



# Falling Weight Deflectometer 처짐값을 이용한 아스팔트 포장체의 구조적 상태 평가기법 개발

## Development of the Structural Condition Evaluation Technique for Asphalt Pavements Using Falling Weight Deflectometer Deflections

손 종 철\*      이 석 근\*\*      안 덕 순\*\*\*      박 희 문\*\*\*\*  
 Son, Jong Chul      Rhee, Suk Keun      An, Deok Soon      Park, Hee Mun

### Abstract

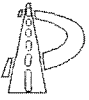
The objectives of this paper are to develop the structural condition evaluation technique using Falling Weight Deflectometer deflections and propose the structural condition criteria for asphalt pavements. To figure out correlation between surface deflections and critical pavement responses, the synthetic database has been established using the finite element pavement structural analysis program. A regression approach was adopted to develop the pavement response model that can be used to compute the stresses and strains within pavement structure using the FWD deflections. Based on the pavement response model, the procedure for assessing the structural condition of pavement layers was proposed in this study. To validate the condition evaluation procedure for asphalt pavements, the FWD test, dynamic cone penetrometer test, and repeated triaxial compression test were conducted on 11 sections of national highway and 8 sections of local road. Test results indicate that the tensile strain at the bottom of AC layer and AC elastic modulus were good indicators for estimating the stiffness characteristics of AC layer. For subbase layer, the BDI value and compressive strain on top of the subbase layer were appropriate to predict the structural capacity of subbase layer. The BCI value and compressive strain on top of the subgrade were found to be good indicators for evaluating the structural condition of the subgrade. The evaluation criteria for structural condition in asphalt pavements was also proposed in this paper.

**Keywords :** *falling weight deflectometer, structural condition evaluation technique, pavement response model*

### 요 지

본 논문의 목적은 Falling Weight Deflectometer 처짐값을 이용하여 아스팔트 포장체의 구조적 상태 평가기법을 개발하고, 이를 이용하여 포장체 각 층의 구조적 상태 평가기준을 제시함에 있다. 유한요소해석 아스팔트 포장체 구조해석 프로그램을 이용하여 가상적 데이터베이스를 구축하여 포장체의 표면처짐값과 포장체 내부반응과의 상관관계를 도출하였다. FWD 처짐값과 포장체 두께를 이용하여 직접적으로 포장체 내부반응을 계산할 수 있는 아스팔트 포장체의 내부반응 모델을 통계적 회귀분석을 통하여 개발하였다. 개발된 반응모델을 토대로 아스팔트 포장체 각 층의 구조적 상태를 평가하기 위한 절차를 제시하였다. 본 연구에서 제시한 평가 절차를 검증하기 위하여 국도 11개와 지방도 8개 노선에서 FWD와 동적관입시험을 수행하였으며, 현장에서 채취한 코어는 아스팔트 시편의 삼축압축반복재하시험을 수행하였다. 연구결과, 아스팔트층의 경우 아스팔트층 하부의 인장변형률값과 회복탄성계수값이 아스팔트 층의 강성 특성

\* 정회원 · 건설교통부 기반시설본부 도로건설팀 서기관  
 \*\* 정회원 · 경희대학교 토목공학과 교수  
 \*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원  
 \*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원



을 평가하는 중요한 인자로 판단되었다. 보조기층에서는 BDI값과 보조기층 상부의 압축변형률이 보조기층의 지지력 평가에 적합하였으며, 하부층의 경우 BCI값과 하부층 상부의 압축변형률값이 노상도의 지지력 및 상태를 판단하는데 적절한 인자로 선정되었다. 아스팔트층과 보조기층은 3단계, 하부층은 2단계로 구분하여 아스팔트 포장체의 구조적 상태를 평가 할 수 있는 기준을 제시하였다.

**핵심용어** : *Falling Weight Deflectometer*, 구조적 상태 평가기법, 포장체 내부반응 모델

## 1. 서론

1990년도 이후 도로정책의 목표는 신설도로의 건설에서 기존도로의 운영효율을 극대화할 수 있는 도로관리 운영정책에 주력하고 있다. 이는 매년 급증하는 도로 유지보수 예산을 효율적으로 활용하여 도로 포장상태를 적정수준 이상으로 유지함으로써 사용자에게 쾌적함과 안전성을 제공하는 것이다. 1999년 기준으로 도로의 유지관리에 사용된 예산은 약 1조 4,000억원이며, 연평균 약 14.5%의 증가율을 보이고 있다. 또한 향후 도로의 신설과 기존 도로의 노후로 인하여 유지보수비용은 크게 증가할 것이다. 도로 유지관리비용의 대부분은 도로포장의 유지보수에 사용되고 있다. 예산의 효율적인 활용 및 포장상태의 적정수준 유지를 위해 고속도로, 국도, 지자체 소유의 도로에서는 포장유지관리시스템(PMS, Pavement Management System)을 도입하여 운영하고 있다. 그러나 기존에 시행하고 있는 포장유지관리시스템은 포장체의 구조적 상태 평가보다는 표면파손 정도를 근거로 한 기능적 상태 평가에 주력하고 있다(한국건설기술연구원, 2005). 도로포장은 다양한 재료와 단면으로 구성되어 있으나 기존의 포장유지관리시스템에서는 포장체 각 층의 구조적 적정성 또는 지지력 정도를 파악하는 기법에 대한 정립이 미비하다. 따라서 아스팔트 포장체의 구조적 평가를 하지 않을 경우 과대/과소 유지보수를 할 수 있으며 포장 파손의 근본적인 문제점을 해결할 수 없다.

본 연구의 목적은 비파괴시험장비(FWD, Falling Weight Deflectometer) 처짐값을 이용하여 아스팔트 포장체의 구조적 상태를 평가할 수 있는 기법을 개발하고 이를 이용하여 상태평가 기준을 제시함에

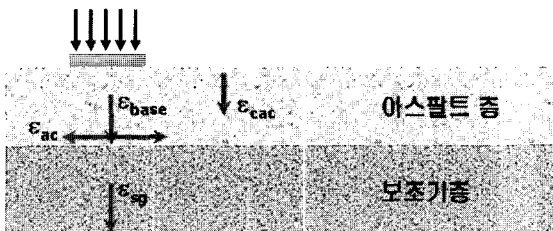
있다. 이를 위해 FWD 처짐값과 포장체 각 층의 두께를 이용하여 포장체의 탄성계수와 중요 지점의 변형률을 직접 계산할 수 있는 포장체 내부반응모델을 회귀분석을 통해 개발하였다. 개발된 기법의 검증 및 구조적 상태 평가기준 정립을 위해 현장 및 실내 시험을 국도 11개 구간과 지방도 8개구간에 대하여 수행하였다. 이 구간에서 수행된 시험은 FWD 시험, 아스팔트 코어채취, 동적관입시험(DCP, Dynamic Cone Penetrometer)이며, 현장에서 채취한 코어는 실내에서 삼축압축반복재하시험을 실시하여 아스팔트 혼합물의 회복탄성계수를 측정하였다. FWD 처짐값과 포장체 내부반응모델로 계산된 변형률과 포장체 상태 및 지지력과의 상관관계를 조사하여 아스팔트 포장체 각 층에 대한 구조적 평가기준을 제시하였다.

## 2. 포장체 내부반응모델의 개발

FWD는 포장체의 구조적 상태 평가를 위해 세계적으로 가장 널리 사용되고 있으며, 충격하중을 이용하여 교통하중을 정확히 모사할 수 있다. 이 장비는 포장체의 표면에 하중을 재하하여 하중의 중심으로부터 떨어진 각 센서에서 포장체의 처짐값을 측정한다(Bentsen et al., 1989). 이 처짐값을 바탕으로 각 포장층의 탄성계수를 역산함으로써 포장체의 현재 구조적 상태를 평가할 수 있으며, 공용중인 도로포장의 향후 잔존수명을 예측할 수 있다. 기존의 포장상태 평가에서는 FWD 처짐값을 이용하여 역산을 통해 각 층의 탄성계수를 추정하고 있다. 본 연구에서 개발된 아스팔트 포장체의 내부반응모델은 FWD 처짐



값을 이용하여 직접 포장체 내부의 응력 및 변형률을 산정할 수 있으며, 일반 밀입도 아스팔트 포장을 대상으로 개발한 것이다. 이 모델을 사용하면 역산시 발생할 수 있는 오차를 최소화할 수 있으며, 반응계산시 소요시간을 단축시킬 수 있다. 아스팔트 포장체의 내부반응모델을 개발하기 위하여 먼저 FWD를 이용한 포장체의 처짐과 내부반응과의 상관관계를 규명하였다. 아스팔트 포장체에서 발생하는 결정적 반응(critical pavement response)은 아스팔트층 하부의 인장변형률, 아스팔트층의 중앙, 보조기층의 상부, 노상층의 상부에서 발생하는 압축변형률을 들 수 있다(그림 1). 이와 같은 변형률값은 표 1과 같이 아스팔트 포장체의 공용성과 연관되는 피로균열 및 소성변형과 같은 포장파손에 많은 영향을 준다.



노상도

그림 1. 아스팔트 포장체에서의 결정적 반응값

표 1. 공용성에 미치는 변형률 요소

변형률 요소	공용성 인자
아스팔트 하부의 인장변형률( $\epsilon_{ac}$ )	피로균열
아스팔트 중앙의 압축변형률( $\epsilon_{ac}$ )	소성변형
보조기층 상부의 압축변형률( $\epsilon_{subbase}$ )	소성변형
노상도 상부의 압축변형률( $\epsilon_{sg}$ )	소성변형

### 2.1 포장체 처짐계수

FWD 하중을 포장 표면에 재하하면 그림 2와 같이 표면 처짐곡선(deflection basin)이 발생하게 된다(손중철, 2006). 측정한 표면 처짐곡선으로부터

다양한 포장체 처짐계수(deflection basin parameter)를 구할 수 있고, 각 계수는 포장체 각 층에 대한 특성을 파악하는데 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구에서 사용된 포장체 처짐계수는 그림 2에 정의하였으며, 이러한 포장체 처짐계수와 포장체 반응과의 상관관계를 고려하여 포장체 내부반응 모델을 개발하였다.

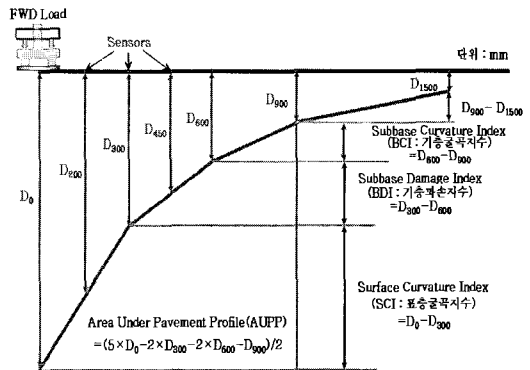
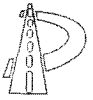


그림 2. FWD하중에 따른 처짐곡선의 발생

### 2.2 가상적 데이터베이스 구성 및 포장체 반응과 처짐계수와의 상관관계 분석

포장체의 결정적 반응값과 FWD 처짐에서 나오는 처짐계수와의 민감도 분석을 위해 가상적인 데이터베이스를 구성하였으며, 이를 이용하여 두 변수간의 상관관계( $\rho$ )를 분석하였다. 가상적 데이터베이스는 다양한 단면구조와 물성으로 구성된 포장체를 아스팔트 구조해석 프로그램을 통해 연산한 후 포장체의 처짐, 응력 및 변형률을 계산하여 입력과 출력정보를 축적하여 구성하였다. 또한 가상적 데이터베이스를 구축하기 위하여 아스팔트층은 선형거동으로 가정하였으며, 보조기층과 노상층은 Uzan이 개발한 모델을 사용하여 비선형성을 고려하였다. 가상적 데이터베이스 구성을 위한 구조해석 프로그램으로는 KPAVE를 이용하였다(손중철, 2006). 이 구조해석 프로그램은 유한요소해석법에 근거하며, 프로그램의 특징을 요약하면 다음과 같다.



- 1) 2D Axisymmetric 포장 구조체
- 2) 약 2,500 Node와 2,200개의 요소로 구성
- 3) 보조기층 및 노상층 : 비선형 토질 모델 적용 가능
- 4) 포장체 내부의 처짐, 응력 및 변형률 계산 가능

본 연구에서 수행한 포장체 반응과 처짐계수와의 민감도 분석 결과, 피로균열에서는  $\epsilon_{ac}$ 와 BDI의 상관관계가 높았고, 소성변형에서는  $\epsilon_{cac}$ 의 경우 SCI,  $\epsilon_{subbase}$ 의 경우 BDI,  $\epsilon_{sg}$ 의 경우 BCI와 상관관계가 높은 것으로 나타났다(표 2).

표 2. 민감도 분석을 통한 포장체 반응과 처짐계수와의 상관관계

파손종류	포장체 반응(변형률)	처짐계수	$\rho$
피로균열	$\epsilon_{ac}$	BDI	0.9903
소성변형	$\epsilon_{cac}$	SCI	0.9110
	$\epsilon_{subbase}$	BDI	0.9836
	$\epsilon_{sg}$	BCI	0.8638

### 2.3 포장체 내부반응모델의 개발

민감도 분석을 통해 결정된 처짐계수는 포장체의 내부반응을 예측할 수 있는 회귀분석 모델의 독립변수로 사용되었다. 본 연구에서는 우선 종속변수와 독립변수들의 표준편차가 크고 독립변수들간의 높은 상관성으로 인하여 기인된 다중공선성(multicollinerity)을 제거하기 위하여 변수제거 및 변수변환을 이용하였다. 변수제거를 위해서는 허용한계(tolerance)값과 그 역수인 분산팽창요인(VIF, Variance Inflation Factor) 값을 통하여 표 2에서와 같이 각 종속변수들과 상관관계가 가장 높은 변수들을 모형 안에 채택하고 나머지 변수들은 제거함으로써 다중공선성 문제를 해결하였다. 다중공선성과 자료의 정규성을 만족시키고 등분산 가정을 만족시키기 위하여 Box-Cox 변수변환을 실시하였다(Box et al., 1964). Box-Cox 변수변환 결과, 네 가지 변형률 요소 모두 로그변환이 가장 적합함을 보였으며, 로그변환 후 자

료에 대한 정규성(normality) 가정을 만족시켰다. 따라서 본 연구에서는 종속변수와 독립변수들은 로그회귀모델을 통하여 분석하였다. 로그회귀모델은 오차항의 분산을 낮추는 등의 여러 가지 장점이 있기 때문에 표 3에 제시된 회귀모델들에서 보는 바와 같이 양변에 자연대수를 취한 로그회귀모델 형태로 변수변환을 실시하였다.

포장체 내부반응모델은 포장층의 두께와 FWD 처짐계수값을 입력으로 하여 아스팔트 하부의 인장변형률, 아스팔트 중앙의 압축변형률, 보조기층 상부의 압축변형률, 노상토 상부의 압축변형률에 대해서 각각 개발하였다(표 3). 표 3의 다중회귀모델을 통해 인장변형률과 압축변형률은  $H_{ac}$ 와  $H_{sg}$ 가 회귀모델에서 중요한 요인으로 작용함을 알 수 있다. 인장변형률에서는  $H_{sg}$ 가 유의하지 않은 변수로 작용하지만, 압축변형률인 경우에는 부(negative)의 관계로 유의한 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다. 또한  $H_{ac}$  요인은 인장변형률에서는 정(positive)의 유의한 영향을 주지만, 압축변형률에서는 부의 유의한 영향을 주고 있음이 밝혀졌다.  $H_{subbase}$ 의 경우는 아스팔트 하부 인장변형률과 보조기층 상부의 압축변형률에는 정의 유의한 영향을 주지만, 반대로 노상토 상부의 압축변형률에는 부의 유의한 영향을 주고 있다.

표 2. 민감도 분석을 통한 포장체 반응과 처짐계수와의 상관관계

변형률 요소	포장체 내부반응모델	R <sup>2</sup>
$\epsilon_{ac}$	$\log(\epsilon_{ac}) = 1.106\log(BDI) + 0.289\log(H_{ac}) + 0.025\log(H_{subbase}) + 3.124$	0.9879
$\epsilon_{cac}$	$\log(\epsilon_{cac}) = 1.076\log(SCI) + 1.122\log(H_{ac}) + 0.315$	0.9706
$\epsilon_{subbase}$	$\log(\epsilon_{subbase}) = 1.106\log(BDI) - 0.087\log(H_{ac}) + 0.040\log(H_{subbase}) - 0.046\log(H_{sg}) + 5.239$	0.9706
$\epsilon_{sg}$	$\log(\epsilon_{sg}) = 1.022\log(BCI) - 0.033\log(H_{ac}) - 0.505\log(H_{subbase}) - 0.156\log(H_{sg}) + 6.312$	0.9072

\*  $H_{ac}$ : 아스팔트층 두께,  $H_{subbase}$ : 보조기층 두께,  $H_{sg}$ : 노상 두께

추정된 각 변형률 요소에 대하여 회귀모델에 대한 회귀선이 관측치들을 얼마나 잘 설명하는지를 검증



하는 결정계수( $R^2$ )는 표 3에 나타나 있다. 본 연구에서 제시한 포장체 내부반응모델인 다중회귀모델을 통해 얻어진 예측값이 실제 관측값과 유사하게 산출되는 것을 알 수 있다. 또한 제시된 독립변수들이 각 변형률 요소들을 잘 설명해 주고 있음을 알 수 있다.

### 3. 현장 및 실내시험

아스팔트 포장체의 구조적 상태 평가기법을 검증하기 위하여 전국 국도 11개 구간 및 지방도 8개 구간을 선정하여 FWD 시험, DCP 시험, 실내시험을 위한 아스팔트 코어채취를 수행하였다. 실내시험으로는 아스팔트 혼합물의 회복탄성계수 측정을 위하여 삼축압축반복재하시험을 수행하였다. 시험구간 선정은 지역 및 환경조건과 아스팔트층 두께를 고려하여 선정하였다. 지역적 기준은 남부, 중부, 북부지방으로 하였으며, 포장두께 기준은 국도의 두꺼운 포장과 지방도의 얇은 포장으로 선정하였다.

#### 3.1 FWD 현장조사

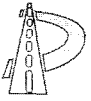
본 연구에서는 포장체의 구조적 상태를 분석하고 포장층의 탄성계수 역산분석을 위해 FWD 현장시험을 실시하였다. FWD 현장시험은 국도의 경우에는 20m 간격으로 약 300m 구간에 대하여 실시(1개 구간당 15개 지점)하였고, 지방도의 경우에는 10m 간격으로 약 100m 구간에 대하여 실시(1개 구간당 10개 지점)하였다. FWD의 하중수준은 3단계(약 5ton, 8ton, 10ton)로 하였으며, FWD 시험시 적외선 온도계를 이용하여 포장체의 표면온도를 계측하였다. 표 4는 현장조사 자료의 처짐량에 대하여 온도 보정을 한 후, FWD 처짐값중 하중판 중심( $D_0$ )과 7번째 센서( $D_7$ )에서의 처짐값, 표준편차, 공분산을 보여주고 있다.  $D_0$ 의 경우, 지방도의 평균처짐값이 국도보다 약 2.5배 크게 발생하였으며, 표준편차도 매우 큰 것을 알 수 있다.

표 4. 현장조사 자료의  $D_0$ 과  $D_7$ 의 처짐량 분석

구 간	$D_0$			$D_7$			
	Mean( $\mu$ m)	SD( $\mu$ m)	COV(%)	Mean( $\mu$ m)	SD( $\mu$ m)	COV(%)	
국 도	가오작	191.6	31.3	16.3	44.4	16.5	37.1
	영주	144.1	27.1	18.8	23.2	5.7	24.8
	진부	291.3	66.6	22.8	43.7	8.4	19.3
	추부	187.9	32.4	17.3	48.4	12.1	25.1
	평창	266.4	43.7	16.4	33.0	7.9	24.1
	당진	275.3	68.4	24.8	40.9	6.6	16.1
	산청	164.8	40.0	24.2	50.8	11.3	22.3
	성전	218.4	27.9	12.8	42.8	4.6	10.7
	신팔	125.7	8.3	6.6	42.6	5.8	13.5
	충주	166.3	21.5	12.9	42.9	5.7	13.4
지 방 도	통도사	252.8	55.5	22.0	52.7	6.2	11.8
	평균	207.7	38.4	17.7	42.3	8.3	19.8
	갈원	531.6	102.9	84.3	24.6	15.9	23.9
	곤지암	284.4	66.0	24.9	3.7	8.7	5.6
	놀왕	529.8	120.3	77.7	15.7	14.7	13.1
	시목	524.6	82.2	123.1	26.8	23.5	32.6
	이천	486.2	75.0	91.6	17.9	18.8	23.9
	주덕	509.5	59.8	55.2	5.7	10.8	9.5
	교북	676.1	89.0	69.0	10.3	10.2	11.5
	안성	407.3	71.5	56.6	12.4	13.9	17.4
평균	493.7	83.3	72.8	14.6	14.6	17.2	

#### 3.2 현장 코어채취

본 연구에서는 FWD 현장조사 대상지역에서 각 지점별로 국도의 경우 4개, 지방도의 경우 2개의 코어를 채취하여 실제 아스팔트층의 두께를 파악하였으며, 표 5는 시험구간의 평균 포장층 두께를 보여주고 있다. 국도의 경우, 아스팔트층의 두께는 18~31cm 범위이며, 지방도의 경우에는 11cm~24cm의 범위로 나타났다. 국도에서는 남부지방을 제외하고 거의 대부분 구간에서 동상방지층이 있었으나, 지방도에서는 동상방지층이 존재하지 않았다. 표 5에



서 보는 바와 같이 지방도 대부분 구간에서의 보조기층 두께는 50cm 이상이었다.

표 5. 시험구간에서의 포장층의 두께

구 간	층 두께 (cm)			
	아스팔트층 (코어)	보조기층 (DCP)	동상방지층 (시공자료)	
국 도	가오작	22.9	45.2	40
	영주	24.8	22.5	20
	진부	19.5	37.5	20
	추부	24.1	35.0	25
	평창	18.0	40.0	20
	당진	30.7	35.0	15
	산청	29.4	22.5	N/A
	성전	27.3	57.5	N/A
	신팔	31.0	27.5	35
	충주	30.0	52.5	25
지 방 도	통도사	29.0	40.0	N/A
	갈원	20.2	50.0	N/A
	곤지암	21.8	70.0	N/A
	놀왕	18.0	70.0	N/A
	시목	23.5	52.5	N/A
	이천	19.3	75.0	N/A
	주덕	11.0	30.0	N/A
	고북	11.8	57.5	N/A
	안성	14.3	47.5	N/A

며, CBR 환산식은 다음과 같다(KESSLER Soils Engineering Products, Inc., 1998).

$$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}}$$

여기서, DCP : DCP 지수(1회 타격시 관입깊이)

보조기층 및 동상방지층의 두께는 타격회수와 관입깊이의 관계에서 변곡점이 발생하는 지점에서의 누적관입깊이에 의해 계산된다(그림 3). 누적타격회수와 누적관입깊이와의 관계에서 변곡점은 보조기층과 노상층의 지지력 차이로 인해 발생하게 되는 것이다.

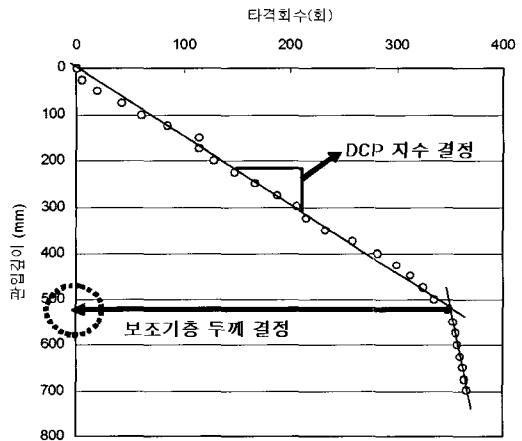


그림 3. DCP 지수 및 두께 결정 방법

### 3.3 동적관입시험

(DCP, Dynamic Cone Penetrometer)

토공부의 지지력 및 두께를 조사하기 위하여 동적 관입시험을 아스팔트 코어 채취 후에 보조기층면 상단에서 수행하였다. DCP 지수는 1회 타격시 관입깊이로 현장조사 자료를 이용하여 관입깊이를 타격회수로 나누어 계산한다. 여기서 DCP 지수는 타격회수에 대한 관입깊이의 기울기를 의미한다. 이와 같이 계산된 DCP 지수는 CBR값으로 환산하는데 활용되

### 3.4 삼축압축반복재하시험

현장에서 채취한 아스팔트 혼합물 시편은 실내에서 삼축압축반복재하시험을 통하여 회복탄성계수를 측정하였다. 19개 조사 대상구간에서 채취된 코어중 일부 파손된 코어를 제외하고, 총 56개 시편을 높이 150mm, 직경 100mm로 절단하여 시험을 수행하였다. 삼축압축반복재하시험은 UTM25 장비를 사용하였으며, 0.1초 하중재하, 0.9초 휴지기, 사용된 축차응력은 827kPa이며, 구속압은 138kPa이다 (Witczak et al., 2002).



## 4. FWD를 이용한 포장체 각 층의 구조적 상태 평가

### 4.1 아스팔트층의 상태 평가

아스팔트층의 상태 평가기법을 검증하기 위해 본 연구에서는 먼저 FWD 조사 자료를 이용하여 “ $\log(E_{ac}) = -1.183\log(H_{ac}) - 1.103\log(SCI) + 4.356$ ”의 회귀식을 활용하여 아스팔트의 탄성계수를 추정하였다. 그림 4는 회귀식으로 산출된 아스팔트 층의 탄성계수와 삼축압축반복재하시험에서 결정된 회복탄성계수와의 관계를 보여주고 있다. 예측된 탄성계수가 실측값보다 3~5배 크게 나오는데 이는 FWD 하중과 삼축반복재하시험 하중재하 주기가 상이하기 때문에

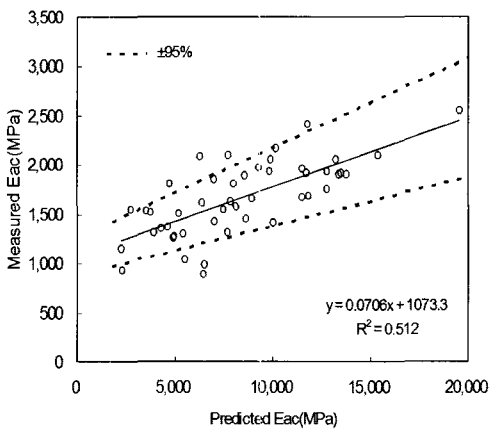


그림 4. 예측과 실측된 탄성계수 비교

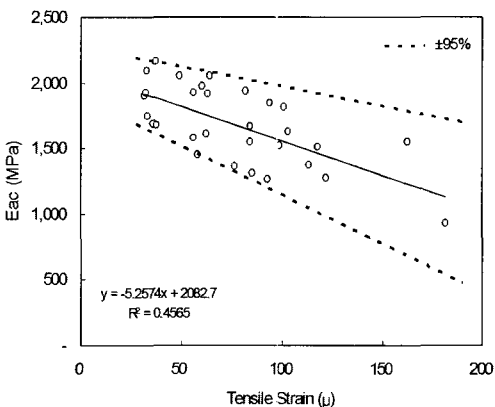


그림 5. 변형률과 계측 탄성계수와의 관계

발생한 결과로 판단된다.

그림 5는 포장체 예측 모델을 이용하여 계산된 아스팔트 하부의 인장변형률과 계측한 아스팔트 포장체의 탄성계수와의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 두 인자간의 상관도는 높지 않으나 아스팔트 탄성계수가 감소함에 따라 인장변형률이 증가함을 알 수 있다. 이는 주어진 인장변형률값에 따라 아스팔트 혼합물의 탄성계수의 범위를 추정하는데 적합하리라 사료된다.

### 4.2 보조기층의 상태 평가

보조기층의 상태 평가는 FWD와 DCP 조사자료를 이용하여 수행하였으며, 동상방지층은 보조기층으로 포함하여 분석하였다. FWD에서 측정된 처짐량을 이용하여 보조기층의 상태를 평가할 수 있는 BDI값을 산출하고, 이를 포장체 반응모델에 적용하여 보조기층 상부의 압축변형률을 계산한다. 또한 DCP를 이용하여 계측된 DCP 지수를 이용하여 보조기층의 CBR값을 산정한다. 앞의 과정을 토대로 BDI, 압축변형률, CBR의 상관관계를 통하여 보조기층의 상태를 평가하게 된다.

현장조사 자료를 분석한 결과, 보조기층의 BDI와 CBR값과의 관계는 그림 6과 같이 나타났으며, 압축변형률과 CBR값과의 관계는 그림 7과 같이 나타났다. 그림에서 보듯이 BDI 및 변형률이 감소할수록

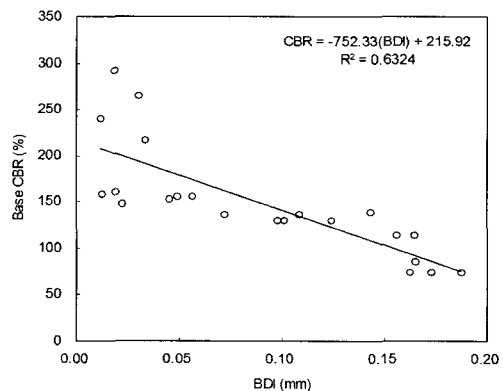


그림 6. BDI와 CBR과의 관계

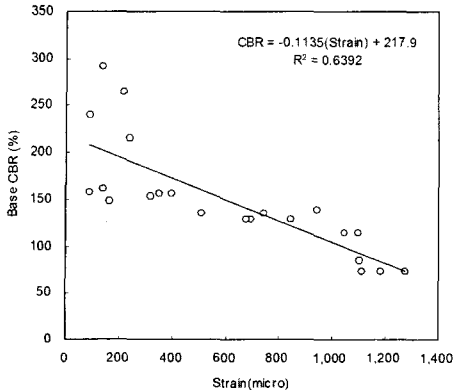


그림 7. 변형률과 CBR과의 관계(보조기층)

CBR은 증가하는 것을 알 수 있다. 보조기층의 BDI가 0.05mm 이하, 변형률이 400 $\mu$ strain 이하인 부분이 국도이고, 0.05mm 초과, 400 $\mu$ strain 초과되는 부분은 지방도이다. 분석결과, 국도의 CBR값이 지방도의 CBR값보다 더 크게 나타났으며, 변형률 및 BDI는 국도가 지방도보다 전반적으로 작게 나타났다. 이 분석자료는 포장체의 구조적 상태에 대한 분류시 기준으로 활용할 수 있다.

### 4.3 하부층의 상태 평가

하부층의 상태 평가는 FWD 조사자료와 DCP 조사자료를 이용하여 수행하였다. 평가방법은 보조기층의 상태 평가와 동일하게 실시하였다. FWD에서 측정된 처짐량을 이용하여 하부층의 상태를 평가할 수 있는 BCI를 산출하고, 이를 포장예측모델에 적용하여 하부층 상부의 압축변형률을 계산한다. 또한 DCP를 이용하여 계측된 자료를 이용하여 하부층의 CBR을 산정한다. 앞의 과정을 토대로 BCI, 압축변형률, CBR의 상관관계를 통하여 하부층의 상태를 평가하게 된다.

현장조사 자료를 분석한 결과, 하부층의 BCI와 CBR과의 관계는 그림 8과 같이 나타났으며, 변형률과 CBR과의 관계는 그림 9와 같이 나타났다. 그림에서 보듯이 BCI 및 변형률이 감소할수록 CBR은 증가하는 것을 알 수 있다. 하부층의 BCI가 0.05mm

이하, 변형률이 200 $\mu$ strain 이하인 부분이 국도이고, 0.05mm 초과, 200 $\mu$ strain 초과되는 부분은 지방도이다. 분석결과, 국도의 CBR이 지방도의 CBR보다 더 크게 나타났으며, 변형률 및 BCI는 국도가 지방도보다 더 작게 나타났다. 이 분석자료는 소성변형 등의 원인이 될 수 있는 노상의 구조적 상태를 분석하는데 활용할 수 있다.

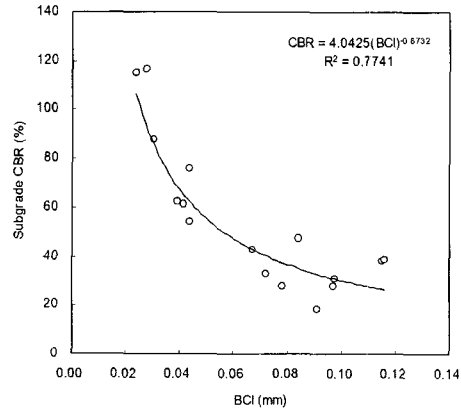


그림 8. BCI와 CBR과의 관계

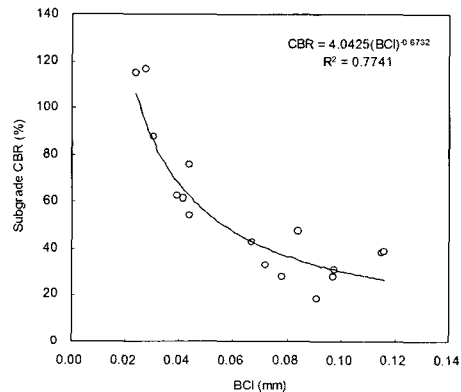


그림 9. 변형률과 CBR과의 관계(하부층)

## 5. 아스팔트 포장체의 구조적 상태 평가기준

FWD 현장조사 자료는 포장체의 상태 평가, 유지보수 관리수준 등의 정립에 활용할 수 있다(Kim et al., 2000, Xu et al., 2002). 본 연구에서는 앞 절





에서 수행한 연구결과를 바탕으로 FWD 처짐값, 포장체 반응값을 이용하여 아스팔트 포장체의 구조적 상태 평가를 정립하였다. 아스팔트 포장체의 구조적 상태는 FWD 역산 아스팔트층 탄성계수와 아스팔트층 하부의 인장변형률을 이용하여 3단계(상, 중, 하)로 분류하였다. 보조기층의 구조적 상태는 BDI값과 보조기층 상부의 압축변형률, 동적관입시험을 통해 계산된 CRB값을 이용하여 총 3단계로 분류하였다. 하부층의 경우에는 BCI값과 노상층 상부의 압축변형률, 노상 CBR값을 이용하여 2단계로 분류하였다. 아스팔트 포장체의 구조적 상태 평가기준은 표 6에 요약하였다.

표 6. 아스팔트 포장체의 구조적 상태 평가기준

구조적 상태	아스팔트층		보조기층			하부층		
	역산탄성 계수 (GPa)	실측탄성 계수 평균값 (GPa)	BDI (mm)	변형률 (%strain)	CBR (%)	BCI (mm)	변형률 (%strain)	CBR (%)
상	>10	2	<0.05	<400	>150	<0.05	<200	>50
중	5~10	1.8	0.05~0.15	400~1,000	120~150	-	-	-
하	<5	1.4	>0.15	>1,000	<120	>0.05	>200	<50

## 6. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 FWD 처짐값을 이용하여 아스팔트 포장체의 구조적 상태를 평가할 수 있는 기법과 상태 평가기준을 제시하였다. 아스팔트 포장체의 구조적 상태 평가기법 개발을 위하여 아스팔트 포장체 구조 해석 프로그램(KPAVE)을 이용하여 가상적 포장체 내부반응 데이터베이스를 구축하였다. 가상적 데이터베이스는 통계적 분석을 이용하여 아스팔트 포장체 내부반응모델 개발에 사용되었다. FWD 처짐값, 동적관입시험, 삼축압축반복재하시험 결과를 이용하여 아스팔트 포장체 구조적 상태 평가기법을 제시하였고 요약하면 다음과 같다.

1. 아스팔트 포장체의 내부반응모델에서 아스팔트층

하부의 인장변형률은 BDI, 아스팔트층 중앙의 압축변형률은 SCI, 보조기층 상부의 압축변형률은 BDI, 노상층 상부의 압축변형률은 BCI를 이용하여 계산할 수 있었다.

2. 국도 11개 구간, 지방도 8개 구간에 대해서 FWD, 동적관입시험, 코어채취, 삼축압축반복재하시험을 실시하였으며, 이를 통해 포장체의 구조적 상태 평가기법 개발 및 검증을 수행하였다. 아스팔트층의 구조적 상태 평가인자로 포장체 내부반응모델을 통해 계산된 아스팔트층 탄성계수와 아스팔트층 하부의 인장변형률을 선정하였다. 검증결과, 예측된 탄성계수가 실측된 탄성계수보다 약 3~5배정도 크게 나타났으며, 이러한 차이는 두 시험의 하중재하 주기가 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

3. FWD 처짐값에서 계산된 BDI값과 보조기층 상부의 압축변형률값은 보조기층의 구조적 상태를 대표할 수 있으며, 이는 보조기층 CBR값과의 상관관계를 통하여 검증하였다. 또한 하부층에서는 BCI값과 하부층 상부의 압축변형률이 구조적 상태 평가를 위한 적절한 인자로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원에서 지원한 “아스팔트 포장체의 구조적 적정성 및 상태 평가 시스템 개발” 과제의 연구수행 결과입니다.

## 참고문헌

1. 한국건설기술연구원(2005), 2004 도로포장관리시스템, 최종보고서.
2. 손준철(2006), FWD를 이용한 아스팔트 포장의 공용성 평가 기법 개발, 박사학위 논문, 경희대학교.
3. Bentsen, R. A., S. Nazarian and J. A. Harrison(1989), "Reliability Testing of Seven Nondestructive Pavement Testing Devices," "Nondestructive Testing of Pavement and



Backcalculation of Moduli," *ASTM STP 1026*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania.

4. Box, G. E. P. and Cox, D. R.(1964), An analysis of transformations. *Journal of Royal Statistical Society*, Series B, vol. 26.
5. KESSLER Soils Engineering Products, Inc.(1998) *KESSLER DCP USER'S MANUAL*.
6. Kim, Y. R., S. R. Ranjithan, J. D. Troxler, and B. Xu.(2000) Assessing Pavement Layer Condition Using Deflection Data. *NCHRP Report 10-48*, TRB, National Research Council, Washington, D. C.
7. Witzczak, M. W., K. Kaloush, T. Pellinen, M. E. Basyouny, and H. V. Quintus.(2002) Simple Performance Test for Superpave Mix Design, *NCHRP Report 465*, TRB, National Academy Press, Washington, D. C.
8. Xu, B., S. R. Ranjithan, and Y. R. Kim.(2002) A New Condition Assessment Procedure for Asphalt Pavement Layers Using FWD Deflections. *Transportation Research Record 1860*, TRB, National Research Council, Washington, D. C.

접 수 일: 2006. 9. 15  
심 사 일: 2006. 9. 26  
심사완료일: 2006. 12. 5