



아스팔트층 온도 비선형성을 고려한 사용자 편의환경의 다층탄성 프로그램 개발

Development of Multi Layered Elastic Pavement Analysis Program Package Considering Temperature Nonlinearity of Asphalt Layer on GUI Environment

최준성* 서주원** 박근보*** 김수일****
Choi, Jun Seong Seo, Joo Won Park, Keun Bo Kim, Soo Il

Abstract

A multi layered elastic analysis program, IDYSPAP, was developed. The objective of this study was to develop the IDYSPAP program on Graphic User Interface environment for field engineers using Visual Basic, which was considered span of multi-wheels and maximum 4 axles using superposition of linear elastic theorem. It is suggested that this study considers algorithm with dynamic properties of asphalt layer on various temperature and non-linear properties of subbase and subgrade on stress non-linearity for asphalt pavement structure. This Program was modified to divide asphalt layer automatically according to layer division concept. The developed program was verified with initial measuring data in test road sections of KEC (Korea Expressway Co.) using laboratory test results.

Keywords : flexible pavement, multi layered elastic program, graphic user interface, asphalt layer division, subbase layer division

요 지

본 연구에서는 기본설계용 다층탄성이론을 이용한 역학적 거동해석 프로그램을 개발하였고, 현장에서 간편하게 사용될 수 있도록 Visual Basic 프로그래밍을 사용한 사용자 편의의 전·후 처리기법을 도입하여 본 연구에서 개발된 다층탄성해석 프로그램을 패키지화하였다. 패키지화한 상용프로그램에 아스팔트층의 깊이별 온도변화에 따른 영향과 보조기층, 노상과 같은 비구속층에서의 응력비선형성을 고려하여 아스팔트 포장구조해석모형을 개발하였다. 또한 개발된 해석과정을 이용하여 시험도로 실제 초기 현장계측자료의 현장검증을 실시하였다.

핵심용어: 아스팔트 콘크리트 포장구조체, 다층탄성해석프로그램, 사용자 편의환경, 아스팔트 층분할, 보조기층 층분할

* 정회원 · 인덕대학 건설환경설계과 교수 · 공학박사

** 정회원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정

*** 비회원 · 연세대학교 토목공학과 연구원 · 공학박사 · 교신저자

**** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 · 공학박사



1. 서론

현재 국내의 경우 외국의 여러 설계법을 검증없이 단순히 도입하여 사용함으로써 여러 문제점이 발생하여 왔고, 우리나라 단일의 표준화된 설계법의 부재로 일선 실무자들의 혼선을 야기시키고 있다. 이러한 문제점으로 인하여 우리나라 자체의 고유설계법 개발이 절실히 필요하게 되었으며, 이는 21세기 지식사회체제 속에서 국내 기술력 확보라는 차원에서도 한국형 포장설계법 구축을 해야하는 실정이다.

한국형 포장설계법 구축의 일환으로 본 연구에서는 다양한 축상태에서의 해석을 위하여 1차원 다층탄성이론을 확장한 역학적 거동해석 프로그램을 개발하고 이를 현장에서 간편하게 사용될 수 있도록 Visual Basic 프로그래밍을 이용한 사용자 편의의 전·후 처리기법을 도입하여 β 버전으로 패키지화한다. 패키지화한 상용프로그램 β 버전을 포장체 모델 데이터베이스로부터 난수발생 경우에 대한 작동여부를 검증하고, 향후 발생될 문제점을 해결하여 포장구조해석의 전문적인 지식이 없는 일반 사용자들이 쉽게 접근할 수 있는 다층탄성프로그램을 개발하고자 한다. 또한 아스팔트층의 동적물성과 보조기층과 노상의 비선형물성을 고려할 수 있는 알고리즘을 추가하여 온도 및 응력비선형성을 고려한 아스팔트 포장구조해석모형을 개발하고자 한다. 또한 개발된 알고리즘을 이용하여 실내시험결과를 통해 물성을 추정 한 후 시험도로 현장실측 초기데이터를 통한 현장검정을 실시하고자 한다.

2. 다층탄성 프로그램의 개발

포장 구조해석을 위한 다층 탄성이론은 Boussinesq가 제안한 점하중이 반무한(half-space) 탄성체에 가해진 경우의 응력 해석기법에서 Burmister에 의해 등분포하중에 대한 다층탄성구조체의 해석기법으로 발전되었고, 이후 Michelow가 Burmister의 이론에 매트릭

스 기법을 도입하고 전자계산기의 발전과 함께 일반적 사용이 확대되기 시작하였다(Huang, 1993).

다층구조해석 이론에 의하여 그림 1과 같은 구조를 갖는 다층구조해석 전산프로그램을 개발하였다. 개발된 전산프로그램은 그림 1과 같이 크게 입력부분, 수직변위와 응력 및 변형률을 계산하는 부분, 그리고 출력부분으로 구성된다.

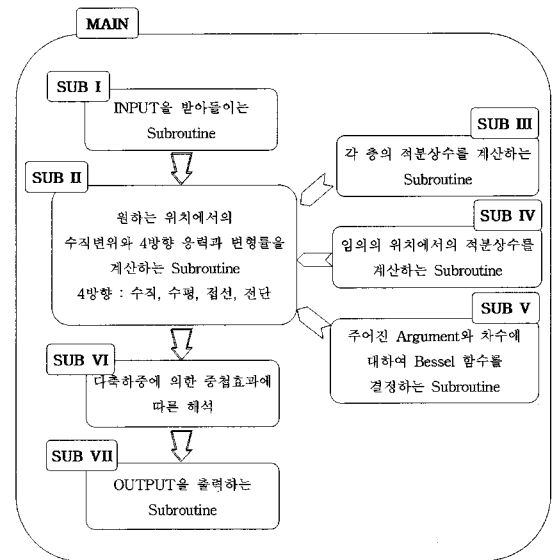


그림 1. 주프로그램과 부프로그램의 관계도

3. 하중중첩을 이용한 다축하중의 고려

실제 도로상을 주행하는 차량은 축간거리와 축의 개수에 따라 다양한 형태로 존재한다. 실제 차량이 주행하는 도로를 설계할 경우는 단축하중만을 모사할 수 있는 Axis-Symmetric을 이용한 지금까지의 다층탄성해석 프로그램만으로는 실제 주행하는 다축 차량에 의한 구조해석이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 탄성모델의 중첩효과를 이용하여 다양한 축간 거리와 1개 이상의 축을 고려할 수 있도록 프로그램을 개발하였다.

탄성모델에서의 중첩효과를 파악하기 위하여 상용



유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용한 2차원 모델링을 실시하였다. 탄성론에 의하면 그림 2와 같이 한 개의 하중에 의한 효과를 중첩시킨 것과 두 개 이상의 하중을 작용시킨 결과는 동일하다고 할 수 있다. 축중량 8.2ton, 축간거리 2m의 ESAL 표준트럭을 기준으로 2차원 유한요소해석을 실시한 결과 차랑하중에 의한 변위, 변형률, 응력의 분포는 한 개의 하중을 이용하여 해석한 후 간격을 두고 중첩한 결과를 간격을 가지는 두 개의 하중에 의한 해석결과와 비교한 결과 그 결과치가 정확히 일치함을 알 수 있었다.

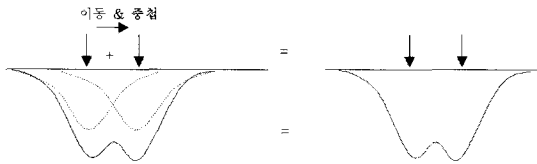


그림 2. 탄성해석에서 하중의 중첩효과

4. 사용자 편의환경의 배포용 프로그램 개발

실제 아스팔트 콘크리트의 구조적 능력을 평가하고 각 층의 강도를 예측하기 위하여 현장에서 간편하게 사용될 수 있도록 Visual Basic 프로그래밍을 사용한 사용자 편의의 전·후 처리기법을 도입하여 본 연구에서 개발된 다층탄성해석 프로그램을 상용프로그램으로 패키지화하였다. 이 패키지는 프로그램 해석을 위한 Input Data를 사용자가 간편하게 입력할 수 있도록 도와주는 Input Data 마법사와, 다층탄성해석과 출력결과를 보여주는 세 부분으로 구성되어 있다. 본 연구에서 개발한 IDYSPAP(InDuk-YonSei Pavement Analysis Program) 배포판을 만들어서 각 대학 도로포장 연구실에 배포하여 문제점을 수정하였다.

그림 3은 IDYSPAP의 초기화면이자 이 프로그램

의 메인부이고, 파일메뉴에서 새파일 메뉴를 선택하면 그림 4와 같이 Input Data를 쉽게 입력할 수 있도록 도와주는 Input Data 마법사창이 화면에 나타난다.

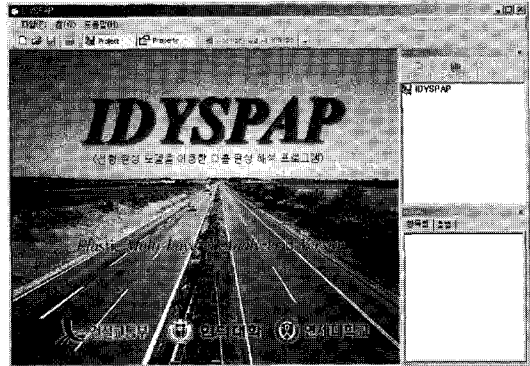


그림 3. IDYSPAP 프로그램의 메인화면

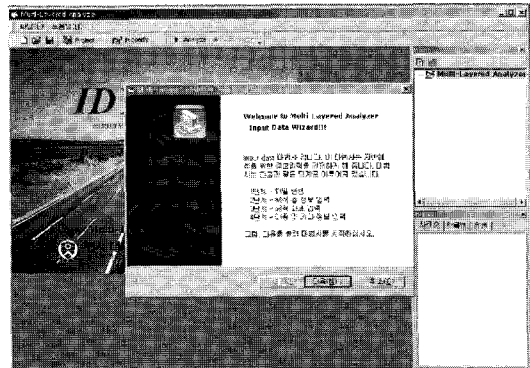


그림 4. Input Data 마법사 화면

그림 5에서 그림 8은 각각 파일명 정의, 해석층 정보 및 물성치 입력, 해석좌표 입력, 그리고 다축하중 정보 입력창을 보여준다. 본 연구에서 개발한 프로그램에서는 그림 8과 같이 축의 개수와 각 축의 축하중을 입력할 수 있도록 개발하였다. 최대 4개의 축을 가지는 대형트럭까지 해석이 가능하며, 각 축의 축간 간격 및 각 축의 축중량을 각각 입력하여 프로그램 내부에서 연속계산에 의해 다축하중의 영향을 고려할 수 있도록 개발하였다.

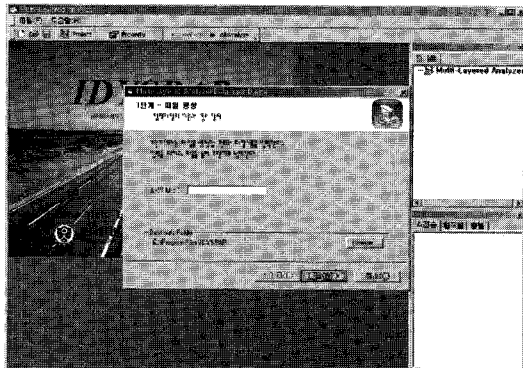


그림 5. Input Data 마법사 화면

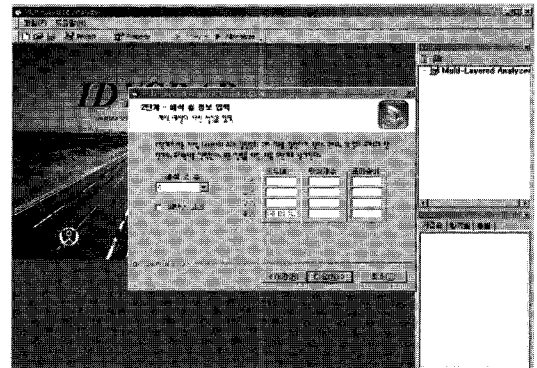


그림 6. 해석층 물성치 입력 화면

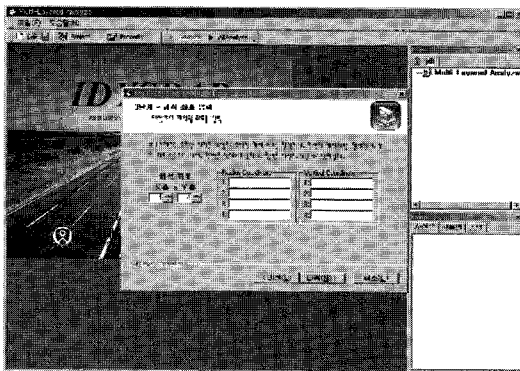


그림 7. 해석좌표 입력 화면

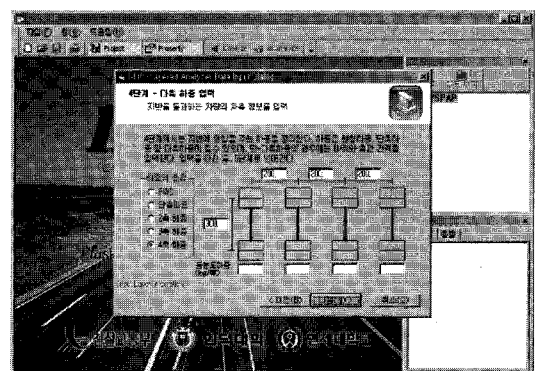


그림 8. 다축하중 입력 화면

그림 9는 Project창과 Property창 화면으로, Project창은 Input Data 마법사로 만든 Input 파일을 불러와서 해석하여 Output 파일을 생성한다. 그

림 10은 차트와 텍스트를 보여주는 화면이다. 우선 차트는 2D와 3D가 가능하고 차트 유형은 막대형, 꺾은선형, 영역형, 단계형이 있다.

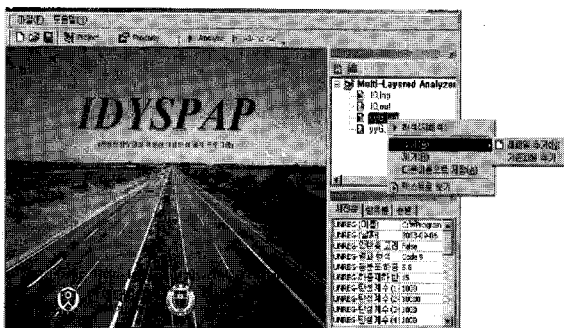


그림 9. Output Data 해석 화면

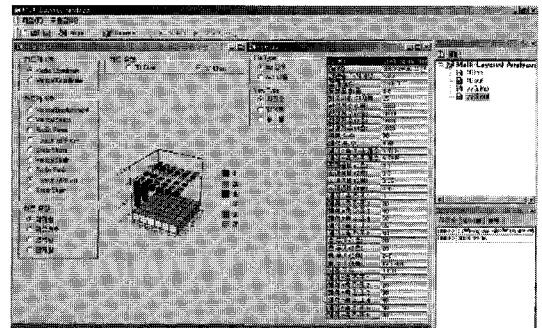


그림 10. Output Data Presentation 화면

5. 아스팔트층 온도에 따른 비선형성 고려

아스팔트 콘크리트 포장구조체의 아스팔트층 거동 특성에 영향을 미치는 환경적 요인은 크게 대기온도 변화, 내부온도 변화에 의한 아스팔트 표층 및 아스팔트 안정처리기층의 물성변화이다. 아스팔트 콘크리트층의 내부온도는 기상, 아스팔트 콘크리트층 하부구조 상태 등의 환경요인에 의한 외부조건, 그리고 아스팔트 콘크리트층 자체의 고유물성에 의한 내부 조건에 의하여 영향을 받는다. 아스팔트 콘크리트층의 응력-변형률 관계를 나타내는 물성은 온도와 밀접한 관련을 갖고 있으므로 아스팔트 콘크리트층의 온도에 따른 물성의 변화를 고려하여야 한다. 즉, 아스팔트 콘크리트층의 탄성계수는 온도변화에 따라 그 물성을 달리하며, 이와 같은 변화특성은 포장구조체의 아스팔트 콘크리트층 온도별 탄성계수 변화모델로부터 추정될 수 있다. 다음 그림 11은 국내의 아스팔트층 표면최고온도는 최고 67.33℃ 까지 상승했던, 아스팔트층이 두꺼운 인천신공항 시험시공 아스팔트 콘크리트 포장구조체에서 측정된 깊이별 온도 분포 일례이다.

그림 11을 살펴보면, 온도분포 변화에 따라 온도 변화가 매우 큰 I 구간, 변화기울기가 완만한 II 구간, 변화정도가 미비한 III 구간의 세 구간으로 구분되어질 수 있다.

- ① I 구간 : 온도 영향이 큰 10cm 구간으로 2.5cm 씩 구분하여 온도의 영향을 고려하도록 한다. 단 표층과 중간층 또는 기층 경계선이 걸리는 경우, 중간층과 기층의 탄성계수 차이가 크지 않은 점으로 고려하여 표층 경계면에서 구분되도록 하였다.
- ② II 구간 : 온도변화 기울기가 완만한 10cm 구간으로, 5cm씩 구분하도록 하였다.
- ③ III 구간 : 변화정도가 미비한 구간으로, 10cm씩 구분하도록 하였으며, II 구간과 경계면이 될 경우 5cm 이하는 5cm 구간에 흡수되며, 5cm 이상에서는 그대로 하나의 층을 형성하도록 하였다.

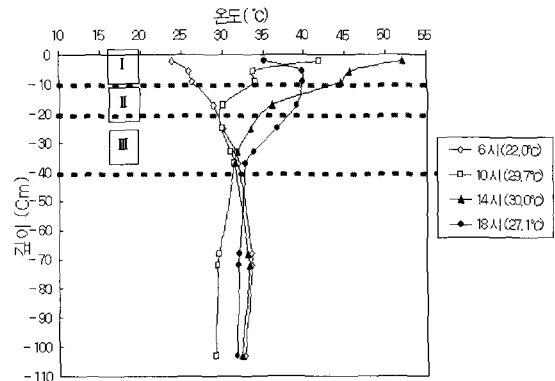


그림 11. 인천신공항 포장체 깊이별 온도분포의 시간에 따른 변화 예(1998년 8월 22일)

본 연구에서는 도로설계시 아스팔트층의 온도변화에 따른 물성의 비선형성을 다층탄성해석에서 고려하기 위한 방법으로, 위와 같은 방법을 이용하였다. 본 방법은 도로설계시 해석의 반복수행으로 걸리는 시간과 효율성을 고려하고 전문가들의 의견을 수렴하여 제안된 것이며, 본 연구에서는 아스팔트층 온도 영향을 고려하기 위한 층분할 서브루틴을 개발하여 기존의 다층탄성프로그램에 추가하였다.

6. 포장하부구조의 응력 비선형성 고려방안

다층구조로서의 역학적 특성을 고려할 수 있는 포장하부구조의 비선형성을 고찰하기 위하여 현재 층재료 자체의 성질을 대변하는 여러 모델 중 실제적으로 포장하부모델로 논의되고 있는 비선형탄성모델을 탄성해석으로 구현하기 위해서 최적의 층분할 및 해석과정을 제시하였다(최준성, 2003, 최준성, 2008).

우선 다층구조 상태인 포장체의 거동해석에 영향을 미치는 두께와 탄성계수 조합으로 구성된 162개의 표준단면과 하중종류에 따른 영향을 분석하여 응력의 변화분포가 큰 경우를 각 층모델 거동비교 및 공용성 평가를 위한 해석단면으로 결정하였다. 해석결과 아스팔트 포장구조체 각 층의 두께와 탄성계수



변화에 따라 가장 큰 응력분포를 나타내는 해석단면 및 적용하중을 표 1에 나타내었다.

표 1. 결정된 해석단면

물성	층	AC 층	보조기층	노상
두께(cm)		30	20	950
포아송비		0.30	0.35	0.40
탄성계수(kg/cm ²)		10000	비선형결과	비선형결과
적용하중		원형등분포하중		

6.1 보조기층에 대한 응력 비선형성 검토

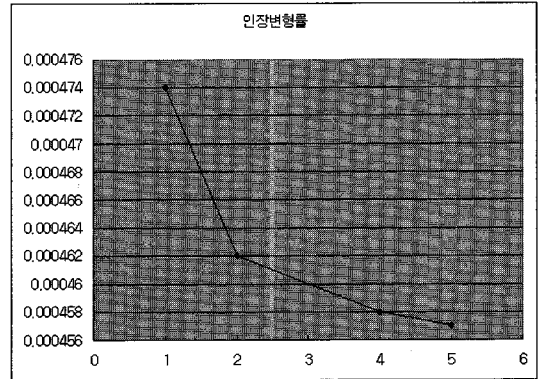
보조기층의 층분할에 따른 영향을 고려하기 위하여 다음과 같은 순서에 따라 해석을 수행하였고, 보조기층의 비선형 탄성계수인 E_{non} 값을 산정하기 위한 구성모델은 한국형 포장설계법 1단계 3차년도의 실내시험결과인 식 (1)을 사용하였다(건설교통부, 2004).

1. 보조기층의 탄성계수를 가정
2. 보조기층을 1층, 2층, 4층, 5층으로 나누어, 각 층 중앙에서의 체적응력 산정
3. 계산된 체적응력을 이용하여 각 층에서의 E_{non} 값 산정
4. 계산된 E 값을 사용한 각 층 중앙에서의 체적응력 산정
5. 다시 산정된 체적응력에 의하여 E_{non}' 을 산정
6. E_{non} 과 E_{non}' 의 차이가 1kg/cm² 이하가 될 때까지 반복수행
7. 최종 E_{non} 값 도출

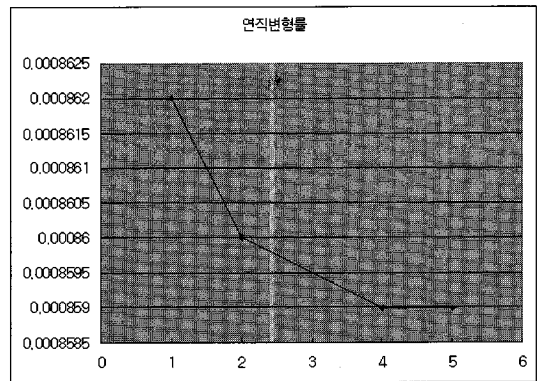
$$E_{non} = 87.47 + 0.33\theta (E_{non} : \text{MPa} \ \& \ \theta : \text{kPa}) \quad (1)$$

보조기층의 층분할 개수를 세분화할수록 실제 응력비선형성을 정확히 모사할 수 있으나 층분할 개수가 증가함에 따라 해석시간은 증가하게 된다. 최적의 층분할 개수를 산정하기 위하여, 층분할 개수를

증가시킴에 따른 아스팔트층 하단의 인장변형률과 노상 상단의 연직변형률을 비교하여 그림 12에 나타내었다.



(a) 아스팔트층 하단의 인장변형률



(b) 노상 상단의 연직변형률

그림 12. 층분할 개수에 따른 변형률의 비교

그림 12를 살펴보면 층분할 개수가 증가할수록 변형률은 일정하게 수렴함을 알 수 있다. 또한 층분할 개수가 1개에서 2개로 증가할 때의 상대오차는 아스팔트층 하단의 인장변형률에서 최대 2.53%의 차이를 보이며, 층분할 개수가 2개에서 4개로 증가할 경우 최대 상대오차는 아스팔트층 하단의 인장변형률에서 0.87%를 보인다. 따라서 층분할 개수가 2개 이상일 경우에는 오차가 1% 미만으로 나타나, 해석시간을 고려한 최적의 보조기층 층분할 개수는 2개



가 적절하다고 판단된다.

6.2 노상에 대한 응력비선형성 검토

노상의 충분함에 따른 응력비선형성을 검토하기 위하여 6.1절의 방법과 동일하게 해석을 수행하였으며, 노상의 비선형 탄성계수인 E_{non} 값을 산정하기 위한 구성모델은 한국형 포장설계법 1단계 3차년도와 실내시험 결과인 식 (2)를 사용하였다(건설교통부, 2004).

$$E_{non} = 101.6 \cdot f(w) \cdot \theta \cdot 0.012$$

(E_{non} : MPa & θ : kPa) (2)

여기서, $f(w) = -6.526 \cdot w / OMC + 7.409$, $OMC = 9.8\%$

노상은 노상상단 1m와 나머지 부분의 두 층으로 나눈 뒤 각 층에 대하여 식 (2)의 시험결과에 따른 비선형물성을 사용하여 체적응력변화에 따른 반복계산을 실시하였으며, 하나의 층으로 해석한 결과와 두 층으로 분할하여 해석한 결과를 표 2에 비교하여 정리하였다. 표 3에서 보이는 바와 같이 노상의 경우 충분할 개수에 따른 아스팔트층 하단의 연직변형률과 노상상단의 인장변형률이 동일하게 산정되었다. 이는 노상의 구성모델이 결정되면 구성모델에 따른 E_{non} 값의 변화에 따라 체적응력의 변화가 적고, 포장체 표면에서 작용하는 하중이 분산되므로 노상상단에 가해지는 하중이 줄어들므로 노상의 깊이에 따른 E_{non} 의 차이가 변형률에 미치는 영향이 적다고 판단된다. 노상의 충분함에 따른 영향이 미비하므로 노상은 하나의 층으로 해석하는 것이 바람직하다고 판단된다.

표 2. 노상의 충분함에 따른 해석결과의 차이

노상 분할	아스팔트 하단 인장변형률	노상 상단 압축변형률
한층으로 해석	0.541E-3	0.861E-3
두층으로 분할	0.541E-3	0.861E-3

7. 현장계측을 통한 다층탄성 프로그램의 검증

시험도로의 온도계, 변형률계 등을 통하여 실제 하중에 의한 아스팔트 포장구조체의 거동을 측정하고 본 연구를 통하여 개발된 다층탄성 프로그램을 이용한 거동분석을 실시하여 다층탄성 프로그램의 현장검증을 실시하였다. 본 연구에서 제시한 해석과정을 통하여 아스팔트층의 온도변화에 따른 거동 및 보조기층과 노상의 비선형거동을 고려하였을 경우와 고려하지 않았을 경우의 거동차이를 분석하였다. 아스팔트 포장구조체 각 층의 물성을 이용한 종합적인 거동분석을 통하여 획득한 분석자료와 현장계측자료를 비교하여 다층탄성이론을 통한 이론적 거동과 실제 현장계측을 통한 실제 거동과의 차이를 파악하고 원인을 분석하였다.

본 연구에서 제시한 다층탄성해석 알고리즘과 현장시험결과를 비교하기 위하여 표 3에서 보이는 바와 같이 시험도로 A5 구간을 선정하였다. A5 구간은 표층, 중간층, 기층, 보조기층, 동상방지층, 그리고 노상의 총 6층으로 구성되어 있고, 각 층의 두께와 포아송비, 그리고 매설된 계측기의 종류를 표 3에 나타내었다. 그림 13과 그림 14는 각각 A5 단면에 매설된 변형률계의 위치를 나타낸 평면도와 단면도이다. 아스팔트 표층과 중간층에는 각각 6개의 변형률계가 매설되어 있고, 아스팔트 기층에는 두 부분으로 나누어 총 12개의 변형률계가 매설되어 있다.

아스팔트 표층과 중간층, 그리고 아스팔트 기층은 아스팔트로 이루어진 층으로서, 아스팔트층의 동적

표 3. 현장 데이터를 이용한 검증을 위한 현장단면

층	두께(cm)	물성	포아송비	매설된 계측기
표층	5	표 4 참조	0.30	변형률계 : 24개 도압계 : 6개 온도계 (Thermocouple) : 18개 MDD : 1공 (4개 1조)
중간층	7	표 4 참조	0.30	
기층	18	표 4 참조	0.30	
보조기층	30	표 4 참조	0.35	
동상방지층	30	표 4 참조	0.40	
노상	910	표 4 참조	0.40	

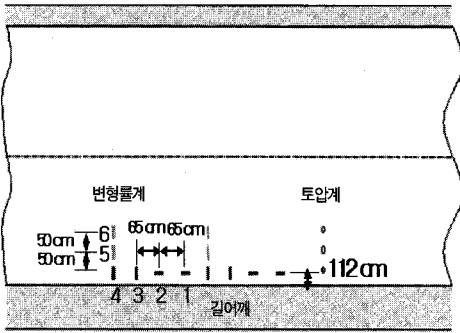


그림 13. 시험도로 계측기 매설위치의 평면도

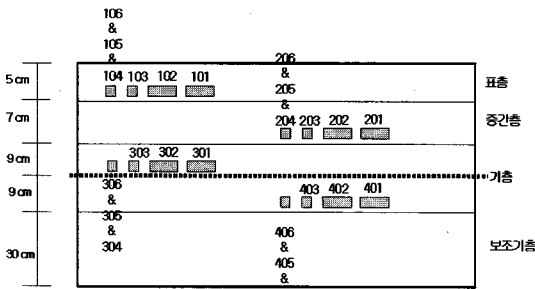


그림 14. 시험도로 계측기 매설위치의 단면도

물성은 식 (3)에 나타낸 바와 같다. 식 (3)에서의 각 입력변수는 한국형 포장설계법 1단계 3차년도에 실 내시험결과인 표 4의 결과를 사용하였다(건설교통 부, 2004).

$$AP \text{ Modulus} = 10^{a_1 + \frac{a_2}{a_3 + a_4 / \exp[a_5 + a_6 (\log fr + a + b \cdot \text{temp}]}} \quad (3)$$

보조기층의 경우와 노상의 경우는 6.1절과 6.2절에서 나타낸 것과 같이 시험도로 보조기층과 노상의 비선형물성에 대한 실내시험자료를 이용하였다. 보조기층의 경우는 본 연구에서 제안한 바와 같이 두개의 층으로 분할을 하여 각 층의 비선형물성을 산정하였고, 동상방지층과 노상의 경우는 한 층으로 합하여 비선형물성을 입력하였다.

검증을 위한 현장시험결과로는 한국도로공사 시험 도로 실측자료 중 2003년 12월 2일과 2003년 12월 4일 실시된 FWD 하중재하시험결과를 사용하였으며, 총 8개의 Case에 대한 검증을 실시하였다. FWD 하중재하는 두 가지 하중(12000lb, 15000lb)을 사

표 4. 아스팔트층(표층, 중간층, 기층)에서의 비선형물성

12월2일 13시43분													
Layer	Velocity	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	Frequency	a	b	temp	E(Mpa)	E(kg/cm ²)
AP	FWD	0.56767	1.70913	0.51468	0.42052	1.78132	0.2509	30.3	3.4755	-0.1516	20	4252	43357
AP	FWD	0.56767	1.70913	0.51468	0.42052	1.78132	0.2509	30.3	3.4755	-0.1516	18.48	4386	44727
Base	FWD	0.29014	0.19771	0.05412	0.00907	0.14339	0.24066	30.3	3.3773	-0.1481	16	4715	48076
Base	FWD	0.29014	0.19771	0.05412	0.00907	0.14339	0.24066	30.3	3.3773	-0.1481	15.33	4779	48734
Base	FWD	0.29014	0.19771	0.05412	0.00907	0.14339	0.24066	30.3	3.3773	-0.1481	14.32	4876	49718
Base	FWD	0.29014	0.19771	0.05412	0.00907	0.14339	0.24066	30.3	3.3773	-0.1481	12.54	5043	51425
Base	FWD	0.29014	0.19771	0.05412	0.00907	0.14339	0.24066	30.3	3.3773	-0.1481	12.35	5061	51605
12월4일 16시50분													
Layer	Velocity	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	Frequency	a	b	temp	E(Mpa)	E(kg/cm ²)
AP	FWD	0.56767	1.70913	0.51468	0.42052	1.78132	0.2509	30.3	3.4755	-0.1516	11.2	4992	50903
AP	FWD	0.56767	1.70913	0.51468	0.42052	1.78132	0.2509	30.3	3.4755	-0.1516	11.85	4941	50381
Base	FWD	0.29014	0.19771	0.05412	0.00907	0.14339	0.24066	30.3	3.3773	-0.1481	12.31	5064	51643
Base	FWD	0.29014	0.19771	0.05412	0.00907	0.14339	0.24066	30.3	3.3773	-0.1481	12.58	5039	51387
Base	FWD	0.29014	0.19771	0.05412	0.00907	0.14339	0.24066	30.3	3.3773	-0.1481	12.54	5043	51425
Base	FWD	0.29014	0.19771	0.05412	0.00907	0.14339	0.24066	30.3	3.3773	-0.1481	11.52	5137	52386
Base	FWD	0.29014	0.19771	0.05412	0.00907	0.14339	0.24066	30.3	3.3773	-0.1481	11.03	5182	52844



용하였으며, 각 단계마다 3회씩 반복하여 하중 재하를 실시하였다.

시험결과를 검증하기위한 해석과정은 총 3가지의 해석을 실시하였다. 첫째, 아스팔트층, 보조기층, 노상의 비선형성을 고려하지 않고 현재 주로 사용되고 있는 상대강도개념의 AASHTO 방법에 의한 예측물성을 사용한 해석(Case I), 그리고 둘째, 타 연구진에 의하여 개발된 아스팔트층 물성식과 보조기층·노상의 비선형물성을 고려한 경우(Case II), 마지막으로 셋째, 두 번째 경우와 같이 비선형물성을 사용하고, 본 연구에서 제안된 층분할방법에 의하여 아스팔트층과 보조기층을 분할하여 각각의 비선형물성을 고려한 방법이다(Case III). 표 5는 아스팔트층에서의 깊이별 실측 온도데이터를 사용하고, FWD 하중의 하중주파수를 고려하여 산정한 아스팔트층의 깊이별 물성을 나타낸다. 표 5는 위에서 제시한 세가지 방법에 따른 해석결과를 이용하여 현장계측 데이터와 비교한 결과이다.

기존의 상대강도개념으로부터 예측된 물성을 이용한 다층탄성해석결과는 표 5의 Case I에서 보이는 바와 같이 상대오차가 최대 828%로 이는 실제 현장

의 재료에 대한 물성시험 없이 일반적인 물성으로 해석을 실시하였을 경우에는 해석결과가 현장의 실제 거동과는 상이함을 알 수 있다. 주요 재료에 대한 실내시험을 통하여 산정된 비선형물성을 사용하여 해석한 결과 표 5의 Case II에서 보이는 것과 같이 상대오차가 최대 191%로 오차가 4배 이상 줄어들음을 알 수 있다. 그러나, 아스팔트 비선형물성의 경우 실내시험자료가 실제 현장의 아스팔트층을 코어링하여 시험을 실시한 자료가 아닌, 현장배합비와 동일한 배합으로 실내시험을 실시한 자료로 현장상태를 동일하게 구현할 수 없었던 점과, 비선형탄성계수가 복합탄성계수를 사용하여 소산탄성계수 개념이 포함되어 있는 점, 그리고 노상의 함수비를 직접 측정하지 않고 가정하여 비선형탄성계수를 산정한 점 등에 대한 오차라고 판단된다. 마지막으로 아스팔트층의 온도 분포를 정확히 고려하기 위하여 아스팔트 층분할을 실시하고, 보조기층도 2개의 층으로 층분할을 실시하여 해석한 결과를 살펴보면, 표 5의 Case III와 같이 층분할을 하지 않았을 경우와 큰 차이가 발생하지 않았다. 이는 FWD 시험이 실시된 시점에서 아스팔트층의 내부온도변화가 매우 작기 때문에 아스팔트

표 5. 각각의 방법에 따른 해석결과 및 시험결과와의 상대오차

번호	위치	시험결과1	시험결과2	시험결과3	시험결과평균	Case I		Case II		Case III	
						해석결과	상대오차 (%)	해석결과	상대오차 (%)	해석결과	상대오차 (%)
1	중간층	2.47	1.83	1.67	1.99	17.20	765	2.89	45	2.84	43
1	기층하단	32.15	33.05	32.36	32.52	138.00	324	82.3	153	82.9	155
2	중간층	1.67	2.87	2.42	2.32	21.50	828	3.57	54	3.52	52
2	기층하단	46.18	46.48	48.62	47.09	173.00	267	103	119	104	121
3	표층	24.00	25.93	25.14	25.02	103.00	312	68.1	172	68.7	175
3	기층상단	16.39	15.61	14.23	15.41	68.60	345	34.9	126	35.2	128
4	표층	38.11	40.11	39.20	39.14	129.00	230	85.1	117	85.8	119
4	기층상단	22.33	23.22	22.65	22.74	85.80	277	43.6	92	43.9	93
5	중간층	3.35	4.13	3.53	3.67	17.20	369	1.09	-70	0.968	-74
5	기층하단	29.59	27.55	28.47	28.54	138.00	384	79.6	179	80.2	181
6	중간층	5.94	5.90	5.73	5.85	21.50	267	1.33	-77	1.21	-79
6	기층하단	44.37	45.35	45.05	44.92	173.00	285	99.3	121	100	123
7	표층	22.78	21.47	21.56	21.94	103.00	370	63.3	189	63.8	191
7	기층상단	15.67	14.34	15.48	15.16	68.60	352	34.4	127	34.7	129
8	표층	35.18	34.71	34.72	34.87	129.00	270	79	127	79.8	129
8	기층상단	23.03	22.22	22.88	22.71	85.80	278	42.9	89	43.4	91



층 온도변화에 따른 영향이 없기 때문에 판단되며, 혹한기나 혹서기에 새벽이나 오후와 같이 아스팔트층 내부의 온도변화가 클 경우에는 큰 영향이 있을 것으로 판단된다.

8. 결론

본 연구에서는 기본설계용 다층탄성이론을 이용한 역학적 거동해석 프로그램을 개발하였고, 현장에서 간편하게 사용될 수 있도록 Visual Basic 프로그래밍을 사용한 사용자 편의의 전·후 처리기법을 도입하여 본 연구에서 개발된 다층탄성해석 프로그램을 패키지화하였다. 패키지화한 상용프로그램에 아스팔트층의 깊이별 온도변화에 따른 영향과 보조기층, 노상과 같은 비구속층에서의 응력비선형성을 고려하여 아스팔트 포장구조해석모형을 개발하였다. 또한 개발된 해석과정을 이용하여 시험도로 실제 현장계측 자료의 현장검증을 실시하였다. 본 연구에 의한 결론은 다음과 같다.

1. 다층탄성이론을 이용하여 추후 교통량에 따른 공용성 평가나 각 층의 Interface를 고려할 수 있는 서브루틴의 추가가 용이하도록 개방구조를 지닌 기본설계용 역학적 거동해석 프로그램을 개발하였다.
2. 탄성모델의 중첩효과를 이용하여 다양한 축간 거리와 1개 이상 최대 4개의 축을 고려할 수 있도록 하여 대형트럭까지 해석이 가능하도록 프로그램을 개발하였다.
3. 아스팔트층 내부의 온도변화를 고려하기 위한 층분할방법을 제시하였으며, 층분할방법에 따라 자동으로 아스팔트층의 층분할이 가능하도록 프로그램을 수정하였다.
4. 보조기층의 비선형성을 고려하여 최적의 층분할 개수를 제시하였다. 최적의 층분할을 제시하기 위한 해석결과, 보조기층을 2개로 분할하는

것이 해석시간과 결과의 정확도 측면에서 가장 만족스러운 결과를 보임을 알 수 있었다.

5. 실제 현장에서 계측된 실측자료를 이용하여 다층탄성해석 프로그램을 세가지 상이한 해석조건에 따라 검증을 실시하였다. 첫째, 아스팔트층, 보조기층, 노상의 비선형성을 고려하지 않고 현재 주로 사용되고 있는 상대강도개념의 AASHTO 방법에 의한 예측물성을 사용한 해석, 둘째, 타 연구진에 의하여 개발된 아스팔트층 물성식과 보조기층·노상의 비선형물성을 고려한 경우, 마지막으로 두 번째 경우와 같이 비선형물성을 사용하고, 본 연구에서 제안된 층분할방법에 의하여 아스팔트층과 보조기층을 분할하여 각각의 비선형물성을 고려한 방법이다. 해석결과 일반적인 예측물성을 이용한 경우에는 상대오차가 최대 828%로 나타났으며, 실내시험을 통한 물성을 이용할 경우 상대오차가 최대 191%로 나타났다. 층분할이론을 추가하여 해석을 실시한 경우 최대상대오차는 189%로 줄어들음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부에서 지원한 '한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구'의 일환으로 연구되었으며, 본 연구를 가능케 하여주신 국토해양부에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부, 아스팔트 포장 설계법 개발, 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 1단계 3차년도 최종보고서, 2004.
- 최준성, 서주원, "아스팔트 포장하부구조 층모델 결정에 관한 연구", 한국도로포장공학회 논문집, 제5권 제4호, pp. 13-22, 한국도로학회, 2003.
- 최준성, 서주원, 김수일, "현장 도로평가장비를 통한 입상재료층의 비선형 재료상수 추정정에 관한 연구", 대



한토목학회 논문집, 제 28권 제 2D호, pp.
227~234, 대한토목학회, 2008.

Huang, Y.H., *Pavement Analysis and Design*,
Prentice-Hall Inc., 1993.

접 수 일: 2008. 5. 29

심 사 일: 2008. 6. 2

심사완료일: 2008. 8. 25