · 공학박사 · E-mail:hlee@sejong.ac.kr



확보하기 위하여 일반적으로 SMA 또는 폴리머 개질 아스팔트 혼합물을 사용함

- 아스팔트 중간층 : 소성변형을 억제하고 차량하중의 대부분을 지지하는 층으로 노상에는 최소한의 응력만 전달되도록 고강도 혼합물로 중간층을 시공하며, 내구성을 증대하기 위하여 현장의 공극률을 4% 이내가 되도록 시공함. 고강도 아스팔트 혼합물을 생산하기 위하여 강성이 큰(침입도가 작은) 아스팔트 바인더를 사용하며, 프랑스의 경우 침입도 35이하의 바인더를 주로 사용함
- 아스팔트 연성 기층 : 아스팔트층의 하단에서 발생되어 상부로 발전하는 피로균열을 억제하고, 수분손상을 방지하기 위하여 아스팔트 함량을 최적함량보다 증가하여 아스팔트 기층을 시공함

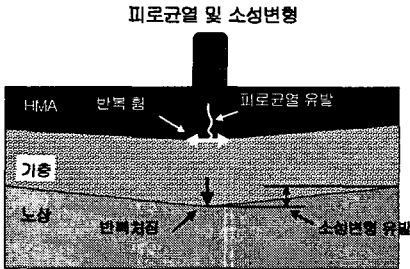


그림 1. 기존 아스팔트포장의 파손 메커니즘

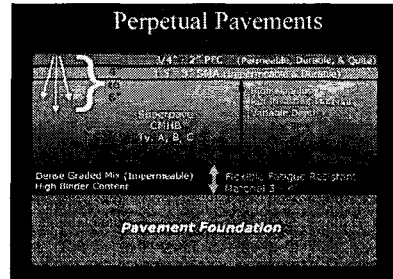


그림 2. 장수명 아스팔트 포장의 일반적인 단면

3. 각국의 장수명 포장 설계 및 시공사례 분석

3.1 영국의 장수명 도로

영국에서는 국립도로연구소를 주축으로 장수명 포장의 개발을 위해 실제 도로에서 오랜 시간동안 조사한 자료들을 분석하여서 영국식 설계법을 확립하고 지속적인 관찰을 통해서 포장체의 파괴에 대한 다각적인 연구를 진행중에 있다. 영국의 장수명 도로에 설계 개념은 기본적으로 두께의 조절에 의해서 변형률을 제어하는데 있으나 HMB(high modulus base)의 개발과 이용을 통해 포장체의 두께를 줄임으로서 시공비용과 공기를 줄이기 위한 연구가 함께 진행 중이다(Nunn, 1997).

3.2 프랑스의 장수명 도로

프랑스 설계법의 특징은 포장의 구성에 따른 분류와 기초의 상태에 따른 등급의 분류 그리고 교통량에 따른 교통등급의 분류 등 도로 설계에 있어서 필수적인 요소들을 세밀한 조사에 의해 분류하여 등급을 정해 놓은데 있다. 그러한 등급에 따라서 설계 두께를 결정하고 또한 바인더의 개발에 따른 도로의 강도증진을 통해 변형률을 제한함으로써 장수명 포장을 설계하고 있다(Laboratoire Central des ponts et Chaussees, 1997).

3.3 미국의 장수명 도로

미국에서는 각 주별로 활발하게 장수명 도로에 대한 연구가 진행되고 있다. 영국이나 프랑스의 장수명 도로가 한쪽은 도로 두께의 조절을 통한 수명의 연장 효과를, 다른 한쪽은 고강도 바인더의 사용에 의한 도로 수명의 연장 효과를 얻을 수 있다는 각각의 특징을 가지고 있는 반면에 미국의 장수명 도로는 이 두 가지 개념의 중간정도의 위치에 있다고 볼 수 있다(Carl, 2001). 즉, 도로의 두께를 조금만 늘려주는 대신 개질 바인더를 사용하여서 도로 수명의 연장 효과를 노리는 것이다.

3.4 각국의 장수명 포장 설계 및 시공 분석 결과와 국내 적용

장수명 아스팔트포장 공법에 대한 각 국의 설계개념을 정리하면 표 1과 같다. 표 1은 장수명 포장공법에 대한 개략적인 분류로서 실제로는 대부분의 국가에서 포장체의 두께 조절만이 아닌 탄성계수가 큰 바인더를



개발함으로 포장체의 두께를 줄이고 그에 따른 비용을 감소시키는 방법을 채택하고 있다.

위에 언급한 3국의 교통량에 따른 포장 두께는 그림 3과 같으며 강성이 큰 재료를 사용하였을 때 포장의 두께가 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 본 연구 역시 이러한 조류에 따라서 포장 단면의 두께 조절과 고강도 바인더의 개발을 함께 진행 중이며 최종적으로는 우리나라에 교통 및 기후조건에 적합한 포장공법으로 발전시키기 위한 방향으로 진행 중에 있다.

표 1. 각국에 장수명 도로의 개념별 분류

개 념	영 국	프 랑 스	미 국
장수명 포장의 접근방법	포장 두께 조절	바인더 강도 증진	두께 조절과 바인더의 강도 증진
피로파괴 억제를 위한 아스팔트 층 하단의 인장변형률 제한 기준	Bending 70 $\mu\epsilon$	Bending 70 $\mu\epsilon$	California 70 $\mu\epsilon$
			Michigan 70 $\mu\epsilon$
			Kentucky 70 $\mu\epsilon$
			Illinois 60 $\mu\epsilon$
장수명 포장의 기준설정	실제 시공되어진 포장으로부터의 실측자료	실내시험 결과에 의해 설정된 기준	각 주별로 환경에 맞는 기준 설정

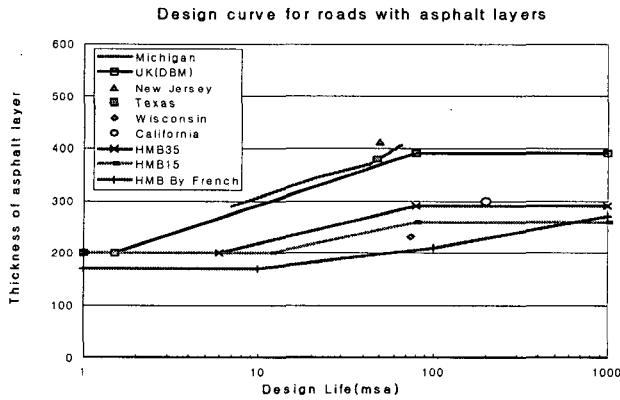


그림 3. 교통량에 따른 각국의 장수명 도로의 아스팔트층 두께

4. 장수명 포장 설계법 개발

아스팔트층	표층 H1(고정, 50.8 mm)	E1(고정, 3.00 GPa)
	중간층 H2	E2
	기층 H3	E3
	보조기층 H4	E4(고정, 0.17 GPa)
	동상방지층 H5	E5(고정, 0.10 GPa)
	노상 H6	E6

그림 4. 포장체 반응 모델 개발을 위한 개요도

표 2. 변수값 범위

	MIN (mm)	MAX (mm)
H1	50.8	50.8
H2	101.6	304.8
H3	0	152.4
H4	203.2	406.4
H5	0	203.2
E1	3.00	3.00
E2	4.00	12.06
E3	2.07	5.00
E4	0.17	0.17
E5	0.10	0.10
E6	0.03	0.10



장수명 포장의 단면설계의 기본 개념은 아스팔트층 하단에 발생하는 인장변형률을 $70 \mu\epsilon$ 이내로 제한하고 동시에 노상에 가해지는 압축변형률을 $200 \mu\epsilon$ 이내로 제한하여 피로균열과 노상의 변형에 의한 파괴를 방지하는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 그림 4와 같이 포장의 거동해석을 위한 모형을 설정하고 표 2에 수록된 변수들의 값을 조절하여 다양한 두께 및 재료물성에 대한 구조해석을 수행하였으며 이를 데이터 베이스로 구축하였다. 이러한 데이터 베이스로부터 장수명 포장의 최소 아스팔트포장 단면두께를 설정하였으며 회귀분석을 통해 아스팔트층 하단의 인장변형률과 노상의 압축변형률을 예측할 수 있는 모형식을 도출하였다. 또한, 이러한 모형식을 사용해 실제 설계에 사용할 수 있는 설계차트를 개발하였으며 추후 연구를 통해 이러한 모형식에 대한 검증을 수행할 예정이다.

5. 장수명 포장에 적용하기 위한 고강도 바인더의 개발

영국의 실측 자료의 분석결과 침입도 등급이 낮은 바인더를 사용한 HMB 혼합물의 아스팔트층 두께가 DBM 혼합물의 두께보다 얇게 설계되는 것을 알 수 있으며, 이것이 고강도 아스팔트 혼합물 개발의 필요성을 보여주는 부분이다. 영국에서 사용한 기층재를 개발하기 위하여 최대 입경 25mm의 국내 기층용 골재 입도와 영국의 기층용 골재 입도 분포를 비교해 본 결과 영국의 기층용 골재 입도가 국내 기층용 골재 입도 분포 범위내에 포함되는 것으로 나타나 국내적용에도 문제가 없는 것으로 사료되었다.

5.1 장수명 포장을 위한 고강도 바인더의 실내 시험

각 혼합물별 최적 아스팔트 함량은 마샬배합설계를 실시하여 선정하였으며, 이때 사용된 이론최대밀도는 Rice의 방법에 의해 실측한 비중을 사용하였다. 영국의 기층용 아스팔트 혼합물의 경우에는 공극률 4%에서 최적 아스팔트 함량을 결정한다. 본 연구에서는 영국의 기층용 골재입도를 사용하여 혼합물을 생산하므로 공극률 4%에서 최적 아스팔트 함량을 결정하였다. 본 연구에서는 영국에서 사용하는 기층재의 입도 분포와 침입도 등급이 낮은 바인더를 이용하여서 영국에서 사용중인 HMB15와 HMB35, DBM 그리고 PMA를 만들었으며 실내 동탄성계수 측정을 통해서 고강도 기층재로서의 타당성을 확인 하였다. 또한 휠트래킹 시험을 통해서 고강도 아스팔트와 일반 아스팔트 및 PMA의 소성변화에 대한 저항성을 확인 하였으며, 고강도 아스팔트가 러팅에 대한 저항성이 현저히 큰 것으로 나타났다.

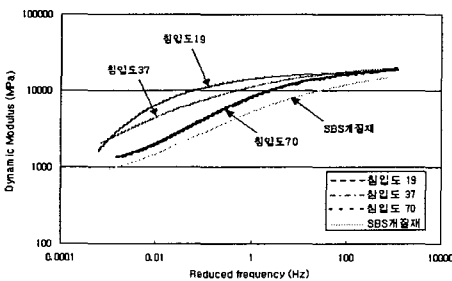


그림 5. 동탄성계수 측정시험 Master curve

표 3. 동탄성계수 비교

혼합물		동탄성계수 (GPa)	
		5Hz	1Hz
영국의 기층재	DBM(침입도100)	3.1	-
	DBM(침입도50)	4.7	-
국내적용을 위하여 개발된 기층재	HDM(침입도50 + extra filler)	6.2	-
	혼합물 A(AP-5)	7.5	5
	혼합물 B(침입도20)	9	8.5
	혼합물 C(침입도40)	10	7.5
	혼합물 D(SBS 개질아스팔트)	4.6	3

6. 장수명 도로의 Top-Down 균열 해석

일반 아스팔트 포장에 발생하는 주된 파손은 반복적인 윤회중에 의한 포장체 하부에 발생하는 인장 변형에 의한 균열이 상부로 진행되면서 발생하는데 비해 장수명 도로는 포장의 두께가 증가하고 강도가 증가함에 따라 균열이 상부에서 발생하여서 하부로 진행되는 Top-down 균열이 주로 발생하는 것으로 알려져 있다. 장수명 포장을 보다 효율적으로 관리하기 위해서 이러한 Top-down 균열의 발생원인과 예측모형을 개발하는 것이 필요하며, 본 연



구에서는 1차적으로 Top-down 균열의 발생원인을 분석하기 위하여 ABAQUS를 사용한 3차원 포장체의 구조해석을 수행하였다.

해석대상인 아스팔트 포장 구조체의 크기와 경계조건을 최적화하기 위하여 그림 5와 같이 3차원 유한요소망을 구성하였고, 우리나라에서 일반적으로 많이 사용되어졌던 단면의 크기를 사용하였다. 아스팔트 콘크리트 구조체는 아스팔트층, 아스팔트 안정처리기층, 보조기층, 노상의 4층으로 구성하였고 노상 밑에는 암반층이 존재한다고 가정하였다. 노상 하부에 존재하는 암반층은 독립된 하나의 해석층으로 고려하지 않고 경계조건으로 가정하였다. 또한, 동적영향이 미치지 않는 최적 노상두께는 8m로 가정하였다(최준성, 2003).

본 연구에서 수행한 3차원 유한요소해석 모델의 적합성을 검증하기 위하여 먼저 다층탄성해석 프로그램(Elsym5)과 2D유한요소해석을 수행하여 포장체 내부의 처짐을 비교 하였으며, 오차가 1% 이내임을 확인하였다. 현재 2D유한요소 해석을 3D유한요소해석으로 확장하여 해석을 수행하고 있다.

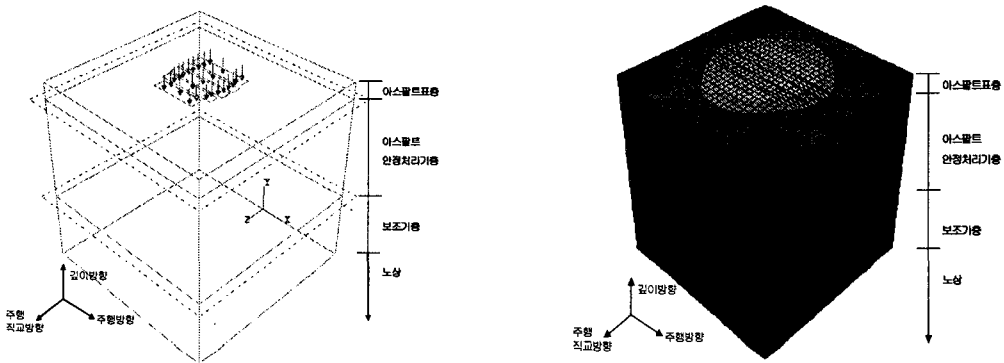


그림 6. 3차원 유한요소 모델링

6. 장수명 포장의 생애주기 비용 분석(LCCA)

6.1 장수명 포장의 경제적 효과

장수명 아스팔트 포장의 가장 큰 장점은 생애주기비용이 일반 포장보다 경제적이라는 것이다. 장수명 포장의 시공시 포장 두께의 증가로 인해 초기 비용이 일반 아스팔트 포장보다 약간 높지만 콘크리트 포장 보다는 상당히 낮은 수준이며, 또한 재시공의 필요가 없고 주기적으로 표층에 대한 보수만 시행하면서 40년 이상의 공용성을 유지할 수 있기 때문에 경제성 및 효율성이 뛰어나다고 할 수 있겠다. 또한 일반 포장의 전층에 대한 재시공시 수개월 이상의 시간을 소요함으로써 사용자비용의 엄청난 손실을 가져오는 반면에 장수명 포장은 주로 야간에 절삭한 후 표층에 덧씌우기를 시행하게 됨으로 사용자 비용의 감소효과를 얻을 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 일반 포장과 장수명포장의 생애주기비용을 분석하여 비교하였으며, 장수명 포장의 경우 보수주기에 대한 데이터가 부족하기 때문에 보수주기를 다양하게 가정하여 각 보수주기별로 수명주기 비용을 산정한 다음 일반 포장보다 경제적이 되기 위한 최소 보수주기를 산정하였다.

6.2 생애주기 비용 분석

국내에 공용되고 있는 아스팔트 국도의 경우 신설포장의 보수주기는 약 9년, 덧씌우기 포장의 수명은 약 5년으로 알려져 있다. 반면 장수명 포장의 보수주기에 대한 데이터는 부족하기 때문에 그림 6과 같이 초기 공용년수는 일반 포장과 같이 10년으로 가정하고 이후의 보수주기는 각각 10년 9년 8년 7년씩 일정한 것으로 가정하여 각 보수주기에 대해 생애주기비용을 산정하였다.

분석 대상구간은 연장 10km인 4차로이며 보수 공사시 4차로 중 2차로를 보수하는 것으로 가정하였으며, 일반포장과 장수명 포장의 단면 두께와 재료비는 표 3과 같이 적용하였다. 할인율은 실질 할인율 산정식에 의한 값인 5.0%를 적용하였으며, 분석기간은 장수명포장과 일반포장의 공용년수를 그림 6과 같이 일치시켰다.



사용자비용은 공용년수 동안에 도로 이용자가 부담하는 비용이며 이는 차량운행비, 시간지연비, 충돌사고 비용을 포함하나 이중 충돌사고 비용을 제외한 차량운행비와 지체비용을 고려하였다. 본 연구에서의 우회거리 1km, 우회속도 30km/hr에 해당하는 시간지연비용과 차량운행비용은 표 4와 같다.

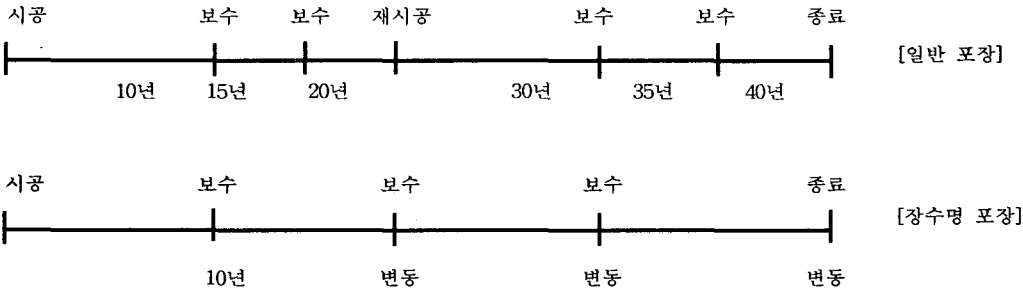


그림 7. 일반포장과 장수명포장의 보수주기

표 4. 포장의 단면두께와 재료비

항 목	일반 포장(원)	장수명 포장(원)
차량 운행비	528,925,795	285,762,946
시간 지연비	3,290,627,511	1,777,828,608

표 5. 시간지연비와 차량운행비

	구 분	일반 포장	장수명 포장
단면두께(m)	표 층	0.05	0.05
	기 층	0.2	0.34
재료비(원/ton)	표 층	39,000	39,000
	기 층	35,000	35,000

6.3 장수명 포장의 생애주기비용분석 결과

장수명 포장의 생애주기비용분석을 통해 그림 7과 같은 결과가 얻을 수 있었다. 그림 7의 해석결과를 바탕으로 각 보수주기별로 LCC를 그림으로 나타내면 그림 8과 같다. 그림 8에서 일반 포장과 40년 후의 LCC가 동일하게 되는 보수주기는 약 9년으로 나타났다. 따라서, 장수명 포장의 보수주기가 9년 이상일 경우 일반 포장에 비해 항상 LCC 측면에서 유리하다 할 수 있다.

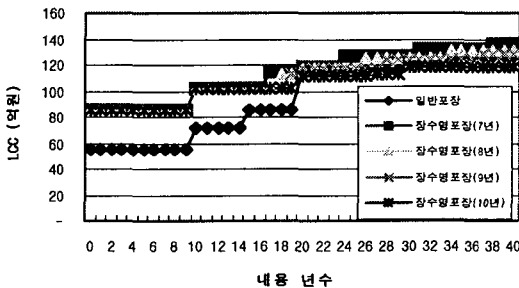


그림 8. 일반 포장과 장수명 포장의 LCC 비교

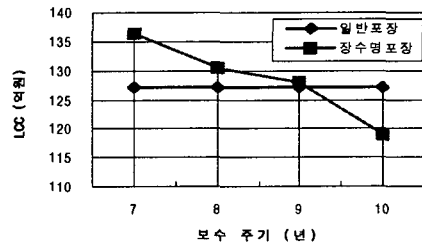


그림 9. LCC가 일반 포장과 동일하게 되는 장수명 포장의 보수주기

7. 결 론

본 연구에서는 현재 구미 선진국에서 활발히 연구가 진행되고 실제 도로에 적용이 증가하고 있는 장수명 포장공법의 국내 개발을 위한 기초 연구를 수행하였으며 먼저 각 국의 장수명 포장 공법에 대한 설계개념을 분석하고 시공사례분석을 수행하였다. 또한, 장수명 포장의 단면설계법 개발을 위해 본 연구에서 수행하고



있는 연구내용을 소개하였고 Top-down 균열에 대한 발생원인 분석을 위한 유한요소해석을 소개하였다. 끝으로 생애주기비용분석을 통해 장수명 포장의 보수주기가 9년 이상일 경우 일반 포장에 비해 LCC 측면에서 유리함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2002년 건설기술연구개발 사업지원(과제번호:02산학연B01-01)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 최준성, 신대영, 김수일(2003). “수치해석과 현장시험을 통한 주행하중의 이격거리 영향 분석” 대한토목학회 논문집,
2. *Asphalt Pavement Alliance*,(2002) “Perpetual Pavements” Order Number APA 101.
3. Carl Monismith, Fenella Long, and John Harvey(2001). “California’s Interstate-710 Rehabilitation” *The Association of Asphalt Paving Technologists*.
4. *Laboratoire Central des ponts et Chaussees*, (1997).
5. Nunn, M. E., A. Brown, D. Weston, and J. C. Nicholls.(1977) Design of Long-Life Flexible Pavements for Heavy Traffic. TRL Report 250, *Transport Research Laboratory*, Crowthorne, U.K.
6. Nunn, M and T, Smith.(1997) Road Trials of High Modulus Base for Heavily Trafficked roads. TRL Report 231, *Transport Research Laboratory*.
7. *Transportation Research Circular* No. 503,(2001).