Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 11, No. 3, pp.124-130 (2003)

도로포장 구조체의 물성 추정을 위한 FWD의 설계 및 제작

황 성 호[*1] · 손 웅 희[2] · 최 경 락[2]

성균관대학교 기계공학부[*1] · 한국생산기술연구원[2]

Development of Falling Weight Deflectometer for Evaluation of Layer Properties of Flexible Pavement

Sung-Ho Hwang[*1] · Woong-Hee Shon[2] · Gyeong-Rak Choi[2]

[*1]*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea*

[2]*Manufacturing System Research Center, KITECH, 35-3 Hongchon-ri, Ibjang-myun, Chonan, Chungnam 330-825, Korea*

(Received 5 August 2002 / Accepted 7 February 2003)

Abstract : Many structural evaluation procedures of road and airfield pavements use the Falling Weight Deflectometer (FWD) as a critical element of non-destructive deflection testing. FWD is a trailer mounted device that provides accurate data on pavement response to dynamic wheel loads. A dynamic load is generated by dropping a mass from a variable height onto a loading plate. The magnitude of the load and the pavement deflection are measured by a load cell and geophones. And database concerning pavement damage should be enhanced to analyze loss of thickness asphalt layer caused from the plastic deformation of pavement structure, such as cracking or rutting. The prototype FWD is developed, which consists of chassis system, hydraulic loading system, data acquisition and analysis system. This system subsequently merged to form automation management system and is then validated and updated to produce a working FWD which can actually be used in the field.

Key words : FWD(Falling Weight Deflectometer), Asphalt concrete pavement(아스팔트 포장 구조체), Non-destructive testing(비파괴 시험), Hydraulic loading system(유압식 하중 재하 장치)

Nomenclature

H : falling height, m

Fd : desired load, N

K_{fv} : load-velocity constant, N/m/s

1. 서 론

포장도로는 지속적인 차량하중과 기후조건 등 환경적인 영향에 의해서 구조적 능력이 감소하게 되어 결국은 한계 공용상태에 이르게 된다. 그러므로 적절한 시기에 수행한 포장구조체의 구조평가를 바탕으로 보수·보강을 실시하여 도로의 주행성, 안정성 및 쾌적성을 유지해야 한다.

포장구조체의 구조평가를 신속, 정확하게 실시하기 위해서는 포장체를 손상시키지 않고 현장에서 직접 시험할 수 있는 비파괴시험을 실시해야 한다. 이러한 비파괴시험 중 FWD(Falling Weight Deflectometer) 시험은 시험과정이 간단하고 실제의 교통하중을 가장 정확히 묘사할 수 있기 때문에 가장 우수한 장비로 평가받고 있다. 또한 앞으로 많은 고속도로와 국도의 확장으로 인해서 더욱 더 많은 FWD가 필요할 것으로 추정된다.

*To whom correspondence should be addressed.
hsh@me.skku.ac.kr

비파괴시험방법을 이용하여 포장체를 평가하기 위한 노력은 1933년 German Research Society for Soil Mechanics에서 처음으로 시도되었다. 그 후, 네덜란드의 SHELL Laboratory와 영국의 Road Research Laboratory에서 이를 정현 진동하중에 의한 포장구조체의 평가방법으로 발전시켰다. 이는 정현진동하중을 포장 표면에 가하여 처짐을 유발시키고 이를 측정하는 장비이다. 이와 같은 장비로서 1960년대 Dynaflect1)와 Road Rater가 개발되어 사용되고 있다. 충격하중으로 포장 표면의 처짐을 유발하고 이를 측정하는 비파괴시험장비인 FWD는 1963년 Bretonniere에 의해서 제작되었다. 그 후 계속 개선·보완되어 현재 사용중인 Dynatest,[2] KUAB,[3] JILS[4] 모델 등의 FWD가 실제 차량하중조건을 가장 잘 나타내고 보다 신뢰성 있는 해석결과를 보여주고 있는 것으로 알려져 있다.

순수 국내 기술로 FWD를 국산화하고자 Dynatest의 FWD를 모델로 연구를 수행하였으며, 본 논문에서는 수행된 연구 결과를 토대로 시스템 설계/제작 및 실험 결과에 대해 기술하였다. 시제작된 FWD를 실제 아스팔트 노면에서 하중 충격 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였으며, 향후 보다 안정적인 실험이 가능하도록 FWD 차체 구조물에 대한 개선과 데이터 처리 분석 S/W 보완에 대한 연구가 계속 수행될 것이다. 본 연구에서 개발된 FWD를 활용, 포장도로의 정확한 구조평가에 바탕을 둔 적절한 대처로 도로유지보수비를 절감하고 체계적인 도로유지/보수/관리 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

2. FWD 시스템 개요

FWD는 도로 포장표면에 충격하중을 가하여 발생된 처짐을 포장표면에 설치된 일련의 감지기에 의해 표면처짐곡선을 얻고, 이를 분석함으로써 포장구조체를 평가하는 비파괴 시험장비이다. FWD는 현재까지 사용되고 있는 도로포장평가를 위한 여러 비파괴시험장비 중에서 가장 신뢰성이 있으며 신속한 비파괴시험장비로 평가되고 있다.[5,6]

FWD 시험의 원리는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 일정한 질량의 추를 포장체 표면에 놓인 완충장치가 부착된 원형 재하판(loading plate)에 자유낙하시켜 순간적인 충격 하중을 가하여 포장체의 표면에 유발된 처짐을 측정하는 장비이다. FWD 시험은 추의 질량을 바꾸거나 자유낙하 높이를 변화시킴으로써 포장체에 충격하중을 변화시킬 수 있기 때문에 차량의 하중을 모사하는데 매우 적합한 장비이며, 해석에 있어서는 포장구조체의 비선형 거동을 고려하지 않기 때문에 지금까지 개발된 장비 중에서 가장 신뢰성이 좋은 결과를 주는 비파괴 시험장비이다. 표면처짐은 하중재하 중심으로부터 300mm 간격으로 설치된 7개의 속도계로부터 측정되며, 측정된 표면처짐을 이용하여 포장구조체의 물성을 추정한다.[7]

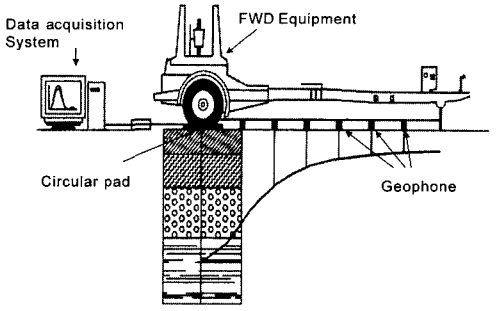


Fig. 1 Testing system layout using FWD equipment

FWD 시스템은 크게 두 부분으로 나눌 수 있는데, 이는 차량하중을 충격하중으로 모사하여 포장체 표면에 하중을 가하는 장치와 이 충격하중으로 인하여 발생되는 표면처짐량을 측정하는 센서로 이루어진 하드웨어(H/W) 부분과, 센서 신호를 측정하고 획득된 표면침하량을 역해석하여 포장구조체의 물성을 추정하여 포장구조체를 평가하는 소프트웨어(S/W) 부분이다. 그동안 측정 데이터를 이용한 물성 파악을 위한 연구는 토목공학전공 연구자들에 의해 많이 진행되어 왔다.[6,8,9] 본 논문에서는 이중 S/W 부분의 해석 파트를 제외한 FWD 시스템의 전반적인 구성 및 설계에 대해 기술하도록 한다.

3. FWD의 H/W 설계 및 제작

FWD를 이용하여 포장 구조체의 물성을 추정하기 위해서는 하중재하장치, 하중측정장치, 처짐측정장치가 필수적이다. 이러한 구성요소들을 하나의

샤시시스템 위에 설치하고 측정의 현장성을 살리기 위해서 시제품 개발은 트레일러 방식의 특장시스템으로 설계, 제작하였다.

하중은 일정 질량을 도로면과 수직방향으로 자유낙하시킴으로서 도로표면에 스프링(고무판)으로 연결된 판에 충격력으로 작용하게 된다. 이 때 일정 질량은 하중재하장치에 의한 유압장치와 기계식 catch 메커니즘에 의해 유도되고 작동되며, 하중의 크기는 질량 크기와 낙하높이에 따라 조절되고 재하판 상부에 놓인 로드셀에 의해 측정된다. 처짐은 재하중심과 그곳으로부터 300mm 간격으로 놓인 7개의 속도계(geophone)에 의해 측정된 연직 방향 속도를 수치 적분하여 구하게 된다. 측정자료의 획득은 Data Acquisition Board를 내장한 노트북 PC에서 자동적으로 수행되며 자료의 현지 출력, 분석 및 저장이 가능하도록 구성하였다.

3.1 FWD 샤시 시스템

도로면 측정을 위해서는 차량에 장착되어 이동이 용이하여야 한다. 따라서, 하중재하장치가 장착된 샤시시스템은 실제 도로의 이동 접근성과 현장성을 위해서 트레일러 방식으로 설계 제작하였다. FWD 시스템을 견인하고 운용할 차량은 엔진의 낮은 회전수 영역에서도 높은 토크와 출력이 가능한 디젤 엔진 타입의 4×4 차량으로서, 이것을 고려해 트레일러를 설계하였다.

FWD 시제품은 현장 사용을 위한 시스템 구축에 주안점을 두고 개발하였으며, 트레일러 이동에 따른 안전을 고려하여 신호등과 경광등을 설치하였다. 브레이크 및 좌우측 방향신호, 그리고 비상등 신호를 구동차량과 일체화 배선작업을 통하여 커넥터로 전기신호를 받아 동시에 가동되도록 제작하였다.

본 논문에서 설계 제작한 FWD 시제품의 주요 사양을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

본 논문의 FWD는 일정 중량을 정해진 높이까지 올렸다가 자유낙하 시킴으로써 원하는 하중을 부가하는 시스템이다. 따라서, 목표하중을 부가시키기 위한 높이를 선정해야 하며, 이것은 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

Table 1 Design specifications of FWD

항 목		설계 사양
축 허용 하중		1200 kg
최대 허용 운행 속도		80 km/h
트레일러 길이		4.40 m
트레일러 폭		1.80 m
시스템 전체 높이		1.30 m
하중재하 높이 범위		30-390 mm
하중 재하 조합	50kg 하중	7-20 kN
	150kg 하중	16-50 kN
	250kg 하중	27-85 kN
	350kg 하중	40-140 kN
하중 재하판 외경		300 mm
허용 운용 온도 범위		−20~50° C

$$H=\left\{\frac{F_d}{K_{fv}}\right\}^2\frac{1}{2g} \quad (1)$$

여기서, H는 낙하위치, F_d는 목표 하중, g는 중력가속도이다. 또한, K_{fv}는 하중/속도 인자로서 실험에 의해 구해지며, 본 논문에서는 51,700 N/m/s의 값을 갖는다. 위 식에 의해 계산된 설계 낙하높이는 Table 2와 같다.

Table 2 Desired loads and falling heights

	목표하중[kN]	낙하높이[mm]
1단계	40	30
2단계	80	117
3단계	110	222
4단계	140	373

3.2 유압식 하중 재하 장치

유압식 하중 재하 장치는 FWD 시스템의 중량부(falling weight)를 일정 높이까지 상승시켰다가 하강시키는 기능을 하는 부분으로서, 노면 상태를 파악할 수 있는 적정 중량을 들어올릴 수 있도록 설계되어야 한다.

본 논문에서 목표로 하는 1차 부하 범위는 100kN으로서, 낙하되는 물체의 무게는 350kg으로 설계하였다. FWD용 유압 시스템은 중량부 및 센서부를 노면에 닿도록 상승 또는 하강시키며, catch 메커니즘에 의해 함께 올려진 중량을 일정높이에서 낙하시키는 기능을 수행하여야 한다. 따라서, 이러한 기능을 수행할 수 있도록 본 논문에서 설계한 유압회로는 Fig. 2와 같다.

유압 시스템은 측정 시스템의 동작과는 상관없이 별도로 수동 조작으로 작동될 수 있어야 한다. 따라서 PLC를 이용하여 동작시킴으로써 보다 안정한 작동이 이루어 질 수 있도록 하였으며, Fig. 3은 PLC를 이용한 유압 제어기와 각종 센서 및 입력 스위치의 구성도를 나타낸다. 이때, 유압부의 작동은 Table 3에 나타나 있는 바와 같이 솔레노이드 동작의 조합

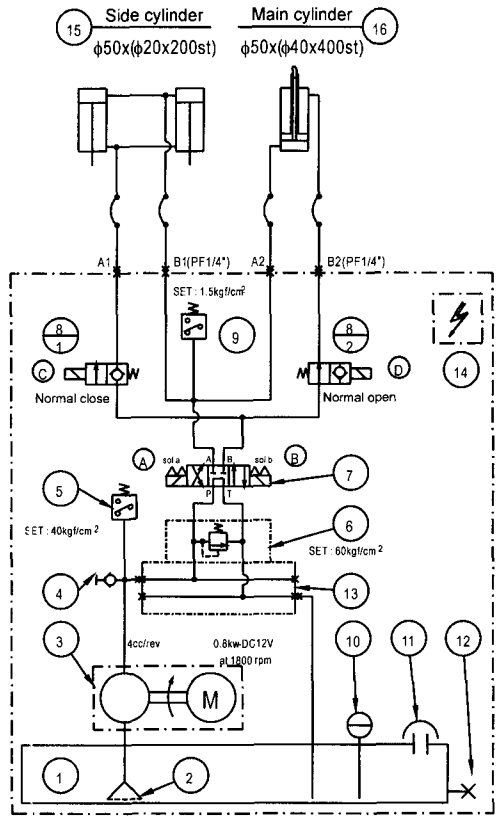


Fig. 2 Hydraulic circuit of FWD

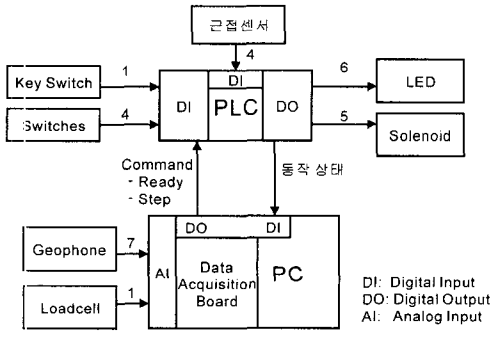


Fig. 3 Configuration of FWD control system

Table 3 Solenoid combination of operating modes

Mode	Coil Combination				
	A	B	C	D	M
Normal	X	X	X	X	OFF
Raise Weight (Lower Plate)	OFF	ON	OFF	X	ON
Drop (Lower Plate)	OFF	ON	ON	X	ON
Lower Catch	ON	OFF	ON	OFF	ON
Raise Plate	ON	OFF	ON	ON	ON

주) A, B, C, D : coils of solenoid valves
M : coil of the motor starting relay
X : do not care

Fig. 4 Developed FWD prototype

에 따라 이루어지게 된다. PLC와 PC는 디지털 I/O에 의해 서로 신호를 주고받으며, 근접센서에 의해 유압부의 동작을 감지하고, PC 내부의 Data Acquisition Board를 통하여 노면의 속도(geophone)와 그때 가해진 하중(load cell)을 측정한다.

Fig. 4는 본 연구에서 시제품으로 개발한 FWD의 모습을 나타낸다.

4. FWD의 S/W 구성

FWD를 이용한 시험 결과의 측정과 시험의 자동화를 위하여 PC를 이용한 데이터 측정 및 시험 장비를 구성하였다. 장비는 크게 FWD에 사용되는 각종 신호를 적절하게 처리하는 증폭기를 포함한 신호처리부와 이러한 신호를 PC에서 입출력할 수 있게 해주는 데이터 측정 보드 그리고 FWD 운영 프로그램이 실행되는 컴퓨터로 이루어진다.

데이터 측정과 PLC를 통한 시험에 필요한 신호는 PC를 기준으로 할 때 1개의 하중 센서와 7개의 속도 센서 신호인 아날로그 입력 신호, PLC에서 PC로 보내는 상태 신호와 FWD에 설치된 센서로부터

나오는 디지털 입력 신호, 그리고 PC에서 PLC로 명령을 주기 위한 디지털 출력 신호로 구성된다.

FWD 운영 프로그램은 FWD에 설치된 하중 신호 및 속도 신호를 측정하며, 사용자의 의도에 따라 시험을 수행하는 기능을 한다. 시험은 시험하기를 원하는 높이를 미리 정해놓고 자동으로 하는 방법과 수동으로 하는 방법을 선택할 수 있다.

Fig. 5는 FWD를 운영하기 위한 초기 화면으로, 수동/자동 동작 모드에 따라 관련된 항목의 활성화/비활성화 상태가 바뀐다. 수동 시험에서는 미리 정해진 1단, 2단, 3단, 4단의 높이에 해당되는 시험을 사용자가 시작과 멈춤 버튼을 조작함으로써 수행할 수 있다. 자동 시험에서는 미리 정해진 프로세스 즉, 각 단에서의 반복 회수를 입력하여 일련의 시험 과정을 한번에 수행하게 된다. 또한 현재의 시스템 동작 상태를 파악할 수 있도록 솔레노이드 밸브나 근접 스위치 센서의 작동 여부를 그래픽으로 표시하였다.

Fig. 6은 시험이 완료된 후의 결과를 바로 확인할 수 있도록 한 그래픽 출력 화면이다. 사용자의 편의성을 위해 하중 신호 및 속도 신호에 대한 최대값을 문자 형태로 표시하도록 하였다. 또한, 적분 알고리즘을 사용하여 속도 신호를 처짐량으로 변환하여 그래프로 나타내도록 하였다.

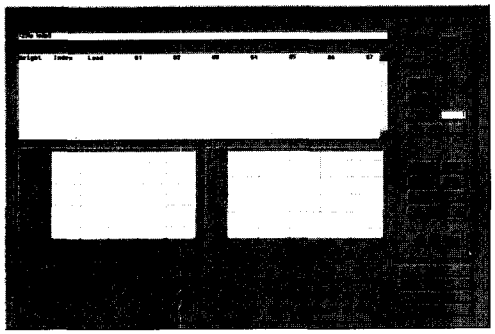


Fig. 5 Operating software of FWD

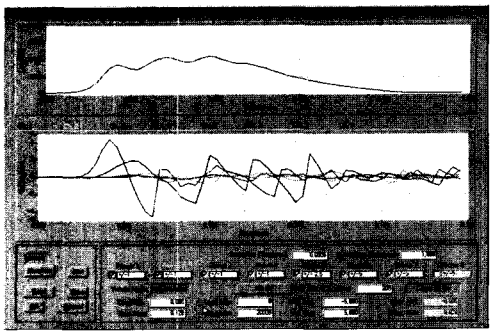


Fig. 6 Graphic output of FWD S/W

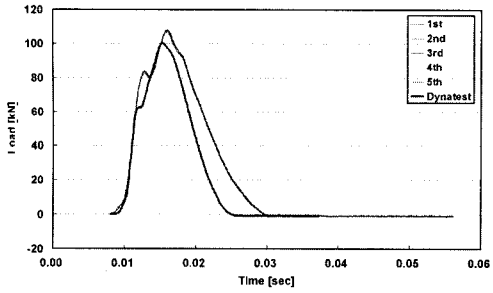
5. FWD 시제품의 성능 평가

5.1 시제품의 성능 튜닝 시험

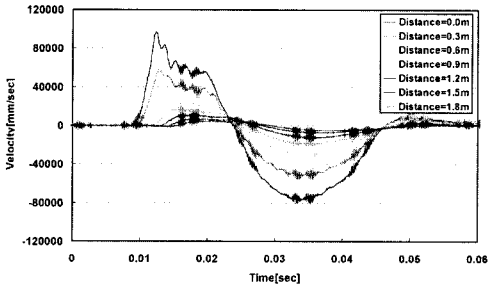
개발된 시제품이 현재 한국도로공사에서 운영하고 있는 Dynatest를 현장 대체할 수 있는 정도의 수준을 갖추도록 하기 위하여 유압재하장치의 단계별 낙하 높이의 튜닝작업을 실시했다. FWD는 유압재하장치의 낙하높이 설정을 정확히 해야만 한다. 그것은 설정된 각 단의 높이에 따라 도로포장 구조체에 자동으로 부가하는 하중 값이 결정되기 때문이다. 이와 같이 낙하 높이는 하중 값에 직접적으로 영향을 주는 것으로 여러 차례 튜닝 실험을 수행하여 정확한 4단계의 낙하 높이를 설정했다. 또한 로드셀 하중값과 속도계 값에 대한 데이터 수집 및 처리 과정의 정확성 검증을 위해 기존장비와의 비교 시험을 수행하였다.

Fig. 7(a)는 단계별 하중에서 제 3단의 높이에서 노면에 가해지는 하중을 로드셀로 측정한 결과를 나타낸다. 모두 5회에 걸쳐 반복 실험을 수행하였으며, 하중은 최대값이 약 108kN으로서, 약 20msec 동안 노면에 가해지는 것을 알 수 있다. 결과에서 peak 점이 2개가 발생하였는데, 이것은 하중판 구성의 조합형상과 노면과 접지되는 고무판의 탄성계수와 같은 물리적인 값이 영향을 미치는 것으로 판단되나, 이에 대한 추가적인 분석이 필요한 것으로 사료된다. 반복 실험 결과, 재하하중은 최대 peak 값의 경우 오차 0.5% 이내로 반복적으로 부가할 수 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 7(b)는 3단계 하중이 작용하였을 때 센서에 의해 측정된 속도값이며, Fig. 7(c)는 측정된 속도값을 사다리꼴 적분법을 사용하여 표면처짐량으로 계산한 결과를 보여준다. 측정 간격은 1msec 이며, 100Hz의 저주파통과 필터를 사용하였다.

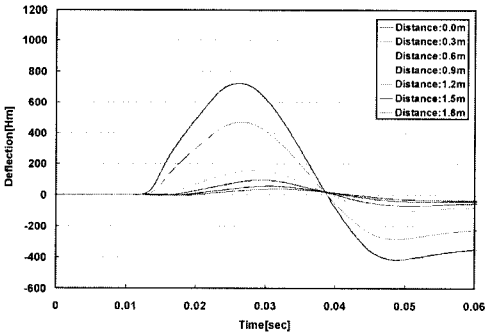
이렇게 계산된 하중 처짐량을 이용하면 도로 포장 구조체의 물성치를 파악할 수 있으며, 이 값으로부터 현재 지반의 상태를 판단하게 된다.[8,9]



(a) Load



(b) Velocity



(c) Deflection

Fig. 7 Experimental results of developed FWD

5.2 시제품의 현장 시험

선행된 시제품의 성능평가의 튜닝 실험 결과를 바탕으로 현장 적용성을 검증하기 위한 현장시험을 수행하였다.

시험현장은 한국도로공사의 협조로 영동고속도로구간의 덕평폐도에서 실시하였다. 이러한 현장시험을 통하여 시제품의 성능평가는 물론 성능실험에서 미처 발견하지 못한 보완사항과 시제품의 상용화를 위한 현실성을 타진하는 계기를 마련하는 것도 시험의 부가 목적이라 할 수 있다. 현장시험에서는 Fig. 8과 같이 본 연구를 통하여 개발된 FWD 시제품과 한국도로공사의 운용하고 있는 기존의 Dynatest FWD를 동시에 같은 장소에 현장 실험함으로서 성능의 비교검증을 하였다.

Fig. 8 Field test of developed FWD

개발된 시제품의 성능검증과 신뢰성 확보를 위해 상용 외국장비인 Dynatest의 FWD와 현장시험을 통하여 결과를 비교하였다. 이미 하중계 신호의 반복정밀도는 튜닝실험을 통하여 0.5% 이내로 우수한 안정성을 지닌 것을 입증한바 현장의 동일조건에서의 비교시험을 통하여 그 타당성을 검증하기 위한 것이다. 비교시험은 Fig. 8과 같이 동일한 장소에서 같은 단계의 하중 재하 높이에서 실시하였으며, 측정 결과로서 3단계의 경우(Fig. 7(a)) 하중 값은 Dynatest가 3단계의 범위(27~85kN)의 상한치를 넘어선 약 100kN, 개발된 시제품은 고정값 108kN 내외로 하중의 peak 치가 나타났다. 실험 결과로부터 개발된 시제품의 5회 반복시험 결과 재현성에 따른 반복정밀도는 매우 우수하며 1차, 2차 peak 값에 대한 형상 또한 상용 제품인 Dynatest와 유사한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

시제품 FWD의 하중 peak 값과 지속주기 형상(duration shape)이 10%정도 크게 나타난 것은 시제품 설계시 아스팔트, 콘크리트는 물론 나아가서 공항용 대형하중 1단계에 대한 시험을 수행할 수 있도

Table 4 Field test results

Load / 단계	Dynatest [kN]	시제품 [kN]
1단계(7~20)	32	40
2단계(16~50)	74	82
3단계(27~85)	100	108
4단계(40~120)	140	150

록 시제품의 단계 높이를 설정하였기 때문이며, 결과적으로 시제품의 각 단계의 하중재하 높이가 Dynatest 보다 약간씩 높게 설정되었다.

결론적으로 동일장소, 동일조건에서 상용 외국 장비와의 비교시험으로 시제품의 성능을 검증할 수 있었으며 결과는 매우 우수하며, 안정적인 성능을 보여주었다.

6. 결론 및 향후전망

본 논문에서는 트레일러 타입의 특장 샤시시스템을 기반으로 하는 FWD 시제품 개발에 대해 기술하였다. 유압식 하중재하장치와 측정장치가 탑재된 트레일러 샤시시스템의 H/W를 설계, 제작하였다. 또한, 측정 데이터의 수집 및 처리를 위한 S/W를 개발하였으며 사용자 편이성을 고려한 전 후처리기법을 도입하여 패키지화한 S/W 개발로 시제품의 활용도를 높였다. 개발된 시제품의 현장 시험 결과, 하중재현 반복성이 0.5%이내로 그 안정성이 입증되었으며 충분히 현장 투입이 가능함을 확인할 수 있었다.

그러나, 아직 센서 신호의 정밀성이나 시스템 신뢰도에 대한 연구가 미흡한 실정이며, 향후 상용화를 위해서는 내구성 및 신뢰도 검증을 통하여 제품의 완성도를 더욱 향상시켜야 할 것이다. 또한, 특장차량 타입의 개발 또는 대형 모델로의 확장성을 고려하는 등 독자모델 개발을 위한 연구가 필요하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 건설 교통부가 출연하고, 한국건설기술연구원에서 위탁시행한 99년도 건설기술연구개발사업의 일부로서, 본 연구를 위하여 지원해주신 관계 기관에 깊이 감사드립니다.

References

1) http://www.dynaflect.com
2) http://www.dynatest.com
3) http://www.erikuab.com
4) http://www.jilsfwd.com
5) T. G. Davise, M. S. Mamlouk, "Theoretical Response of Multilayer Pavement Systems to Dynamic Nondestructive Testing," TRR 1022, TRB, National Research Council, Washington D.C., pp.1-7, 1985.
6) S. I. Kim, J. S. Choi, Y. K. Lee, "A Study on the Evaluation of Layer Properties of Flexible Pavement with Respect to Dynamic Effects of Falling Weight Deflectometer I : Development Backanalysis Procedure," KSCE Journal, Vol. 18, No.III-5, pp.623-634, 1998.
7) H. S. Yoo, et al., Development of FWD for Construction and Maintenance of Road, Ministry of Construction and Transportation, 2001.
8) S. I. Kim, J. H. Yoo, "Evaluation of Layer Moduli of 4 Layered Flexible Pavement Structures Using FWD," KSCE Journal, Vol.10, No. 2, pp. 67-78, 1990.
9) S. I. Kim, J. S. Choi, Y. K. Lee, "Development of Optimum Backcalculation Procedure for Evaluation of Layer Properties of Asphalt Concrete Pavement from Deflection Basins of FWD," KSCE Journal, Vol.18, No.III-1, pp. 41-52, 1998.