

# 시멘트콘크리트 포장구조계의 층별물성 및 응력추정에 관한 연구

## A Study on Evaluation of Layer Moduli and Stresses in Cement Concrete Pavement System

이 승 원\* · 김 문 겸\*\* · 김 수 일\*\*\* · 황 학 주\*\*\*  
Lee, Seong Won · Kim, Moon Kyum · Kim, Soo Il · Hwang, Hak Joo

### Abstract

An inverse self-iterative procedure is developed to estimate layer moduli and stresses in cement concrete pavement systems from the falling weight deflectometer deflection basins. The existing concrete pavement highways are analyzed using coupled analysis procedure of finite element and layer elastic theory for models obtained through factorial design, from which the characteristics of deflection basins are studied and the empirical equations are proposed for the estimation of layer moduli. The empirical equations are used to assume initial moduli, and the relations between the rate of change of moduli and deflections are used in the self-iterative procedure to ensure accuracy of moduli. The developed computer program of this procedure is verified through various numerical model tests.

### 요 지

본 연구에서는 FWD시험의 표면 처짐곡선으로부터 시멘트 콘크리트 포장구조체의 물성 및 응력을 추정할 수 있는 역산반복기법을 개발하였다. 국내에 가설되어 있는 시멘트 콘크리트 포장구조체에 대한 요소설계를 실시하여 구한 모형들에 대하여 유한요소와 층탄성이론을 조합한 해석방법을 적용하여 처짐특성 및 탄성계수 추정식을 구하였다. 추정식에 의한 각 층의 탄성계수를 초기 탄성계수로 하고, 탄성계수 변화율과 처짐 변화율의 관계를 이용하여 반복역산시 탄성계수 보정에 사용하였다. 각 고속도로 노선별로 효율적인 역산반복기법을 전산화하였으며, 수치모형을 통하여 신뢰성 및 타당성을 검증하였다.

### 1. 서 론

콘크리트 포장구조체는 계속적인 차량의 통행으

로 인해 반복하중을 받게 되며, 결국에는 피로파괴에 이르게 되는 경우가 일반적이다. 포장구조체에 하중이 가해지는 경우 포장체에 발생하는 변위 및

\* 정회원 · 연세대학교 대학원 박사과정, 토목공학과

\*\* 정회원 · 연세대학교 공과대학 조교수, 토목공학과

\*\*\* 정회원 · 연세대학교 공과대학 교수, 토목공학과

응력은 포장구조체 각 층의 물성에 좌우되며, 이 변위 및 응력을 산정하기 위해서는 시험 당시의 포장체 각 층의 탄성계수를 정확히 추정하여야 한다. 그러므로 포장구조체의 내구성 평가는 정확한 물성 추정을 통하여 이루어 질 수 있다.

종래에는 포장구조체의 역학적 상태를 평가하는 방법으로 포장체를 파괴하면서 CBR시험이나 평판재하시험을 실시하여 왔다. 그러나 최근에는 여러 가지의 비파괴 시험방법이 개발되어 비파괴 시험하중을 포장체 표면에 가하여 일련의 표면처짐등을 측정하고, 이들로부터 포장구조체를 평가하는 방법이 사용되기 시작하였다. 1940년대 말에 비파괴 시험방법으로 벤켈만빔(Benkelman beam)이 처음 소개되어 사용되기 시작하였으며 그 후 보다 신속하고 경제적이며 과학적인 비파괴 시험방법의 요구에 따라 진동하중을 이용한 비파괴 시험방법이 개발되었으며<sup>(1)</sup> 1963년에는 Bretonniere, S.<sup>(2)</sup> 가 비파괴 시험 장비로서 deflectete a boulet 을 제작하면서 충격하중에 의한 비파괴 시험 장비인 Falling Weight Deflectometer(FWD)가 개발되어 현재 여러 유형의 FWD가 개발되어 사용되고 있다.<sup>(3)</sup> 또한 1960년대 말 미국의 오하이오 도로국에서 포장평가를 위해 정현 진동 하중에 의한 비파괴 시험방법인 Dynaflect가 사용된 이후<sup>(4)</sup>, 같은 유형인 Road Rater, WES Vibrator, FHWA Vibrator 등이 개발되어 사용되고 있다.

이러한 비파괴 시험장비들은 시험하중에 의해 발생하는 표면처짐을 측정하고, 이를 해석함으로써 포장구조체를 평가하게 된다. 1967년 Dorman, G. M.과 Edward, J. M.<sup>(5)</sup>은 진동을 이용한 비파괴 시험방법에 의하여 최대처짐 이외에 처짐의 특성을 분석함으로써 포장구조체의 물성을 추정할 수 있는 해석적방법을 제안하였으며 이에 1977년 Irwin, L. H.등<sup>(6)</sup>은 측정처짐치와 이론적 처짐이 일치할 때까지 탄성계수를 보정하면서 현 위치의 탄성계수를 결정하는 역산반복기법(inverse self-iterative procedure)을 제안하였다. 1983년 Uddin, W.등<sup>(7)</sup>은 위의 방법을 적용하여 콘크리트 포장구조체의 현 위치의 물성을 추정할 수 있는 전산 프로그램을 개발하였다. 이외에도 비파괴 시험방법 및 포장체의 유형에 따라 많은 전산 프로그램들이 개발되기 시작하였다<sup>(8)</sup>.

본 연구에서는 우리나라에서 상용중인 시멘트 콘크리트 포장구조체의 단면과 물성에 대하여 이론적 처짐특성을 분석함으로써, FWD에 의한 처짐곡선으로부터 포장구조체 각 층의 물성 및 응력을 추정할 수 있는 효율성과 정도가 높은 역산반복기법을 개발하고, 수치모델을 통하여 그 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 처짐특성분석

### 2.1 해석모델

시멘트 콘크리트 포장구조체의 물성 및 응력추정은 상용중인 국내의 콘크리트 포장을 대상으로 하였다. 즉 국내에 가설되어 있는 각 고속도로 노선별로 실제 단면을 감안하여 표 1과 같은 구조체 단면을 설정하여 각 노선별로 각 층의 두께는 일정한 것으로 하였다. 우리나라의 경우 도로설계 및 해석에 사용되고 있는 AASHTO 설계법은 18 kips 단축하중을 표준축하중으로 정하고 있다. 그러므로 비파괴 시험중에서 FWD를 사용하게 되면 표준축하중과 같은 9kips(4100 kgf)의 시험하중을 재하함으로써 응력상태에 따른 비선형성을 고려하지 않고도 포장구조체의 물성을 추정할 수 있다<sup>(9)</sup>. 그러므로 본 연구에서는 그림 1과 같이 콘크리트층, 빈배합 콘크리트층, 보조기층, 노상의 4층으로 이루어진 콘크리트장구조체의 표면에 접지면이 26.587 cm × 26.587 cm이고, 접지압이 5.80kgf/cm<sup>2</sup>인 정사각형 등분포하중이 작용하는 해석모델을 설정하였으며 처짐의 측정위치는 일반적으로 FWD 실험에서 사용하고 있는 바와 같이 재하 중심으로부터 30 cm

표 1. 고속도로 노선별 시멘트 콘크리트 포장구조체의 설계단면

(단위 : cm)

고속도로 노선	각 단면의 두께			
	무근콘크리트	빈 배합콘크리트	보조기층	노상
1 호남선(대전-광주 구간) 88선	30	-	45	∞
2 영동-동해 연결선 부마선(신철구간)	30	-	20	∞
3 부마선(화장구간)	25	-	20	∞
4 호남선(광주-고서 구간) 남해선(마산-진주 구간)	30	15	15	∞
5 중부선	30	15	30	∞

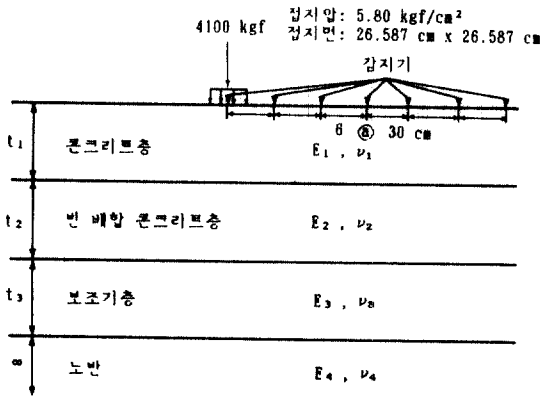


그림 1. 해석모델

간격으로 7개 지점으로 하고 그 크기는 하중 재하 중심으로부터 시작하여 각각  $w_1, w_2, \dots, w_7$ 으로

표 2. 시멘트 콘크리트 포장구조체의 요소 설계

요 소	수 준	무근 콘크리트	빈 배합콘크리트	보 조 기 층	노 상
탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	하	200,000	150,000	1,000	500
	중	250,000	165,000	3,000	1,500
	상	300,000	180,000	5,000	3,000
포아손 비		0.15	0.15	0.35	0.40

## 2.2 탄성계수가 처짐곡선에 미치는 영향

다층 탄성구조체에 일정 하중의 재하로 인해 발생하는 처짐은 각 층의 탄성계수에 영향을 받는다. 각 층의 탄성계수가 처짐곡선에 미치는 영향을 보기 위하여 5개의 고속도로 노선중에서 호남선(광주-고서구간) 및 남해선(마산-진주구간) 설계단면에 대해 표 2의 중 수준의 물성을 기준으로 해석모델을 정하였다. 이러한 기준모델의 탄성계수를 2배 및 0.5배로 변화시켰을때 구조해석에 의해 구한 처짐곡선을 기준모델에 대한 처짐곡선과 비교하여 그림 2에 도시하였다.

그림 2에 도시된 바와 같이 노상층의 탄성계수는 처짐곡선에 가장 큰 영향을 주고 무근 콘크리트층과 빈 배합 콘크리트층의 탄성계수는 하중재하지점의 처짐에는 큰 영향을 주지만 거리가 멀어질수록 그 영향은 감소하여 하중재하지점에서 180

표시하였다.

물성추정을 위한 처짐특성을 분석하기 위하여 각 고속도로 노선의 단면별로 표 2와 같이 요소설계(Factorial Design)를 수행하였다. 표 2에서 탄성계수는 각 층의 재료에 대한 가능한 범위내에서 최대, 최소와 중간값을 선택하였으며 포아손비는 일정 재료에 대해 작은 범위에 있으며, 탄성해석시 큰 영향을 미치지 않으므로 무근 콘크리트 및 빈 배합 콘크리트는 0.15, 보조기층은 0.35, 노상은 0.40으로 가정 하였다<sup>9, 10)</sup>. 표 2의 물성을 조합하여 3층 구조체의 경우는  $3^3=27$ 개, 4층 구조체의 경우는  $3^4=81$ 개의 해석대상을 각 고속도로 노선별로 구성하였다. 해석 프로그램으로는 판 이론 및 Burmister 기초이론을 적용한 유한요소해석 프로그램<sup>11)</sup>을 이용하여 이론적 처짐곡선을 구하고 이로부터 처짐특성을 분석하여 탄성계수의 추정을 위한 자료로 사용하였다.

cm 떨어진 지점의 처짐에는 거의 영향을 주지 않는다. 보조기층의 탄성계수는 처짐곡선 전체에 걸쳐서 그 영향이 미소함을 알 수 있다. 또한 무근 콘크리트층, 빈 배합 콘크리트층의 탄성계수가 감소함에 따라 처짐곡선의 기울기는 증가하나 노상층에 의한 변화는 미소함을 알 수 있다. 3층 구조체의 경우도 비슷한 양상을 보이나, 단지 4층 구조체의 경우보다 각 층의 탄성 계수가 처짐곡선에 미치는 영향이 약간 큼을 알 수 있다.

콘크리트 포장구조체의 처짐특성을 분석한 결과, 노상의 탄성계수는  $w_i$ 의 크기에 따라 추정할 수 있으나 기타층의 탄성계수는 특정 지점의 처짐뿐만 아니라 처짐곡선의 기울기 및 형상을 나타내는 일련의 처짐지수등도 고려하여 추정하여야 할 것으로 판단된다.

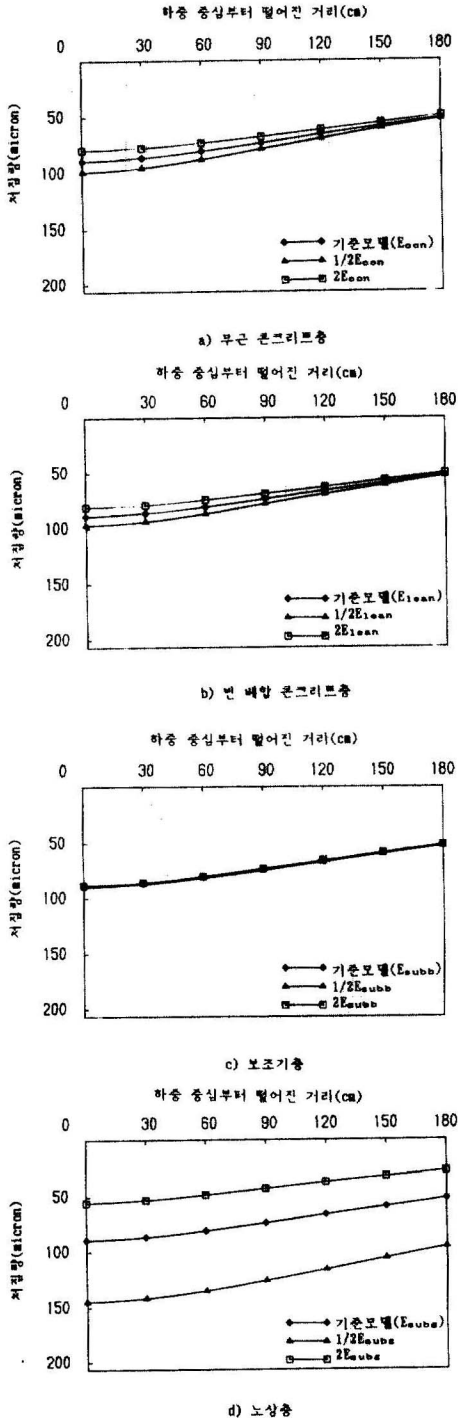


그림 2. 탄성계수가 처짐곡선에 미치는 영향

### 2.3 처짐곡선에 의한 탄성계수 추정

시멘트 콘크리트 포장구조체 각 층의 탄성계수는 2.2 절에서 분석한 바와 특정지점의 처짐과 일련의 처짐지수의 함수로 나타낼 수 있다. 즉 노상층의 탄성계수,  $E_{sub}$ 는 식 (1)과 같이  $w_7$ 의 함수로

표 3. 고속도로 노선별 각 층의 탄성계수 추정식

고속도로 노선	각층의 탄성계수 추정식	상관계수 ( $r^2$ )
1*	$\log_{10}(E_1/E_3) = 0.78560 - 2.62989 \log_{10}(F_4)$	0.99943
	$\log_{10}(E_2/E_3) = 1.59602 + 13.21798 \log_{10}(F_1)$ $- 19.85951 \log_{10}(F_5)$	0.92275
	$\log_{10}(E_3) = 5.26856 - 1381.76715/w_7^2$ $- 1.19734 \log_{10}(w_7)$	0.99067
2*	$\log_{10}(E_1/E_3) = 0.81791 - 2.41091 \log_{10}(F_4)$	0.99985
	$\log_{10}(E_2/E_3) = -1.26152 - 2.85970 \log_{10}(F_5)$	0.54097
	$\log_{10}(E_3) = 5.10333 - 703.67396/w_7^2$ $- 1.10947 \log_{10}(w_7)$	0.99850
3*	$\log_{10}(E_1/E_3) = 0.49438 + 0.00066/F_1^2$ $+ 0.00033SP_1^2$	0.99983
	$\log_{10}(E_2/E_3) = 2.60351 + 13.06464F_2$ $- 16.55190F_5$	0.68642
	$\log_{10}(E_3) = 4.98196 - 585.59745/w_7^2$ $- 1.04171 \log_{10}(w_7)$	0.99852
4*	$\log_{10}(E_1/E_4) = -0.71317 - 0.01439/F_1 + 0.56535$ $LAA_1 - 3.451621 \log_{10}(F_2)$	0.99018
	$\log_{10}(E_2/E_4) = 0.13997 - 0.77994 \log_{10}(F_2)$ $+ 0.71756 \log_{10}(w_7)$	0.99081
	$\log_{10}(E_3/E_4) = -0.85008 - 1.50185 \log_{10}(w_2 - w_3)$ $- 1.15747(w_1 - w_2) + 0.00512w_7$	0.59647
	$\log_{10}(E_4) = 5.09694 - 1.12920 \log_{10}(w_7)$	0.99911
5*	$\log_{10}(E_1/E_4) = 0.01141 - 0.00202 w_6$ $- 3.48898 \log_{10}(F_5)$	0.98857
	$\log_{10}(E_2/E_4) = -0.12923 - 1.01723 \log_{10}(w_6 - w_7)$ $+ 1.73701 \log_{10}(w_7)$	0.98848
	$\log_{10}(E_3/E_4) = 4.80219 - 1.45177 \log_{10}(w_6 - w_7)$ $+ 53.77191 F_1 - 36.26039 F_5$	0.70962
	$\log_{10}(E_4) = 5.14345 - 1.15690 \log_{10}(w_7)$	0.99597

\* 1. 호남선(대전-광주 구간) 및 88선  
2. 영동-동해 연결선 및 부마선(신설구간)  
3. 부마선(확장구간)  
4. 호남선(광주-고서 구간) 및 남해선(마산-진주 구간)  
5. 중부선

나타낼 수 있다.

$$E_{subg} = f(w_j) \quad (1)$$

또한 무근 콘크리트층의 탄성계수  $E_{conc}$ , 빈 배합 콘크리트층의 탄성계수  $E_{lean\ conc}$ , 보조기층의 탄성계수  $E_{subb}$  는 식 (2)와 같이 일련의 치짐지수의 함수로 나타낼 수 있다.

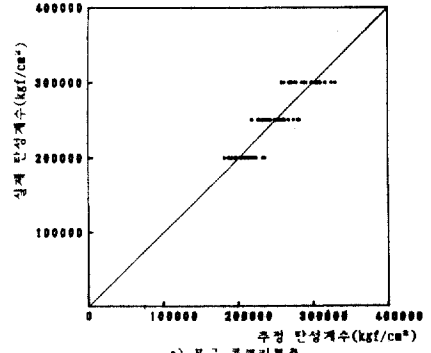
$$E_{conc}, E_{lean\ conc}, E_{subb} = f(w_j, A, PR, F_k, TS_1, \dots) \quad (2)$$

여기서  $w_j$  는  $j$  번째 측정점의 치짐,  $A$  는 치짐곡선의 면적,  $SPR$  은 분산도이며  $F_k$  와  $TS_1$  은 치짐곡선의 기울기를 나타내는 치짐지수이다.

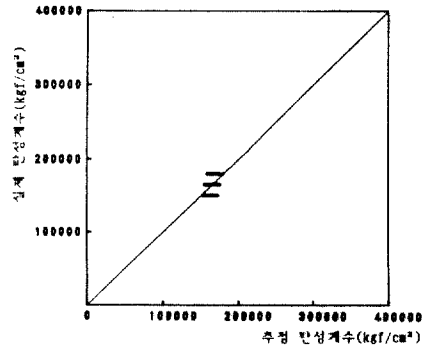
본 연구에서는 식 (1) 및 식 (2)의 탄성계수 추정식을 구하기 위하여 표 2의 요소설계에 의한 해석모델의 이론적 치짐곡선들을 회귀분석의 통계자료로 사용하였으며 회귀분석은 SPSS package 중 STEPWISE 프로그램<sup>(12)</sup>을 이용하여 독립변수들중에서 종속변수와 상관성이 높은 변수부터 선택하여 결정계수  $r^2$ 이 가장 높은 회귀 곡선식을 구하였다. 표 3에는 이러한 회귀분석을 통하여 구한 각 고속도로 노선별 각 층의 탄성계수 추정식을 각각 표시하였다.

회귀분석결과 각 고속도로 노선별로 노상층 및 콘크리트층의 탄성계수에 대해서는  $r^2$ 이 0.99 이상으로 상관성이 극히 높지만, 보조기층의 탄성계수에 대해서는  $r^2$ 이 0.54 부터 0.92까지 나타나 노상층 및 콘크리트층에 비해 상관계수가 낮다.

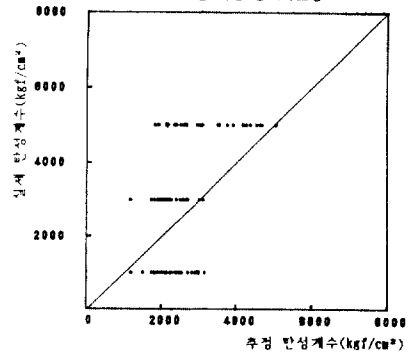
추정식의 신뢰성을 살펴보기 위하여 각 고속도로 노선별 해석모델의 탄성 계수와 이에 대한 이론적 치짐곡선으로부터 회귀분석에서 구한 추정식에 의해 산정된 탄성계수의 분포도를 구하였다. 그림 3은 5개의 고속도로 노선중에서 호남선(광주-고서구간) 및 남해선(마산-진주구간)의 경우의 해석 모델의 탄성계수와 추정식에 의해 산정된 탄성계수의 분포도이다. 이 분포도를 분석한 결과 노상층, 무근 콘크리트층 및 빈 배합 콘크리트층의 추정 탄성계수는 실제 탄성계수와 약간의 차이를 보이고 보조기층은 경우에 따라서 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이러한 특성은 다른 고속도로 노선의 경우도 마찬가지였다. 그러므로 회귀분석에서 구한 추정식에 의해 산정된 탄성계수에 보정을 하여 실제 탄성계수에 접근시키는 방법이 필요함을 알 수 있다.



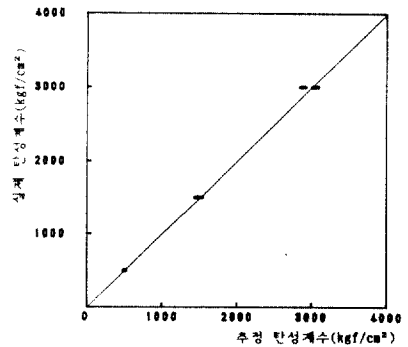
a) 무근 콘크리트층



b) 빈 배합 콘크리트층



c) 보조기층



d) 노상층

그림 3 추정탄성계수와 실제탄성계수의 분포도 (호남선(광주-고서구간), 남해선(마산-진주구간))

### 3. 역산반복기법에 의한 물성추정

시멘트 콘크리트 포장구조체의 탄성계수는 2, 3 절에서 본 바와 같이 추정식만에 의해 탄성계수를 추정할 경우 정도가 낮다. 그러므로 본 연구에서는 회귀분석에 의해 추정된 탄성계수를 초기 탄성계수로 하고 이에 대한 이론적 처짐곡선을 구조해석에 의해 산정한 후 실측 처짐곡선과 비교함으로써, 그 차가 허용 범위내에 들 때까지 탄성계수를 반복적으로 보정하여 현 위치의 실제 탄성계수를 추정하는 역산반복기법(inverse self-iterative procedure)을 적용한 전산 프로그램을 개발하였다.

#### 3.1 탄성계수 변화율에 따른 처짐변화율

역산반복기법의 적용시 탄성계수는 반복적으로 보정하여야 하는데 본 연구에서는 각 고속도로 단면별로 탄성계수 변화율에 대한 처짐변화율을 구하여 효율적인 보정계수를 적용하였다.

앞의 그림 3에서 본 바와 같이 노상토의 탄성계수는  $w_7$  에, 무근콘크리트의 탄성계수는  $w_1$  에, 빈배합 콘크리트의 탄성계수는  $w_2$  에 가장 큰 영향을 미치며, 보조기층의 탄성계수는  $w_3$  에 비교적 큰 영향을 미친다. 또한 3층 구조체의 경우 보조기층의 탄성계수는  $w_2$  에 가장 큰 영향을 미친다. 그러므로 각 층의 탄성계수에 비교적 큰 영향을 받는 지점의 처짐을 기준으로 보정계수를 산정하였다.

보정계수 산정은 먼저 각 고속도로 노선별로 앞의 표 2와 같이 각 층의 탄성계수를 상, 중, 하의 범위에 대해 각각 기준모델로 삼았다. 그리고 각 기준모델에 대하여 해당층의 탄성계수만  $\pm 5\%$  까지는 1%씩,  $\pm 10\%$  부터  $\pm 90\%$  까지는 10%씩 증감시켰을 때 산정된 이론적 처짐을 기준모델의 처짐에 대한 백분율로 구하였다. 또한 각각의 탄성계수변화율에 따른 처짐변화율의 함수는 원점을 지나는 다차회귀분석(polynomial regression)을 실시하여 역산반복기법 적용시 탄성계수의 보정계수로 사용하였다. 표 4에는 이러한 회귀분석을 통하여 구한 각 고속도로 노선별 각 층의 탄성계수 변화율과 처짐 변화율의 관계식을 각각 나타내었다.

#### 3.2 역산반복기법의 알고리즘

역산반복기법은 회귀분석에 의해 추정된 탄성계수를 초기탄성계수로 하고 이에 대한 이론적 처짐곡선을 구조해석에 의해 산정한 후 실측 처짐곡선

표 4. 고속도로 노선별 각 층의 탄성계수 변화율과 처짐 변화율의 관계식

고속도로 노 선	각 층의 탄성계수 변화율과 처짐 변화율의 관계식
1*	$\Delta E_1 = -3.94086 (\Delta w_1) + 0.07268 (\Delta w_1)^2 - 0.00047 (\Delta w_1)^3$ $\Delta E_2 = -13.48503 (\Delta w_2) + 0.60395 (\Delta w_2)^2 - 0.00762 (\Delta w_2)^3$ $\Delta E_3 = -1.17802 (\Delta w_7) + 0.01383 (\Delta w_7)^2 - 0.00008 (\Delta w_7)^3$
2*	$\Delta E_1 = -3.83823 (\Delta w_1) + 0.06870 (\Delta w_1)^2 - 0.00042 (\Delta w_1)^3$ $\Delta E_2 = -38.27786 (\Delta w_2) + 4.41484 (\Delta w_2)^2 - 0.13882 (\Delta w_2)^3$ $\Delta E_3 = -1.13691 (\Delta w_7) + 0.01252 (\Delta w_7)^2 - 0.00007 (\Delta w_7)^3$
3*	$\Delta E_1 = -3.87297 (\Delta w_1) + 0.06967 (\Delta w_1)^2 - 0.00043 (\Delta w_1)^3$ $\Delta E_2 = -33.44831 (\Delta w_2) + 3.38112 (\Delta w_2)^2 - 0.09315 (\Delta w_2)^3$ $\Delta E_3 = -1.07161 (\Delta w_7) + 0.01193 (\Delta w_7)^2 - 0.00007 (\Delta w_7)^3$
4*	$\Delta E_1 = -7.29612 (\Delta w_1) + 0.23989 (\Delta w_1)^2 - 0.00265 (\Delta w_1)^3$ $\Delta E_2 = -8.17720 (\Delta w_2) + 0.32846 (\Delta w_2)^2 - 0.00592 (\Delta w_2)^3$ $\Delta E_3 = -64.06672 (\Delta w_3) + 12.45071 (\Delta w_3)^2 - 0.6619 (\Delta w_3)^3$ $\Delta E_4 = -1.19811 (\Delta w_7) + 0.01447 (\Delta w_7)^2 - 0.00009 (\Delta w_7)^3$
5*	$\Delta E_1 = -7.18563 (\Delta w_1) + 0.23019 (\Delta w_1)^2 - 0.00252 (\Delta w_1)^3$ $\Delta E_2 = -8.02497 (\Delta w_2) + 0.27700 (\Delta w_2)^2 - 0.00408 (\Delta w_2)^3$ $\Delta E_3 = -18.37775 (\Delta w_3) + 1.20174 (\Delta w_3)^2 - 0.02440 (\Delta w_3)^3$ $\Delta E_4 = -1.19695 (\Delta w_7) + 0.01432 (\Delta w_7)^2 - 0.00009 (\Delta w_7)^3$

- \* 1. 호남선(대전-광주 구간) 및 88선
2. 영동-동해 연결선 및 부마선(신철 구간)
3. 부마선(확장 구간)
4. 호남선(광주-고서 구간) 및 남해선(마산-진주 구간)
5. 중부선

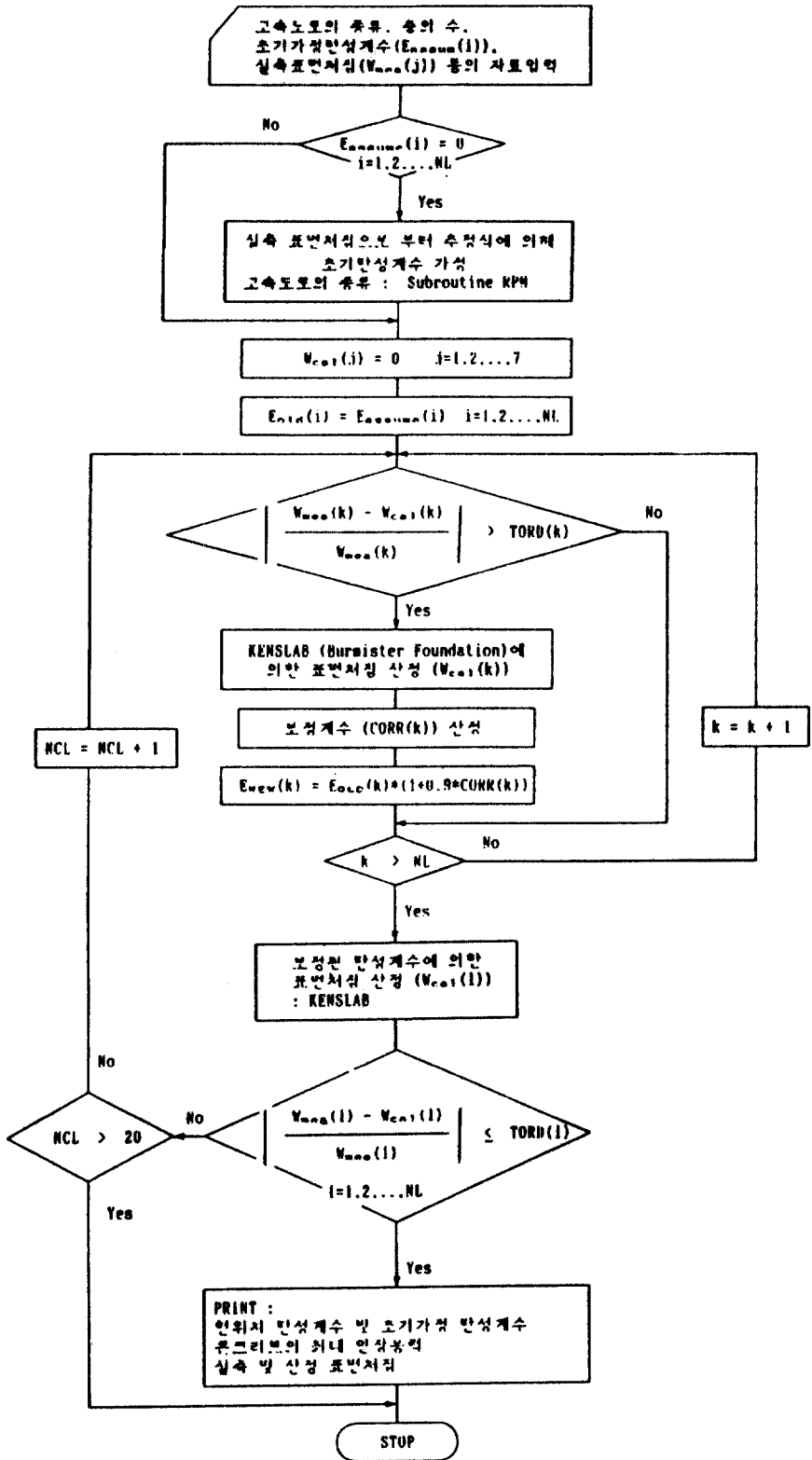


그림 4. 역산반복기법 프로그램의 흐름도

과 비교함으로써, 그 차가 허용범위내에 들 때까지 탄성계수를 반복적으로 보정하여 현 위치의 실제 탄성계수를 결정한다.

반복역산은 가정된 초기 탄성계수에 대한 이론적 처짐과 실측 처짐의 차이에 의해 3층 구조체의 경우는 노상층, 무근 콘크리트층, 보조기층 순으로 탄성계수를 보정하며, 4층 구조체의 경우는 노상층, 무근 콘크리트층, 빈 배합 콘크리트층, 보조기층 순으로 탄성계수를 보정한다. 이렇게 하여 각 층의 탄성계수가 보정되면 첫번째의 보정은 완료된다. 첫번째에 보정된 탄성계수에 의한 이론적 처짐과 실측처짐의 차가 허용오차내에 들지 않으면 탄성계수 보정을 허용오차내에 들 때까지 반복수행한다. 각 층의 탄성계수 보정은 식 (3)에 의해 보정되며 CORR(i)는 처짐 변화율과 탄성계수 변화율과의 상관관계식인 표 4의  $\Delta E_i$  로서 상관성을 고려하여 90%만 보정하였다.

$$E_{new}(i) = E_{old}(i) (1 + 0.9 CORR(i)) \quad (3)$$

반복역산시 허용오차는 처짐의 실측치에 대한 계산치의 백분율로 나타낼 수 있는데 각 층에 대하여 0.3%로 하였다. 그림 4는 역산반복기법 프로그램의 흐름이다.

#### 4. 수치모델에 의한 검증

본 연구에서 개발한 반복역산기법의 신뢰성 및 타당성을 검증하기 위하여 각 고속도로 노선별로 실제 가능한 각종 모델에 대해 수치검증을 실시하였다. 요소설계시 사용한 수치모델에 대한 이론적 처짐곡선을 실제처짐곡선으로 간주하고, 반복역산기법에 의해 추정된 탄성계수를 수치모델 본래의 탄성계수와 비교하였다.

표 5는 호남선(대전-광주구간) 및 88선의 탄성계수 및 수치모델과 이에 대한 역산결과 중 대표적인 것을 표시한 것이다. 추정값은 본 연구에서 제안된 추정식에 의한 초기 탄성계수이다. 표 5의 수치모델들은 각 층의 탄성계수가 표 2에 표시되었던 상, 중, 하의 범위와 처짐곡선에 가장 큰 영향을 미치는 콘크리트층과 노상층의 탄성계수가 서로 상과 하의 범위 그리고 하와 상의 범위도 포함하였다. 그리고 요소설계에 사용되지 않은 수치모델도 포함하였다. 이 경우 각 수치 모델에 대한 탄성계수의 최대 역산오차는 노상층의 경우는 1.4%

표 5. 호남선(대전-광주구간) 및 88선의 탄성계수 및 최대 인장응력의 비교

(단위 : kgf/cm<sup>2</sup>)

	$E_{con}$	$E_{sub}$	$E_{subg}$	Max. Stress	보정 회수
실 제 값	30000.0	5000.0	3000.0	4.62	2
추 정 값	316753.8	5819.8	3115.6		
역 산 값	290881.8	5712.7	2968.0	4.57	
오차(%)	-0.3	14.2	-1.1	-1.1	
실 제 값	20000.0	1000.0	500.0	5.93	3
추 정 값	181842.8	1306.3	463.6		
역 산 값	196043.5	1297.2	493.6	5.88	
오차(%)	-2.0	29.7	-1.3	-0.8	
실 제 값	20000.0	5000.0	3000.0	4.25	3
추 정 값	218643.0	6000.0	3162.7		
역 산 값	196076.9	5714.1	2960.6	4.19	
오차(%)	-2.0	14.3	-1.3	-1.4	

무근 콘크리트의 경우는 3.0%, 보조기층은 -30.7% 이고 반복역산시 최대보정수는 3회이었다.

표 6은 영동-동해 연결선 및 부마선(신설구간)의 경우이다. 각 수치모델에 대한 탄성계수의 최대역산오차는 노상층의 경우는 3.5%, 무근 콘크리트층의 경우는 5.1%, 보조기층의 경우는 86.6%이고 반복역산시 최대보정수는 7회이었다. 표 7은 부마선(확장구간)의 경우이다. 각 수치 모델에 대한 탄성

표 6. 영동-동해 연결선 및 부마선(신설구간)의 탄성계수 및 최대인장응력의 비교

(단위 : kgf/cm<sup>2</sup>)

	$E_{con}$	$E_{sub}$	$E_{subg}$	Max. Stress	보정 회수
실 제 값	30000.0	5000.0	3000.0	4.72	1
추 정 값	308828.0	3163.2	3045.7		
역 산 값	308828.0	3163.2	3046.5	4.76	
오차(%)	2.9	-36.7	1.5	0.9	
실 제 값	20000.0	1000.0	500.0	6.03	1
추 정 값	194472.0	1854.9	481.7		
역 산 값	200176.3	1866.4	491.9	6.02	
오차(%)	0.1	86.6	-1.6	-0.2	
실 제 값	20000.0	5000.0	3000.0	4.35	1
추 정 값	211414.7	2231.2	3114.8		
역 산 값	210195.5	2231.2	3103.9	4.44	
오차(%)	5.1	-55.4	3.5	2.1	



표 7. 부마선(확장구간)의 탄성계수 및 최대인장응력의 비교

(단위 : kgf/cm<sup>2</sup>)

	E <sub>con</sub>	E <sub>sub</sub>	E <sub>subg</sub>	Max. Stress	보정 회수
실 제 값	300000.0	5000.0	3000.0	6.08	
추 정 값	307682.7	3696.9	3011.1		
역 산 값	307682.7	36.3	29	6.13	1
오차(%)	2.6	-26.1	1.0	0.8	
실 제 값	200000.0	1000.0	500.0	7.89	
추 정 값	200828.6	1613.9	490.8		
역 산 값	200828.6	1613.9	493.1	7.91	1
오차(%)	0.4	61.3	-1.4	0.3	
실 제 값	200000.0	5000.0	3000.0	5.56	
추 정 값	216953.7	4368.5	3126.3		
역 산 값	204011.4	4259.2	3009.9	5.60	3
오차(%)	2.0	-14.8	0.3	0.7	

계수의 최대역산오차는 노상층의 경우는 3.1%, 무근 콘크리트층의 경우는 7.4%, 보조기층의 경우는 61.3%이고 반복역산시 최대보정수는 3회이었다.

표 8은 호남선(광주-고서구간) 및 남해선(마산-진주구간)의 경우이다. 각 수치모델에 대한 탄성계수의 최대역산오차는 노상층의 경우는 1.7%, 무근 콘크리트층의 경우는 10.6%, 빈 배합 콘크리트층의

표 8. 호남선(광주-고서구간) 및 남해선(마산-진주구간)의 탄성계수 및 최대인장응력의 비교

(단위 : kgf/cm<sup>2</sup>)

	E <sub>con</sub>	E <sub>lean</sub>	E <sub>sub</sub>	E <sub>subg</sub>	Max. Stress	보정 회수
실 제 값	300000.0	180000.0	5000.0	3000.0	2.12	
추 정 값	316633.9	174992.9	3555.5	3102.2		
역 산 값	315889.5	174699.3	4515.4	2997.5	2.06	3
오차(%)	5.3	-2.9	-9.7	-0.1	-2.8	
실 제 값	200000.0	150000.0	1000.0	500.0	2.94	
추 정 값	187614.6	153411.8	1174.3	491.7		
역 산 값	190659.4	157692.2	1491.4	497.7	3.04	4
오차(%)	-4.7	5.1	49.1	-0.5	3.4	
실 제 값	200000.0	165000.0	5000.0	3000.0	2.25	
추 정 값	207640.3	159392.5	2523.0	3062.8		
역 산 값	207640.3	163140.1	2523.0	3050.4	2.23	
오차(%)	3.8	-1.1	-49.5	1.7	-0.9	

표 9. 중부선의 탄성계수 및 최대인장응력의 비교 (단위 : kgf/cm<sup>2</sup>)

	E <sub>con</sub>	E <sub>lean</sub>	E <sub>sub</sub>	E <sub>subg</sub>	Max. Stress	보정 회수
실 제 값	300000.0	180000.0	5000.0	3000.0	2.11	
추 정 값	323048.4	181551.1	5112.6	3181.4		
역 산 값	297990.9	179705.0	5112.6	3000.6	2.11	1
오차(%)	-0.7	-0.2	2.2	0.0	0.0	
실 제 값	200000.0	150000.0	1000.0	500.0	2.93	
추 정 값	183764.8	152252.5	1341.4	477.8		
역 산 값	200747.0	153050.2	1341.4	491.0	2.95	3
오차(%)	0.4	2.0	34.1	-1.8	0.7	
실 제 값	200000.0	165000.0	5000.0	3000.0	2.24	
추 정 값	234261.4	164632.9	4323.8	3139.8		
역 산 값	204754.3	164624.9	4323.8	3027.3	2.23	1
오차(%)	2.4	-0.2	-13.5	0.9	-0.4	

경우는 11.5%, 보조기층의 경우는 49.5%이고 반복역산시 최대보정수는 4회이었다. 표 9는 중부선의 경우이다. 각 수치모델에 대한 탄성계수의 최대역산오차는 노상층의 경우는 1.8%, 무근 콘크리트층의 경우는 13.4%, 빈 배합 콘크리트층의 경우는 11.5%, 보조기층의 경우는 39.8%이고 반복역산시 최대보정수는 3회이었다.

표 5로 부터 표 9까지의 결과에서 보듯이 개발된 반복역산기법은 콘크리트층, 빈 배합 콘크리트층, 노상층의 탄성계수를 비교적 정확히 산출해 내고 있다. 그러나 보조기층에 대한 결과는 상대적으로 큰 오차를 포함하고 있다. 이는 그림 2에서 본 바와 같이 보조기층의 탄성계수와 처짐형상과는 큰 관계가 없는 것에 기인된다. 즉, 보조기층에서의 오차는 처짐형상에 거의 영향을 미치지 않는다.

처짐의 크기외에 콘크리트 판의 유지관리에 있어서 중요한 결정인자로서 콘크리트 판 하부의 응력크기를 정확히 산정할 필요가 있다. 따라서 전술된 보조기층에서의 오차가 콘크리트 판 하부의 최대인장응력에 미치는 영향을 검토하여 표 5로부터 표 9까지에 함께 수록하였다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 보조기층의 탄성계수의 역산오차가 큰 경우에도 최대인장응력의 오차는 10%이내로서 최대인장응력의 크기가 정확히 산출됨을 알 수 있다. 콘크리트 포장구조체의 건전도 판단 기준이 되는 표면처짐과 판 응력에 보조기층의 탄성계수의

오차가 미치는 영향이 미소하므로 본 연구에서 개발한 반복역산기법은 콘크리트 포장구조체의 물성 및 응력추정과 건전도의 판단에 효율적으로 사용될 수 있다고 생각된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 포장체의 구조적 상태를 평가하는데 중요하게 사용되는 물성추정의 효율적인 방법에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 포장체에 대한 비파괴시험으로서 Falling Weight Deflectometer(FWD)를 택하였고 시멘트 콘크리트 포장구조체의 거동을 해석하는 이론으로서 유한요소법에 의한 판이론 및 Burmister 기초이론을 택하였다.

채택된 해석이론을 적용하여 FWD의 하중에 대한 이론적 처짐특성을 해석하였다. 해석 대상으로는 현재 국내에서 사용되고 있는 고속도로의 단면을 고려한 요소설계(factorial design)를 통하여 얻어진 일련의 해석모델을 취하였다. 처짐특성 분석 결과, 하중 재하 지점에서 가장 먼 측정점의 표면 처짐은 노상의 탄성계수에만 큰 영향을 받으며 그 외의 탄성계수는 일련의 처짐지수에 관련이 깊음을 밝히고, 이들의 관계로부터 각 층의 탄성계수 추정식을 제안하였다.

탄성계수 추정식에 의해 산정된 각 층의 탄성계수를 초기 가정치로 하고 처짐 특성 분석을 통해 보다 개선된 보정 방법을 적용함으로써, FWD 시험의 처짐으로부터 포장체 각 층의 물성을 추정할 수 있는 보다 효율적이며 정도가 높은 역산방법을 제안하고 이를 전산화하였다. 시멘트 콘크리트 포장의 실제 가능한 수치모델에 대한 검증 결과 매우 양호한 역산결과를 주고 있어, 본 연구에서 제안한 역산 방법의 신뢰성 및 타당성을 입증하였다. 따라서 FWD 시험에 의한 표면 처짐을 측정하고, 본 연구에서 개발한 역산 방법에 의한 콘크리트 포장구조체 각 층의 물성 및 응력을 추정함으로써 보다 과학적인 포장 유지관리에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 1988년도 과학기술처의 지원으로 수행된 연구의 일부이며, 본 연구를 위하여 지원해주신 정부기관에 감사사를 드린다.

## 참 고 문 헌

1. Heukelom, W. and Foster, C. R., "Dynamic Testing of Pavements", *Transactions, American Society of Civil Engineering*, 1960, pp.1-28.
2. Bretonniere, S., "Etude d'un deflectometre a boulet", *Bulletin de Liaison des Laboratoires Routieres*, No. 2, Paris, 1963.
3. Ullidze, P., *Pavement Analysis*, Elsevier, 1987, pp.254-256.
4. Majidzaeh, K. and Kumar, V., *Manual of Operation and Use of Dynaflect for Pavement Evaluation*, The Ohio Department of Transportation, The Asphalt Institute, 1983, pp.27-138.
5. Dorman, G. M. and Edward, J. M., "Developments in the Application in Practice of a Fundamental Procedure for the Design of Flexible Pavements", *Proceedings, 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 1967, p.99.
6. Irwin, L. H., "Determination of Pavement Layer Moduli from Surface Deflection Data for Pavement Performance Evaluation", *Proceedings, 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Ann Arbor, 1977, pp.831-840.
7. Uddin, W., Nazarian, S., Hudson, W. R., Meyer, A. H., and Stokoe II, K. H., *Investigations into Dynaflect Deflections in Relation to Location/Temperature Parameters and Insitu Material Characterization of Rigid Pavement*", Research Report 256-5, Center for Transportation Research, Univ. of Texas at Austin, 1983.
8. Uddin, W., Meyer, A. H., Hudson, W. R., and Stokoe II, K. H., "Project-Level Structural Evaluation of Pavements Based on Dynamic Deflection", *TRR 1007*, Transportation Research Board, Washinton, D. C., 1985, pp.37-45.
9. AASHTO, *AASHTO Guide for Design of Pavement Structure 1986*, AASHTO, Washington, D. C., 1986, pp. II. 13-III. 85.
10. Yoder, E. J., Witczak, M. W., *Principles of Pavement Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1975, pp.504-553.
11. 연세대학교 토목공학과, *아스팔트 및 콘크리트 포장구조체의 유지관리를 위한 시스템의 개발 (I)*, 과학기술처, 1989.
12. Hull, C. H. and Nie, N. H., *SPSS Update 7.9*, McGraw-Hill, New York, 1981.

(接受: 1989. 11. 29)