



# 3단계 한국형 포장 설계법 개발 연구

The 3rd Stage Research of the Design Method for Pavement in Korea

조윤호\* 김연복\*\* 황성도\*\*\* 김일평\*\*\*\* 류성우\*\*\*\*\* 최준성\*\*\*\*\*  
 Cho, Yoon-Ho Kim, Yun Bock Hwang, Sung Do Kim, Il Pyung Ryu, Sung Woo Choi, Joon Sung

## 1. 서론

기존의 국내 포장 설계는 1950년대 수행된 AASHTO 도로 시험의 데이터를 기초로 포장의 공용성(Pavement Performance)을 추정하여 두께설계를 진행하는 AASHTO Guide 를 이용하였다. 하지만 경험에 근거한 이 설계법은 국내 교통, 재료 및 환경 조건을 반영하지 못하는 단점이 있어 국내 연구진들은 국내 조건을 고려하고 경험보다는 역학적인 부분을 고려한 설계법의 개발 필요성을 인식하였다. 이를 계기로 역학적-경험적 한국형 포장 설계법 개발 연구에 착수하였으며, 2001년에 수행된 기본계획연구에서 설계전반에 대한 개략적인 구조를 정립하였고, 1단계 연구를 통해 기본 설계모형(안)을 개발하였다. 2단계 연구에서는 1단계에서 구축된 기본 설계모형(안)과 함께 추가 연구를 통해 설계법 및 프로그램을 개발 및 완성시키기 위한 노력을 진행하였다. 3단계에서는 이를 수정 및 보완하여 실무에서 사용할 수 있도록 보완하는 노력을 진행할 계획이다.

본 논문에서는 기존 1단계에 개발한 설계법이 지금 어떻게 개선 및 보완되었으며, 관련 세부 내용에 대한 분석을 실시하였다. 이를 통해 한국형 포장 설계법의 현 위치와 앞으로의 나아갈 방향에 대하여 정리하였다.

## 2. 한국형 포장 설계법 기본 아키텍처

한국형 포장 설계법은 기본적으로 역학적-경험적 설계(Mechanistic-Empirical Design)에 기초하여 <그림 1>과 같은 방법으로 개발되고 있으며 최종적으로 교통량, 기후조건, 토질조건, 포장 층의 두께조합, 재료물성 등을 입력하여 설계 적절성을 평가한다.

### ■ 포장 형식 결정

설계 대상 지역의 약식 자료를 이용하여 적합한 포장 형식을 결정한다. 이를 바탕으로 결정된 포장형식에 대한 단면 설계를 진행한다.

### ■ 입력 변수 결정

입력변수 정량화 연구를 통해 국내의 교통하중, 환경하중, 포장 재료 물성의 기본값을 제안하고 구조해석 프로그램의 입력 변수로 사용된다.

\* 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 정교수 · 공학박사 · 02-820-5336 (E-mail : yhcho@cau.ac.kr) -발표자

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 · 공학박사 · 031-9100-310 (E-mail : ybkim@kict.re.kr)

\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원 · 공학박사 · 031-9100-180 (E-mail : sdhwang@kict.re.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 국토해양부 간선도로과장 · 02-2110-8718(E-mail : ipkim33@mltm.go.kr)

\*\*\*\*\* 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 박사과정 · 02-816-0250 (E-mail : htsw@naver.com)

\*\*\*\*\* 정회원 · 인덕대학교 교수-공학박사 · 02-950-7565 (E-mail : soilpave@mail.induk.ac.kr)



■ 구조해석 모형

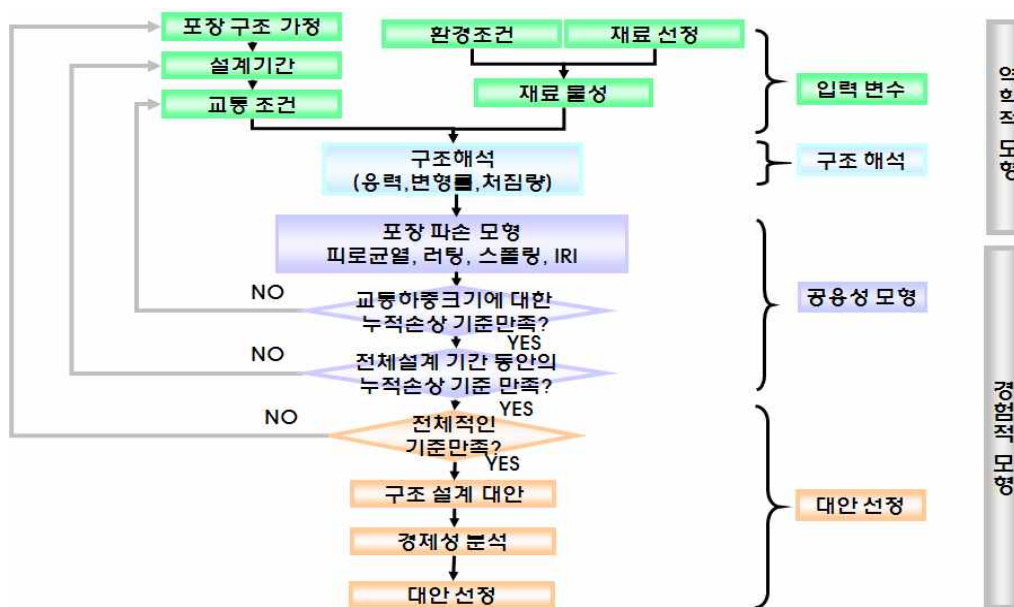
앞서 설정한 입력 변수들을 이용하여 포장의 구조적 거동(한계응력, 변형률)을 계산한다. 그 결과를 이용하여 공용성을 예측한다.

■ 공용성 모형 선정

국내 도로 포장의 주요 파손은 피로균열, 러팅, 스펙링, 평탄성으로 선정하였으며 이에 대한 경험적인 모형을 개발하였다. 기본적인 공용성 모형의 개념은 누적 손상 개념을 이용하여 연도별 누적 손상을 반복 계산하고 주어진 포장 단면의 시간별 파손 진행을 추정함으로써 설정된 설계 기준에 만족하는가를 판단한다.

■ 최적 대안 선정

공용성 모형이 설계 기준을 만족시키지 못 할 경우, 두께나 재료 혹은 구조를 변경한 후 공용성 기준을 만족할 때까지 반복 계산한다. 목표한 기준을 만족시키는 다양한 설계 단면들 중에서 생애주기 비용분석 및 신뢰도를 이용하여 최적의 대안을 찾게 된다.



〈그림 1〉 한국형 포장 설계법 기본 아키텍처

### 3. 세부 연구

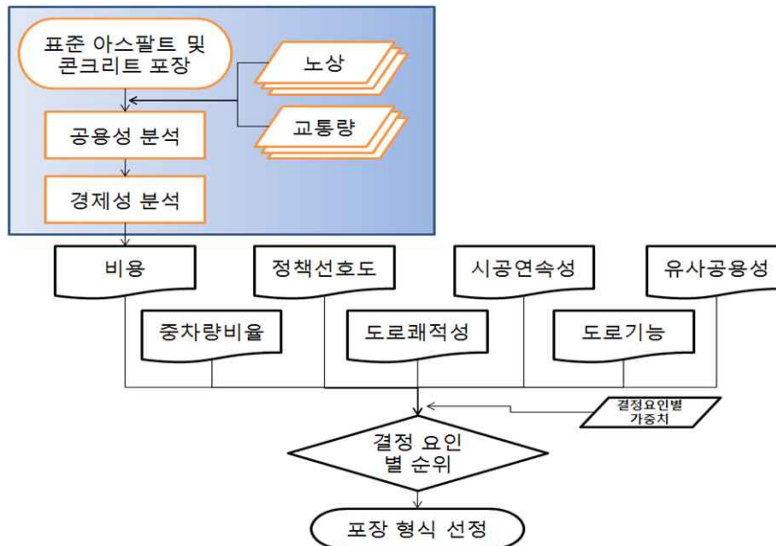
한국형 포장 설계법 개발을 위해 본 연구진은 과업을 포장 형식 결정, 입력 변수 정량화, 구조해석 모형개발, 공용성 모형 개발, 신뢰도 모형, 경제성 분석 및 대안 선정 연구로 나누었으며 관련 연구를 지속적으로 진행하고 있다.

#### 3.2. 포장 형식 결정

포장형식은 교통, 기후, 비용, 포장 재료, 정책선호도 등과 같은 다양한 요인들에 의해 결정된다. 따라서, 포장 형식선정에 영향을 미치는 요인 선정 및 영향도를 평가하여 정해진 포장형식지수를 비교함으로써 포장형식을 선정한다. 〈그림 2〉와 같이 포장 형식 선정은 우선 아스팔트 및 콘크리트 도로포장의 국내의 대표적인 포장단면을 교통량 및



노상의 상태에 따른 생애주기비용 분석을 통해 비용을 결정한다. 어떤 형식의 도로포장을 설계할지의 결정을 하기 위해 주어진 교통량과 지반환경 하에서의 공용성 분석을 통해 유지보수 시기를 선정하고 그에 따른 사용자 비용 및 유지관리 비용을 산정하고 이에 부가적인 결정 요인을 정량적으로 합산하여 포장형식을 선정한다.



〈그림 2〉 포장 형식 결정 흐름도

### 3.1. 입력 변수

한국형 포장 설계법 분야에서 진행되는 입력 변수 관련 연구 항목은 교통하중, 재료물성, 환경하중, 하부구조, 불연속면 정량화로 지금까지의 그 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

#### 3.1.1. 교통하중 정량화

교통하중은 포장 설계에 가장 민감한 입력변수로서 포장파손의 주요 원인이 된다. 본 연구에서는 기존의 등가단축 하중계수의 한계점을 인식하고 실제 포장에 재하되는 교통하중을 모사하기 위해 축 하중 분포를 이용하여 누적 손상 개념으로 교통하중을 정량화하였다. 도심부와 지방부, 2차로와 4차로, 중차량 유무로 나누어 도로를 분류하였고, 대표 구간을 선정하여 축하중을 조사하였다. 조사된 자료를 분석하여 대표 구간 별 차중 분류별, 축하중 분포 DB를 설계 프로그램에 구축하였다. 현재 차량의 원터링에 대한 연구를 진행하고 있으며 이를 설계 프로그램에 반영할 계획이다.

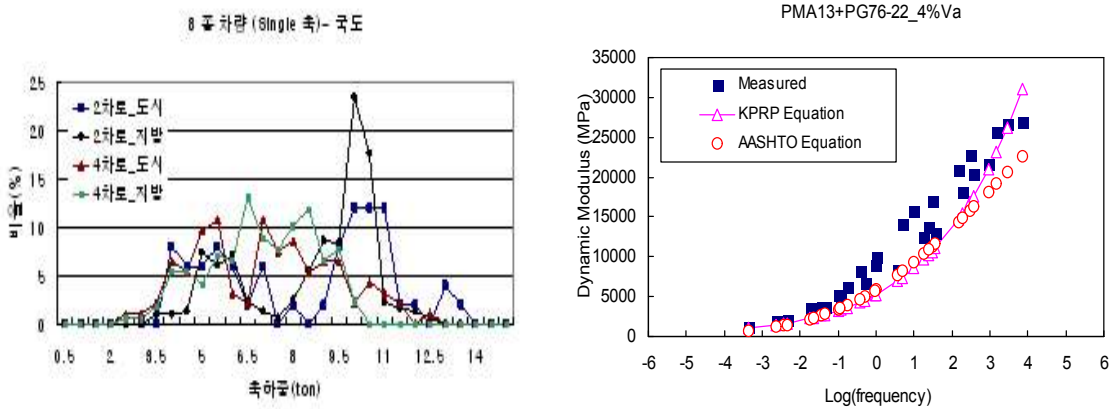
#### 3.1.2. 재료물성 정량화

재료물성 정량화 연구는 도로포장에 적용되고 있는 포장 재료의 기초적인 물성을 측정하여 구조해석의 입력 변수로 제시하는 것이다. 아스팔트 재료의 경우 국내에서 사용되는 대표적인 혼합물들의 동탄성계수를 측정하여 DB 화하였고 간편식을 개발하여 물성을 추정할 수 있도록 하였다. 콘크리트 재료는 강도, 열팽창 계수, 탄성계수 등에 대한 물성 DB 및 재령에 따른 예측식을 개발하여 설계 프로그램에 반영하였다.

#### 3.1.3. 환경하중 정량화

환경하중은 포장체에 직접적인 파손의 원인으로 작용하지는 않지만 포장체의 강도 저감 및 물성변화, 노상토의

지지력 감소 등을 유발하여 포장파손을 가속화하는 역할을 한다. 따라서 환경하중이 포장체에 미치는 영향을 정량화하고 구조해석의 입력 변수로 적용하기 위해서, 국내의 포장체 온도예측 모형 현황을 파악하고 국내 현장실험 및 관련 기상대 데이터를 이용하여 포장체의 온도예측 모형을 개발하였다. 또한 노상의 함수비가 변화하여 포장 공용성에 영향을 주기 때문에 이를 예측할 수 있는 모형을 개발 및 검증하여 프로그램의 모듈로 적용하였다.



〈그림 3〉 교통하중 정량화(8종 차량) 및 재료 물성 정량화  
(아스팔트-개질제 13mm 동탄성계수 (공극률=4%))

### 3.1.4. 하부구조 정량화

현재 국내에 적용되고 있는 포장 설계법에서는 하부구조(노상, 보조기층)의 설계입력 물성치를 CBR, 표준관입시험값(N), 노상지지력 계수(K) 등과 같은 물성치를 사용하고 있다. 그러나 이 값들은 실제 하부층 거동 특성을 합리적으로 평가하지 못하는 단점이 있고 상관 관계도 비교적 낮은 것으로 평가되고 있다. 따라서, 본 설계법에서는 모든 하부구조층의 탄성계수와 포아손 비(Poisson's ratio)로 정량화하였으며 간단식을 개발하였다. 콘크리트 도로포장의 경우에는 이 물성과 두께를 이용하여 복합 지지력을 산출하여 설계에 이용하도록 되어있다.

### 3.1.5. 불연속면 정량화

아스팔트 도로포장과 달리 줄눈 콘크리트 도로포장의 경우, 일정한 간격으로 줄눈부를 설치하여 온도에 따른 수축 및 팽창이 가능하도록 하였다. 하지만 이 부분이 구조적으로 취약한 부분이 되었으며 이에 대한 물성을 정량화하였다. 연구는 LTE, 하중전달 장치 설계 및 줄눈 폭 길이에 대한 연구를 진행하였다. 다음은 린콘크리트가 타설되고 다웰바가 설치된 포장의 LTE 예측식이다.

$$LTE(\%)_{dowled-lean} = LTE_0(\%) - 0.54 \times year(\text{재령})$$

$$\text{단, } LTE(\%) = \text{Min}[40\%]$$

$$LTE_0(\%) = 80.8 + 0.826 \times Temp \quad Temp < 20^\circ\text{C 일때} \quad (1)$$

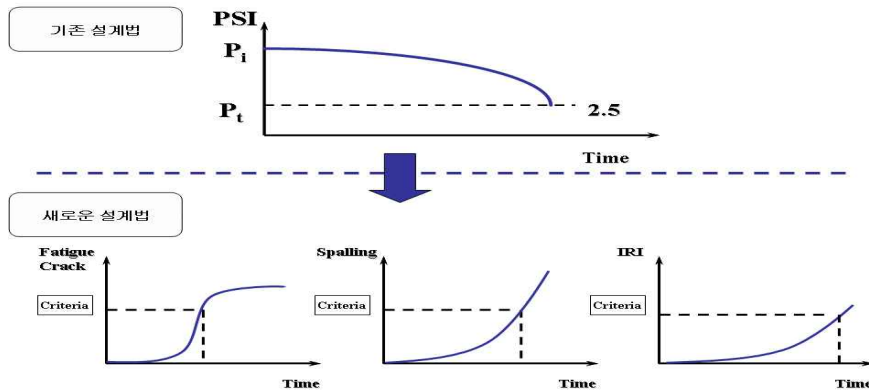
여기에서,  $LTE_0(\%) =$  초기하중전달율

$$Temp = \text{슬래브 온도}$$



### 3.2. 구조해석 모형

구조해석은 포장 거동의 역학적 해석 기능을 담당 하며, 한국형 포장 설계법 개발에 있어서 물성 정량화 부분과 공용성 모형을 연계하는 역할을 한다. 콘크리트 도로포장의 경우, 온도하중, 교통하중에 대하여 구조해석을 미리 수행하여 DB 화 및 예측식을 개발하였다. 또한 건조수축에 의해 발생하는 응력을 고려하기 위해 온도하중으로 변환하는 모형을 개발하여 적용하였다. 아스팔트 도로포장의 경우, 온도, 주행속도, 층간 깊이 등을 고려하여 기층하부의 인장 변형률, 각 층의 중간에서 수직변형률을 계산하는 해석 프로그램이 탑재되어 있다.



〈그림 4〉 새로운 설계법의 공용성 기준(콘크리트 도로포장)

### 3.3. 공용성 모형

공용성 모형은 피로파손 모형, 러팅 모형, 스펙링 모형, IRI 모형으로 나눌 수 있다. 기존 AASHTO 설계법에서 사용한 PSI개념의 기능적 공용성은 더 이상 사용되지 않고 포장의 구조적 파손 진전을 추정하여 이를 근거로 가장한 단면의 적절성을 평가하게 될 것이다.

#### 3.3.1. 피로파손 모형 개발

차량의 반복하중으로 인해 포장층 하부에 피로균열이 발생하고 이에 따른 포장의 공용성이 저하된다. 다양한 요인들을 고려하여 피로실험을 수행하고 그 결과를 바탕으로 설계 프로그램에서 사용할 수 있는 국내 피로모형을 개발하였다. 콘크리트 도로포장의 경우, 쪼갬인장강도, 휨인장강도를 이용하여 사용골재 종류에 따른 피로식을, 아스팔트 도로포장의 경우, 사용 골재의 입도 및 바인더 종류에 따라 피로식을 개발 및 검증하였다.

$$N_f = SF \cdot k \cdot 10^M (f_1 (\epsilon_t)^{f_2} (|E^*|)^{f_3}) \tag{2}$$

여기서,  $N_f$  = 피로균열 허용 하중 재하회수

$\epsilon_t$  = 구조해석한계지점에서의 인장변형률

$|E^*|$  = 아스팔트 세부분할층 중앙부의 동탄성계수 (MPa)

$SF$  = 전이함수  $f_1, f_2, f_3$  = 피로균열 모형 매개변수

$$M = 4.84 \times \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} - 0.69 \right)$$



$$k = \frac{1}{0.01 + \frac{12}{1 + e^{(15.676 - 1.1097 * h_{ac})}}} \quad (\text{하향균열})$$

$$k = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 1.374 * h_{ac})}}} \quad (\text{상향균열})$$

- $V_{beff}$  = 아스팔트층의 유효 아스팔트함량(%)
- $V_a$  = 아스팔트층의 초기 공극률(%)
- $h_{ac}$  = 아스팔트층의 총 두께 (cm)

### 3.1.2. 러팅 모형 개발

아스팔트 도로포장의 경우, 차량 하중 및 온도에 의한 영향 등으로 인해 러팅이 발생한다. 현재 실내에서 골재 및 바인더 종류에 따라 예측 모형을 개발하였으며, 이를 LTPP 데이터 및 APT 데이터와 비교 분석하여 검증 및 보완하였다.

### 3.1.3. 스폐링 모형 개발

스폴링은 콘크리트 도로포장의 줄눈부나 균열부위에서 상부 콘크리트 재료가 떨어져 나가는 파손이다. 고속도로의 LTPP 구간에서 자료를 수집하였으며 통계 분석 프로그램을 이용하여 영향 인자를 선정 및 비선형 모형을 개발하였다.

### 3.1.4. IRI 모형 개발

IRI 모형 개발 연구는 포장 상태 정량화를 위해 진행되었으며 두 포장 형식에 대한 모형을 개발하였다. 콘크리트 도로포장에서는 고속국도 현장 자료를 이용하여 재령, 피로균열, 스폐링, 초기 IRI 등의 변수들로 구성된 식 (3)과 같은 비선형 회귀모형 제안하였다. 아스팔트 도로포장의 경우, 피로 균열, 러팅, 공용 년수에 따른 모형을 제시하였다.

$$IRI = \frac{2.3779Age}{2.0294Age + 1} (0.0636FC + 0.0408Spalling + IRI_0) \quad (3)$$

- 여기서,  $FC$  : 피로균열 발생률 (%)
- $Age$  : 콘크리트 재령 (년)
- $Spalling$  : 스폐링 발생률 (%)
- $IRI_0$  : 교통개방 전 초기 IRI (1.28)

## 3.4. 경제성 분석 모형

다양한 입력 변수를 통해 구조해석을 수행하고 그 결과를 이용하여 공용성을 예측하게 된다. 예측된 공용성이 설계 수명기간동안 설계 기준을 통과하면 사용가능한 대안들로 분류가 된다. 포장 두께, 재료를 바꿔가면서 가능한 대안들을 여러 가지를 제안한다. 그 대안들을 이용하여 경제성 분석을 수행하여 최종안을 결정한다. 비록 초기 투자비가 크더라도 유지관리 비용이 적은 공법이 있다면 경제성 분석을 통해 선정 될 수 있다.





#### 4. 결론

현재 진행 중인 각각의 세부 연구 과제는 그 방법과 기술은 다를 수 있으나 한국형 콘크리트 포장 설계법 개발이라는 커다란 하나의 목표를 위해 진행중인 연구들이다. 국내 환경을 고려한 설계법 개발을 위한 많은 연구를 수행하였으며, 가시적으로 많은 성과들이 나타났다. 포장 형식결정 및 경제성 분석, 포장 입력변수 정량화, 공용성 모형 정량화, 덧씌우기 설계 등에 대한 로직 개발, 모형 개발, DB 구축 등의 결과를 바탕으로 설계 프로그램을 개발 중에 있다.

향후 3단계에는 지금까지의 연구 성과를 바탕으로 수정 및 보완 작업을 수행하여 신설 및 덧씌우기포장 설계프로그램을 개발할 계획이다. 더불어 실무자들에 대한 교육과 홍보를 통해 본 설계프로그램을 알리고 널리 사용할 수 있도록 할 것이다. 『한국형 포장 설계법 개발 및 포장성능 개선에 관한 연구』는 인간과 함께하는 도로 포장을 건설하기 위한 국내 포장인의 노력으로 보다 힘찬 미래를 위한 밑거름이 될 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

“한국형 포장 설계법 개발과 포장 성능개선 방안 연구 최종보고서” . 건설교통부, 2002. 10  
 “한국형 포장 설계법 개발과 포장 성능개선 방안 연구 최종보고서” . 건설교통부, 2003. 10  
 “한국형 포장 설계법 개발과 포장 성능개선 방안 연구 최종보고서” . 건설교통부, 2005. 6  
 “한국형 포장 설계법 개발과 포장 성능개선 방안 연구 최종보고서” . 건설교통부, 2006. 6  
 “한국형 포장 설계법 개발과 포장 성능개선 방안 연구 최종보고서” . 건설교통부, 2007. 6