

# 아스팔트 포장 설계법 개발에 관하여

박형순\* · 이현증\*\*

## 1. 서론

현재 도로는 육상교통수단 중 국가경제활동의 이동과 접근을 제공하는 매우 중요한 사회간접자본시설이다. 특히, 포장체는 인적 물적 자원의 원활한 수송을 위해 건설되는 도로의 평면 시설물로서, 예상되는 교통수요와 하중조건에 만족스러운 수준의 포장공용성을 일정기간동안 사용자에게 제공하여야 한다. 따라서, 포장설계는 경제적이면서 내구성이 보장되는 도로포장체의 적정 두께와 재료를 선정하며, 일정한 포장공용성을 제공하여야 한다.

그러나, 국내에서 사용중인 모든 도로포장 설계법은 외국의 설계법을 도입하여 사용하고 있으며, 그 내용이 설계법 개발국의 지역과 환경조건들에 기초한 결과를 반영한 경험적인 방법을 사용하여 상이한 건설재료, 기후, 교통조건 등을 가진 국내에서 사용하기에는 근본적인 제한성을 가지고 있다. 더욱이 기술수준의 상대적인 차이로 외국의 개발된 설계법을 제대로 원용하지 못하는 실정이다.

현재 아스팔트 포장의 설계 기술은 매우 낙후되어, 미국의 AASHTO 설계법을 그대로 원용하여 포장을 설계하고 있다. 국내에 적용되고 있는 AASHTO 설계법은 72년 잠정설계법과 86년 개정설계법이 주를 이루고 있으나 설계자의 주관적인 기준에 상당부분 의존하여 설계하고 있다. 또한 설계

기준에 대해서도 기초적인 연구가 거의 이루어지지 않은 상태로, 설계 입력변수 설정에서부터 설계 과정에 이르기까지 체계적 정립이 필요한 실정이다.

그러므로 효율적인 도로포장의 설계, 시공, 운영, 관리를 위한 새로운 도로포장 설계법 개발이 요구되며 재료연구, 설계모형개발, 현장시험 등 장기간의 조사·연구가 필요하다. 더욱이, 포장기술의 선진국이라 할 수 있는 미국과 유럽에서도 기존의 경험적 설계법을 대체하고자 역학적 이론에 기초한 차세대 포장설계법의 개발을 진행하고 있다. 따라서, 우리나라도 기존 외국에서 개발된 설계법의 적용상의 한계를 극복하고 최선의 연구성과를 반영한 보다 선진화된 포장설계법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

## 2. 아스팔트 포장 설계의 기본 모형

현재 개발 중인 역학적-경험적 설계법은 도로의 중요도와 교통량 등을 감안하여 설계수준을 3단계로 구분하였다. 기본적으로 동일한 방식에 의해 설계를 수행하지만 도로의 중요도에 따라 설계에 필요한 설계 입력변수(교통, 환경 및 재료물성)를 결정하는 방식에 차이를 두고 있다. 즉, 도로의 중요도가 상대적으로 낮은 경우에는 재료물성시험이나 교통량 정보수집 등에 있어 상대적으로 간편하게 입력변수를 결정하게

\* 정회원 · 세종대학교 석사과정

\*\* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사

표 1. 도로등급별 요구되는 물성 및 교통하중 정보

등급	도로종류	물성 측정	교통량 측정	설계법
1	고속국도, 국도	실내시험을 통한 재료의 물성 측정	축하중과 종류별 교통량 분포	설계 프로그램 사용
2	지방도, 간선도로	재료의 종류에 따라 물성 D/B나 예측모형 사용	축하중과 종류별 교통량 분포나 중차량 교통량에 따라 정해진 축하중별 교통량 분포	설계 프로그램 사용
3	군도, 국지도로	포장재료의 일반적인 물성 사용	중차량 교통량에 따라 정해진 축하중별 교통량 분포	표준단면 카타로그 사용

하고 도로의 중요도가 높을수록 보다 많은 실내시험과 교통특성에 대한 세밀한 정보를 필요로 한다.

다음의 <표 1>은 설계등급별 교통하중 및 포장재료의 물성 정량화의 방법을 정리한 것이다.

<표 1>에서 보는 바와 같이 설계등급 1과 2에서는 설계 프로그램을 사용하는 반면 설계등급 3에서는 동일한 설계방식이지만 미리 국내의 대표적인 포장재료와 교통특성에 따라 설계되어진 표준 설계단면을 사용하여 설계하게 된다.

역학적-경험적 설계방식과 기존의 경험적 설계법과 가장 큰 차이는 AASHTO 포장설계법과 같은 설계 프로그램이 아니라, 엄격한 의미에서 해석프로그램 이라는데 있다. 즉 주어진 포장단면에 대해 해석을 수행하여 공용성을 예측하는 방식인 것이다.

<그림 1>은 아스팔트 포장에 대한 전반적인 설계 과정을 흐름도로 나타낸 것이며 이를 상술하면 다음과 같다.

교통량, 기후조건, 토질조건, 포장층의 조합, 아스팔트 혼합물의 물성, 등을 입력변수로 정하고, 설계기간 종료시점까지 유지되어야 할 공용성에 대한 기준과, 공용성 인자에 대한 기대 신뢰도 수준 (desired level of reliability)을 결정한다.

다층탄성이론 또는 유한요소해석 기법을 통하여 포장의 구조적 거동 (structural responses)을 계산하고, 이를 한 달 동안의 설계기간에 대하여 각 축하중 종류와 하중크기에 대해 각각의 포장 손상을 계

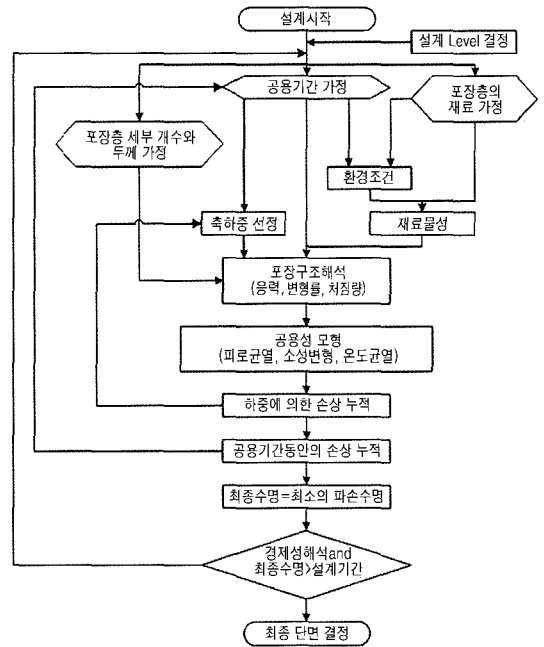


그림 1. 아스팔트 포장 설계법의 기본모형

산하고 이를 누적한다. 또 전체의 설계기간에 대하여, 매월별로 누적된 손상을 계산한다.

실내시험을 통해 개발된 파손모형을 현장시험의 결과와 비교 분석하여 보정한 역학적-경험적 (mechanistic-empirical) 공용성 모델을 이용하여 매월별로 포장의 파손을 예측한다. 포장의 IRI를 초기의 IRI와 포장파손, 그리고 매 분석기간의 말미에 현장특수성을 고려하여 예측하고, 예비설계의 기대

공용성을 주어진 신뢰도 수준에서 적합한지를 평가한다.

만약 예비설계가 공용성 기준을 만족하지 못하면, 설계를 변경한 후 다시 위의 구조해석부터 다시 반복하여 그 설계가 공용성 기준을 만족할 때까지 수행한다. 목표한 공용성 기준을 만족시키는 설계는 구조 및 기능적 측면에서 실행 가능한 것으로 인정되어, 다른 평가, 예를 들면 생애주기비용분석 같은 것을 수행하게 된다.

개발될 설계법은 기존의 전통적인 역학적-경험적 설계방식과 몇 가지 측면에서 개선된 부분이 있다. 즉, 배합설계와 누적손상개념이 설계에 도입된 점이다. 재료선정과 배합설계를 포장의 설계절차에 포함한 것은 포장의 공용성이 포장단면의 두께뿐만 아니라 포장재료의 공용특성에 의해서도 영향을 받기 때문이다. 따라서, 설계단계에서 미리 포장시공 예정 지역에 사용할 골재 및 아스팔트의 기본적 물성 시험과 예비 배합설계를 통하여 아스팔트 혼합물의 기본적인 물성(예를 들어, 탄성계수와 포아송비 등)과 공용특성(피로 및 소성변형 등) 등을 예측 또는 실측하여 이를 포장설계에 반영하고자 함이다.

또한 기존의 설계에서 사용하고 있는 등가단축하중 개념은 몇 가지 중요한 결함을 내포하고 있기 때문에 이를 극복하기 위하여 설계기간  $4t$  동안의 각 축하중 크기별(예를 들어 1ton, 2ton, 3ton, ...) 포

장의 거동을 해석하고 이를 토대로 공용성 분석을 실시하여 각 하중크기별 발생하는 손상을 산정하고 이를 합산한다.

### 3. 아스팔트 포장 설계 세부 연구

현재 1단계 연구가 진행 중이며 아스팔트 포장 설계법의 세부연구는 크게 세부부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째로 포장 거동 모형, 두 번째로 환경하중 및 재료물성등의 설계입력변수, 마지막으로 공용성 예측 모형으로 나누어지며 이 세부연구는 2단계에서는 더 많은 내용으로 확장할 계획이다.

#### 3.1. 포장 거동 모형

아스팔트 포장의 거동분석을 위해 일반적인 해석 방법인 다층탄성이론을 이용하여 역학적 거동을 산정할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 이는 아스팔트 포장 설계법 개발에 있어서 설계입력변수 부분과 공용성 예측 모형 부분을 연결 또는 통합시키는 역할을 담당하고 있다.

포장구조해석 프로그램은 크게 포장체의 조건과 하중에 대한 입력자료를 받아들이는 과정, 포장체 내 임의의 위치에서 처짐, 응력 및 변형률을 계산하

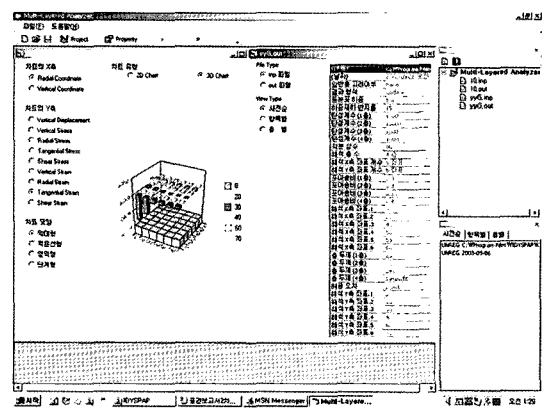
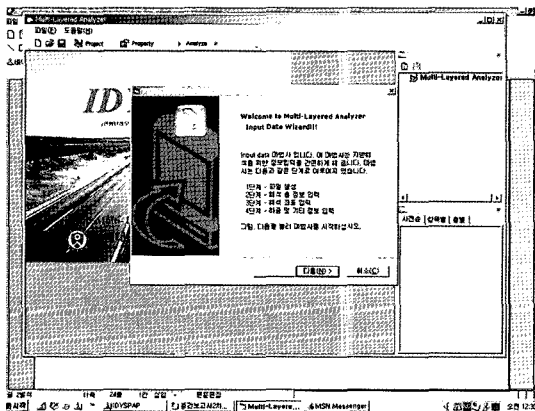


그림 2. 프로그램의 초기화면 및 해석 결과화면

는 과정, 그리고 계산된 결과를 출력하는 과정으로 구성되어 있다. 포장체에서의 처짐, 응력, 그리고 변형률을 계산하기 위해서 3개의 서브루틴이 사용되었다. 이들 서브루틴은 경계조건과 연속조건을 이용하여 각 층의 적분상수를 결정하고 베셀함수를 이용하여 임의의 점에서의 변위와 응력을 계산하도록 되어 있으며, 또한 탄성모델의 중첩효과를 이용하여 다양한 축간 거리와 1개 이상의 축을 고려할 수 있도록 설계되어 있다.

프로그램을 현장에서 간편하게 사용될 수 있도록 Visual Basic 프로그래밍을 사용한 사용자 편의의 전·후 처리기법을 도입하여 본 연구에서 개발된 다층탄성해석 프로그램을 상용프로그램  $\beta$ -버전으로 패키지화하였다. 그리고 기존 포장구조해석 모델과 비교 검증한 결과, 하중직하 점에서의 수직응력이 최대 7.3%의 차이를, 수평응력은 최대 4.7% 차이를 보여 실제 사용되고 있는 대부분의 프로그램들과의 해석 결과와 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

본 프로그램은 <그림 2>와 같이 입력변수 입력부분은 여러 단계로 구성되어 있으며 각 단계마다 해석 층 정보, 해석 좌표입력, 하중 등을 입력하게 되어 있다. 결과 출력부분은 차트와 텍스트를 보여주는 화면으로 되어 있으며 각각의 응력, 변형률을 보여주게 되어 있다.

### 3.2. 설계입력변수

아스팔트 포장 설계법에서는 설계입력변수 정량화에 대하여 환경하중, 재료물성, 교통하중 등의 항목으로 연구되었다.

#### 3.1.1. 환경하중 정량화

환경하중은 포장체의 온도 및 습도 변화를 의미하는 것으로 강도 저하, 노상 지지력 감소 등과 같은 포장체 물성 변화의 원인이 된다. 물성이 변화된 포장체에 교통하중이 재하되면 변형이 크게 발생되어 포장 파손을 촉진시킨다. 즉, 환경하중은 직접적으

로 포장 파손을 유발시키지는 않지만 포장 파손의 잠재적인 원인이 된다.

환경하중이 포장 공용성에 미치는 영향은 매우 다양하다. 실례로 아스팔트 포장의 경우 처짐량(Deflection), 탄성계수(Elastic Modulus), 아스팔트 점도(Viscosity) 등은 온도에 크게 영향을 받는다. 온도가 상승하면 처짐량은 증가하게 되고 처짐량을 기준으로 역산을 통해 산정되는 탄성계수도 변화하게 된다. 또한, 아스팔트 점도가 하락하여 혼합물의 결속력 및 전단 저항을 약화시켜 포장체 변형을 유발시킨다. 그래서 본 연구는 환경하중을 온도 변화에만 제한하여 1단계에서는 포장체 온도예측 모델 개발 연구가 수행되고 2단계에서는 개발된 포장체 온도예측 모델 검증 및 보완 연구가 수행될 계획이다.

1단계 2차년도부터 시작한 본 연구는 문헌고찰을 통하여 국·내외 포장체 온도예측 모델 현황을 파악하고 포장체 온도예측 모델 개발 방안을 수립하였다. 또한, 현장에서 온도를 수집할 계측기(thermocouple, i-Button)를 선정하고 국내 포장체 내부온도 변화 패턴을 파악하기 위해 조사대상 구간(총9구간)을 선정하여 온도 계측기를 매설하였다. 현재 30분 간격으로 포장체 깊이별 6개지점의 내부 온도를 연속하여 계측하고 있다. 포장체 내부온도조사는 3차년도에도 계속 진행될 것이며 포장체 관련 데이터베이스를 구축하고 있다.

#### 3.1.2. 재료물성 정량화

재료물성 정량화 연구는 크게 아스팔트 포장재료와 하부구조의 물성정량화로 나누어서 수행되었으며 이는 포장거동모형의 주요입력변수이다.

첫 번째로 아스팔트 포장재료 물성정량화는 골재와 아스팔트 바인더, 아스팔트 혼합물로 나누어 연구 되었으며 자세한 내용은 다음과 같다.

우선 골재 분야는 국내산 골재의 지역별, 산지별 물성자료를 구축하였고, 실내 평가 시험을 실시하여 국내에 적합한 항목별 실내 시험을 선정하였다. 아

스팔트 바인더 분야의 경우 1차년도에는 아스팔트 바인더의 모델조사 및 PG분류시험, 원/산화 아스팔트 바인더의 기본물성 측정 및 분석, 온도 및 하중주기를 고려한 동적전단유동시험을 수행하였고, 2차년도에는 아스팔트 단기노화시험시행, 노화된 아스팔트 바인더의 거동특성평가를 위한 시험, 단기산화로 인한 아스팔트 바인더의 유변학적 특성에 영향을 주는 요소를 규명하기위한 분석을 하였다. 아스팔트 혼합물 분야에서는 1차년도에 동탄성계수 모형 비교 분석, 동탄성계수시험법 정리 및 표준 Protocol 개발, 2차년도에는 동탄성계수시험을 계속하였으며 비파괴시험 장비 및 예측공식을 이용한 동탄성계수평가, 회복탄성계수 및 간접인장강도시험 등을 수행하였다.

하부구조 정량화는 크게 세 가지 부분의 세부적인 연구 범위를 갖는다. 첫째는 노상토의 역학적 특성 연구분야, 둘째는 입상 보조기층 재료의 역학적 특성 연구분야, 셋째는 설계입력변수 결정기법 개발 분야이다. 1단계 연구에서는 첫째와 둘째의 연구분야를 중심으로 연구의 진행을 계획하고 있다.

1차년도의 연구 내용은 국내 하부구조 재료의 기초물성 특성 평가, 국내 하부구조 재료가 경험하는 응력범위 설정, 하부구조재료의 역학적특성 평가를 위한 시험 장치의 검증, 시험절차수립 및 영향요소의 일차적인 평가를 수행하였다. 2차년도에는 하부구조 재료의 변형특성 평가와 지지력계수와 탄성계수의 상관모형 개발 등을 수행하였다.

### 3.3. 공용성 모형

공용성 모형은 크게 피로 파손 모형, 소성변형 모형, 저온 균열 모형 등으로 나눌 수 있으며 1단계에서는 피로균열과 소성변형만을 고려하여 연구를 수행하고 있다.

#### 3.3.1. 피로균열 모형 개발

교통하중으로 인해 아스팔트 콘크리트층 하부에

피로균열이 발생하여 그 균열이 하부에서부터 상부로 진전되며 공용성의 저하를 유발시키는 다양한 요인들을 고려하여 피로 시험을 수행하여 역학적 이론에 근거한 피로 모형을 개발하는 것이 1단계의 목표이다.

1차년도에는 아스팔트 혼합물의 피로손상에 영향을 미치는 요소들에 대한 분석을 실시하였고, 아스팔트 혼합물의 피로모형 개발 방법론에 대한 분석을 실시하였다. 또한 간접인장 피로시험으로 선정하여 이에 관한 문헌 및 시험에 대한 변수들을 선정하였다.

2차년도에는 간접인장 방식의 시험에 대한 데이터 수집 장비 및 하중재하장치를 준비하였다. 피로시험 전에 아스팔트 혼합물의 물성을 알아보기 위하여 크리프 시험, 동탄성계수 시험을 간접인장 방식으로 수행하였다. 또한 이 모든 시험의 해석에 사용되는 계산식을 제안했으며, 데이터수집 및 해석의 전 과정을 자동으로 수행하기 위하여 컴퓨터 프로그램(labview)을 개발하였다. 그리고 각각의 시험 결과를 고찰하였으며 이 결과들의 Database 구축을 진행하고 있다. 다음 단계로 Composite system의 적용성과 Shift Factor, 온도영향 등의 추가연구를 실시할 것이다.

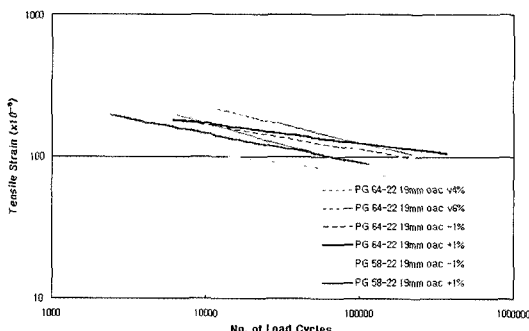


그림 3. 19mm 혼합물에 대한 피로수명 비교

#### 3.3.2. 소성변형 모형 개발

본 연구는 2차년도부터 시작된 연구로서, 피로 균열 예측 모형과 같이 1단계에서는 경험적인 모형을

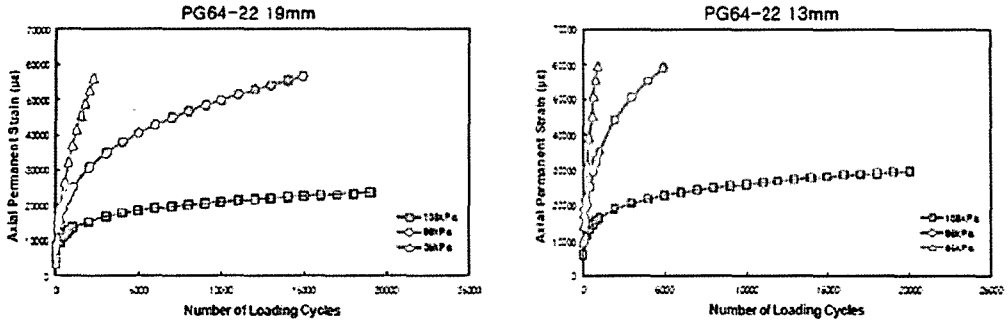


그림 4. PG64-22 13mm, 19mm 혼합물의 소성변형시험 결과

개발하는 것이 연구 목표이다.

2차년도에는 소성변형시험 장비구축을 하였고 소성변형시험 및 Database 구축을 하였다. 추후 연구에서는 소성변형에 대한 예측모형안을 제시하고 2단계에서는 이 모형안을 검증하는 연구를 실시할 계획이다.

#### 4. 결 론

1단계 2차년도까지의 연구에서는 국내 환경을 고려한 설계법 개발을 위한 기초 작업을 수행하였으며, 또한 새로운 연구분야에 대한 문헌고찰을 수행하였다. 설계 입력 변수 정량화 부분은 기본적인 실

내 실험을 진행하였으며 현장 여건을 고려할 수 있는 간편 시험법 개발에 관하여도 연구 범위를 확장하는 작업을 진행하고 있다. 포장거동모델 개발은 GUI 프로그램을 개발하여 이용자로 하여금 사용하기 쉽도록 하였다. 공용성 모형 개발은 연구 과제에 따라 다소 차이는 있으나 문헌 고찰을 통해 실내 실험을 수행하고 보완하는 작업을 진행 중이다.

향후 연구는 기존의 실내시험 및 개발된 내용들을 검증 및 보완하는 작업을 주된 연구로 수행할 것이며, 이는 국내외의 현장 데이터 및 LTPP 데이터를 수집하고 중부내륙고속도로에 설치된 시험도로에서 얻어진 자료들을 연구에 사용할 예정이다. 또한 포장설계에 관련된 실무자들과의 지속적인 접촉으로 설계자 중심의 설계법을 개발할 것이다.

본 특집기사는 건설교통부에서 발주한 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 연구성과물을 요약한 것으로, 원문은 인터넷의 『www.pavementinfo.com』을 참조하기 바랍니다.