

아스팔트 포장의 구조해석

최준성* · 유지형** · 박동엽***

1. 머리말

도로는 수천년동안 여러 형태로 사용되어 오긴 했으나 근대적인 포장도로의 출현은 비교적 오래 되지는 않았다. 20세기 초까지만 해도 인적·물적 이동은 주로 철도 또는 마차에 의존하였다. 자동차가 널리 보급되기 시작한 1920년대 이후 교통체계는 급속도로 변하게 되었고, 자동차가 안전하게 주행할 수 있는 전천후·고품질의 도로가 요구되었다. 이에 따라 도로 건설시 합리적이고 공학적인 설계와 새로운 도로포장기술이 요구됨에 따라 실제 시험도로가 유럽과 북미에 건설되었다. 시험도로 중에서 도로설계와 시공에 가장 중요한 영향을 미친 것은 1950년대 말에 미국 Illinois주 Ottawa근교에 건설된 AASHO 시험도로이다. 이 시험에서 조사된 결과를 바탕으로 포장도로의 공용성과 설계개념이 정립되어 1961년에 AASHTO 설계잠정지침이 제시되었다. 1960년대 이후 이론 및 경험에 있어서 포장공학은 상당한 발전을 하였고, 이에 따라 1986년에는 보다 역학적인 AASHTO 설계법이 제시되었다.

이러한 포장공학의 이론과 경험측면의 발전과 함께 지반공학의 발전 및 대용량의 컴퓨터가 개

발되고 지속적으로 향상됨에 따라 포장구조해석을 위한 강력한 전산프로그램이 개발됨으로써 과학적이며 역학적인 포장도로의 설계 및 유지관리 시스템이 가능하게 되었다. 오늘날 주요 포장설계법은 다양한 범위의 시험포장도로에서 조사된 공용성과 역학적 포장해석에 바탕을 둔 보다 과학적인 방법에 의한다. 즉 포장도로의 역학적 설계와 유지관리는 실내시험을 통하여 결정되는 포장재료의 공학적 물성에 바탕을 둔 포장도로의 해석적 거동을 실제 포장도로의 공용성과 관계를 맺음으로써 이루어지게 되는 것이다.

이와 같이 도로포장은 중요하고 고가인 사회자본의 하나이고, 그 설계방법은 거시적으로는 대단히 큰 사회적 영향을 갖고 있는 것이다. 따라서, 그 설계에 대해서 보다 경제적이고 유효한 방법을 확립해 가는 것이 사회적 요청이기도 하다. 본 고에서 기술하고자 하는 포장구조에 관한 역학적 해석방법은 그런 요구에 대해 보편적인 시점을 주는 수단 of 하나이므로, 우리 도로포장 기술자들은 포장 설계를 할 때에는 실제 데이터의 유효한 활용과 함께 포장구조 해석의 이해가 중요한 것임을 인식하여야 한다. 또한 아스팔트 포장도로의 유지관리를 위하여 포장도로의 구조적

* 정회원 · 인덕대학 건설환경설계학과 (soilpave@induk.ac.kr)

** 정회원 · 경일대학교 토목공학과 (yjh@bear.kyung.ac.kr)

*** 정회원 · 한양대학교 첨단도로연구센터 (parkdon2@yahoo.com)

평가(학회지 제 3권 3호)를 수행하기 위해서는 도로포장체의 역학에 관련된 구조해석을 통하여 교통하중에 대한 포장체의 거동을 산정하여야 하므로 본 고에서는 우리 회원들에게 아스팔트 포장도로의 구조해석에 관련된 기본개념과 현황, 그리고 앞으로의 전망과 활용방안에 대해 소개하고자 한다.

2. 포장구조해석은 어디에서 어떻게 이용되는가?

아스팔트 포장구조해석은 머리말에서와 같이 도로포장설계, 포장평가 및 유지보수시스템에 사용될 수 있다. 아스팔트 포장의 설계방법에 있어 세계적인 큰 흐름은 CBR(California Bearing Ratio) 설계법 탄생 이전의 시대, CBR 설계법 시대, AASHO(American Association of State Highway Officials : 미연방도로국) 설계법 시대, 개정 AASHO 설계법시대의 4가지로 집약할 수 있다. 또한, 최근에는 여기에 덧붙여 이론적 해석에 근거한 설계법의 개발, PMS(Pavement Management System) 개념의 도입은 세계적인 경향이다.

2.1 도로포장평가와 도로포장설계법

1943년에 Burmister가 표면의 휨을 산출하기 위해 도표를 발표한 이래 많은 연구자에 의해 2층 구조, 3층 구조의 이론해석법이 점차로 발표되었다. 이들 연구는 1940년대에 집중되었지만 실용적인 설계법이 발전하지는 못했다. 그러나 1960년대에는 전자계산기의 진보에 따라 많은 수치해와 계산도표가 발표되기 시작했다. 그 가운데서도 Jones와 Peattie의 연구는 1963년에 발표된 Shell 설계법의 기초가 된 것이다. 그 후 Chevron의 CHEV5L, Shell의 BISTRO(Bitumen Structures in Road), BISAR (Bitumen Stress Analysis in Road) 등 응력, 변형률, 변위를 계산

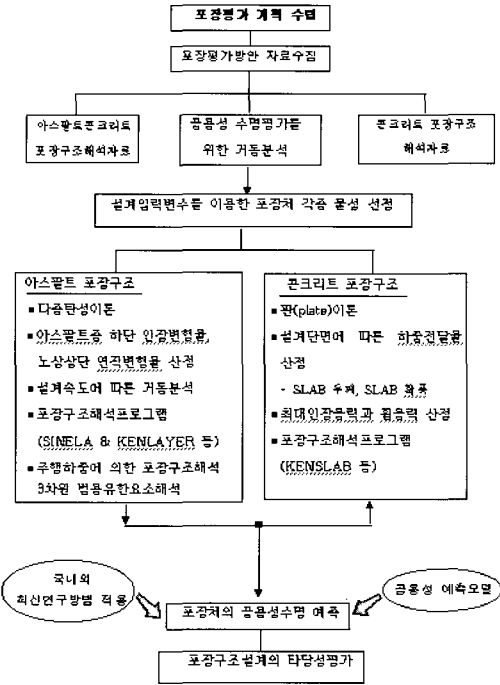
하는 다층탄성해석 프로그램이나 응력, 뒤틀림, 변위의 계산과 함께 포장이 파괴될 때까지의 기간을 예측하는 층구조해석 프로그램인 DAMA 등이 개발·발표 되어 현재에는 많은 연구자들이 이용하고 있다. 또 이들 프로그램을 응용한 설계법이 발표되어 Shell, AI 등의 설계법에 반영되게 되었다. 일본에서는 1992년판 아스팔트 포장요강에서 경험적 설계법인 T_A법에 의하지 않고 다층탄성이론을 사용한 설계법이 T_A법을 보정해 장래의 이론적 설계법으로 개발될 수 있도록 처음으로 도입되었다.

그러나 아직은 아스팔트 포장구조해석 개념은 도로포장설계보다는 도로포장 평가부분에 더욱 활발히 연구되고 사용되는 중이다. 따라서 도로포장설계 이후에 설계수명에 대한 평가와 더불어 비파괴시험장비를 통한 기존 도로의 평가 및 덧씌우기 설계에 필요한 물성추정 등에 사용되고 있다. 다음 그림 1과 2는 현재 포장구조해석으로 활발히 수행되고 있는 아스팔트 포장구조해석을 통한 도로포장설계의 타당성 평가 및 기존 도로 평가에 활용되고 있는 흐름도이며, 그림 3은 일반적인 도로에서 포장구조 해석결과로 이용되는 포장구조체의 거동을 나타낸 것이다.

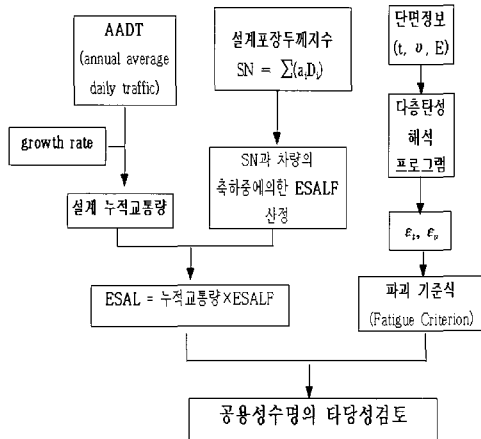
또한 현재 세계적으로 최근 설계법 경향이 역학-경험적인(Mechanistic-Empirical) 방법으로 발전되어가는 추세이므로 포장구조해석의 중요성은 그 어느 때보다도 부각되고 있다. 따라서 포장의 응력, 변형률, 처짐량 등은 상당한 관심사이므로 아스팔트 포장도로의 설계를 위해 포장구조해석에 관한 논의가 특히 활발히 전개되고 있다.

이와 같은 개념의 미국 AASHTO 2002 설계법 개발연구가 진행중이고, 중간단계의 연구결과들은 아직 실제 현장에서는 완전히 검증되지 않았으나 포장구조해석을 설계의 기본개념으로 채택하였고, 유럽의 AMADEUS(Advanced Models for Analytical Design of European pavement Structures)에서도 그

림-4와 같이 포장구조해석을 이용한 설계법을 개발하고자 이미 1995년부터 연구되어지고 있다.



(a) 도로포장설계평가 예



(b) 도로포장 설계수명의 평가에
그림 1. 신설도로 포장구조해석 예

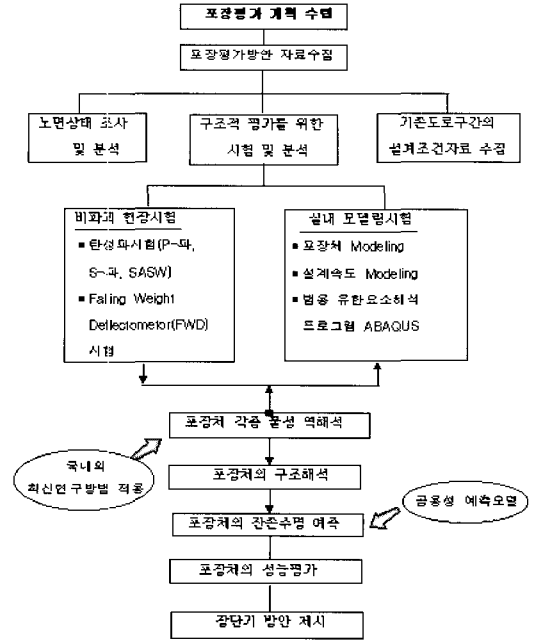


그림 2. 기존도로 포장평가 구조해석예

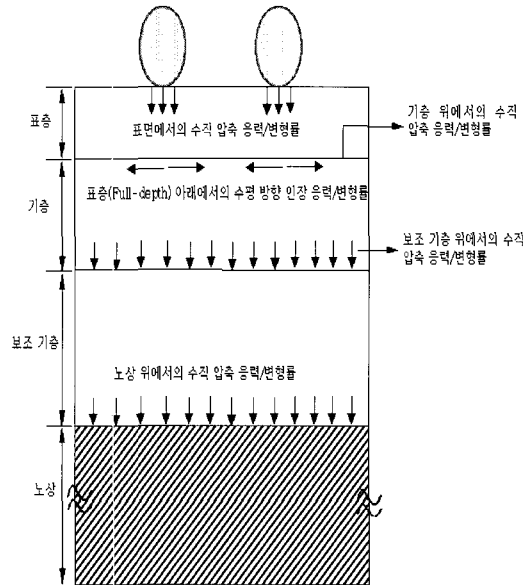


그림 3. 일반적인 도로구조에서의 임계(critical) 응력과 변형률

국내에서도 한국형 포장설계법 개발연구가 역학적-경험적 설계법을 기본개념으로 하여 시작되었다.

아스팔트 포장의 구조설계라는 것은 주어진 설계조건을 바탕으로 포장의 구성과 각층의 강도, 각층의 두께를 결정하는 것이다. 아스팔트 포장의 구조는 표층, 기층, 보조기층과 노상 등 위에서부터 차례로 지지력이 큰 층을 쌓은 다층구조로 교통하중을 순차 분산시켜 지지력이 작은 노상으로 포장전체를 지지하게 하는 것이다. 따라서 각 층의 강도도 중요하지만 전체적인 다층구조체로서의 밸런스가 더 중요하다. 게다가 구조선정을 좌우하는 설계인자가 다수 있고, 그 인자가 현장에 따라 각각 다르기 때문에 설계조건에 적절한 평가와 충분한 파악도 중요하다. 구조설계의 방법은 각 국의 각 기관에 따라 여러가지 것이 운용되고 있지만, 크게 분류하면 과거의 경험이나 실적에 기초한 것과 역학이론에 따른 해석결과에 기초한 것으로 나눌 수 있다. 일반적으로 전자를 경험법, 후자를 이론법이라고 하며, 포장구조해석이 반영되어 있는 것은 후자이다.

이론해석에 기초한 포장의 설계는 Boussinesq나 Burmister의 이론을 기초로 예전부터 행해져왔다. 그러나, 이론 전개가 난해하고 구체적인 수치를 구하는데 상당히 복잡한 계산을 요하기 때문에 그 당시는 널리 보급되지 않았다. 그 후 컴퓨터 하드웨어의 발달과 보급 및 수치값들을 구하기 위한 해석 소프트웨어의 개발에 따라 다층구조의 해석이 용이하게 되어 오늘날의 많은 설계법에 이론해석이 적용되게 되었다. 이론적 설계법 가운데 최초로 주목받고 지금도 높은 평가를 받고있는 것은 Shell에 의한 설계방법이다. 이것은 WASHO, AASHO 도로시험 결과와 그 외의 실측 데이터들을 토대로 다층탄성이론에 의한 계산결과를 가미해 1963년에 발표되었다. 1963년에 발표된 『Shell Design Charts for Flexible

Pavement』에 많은 실험과 수치계산을 토대로 개량이 되어 보다 포괄적인 설계법으로 1977년에 개정판이 공표되었다. 그 후 1977년에는 세부적 사항들의 재평가와 새로운 검토를 부가한 개정이 행해졌다. 개정된 설계법에서는 다른 환경조건에서도 적용할 수 있도록 온도의 영향을 다루고 있고, 지역의 경제성이 고려되도록 많은 아스팔트 혼합물을 취급하게 되었다. Shell 설계법의 근거를 이루는 것은 다층탄성이론에 의한 포장체의 응답해석과 현장 및 실내시험에 의한 많은 측정 데이터이다. 다층탄성이론에 의한 설계를 이론적으로 전개한 후 이론에 없는 부분은 실내시험의 결과를 반영시키고 이들과 실제 상황과의 차이는 많은 실측데이터를 고려하고 보충하여 설계법을 구축하였다. 세밀한 배려가 곳곳에 담겨져 있어 범용성 높은 설계법이라 평가되고 있다. 응답해석에 사용되고 있는 해석모델은 포장을 아스팔트층, 보조기층, 노상의 3층 구조로 나누고 여기에 표준축중의 복륵하중이 작용하고 있다고 보았다. 그 후 1981년 미국의 Asphalt Institute(AI)에 의해서도 AASHO 도로시험 등의 조사결과와 다층탄성이론, 수명예측 등에 기초한 설계법이 발표되었다. 이 2가지 설계법은 이론적 설계법을 대표하는 것으로 기타 설계법은 많은 적든 이들의 영향을 받고있다.

현재 위에서의 Shell 설계법과 AI 설계법 및 다양한 역학-경험적인(Mechanistic-Empirical) 설계법이 개발되어 왔지만 이들의 기본적인 개념은 다음과 같다. 먼저 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 파손과 파괴라는 개념에서 출발한다면 도로 포장은 공용 후 교통하중이나 자연환경의 작용에 의해 파손이 생긴다. 포장의 파손에는 포장지력의 저하 내지는 부족에 기인하는 구조적 파손과, 포장지력의 저하나 부족에 기인하지 않고 표층·기층의 아스팔트혼합물 층에만 발생하며 노면성상이 저하되는 기능적 파손이 있다. 구조

적 파손이 노상에까지 미치고 안전하면서 원활한 교통에 지장을 초래하는 상태를 파괴라 한다. 구조설계에서의 설계기간이란 포장의 공용개시부터 파괴에 이를 것으로 예측되는 시점까지의 기간을 의미한다. 한편, 기능적파손에 대한 대응은 재료나 배합의 선정 등에서 고려하는 것이며 포장 두께 등의 구조설계에는 영향을 미치지 않는다. 따라서 아스팔트 포장구조해석에서는 구조적 파손으로 인한 피로파괴에 초점을 두어 포장체 거동 분석을 실시한다. 아스팔트 포장구조체의 공용성을 나타내는 피로파괴는 그림 3과 같이 아스팔트 층 저면에서 발생한 균열이 표면으로 발전하여 표면균열로 나타나는 피로균열 파괴와, 노상의 영구변형이 누적되어 표면에 과도한 변위로 나타나는 소성변형(rutting) 파괴로 대별된다. 피로균열은 반복되는 차량하중으로 인하여 아스팔트 콘크리트층 저면에서 발생하는 수평인장변형률에 기인한 것으로서 인장변형을 파괴조건에 의하여 조절되며, 소성변형(rutting) 파괴는 노상에서 발생하는 연직방향의 압축변형률에 기인된 것으로 압축변형률 파괴조건에 의하여 조절된다. 이외에도 최근에는 아스팔트도로에 점탄소성 기법을 적용하여 구조 해석에서 직접 소성 변형과 같은 포장 파손을 예측하려는 시도가 되고 있다. 그러나 실제 누적 교통량(즉 반복 하중에 의한 누적 하중)을 모사하여 포장 파손을 예측하는 데는 아직 어려움이 있다. 따라서 재하하중인 차량하중으로 인한 도로포장구조체의 거동을 정확하게 해석한다면 이러한 파괴조건을 기준으로 역학적인 포장의 설계와 유지관리가 이루어 질 수 있게 된다. 또한 도로포장구조체를 역학적으로 해석함으로써 포장도로의 파손유형을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 설계의 신뢰성을 개선하고, 제한된 현장 및 실내시험 자료로부터 확장·적용할 수 있게 된다.

그러므로 M-E(Mechanistic-Empirical) 설계법의 구성은 그림 5와 같이 입력변수, 구조해석모

형, 연결함수(transfer function), 신뢰도 등으로 이루어진다. 여기서 가장 중요한 부분이 구조해석모형과 연결함수라고 할 수 있다. 연결함수는 파괴모형(distress model)이라고도 하며 구조해석에서 나온 임계(critical)응력 혹은 변형률과 포장의 공용성을 연관시키는 역할을 한다. 예를 들어 아스팔트층의 아래에서 발생하는 수평인장변형률과 피로수명을 연관시키거나 포면 혹은 노상 위에서의 수직 압축 변형률과 소성변형(rutting)을 연관시킨다. 이러한 연결 함수는 현장의 데이터나 실험에 의한 경험에서 개발된 모델이다. 이러한 포장의 공용성을 예측하는 모형들은 국내·외에서도 이미 많이 개발되어 있으며, 최근 기존의 연구결과를 토대로 국내 아스팔트혼합물에 따른 공용성 예측모델 개발연구가 한국형 포장설계법과 관련하여 수행되고 있다.

포장구조해석을 이용한 새포장 혹은 덧씌우기한 포장의 설계법은 아래와 같다.

(1) 초기 설계한, 또는 비파괴시험장비로부터 얻은 포장의 구조와 물성치를 가지고 구조 해석을 통한 도로구조의 반응(예를 들어 응력, 변형률, 처짐량 등...)을 구한다. 이 때 비파괴시험장비 또는 각종 도로평가장비로부터 아스팔트 포장구조체의 물성추정을 위해서는 일반적으로 도로 포장의 역해석기법을 사용한다.

(2) 앞에서 구한 값을 연결함수에 넣어 예상수명을 구한다.

(3) 연결 함수를 통해 나온 예상수명과 설계수명을 비교하여 초기 설계한 포장이 설계수명을 만족하지 못하면 초기 설계를 변경한다.

(4) 변경된 설계를 가지고 설계수명을 만족하는 설계가 나올 때까지 이 과정을 반복하여 최종 설계를 한다.

(5) 최종적인 구조는 경제성이나 기타 현장 상황을 고려하여 결정하게 되지만 설계법으로써는 여기서 종료한다.

이러한 도로포장구조해석을 수행할 때 각각의 제한사항과 가정사항을 잘 살펴야 하며, 다층탄성 이론의 계산에 이용하는 포장재료의 탄성계수, 포아송비 등의 재료의 특성치는 충분히 파악된다고 할 수 없으므로 다층탄성이론을 이용할 경우는 반드시 이들 계수의 신뢰성에 대한 검토와 더불어 입력정수나 계산절차 등의 기록을 보존해 두는 것이 바람직하다. 또한 도로포장의 설계시 그 설계의 타당성이 확인되도록 실험이나 시험시공을 통한 검증이 필요하고 공용후에는 그 공용성에 대한 추적조사와 설계시에 설정한 정수의 타당성 등을 확인하는 것이 바람직하다.

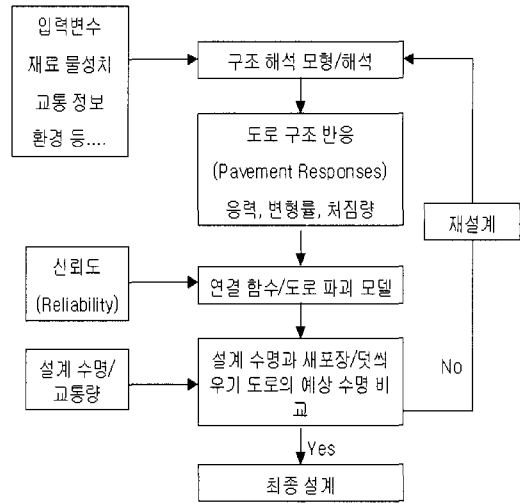


그림 5. 역학-경험적 설계 과정

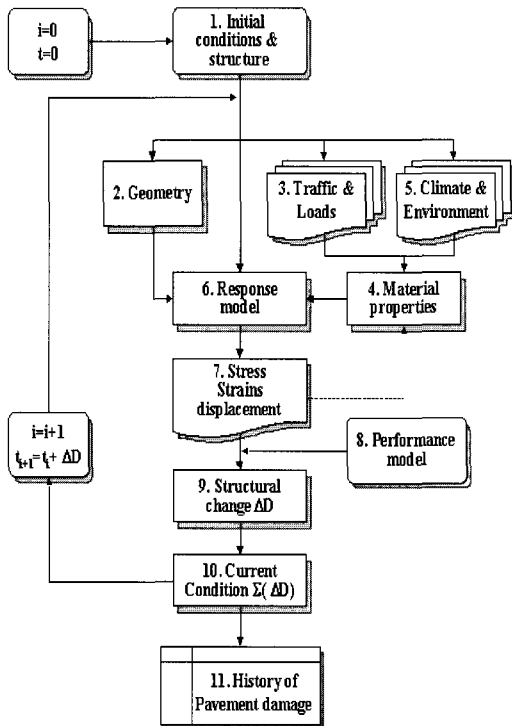


그림 4. 개발중인 유럽의 포장설계법 (AMADEUS)

2.2 포장운영(PMS)에서 활용과 공항포장 시스템

포장운영시스템(PMS)의 개념이라 하면 도로 포장에 관한 비용과 효과를 관리자, 이용자, 환경의 입장에서 고려해 많은 조사와 정보를 이용해 포장의 서비스 성능 등의 예측에 근거한 관리를 하고 이것들을 총합한 비용 대 효과를 크게 하는, 즉 모든 포장투자에 대해 최대의 경제효과를 올리는 것을 목적으로 한 생각방법이라 하겠다.

PMS의 연구는 1960년대 중기부터 AASHO 도로시험의 결과를 받아 미국의 NCHRP(national cooperative highway research program), 텍사스 대학, 텍사스주 도로국(텍사스주 운수교통연구소, 텍사스 A&M 대학), 캐나다의 연구자들에 의해 시작되었다. 「Pavement Management System」이라는 용어는 이 무렵부터 이들에 의해 사용되었다고 한다.

이 PMS의 개념에 기초한 포장 설계에 있어서

는 아스팔트 포장이나 시멘트 콘크리트 포장 등을 포함한 각종 대체설계안을 공통의 척도로 평가해 그들의 라이프사이클 코스트를 비교해 최적인 것을 전략적으로 선택한다. 본 기술기사에서 PMS에서의 포장구조해석 관련사항만 설명하고자 한다.

포장운영 시스템은 대단히 포괄적인 개념으로 실제 운용에 있어서는 몇 개의 서브시스템으로 나누어 생각해 볼 수 있다. 그 서브시스템 및 전체 구성에 대해 정해진 방법은 아니지만 일례를 들면 그림 6과 같다. 그림 6에서 보는 바와 같이 설계서브시스템과 연구서브시스템 및 평가서브시스템에서 포장구조해석에 의한 분석이 필요한 실태이다.

NCHRP에 의한 PMS의 연구 성과로서 포장의 최적 설계를 주안으로 한 프로젝트 레벨의 실용적인 시스템인 FPS (Flexible Pavement design System), SAMP (System Analysis Method for Pavement)라고 하는 전산프로그램이 개발되고 그 후 더욱 개량되어가고 있다. 마찬가지로 캐나다의 온타리오 주에서도 OPAC (Ontario Pavement Analysis of Cost)가 개발되었다. 그리고 이것들은 보다 실용성을 높인 시스템으로 개선되어 오늘날에 이르고 있다. 또 전자 이외에도 프로젝트 레벨의 실용적인 시스템으로 VESYS (Viscoelastic System IV) 등이 가동되고 있다.

현재 PMS으로의 이행은 세계적인 경향이고 최근 정해진 각국의 포장 설계법에도 PMS의 도입을 전제로 한 것이 많아지고 있다. 그러나 PMS에 대해서는 아직 연구단계이고 그 서브시스템의 구축연구가 수행되고 있는 것이 현 상황이다.

공항은 기능면에서 보면 항공기 운행, 여객·화물의 취급, 항공기 정비에 관한 시설로 분류된다. 또한, 항공기 하중을 지지하는 측면에서 활주로, 유도로, 에이프런의 기본시설과 배수시설, 조명시설 등의 부대시설로 나눌 수 있다.

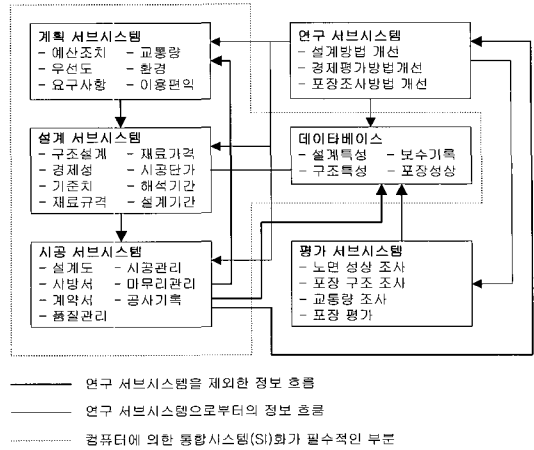


그림 6. 포장운영시스템의 개요

이들 공항 토목시설에 관해서는 공항 토목시설 설계기준에 구체적인 운용규정이 설정되어 있는데 기본시설 중에서도 특히 중요한 활주로, 유도로, 에이프런 등의 포장에 대해서는 공항 아스팔트 포장구조 설계요령, 공항 콘크리트 포장구조 설계요령에 설계법이 정해져 있을 뿐만 아니라 시공에 관해서도 규정이 설정되어 있다.

공항포장을 설계할 때 ICAO(International Civil Aviation Organization) 기준에는 580N(5700kgf) 이상의 항공기가 이용할 공항의 포장강도를 AIP (Aeronautic Information Publication)로 보고하도록 정해져 있다. 그 경우 포장강도는 ACN-PCN법(ACN : Aircraft Classification Number, PCN : Pavement Classification Number)에 의해 평가되는데 이에 따라 항공기 하중과 포장강도를 통일하여 나타낼 수 있다. ACN-PCN법에서는 항공기의 ACN이 공항포장의 PCN과 등가이든지 또는 작으면 그 공항을 이용하는 것이 가능하다고 판정되어 있다. ACN이 PCN보다 큰 경우 ACN이 PCN의 1.1배를 초과하지 않으면 포장수명에는 영향을 주지 않으며, 그 항공기의 교통량이 전체의 5% 미만인

면 이용이 가능하다고 되어 있다. ACN은 포장의 종류에 따라 포장두께로부터 제안된 도표로부터 산정되며, PCN 계산방법은 항공기 운용상의 경험에 의거한 방법과 포장구조의 평가에 의거한 방법이 있다. 항공기 운용상의 경험법은 현재 운용중인 항공기의 실태조사로부터 각 항공기의 ACN을 산출하여 그 중 최대치를 PCN으로 하는 것이다. 장래 교통량 증가가 예측될 경우에는 PCN을 저감시킬 필요가 있다. 포장평가에 의한 방법으로는 포장구조 설계법의 역산에 의한 방법과 하중에 대한 포장응력을 측정하는 방법이 있다. 전자는 포장 각 층·노상의 두께 및 재료 특성, 교통량 등을 파악하여 설계법을 역으로 산출함으로써, 후자는 비파괴시험에 의한 처짐에서 파괴횟수를 추정함으로써 포장의 허용하중을 구하여 PCN으로 하는 것이다. 이처럼 ICAO기준에서는 그 시점에서의 포장강도를 나타내며 포장을 어떻게 설계·시공·보수하여 운용해 갈 것인지 는 각 국에 일임하고 있다.

공항 포장을 보수할 경우, 공항 운용관계상 오랫동안 폐쇄할 수 없는 경우가 많으므로 단시간에 충분한 효과를 얻을 수 있는 공법을 채용하는 것이 바람직하다. 특히, 활주로·유도로를 보수할 때에는 야간에 공사를 하여 다음날 아침에는 공용해야 하는 경우가 많아 아스팔트에 의한 덧씌우기가 많이 채용된다. 이러한 경우에는 비파괴시험장비에 의해 측정된 처짐에 대해 다층탄성이론을 적용하여 덧씌우기 두께를 산정한다. 우선, 비파괴시험장비의 처짐으로부터 포장구조해석의 역해석을 이용하여 각각의 탄성계수를 추정한다. 그리고, 덧씌우기된 포장으로부터 비파괴시험장비에 의해 하중이 가해진 경우의 처짐을 계산하여 그 계산치가 기준 처짐량 이하가 되도록 덧씌우기 두께를 결정한다.

3. 아스팔트 포장구조해석의 현황

아스팔트 포장구조체는 표층이 아스팔트혼합물로 포설된 구조체로서 일반적으로 노상 위에 보조기층, 기층, 표층 순으로 구성되어 있다. 아스팔트 포장구조체는 반복적인 차량하중 또는 비행기하중에 의하여 포장구조체의 내하력이 저하되고 종국에는 피로파괴에 도달하게 됨으로써 도로 및 공항의 주행성, 안전성, 쾌적성을 나타내는 포장의 공용성이 저하되어 차량의 원활한 통행에 지장을 주게 된다. 따라서 포장구조해석에 의한 역학적인 설계와 유지관리가 이루어지기 위해서는 차량하중이나 비행기하중의 반복적인 재하로 인한 포장도로의 피로파괴에 대한 기준 또한 잘 정립되어 있어야 한다.

먼저 포장역학을 근거로 한 포장구조해석을 이해하기 위해서는 하중조건이 되는 교통하중, 재료의 물성이나 구조에 관계된 환경조건 다음으로 아스팔트 포장, 콘크리트 포장 각각에 대해 파괴기준과 포장 거동을 해석하기 위한 역학의 기초 방정식과 재료특성을 나타내기 위한 구성방정식을 필요로 한다. 또한 포장의 특징인 다층구조를 분석하기 위하여 이론적인 방법과 수치해석적인 방법과 포장평가장비 및 비파괴시험장비인 FWD (Falling Weight Deflectometer) 등의 측정 결과로부터 포장의 특성치를 결정하는 역해석에 대해서도 이해해야 한다. 따라서 본 고에서는 포장구조해석의 전체적인 현황을 정리하여 회원들의 이해를 돕고자 하므로, 보다 학문적인 입장에서 전문적인 구조해석관련 이론 및 내용의 습득은 본 기사보다는 참고문헌 및 우리 학회 기술위원회들의 세미나 등을 활용하길 부탁드린다.

아스팔트 포장구조체의 역학적 해석을 위해서는 하중조건, 기하조건, 재료조건 등 해석조건을 설정하여야 하는데, 실제 포장도로의 거동 및 공용성에 영향을 미치는 변수는 너무나도 많고 매우 복잡하게 작용하므로 설계와 유지관리에 손쉽게 적용할 수 있도록 해석조건을 실제에 잘 부합

하도록 단순화하여야 한다. 교통하중은 다양한 크기 및 형태를 갖고 다양한 속도로 주행하는 이동 운하중이지만, 하중조건은 다양한 크기와 형태의 차량하중을 표준 축하중으로 환산하여 타이어에 의하여 포장체에 정하중으로 재하되는 것으로 가정한다. 포장구조체에 작용하는 운하중은 바퀴의 타이어압으로 포장체에 가해지게 되며, 그 접지면은 실제로 타원형을 이루고 있다. 그러나 포장구조체와 같이 포장 깊이가 얇은 경우에는 접지면의 형상으로 인한 영향이 작으므로 등가면적의 원형접지면에 등분포하중이 작용하는 것으로 환산하게 되면 축대칭 하중조건으로 해석이 가능하게 된다. 또한 포장체 표면에는 실제 여러 개의 운하중이 동시에 작용하게 되지만, 재료가 선형탄성범위 내의 응력을 받는다면 중첩의 원리가 적용될 수 있으므로 다륜하중의 영향은 단일 하중에 대한 것을 단순히 합산하는 중첩의 원리를 적용하여 근사적으로 구하게 된다.

또한 아스팔트 포장구조체는 각 층마다 동일한 재료를 가지고 종방향으로 길게 포설되므로 포장체의 각 층은 균질한 재료가 수평방향으로 무한하며, 최저층인 노상층은 수직하향으로 무한하다고 가정할 수 있다. 이러한 가정은 아스팔트 포장구조체의 가장자리에 바퀴하중이 놓이는 경우를 제외하고는 실제 조건들을 잘 나타내고 있다. 따라서 포장구조체의 이러한 기하조건과 교통하중을 표준축하중에 대한 원형 등분포하중으로 환산하여 재하되는 것으로 가정한다면 도로포장구조체는 축대칭조건으로 단순화하여 해석할 수 있게 된다. 그러나 포장재료의 거동특성 및 다양한 형태와 구조의 차륜하중을 고려하고자 한다면 수치해석기법을 통하여 2차원 평면변형률해석 또는 3차원해석을 수행할 수도 있다.

포장구조해석의 개발이론은 다층탄성이론(multi-layer elastic analysis), 유한차분법 및 유한요소해석(finite element analysis)과 개별요소법

(discrete element analysis) 등이 있고, 해석결과를 고려하는 방법에는 결정론적 방법(deterministic)과 확률론적 방법인 Taylor Series, Monte Carlo Simulation, Neural Network 등이 있다. 본 구조해석프로그램 결과들은 추후 손상모델 및 공용성 모델과 연계할 수 있으며, 아스팔트층의 온도모델과 함수비 및 동결심도모델을 고려할 수 있도록 일반화하여 사용되어야 한다. 현재 포장구조체의 해석기법은 정해를 이용한 방법과 수치해석을 이용한 방법으로 크게 나눌 수 있으며, 포장구조체의 물성을 구하기 위한 역해석기법인 정적 역해석기법과 동적 역해석기법이 개발되어 있다.

3.1 아스팔트 포장구조체 해석기법

도로포장구조체를 해석하는 방법은 정해를 이용한 방법과 수치해석적인 방법이 있으며, 가해지는 하중이 정적하중이나 동적하중이냐에 따라 아스팔트 포장도로의 정적거동, 동적거동을 산정하기 위한 해석기법으로 구분된다.

3.1.1 정해를 이용한 방법

1926년 Westergaard가 탄성이론을 시멘트 포장구조체에 처음으로 적용한 후 1943년 Burmister가 다층 탄성이론을 포장구조체의 해석에 도입하였다. Burmister는 하중을 정적 원형등분포하중으로, 각 층은 수평방향으로 연속적이라고 가정하여 가정된 사항으로부터 응력함수를 Bessel 함수와 지수함수로 표현하여 2층 및 3층 구조체의 거동을 산정하였고 이를 실제적인 아스팔트 도로포장구조체의 설계에 이용할 수 있도록 영향도표를 제시하여 포장구조해석결과가 설계에 사용되기 시작되었다. 1951년 Acum과 Fox는 3층 구조체 표면에 원형 분포하중이 작용하는 경우 각 층의 경계응력을 구하는 정해를 발표하면서 포장구조

해석에 일반적으로 적용되기 시작하였다. 그러나 이러한 정해를 이용한 포장구조체의 해석에는 한계가 있음이 밝혀졌다. 동적거동을 해석하기 위하여 정해를 이용한 방법은 이론적, 실험적 연구가 진행중이며, 1982년 Kausel과 Peek가 층구조에 작용하는 동하중을 Green 함수로 변환하여 정해를 발표한 바 있다. 그러나 정해를 이용하여 동적거동을 분석하는 기법은 많은 변수와 해석시간의 문제로 인하여 포장구조체 설계에는 이용되지 못하는 실정이다.

3.1.2 수치해석을 이용한 방법

수치해석을 이용한 방법은 주로 연속체역학을 기초로 하는 층이론과 유한요소 해석이론으로 나누어 진다.

① 수치해석을 이용한 층이론

아스팔트 콘크리트 포장구조체는 최하단의 반무한층 위에 물성이 상이한 일련의 수평층으로 구성된 다층탄성체로 이상화할 수 있으며 그림 7은 지반 및 하중조건에 대한 대칭성을 고려하여 포장구조체를 3차원 극좌표계로 나타낸 것이다. 탄성해석을 위하여 각 층은 균질, 등방인 이상적 탄성체로서 수평방향으로 무한하게 놓여 있으며, 모든 층들은 완전 접합되어 있어 각 층 경계면에서의 변위 및 응력은 연속적인 것으로 가정하며, 또한 외력인 윗하중은 원형 등분포하중인 것으로 가정한다. 각 층의 물성은 탄성계수(E)와 포아송비(μ)로 대표되며, 최하단층을 제외한 모든 층의 두께는 유한한 것으로 가정한다. 그림 7과 같은 다층구조체에서 지반 내 임의의 한 점을 미소정육면체로 생각하면, 외력에 의해 발생하는 응력은 육면체의 각 면에 수직하게 작용하는 3개의 축응력($\sigma_z, \sigma_r, \sigma_t$)과 육면체의 벽면에서 각 축의 방향에 나란하게 작용하는 6개의 전단응력($\tau_{rz}, \tau_{tr},$

$\tau_{rz}, \tau_{zr}, \tau_{tz}, \tau_{zt}$)으로 나타낼 수 있다.

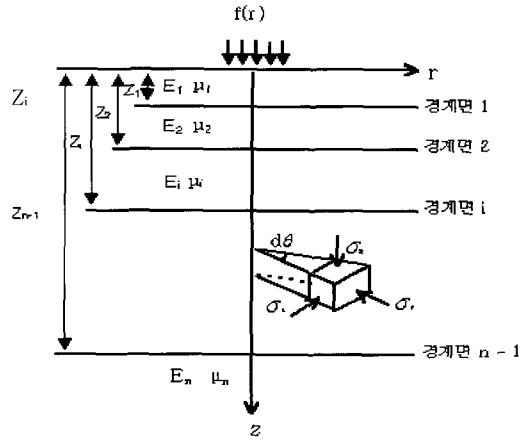


그림 7. 다층탄성구조

또한 변위로는 연직방향변위(w), 반경방향의 변위(u), 접선방향의 변위(v)의 3개 변위를 생각할 수 있다. 여기서, 전단응력은 정역학 상태에서 $\tau_{rz} = \tau_{zr}, \tau_{rt} = \tau_{tr}, \tau_{tz} = \tau_{zt}$ 가 되며, 축대칭을 고려하면 $\tau_{rt} = \tau_{tr} = v = 0$ 이 된다. 따라서 3차원 극좌표계에서 외력에 의한 $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_t, \tau_{rz}$ 의 4개 응력성분과 u, w의 2개 변위성분이 발생하게 된다.

3차원 극좌표계에서의 평형방정식과 적합방정식을 만족하는 응력과 변위를 응력함수로 나타낼 수 있다. 다층지반 내 임의의 지점에서의 응력 및 변위는 다음 식(1)과 같이 각 층에서의 응력함수를 구함으로써 얻을 수 있다

$$\phi_i(r, z, m) = J_0(mr) [(A_i + B_i z)e^{mz} + (C_i + D_i z)e^{-mz}] \quad (1)$$

각 경계면에서의 응력 및 변위를 산정하기 위한 방법으로는 매트릭스 기법이 도입되었고, 최하단층의 무한깊이에서 응력 및 변위는 0이라는 조건으로부터 최하층의 적분상수 A_n, B_n, C_n, D_n

을 결정하고, 각 경계면에서 응력 및 변위는 연속적이라는 조건으로부터 상층에서 순차적으로 각 층의 적분상수인 A_i, B_i, C_i, D_i 를 결정하여 임의 지점에서의 응력, 변형률, 변위를 구하게 된다.

이와 같은 방법으로 하중이 정적으로 가해지는 경우의 정적해석에 사용된 층이론은 1963년 Michelow가 Burmister의 다층탄성 이론에 매트릭스 기법을 도입하여 Chevron 연구소에서 CHEVNL 전산 프로그램을 개발하면서 ELSYM5, CHEVRON, DAMA, BISAR, SILERA 등의 많은 다층 탄성해석 전산 프로그램에 적용되었다. 또한 점탄성이론에 기초한 해석을 이용하여 1973년 MIT대학에서 VESYS 가 개발된 후 활발한 연구가 진행되어 여러 종류의 VESYS 프로그램이 개발되었고, 1993년 Huang 은 다층 탄성해석 전산프로그램을 확장하여 아스팔트층을 선형탄성과 점탄성으로, 쇠석기층 및 노상을 여러 하부층으로 나누어 응력의존 물성을 추정할 수 있도록 기존의 SINELA를 발전시켜 KENLAYER를 개발하였다.

이러한 층이론은 비교적 간단하고 해석시간이 빠른 반면 포장구조체에 가해지는 하중을 정하중으로 가정하여 해석하므로 정확한 해를 얻을 수 없는 단점이 있다. 그러나 오차가 실제 현장에서 발생하는 시공상의 오차와 설계수명의 영향을 고려한다면 현장적용성이 뛰어난 장점으로 인하여 미국과 유럽에서도 미래의 설계기법에 적용하기로 결정한 바 있다. 한편 정확한 해석을 위한 주행속도와 바퀴하중 및 포장구조체 표면의 거칠음 등을 고려한 동적해석을 시도하고 있다. 1962년 Harr는 사각형 등분포하중을 포장구조체에 가하여 판성, 탄성거동과 시간의존성 거동을 고려하여 동적거동을 산정한 후 AASHTO 도로시험결과와 비교하였고, 1987년 Chen은 다층 점탄성체에 다중하중이 가해지는 경우 동적거동을 산정할 수 있는 SAPSI 를 개발하였고, Tabatabaie는 이를 현장시험으로 검증하였다. 또한 같은 해에 Sebaaly

는 FWD 하중을 분석할 수 있도록 Kausel이 개발한 DYNAMIC 프로그램을 보완하여 사용하였고, 1994년 Zafir등은 주행하중이 가해지는 경우 포장구조체의 동적 변형률을 산정하는 DYNPAVE를 개발하였다. 1995년 Yun은 SAPSI 프로그램에 주행하중과 피로파괴 예측모델을 보완한 후 시애틀에 있는 PACCAR 기술연구센터내의 현장시험을 통하여 검증한 바 있다. 현재 동적해석을 위해서는 층이론을 적용하기보다는 구조해석 개념의 유한요소해석적인 접근이 상용 동적해석 프로그램등을 통하여 시도되고 있다.

층탄성이론을 이용하여 실제 포장구조체를 해석하였을 때 이론의 성립을 위해 설정한 가정들이 실제 조건과 일치하였을 때에만 정확한 해를 얻을 수 있다. 그러나 층탄성이론에서 가정한 해석조건인 포장 재료의 거동특성, 응력에 대한 거동, 하중조건 및 기하조건 등이 실제와 차이가 있다. 즉 차륜하중이 원형등분포하중이 아닐뿐만 아니라 이동하중이고 포장재료는 응력을 받았을 때 선형탄성거동을 하기보다는 비선형탄성, 소성, 점탄성거동 등의 시간 의존성과 응력 의존성을 나타내게 된다. 그러므로 이러한 실제적인 포장체의 거동을 산정하는 것은 현장에서의 적용성과 필요성 및 설계수명에 미치는 실제적 영향등을 고려하여 많은 연구와 논의들이 진행되고 있다. 사실적으로 하중의 모사 및 포장재료들의 많은 모델들 또한 가정사항에서부터 시작되고 있기 때문이다.

② 유한요소해석

층탄성이론에 의한 포장구조해석은 실제 조건들을 반영하는데 한계가 있다. 층탄성이론에 의한 해석의 주요한 문제는 각 층이 층 전체에 걸쳐 동일한 물성을 갖는 균질한 층으로 가정하는 것이다. 이러한 가정은 안정처리가 되지 않은 입상기층과 보조기층 등과 같은 비선형재료로 구성

된 층구조체의 해석을 어렵게 한다. 이러한 재료의 탄성계수는 응력의 크기에 의존하며, 층 전체에 걸쳐 변하게 된다. 따라서 비선형층의 어느 지점이 전체 층을 대표하는 것으로 선정되어야 할 것인가라는 문제가 발생하게 된다. 보통 포장설계의 경우에서처럼 설계를 지배하는 응력, 변형을, 변위만이 요구된다면, 재하위치에 가장 가까운 지점이 선정될 수 있다. 그러나 재하위치에 근접한 지점 또는 멀리 떨어져 있는 다른 지점에서의 응력, 변형률, 변위가 요구된다면, 비선형재료를 해석하기 위하여 층탄성해석을 사용하기는 곤란할 것이다. 또한 재료의 특성인 구성방정식과 차량하중의 동적 특성, 하중 및 포장구조체의 기하특성등을 다양하게 적용한 보다 정확한 거동을 해석하기에는 어려움이 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서는 유한요소법과 같은 수치해석기법을 사용할 수 있다.

포장구조해석을 위한 수치해석에는 차분법과 유한요소법이 주로 사용된다. 차분법은 기초미분방정식의 미분항을 차분으로 근사하여 해를 수치적으로 구하는 방법으로 해를 빠르고 정확하게 구하기 위해 반복연산을 응용한 완화법 등의 방법이 병용된다. 유한요소법은 연속체를 유한한 요소로 나누어 근사해를 구하는 방법으로, 특히 응력-변형을 관계의 비선형성과 동적 특성 및 크리프현상과 같은 시간 의존성을 고려할 수 있다. 유한요소법은 물리적인 접근방법으로 근사해를 구하는 반면, 차분법은 수학적 접근방법으로 근사해를 얻게 된다. 이들에 있어서 주요 연산은 전산프로그램이 용이한 매트릭스 연산 형태로 되어 있다. 유한요소법은 강성포장해석을 위해 1960년대 텍사스대학에서 개발된 이후, 이를 바탕으로 여러 개의 전산프로그램들이 개발되어 사용되고 있다. 또한 버클리대학에서 개발된 범용 전산프로그램인 SAP은 포장구조해석뿐만 아니라 구조해석용으로 널리 사용되고 있다. 최근에는

ABAQUS를 이용한 아스팔트 포장구조체의 해석이 국내에서 많이 시도되고 있다.

이와 같이 유한요소해석은 절리로 인한 수평방향의 불연속으로 인하여 주로 시멘트 콘크리트 포장해석에 사용되나, 최근 아스팔트 포장도로의 구조해석에도 그 적용성 검토가 활발히 이루어지고 있다. 아스팔트 포장구조체의 경우 1968년 Duncan등이 처음으로 도입한 후 1980년 Radd와 Figueroa가 비선형 유한요소 해석프로그램인 ILLI-PAVE를 개발하였다. ILLI-PAVE는 해석 모델로서 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 사용하였으나, 현재 Mohr-Coulomb의 Failure Criteria를 만족시키는 주응력을 수정하는 방법은 아직 그 타당성에 있어 논란이 있다.

1989년 Harichandran 등은 공용성 예측에 사용할 수 있는 MICH-PAVE를 개발하였고, MICH-PAVE가 경계지역을 모사하기 위해 Flexible Boundary ("infinite" element)를 사용했다는 것 이외에는 ILLI-PAVE프로그램과 유사하다. Flexible Boundary는 자유도(D.O.F., degree of freedom)의 수를 줄여줌으로써 결국에는 계산시간을 줄여주는 장점이 있다. 이들 프로그램은 단축 원형하중만 모사할 수 있고 복륜하중 및 모서리에서의 하중은 모사하지 못하는 단점이 있다.

1991년 Hanazato 등은 점탄성 층이론과 유한요소해석을 조합한 동적 탄성 유한요소해석방법을 소개하였고, 1992년 Chatti가 동적거동을 산정할 수 있는 DYNA-SLAB을 개발하였다. 그러나 아직은 이런 개발된 프로그램들보다는 연구적인 측면에서 상용 동적해석프로그램들을 통하여 포장체의 거동을 산정하는 방법들이 적용되고 있다. 국내에서도 ABAQUS를 이용하여 주행하중에 대한 영향을 분석하여 실제 아스팔트 포장구조체에서의 내부거동을 MDD(multi depth deflectometer)로부터 측정하여 검증한 바 있다. 그림 8은 유한요소법에 의하여 포장구조체를 축대칭 요소망으

로 나눈 것이다.

포장구조해석에서 보다 개선된 강력한 해석 도구는 3차원 비선형 유한요소해석이다. 많은 3차원 비선형 유한요소해석 프로그램이 1980년대에

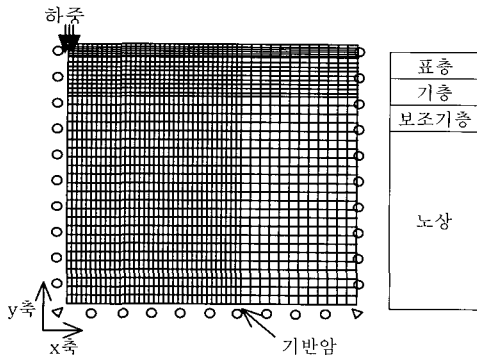


그림 8. 축대칭 요소망

구조공학 분야에서 사용되어 왔다.

이러한 프로그램은 정하중, 진동하중, 충격하중, 이동하중 등 다양한 재하형태에 대하여 해석할 수 있다. 또한 하중이 포장의 가장자리에 작용하는 경우와 같이 기하, 하중, 재료특성 조건이 축대칭이거나 평면변형률이 아닌 경우에는 축대칭해석인 층탄성해석이나 2차원유한요소법을 사용할 수 없으며, 이런 경우에 3차원 유한요소법이 매우 유용하게 적용될 수 있다.

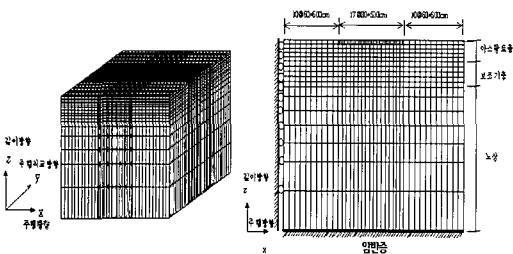
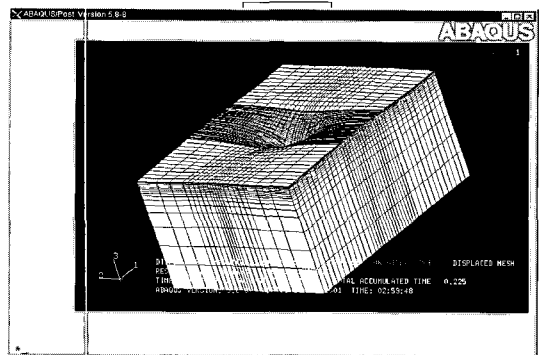
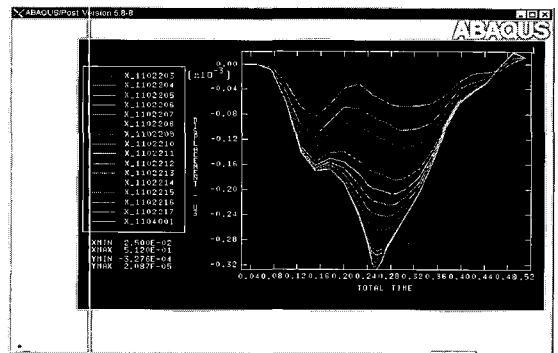


그림 9. 3차원 포장구조체 모델링

수치해석의 범용전산프로그램인 SAP, MARC, ANSYS, FLAC, ABAQUS, ADINA 등으로 3-D 해석을 할 수 있다. 그림 9와 그림10은 3-D 해석을 위한 포장구조체 요소망으로 모델링과 결과 분석 결과그림이다.



(a) 표면변위 (64,000배 확대 모습)



(b) 깊이별 처짐데이터

그림 10. 주행하중 재하시 포장체의 거동분석

3.2 도로물성 추정 역해석 기법

3.2.1 정적 역해석 기법

1970년대 이전까지의 대부분 포장평가방법은 과거의 경험 자료를 이용한 포장구조능력 평가방법에 의존하는 것으로, 비파괴시험으로 측정된

최대 처짐을 포장의 구조능력평가에 이용하는 것이다. 1955년 Hveem, 1962년 Whiffen등과 1966년 Carneira는 허용 표면처짐을 제안하였고, 1972년 Lister, Nagumo등은 최대 표면처짐과 수용가능 교통량과의 관계를 발표하였다. 그러나 최대 표면처짐만을 이용한 포장평가 방법은 포장 구성층의 층별 평가에는 미흡하므로, 처짐지수(deflection parameter)를 이용한 평가방법과 처짐곡선(deflection basin) 으로부터 포장구조체의 탄성계수를 추정하는 방법이 개발되기 시작하였다. 이러한 처짐지수 및 처짐곡선을 통하여 도로포장의 탄성계수를 추정하기 위한 역해석방법이 연구되기 시작하여 1973년 Scrivner 등은 포장구조체의 탄성계수 추정을 위한 역산기법으로 2층 포장구조에 대하여 Burmister의 식을 도입하여 표면처짐비와 탄성계수비의 관계로부터 탄성계수를 구하는 방법을 제시하였고, 1977년 Hou는 최소자승법과 탐색법을 사용하여 다층구조의 탄성계수를 역산하는 방법을 발표하였다. 그러나 이러한 단순작업이 아닌 최적의 해를 찾기 위하여 반복기법에 의한 역산방법이 연구되기 시작하였다. 1977년 Irwin이 비파괴시험의 실측처짐과 이론처짐이 일치할 때까지 각 층의 탄성계수를 보정하면서 현 위치 탄성계수를 결정하는 방법을 발표하였고, 1983년에는 이를 발전시켜 역해석 프로그램인 MODCOMP를 개발하였다. 1979년 Stubstad 등에 의한 ISSEM4, 1983년 ELSDEF를 발전시킨 Bush의 CHEVDEF, 1984년 Uddin에 의한 FPEDD1, 1985년 Bush의 BISDEF 등이 개발되었으나 수많은 반복계산으로 속도가 매우 느린 단점이 있었다. 따라서 연산속도를 증가시키기 위해 데이터베이스를 이용하기 위한 방법으로 일정한 포장단면에 대한 각 층의 탄성계수들을 변화시켜가면서 표면처짐의 데이터베이스를 구축하여 1987년 Michalak과 Scullion이 패턴탐색기법이라는 비선형 최적화방법을 사용한 역해석 프

그램인 MODULUS를 개발하였으나 이러한 데이터베이스는 환경에 의존하므로 국내현실에 적합하지는 않다. 국내에서는 1989년과 1990년 김수일, 유지형 등이 탄성계수변화율과 처짐변화율의 상관관계를 회귀분석하여 각 층 탄성계수를 일개 층씩 보정하는 반복기법을 제시하고 이를 적용한 역해석 프로그램인 MFPD를 개발하였다. 그 후 1992년 이광호는 MFPD에 가상암반층을 고려할 수 있는 알고리즘을 추가하고 FWD 현장시험자료로부터 추정된 아스팔트 콘크리트 포장구조체 각 층 탄성계수들의 신뢰성 검증을 실시하였다. 1998년 김수일, 최준성은 아스팔트 콘크리트 포장구조체에 한하여 FWD 시험결과인 표면처짐 자료로부터 Newton - Raphson 방법에 의한 역해석기법을 사용하여 FWD의 충격영향범위인 가상암반층을 고려한 BALMAT 프로그램을 개발하고 수치검증을 실시한 후 우리나라 대표적인 고속도로현장에서 현장실험을 통해 현장 적용성을 검토하였다.

3.2.2 동적 역해석 기법

최근 몇 년간 특히 90년대에 들어서 주로 FWD에 의한 비파괴 시험데이터의 정적 해석방법에서 탈피하기 위해서 동적 영향을 고려할 수 있는 프로그램의 개발 및 모델의 연구로부터 실험기법 연구까지 다양한 방법들이 시도되었다. 1985년 Mamlouk은 기반암이 약 4.6m 깊이에 존재하는 도로모델을 사용하여 주기하중을 받는 도로표면의 처짐을 구하기 위하여 동탄성 해석방법을 사용하였고, 여기에 재료감쇠(material damping)와 기하감쇠(radiation damping)의 효과를 포함시켰다. Rosset과 Shao는 동적해석시의 경계효과를 없애기 위해 기반암이 도로표면에서 21.3m 깊이에 존재하는 모델을 사용하여 정적해석과 동적해석시 계산된 표면처짐이 서로 다름을 밝혔으며, 1988년 Uzan과 1990년 Lytton 등이 포장체에

충격시험을 통한 동역학적 해석방법을 소개한 후 Magnuson은 1972년 다층 점탄성 문제를 해결하기 위한 매트릭스해법을 개발하였고, 1988년에는 포장체의 동적 해석을 위한 적분알고리즘을 개발한 후 1991년에는 FWD 데이터의 동적해석을 위한 컴퓨터 프로그램인 SCALPOT을 개발하여 시간 의존적인 동적 해석의 영향을 주파수 응답함수를 이용하여 표면 연직처짐량을 주파수의 크기와 위상각으로 표현하고, 포장체 각 층을 감쇠 탄성체나 삼변수 점탄성체로 모델화하여 해석하였다. 또한 같은 해에 FWD 데이터의 동적 해석을 위한 프로그램으로 퓨리에변환을 사용하는 FWD-FFT를 발표하였으나 이러한 주파수 영역에서의 해석은 표면처짐의 시간이력에 발생하는 왜곡현상 제거와 감쇠장치의 물성 결정의 어려움이 있었다. 1992년 Chang등은 단순화한 도로 시스템에 수직하중이 가해졌을 경우 동적 반응을 고려하기 위해 Green의 연성함수를 사용한 UTDYNF와 UTFWD를 개발하였고, 1994년 Chatti등은 정적 역해석 프로그램 ILLI-SLAB을 동적 영향을 고려할 수 있도록 발전시켰다. 1994년 Uzan은 포장구조체의 물성 추정을 위하여 주파수 영역과 시간 영역에서의 동적 역해석기법을 비교연구 하였으나 이러한 방법들은 너무 이론적이고, 역해석시 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 해석과정의 어려움으로 인하여 아직 현장에서 실제 적용은 못하고 있는 실정이다. 따라서 1995년 Liang과 Zhu는 종래의 연구(탄성기초위의 Winkler 모델에서의 무한보나 무한판에 대한 정현진동의 해석적인 해)로부터 수정 Vlasov 노상 모델에 동적 해석을 실시하여 동적 역해석기법을 제안하였으나 수정 Vlasov 노상 모델을 이용한 동적 역해석기법은 2층 구조의 해석으로 현장검증이 이루어지지 않아 실제 포장구조체 해석에는 충분치 않으므로, 1998년 최준성 등은 3층 아스팔트 콘크리트 포장구조체에 대하여 감쇠비 및 압

반층까지의 깊이 및 층두께와 탄성계수의 변화에 따른 비파괴시험장비 FWD의 동적영향을 밝힌바 있다.

3.2.3 의사정적 역해석기법

아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정을 위한 일반적인 역해석기법은 FWD 시험에 의한 동적 표면처짐을 정적 표면처짐으로 가정하고 다층탄성이론을 적용한 정해석을 사용한다. 그러나 실제 FWD 시험시 가해지는 하중은 충격하중으로 포장구조체는 동적 거동을 한다. 따라서 정해석에 의해 산정된 표면처짐과 FWD 시험시 측정되는 동적 표면처짐은 서로 차이가 있다. 이는 정해석이 점탄성 재료인 포장구조체의 관성, 감쇠 및 공진 등의 동적 거동특성을 반영하지 못하기 때문이다. 보다 정확한 포장구조체의 해석을 위해서는 동해석의 적용이 필요하나, 동해석은 해석 시간이 많이 걸리므로, 현장에서 실시간으로 해석하기가 어렵다. 따라서 동적 특성을 반영할 수 있도록 1999년 최준성은 실제 국내조건의 4층 포장구조에서 FWD 동적 영향을 고려할 수 있고 실시간 해석이 가능한 의사정적 역해석 프로그램을 개발하고 이를 수치검증과 현장에서의 깊이별 처짐측정을 통하여 현장검증을 실시하였다. 또한 역해석시 실제 암반층의 깊이를 고려하고자 2000년 백중은, 최준성, 김수일은 FWD의 시계열 데이터를 이용한 깊이추정식을 개발하였고, 의사정적 역해석 프로그램이 가지는 데이터베이스의 한계성을 극복하고자 2001년 최석명, 최준성, 김수일은 인공신경망을 이용하여 계절적 변화를 고려한 역산탄성계수 추정 프로그램을 개발하였고, 2002년 최준성, 김수일은 기존의 데이터베이스의 한계성을 극복하기 위하여 환경적 변화를 고려한 영역에서 FWD 비파괴시험의 시계열데이터를 통한 기반암깊이의 추정식을 적용한 3층 의사정적 역해석 프로그램을 개발하였다.

의사정적 역해석 프로그램인 DYN-BAL (dynamic

back analysis of asphalt layer) 은 FWD의 동적 특성을 고려할 수 있는 프로그램이다. 이 프로그램은 동적 표면처짐곡선과 하중지속시간을 이용하여 가상압반층의 깊이를 추정한 후 표면처짐과 다층탄성이론에 의해 산정된 정적 표면처짐곡선을 비교분석하여 의사정적 표면처짐계수를 산정하였다. 그 후 산정된 의사정적 표면처짐계수를 이용하여 동하중에 의한 표면처짐을 정하중에 의한 표면처짐으로 환산하고 환산된 표면처짐을 역해석함으로써 포장구조체의 동적인 특성을 반영하여 포장구조체의 물성을 추정하는 프로그램이다.

3.3 전산프로그램

Burmister의 층탄성이론이 매트릭스기법으로 정립되고 컴퓨터의 발달과 함께 다층탄성이론에 바탕을 둔 전산프로그램이 많이 개발되어 아스팔트 포장구조체의 구조해석에 사용되고 있다. 3.1 절에서 전술한 바와 같이 층탄성이론을 가장 먼저 전산화하여 포장구조해석에 사용된 전산프로그램은 1963년 Chevron연구소에서 개발된 CHEV 프로그램이다. 이는 선형탄성재료에만 적용될 수 있었으나, 1979년에 미국 아스팔트협회의 DAMA 프로그램에 비선형 탄성재료에 대하여 해석할 수 있도록 수정되었다. 1973년 에 Shell 정유사에서 개발된 BISAR 프로그램은 가장 보편적으로 사용되는 층탄성해석 전산프로그램으로 포장구조체에서 응력과 변형율을 가장 정확하게 구할 수 있는 복잡한 수학적 모델을 내포하고 있어 다른 층탄성프로그램을 비교하는 기준으로 사용되고 있다. 이는 수직하중뿐만 아니라 수평하중을 고려할 수 있으며, 포장층 사이의 마찰 정도를 규정할 수 있도록 되어 있다. ELSYM5 프로그램은 켈리포니아대학(버클리)에서 처음 개발되어 후에 소형컴퓨터에 적용할 수 있도록 수정된 것으로서 다룬 하중하에서 5개 탄성층까지 해석이 가능한 전산

프로그램으로 널리 사용되고 있다. 이는 최근에 FHWA에 의해 사용자 편의 전산프로그램으로 수정되었다. 미공병단에서 개발된 WESLEA 프로그램은 소형컴퓨터에서 보다 효율적으로 사용되며, 다른 프로그램에 비해 신속하게 수행된다. 1986년에 Finn 등은 아스팔트 포장구조체에서 피로균열과 소성변형(rutting)을 예측할 수 있도록 층탄성이론에 재료의 응력수준에 따른 물성(stress-dependent property)의 비선형을 적용한 전산프로그램인 PDMAP 을 개발하였다. 또한 Kenrurky 대학에서 개발된 KENLAYER 프로그램은 포장재료에 대하여 선형탄성, 비선형탄성, 또는 점탄성해석이 가능하며, 정하중 또는 이동하중에 대하여도 해석이 가능한 포장구조해석프로그램이다. 이는 피로균열과 바퀴자욱패임에 대한 손상해석(damage analysis)도 수행할 수 있도록 되어 있다. 또한 비파괴시험장비인 FWD(falling weight deflectometer) 시험결과로부터 포장구조체의 물성을 추정하기 위해 많은 역해석 프로그램들이 개발되어 사용되고 있다.

포장구조체해석을 위하여 층탄성이론에 바탕을 둔 전산프로그램들이 많이 개발되어 사용되고 있다. 그 중에서 현재 가장 널리 사용되고 있는 대표적인 연성포장체의 해석프로그램인 ELSYM5, BISAR, 와 VESYS 와 더불어 현재 전세계적으로 사용되는 프로그램들과, 유럽에서 개발중인 포장설계법에서 아스팔트 포장구조체의 해석프로그램을 선정하기 위해 검토하였던 프로그램들의 간단한 비교를 표 1에 나타내었다. 또한 표 2는 포장구조해석을 이용하여 포장구조체의 물성을 역산할 수 있는 여러 가지 역해석 프로그램들의 특징과 장·단점 등을 나타내었다.

4. 앞으로의 전망과 활용 방안

포장도로의 설계 및 평가와 유지관리를 객관적으로, 또한 경제적으로 수행하기 위해서는 경험적

특 집

표 1. 포장구조해석 프로그램의 비교

프로그램 명칭	특	정	개발 Source
ELSYM5	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 다층탄성해석, 선형해석 ◦ 특정지점 해석이 가능하여 시간소요가 적음 ◦ 10개 하중에 대하여 5층 포장체까지 가능 		California 대학
BISAR	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 연직, 수평하중을 고려한 다층탄성 선형해석 ◦ 각 점의 응력과 변형을 구하기 때문에 시간이 비교적 많이 소요됨 ◦ 10개 하중에 대하여 10개의 포장체까지 가능 		Shell
VESYS	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 시간 비중속성(탄성)재료와 시간중속성(점탄성) 재료에 모두 사용 ◦ 확률적 모델해석이므로 시간소요가 많음 		FHWA-US
ILLI-PAVE	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 유한요소법 작용, 비선형 탄성해석 ◦ 회복탄성계수 모델 및 Mohr-Coulomb 파괴기준 적용 ◦ 1개의 원형등분포 하중에 대하여 10개 포장체까지 가능 		Illinois 대학
DAMA	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 누적 손상기법을 사용한 다층탄성해석 ◦ 계절별 환경인자를 고려 ◦ 일정지점 표층 처짐, 인장변형률과 노상토 상부의 수직변형률을 구함 		AI-US
SINELA	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 다층탄성 선형해석 ◦ 해석층수 최대 6층 ◦ 시간소요 매우 적음 		Kentucky 대학
KENSLAB	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 콘크리트 slab 내의 응력, slab과 기초의 처짐을 결정하는 유한요소해석 프로그램 ◦ 최대 9개의 slab, 12개의 joint, 420개의 node ◦ 온도변화의 영향 및 기초와 slab 사이의 gab에 의한 영향 해석 가능 		Kentucky 대학
KENLAER	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 다층탄성 선형해석, 다층탄성 비선형해석, 점탄성해석 ◦ 이음이나 강성포장이 없는 연성포장구조체에만 적용가능 ◦ 복물하중, 비선형 포장체 해석 가능 ◦ 매너를 최대 24구간으로 나누어 피로균열 및 영구변형에 의한 손실해석 ◦ 해석층수 최대 10층 		Kentucky 대학
유럽의 포장설계법 (AMADEUS) 선정용 프로그램	다층 선형탄성해석 (Linear Elastic)	APAS-WIN	Finish
		BISAR-SPDM	Shell
		ELSYM5	
		MMOPP(비선형가능)	Denmark
		NOAH	Belgium
		VAGDIM95	Swedish
		VESYS	
		ROADENT/WESLEA	
	ECOROUTE		
	KENLAYER(비선형가능)		
	다층 비선형탄성해석(LE+NL)	CIRCLE	Australia
	다층 점탄성해석	VEROAD	Netherlands
유한요소해석(FE)	AXYDIN(축대칭)	Portugal	
	CAPA-3D(3차원)	Netherlands	
	MICHPAVE(축대칭)		
	SYSTUS(3차원)	Belgium	
	CESAR(3차원)		

표 2. 포장물성 추정 역해석 프로그램의 비교

프로그램 명 칭	특 징	개발 Source	비고
CHEVDEF ELSDEF WESDEF	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 사용된 Forward calculation 프로그램에 따라 나눈다 ◦ Chevron을 사용한 경우 : CHEVDEF ◦ ELSYM5를 사용한 경우 : ELSDEF ◦ WES5를 사용한 경우 : WESDEF ◦ 노상두께는 반무한 혹은 임의로 지정 ◦ 해석가능 층수 5층 ◦ 반복역산기법 	BushIII, A.J.	Boussinesq이론을 사용한 BOUSDEF도 있음
MODCOMP2.4	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Chevron을 Forward calculation용으로 사용 ◦ 노상두께는 반무한으로 가정 ◦ 해석가능 층수 8층 ◦ 사용하기가 까다롭다 ◦ 반복역산기법 	Irwin, L. H. (Cornell Univ.)	
MODULUS 4.0	<ul style="list-style-type: none"> ◦ WES5 를 Forward calculation용으로 사용 ◦ 노상두께를 측정된 표면치짐으로부터 자동적으로 계산 ◦ 초기탄성계수를 Data-base에 의해 자동적으로 계산 ◦ 해석가능 층수 4층 ◦ Data-base에 의한 pattern search 기법 	TII (Texas Transportation Institute)	현재 미국에서 가장 많이 사용되고 있음
EVCALC 3.0	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Chevron을 Forward calculation용으로 사용 ◦ 노상두께는 반무한으로 가정 ◦ 해석가능 층수 4층 ◦ 노상의 비선형성 고려 ◦ 반복역산기법 (비선형 최적화 기법 사용) 	Washington주 교통국 Washington 대학교	
MICHBACK	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Chevron을 Forward calculation용으로 사용 ◦ 노상두께는 측정된 표면치짐으로부터 계산 ◦ 해석가능 층수 3층 (암반층 고려시 4층) ◦ 아스팔트층의 온도보정이 가능 ◦ 반복역산기법 	Michigan 주립대학교	
MFPD	<ul style="list-style-type: none"> ◦ SINELA를 Forward calculation용으로 사용 ◦ 노상두께는 반무한인 경우와 치짐값에 의해 가정한 경우로 구분 ◦ 해석가능 층수 4층 ◦ 각층 탄성계수를 일개층씩 보정 	김수일 등 (연세대학교)	국내 아스팔트 포장에 이용
BALMAT	<ul style="list-style-type: none"> ◦ SINELA를 Forward calculation용으로 사용 ◦ Newton-Raphson 법 이용 ◦ 아스팔트층의 온도보정이 가능 	김수일, 최준성	현장에서의 깊이별치짐값으로 검증
DYN-BAL	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 암반층 영향깊이 고려 ◦ FWD 동적특성 고려 	최준성등	의사정적해석
ANN-BAL	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Artificial Neural Network 이용 ◦ 컴퓨터의 인공지능능력에 의한 D/B 구축 	최준성등	
DYN-BAL3	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 감쇠고유주기를 통한 실제 암반층 깊이 추정 알고리즘 추가 ◦ 극한의 기후영향을 고려한 D/B 확장 	최준성등	의사정적해석

방법보다는 정량적으로 평가할 수 있는 수단이 필요하며, 이러한 수단으로서 이론적 배경의 포장 구조해석이 사용될 수 있을 것이다. 또한 최근 전세계적으로 이슈화되고 있는 역학적-경험적설계법은 역학적 방법으로 포장구조체의 거동을 분석하고, 이로부터 공용성 저하를 예측하여, 실제 실내·현장시험 및 장기공용성시험의 경험적인 값의 보정을 통하여 도로포장설계시 합리적이고 경제적인 설계를 할 수 있도록 하는 것으로, 우리 회원들의 포장구조해석의 이해도 증진과 프로그램 사용성이 증가할 것이다. 따라서 국내에서도 역학적-경험적 설계법의 기본요소중 가장 기초적인 아스팔트 포장구조체의 거동을 분석하는 포장구조해석 프로그램의 개발은 시급히 이루어져야 하며, 특히 기본적 이론에 의한 프로그램 개발은 포장체 재료특성 및 시공조건, 환경과 교통특성을 고려한 단계해석 프로그램으로의 일반화를 통해 실내 및 현장실측 데이터를 통해 보정과 검증을 실시하여야 할 것이다. 이와같이 아직은 포장구조해석이론에서 여러 가지 검증되어야 할 사항들이 있으나 신속성 및 정확성, 신뢰성을 종합적으로 고려하여 우리 실정에 적합한 구조해석모형 개발이 국내 환경조건과 국내 기술력 확보차원에서 필요한 실정이다.

또한 포장 구조 해석의 추후 활용방안으로 다음과 같은 구체적인 항목에서 활용할 수 있을 것이다.

- M-E 설계법에서 역학적 구조 해석
- 새로운 포장 해석 방법/기법의 개발로 소성 변형등과 같은 포장 파괴 예측
- 포장 파손 이론 적용
- 장기 공용성 분석
- 새로운 포장 재료 및 공법의 적용성 분석
- 새로운 교통 하중의 영향 분석
- 아스팔트 콘크리트의 Micro-structure의 분석

앞에서 언급한 것처럼 현재 역학-경험적 (mechanistic-empirical method) 포장설계법은 활발히 연구되고 개발되고 있다. 여기서 구조해석은 핵심 부분이라 할 수 있다. 현재의 설계법은 일반적으로 소성변형(rutting)과 피로균열(fatigue crack)을 막기 위해 노상의 수직 변형률과 표층 아래에서의 수평 변형률/응력등을 제한하는 방법을 사용하기 때문에 표층의 표면에서 시작하는 균열(surface-initiated/top-down crack) 등을 반영하는 데는 한계가 있다. 따라서 여러 가지 해석 기법을 이용한 다양한 포장 파손의 메카니즘을 이해하고 포장 파손의 이론을 적립해서 궁극적으로는 설계에 반영될 수 있을 것이다. 또한 현재의 해석에서 반복 하중의 적용과 이에 따른 소성변형의 예측하는 데는 어려움이 있다. 따라서 이에 대한 연구가 이루어진다면 장기 공용성 분석도 언젠가는 구조해석에서 가능하리라 생각한다. 또한 새로운 포장 재료 및 공법의 현장 적용전에 구조 해석을 통한 적용성 분석을 수행할 수도 있을 것이며 새로운 교통 하중이 포장 구조에 미치는 영향을 조사할 수 있다. 이에 따른 경제적인 효과도 기대된다. 최근에는 도로 전체 구조를 해석하는 것에서 나아가 아스팔트 콘크리트의 골재와 바인더간의 미시적인 구조(micro-structure)를 분석함으로써 아스팔트 콘크리트 전체의 역학적 거동을 이해하려는 해석이 시도되고 있다. 이러한 미시구조의 해석을 통한 거시구조(macro-structure)의 거동을 이해하려는 방법은 소위 Homogenization techniques이라 하여 다른 분야 특히 복합재료분야에서는 널리 적용되고 있는 기법이기도 하다. 따라서 아스팔트 포장구조해석은 기존에 개발된 내용으로서 도로포장을 설계, 평가, 유지관리함에 있어서 유용한 수단이 될 것이며, 새로운 이론과 컴퓨터 및 공학분야의 발전에 따라서 더욱 발전할 수 있는 분야라 할 수 있다.

참고 문헌

1. AASHTO, *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, AASHTO, 1986.
2. Barker, W.R., Brabstone, W.N., and Chou, Y.T., "A General System for the Structural Design of Flexible Pavements," *Proceedings of 4th International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 1977.
3. Chen, D. H., Zaman, M, Laguros, L., and Soltani, A., "Assessment of Computer for Analysis of Flexible Pavement Structure", *TRR No.1482*, TRB, 1995, pp.123-133.
4. Croney, D. and Croney, P., *Design and Performance of Road Pavement, 3rd ed.*, McGraw-Hill, 1998.
5. Dong, Q., Matsui, K., and Yamamoto, K., "Time Domain Backcalculation of Pavement Structure Material Properties Using 3D FEM with Ritz Vectors", *International Journal of Geomechanics*, Vol.1, No.3, 2001, pp.325-336.
6. Helwany, S., Dyer, J., and Leidy, J., "Finite-Element Analysis of Flexible Pavement", *Jour. of Trans. Eng.*, ASCE, Vol.124, No.5, 1998, pp.491-502.
7. Huang, Y. H., *Pavement Analysis and Design*, Prentice-Hall Inc., 1993.
8. Siddharthan, R. V., Yao, J., and Sebaaly, P., "Pavement Strain from Moving Dynamic 3D Load Distribution", *Jour. of Trans. Eng.*, ASCE, Vol.124, No.6, 1998, pp.557-566.
9. 권수안, 노관섭, "도로사업의 시행 절차", 도로포장공학회지, 제3권 제1호, pp.13-20.
10. 김규춘, 노성렬, "한국형 포장설계법 개발연구를 시작하면서", 대한토목학회지, 제50권 제4호, pp.75-79.
11. 김수일, 유지형, 최준성, "MDD를 이용한 FWD의 역해석방법의 비교연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1997.
12. 김수일, 최준성, 이양구, "아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정을 위한 FWD 시험결과의 최적 연산기법 개발", 대한토목학회 논문집, 제18권 제3-1호, pp.41-52.
13. 서주원, 최준성, 김수일, "차량주행속도를 고려한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2001, pp.83.
14. 이강진, 최준성, 김수일, "차량 주행속도에 따른 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 거동 분석", 대한토목학회 논문집, 제19권 제3-6호, pp.1093-1101.
15. 최준성, "비파괴시험을 이용한 아스팔트 포장의 유지관리", 도로포장공학회지, 제3권 제3호, pp. 38-49.
16. 최준성, 김수일, "아스팔트 콘크리트 포장구조체의 현장온도조건을 고려한 의사정적 역해석기법에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제19권 제3-6호, pp.1081-1092.
17. 최준성, 이승훈, 김수일, 유지형, "FWD의 동적특성을 고려한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정에 관한 연구(I):역해석 기법개발", 대한토목학회 논문집, 제18권 제3-5호, pp.623-634.
18. 한국도로공사, "아스팔트 포장 구조해석 연구(II)", 도로연 92-13-6, 1992, pp.167-190