

지반물성추정 및 다짐관리를 위한 비파괴시험장비의 개발

A Development on the Non-Destructive Testing Equipment for the Compaction Control and the Evaluation of Pavements Properties

최준성¹⁾, Jun-Seong Choi, 김인수²⁾, In-Soo Kim, 유지형³⁾, Ji-Hyeong Yoo, 김수일⁴⁾, Soo-Il Kim

¹⁾ 인덕대학, 토목공학과, 전임강사, Full time lecturer, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Induk College

²⁾ 한국도로공사 도로연구소 연구원, Researcher, Asphalt Pavement Research Division, KHC

³⁾ 경일대학교 토목공학과 부교수, Assoc. Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungil University

⁴⁾ 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : In this study, the Non-Destructive Testing Equipment was introduced for the compaction control and the evaluation of pavements properties and the developing process was showed. Falling Weight Deflectometer(FWD) is a system for performing non-destructive testing of pavement and the other foundation structures. The system develops forces from the acceleration caused by the arrest of a falling weight and these forces are transmitted onto the surface of a structure causing it to deflect much as it would due to the weight of a passing wheel load. The structure will bend downward and exhibit a deflection basin. FWD uses a set of velocity sensors to determine the amplitude and shape of the deflection basin. The deflection response, when related to the applied loading, can provide information about the strength and condition of the various elements of the test structure. In this study, a computer program was developed that can be used to evaluate pavement and foundation structures from the data produced by FWD. The Falling Weight Deflectometer, non-destructive testing equipment, is increasing used at the whole world.

Key world : Non-Destructive Testing Equipment, Falling Weight Deflectometer, deflection basin, compaction control, pavements properties

1. 서론

도로건설은 모든 토목기술의 집약적 산물이며, 특히 물류이동 및 교통소통의 필수적인 수단이다. 국내도로는 미국 및 유럽과 비교하여 매우 짧은 역사동안 비약적인 발전을 이룩하였으며, 아직도 원활한 물류이동과 교통소통을 위하여 도로망 구축이 건설 및 계획중에 있다. 그러나 환경문제와 더불어 예산문제 등으로 인하여 신설도로의 구축에 많은 어려움이 있다. 그러므로 기존도로의 수십년동안 막대한 투자에 대해 최대의 비용효과를 얻기 위하여 합리적이고 효율적인 유지관리가 절실히 필요한 상황이다. 또한 도로건설시 실시되는 도로의 평판재하시험에는 1일에 시험 가능한 횟수가 적고 큰 반력장치를 필요로 하는 등의 문제점이 있다. 그러나 성토의 적절한 다짐관리는 평판재하시험과 같이 시간이 소요되는 시험을 대표 지점에서 여러회에 걸쳐 시행함으로써 정도가 좋아지므로, 간편하고 신속한 방법에 의해 수회 실시할 필요가 있다.

따라서, 공용중인 도로와 공항의 합리적 유지관리 및 평판재하시험을 대신하는 간편한 방법개발을 위해서는 지반 및 포장도로를 정확히 평가할 수 있는 체계가 필요하며, 그 첫번째 요구조건은 이상적인 지반 및 포장도로의 각 층의 물성을 신뢰성있게 추정하기 위한 장비의 선정 및 이의 활용방안을 구축하는 것이다. 본 연구에서는 현재까지 이용되고 있는 여러 비파괴 시험장비중 가장 신뢰성 있는 비파괴

시험장비로 평가되고 있는 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 국내기술에 의해 개발하고자 한다. 비파괴시험장비는 공학적인 이론에 근거하여 합리적이며 과학적으로 포장구조 시스템을 평가할 수 있기 때문에 유지관리시스템 구축등 공항 및 포장도로에서 그 사용성이 점차 증가일로에 있다. 또한 기존시스템의 최적화 유지관리시스템 뿐만 아니라 공항 및 포장도로의 역학적 설계법에도 비파괴시험장비는 기본인자로 사용될 것으로 예상되며, 선진외국에서는 물론 우리나라와 가까운 일본과 중국에서도 FWD를 사용하여 포장도로의 물성추정 및 유지보수, 다짐평가방법의 도입연구를 실시하고 있다. 2000년 밀레니엄 지식사회로의 변화가 강력히 요구되는 요즘, 지금까지는 선진국의 기술을 들여와서 그냥 모방만 하던 시절이었다면 앞으로는 우리가 주도적으로 관련기술을 개발, 발전시켜서 우리 고유의 기술과 자체 기술력과 경쟁력을 확보하여야 할 것이다.

2. 비파괴시험장비, FWD 의 국산화

포장구조체의 구조평가를 신속하고 정확하게 실시하기 위해서는 포장체를 손상시키지 않고 현장에서 직접 시험할 수 있는 비파괴시험을 실시해야 한다. 이러한 비파괴시험 중 FWD 시험은 시험과정이 간단하고 실제의 교통하중을 가장 정확히 묘사할 수 있기 때문에 가장 우수한 장비로 평가받고 있다. 또한 앞으로 많은 고속도로와 국도의 확장 및 지반의 다짐평가장비로서 더욱더 많은 FWD가 필요할 것으로 추정된다.

국내의 경우 1990년 연세대학교에서 연구용으로 제작한 시제품 FWD 와 한국도로공사에서 1995년 구입하여 고속도로에서 사용중인 DYNATEST FWD, 건교부에서 구입하여 국도에 사용중인 KUAB FWD 등으로, 실제 사용되는 도로유지관리장비는 2대 뿐으로, 전체 국내도로의 평가 및 유지관리 계획 수립을 위해서는 절실히 부족한 상태이다. 외국의 경우, 주마다 2대이상의 FWD 장비를 보유하고 있으며, 일본의 경우 일개 토목회사가 보유하고 있을 정도이며 유럽, 미국등에는 보편적으로 사용되고 있는 현실이다. 그러나 국내에 수입되어 있는 FWD 장비는 고장수리시 많은 애로가 있으며, 각 센서 점검, 전체 시스템의 검정(Calibration) 에도 많은 어려움이 있다. 또한 운영 소프트웨어가 외국에서 개발된 바 개선이 어렵고, 외국의 자료에 의한 데이터베이스가 사용되어 국내의 경우에 부적합한 경우가 발생하기도 한다. 그러므로, FWD를 국내에서 직접 개발해서 수입대체효과에 의한 경제적인 이득뿐만 아니라 추후 FWD를 적극적으로 활용하여 다짐평가장비로서의 가능성과 포장도로의 구조평가를 정확하게 해서 유지관리에 사용되는 국가예산까지 절약할 수 있을 것으로 판단되므로 FWD의 국산화는 반드시 필요하다고 사료된다.

2.1 비파괴시험장비, FWD

FWD는 현재까지 이용되고 있는 여러 비파괴 시험장비중 가장 신뢰성 있는 비파괴 시험장비로 평가되고 있다. 가장 최근에 개발된 주행식 동적변위 측정장비(RDD)는 측정데이터의 신뢰성이 아직은 검증이 완료되지 않았으며, 간편식 충격하중에 의한 Handy FWD는 재하하중이 작기 때문에 포장도로 노면에서의 다층구조체에 대한 시험은 검증이 연구중인 상태이다. FWD는 벤켈만 빔, Dynaflect, Road Rater와 비교하여 실제 차량하중에 의해 발생하는 포장 도로의 처짐 형상을 가장 잘 나타낼 수 있는 장비이며, 차량하중 크기의 하중을 포장 구조체 표면에 가할 수 있기 때문에 FWD에 의하여 측정되는 처짐 곡선으로부터 포장 구조체의 탄성계수를 추정하게 되면 응력 상태에 따른 비선형성을 고려하지 않고도 포장 구조체의 해석에 직접 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. FWD를 이용한 비파괴시험의 개략도는 다음 그림 2.1과 같다. FWD의 종류는 다양하지만 그 중 대표적으로 상업화된 장비는 덴마크의 Dynatest 사와 스웨덴의 KUAB Model, 국내에는 없는 노르웨이의 Phoenix FWD, 미국의 Foundation Mechanics사의 Jils 시리즈가 있다.

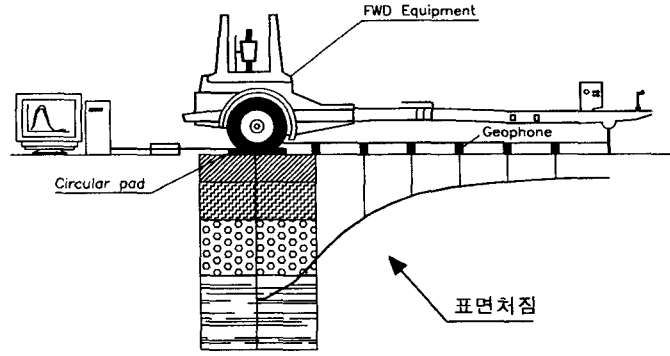


그림 2.1 FWD 비파괴시험을 통한 표면처짐 측정

우리나라에서는 그림 2.2 ~ 그림 2.4의 연세대학교 연구용 시제품 FWD, 한국도로공사의 DYNATEST Model 8000, 한국건설기술연구원의 KUAB FWD 등이 있다. 현재 전세계적으로 1998년 자료를 토대로 보면 약 330대 정도가 가동중인 것으로 알려져 있으며, 점점 증가하는 추세이다. 국가별 소유대수를 살펴보면 미국 Dynatest 82대, KUAB 15대, 기타종류로 수십대를 보유하고 있고, 일본은 KUAB 17대와 기타 몇 대, 중국은 기하급수적인 증가추세를 보이고 있으며 단일기종인 DYNATEST 보유현황이 1998년 1대, 1999년 3대, 2000년초 10대로, 타기종까지 합치면 10대 이상이 될 것이다. 인도 또한 3대 이상으로 우리나라에 비하여 우위를 차지하고 있다. 특히 일본과 미국에서는 도로포장 유지보수를 전문으로 하는 민간회사가 FWD를 많이 보유하고 있는 것으로 알려져 있다. 현재 미국에서는 포장유지관리시스템(PMS)에서 포장의 구조적 물성을 추정하기 위한 비파괴시험장비로, 또한 도로전략사업(SHRP)에서 포장의 장기공용성(LTPP, Long Term Pavement Performance) 추적조사의 구조강도측정을 위한 중요장비로서 자리를 잡고 있다.



그림 2.2 연세대학교 FWD 시제품



그림 2.3 DYNATEST 8000E

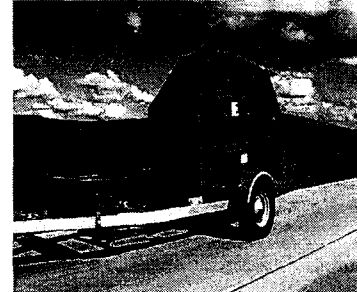


그림 2.4 KUAB FWD

2.2 연구개발

본 연구에서 FWD를 국산화하는 최종목표는 1988년부터 지속적으로 연구해왔던 충격하중에 의한 표면처짐으로부터 포장구조체의 탄성계수를 추정하는 과정을 체계적으로 정립하는데 있다. 이를 위해서 FWD의 기본 시스템 구축과 이를 실제 운영할 수 있도록 FWD 자동화 관리 시스템을 구축하는 2단계로 나누어 연구하게 된다. 우선 FWD의 기본 시스템을 구축하는 1단계에서는 실제 차량에 의한 충격하중을 모사하기 위한 FWD 본체의 제작과 충격하중에 의해서 발생하는 표면처짐을 계산하고, 이를 정해석과 역해석을 통해서 최종적으로 포장구조체의 탄성계수를 추정하는 데이터 획득시스템을 구축한다. FWD 자동화 관리 시스템을 구축하는 2단계에서는 1단계에서 만들어진 FWD본체와 데이터 획득시스템을 통합하여 자동화 관리시스템을 구축하고, 이를 기존의 FWD와 깊이별 처짐측정장비로부터 보완·검증하여 현장에서 실제 사용할 수 있는 FWD를 개발한다.

2.2.1 FWD의 시스템

비파괴시험장비 FWD를 국산화하기 위하여 먼저 FWD 국산화 개발방안 및 개선방안을 검토하여 하중 재하 시스템 구축, 포장구조체 물성추정 시스템 구축, 데이터 획득시스템 구축을 수행하고 전체 데이터 자동화 관리시스템 완성 및 FWD 시제품 현장검증, 상용 FWD와 시제품과의 계측데이터 비교를 통하여 개선사항을 검토한다. 이를 통하여 데이터 획득시스템 및 역해석기법의 개선 및 오차경감방법에 관한 연구를 수행한다. 자동화관리시스템은 FWD의 본체 운영시스템과 데이터 획득시스템을 통합하여 자동화할 수 있는 시스템이며, 개발된 FWD 시제품의 현장검증 및 상용 FWD와의 비교는 실제 지반과 포장도로에서 수행하며, 오차가 발생할 경우 깊이별 처짐측정장비를 사용해서 FWD 시제품을 검증한다. 또한 추후 국산화된 FWD를 이용하여 유지관리 장비로서의 사용성 및 효율성 증대방안과 개발장비의 실용화 방안을 연구한다. 다음 그림 2.5는 전체 개발 흐름도이며, 표 1은 전체 연구내용을 나타낸다.

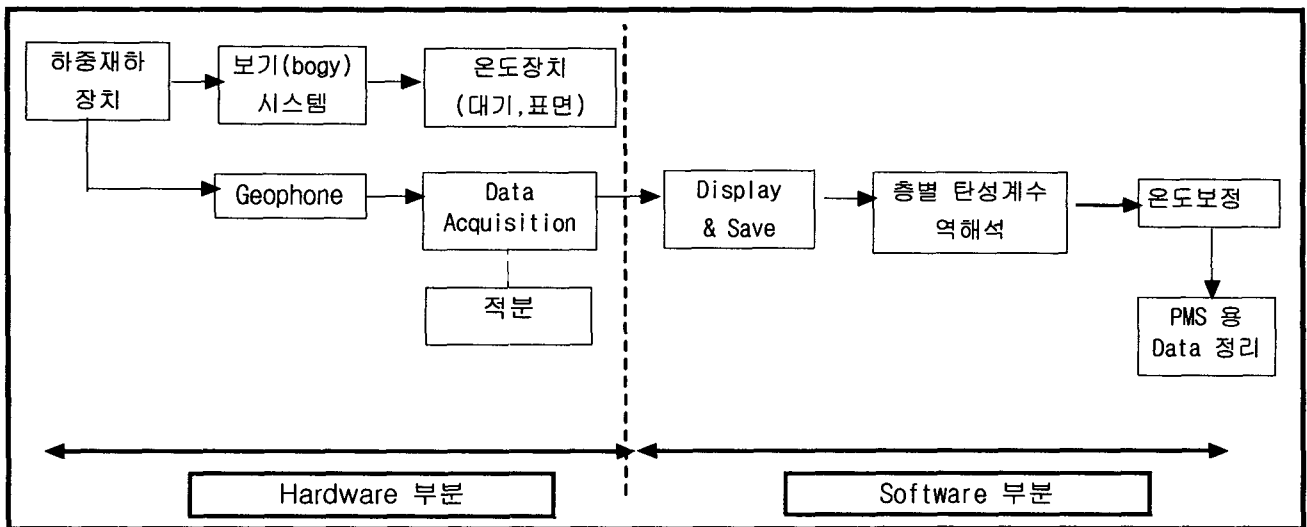


그림 2.5 FWD 국산화 개발 흐름도

표 1 FWD 국산화 연구개발

구분	연구 목표	주요 내용 및 범위
FWD 기본 시스템 구축	<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 기반암 추정기법 개발 정해석 및 역해석을 통한 탄성계수값 추정에 관한 연구 표면처짐 계측시스템 개발 데이터 획득 시스템 완성
FWD 자동화 관리 시스템	<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·자동화하는 자동화 관리시스템의 완성 개발된 FWD 시제품의 현장검증 및 기존장비 비교연구 현장검증에 의한 역해석기법의 개선을 통한 오차경감방법 연구 유지관리 장비 사용성 및 효율성 증대방안 연구 개발장비의 실용화 방안연구

2.2.2 FWD의 기본 시스템 구축

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 승강 장치, 하중 충격장치등으로 구성된 하중시스템 개발과 속도계로부터 얻은 신호로부터 기반암의 깊이를 추정하는 기법을 개발한다. 또한 측정된 시그널의 분석을 위하여 정해석과 역해석을 실시하여 포장구조체의 층별 탄성계수를 합리적으로 추정하는 기법과 현장사용성이 용이한 시스템 기반을 구축한다. 다음 표 2는 FWD 기본 시스템 구축을 위해 수행되는 세부항목을 나타낸다.

표 2 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 탄성 계수값의 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 충격영향 범위내의 암반층의 영향을 고려하여 물성추정기법을 개발한다.
<ul style="list-style-type: none"> ■ 본체 운영시스템 개발 	하중재하장치를 자동으로 제어할 수 있는 운영시스템을 개발한다.

3. 결론

본 연구에서는 FWD를 기계적인 측면과 해석적인 측면을 구별하여 각각 전문적인 기관에서 전문성을 살려서 연구·개발함으로써 현장에서 직접 사용할 수 있는 국산 FWD를 개발하려고 한다. 현재 국내 보유하고 있는 비파괴시험장비는 2대뿐으로 주로 현장운영되는 바, 전체도로와 공항 및 최근 논의되고 있는 성토다짐관리방법으로서의 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, 포장구조체 및 지반물성 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 지원아래, 건설기계장비의 국산화 기술이 축척되어 있는 연구원과 기술력이 축척되어 있는 대학, 현장적용성 및 검증장비를 구비하고 있는 기관의 협

력체제에서 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 국도관리청에서 사용 가능하며, 각 기관의 사용성 증대로 유지관리 시기를 정확히 추정하므로써 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 콘크리트 포장도로 및 지반과 다짐성토 관리에서 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. 井原 務, “FWD 활용사례와 조사설계시스템의 구축“, 舗装 32-2, pp. 28 - 36, 1997
6. 關根悅夫, 鴨智彦, 阿部長門, 丸山暉彦, “Compaction Control by using a Falling Weight in Railway Embankment Work“, 土と基礎, Vol. 48, No.4, pp.13-16, 2000
7. National Highway Institute, “Pavement Deflection Analysis-Participant Workbook“, *Federal Highway Administration*, Publication No. FHWA-HI-94-021, 1994, pp.6.47-6.54.