

# 매트릭스 해법을 이용한 포장체 각 층의 탄성계수 추정 역산알고리즘의 개발

## Development of Backcalculation Algorithm of Pavement System Using Matrix Solution Technique

김수일\* · 이광호\*\* · 박병현\*\*\*

Kim, Soo Il · Lee, Kwang Ho · Park, Byung Hyun

### Abstract

A backcalculation procedure to determine the layer moduli of flexible pavement structure is developed using matrix solution technique. Forward calculation computer program adopted in this backcalculation procedure is SINELA which is one of layered elastic computer programs. Data base system is used as a tool for setting initial seed moduli and depth to virtual bedrock in backcalculation procedure. The validity and applicability of the proposed backcalculation procedure are verified through various numerical model tests. From the results of comparison analysis with FPEDD1, it is found that the proposed procedure gives more efficient and accurate results.

### 要 旨

본 연구에서는 FWD 등의 비파괴 시험장비를 사용하여 포장체 각 층의 탄성계수를 추정할 때 필요로 하는 역산알고리즘을 매트릭스 해법을 이용하여 개발하고 수치모형을 통하여 알고리즘의 신뢰성을 검증하였다. 역산알고리즘에 적용한 포장구조해석 전산 프로그램으로는 다층탄성해석 전산 프로그램인 SINELA를 사용하였다. 역산 초기의 가정 탄성계수 및 가상암반층의 깊이 설정에는 포장 단면에 따른 data base를 구성한 후 이를 이용하는 방법을 택하였다. 본 연구개발의 역산 프로그램은 수치모형을 통한 분석에서 매우 정확한 역산결과를 주고 있음을 알 수 있었다. 또한, 기존의 역산 프로그램인 FPEDD1과의 결과비교를 통해 본 프로그램이 역산 소요시간 및 정도 면에서 우수함을 알 수 있었다.

## 1. 序 論

포장체의 구조능력 평가는 과거의 경우 주로 포장

표면에서 유발된 처짐치를 근거로 한 경험적 판단에 의존했으나 포장구조해석 이론, 포장평가 장비, 전자계산기 등의 발전에 힘입어 분석적-경험적 방법(analytical-empirical method), 또는 해석적 방법(mechanical method)으로 진일보 하고 있다. 최근에는 다층탄성이론 등을 기본적으로 적용하여 표면

\* 정희원 · 연세대학교 토목공학과 교수

\*\* 정희원 · 한국도로공사 도로연구소 선임연구원

\*\*\* 연세대학교 산업기술연구소 연구원

처짐곡선으로부터 포장체 각 층의 물성을 보다 신속 정확하게 추정하고자 하는 연구가 많은 진전을 보고 있으며, 이와 더불어 포장층 각 층의 물성추정에 영향을 미치는 암반층, 가상암반층의 위치 확인에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

Burmister<sup>(3,4)</sup>의 층탄성이론을 기초로 한 다층 탄성해석기법은 1970년대 들어 오면서 전자계산기의 일반적 사용과 함께 포장구조 해석에 널리 사용되기 시작하였다. 또한, Dynaflect나 Falling Weight Deflectometer(FWD) 등의 비파괴 시험장비를 사용하여 포장 표면의 처짐곡선을 측정하고 이를 다층탄성해석 등에 적용 포장체 각 층의 탄성계수를 추정하는 역산에 관한 연구가 시작되었으며, 1977년 Irwin 등<sup>(5)</sup>은 비파괴 시험의 실측치점과 이론적 처짐이 일치할 때까지 각 층의 탄성계수를 보정하면서 현 위치 탄성계수를 결정하는 소위 역산반복기법(inverse self-iterative procedure)를 제안하였다. 이와 같은 역산기법을 이용한 전산 프로그램으로는 1979년 Stubstad 등<sup>(6)</sup>에 의한 ISSEM4, 1983년 Irwin<sup>(7)</sup>의 MODCOMP2, 1984년 Uddin 등<sup>(8)</sup>에 의한 FPEDD1, 1985년 WES<sup>(9)</sup>의 BISDEF와 Jordahl<sup>(10)</sup>의 ELSDEF, 1989년 김수일 등<sup>(11,12,13)</sup>에 의한 MFPD가 있다.

이와 같은 역산기법은 각 층의 초기 탄성계수의 설정방법과 탄성계수 보정방법에 따라 역산 소요시간 및 그 정도가 결정된다. 또한, 역산시 암반층의 정확한 위치 반영이나 가상암반층의 위치 설정방법에 따라서도 역산결과는 다르게 평가된다. 따라서, 보다 신뢰성 있는 역산결과를 도출하기 위해서는 일련의 역산체계구성에 필요한 개별 요소의 신뢰성이 확보되어야 한다. 그러나, 기존의 대부분의 역산기법 전산 프로그램은 포장체 각 층의 탄성계수를 일개 층씩 보정하는 시간 소모적인 탄성계수 보정 알고리즘을 갖고 있으며, 가상암반층의 적용도 일률적인 깊이로 단순화 하고 있어 개선을 요하는 문제를 안고 있다.

본 연구에서는 가장 효율적인 비파괴시험장비로 평가되고 있는 FWD<sup>(14)</sup>의 처짐곡선을 사용하고 보다 신속 정확하게 포장체 각 층의 탄성계수를 역산 추정할 수 있는 역산기법 전산 프로그램을 개발하고자 한다. 이에 본 연구에서는 역산체계의 구성중 가장 중요한 요소라 할 수 있는 탄성계수 보정 알고리즘을 매트릭스 해법을 이용하여 개발하고자 한

다. 가상암반층의 깊이 추정에는 FWD의 충격영향범위를 고려할 수 있도록 개발된 가상암반층 추정기법<sup>(15)</sup>을 적용하고자 한다. 또한 역산 초기 탄성계수 및 가상암반층의 깊이 설정은 Data Base를 구축 이를 이용하는 방법을 적용하고자 한다. 포장구조 해석이론은 다층탄성이론(전산 프로그램 SINELA<sup>(15)</sup>)을 적용한다. 본 연구개발의 역산기법에 대한 검증은 포장 단면의 수치모델을 통하여 실시한다.

## 2. 정역학 해석과 가상암반층

일반적으로 포장 구조체를 다층 탄성모델화하여 해석하는 경우 포장체를 물성이 다른 3층 또는 4층 구조로 단순화하고 이를 정적 해석한다. 또한, 포장 구조의 해석을 위한 물성추정에는 비파괴 시험장비의 동하중에 의하여 유발된 일련의 처짐치를 다층 탄성이론에 적용하여 포장체 각 층의 탄성계수를 역산하는 정적 해석방법을 이용하게 된다. 이때, 동하중에 의한 처짐치를 정하중에 의한 것으로 가정하여 탄성계수를 추정할 경우 실제적이지 못한 결과를 얻게 된다.<sup>(16,17)</sup> 이와 같은 이유는 비파괴 시험시 일정시간 충격하중의 지속으로 포장 표면에서 연직 하향으로 충격영향범위가 결정되며, 동하중에 의한 처짐치는 이와 같은 충격영향범위의 물성만에 의존하기 때문이다. 따라서, 충격영향범위 이하의 물성은 비파괴 시험시 처짐곡선의 형성에 영향을 주지 못하는 것으로 평가할 수 있으며, 이와 같은 동적 처짐곡선을 이용하여 포장체 각 층의 탄성계수를 역산할 때 충격영향범위 이하는 처짐에 영향을 주지 않는 물성이 매우 큰 가상암반층이 존재하는 것으로 가정을 하여야 실제적인 해석결과의 도출이 가능하다.

WES(U.S. Army Corps of Engineer Waterways Experiment Station), Mamlouk 등은 비파괴 시험자료인 처짐곡선을 이용하여 포장체 각 층의 탄성계수를 추정할 때 가상암반층을 고려하여야 실제적인 해석결과의 도출이 가능함을 밝혔으며, 가상암반층의 위치를 포장 표면 연직하향 6m 지점으로 하여 이를 해석에 적용하고 있다.<sup>(17)</sup> 또한, Yazdani 등<sup>(16)</sup>도 Multidepth Deflectometer를 사용한 가상암반층의 영향평가를 실시하여 해석상 고려하는 가상암반층의 일반적 깊이를 포장 표면 연직하향 6m로

제안한 바 있다. Uddin 등<sup>(2)</sup>과 Scullion 등<sup>(1)</sup>은 해석상 노상하부에 존재하는 가상압반층의 정확한 위치를 추정하기 위하여 FWD나 Dynaflect의 재하하중에 의해 유발된 압축파나 처짐측정자료를 이용할 수 있는 이론적 근거를 제시한 바 있다.

최근 김수일, 이광호<sup>(13)</sup>는 FWD의 충격지속시간과 압축파속도를 분석하는 방법으로 가상압반층의 깊이를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 포장체 각 층의 탄성계수를 기지의 값으로 할 때 4층 포장구조의 경우 가상압반층의 깊이는 다음과 같은 식 (1)과 (2)를 적용한 식 (3)으로 결정된다.

$$V_{pj} = \left[ \frac{E_j(1-\mu_j)}{(1+\mu_j)(1-2\mu_j)} \left( \frac{g}{\gamma_j} \right) \right]^{0.5}, \quad j=1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

여기서,  $V_{pj}$ ,  $E_j$ ,  $\mu_j$ ,  $\gamma_j$ 는 각각  $j$ 층 재료의 압축파 속도, 탄성계수, 포아손비, 단위중량이며,  $g$ 는 충격 가속도이다.

$$H_4 = \left( \text{FWD 충격지속시간}/2 - \sum_{j=1}^3 \frac{H_j}{V_{pj}} \right) V_{p4} \quad (2)$$

여기서,  $H_4$ 는 노상 상부에서 가상압반층까지의 깊이,  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ 는 기지의 값으로 표층, 기층, 보조기층의 두께이다.

$$H_R(\text{가상압반층의 깊이}) = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 \quad (3)$$

### 3. 매트릭스 해법을 이용한 탄성계수 보정알고리즘의 제안

포장체의 내부 거동특성은 포장 구성층의 물성에 좌우되는데, 특히 포장표면의 처짐치는 비파괴 시험장비나 차량하중에 의해 쉽게 측정되는 거동특성치로 포장물성을 역추정하는데 주로 사용된다. 현재까지 포장물성의 역추정에는 포장체 각 층의 물성을 가정하고 한개의 층씩 물성을 보정하면서 실측 처짐치를 이론적 처짐치와 비교, 다시 다른 층의 물성을 보정하는 방법을 적용하고 있다. 이와 같은 방법은 역산 종료시까지 소요시간이 길며 경우에 따라서는 실제적이지 못한 역산결과를 주는 단점이 다분히 내포되어 있다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 다음과 같은 물성보정알고리즘을 제안하고자 한다.

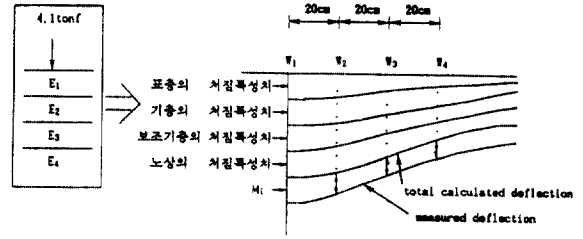


그림 1. 포장체 처짐특성 관계.

특정 하중재하시의 포장에서 유발되는 처짐 특성관계를 나타내면 그림 1과 같다. 그림 1에서 살펴보면 표층 상단에서의 처짐은 각 층별 탄성계수 조합의 영향에 대한 특성값이 된다. 4층 포장구조체의 경우, 표층 상단의 처짐값에서 기층 상단의 처짐값을 빼면 표층의 탄성계수( $E_1$ )만에 의한 처짐 특성값을 얻을 수 있다. 마찬가지로 기층 상단의 처짐값에서 보조기층 상단의 처짐값을 빼면 기층의 탄성계수( $E_2$ )만에 의한 처짐 특성값이 되고, 보조기층 상단의 처짐값에서 노상 상단의 처짐값을 빼면 보조기층의 탄성계수( $E_3$ )만에 의한 처짐 특성값이 된다. 노상의 탄성계수( $E_4$ )만에 의한 처짐 특성값은 노상 상단의 처짐값을 구하면 바로 얻을 수 있다.

이 값들에 대한 대상층 탄성계수의 비를 각 감지기 설치 지점을 기준으로하여 나타내면 식 (4)와 같다.

$$A_{ij} = \frac{W_i \text{ 위치에서의 } E_j \text{ 만에 의한 처짐 특성값}}{E_j} \quad (4)$$

한편, 실측처짐곡선을 이용한 포장체 각 층의 탄성계수 역산과 관련하여 가정 탄성계수에 의한 이론적 처짐곡선이 실측 처짐곡선과 다를 경우 각 감지기 위치에서의 처짐치차( $M_i$ )는 식 (4)를 이용하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_i = \sum_{j=1}^4 \Delta E_j \cdot A_{ij} \quad (5)$$

식 (5)에서  $M_i$ 와  $A_{ij}$ 는 기지의 값이며, 가정된 각 층 탄성계수에 대한 보정량,  $\Delta E_j$ 는 매트릭스 해법으로 일시에 구해진다. 이로부터 포장체 각 층의 탄성계수는 식 (6)과 같이 보정된다.

$$ENEW_j = E_j + \Delta E_j \quad (6)$$

표 1. 4층 포장구조 물성에 대한 요인 배치

수준	탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )			
	AC 표층	기층	보조기층	노상
상	70000	7000(40000)	5000	2000
하	10000	1000(5000)	1000	200
포아송비	0.3	0.35(0.3)	0.35	0.4

( ): 아스팔트 안정처리기층의 경우

표 2. 경부고속도로 신설단면에 대한 data base 구축을 위한 기초자료

층	탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )	포아송비	탄성계수 경우의 수	간격	수
표층	10000~70000	0.30	10000		7
기층	1000~7000	0.35	1000		7
보조기층	1000~5000	0.35	200		21
노상	200~2000	0.40	200		10

Data Base 총수=7×7×21×10=10290개

식 (6)에서의 E<sub>i</sub>값은 실제값이 아닌 가정치이고 탄성계수 보정후에는 가상암반층이 다시 평가되기 때문에 탄성계수 보정후의 이론적 처짐치는 실측처짐치와 상이한 결과를 주게 된다. 따라서 새로운 층별 탄성계수에 의해 발생하는 처짐치와 실측처짐치를 다시 비교하여 그 차가 허용 범위 안에 들지 않으면 전술한 과정을 반복한다.

#### 4. data base 구성

data base를 통한 역산 초기 탄성계수를 결정하기 위하여 일반적 포장 구성형태인 4층 포장구조를 대상으로 하여 각 층 물성에 대한 2수준 요인배치를 실시하였다. 표 1은 4층 아스팔트 포장구조를 대상으로 한 요인배치 결과이다.

특정 포장단면에 대한 data base의 구성은 포장 물성의 2수준 요인배치자료를 기준으로 일정 간격의 탄성계수를 선정하도록 각 층별 경우의 수를 입력하면 각층 탄성계수의 조합에 대한 가상암반층의 깊이, 처짐곡선을 출력하는 프로그램을 개발하여

표 3. 호남고속도로 신설단면에 대한 data base 구축을 위한 기초자료

층	탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )	포아송비	탄성계수 경우의 수	간격	수
표층	10000~70000	0.30	5000		13
안정처리기층	5000~40000	0.30	5000		8
보조기층	1000~5000	0.35	500		9
노상	200~2000	0.40	200		10

Data Base 총수=13×8×9×10=9360개

포층의 두께 5cm, 안정처리기층 15cm, 보조기층 37.5cm

처짐치(micron)			가상암반층의 깊이(cm)			탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )			
V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>
157.37	125.38	94.92	73.28	678.12	70000	40000	5000	2000	2000
163.85	132.03	101.08	78.78	646.51	70000	40000	5000	1800	1800
171.77	139.92	108.39	85.53	612.95	70000	40000	5000	1600	1600
181.24	149.46	117.23	93.62	577.04	70000	40000	5000	1400	1400
192.97	161.26	128.14	103.66	538.26	70000	40000	5000	1200	1200
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
659.66	437.55	283.27	170.21	462.42	10000	5000	1000	1000	1000
699.80	475.96	297.46	199.05	418.29	10000	5000	1000	800	800
759.61	532.85	348.56	242.96	367.58	10000	5000	1000	600	600
858.62	622.99	434.25	316.45	306.82	10000	5000	1000	400	400
1060.55	819.75	613.17	473.82	225.71	10000	5000	1000	200	200

그림 2. 경부고속도로 신설단면에 대한 data base구축 일례.

포층의 두께 7.5cm, 쇄석기층 15cm, 보조기층 40cm

처짐치(micron)			가상암반층의 깊이(cm)			탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )			
V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>
215.95	151.30	95.88	70.18	670.05	70000	7000	5000	2000	2000
222.47	157.86	101.92	75.60	638.81	70000	7000	5000	1800	1800
230.18	165.63	109.08	82.05	605.64	70000	7000	5000	1600	1600
239.48	174.96	117.65	89.85	570.17	70000	7000	5000	1400	1400
250.94	186.48	128.23	99.51	531.84	70000	7000	5000	1200	1200
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1009.24	596.51	286.62	157.59	447.99	10000	1000	1000	1000	1000
1049.37	624.60	300.21	185.58	405.23	10000	1000	1000	800	800
1108.68	680.90	350.31	227.67	356.21	10000	1000	1000	600	600
1206.86	773.96	433.84	298.78	297.24	10000	1000	1000	400	400
1403.22	960.85	608.78	448.23	218.67	10000	1000	1000	200	200

그림 3. 호남고속도로 신설단면에 대한 data base구축 일례.

이를 사용하였다. 표 2와 표 3은 각각 4층 구조체의 경부고속도로 신설단면과 안정처리기층을 갖는 호남고속도로 신설단면에 대한 data base 구축을 위한

예제를 나타낸 것이다.

표 2와 표 3의 기초자료에 대하여 data base를 구축한 결과는 각각 그림 2, 그림 3과 같다. Data base 구축에는 다층탄성해석 전산 프로그램인 SI-NELA<sup>(15)</sup>를 보완한 SINRB를 사용하였으며, SINRB 또한 매트릭스 해법을 이용한 탄성계수 보정과정에도 사용한다. 처짐곡선 자료 즉 일련의 처짐치는 전술한 바와 같은 물성 보정을 위한 매트릭스 해석에 유리하도록 처짐곡선의 곡률반경이 적은 부분인 FWD 하중 재하중심과 이로부터 각각 20 cm씩 떨어진 4지점을 기준으로 하였다.

### 5. 전산 프로그램의 개발

본 연구에서 개발한 포장체 각 층의 탄성계수 추정 전산 프로그램은 역산 초기 탄성계수 추정을 위한 data base 화일과 역산을 수행하는 실행 화일 두 부분으로 구성하였다. 역산 수행시의 입력자료로는 대상도로의 data base 화일 이름과 FWD 처짐측정치, 처짐허용오차, 한계반복횟수이다. data base를 이용한 역산 초기의 탄성계수 결정은 data base에 구축된 여러 이론적 처짐곡선 자료를 실측 처짐곡선과 비교하여 그 차의 절대값 총화가 가장 작은 경우에 대응하는 탄성계수(E<sub>i</sub>)를 찾는 방법을 택하였다.

역산은 초기 탄성계수에 대한 이론적 처짐곡선을 FWD 시험하중으로 인해 발생된 포장구조체 표면의 실측처짐곡선과 비교하여, 그 차이가 허용 범위 내에 들 때까지 전술한 바와 같은 매트릭스 기법을 통해 각 층의 탄성계수를 동시에 보정하게 된다. 그림 4는 이와 같은 역산반복기법을 전산화한 프로그램의 흐름도를 나타낸 것이다.

### 6. 수치 모델에 의한 검증

검증시 역산결과에 대한 정확도는 이론적 처짐과 실측 처짐의 차로부터 탄성계수의 보정량을 결정하는 역산알고리즘의 효율성과 처짐오차를 허용하는 정도에 크게 의존한다. 그러나, 기존의 역산기법은 처짐오차에 대한 허용범위를 보다 작게 설정한다 하더라도 탄성계수 보정체계에서 이를 수용하지 못하는 경우가 많으며 더구나 비합리적인 역산결과를

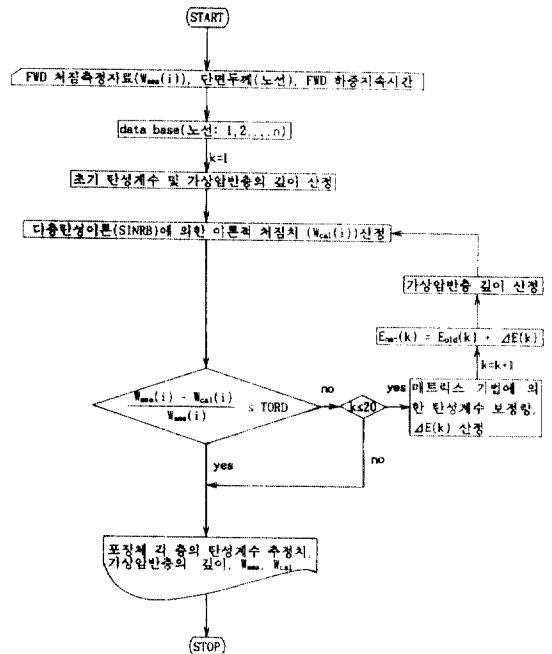


그림 4. 전산프로그램의 흐름도.

주는 경우가 발생하기도 한다. 따라서, 기존의 역산 기법은 적절한 처짐오차의 허용범위를 설정하여야 하는 문제점이 있다. 본 연구에서 개발한 탄성계수 보정체계는 기존의 체계와는 달리 포장체 각 층 물성에 대한 처짐영향을 분석한 민감도자료를 정확히 물성보정체계에 반영하기 때문에 보다 합리적인 탄성계수 보정치가 결정되며 처짐오차의 허용범위가 작게 설정될 수록 보다 정확한 역산결과를 줄 수 있다.

우선, 본 연구에서 개발한 역산기법의 처짐오차 허용범위 설정에 따른 역산결과의 정확도를 평가하기 위하여 변위 허용오차를 각각 5%, 2%, 0.5%로 하여 역산결과를 비교 하였다. 표 4는 경부고속도로 신설 단면을 모델로 그림 2의 data base를 적용하여 역산한 수치검증자료 중 반복보정횟수가 가장 많은 결과를 주고 있는 경우를 택하여 변위 허용오차에 따른 역산결과를 비교하여 나타낸 것이다.

표 5는 호남고속도로 신설 단면을 모델로 그림 3의 data base를 적용하여 역산한 수치검증 자료중 표층 및 안정처리 기층의 탄성계수 추정값이 실제 값과 아주 상이한 경우를 택하여 변위 허용오차에

표 4. 변위 허용오차에 따른 역산결과 비교 일례(경부고속도로)

변위 허용오차	구분	탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )				보정횟수
		표층	기층	보조 기층	노상	
허용오차	실제값	62000.0	5500.0	2500.0	300.0	
	추정값	70000.0	3000.0	4400.0	200.0	
0.5%	역산값	62502.3	5550.3	2499.1	297.7	12회
	오차 %	0.81	0.92	-0.04	-0.75	
	암반층까지의 깊이: 279.17 cm					
2.0%	역산값	65466.9	5925.9	2537.7	286.5	7회
	오차 %	5.59	7.74	1.51	-4.51	
	암반층까지의 깊이: 274.75 cm					
5.0%	역산값	12329.6	4362.1	3055.8	184.7	1회
	오차%	80.11	-20.69	22.23	-38.43	
	암반층까지의 깊이: 226.19 cm					

표 5. 변위 허용오차에 따른 역산결과 비교 일례(호남고속도로)

변위 허용오차	구분	탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )				보정횟수
		표층	기층	보조 기층	노상	
허용오차	실제값	49000.0	18000.0	2800.0	1300.0	
	추정값	15000.0	30000.0	2500.0	1400.0	
0.5%	역산값	48877.7	18037.5	2791.9	1298.4	7회
	오차 %	-0.25	0.21	-0.29	-0.12	
	암반층까지의 깊이: 547.76 cm					
2.0%	역산값	45642.1	18908.0	2872.0	1290.4	5회
	오차 %	-5.04	5.04	2.57	-0.74	
	암반층까지의 깊이: 546.76 cm					
5.0%	역산값	32883.5	8089.5	3086.3	1336.9	1회
	오차%	-32.89	-55.06	10.23	2.84	
	암반층까지의 깊이: 553.44 cm					

다른 역산결과를 비교하여 나타낸 것이다.

표 4와 표 5에서 보는 바와 같이 변위 허용오차가 작을수록 역산값은 실제값에 접근함을 보이며, 변위 허용오차가 0.5%인 경우 탄성계수 추정에 매우 높은 정확도를 주고 있음을 알 수 있다. 한편, 변위 허용오차가 작을수록 보정횟수가 증가하는 문제가 발생하지만 본 연구에서의 보정(1회 forward calculation 수행)횟수는 다른 역산기법의 보정(포장체 각 층의 탄성계수 전체를 보정하는 것으로 4층 포장체의 경우 4 forward calculation 수행)횟수와 개념이 다르기 때문에 본연구의 변위 허용오차 0.5%에 대해 최대 15회까지 보정하는 경우는 타 역산기법의 4회 보정 정도로 평가할 수 있으며, 이에 본 연구 개발의 역산기법은 시간절약 측면에서 효율적임을 알 수 있다. 실제 Geophone을 이용한 FWD 자료획득체계에서 FWD 반복시험<sup>(18)</sup>에 따른 각 처짐 측정치의 분산정도를 평균치에 대한 표준편차의 비로 나타내면 그 값이 1% 내외인 점을 고려할 때 변위 허용오차 2%까지도 역산에 적용할 수 있으며, 이를 적용할 경우 본 연구 개발의 역산기법은 대부분의 보정이 2~3회에서 종료됨을 수치모델을 통해 확인하였다.

다음 표 6과 표 7은 역산결과와 정확성에 비중을 두고 역산시 처짐에 대한 변위 허용오차를 0.5%로 하여 각각 쇄석기층과 안정처리기층을 갖는 4포장구조체의 수치 모델에 대한 수치검증 결과를 나타낸 것이다. 표 6과 표 7에서 추정값은 data base에서 선정된 초기 탄성계수이며, 역산값은 본 연구개발의 역산기법에 의해 얻어진 탄성계수이다. 오차는 수치모델 본래의 탄성계수인 실제값에 대한 실제값과 역산값의 차이의 백분율로서 본역산기법의 정도를 나타내는 값이다.

처짐오차의 허용범위가 0.5% 일때 표 6과 표 7에서 보는 바와 같이 쇄석기층을 갖는 4층 포장구조체의 경우, 표층과 기층의 탄성계수는 각각 최대 오차 2%와 1.5%, 보조기층의 최대오차 1%, 노상의 최대오차 0.7% 내이고 안정처리기층을 갖는 경우에도 표층과 안정처리기층의 탄성계수는 각각 최대 오차 3%와 1.7%, 보조기층의 최대오차 1%, 노상의 최대오차 0.3% 내의 매우 정도가 높은 역산 결과를 보여 주고 있다.

한편, 역산시 소요되는 시간적인 문제는 4층 포

장구조체인 경우, 컴퓨터 기종 IBM PC 386DX로 1회 보정시 약 25초가 걸리므로 본 연구에서 수치 검증 결과(허용오차 0.5%)중의 최대 15회 보정시에는 약 6분이 소요되는 양호한 결과를 보여주는데, FWD 처짐측정 체계에서의 기계 및 우연 오차를 고려하여 역산시 허용오차의 한계를 적절히 설정한다면 역산 소요시간을 더욱 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

## 7. FPEDD1과의 역산결과 비교

본 연구에서 개발한 역산반복기법의 신뢰성 및 효율성을 비교 평가하기 위하여 Uddin 등<sup>(8)</sup>에 의해 개발되어 사용되고 있는 전산 프로그램 FPEDD1의 역산결과와 비교하였다. 본 연구에서는 다층 탄성 해석 프로그램으로 SINRB를 사용한 반면, Uddin 등은 ELSYM5를 사용하여 FPEDD1을 개발하였다. 따라서, FPEDD1에 적용하기 위한 수치모델을 구성하기 위해 이론적 처짐곡선은 ELSYM5로 산정하였으며, 이를 실측 처짐곡선으로 간주한 수치 모델을 설정하였다. 표 8과 표 9는 각각 경부, 호남고속도로 신설단면 수치검증 모델에 대하여 본 연구개발의 역산기법과 FPEDD1에 의한 역산 결과를 비교한 것이다.

표 8과 표 9에서 보는 바와 같이 FPEDD1에 의한 층별 탄성계수의 역산 오차는 본 연구의 역산오차에 비해 매우 큼을 알 수 있다. 또한, FPEDD1에서는 비실제적인 탄성계수를 추정하는 경우가 발생하고 있다. 이와 같은 결과를 살펴볼 때 본 연구에서 개발한 역산기법은 보다 신속 정확하며 실제적인 출력결과를 보이고 있음을 알 수 있으며, 이를 이용한 현위치 포장체 각 층의 탄성계수 추정에 충분히 신뢰성있는 결과를 줄 수 있을 것으로 판단된다.

## 8. 결 론

본 연구는 보다 효율적인 포장물성추정 역산기법의 개발에 관한 것으로, 역산알고리즘의 제안과 역산 전과정의 전산화, 포장구조체의 수치모델을 통한 검증 및 타 역산기법과의 결과 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 특정 포장단면에 대하여 포장체 각 층의 물

표 6. 쇠석기층을 갖는 4층 구조체의 수치모델 및 역산 결과

구 분	탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )				처짐량(micron)				가상 압반층의 깊이 (cm)	보정 횟수
	표 층	기 층	보조기층	노 상	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>		
실제값	15000.0	5000.0	2000.0	600.0	535.9	382.5	263.3	199.9	376.84	3
추정값	10000.0	5000.0	2000.0	600.0	565.4	391.5	268.5	203.3		
역산값	15011.7	4991.2	1996.7	599.5	536.4	382.9	263.6	200.1		
오차(%)	0.08	-0.18	-0.16	-0.08						
실제값	18000.0	6500.0	6300.0	1000.0	306.3	203.9	142.1	115.0	490.80	5
추정값	30000.0	6000.0	5000.0	1000.0	310.1	216.1	147.4	116.5		
역산값	18000.0	6506.1	6293.7	1000.2	306.3	204.0	142.1	115.0		
오차(%)	0.00	0.09	-0.10	0.02						
실제값	23000.0	3800.0	2500.0	900.0	455.1	309.9	195.7	144.2	455.06	5
추정값	20000.0	5000.0	1800.0	1000.0	459.3	319.0	203.7	144.8		
역산값	22650.8	3742.8	2493.8	900.9	458.3	311.2	195.9	144.2		
오차(%)	-1.52	-1.51	-0.25	0.10						
실제값	27000.0	4500.0	3000.0	600.0	453.9	329.4	228.2	178.9	382.58	3
추정값	20000.0	5000.0	3000.0	600.0	459.9	329.5	230.6	181.5		
역산값	26774.5	4493.8	3002.7	601.0	454.3	329.3	228.0	178.8		
오차(%)	-0.84	-0.14	0.09	0.17						
실제값	33000.0	6400.0	3000.0	600.0	406.8	308.5	222.8	176.6	384.45	3
추정값	40000.0	6000.0	2800.0	600.0	411.0	314.7	226.1	177.9		
역산값	32044.5	6485.5	3001.9	602.7	406.4	307.8	222.5	176.3		
오차(%)	-2.90	1.34	0.06	0.45						
실제값	36000.0	4600.0	2300.0	1100.0	393.1	278.4	176.6	126.7	498.03	7
추정값	30000.0	6000.0	1800.0	1200.0	393.9	281.7	181.2	127.4		
역산값	36056.6	4630.1	2301.9	1099.7	392.3	277.9	176.5	126.7		
오차(%)	0.16	0.65	0.08	-0.03						
실제값	43000.0	4200.0	3600.0	900.0	365.7	261.9	172.2	131.3	461.14	5
추정값	30000.0	6000.0	2600.0	1000.0	372.5	267.0	178.0	132.4		
역산값	42749.0	4141.8	3593.0	900.9	367.4	262.8	172.4	131.3		
오차(%)	-0.58	1.39	-0.19	0.10						
실제값	47000.0	5600.0	4600.0	900.0	313.3	228.9	157.5	124.0	465.13	10
추정값	50000.0	7000.0	3200.0	1000.0	315.7	236.4	163.3	124.6		
역산값	47303.1	5621.8	4605.7	899.5	312.7	228.7	157.4	124.0		
오차(%)	0.64	0.39	0.12	-0.05						



표 6. Continued

구 분	탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )				처짐량(micron)				가상 압반층의 깊이(cm)	보정 횟수
	표 층	기 층	보조기층	노 상	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>		
실제값	48000.0	5300.0	2700.0	1100.0	347.1	253.0	165.8	121.7	501.68	6
추정값	30000.0	7000.0	2200.0	1200.0	356.1	255.8	168.6	121.7		
역산값	47665.8	5240.0	2702.4	1100.7	348.3	253.4	165.8	121.6		
오차(%)	-0.70	-1.13	0.09	0.06						
실제값	53000.0	5400.0	2500.0	1300.0	332.0	241.0	154.6	110.4	539.81	11
추정값	70000.0	4000.0	3000.0	1200.0	332.2	243.5	155.2	11.6		
역산값	52401.8	5310.3	2504.4	1301.0	333.7	241.7	154.6	110.3		
오차(%)	-1.13	-1.66	0.18	0.08						
실제값	55000.0	5500.0	2300.0	600.0	425.9	333.3	238.4	184.3	380.08	4
추정값	70000.0	5000.0	2200.0	600.0	426.1	337.9	241.5	185.4		
역산값	54964.6	5338.2	2285.5	599.9	429.5	335.6	239.8	184.7		
오차(%)	-0.06	-2.94	-0.63	-0.01						
실제값	62000.0	5500.0	2500.0	300.0	506.6	413.8	318.0	259.8	279.17	12
추정값	70000.0	3000.0	4400.0	200.0	520.5	418.7	318.4	266.6		
역산값	62502.3	5550.3	2499.1	297.7	506.4	414.1	318.7	260.5		
오차(%)	0.81	0.91	-0.04	-0.75						
실제값	64000.0	4700.0	3300.0	700.0	370.4	284.2	198.5	154.2	411.72	8
추정값	40000.0	7000.0	2400.0	800.0	378.8	288.0	202.5	154.4		
역산값	63152.8	4726.6	3323.4	700.3	369.9	283.5	198.0	153.9		
오차(%)	-1.32	0.57	0.71	0.04						
실제값	70000.0	3800.0	2300.0	700.0	424.9	328.8	224.9	168.1	405.48	15
추정값	50000.0	6000.0	1600.0	800.0	429.4	332.1	229.8	169.0		
역산값	71300.6	3933.9	2279.9	697.4	422.2	327.8	225.3	168.7		
오차(%)	1.86	3.52	-0.88	-0.38						
실제값	70000.0	5800.0	4700.0	1400.0	255.5	184.8	121.2	91.2	568.24	4
추정값	60000.0	6000.0	4600.0	1400.0	260.8	186.5	122.0	91.9		
역산값	70441.6	5857.8	4692.4	1398.5	254.8	184.6	121.2	91.2		
오차(%)	0.63	1.00	-0.16	-0.11						
실제값	70000.0	7000.0	4300.0	900.0	286.5	220.1	156.6	123.4	465.74	7
추정값	70000.0	7000.0	3200.0	1000.0	301.8	231.8	161.7	133.4		
역산값	69495.8	7024.5	4316.9	900.5	286.2	219.8	156.3	123.2		
오차(%)	-0.72	0.35	0.39	0.06						

표 7. 안정처리기층을 갖는 4층 구조체의 수치 모델 및 역산 결과

구 분	탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )				처짐량(micron)				가상 압반층의 깊이 (cm)	보정 횟수
	표 층	기 층	보조기층	노 상	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>		
실제값	10000.0	12000.0	3700.0	900.0	364.9	259.0	187.2	144.7	465.39	4
추정값	10000.0	10000.0	4500.0	800.0	374.2	262.0	192.1	152.5		
역산값	10026.0	12018.7	3696.0	899.2	364.9	259.2	187.3	144.8		
오차(%)	0.26	0.16	-0.11	-0.08						
실제값	15000.0	9000.0	4700.0	1000.0	337.4	230.9	163.7	128.4	490.70	2
추정값	10000.0	10000.0	4500.0	1000.0	347.1	235.7	167.9	130.8		
역산값	15158.4	9021.3	4729.3	1001.2	336.1	230.2	163.2	128.1		
오차(%)	1.06	0.24	0.62	0.12						
실제값	25000.0	18000.0	4600.0	1000.0	274.7	210.1	158.0	125.2	492.90	4
추정값	20000.0	20000.0	4500.0	1000.0	276.9	212.3	160.2	126.6		
역산값	25419.0	17950.9	4623.2	1000.9	273.9	209.6	157.6	124.9		
오차(%)	1.68	-0.27	0.51	0.09						
실제값	28000.0	9000.0	3500.0	1100.0	335.2	235.4	161.8	122.8	508.68	9
추정값	15000.0	15000.0	2500.0	1200.0	337.5	246.4	171.7	125.3		
역산값	27882.0	8988.5	3491.9	1099.5	335.7	235.7	162.0	122.9		
오차(%)	-0.42	-0.13	-0.23	-0.04						
실제값	36000.0	27000.0	4500.0	1000.0	246.1	198.6	154.1	123.4	493.96	7
추정값	55000.0	25000.0	4000.0	1000.0	247.2	200.9	155.3	124.0		
역산값	36817.5	26888.5	4534.2	1001.3	245.1	197.8	153.5	123.0		
오차(%)	2.27	-0.41	0.76	0.01						
실제값	38000.0	20000.0	3500.0	1300.0	252.8	194.3	142.1	108.4	551.26	8
추정값	15000.0	35000.0	3000.0	1400.0	253.3	195.7	145.1	108.4		
역산값	37968.0	20140.2	3507.9	1298.3	252.4	194.2	142.1	108.4		
오차(%)	-0.08	0.70	0.23	-0.13						
실제값	40000.0	27000.0	5100.0	1700.0	191.6	146.6	108.4	83.5	628.61	8
추정값	45000.0	30000.0	4000.0	1800.0	194.0	150.6	110.8	83.7		
역산값	40034.5	27111.6	5103.0	1697.9	191.5	146.6	108.4	83.5		
오차(%)	0.09	0.41	0.06	-0.13						
실제값	44000.0	32000.0	3800.0	1000.0	244.8	202.1	158.3	126.3	492.40	9
추정값	60000.0	30000.0	3500.0	1000.0	245.1	203.2	158.9	126.7		
역산값	45318.7	31792.9	3826.4	1000.9	243.7	201.3	157.7	125.9		
오차(%)	3.00	-0.65	0.70	0.09						

표 7. Continued

구 분	탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )				처짐량(micron)				가상 암반층의 깊이 (cm)	보정 횟수
	표 층	기 층	보조기층	노 상	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>		
실제값	49000.0	18000.0	2800.0	1300.0	268.9	207.3	149.5	112.3	547.76	7
추정값	15000.0	30000.0	2500.0	1400.0	275.1	211.1	153.6	112.6		
역산값	48877.7	18037.5	2791.9	1298.4	269.2	207.6	149.8	112.5		
오차(%)	-0.25	0.21	-0.29	-0.12						
실제값	51000.0	24000.0	3500.0	1300.0	235.7	186.3	139.1	107.3	551.86	7
추정값	25000.0	35000.0	3000.0	1400.0	238.8	189.6	142.2	107.4		
역산값	50671.4	24136.6	3502.1	1298.2	235.6	186.4	139.3	107.4		
오차(%)	-0.64	0.57	0.06	-0.13						
실제값	54000.0	37000.0	5600.0	1000.0	209.9	175.5	1140.7	115.5	496.75	3
추정값	70000.0	35000.0	5000.0	1000.0	213.0	178.6	142.7	116.7		
역산값	53033.1	37061.2	5591.8	1000.4	210.3	175.7	140.9	115.6		
오차(%)	-1.79	0.17	-0.15	0.04						
실제값	61000.0	34000.0	2600.0	1500.0	219.5	178.8	135.1	102.7	584.76	5
추정값	30000.0	35000.0	3500.0	1400.0	224.3	179.0	135.3	103.6		
역산값	59751.9	34488.8	2617.3	1496.5	219.1	178.6	135.2	102.8		
오차(%)	-2.05	1.44	0.67	-0.24						
실제값	63000.0	23000.0	1600.0	1500.0	272.9	217.5	157.8	114.9	574.48	5
추정값	35000.0	25000.0	2000.0	1400.0	275.6	217.6	158.3	116.1		
역산값	62698.3	23144.2	1603.0	1497.8	272.6	217.4	157.8	115.0		
오차(%)	-0.48	0.63	0.19	-0.15						
실제값	68000.0	38000.0	1900.0	900.0	279.3	239.8	190.9	151.5	459.85	7
추정값	35000.0	35000.0	3000.0	800.0	287.9	242.3	192.5	154.1		
역산값	65950.6	38642.6	1925.7	896.5	278.9	239.6	191.0	151.6		
오차(%)	-3.01	1.69	1.35	-0.39						
실제값	70000.0	36000.0	4000.0	1700.0	181.9	146.5	111.2	85.8	626.49	5
추정값	45000.0	35000.0	5000.0	1600.0	184.7	146.6	111.6	87.0		
역산값	70041.1	36174.0	4014.3	1698.7	181.6	146.4	111.1	85.8		
오차(%)	0.06	0.48	0.36	-0.08						
실제값	70000.0	37000.0	4700.0	1700.0	173.2	139.5	106.5	83.1	628.74	6
추정값	55000.0	40000.0	4000.0	1800.0	178.6	143.4	108.5	83.1		
역산값	70855.1	37132.7	4728.2	1697.9	172.7	139.1	106.4	83.0		
오차(%)	1.22	0.36	0.60	-0.12						

표 8. 본 연구와 FPEDD1에 의한 역산결과 비교(경부고속도로)

구 분	본 연구				보정 횟수	Uddin 등 (FPEDD1)				보정 cycle (*보정횟수)
	표 층	기 층	보조기층	노 상		표 층	기 층	보조기층	노 상	
실제값	15000.0	5000.0	2000.0	600.0	3	15000.0	5000.0	2000.0	600.0	14 (56)
역산값	15011.7	4991.2	1996.7	599.5		20855.8	5110.1	1703.4	589.0	
오차(%)	0.08	-0.18	-0.16	-0.08		39.04	2.20	-14.8	-1.84	
실제값	27000.0	4500.0	3000.0	600.0	3	27000.0	4500.0	3000.0	600.0	3 (12)
역산값	26774.5	4493.8	3002.6	601.0		17387.4	4772.8	1895.6	631.9	
오차(%)	-0.84	-0.14	0.09	0.17		-35.60	6.06	-36.81	5.32	
실제값	47000.0	5600.0	4600.0	900.0	10	47000.0	5600.0	4600.0	900.0	10 (40)
역산값	47303.1	5621.8	4605.7	899.5		50920.4	5266.2	2608.1	869.4	
오차(%)	0.64	0.39	0.12	-0.05		8.34	-5.96	-43.30	-3.40	
실제값	55000.0	5500.0	2300.0	600.0	4	55000.0	5500.0	2300.0	600.0	3 (12)
역산값	54964.6	5338.2	2285.5	599.9		47969.8	5266.2	1755.4	585.1	
오차(%)	-0.06	-2.94	-0.63	-0.01		-12.78	-4.25	-21.78	-2.48	

\*보정횟수=1 cycle×4: ( )안의 수치

표 9. 본 연구와 FPEDD1에 의한 역산결과 비교(호남고속도로)

구 분	본 연구				보정 횟수	Uddin 등 (FPEDD1)				보정 cycle (*보정횟수)
	표 층	기 층	보조기층	노 상		표 층	기 층	보조기층	노 상	
실제값	10000.0	12000.0	3700.0	900.0	4	10000.0	12000.0	3700.0	900.0	9 (36)
역산값	10026.0	12018.7	3696.0	899.2		13164.8	14928.3	2591.9	875.4	
오차(%)	0.26	0.16	-0.11	-0.08		31.65	24.40	-29.95	-2.74	
실제값	25000.0	18000.0	4600.0	1000.0	4	25000.0	18000.0	4600.0	1000.0	3 (12)
역산값	25419.0	17950.9	4623.2	1000.9		22832.3	36578.2	2896.3	965.4	
오차(%)	1.68	-0.27	0.51	0.09		-8.68	103.21	-37.04	-3.46	
실제값	40000.0	27000.0	5100.0	1700.0	8	40000.0	27000.0	5100.0	1700.0	9 (36)
역산값	40034.5	27111.6	5103.0	1697.9		23335.6	44603.2	3978.5	1652.6	
오차(%)	0.09	0.41	0.06	-0.13		-41.66	65.20	-21.99	-2.78	
실제값	61000.0	34000.0	2600.0	1500.0	5	61000.0	34000.0	2600.0	1500.0	14 (56)
역산값	59751.9	34488.8	2617.3	1496.5		31600.4	49000.8	2889.0	1482.5	
오차(%)	-2.05	1.44	0.67	-0.24		-48.20	44.12	11.11	-1.17	

\*보정횟수=1 cycle×4: ( )안의 수치

성조합에 따른 가상압반층의 깊이 및 이론적 처짐치를 수록할 수 있는 data base 설정 프로그램을 개발하였다. 또한, FWD 실측 처짐치를 입력치로 했을 때 data base를 통하여 역산 초기 가정 탄성계수와 가상압반층의 깊이를 추정하고 포장체 각 층 경계에서의 처짐 특성자료를 분석함으로써 최종적으로 포장체 각 층의 탄성계수를 보다 신속 정확하게 역산할 수 있는 전산프로그램을 매트릭스기법을 적용하여 개발하였다.

2) 본 연구개발의 역산 프로그램을 수치모델을 통해 검증한 결과 각 층의 탄성계수 최대오차가 선택기층을 갖는 4층 포장구조체의 경우 2%, 안정 처리기층을 갖는 4층 포장구조체의 경우 3%이었다. 이러한 수치 해석결과는 본 연구에서 개발한 역산 기법의 신뢰성이 대단히 높음을 입증하는 것으로 판단된다.

3) 본 연구개발의 역산 프로그램을 Uddin 등이 개발한 역산 프로그램인 FPEDD1과 비교 분석한 결과 본 연구에서 개발된 역산 프로그램이 정확도에서 훨씬 앞설 뿐만 아니라 보다 실제적인 출력 결과를 보이고 있으며, 역산에 소요되는 시간도 크게 절약되는 역산기법임이 밝혀졌다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 연구지원사업으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능케한 관계 당국에 깊은 감사를 드립니다.

## 参考文献

1. Scullion, T., Uzan, J., and Paredes, M., "MODULUS: A Microcomputer-Based Backcalculation System", *TRR 1260*, TRB, Washington, D.C., 1990, pp. 180-191.
2. Uddin, W., Meyer, A.H., Hudson, W.R., "Rigid Bottom Considerations for Nondestructive Evaluation of Pavements", *TRR 1070*, TRB, Washington, D.C., 1988, pp. 21-29.
3. Burmister, D.M., "The Theory of Stress and Displacement in Layered Systems and Applications to the Design of Airport", *Proceedings of Annual Meeting of the Transportation Research Board*, HRB, Washington, D.C., 1943, pp. 126-148.
4. Burmister, D.M., "The General Theory of Stresses and Displacement in Layered System", *Journal of Application Physics*, Vol. 16, 1945, pp. 89-94.
5. Irwin, L.H., "Determination of Pavement Layer Moduli from Surface Deflection Data for Pavement Performance Evaluation", *Proceedings of 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1977, pp. 831-840.
6. Stubstad, R.N. and Sharma, J., "Deriving Mechanistic Properties of Pavements from Surface Deflections", *Proceedings of International Conference on Computer Applications in Civil Engineering*, Roorkee, India, 1979, pp. 57-62.
7. Irwin, L.H., *User Guide to MODCOMP2*, Cornell University, Ithaca, NY, 1983.
8. Uddin, W., "A Structural Evaluation Methodology for Pavements Based on Dynamic Deflections", *Ph. D. Dissertation*, Department of Civil Engineering, University of Texas, Austin, 1984.
9. Bush, A.J., *Computer Program BISDEF*, WES, 1985.
10. Jordahl, P., *ELSDDEF User's Guide*, Brent Rauhut Engineers, Austin, 1985.
11. 김수일, 유지형, "처짐곡선을 이용한 3층 아스팔트 포장체의 물성추정에 관한 연구", **대한토목학회논문집**, 제 9권 제 4호, 대한토목학회, 1989, pp. 97-107.
12. 김수일, 유지형, "FWD에 의한 4층 아스팔트 포장구조체의 층별 탄성계수 추정", **대한토목학회논문집**, 제 10권 제 2호, 대한토목학회, 1990, pp. 67-78.
13. 김수일, 이광호, 가상압반층의 깊이를 고려한 아스팔트 포장체의 층별 탄성계수 추정기법의 개발, **대한토목학회논문집**, 제 13권 제 4호, 대한토목학회, 1993, pp. 87-99.
14. Bohn, A., Ullidtz, P., Stubstad, R., and Sorensen, A., "Danish Experiments with the French Falling Weight Deflectometer", *Proceedings of 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 1972, pp. 1119-1128.
15. Huang, Y.H., *Flexible Pavement Analysis Computer Program Manual*, University of Kentucky, 1972.
16. Yazdani, J.I. and Scullion, T., "Comparing Measured and Theoretical Depth Deflections under a Falling Weight Deflectometer Using a Multidepth

- Deflectometer”, *TRR 1260*, TRB, Washington, D. C., 1990, pp. 216-225.
17. Uddin, W., Meyer, A.H., Hudson, W.R., and Stokoe II, K.H., “A Structural Evaluation Methodology for Pavements Based on Dynamic Deflections”, Research Report 387-1, Center for Transportation Research, University of Texas, Austin, 1985.
18. 이광호, 아스팔트 콘크리트 포장체의 구조적 능력 평가에 관한 연구, 박사학위논문, 연세대학교, 1992.

(接受 : 1993. 12. 9)