

# 시험도로의 계측시스템과 계측결과자료 소개

**권순민** 한국도로공사 도로교통기술원 연구원  
**안성순** 한국도로공사 도로교통기술원 원장  
**정진훈** 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원  
**이재훈** 한국도로공사 도로교통기술원 연구원  
**배성호** 한국도로공사 도로교통기술원 연구원



[그림 2] 한국도로공사 시험도로



[그림 3] 시험도로 계측실

## 1. 머리말

한국도로공사의 시험도로는 1997년 계획을 시작하여 지난 2002년 12월에 건설을 완료하였고, 2003년 12월까지 모든 계측시스템을 구축하여 초기 시험운용을 완료하여 올해 3월 시험도로 정식 개통을 앞두고 있다. 이에, 본 기사에서는 한국도로공사 도로교통기술원에서 운영하고 있는 시험도로에 대하여 계측시스템과 초기 시험운용에서 나타난 각종 포장거동 관련 계측결과를 소개하고자 한다.

한국도로공사의 시험도로는 한국형 포장설계법 개발과 국내 포장기술력 증진을 위해 국내 최초로 공용 고속도로에 건설된 대규모의 포장관련 연구시설이다. 시험도로는 중부내륙고속도로 하행선 여주분기점으로부터 약 1km 이남에서 시작되는 편도 2차로 총연장 7.7km의 공용 고속도로로 건설되었으며, 포장의 두께와 재료를 달리하는 25개 단면의 콘크리트포장구간과 15개

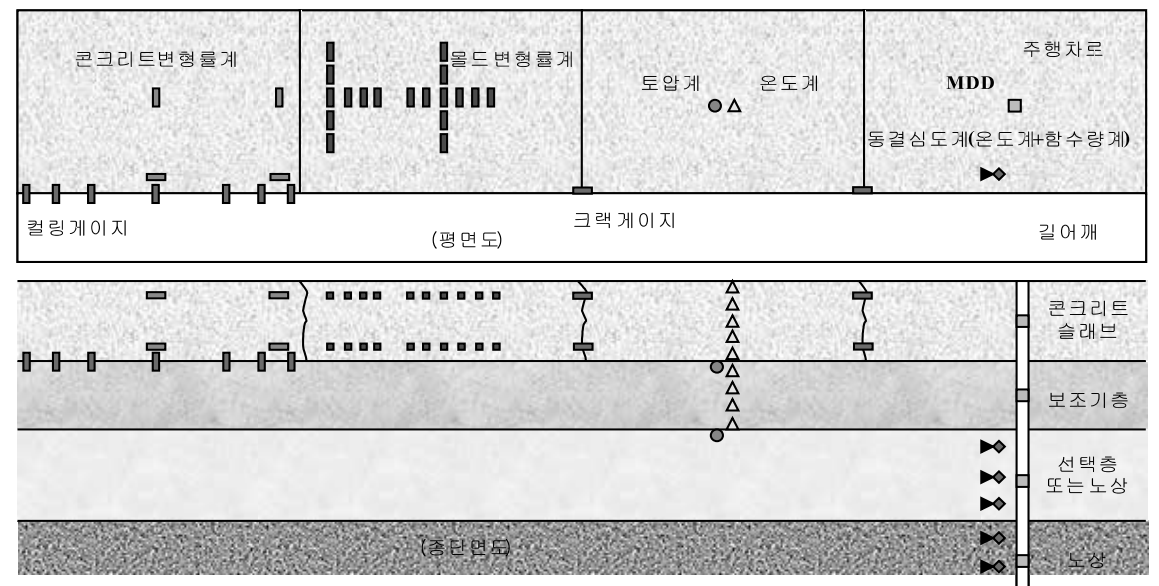


[그림 1] 시험도로 위치도

단면의 아스팔트포장구간으로 이루어져 있다. 콘크리트포장구간에는 린콘크리트 보조기층이 적용된 무근줄눈 콘크리트포장을 기본으로 하여 연속철근 콘크리트포장과 아스팔트 또는 쇠석 보조기층 등이 적용되었으며, 아스팔트포장에서는 표층 재료에 대하여 일반 밀입도 아스팔트, 개질 아스팔트, SMA, 기층 재료에 대하여 아스

<표 1> 시험도로 적용 계측기

계측기 포장	변형률계				토압계	다층 변위계	균열변위계		온도계	동결심도계	
	콘크리트	철근	아스팔트	몰드			컬링	줄눈		온도계	함수량계
콘크리트	636	48	36	132	34	4	51	120	140	30	30
아스팔트	-	-	374	-	66	6	-	-	112	39	39



[그림 4] 콘크리트포장구간 계측기 설치 매설도



[그림 5] 아스팔트포장구간 계측기 설치 매설도

팔트 기층과 쇄석 기층 등이 적용되었다. 시험도로에서는 다양한 목적에 맞추어 11종 약 1900여 개의 포장거동관측용 계측기들이 시공 중에 매설되었으며, 시험도로 주변의 기후변화 및 교통하중조건을 관측할 수 있는 장비가 구비되어있다. 또한 이를 통해 발생하는 방대한 양의 자료를 원하는 형태에 따라 효율적으로 관리하고 활용할 수 있도록 현장에 시험도로 계측실을 마련하고 다양한 계측시스템을 구축하였다.

## 2. 시험도로 계측시스템

시험도로의 계측시스템은 크게 자동계측시스템과 수동계측시스템, 상시계측시스템으로 나누어진다. 자동계측시스템은 일정한 시간 간격을 두고 꾸준한 데이터의 수집이 이루어지는 경우

에 적용되었다. 자동계측시스템에서는 환경변화에 따른 포장체의 온도변화 및 포장하부의 함수량변화를 측정하기 위한 온도계와 함수량계가 포함되어 있다. 수동계측시스템은 주로 동적데이터를 획득하는 것으로 교통하중 및 환경하중에 의한 포장체의 거동 데이터를 수집하는 것이다. 이러한 수동계측데이터의 경우 특정 시점에서 특정하중에 대한 포장의 거동을 계측하는 것이기 때문에 데이터획득시스템차량을 이용한 수동계측시스템으로 구성하였다. 여기에는 포장층의 변형률, 수직압 데이터 등을 계측할 수 있는 계측기들로 변형률계, 토압계, 균열변위계 등이 포함된다. 상시계측시스템은 시험도로의 포장에 가해지는 교통하중정보를 수집하기 위한 고속충중계시스템과 시험도로 주변의 기상상태를 관측할 수 있는 자동기상관측시스템으로 구성되어

있다.

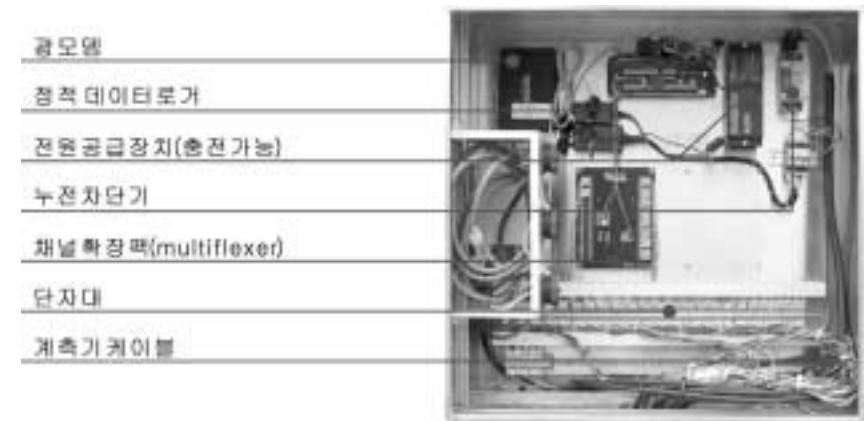
### 2.1 자동계측시스템

자동계측시스템은 시험도로 운영 기간동안 실시간으로 환경변화에 따른 포장체의 온도변화 및 포장하부의 함수량변화 데이터를 획득하여야 하므로 [그림 4]에서 보는 것과 같이 현장에 설치되어 있는 자동계측합체를 통해서 매설된 계측기와 계측서버를 광통신망으로 연결하였다. 자동계측합체는 시험도로 내에 총 15개 단면에 대하여 구성이 되어있으며, 합체 내부에는 정적 데이터로거와 광 모듈 등으로 이루어져있고 각 단면에 매설된 계측기 케이블들은 자동계측합체 내부에 고정된 단자대로 연결된다. 데이터로거의 채널 확장용 믹스(Multiflexer)가 단자대로부터 들어오는 계측 신호를 순차적으로 처리해 데이터로거로 연결된다. 데이터로거는 정해진 시간간격으로 각 계측값들을 확인하여 저장하고 이를 통신가능한 신호(RS232)로 변환하여

광모뎀을 통하여 현장 계측실 메인서버로 전송한다. 데이터로거는 충전전전지와 함께 설치되어 전원이 단락되어도 최대 1개월 가량 계측 및 데이터 보존이 가능하다. 전원이 회복된 뒤 언제든지 연결하여 저장된 데이터를 받아서 다시 시험도로 데이터베이스에 저장이 가능하다.

### 2.2 수동계측시스템

변형률계, 토압계, 균열변위계 등은 특정한 교통하중 또는 일정한 온도변화 패턴에 따른 계측기의 반응을 계측하기 위한 것이므로 시험도로의 일반 통행교통을 통제된 상태에서 특정한 하중을 재하하거나 일정 시간대에 대해 계측을 할 수 있는 수동계측방법을 채택하였다. 이를 위하여 수동계측시스템은 동적데이터로거로 구성된 데이터획득시스템 차량이 2조와 특정하중을 설정할 수 있는 하중재하시스템, 현장에 매설되어 있는 계측기와 데이터획득시스템을 연결할 수 있는 58개의 현장 수동계측합체, 일정시간대를



[그림 6] 자동계측합체



[그림 7] 수동함체 내부

연속으로 계측할 수 있는 정적데이터로거, 그리고 동적계측시 시험차량의 주행정보를 확인할 수 있는 동적계측 주행정보시스템 등으로 구성되어 있다.

수동계측시스템의 함체는 [그림 7]과 같이 매설된 계측기 케이블이 단자대를 거쳐 52핀으로 구성된 커넥터로 연결된다. 데이터획득시스템 차량의 내부에 장착된 데이터획득시스템은 동적 데이터로거와 전원공급장치, 허브, 커넥터, 노트북 등으로 구성되어 있으며 최대 48개의 계측기에 대하여 동시측정이 가능하다. 현장에서 계측된 데이터는 1차적으로 노트북에 저장되고 이는 계측실 메인 서버로 옮겨져 데이터베이스에 축적된다. 수동계측데이터는 계측관리프로그램을 통하여 사용자가 원하는 형태로 수집·가공할 수 있다.

시험도로에 매설된 변형률계나 토압계는 포장에 가해지는 특정하중에 반응하는 계측값이 의

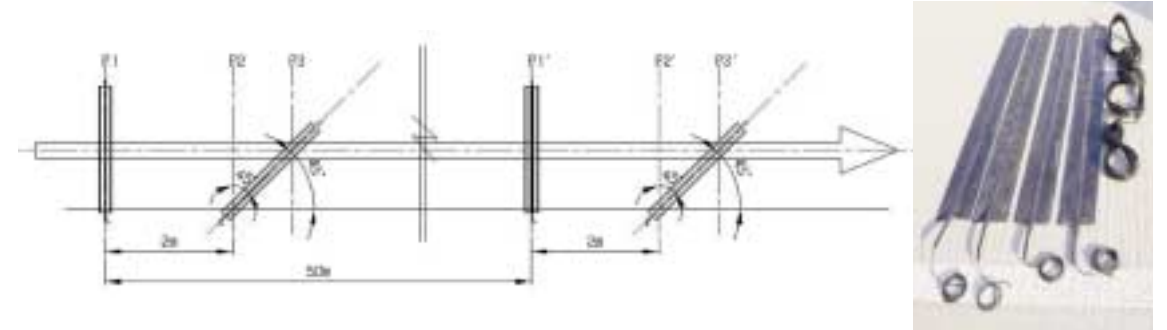


[그림 8] 데이터로거

미를 가지므로 계측시 분석용도에 따라 임의의 하중설정이 가능하여야 한다. 시험도로에서는 임의의 하중설정을 위하여 250kg 단위의 하중 재하판 80여장을 구비하여 다양한 차량하중을 설정할 수 있다. 또한 동적계측시 시험차량이 실제 포장체에 매설된 계측기에 어떠한 형태로 재



[그림 9] 데이터획득시스템



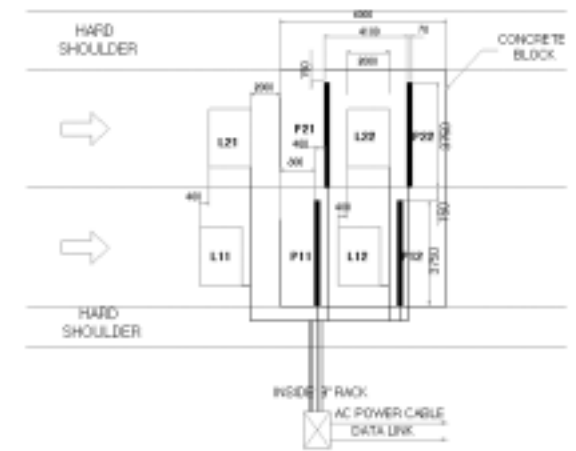
[그림 10] 이동형 원더링시스템

하되는지에 대한 정보를 확인하기 위한 동적계측 주행정보시스템을 구비하였다. 일반적으로 포장에서 이루어지는 동적계측에서는 하중재하를 위한 시험차량의 속도를 차량의 계기판을 이용하여 설정하고, 매립된 계측기의 위치정보를 노면에 표시하여 운전자가 노면표시를 육안으로 확인하여 주행하거나 외부에서 주행차량의 재하 위치를 유도하는 형태로 진행된다. 그러나, 이러한 방법을 이용하여 계측기의 반응을 획득하려면 시행착오를 통해 평균값 또는 최대값을 얻기 위하여 시험회수 및 시간이 많이 소모된다. 따라서, 시험도로에서는 시간 및 인력의 효율성을 높이기 위하여 [그림 10]과 같은 이동형 원더링시스템(portable wandering system)을 제작하였다. 이를 통하여 다양한 단면에 매설된 계측기의 동적계측시 재하되는 시험차량의 정확한 속도와 계측기로부터 실제 차량의 바

퀴가 재하된 위치의 정확한 이격거리를 수동계측시스템 내에서 자동으로 획득하여 시험차량의 주행정보를 계측값과 연동하여 데이터베이스화할 수 있도록 하였다.

### 2.3 상시계측시스템

상시계측시스템은 고속축중계와 기상관측시스템으로 구성되어 있다. 고속축중계는 시험도로를 통과한 정확한 누적통과교통량을 확인하기



[그림 11] 고속축중계 배치도



[그림 12] 기상관측장비

위하여 설치되었으며 11종의 차종구분, 차축중량, 전체중량, 통과속도, 축간격, 차량간격 등의 정보를 측정할 수 있다. 현재 설치된 고속축중계의 허용 통과속도는 200km까지이고 약 7%이내의 정확도로 축중량 및 전체중량의 측정이 가능하다. 시험도로의 특성상 계측과정에서는 교통량의 역주행이 가능하므로, 역주행시에도 축중계의 계측에 오차가 발생하지 않도록 프로그램을 작성하였다. 고속축중계는 [그림 11]에 보이는 것처럼 차선별로 4.1m 이격되어 설치된 두 줄의 축중기(P11, P12, P21, P22)와 전방 루프(L11, L21) 및 중간 루프(L12, L22)로 구성된다. 또한 주행선과 추월선 사이의 고속축중계 및 루프는 약 40cm 가량 이격되어 설치되었다.

시험도로에서 계측되는 대부분의 계측값들은 대기요소인 기온, 풍속 등의 영향을 받는다. 특히 여름철의 고온 및 겨울철의 저온은 포장체의 거

동에 큰 영향을 주기 때문에 기상을 관측하여 상호 연관성을 분석하고 계측값들에 대한 보정을 수행하는 것이 필요하다. 따라서 시험도로 계측실 옥상에 [그림 12]와 같이 자동기상관측기를 설치하여 포장체에 영향을 줄 수 있는 대표적인 기상인자 즉, 풍향/풍속, 온/습도, 강우량, 일사량을 측정하고 있다. 이와 함께 겨울철의 도로 결빙 상태를 파악할 수 있는 노면관측센서를 설치하여 기상상태에 따른 결빙예측을 시도하고 있다.

### 3. 시험도로 계측데이터

앞서 언급한 바와 같이 시험도로에는 콘크리트포장 단면 25개, 아스팔트포장 단면 15개가 시공되었으며, 여기에는 총 1900여 개의 계측기들이 매설되어있다. 본 기사에서 다루어지는 계측데이터들은 시험도로 정식개통을 앞두고 시행된 초기계측결과를 중심으로 동적하중 및 FWD 충격하중에 의해 측정된 수동계측 결과를 토대로 기술하였다. 다음의 <표 2>는 시험도로에서 진행되는 계측패턴을 나타낸 것이다.

#### 3.1 동적하중재하시험

동적하중재하시험은 하중재하판을 적재한 15톤 덤프트럭을 이용하여 수행되었다. 하중재하판은 가로 1829mm, 세로 914mm, 두께 19mm의 철판으로, 하중재하판 1개의 무게는 249kg이다. 운하중의 확인은 이동식 축중계를 이용하였으며, 하중재하트럭의 제원 및 정적하중재하에 사용된 운하중값은 [그림 13]과 같다. (단, 아스팔트구간의 경우 기준하중 2080kg 사용)

<표 2> 시험도로 계측 패턴

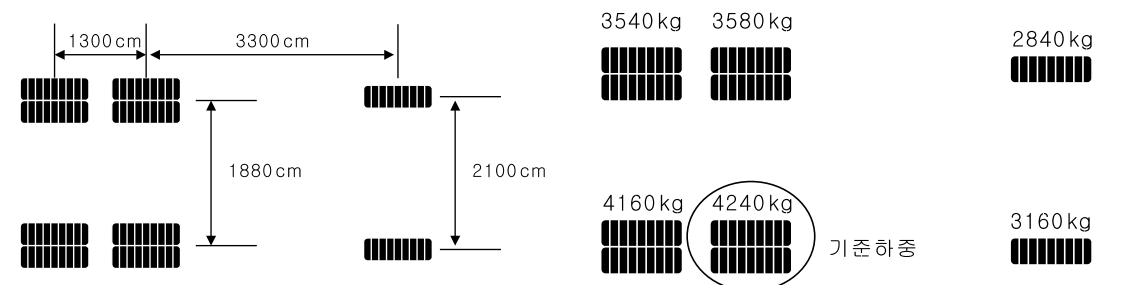
구분	계측기	계측방법	
자동계측	온도계, 함수량계	30분간격 상시계측	
수동계측	콘크리트포장구간	변형률계, 토압계	정적하중재하시험
			동적하중재하시험
			FWD충격하중재하시험
	아스팔트포장구간	변형률계, 토압계	온도변화에 따른 실시간계측
			하중재하시험
			동적하중재하시험
		FWD충격하중재하시험	

#### (1) 콘크리트포장구간의 동적하중재하시험

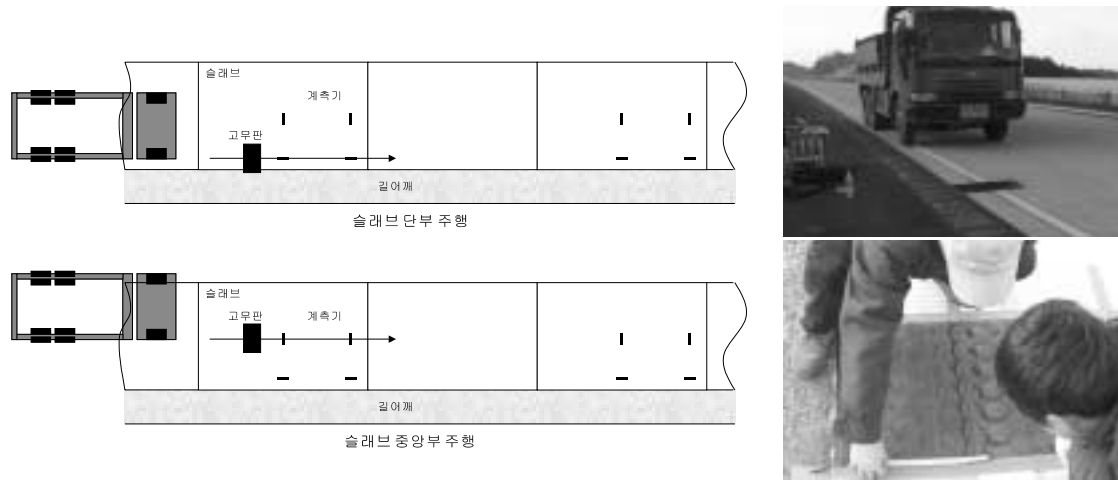
콘크리트포장구간의 동적하중재하시험에서는 본 시험에 들어가기 전에 계측기의 반응 및 시험 차량의 주행속도, 계측기 매설위치에 대한 실제 하중재하위치의 이격거리 정도 등에 관한 결정을 위하여 다양한 예비시험을 수행하였다. 시험 차량의 주행시 계측기 중심에서의 이격거리를 측정하기 위하여 계측기 매설위치 전·후에 고무판을 설치해 차량의 원더링(wandering)을 측

정하였고, 차량의 주행속도는 가속거리를 고려하여 50km/h로 결정하였다.

[그림 15]에서 보는 바와 같이 슬래브의 깊이별 변형률계의 반응을 살펴보면, 시속 50km/h의 속도로 재하하는 복륜 4.2ton에 대한 변형률계의 반응을 100Hz로 획득한 결과 콘크리트 슬래브 및 린 콘크리트 보조기층에 매설된 변형률계가 깊이별 발생하는 압축 및 인장응력에 매우 잘 반응하고 있음을 알 수 있다.



[그림 13] 하중재하트럭의 제원 및 운하중



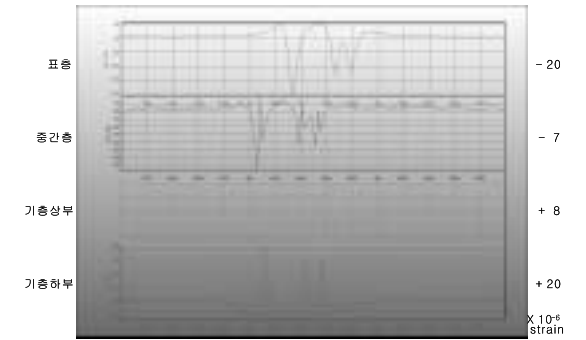
[그림 14] 콘크리트포장구간 동적하중재하시험

(2) 아스팔트포장구간의 동적하중재하시험

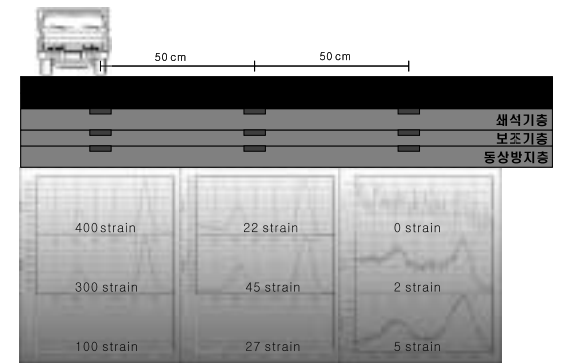
아스팔트포장구간에서는 아스팔트 변형률계와 토압계에 대하여 [그림 16]과 같은 방법으로 동적하중재하시험을 수행하였다. [그림 17(a)]는 아스팔트의 표층, 중간층, 기층 상하부에 매설된 변형률 계에 대하여 동적하중에 대한 변형률값을 획득한 결과이다. 결과에서 보는 바와 같이 계절적인 영향(11월 말경)으로 인하여 포장 내부의 온도가 낮아 크리프에 대한 영향은 미비

하였고, 깊이별 압축-인장변형률의 관계도 뚜렷이 나타났다. [그림 17(b)]는 쇄석기층, 보조기층, 동상방지층의 각 상부에 매설된 토압계에서 동적하중에 대한 수직압력 분포를 나타내고 있는 것이다. 토압계는 깊이별 3개가 1조로 구성되어 하중이 재하되는 지점 및 횡방향으로 50cm, 100cm 이격된 거리에 각각 1조씩 구성하여 매설되어있다. 하중이 재하된 지점의 토압계들은 깊이방향으로 쇄석기층-보조기층-동상방지층

의 순서대로 압력의 분포가 명확히 나타나고 있으며 50cm 이격거리에서는 보조기층-동상방지층-쇄석기층, 100cm 이격거리에서는 동상방지층-보조기층-쇄석기층으로 반응값의 크기는 적으나 완전한 역순으로 나타났다. 이는 노면에 전달된 바퀴하중이 깊이방향으로 일정한 영향권 안에서 전달됨을 유추할 수 있으며, 시험도로 정식개통 이후 정기계측시 하중크기별, 하중재하위치(오프셋 적용)별로 다양한 계측을 통하여 아스팔트포장에서 깊이별 하중분포도를 상세히 분석할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, [그림 18]은 표층에 매설된 아스팔트 변형률계의 반응값을 보여준다. 시험차량의 하중은 휠패스쪽에 매설된 ASG104 위로 진행하였으며, 50cm 간격으로 도로 중앙부쪽으로 ASG105와 ASG106이 매설되어 있다. 특이한 점은, 하중이 직접 재하된 ASG104에서는 압축응력이 발생하며 일정간격 이격된 ASG105와 ASG106에서는 인장응력이 발생하였다. 이는 top-down 균열의 발생 가능성을 보여주는 것으로 사료되며 향후 추가적인 계측을 수행하여 이에 대한 명확한 분석을 실시할 예정이다.

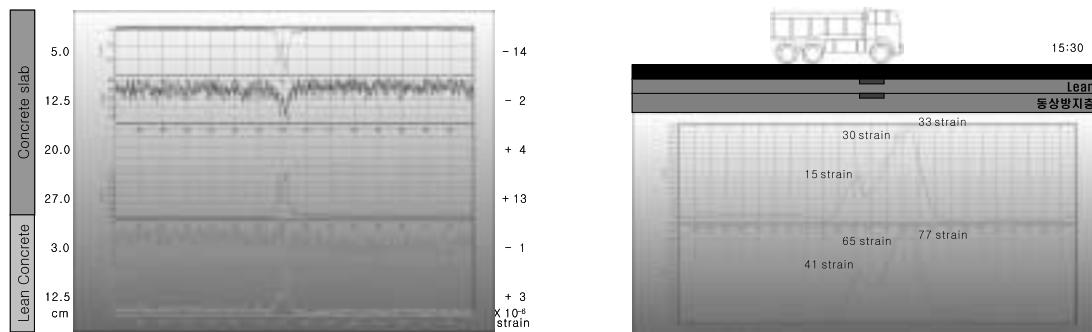


(a) 변형률계

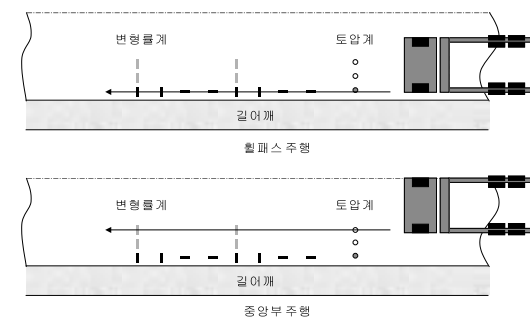


(b) 토압계

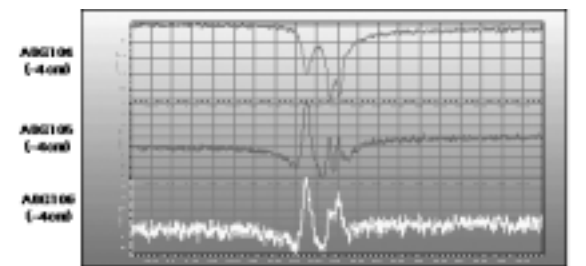
[그림 17] 콘크리트포장구간 동적계측 시험 결과



[그림 15] 콘크리트포장구간 동적계측 시험결과



[그림 16] 아스팔트포장구간 동적하중재하시험

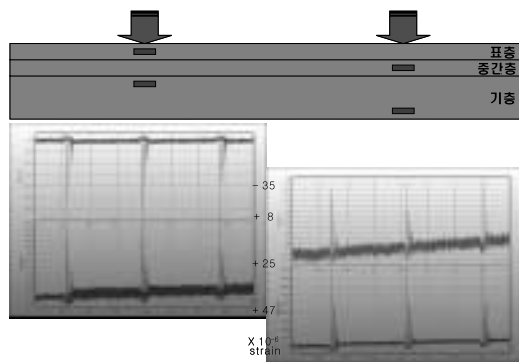


[그림 18] 아스팔트 표층에 매설된 변형률계의 동적계측 시험 결과

### 3.2. FWD 충격하중재하시험

#### (1) 콘크리트포장구간의 FWD 충격하중재하시험

콘크리트포장 구간에는 각 슬래브당 4개의 지점에 변형률계가 매설되어 있다. 그 지점은 각각 슬래브의 중앙과 줄눈쪽 단부, 길어깨쪽 단부, 모서리이다. FWD 충격하중재하시험은 각 슬래브의 4개 위치와 슬래브 중앙에 매설된 토압계 위치에서 수행되었으며, 계측데이터는 센서 위치의 깊이 방향에 매설된 각층의 변형률계 데이터를 모두 수집하였다. 하중의 크기는 콘크리트 슬래브의 강성을 고려하여 3단계(약 18000lb)로 설정하였다. FWD 충격하중에 대한 변형률계의 반응 역시 동적하중재하시험과 유사한 결과를 나타내었다([그림 19]참조). FWD 충격하중에 대한 변형률계의 반응값은 500Hz로 획득하였다. 50km/h의 동적하중에 의해 변형률계가 대응하는 시간은 0.3초 정도인데 비해서 FWD의 충격하중의 반응시간은 0.04초로 매우 짧기 때문에 계측기의 최대 변형시점을 정확히 획득하기 위해서 주파수 빈도를 높였다.



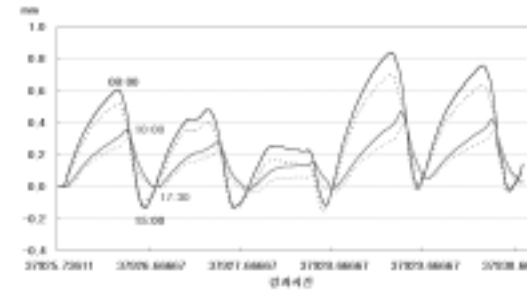
[그림 20] 아스팔트포장구간에서의 FWD 시험 결과

#### (2) 아스팔트포장구간의 FWD 충격하중재하시험

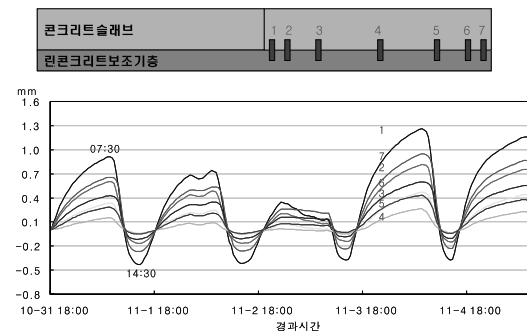
아스팔트포장 구간의 FWD 충격하중재하시험은 포장층의 강성을 고려하여 콘크리트포장에서 사용한 것보다 적은 1, 2단계 하중(12000lb, 15000lb)을 사용하였으며, 각 단계마다 3회씩 반복하여 하중을 재하하였다. [그림 20]은 FWD 충격하중에 대한 아스팔트 변형률계의 깊이별 반응값을 획득한 것이다. 계절적인 영향(11월 말경)으로 인하여 아스팔트포장의 내부온도가 낮아 크리프의 영향을 그리 크게 받지 않았다. [그림 20]에서와 같이 총 3회 반복된 재하시험기간 동안 약  $1 \times 10^{-6}$  strain 가량 크리프에 대한 영향을 받았으나 각 충격하중에 대한 상대적 변위량이 3회에 대하여 거의 동일하게 나타날 정도로 반응은 매우 우수하였다.

### 3.3 환경하중재하시험

환경하중재하시험은 교통하중을 재하하지 않은 상태에서 포장체의 거동을 측정하는 것으로 콘크리트포장의 균열변위계를 이용한 슬래브의 컬링 거동과 줄눈 거동을 계측한 것이다. 줄눈부에 설치된 줄눈변위계와 길어깨쪽 단부에 설치된 컬링변위계에 대하여 7일 가량의 연속적인 계측을 실시하였으며, 그 결과는 다음의 [그림 21]과 [그림 22]와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 온도패턴에 대하여 명확한 거동을 나타낼 수 있다. 줄눈변위계는 줄눈의 상부와 하부 각각 길어깨측과 측대측에 거치하였으며 상부와 하부의 거동에 대한 실제 계측결과에서도 최대 벌어짐과 닫힘 시각이 슬래브의 깊이별 온도변



[그림 21] 줄눈변위계 계측 변화



[그림 22] 컬링변위계 계측 변화

화와 상관관계를 유지하며 나타났다. 즉, 하부의 꼭지점이 상부의 꼭지점에 비하여 2 내지 2.5시간 늦게 발생되었는데 이는 포장체 내부로의 열 전달 속도차에 의한 최대온도시각의 차이와 유사한 것으로 나타났다.

컬링변위계는 슬래브 길어깨쪽 단부에 하나의 슬래브 전체 길이에 대하여 7개의 계측기를 린 콘크리트 보조기층 상부와 슬래브 하부를 연결하여 거치하여 린콘크리트 보조기층에 대한 슬래브의 상대수직변위를 측정할 수 있도록 하였다. 컬링변위계의 변위량을 살펴보면, 줄눈부에

가까울수록 (1, 7번 계측기) 중앙부보다(4번 계측기) 변위량이 높아지는 것으로 나타났다.

## 4. 결론

지금까지 한국도로공사 시험도로의 건설이후에 진행된 각종 계측시스템 구축현황과 그 결과로 생성된 포장거동 관련 계측 데이터에 대하여 간략히 기술하였다. 시험도로는 2003년 3월에 정식 개통이 이루어질 예정이며 개통 이후에는 중부내륙고속도로 하행선을 이용하는 모든 일반교통이 시험도로를 주행하게 될 것이다. 현재 시험도로에서는 지난해 3월 이후로 자동계측시스템을 통하여 시험도로 포장체 및 포장하부의 온도 및 함수량변화에 대한 데이터가 30~60분 간격으로 획득이 되어 축적되고 있으며 이는 개통 이후에도 여전히 운용된다. 또한 개통 이후에는 교통조건 및 기상조건을 고려하여 매년 4회 이상의 정기계측을 실시하여 본 기사에서 기술한 부류의 수동계측을 실시할 것이다. 시험도로에는 향후 생성될 다양하고 방대한 양의 데이터를 효율적으로 관리하고 연구자의 필요에 따라 여러 형태로 조회 및 가공할 수 있도록 데이터베이스를 구축하였다. 이렇게 구축된 데이터베이스를 활용하여 현재 건설교통부 국책과제로 진행되고 있는 "한국형 포장 설계법 개발"에 필요한 각종 모형검증을 수행할 수 있을 것이며, 국내 도로포장 연구분야에 다양한 형태로 활용되어 새로운 연구성과가 창출될 것으로 기대하고 있다.