

포장도로 물성추정을 위한 충격하중 변위측정장비의 개발

A Development of Falling Weight Deflectometer for the Evaluation of Pavements Properties

최준성* · 김인수** · 김수일***

1. 서 론

도로건설은 모든 토목기술의 집약적 산물이며, 특히 물류이동 및 교통소통의 필수적인 수단이다. 국내도로는 미국 및 유럽과 비교하여 매우 짧은 역사 동안 비약적인 발전을 이룩하였으며, 아직도 원활한 물류이동과 교통소통을 위하여 도로망 구축이 건설 및 계획중에 있다. 그러나, 신설도로의 구축에 많은 어려움이 있으므로 기존 도로의 수 십년 동안 막대한 투자에 대해 최대의 비용효과를 얻기 위한 합리적이고 효율적인 포장평가와 유지관리가 절실히 필요한 상황이다.

공용중인 도로와 공항의 합리적인 유지관리를 위해서는 지반 및 포장도로를 정확히 평가할 수 있는 체계가 필요하며, 그 첫 번째 요구조건은 이상적인 지반 및 포장도로의 각 층의 물성을 신뢰성 있게 추정하기 위한 장비의 선정이다. 포장도로의 해석모델은 1940년대 초 *Burmister*의 다층탄성이론과 유한요소해석이론을 기초로 정립되었으나 포장도로의 물성추정 장비의 미비로 합리적인 유지관리에 문제점이 많았다. 그러나 이러한 문제점은 시험장비의 발달과 더불어 해결되기 시작하였으며, 근래에 들어서는 물성추정 하드웨어적인 요소는 신뢰성이 좋은 비파괴시험장비의 개발로 많은 발전을 이루고 있다. 본 연구에서는 최근 관심이 증폭하고 있는 고속도로, 국도, 공항의 유지관리시스템(PMS, Pavement Management System)의 구조적, 기능적, 안정적 측면에서의 평가시 구조적 평가의 기본이 되는 비파괴시험장비의 특성에 대하여 고찰하고, 특히 최근 전세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 비파괴시험장비인 Falling Weight Deflectometer를 국내기술에 의하여 개발하고자 한다.

2. FWD의 활용현황 및 연구개발내용

FWD의 종류는 다양하지만 그 중 대표적으로 상업화된 장비는 덴마크의 *Dynatest*사와 스웨덴의

* 정회원, 인덕대학, 토목공학과, 전임강사(☎ 02-901-7658)

** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 연구원(☎ 02-2230-4853)

*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수(☎ 02-361-2800)



KUAB Model, 국내에는 없는 노르웨이의 Phoenix FWD, 미국의 Foundation Mechanics사의 Jils 시리즈가 있다. 우리나라에서는 연세대학교에서 1990년 연구용으로 자체제작한 바 있으며, 한국도로공사에서 1995년 Dynatest Model 8000을, 한국건설기술연구원에서 1998년 Phoenix FWD를 수입, 보유하고 있다. 또한 현재 전세계적으로 1998년 자료를 토대로 보면 약 330대 정도가 가동중인 것으로 알려져 있으며, 점점 증가하는 추세이다. 특히 일본과 미국에서는 도로포장 유지보수를 전문으로 하는 민간회사가 FWD를 많이 보유하고 있는 것으로 알려져 있다. 현재 미국에서는 PMS(포장유지관리시스템)에서 포장의 구조적 물성을 추정하기 위한 비파괴시험장비로, 또 SHRP(전략적 도로연구사업)에서 LTPP(Long Term Pavement Performance, 포장의 장기공용성) 추적조사의 구조강도측정을 위한 중요 장비로서 자리를 잡고 있는 실정이다.

국내의 경우 앞으로 많은 고속도로와 국도의 확장으로 인해서 더욱더 많은 FWD가 필요할 것으로 추정된다. 그러나 국내의 활용장비는 수입품이기 때문에 고장수리시에 많은 애로가 있으며, 각 센서점검, 전체 시스템의 캘리브레이션 예도 많은 어려움이 있다. 또한 운영 소프트웨어가 외국에서 개발된 바 개선이 어렵고, 외국의 자료에 의한 데이터베이스가 사용되어 국내의 경우에 부적합한 경우가 발생한다. 그러므로, FWD를 국내에서 직접 개발해서 수입대체효과에 의한 경제적인 이득뿐만 아니라 추후 FWD를 적극적으로 활용하여 포장도로의 구조평가를 정확하게 해서 유지관리에 사용되는 국가 예산까지 절약할 수 있을 것으로 판단되므로 국내 도로의 구조평가 시스템의 최적설계와 표준화 작업이 시급하다 하겠다. 본 연구는 수입에 의존하는 장비의 국산화로 수입대체효과를 획득하고, 건설기계 장비의 국산화 기술이 축적되어 있는 한국생산기술연구원과 기술력이 축적되어 있는 대학, 현장적용성 및 검증장비를 구비하고 있는 한국도로공사의 산학연 협력체제로 추후 다른 포장평가장비의 국산화 개발과 표준화 사업의 연계성을 제시할 모델이 될 것이며, 국산화된 도로 유지관리장비의 개선을 통해 향후 북방지역 및 외국의 도로 설계, 시공, 유지관리시스템 구축사업에 동참할 수 있는 기술력 확보를 목표로 하고 있다.

본 연구의 연구개발내용은 도로평가 및 유지관리를 위한 FWD의 국산화 개발로서, FWD용 특장대차 시스템의 개발, 하중재하장치 및 측정시스템의 개발, 데이터 획득 및 처리시스템의 S/W개발, 개발장비의 실용화 연구 및 사업의 확장성 제시 등을 들 수 있다. 이를 위해 표 1과 같이 FWD 개발 전체 운영계획을 수립하고, 각 협동연구기관들의 전문성을 살려 표 2와 같이 연구내용을 수립하였다.

표 1. FWD 개발 전체 운영계획

연 차	연구 목표	주요 내용 및 범위
1차년도	<ul style="list-style-type: none"> • FWD 본체 완성 • 포장구조체 물성추정 시스템 구축 • FWD 데이터 획득시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 기존장비들의 장단점 분석 및 선행경험 조사 • 국산화 개발방안 및 개선방안 연구 • 하중 재하 시스템 개발 • 표면처짐 계측시스템 개발 • 기반암 깊이추정 알고리즘 개발 • 정해석 및 역해석을 통한 탄성계수값 추정에 관한 연구 • 데이터 획득 시스템 완성



2차년도	<ul style="list-style-type: none"> · 자동화 관리시스템 완성 · 현장검증 · 계측데이터 비교검토 · 오차수정 · 개발된 FWD의 활용방안 연구 	<ul style="list-style-type: none"> · FWD 본체와 데이터 획득시스템을 통합·자동화 하는 자동화 관리시스템의 완성 · 개발된 FWD 시제품의 현장검증 및 기존장비 비교연구 · 현장검증에 의한 역해석기법의 개선을 통한 오차 경감방법 연구 · 유지관리장비 사용성 및 효율성 증대방안 연구 · 개발장비의 실용화 방안연구
------	--	--

표 2. 협동연구기관들의 연구내용

협동연구기관	연구내용
한국도로공사	<ul style="list-style-type: none"> · FWD 관련자료조사 · FWD 시험 및 기존경험 노하우 응용 · 협동연구방향 제시 및 실용화 방안 제시
한국생산기술연구원	<ul style="list-style-type: none"> · 하중재하장치 개발 - 유압 승강장치, 하중재하장치 · 자동제어 운영시스템 개발(자동트리거, 수동) · 계측 시스템 구축 - 신호처리, 사용자 편의의 데이터 획득시스템 구축 (데이터 수집 제어보드 장착)
연세대학교	<ul style="list-style-type: none"> · 전체 개발계획의 방향성 제시 · 획득된 하중·표면치짐 Display 및 저장 · 탄성계수 산정 알고리즘 - 역해석 프로그램 · 기반암 추정프로그램 개발 및 역해석 프로그램 연계 · 표면 온도에 따른 탄성계수값의 보정
한국생산기술연구원 / 연세대학교	<ul style="list-style-type: none"> · 각종 계측장비 부착(속도계, 온도측정장치) · GUI 통합운영 소프트웨어 개발 · Hardware(trigger system 등)와 software(통합운영시스템 등)의 결합

3. 당해연도 연구내용 및 추후 연구내용

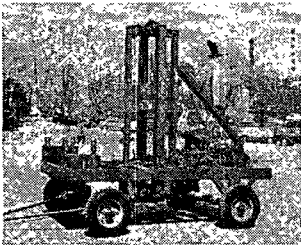
당해년도에서는 FWD 기본 시스템 구축을 위해서는 먼저 기존장비들의 장단점 분석 및 선행경험 조사를 통한 국산화 개발방안 및 기존장비의 개선방안을 연구하고, 이를 토대로 보기(bogy) 시스템 및 유압 승강장치, 하중충격장치 등으로 구성된 하중시스템 개발과 속도계로부터 얻은 신호로부터 기반암의 깊이를 추정하는 기법을 개발하였다. 또한 측정된 시그널의 분석을 위하여 기존의 정해석과 역해석기법 및 개발된 기법들을 이용하여 포장구조체의 층별 탄성계수를 합리적으로 추정하는 기법과 현장사용성이 용이한 시스템 기반을 구축하였다. 표 3은 FWD 기본시스템 구축을 위해 수행되는 세부 항목을 나타낸다.



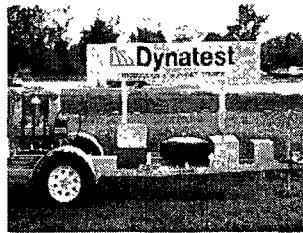
본 연구에서는 그림 1의 국내보유 FWD 장비중 기계적으로 간편한 Dynatest 장비의 모델을 채택하여 자체제작된 국내기술의 FWD 모델의 세부적 부품 및 시스템을 검증하고, 기존제품의 개선방안과 기능의 추가 및 포장평가장비의 사용자 측면의 개선방안 및 기능을 추가할 것이다. 한편 FWD의 하중판의 형상이 몇 조각으로 나누어져 있느냐에 따라 하중이 포장표면에 얼마나 균등하게 작용되는지 결정되기 때문에 1차년도에서는 하중판을 기존 Dynatest FWD처럼 단지 2등분하여 FWD 시제품을 제작하였으나 추후 연구에서는 하중판 형상을 모델시험으로부터 결정하여 균등하게 하중이 작용되어질 수 있도록 하며, 궁극적으로 종합적 시스템을 구축하여 실제 도로 및 공항의 유지관리 및 평가를 수행하게 될 것이다. 또한 컴퓨터의 발전에 따라 전산처리속도가 빨라짐에 따라 포장체의 정적인 거동뿐만 아니라 보다 정확한 거동을 파악하기 위한 동적인 영향을 실시간으로 파악할 수 있게 되므로, 향후에는 동적인 영향까지 고려할 수 있는 해석방법을 연구해야 할 것이다.

표 3. FWD 기본 시스템 구축을 위한 세부항목

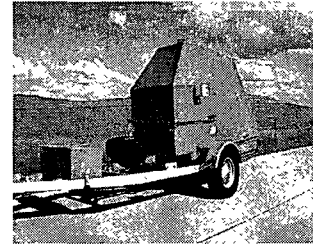
세부항목	내용
<ul style="list-style-type: none"> ■ FWD 관련 자료조사 - 개량형 FWD 조사 	최근 개발된 FWD를 인터넷과 참고문헌을 통해서 조사·분석하여 우리나라에 적합한 FWD 모델을 선정한다.
<ul style="list-style-type: none"> ■ 계측 시스템 구축 - 신호처리 - 표면처짐값 계산 	속도계로부터 얻은 신호를 실시간으로 처리하여 표면처짐값을 구하는 자동화 계측 시스템을 구축한다.
<ul style="list-style-type: none"> ■ 하중재하장치 개발 - 유압 승강장치 - 하중재하장치 	기존의 상용 FWD의 하중재하장치를 조사 및 분석하여 하중재하장치를 개발한다.
<ul style="list-style-type: none"> ■ 정해석 및 역해석 수행 	정해석을 실시하여 표면처짐을 계산한 후, 이를 역해석하여 측정된 표면처짐값과 비교하여 최종 탄성계수를 추정한다.
<ul style="list-style-type: none"> ■ 표면 온도에 따른 탄성계수값의 보정 	표면 온도를 측정하여 온도에 따른 아스팔트 콘크리트의 탄성계수를 보정한다.
<ul style="list-style-type: none"> ■ 기반암 추정시스템의 구축 	FWD 표면처짐 자료를 이용한 실제 지반에서의 기반암을 추정한 후 FWD 충격영향범위내의 암반층의 영향을 고려하여 물성추정기법을 개발한다.
<ul style="list-style-type: none"> ■ 본체 운영시스템 개발 	하중재하장치를 자동으로 제어할 수 있는 운영시스템을 개발한다.



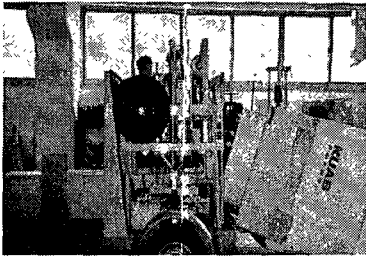
(a) 연세대학교 FWD 시제품



(b) DYNATEST 8000E



(c) KUAB FWD



(d) 국내 KUAB FWD 내부모습



(e) 국내 DYNATEST FWD

그림 1. 국내보유 FWD 종류

4. 결 언

본 연구에서는 FWD를 기계적인 측면과 해석적인 측면을 구별하여 각각 전문적인 기관에서 전문성을 살려서 연구·개발하므로써 현장에서 직접 사용할 수 있는 국산 FWD를 개발하려고 한다. 현재 국내 보유하고 있는 비파괴시험장비는 2대뿐으로 주로 현장운영되는 바, 전체 도로와 공항의 유지관리 방법으로서의 역할은 매우 미흡한 현실이다. 또한 기존장비의 고장수리시 많은 애로가 있으며, 각 센서의 점검에도 어려움이 있다. 또한 기존의 도로유지관리장비로부터 측정된 자료로부터 도로상태 분석시, 운영 소프트웨어가 외국에서 개발된 바 개선이 어렵고, 외국의 자료에 의한 데이터베이스가 사용되어 국내의 경우에 부적합한 경우가 발생하기도 한다. 본 연구의 국산화된 비파괴시험장비의 개발을 통해 기존 장비의 데이터 획득 시스템의 개선, 국내환경조건의 유지관리 자료의 데이터베이스화, 포장구조체의 물성 추정시스템의 개선 및 향후 업그레이드할 수 있는 환경을 조성할 수 있을 것이다. 이러한 본 연구의 성과를 기술적 측면과 경제적 측면을 나누어 살펴보면 다음과 같다.

가. 기술적 측면

- 국가 경쟁력 제고를 위한 정부의 주도적 역할과 지원 아래, 건설기계장비의 국산화 기술이 축적되어 있는 연구원과 기술력이 축적되어 있는 대학, 현장적용성 및 검증장비를 구비하고 있는 기관의 협력체제에서 수입에 의존하는 장비의 국산화로 수입대체효과 획득.
- 건설장비의 연구·개발과 관련된 공공기관, 대학의 인력, 기술력, 시험시설 및 기술정보를 효율적으로 활용하여 선진 건설장비 기술을 획득하고, 이를 통하여 도로구조물의 설계, 시공 및 유지관리를 위한 자료 수집 시스템의 개발.
- 차후 지반 및 도로관련 장비 자체연구 수행시 기술교류 및 공동연구 가능
- 저가의 국산품으로 공항 과 도로유지관리시스템 및 성토관리평가시스템에 사용가능하도록 변경가능.



나. 경제적 측면

- 고가의 외국장비의 국산화를 통한 기술력 확보 및 국가 경쟁력 제고.
- 국산화된 도로유지관리장비의 개선을 통해 향후 북방지역 및 외국의 도로 설계, 시공, 유지관리 시스템 구축사업에 동참할 수 있는 기술력 확보.
- 가격의 합리화로 국도 및 고속도로 관리의 효율적 운영을 위하여 각 지사 및 국토관리청에서 사용가능하며, 각 기관의 사용성 증대로 유지관리 시기를 정확히 추정함으로써 예산집행의 최적화 및 예산절감 효과.

본 연구의 최종목표는 FWD를 상용화하는 것으로 기존의 연구에서 만들었던 시제품의 수준이 아닌 현장에서 직접 사용할 수 있고 현재 국내에서 사용하는 외국산 FWD를 대체할 수 있는 제품과 기술을 만드는 것이다. 하지만, 현재의 연구상황상 하중재하장치 및 대차시스템을 대형화할 수 없으므로 FWD 모델중 아스팔트 포장도로에서 사용할 수 있는 중형모델만을 개발하는 것을 목표로 삼고있다. 그러므로 시멘트 콘크리트 포장도로 및 공항에서 사용할 수 있는 대형 FWD는 본 연구의 국산화 FWD 시스템을 토대로 하여 추후 연구를 통해서 계속적으로 발전시켜야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 연세대학교 산업기술연구소, "아스팔트 및 콘크리트 포장구조체의 유지관리를 위한 시스템의 개발", 한국과학재단 연구보고서, 1992
2. 연세대학교 산업기술연구소, "FWD 정밀해석 및 포장구조체 하부구조 평가방법 연구", 한국도로공사 연구보고서, 1997
3. 최준성, "동적표면처짐의 의사정적해석에 의한 아스팔트 콘크리트 포장구조체의 물성추정", 연세대학교 대학원 박사학위논문, 1998. 12.
4. 최준성, 김수일, "아스팔트 콘크리트 포장구조체의 현장온도 조건을 고려한 의사정적 역해석기법에 관한 연구", 대한토목학회논문집 제 19권 제 III-6, 대한토목학회, 1999. 11., pp. 1081 -1092
5. National Highway Institute, "Pavement Deflection Analysis-Participant Workbook", Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-HI-94-021, 1994, pp.6.47-6.54.