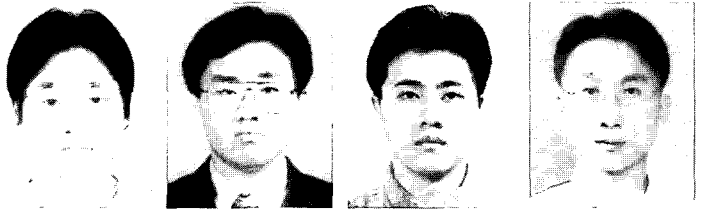


시험도로 계측 결과 유효성 검증 및 분류 방안 정립



이 동 현 | 정회원 · (주)토탈페이브시스템 과장
 김 지 원 | 정회원 · (주)토탈페이브시스템 대표이사
 권 순 민 | 정회원 · 한국도로공사 연구원
 이 재 훈 | 정회원 · 한국도로공사 연구원

1. 서론

시험도로와 같은 연구시설의 건설과 운영은 상당한 규모의 예산을 필요로 하는 사업으로서 미국 이외의 나라에서는 시도된 바가 없다. 시험도로는 실제 현장의 기후 및 교통량 조건을 반영하는 고가의 연구시설인 만큼, 여기서 얻어진 실험 결과들은 실제 상황에 가장 부합하는 결과라 할 수 있다. 향후 포장 분야의 연구 개발에 기여할 수 있도록 앞으로 두 번 다시 수행하기 어려운 시험도로와 같은 연구 시설을 최대한 활용하여야 한다. 그러기 위해서는 초기 계측 결과에 대한 유효성을 검증하는 작업은 상당히 중요하다.

일반적으로 계측 결과는 잡음이 섞인 아날로그 파형과 유사한 형태를 가지고 있다. 이를 의미 있는 결과로 만들어 내기 위해서는 아날로그 파형 중에서 중요 지점을 확인하고, 여기서 최대값 및 최소값을 파악하는 과정이 선행되어야 한다. 또한 계측기의 특성상 극성이 바뀐 파형이나 노이즈가 크게 발생하거나 신뢰도가 크게 낮은 계측기가 포함되어 있어 이들을 반드시 걸러내야 신뢰도 높은 통계 값을 얻을 수 있

다. 따라서 정리된 결과들의 상호 비교를 통해 동일한 조건에서 다른 반응을 보인 계측 결과들을 구분하여 통계적인 신뢰도를 높이는 작업이 필요하다. 시험도로에 적용된 계측기의 종류는 아스팔트 6종, 콘크리트 11종으로 다양하다. 여기서는 이들 중에서도 콘크리트와 아스팔트 변형률계의 계측 결과를 위주로 논하고자 한다. 다양한 계측 결과들을 먼저 비교하여 이 중에서 유효한 계측 결과를 파악하는 작업을 먼저 수행하였고, 신뢰도를 높이기 위해 필터링 주파수 수준을 결정하였다. 또한 문제가 있는 계측기를 선별하여 각 계측기의 상태를 점검하였다.

시험도로의 경우에는 각각 다른 포장층의 두께, 다른 재료 등이 적용된 단면이 다양하게 존재하므로 유효한 계측 결과들을 적절히 활용할 경우 구조해석 기법의 검증에 충분히 적용될 수 있다. 계측 결과와 구조해석 결과상에 연관성이 입증된다면 다양한 단면 구성에 대해 구조해석상으로 검증할 수 있기 때문이다. 그러나, 이를 위해서는 다양한 하중 재하 계측 결과들에서 유효한 계측 결과를 구분해 내고, 이를 해석 결과와 비교하는 등 상당한 노력이 필요하다.

2. 시험도로 계측 결과 검증 및 체계화

2.1 시험도로 계측 결과 구분

시험도로의 계측 결과는 다양한 방법으로 구분된다. 먼저 계측 시기에 따라서는 시험도로의 완성 직후부터 실시한 초기계측과 교통 개방 이후에 실시한 정기계측이 있다. 계측 방법에 따라서는 온도계 함수량계 등에서 나오는 기후 변화를 정적 데이터로거와 광통신망으로 계측하는 자동계측, 하중 재하 시험을 수행하며 포장체의 거동 변화를 측정하는 수동계측, WIM과 기상관측기의 자료를 24시간 측정하는 상시계측으로 구분할 수 있다. 자동 및 상시계측의 경우에는 계측 관리 프로그램 및 자체 데이터베이스가 있어 한국도로공사 시험도로 운영센터에서 자체적으로 데이터의 유효성 판단과 검증을 이미 완료한 상황이다. 그러므로, 수동 계측에 초점을 맞춰서 계측 결과를 정리하고 유효성을 검증한다. 수동계측의 경우에도 하중을 어떤 방법으로 재하하느냐에 따라서 구분이 가능하다.

콘크리트포장의 경우 트럭 하중을 정지시킨 상태에서 계측하는 정적계측과, 트럭 하중이 이동하는 상태에서 계측하는 동적계측, FWD(Falling Weight Deflectometer)를 사용하는 동적하중 계측, 콘크리트 포장의 줄눈 거동 및 커링 변화를 측정할 수 있는 변위계 계측의 4가지로 구분이 가능하다. 이외에도 24시간 동안 포장체의 변화를 관찰하는 24시간 계측 등 다양한 구분이 존재한다. 아스팔트포장은 변형률계와 토압계만이 존재하며, 크리프 현상 때문에 정적계측을 제외한 동적계측, FWD 계측이 주로 이루어진다.

2.2 시험도로 계측 결과의 분류 방법

시험도로에는 수동계측이 필요한 단면이 콘크리트포장이 22개소, 아스팔트포장이 33개소 등 총 55개소 지점이며, 해당하는 계측기의 총 수량은 1,507개

에 달한다. 모든 계측은 동일 지점에서 동일 항목이 3회 이상 측정되므로 초기계측 또는 정기계측 1회에서 양산되는 계측 결과의 양은 방대하다. 수동계측 결과는 대부분 48개 또는 32개의 채널을 가지는 넷포드 (Netpod) 동적 데이터로거를 통하여 측정된다. 그러므로 별도의 추가작업이 없을 경우 각 단면 별로 측정된 파일은 48개 또는 32개 채널의 계측 결과를 동시에 지니고 있다. 그러나 대부분의 경우 48개 또는 32개 채널 중에서 일부만 상호 연관성이 있는 계측 결과들로서 한 번에 모든 계측 결과를 볼 필요가 없다. 그러므로 계측 결과를 정리하는 과정에서는 상호 연관성이 있고 필요한 일부 채널의 계측 결과만을 발췌하여 분류하는 것이 바람직하다.

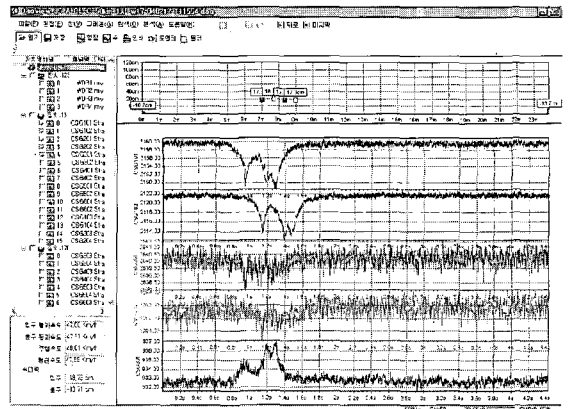


그림 1. 계측프로그램 (0~4번 채널)

그림 1의 화면은 현재 시험도로 계측에서 활용되는 계측 결과 확인 프로그램(DaqView)이다. 좌측 상부에 각 채널별 계측기 고유번호, 좌측 하부에 계측기 설치 지점에서 트럭의 통과 위치 및 진입 속도, 우측 상부에 트럭 통과위치 계측 결과, 우측 하부에 각 채널별 계측 결과 등 다양한 계측 관련 정보를 한 화면에서 보여주고 있다. 계측 결과는 48개 채널 중 0번부터 4번까지 5채널에서 읽어 들여진 계측 결과를 동시에 나타낸 것이다. 각 채널별 계측 결과를 보면 세 번째, 네 번째 계측 결과는 노이즈가 크게 발생한 것으로 판단된다. 이와 같이 각 계측값별로 다른 신뢰성을 가지고 있어 이에 따른 체계적 분류가 필요

하다. 여기서 제시된 시험도로 계측 결과 분류 기준은 향후에 한국형 포장설계법 개발 연구진 및 기타 시험도로의 계측 결과를 필요로 하는 연구진에게 보급될 예정이다.

변형률계 계측 결과의 분석에서 가장 중요한 값은 각 재하 실험에서 얻어진 변형률계의 인장 및 압축방향 최대값이다. 그러나 현재 사용하는 수동계측 관리 프로그램 상에서는 그림 1에서 보는 바와 같이 실제 하중이 통과하는 이전과 이후에 대한 모든 변형률 값들이 100이나 500Hz의 샘플링 빈도(동적 데이터로 거에서 초당 읽어들이는 계측값의 개수)로 나타나고 있다. 이들 값은 계측 과정에서 발생하는 특정 주파수대의 노이즈도 포함되어있다. 노이즈를 줄이는 방안으로 이를 프로그램 상에서 자동으로 구분하고 유효한 계측 결과만을 추출할 수 있도록 분석 모듈을 개발하는 것도 한 방안이 될 수 있겠지만, 이는 각 실험 특성에 따라 데이터의 유형이나 오차 대역이 상이하기 때문에 실제와 동떨어진 계측 결과를 추출할 수 있는 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 보다 신뢰성 있는 계측 결과를 얻기 위해 시험도로의 정보를 숙지하고 있는 숙련된 인력이 직접 프로그램을 사용하며 계측 결과의 신뢰도를 판단하며 프로그램의 다양한 기능을 이용하여 계측 결과의 최대값을 추출하는 방식이 합리적이다.

이를 위해서는 기본적으로 정적하중재하시험, 동적하중재하시험, FWD재하시험 등 하중별로 자료를 분류하며, 포장 형식에 따라 콘크리트포장과 아스팔트포장으로 구분하여 정리한다. 각 변형률 계측 결과의 최대값은 각 계측기 설치 위치에서 깊이 순서에 따라 저장하고 하중재하 위치와 시험 수행 당시의 온

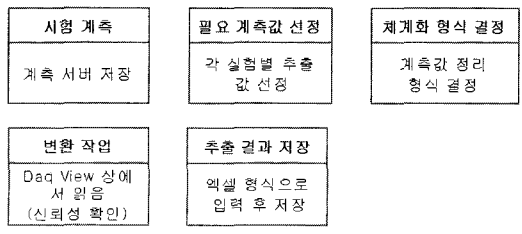


그림 2. 계측 결과 체계화 흐름도

도, 시험 시간 등의 부수적인 데이터도 포함된다. 모든 변형률의 단위는 $\mu\epsilon$ (Micro-strain, 10^{-6})으로 통일하며, 샘플링 빈도는 500Hz를 기본으로 한다. 또한 추후에 다루어질 필터링을 수행할 경우에는 수행 후의 값을 적용하는 것을 원칙으로 한다. 계측 결과의 체계화는 다음과 같이 이루어지며, 체계화 후 최종 파일 저장 형태는 활용도가 높은 엑셀 파일로 하였다.

3. 필터링 분석

DaqView 프로그램은 후리어 변환(Fourier transform)을 이용하여 노이즈가 발생하는 특정 대역의 주파수를 감쇄시켜 노이즈를 걸러주는 필터 기능을 가지고 있다. 이를 이용하면 계측 결과에 포함된 노이즈를 제거하여 변형률계 계측 결과에서 노이즈에 의하여 발생하는 오차를 감소시킬 수 있다. 노이즈의 발생 원인은 시험도로 주변에서 형성되는 전기장 및 자기장과 계측기 및 데이터로거 사이에서 흐르는 전류의 불안정 등 다양하게 추정된다. 대부분의 노이즈는 일정한 주파수를 형성하고 있으며, 계측 결과 주파수와는 다른 영역에 있기 때문에 노이즈의 차단이 가능하다. 다음 그림 3은 계측 결과와 노이즈가 발생하는 주파수 대역을 구분하기 위한 주파수 분석 예이다. 그러나 일률적으로 차단 주파수를 결정할 경우 각 측정 방식에 따라 문제가 발생되기 때문에, 다양한 계측 결과에 적용한 뒤 계측 사례별로 구분되는 차단 주파수를 설정할 필요가 있다. 그림 3에서는 왼쪽에 보이는 저주파영역의 주파수 강도(Amplitude)가 하중에 의한 변형률의 실질적인 변화 부분이고 오

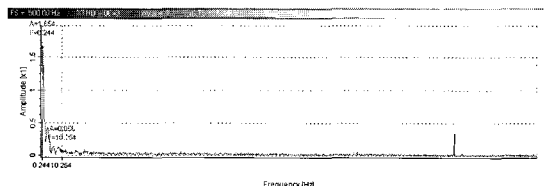


그림 3. 주파수 분석

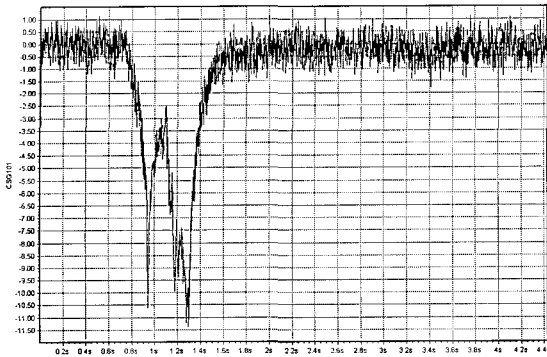


그림 4. 필터링 이전

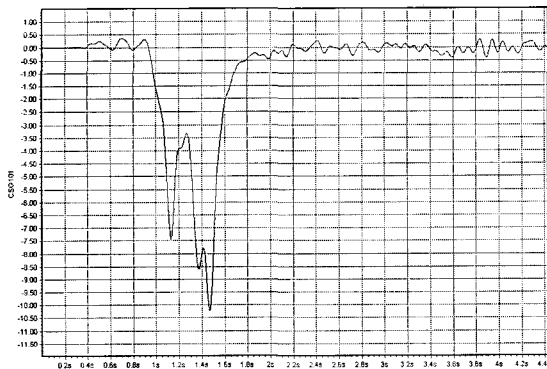


그림 5. 필터링 이후(10Hz)

른쪽에 보이는 약한 주파수 강도의 변화들은 모두 다양한 원인의 노이즈로 인한 변화이다. 차단 주파수를 그림에 나타나는 점선과 같이 변형률의 실질적인 변화 부분 이후로 설정할 경우 점선 오른쪽의 고주파 영역의 노이즈들은 모두 제거된다.

그림 4와 그림 5는 콘크리트 구간의 표면에서 5cm 깊이 지점에 위치한 변형률계에서 얻어진 동적 하중재하시험 계측 결과를 필터링한 사례이다. 그림에서 가장 왼쪽부분은 첫 파형이 트럭의 전륜이 지날 때 나타나는 파형이고 이어서 중륜과 후륜에 대한 파형이 나타난다. 10Hz 이상 주파수 영역을 차단하기 위해 차단 주파수를 10Hz로 설정하고 감쇄비는 60dB(차단된 주파수가 감쇄되는 비율로 60dB가 가장 적정함)로 결정하였다. 원본 데이터에 비해 최대 변화값이 0.50~3.00 μE 감소하였으며 하중이 재하

되지 않은 부분 데이터의 변화폭이 -1.00~1.00 μE 에서 -0.30~0.30 μE 으로 감소하였다. 따라서 일정 수준의 노이즈 감쇄 효과를 나타냈다고 판단할 수 있으나, 전륜과 중륜에 대한 최대 변형률 값이 재하되지 않은 부분 변화폭에 비해 과다하게 감소하여 적용하기에는 무리가 있다.

그림 6부터 그림 9까지는 아스팔트 구간의 FWD 시험 계측 결과를 필터링한 예이다. 이는 보는 바와 같이 6회에 걸쳐 실험한 결과이다. 감쇄비는 동일하게 60dB로 결정하고 차단 주파수를 20~80Hz로 변화시키며 필터링 이후의 변화를 관찰하였다. 차단 주파수가 20Hz일 경우 101번 변형률 값(그림 7의 상단 그래프)은 원본 데이터에 비해 최대 변형률값

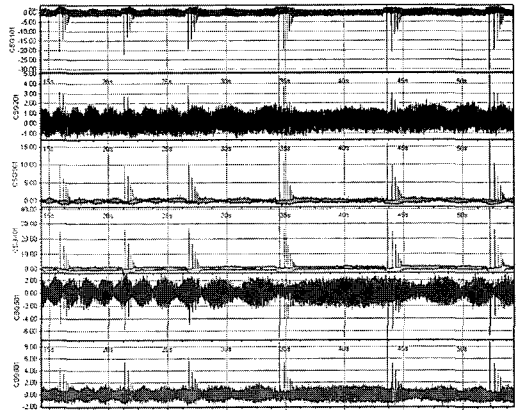


그림 6. 필터링 이전

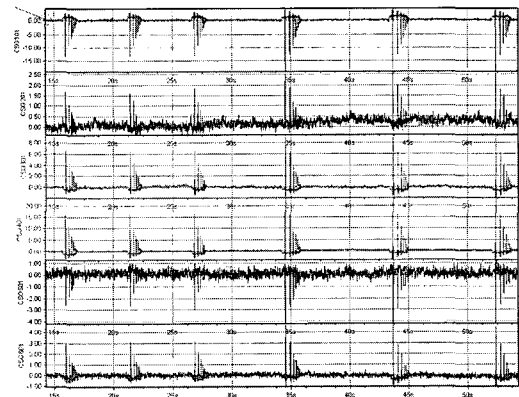


그림 7. 20Hz 필터링 이후

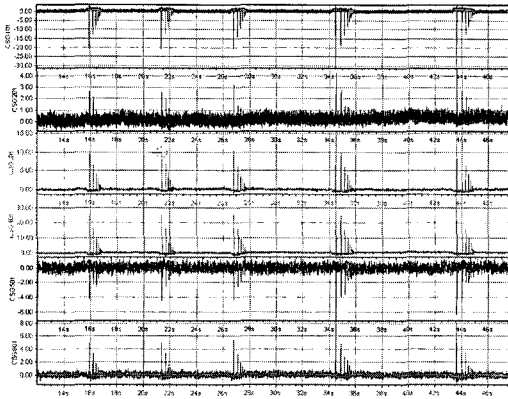


그림 8. 50Hz 필터링 이후

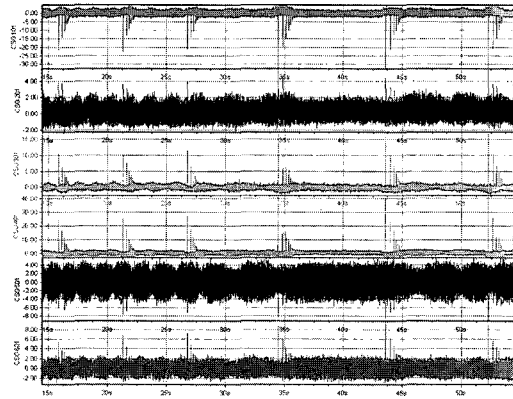


그림 9. 80Hz 필터링 이후

(절대값)이 $10.00\mu\text{E}$ 이상 감소하여 하중이 재하되지 않은 부분 데이터의 변화폭 $-3.00\sim 3.00\mu\text{E}$ 보다 높았다. 이는 필터링에 의해 노이즈 이외에 실제 최대 변형률 계측값도 영향을 받은 것으로 사료된다. 그러나 차단 주파수가 50Hz일 경우 101번 변형률값은 원본 데이터에 비해 최대 변형률 값이 $2.00\sim 3.00\mu\text{E}$ 정도 감소하여 하중이 재하되지 않은 부분 데이터의 변화폭 $-3.00\sim 3.00\mu\text{E}$ 보다 낮아 필터링 후 실제 값이 영향을 받지 않은 범위에서 노이즈가 감소된 것을 알 수 있다. 또한 차단 주파수가 80Hz일 경우 201번과 501번 변형률값은 필터링 이전 값과 차이에 거의 없어 필터링이 무의미하게 된다. 따라서 여기서 최적 필터링 차단 주파수는 50Hz로 판단할 수 있다.

이와 같이 각 시험 항목별로 축척된 계측결과를 토

대로 차단 주파수를 5~10Hz 단위로 변화시켜 가장 이상적인 차단 주파수를 찾아내고 이를 계측 결과 정리과정에서 적용했다. 시험 항목에 따라 차단 주파수를 5~150Hz까지 설정하였고, 표 1은 각 계측 항목별로 적용할 수 있는 차단 주파수이다. 단, 차단 주파수는 샘플링 빈도가 500Hz로 계측된 값들을 대상으로 설정되어 100Hz의 샘플링 빈도로 계측된 결과에 적용하기는 무리가 있다.

표 1. 각 계측 항목 별로 적용 가능한 차단 주파수 사례

계측 항목	차단 주파수
아스팔트 동적	140 Hz
콘크리트 동적	40 Hz
콘크리트 정적	20 Hz
콘크리트 FWD	50 Hz
아스팔트 FWD	50 Hz

4. 시험도로 변형률계 계측 결과 분석

계측 결과 분석을 통하여 시험도로 포장단면에 계측기 설치 이후에 발생한 변형률계의 생존 여부 변화 및 계측기의 신뢰도를 분석하였다. 이를 위하여 2차레에 걸친 초기계측 및 정기계측 결과에서 얻어진 변형률계 계측 결과 값을 분석하였다. 한 가지 특이한 사실은 노이즈가 많이 발생하는 변형률계들은 계측 시기에 따라서 노이즈 발생 정도가 달라 계측 결과의 신뢰도를 명확히 판단할 수 없는 경우도 있어 지속적인 관찰이 필요한 점이다. 또한, 계측기 자체는 생존해 있지만, 계측관리 프로그램상의 오류로 인하여 신뢰도가 저하된 것으로 판단된 계측기도 있었다.

4.1 변형률계 계측 결과를 토대로 구분한 신뢰도 판단 기준

변형률계 계측 결과를 전반적으로 검토한 뒤에 변

형률계의 신뢰도를 판단하고 오류가 있는 계측기들을 구분하기 위하여 표 2와 같이 신호 없음, 신호 이상, 극성 바뀜, 단자 바뀜, 노이즈 많음, 관리프로그램 오류의 6가지로 판정 기준을 구분하였다.

신호 없음의 경우에는 배선의 접속 상태는 정상임에도 불구하고 계측 신호가 전혀 나타나지 않는 경우로, 계측기 망실로 간주할 수 있는 현상이다. 신호 이상의 경우는 신호는 데이터로거에서 읽어지고 있지만, 그림 10의 네번째 채널(최하단)과 같이 노이즈가 너무 커서 계측 신호가 전혀 구분이 가지 않는 경우 또는 두 번째 채널과 같이 전혀 의도되지 않는 파형이 계측되는 경우이다. 이와 같은 사례는 망실은 아니지만 계측기의 배선 및 접속에 문제가 있거나, 내부 회로가 손상된 경우로 판단할 수 있다. 그러나 신호 이상으로 구분된 계측기들 중에서도 간혹 정상적인 계측 결과를 보여주는 사례도 있다. 이와 같은 경우는 따로 구분하여 추가 시험 결과와 비교 검토가 필요하다. 그림 11은 신호이상 유무를 판단할 때 기본적으로 적용되는 횡방향 변형률 발생 개념도이다. 정상적인 경우에는 포장층 상부는 축하중이 재하될 경우 압축 변형률이 발생하고 하부는 인장 변형률이

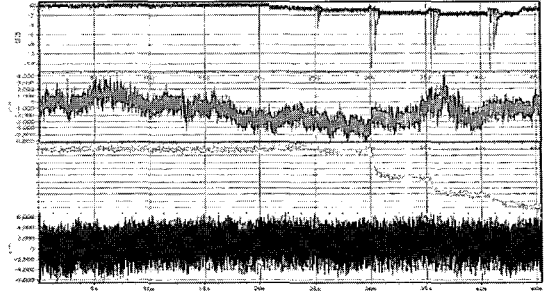


그림 10. 신호 이상 계측 결과

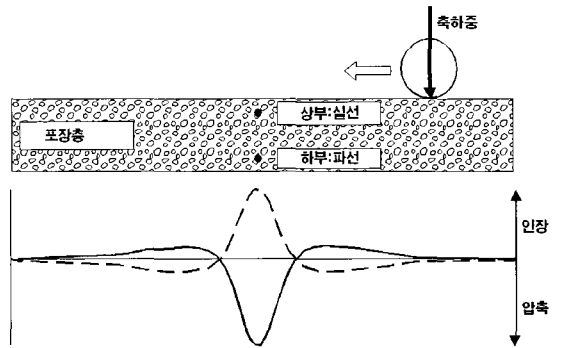


그림 11. 횡방향 변형률 발생 개념도

발생한다. 그러나 계측과정에서 원더링(변형률 위치와 타이어 재하 위치가 이격되는 현상), 켈링(콘크리

표 2. 계측기별 신뢰도 검토 결과 판정

판정 구분	내 용	대처 방안
신호 없음	계측기는 데이터로거에 연결되어 있으나, 전혀 신호가 나타나지 않은 상황으로 계측기에서 데이터로거 사이 임의의 지점에서 단선이 발생한 경우	단선 확인 필요
신호 이상	계측기의 신호는 데이터로거에서 획득되고 있으나, 신호가 의미 없는 파형을 보이거나, 노이즈가 심하여 불안정한 상태가 4회의 초기/정기계측 결과 중 1회라도 발생했을 경우	접촉 및 접지 상태 확인 필요
극성 바뀜	계측기는 정상적으로 작동하고 있으나, 단자대에 계측기 배선을 연결하는 과정에서 오류가 발생하여 +/- 극성이 바뀌어 압축과 인장 변형률이 역전된 결과가 나타나는 계측기	극성 변경 필요
단자 바뀜	계측기는 정상적으로 작동하고 있고 극성도 맞게 연결되었으나, 단자대 내부에서 각 채널별로 접속하는 과정에서 오류가 발생하여 압축과 인장 변형률이 역전된 결과가 나타나는 계측기	단자 연결 변경 필요
노이즈 많음	4회의 초기/정기계측 결과 중 노이즈가 심한 경우가 1회라도 발생했을 경우, 향후 계측기 단자대 및 접지 부위의 연결 상태 점검 필요	접촉 및 접지 상태 확인 필요
관리프로그램 오류	계측기는 정상적으로 작동하고 있고 배선도 맞게 연결되었으나, 기존에 망실된 계측기 등의 채널 입력 오류로 실제 선택되지 않은 계측 결과가 사용자에게 보여지는 경우	관리프로그램 변경 필요

트 슬래브가 상하부 온도차에 따라 휘어지는 현상), 각 층간의 접촉 여부 등에 따라 인장이나 압축 변형률이 예상과 다르게 나타날 수 있다. 이와 같은 현상으로 계측기가 이상이 없음에도 불구하고 신호이상으로 분류되는 것을 방지하기 위해 인접 변형률계와 상호비교를 통해 실제 계측기상에서 발생하는 이상 유무를 확인하였다.

극성 바뀔 경우의 경우는 변형률계에서 얻어진 계측 결과의 파형이 압축/인장이 바뀐 형태로 나타난 경우로서 인접 계측기의 파형과 비교함으로써 판정이 가능하다. 킬링이나 워터링에 의해 압축/인장이 반대로 발생할 수 있지만 명백하게 압축 또는 인장 변형률이 검출되어야 하는 상황에서 계측 결과가 반복적으로 반대로 나왔을 경우 극성이 바뀐 것으로 판단하였다. 이런 경우에는 계측기 합체의 단자대에서 배선의 극성을 변경시켜 줌으로써 오류를 수정할 수 있다.

단자 바뀔 경우의 변형률계는 정상적으로 작동하지만, 계측기 합체 연결하는 과정에서 순서를 뒤바꿔 연결한 경우이다. 이런 경우는 변형률계 배선의 순서를 바꿔서 다시 연결하면 오류를 수정할 수 있다. 단자 바뀔 경우와 극성 바뀔 경우는 신호상으로는 거의 동일하기 때문에 현장 조사를 통하여 구분한다.

노이즈 많음의 경우는 계측 신호의 구분은 가능하지만 계측 중에 노이즈가 심하게 발생하는 경우로 배선 연결 부위의 접촉 불량 또는 접지 불량이 의심된다. 그러나, 이 경우에도 계측이 반복되는 상황에서 정상적인 신호가 검출되는 경우도 있으므로, 예방을 위해서는 수동계측 시 합체와 데이터로거를 연결하는 커넥터의 오류 여부도 주의해서 관찰할 필요가 있다.

관리프로그램 오류의 경우에는 콘크리트 단면 J6번 단면에 국한해서 나타나는 사례로서, 계측기 설치 중에 회수된 계측기가 정확하게 고려되지 않은 채 관리프로그램이 작성되어서 발생한 문제이다. 이는 소프트웨어상으로 해결이 가능하다.

전반적으로 신호 이상과 노이즈 많음의 경우, 지속적으로 신호 이상이 발생하지만, 경우에 따라 정상적

으로 작동하는 경우도 발견되었다. 반복적으로 문제가 발생할 경우 계측기 배선 연결 작업을 재점검하는 것이 바람직하리라 판단된다.

4.2 콘크리트포장 변형률계 계측 결과 분석

콘크리트포장 구간에는 슬래브와 린콘크리트, BB3, Bond breaker 층 등에 총 4가지 유형의 변형률계가 매설되어 있지만, 여기서 분석하는 범위는 줄어 콘크리트 포장 단면에 매설된 콘크리트 및 아스팔트 변형률계로 국한하고자 한다. 시험도로의 총 636개의 콘크리트 변형률계 중 7.55%가 이상이 있는 것으로 나타났다. 계측 신호가 없는 변형률계는 총 5개로 이미 설치 과정 중에서 파손 또는 회수된 7개를 포함하여 현재까지 총 12개의 변형률계가 손실된 것으로 판단할 수 있다. 이들은 대부분 슬래브에 매설된 계측기들로서 계측기 설치 과정에서 보호박스나 슬립폼 패이버의 몰드에 의하여 파손되고 변형률계의 위치가 이동하여 복구가 불가능한 상황에서 회수된 변형률계들이다. 이를 제외한 나머지 항목은 복구 가능한 항목으로 이들을 제외한 실질적인 계측기의 생존율은 98.11%로 나타났다.

표 3. 계측 결과 신뢰도 검토로 판정한 콘크리트 변형률계 오류 계수

	신호 없음	신호 이상	노이즈 많음	극성 바뀔	단자 바뀔	파손 및 회수	총합
콘크리트	5	14	12	6	4	7	48
발생비율	0.79%	2.20%	1.89%	0.94%	0.63%	1.10%	7.55%

이밖에 관리프로그램 오류로 구분되는 변형률계가 3개소로 파악되었는데, 이는 설치 과정에서 회수된 변형률계를 고려하지 않아 발생한 것으로 단순 조작만으로 보정이 가능하기 때문에 수록하지 않았다. 향후 계측에서 노이즈가 많이 발생하거나 신호가 이상한 계측기들은 상황에 따라서 추가로 발생할 수 있으므로, 계측기들이 안정화될 2~3년까지는 지속적인 관찰이 필요하다.

4.3 아스팔트포장 변형률계 계측 결과 분석

아스팔트포장에 매설된 변형률계는 모두 단일 유형이며, 시공 중에 파손되거나 위치 이동으로 회수된 사례는 없었다. 그러나 2개의 변형률계는 설치 후 원인 불명의 이유로 파손되었다. 총 374개의 계측기 중 설치 과정 및 그 이후에 파손개수가 2개라는 것은 99% 이상의 생존율로서 설치 과정이 상당히 우수했음을 반증하는 것이다. 또한 2002년도 시험도로 보고서에 의하면 A2-1단면의 변형률계(ASG 304)가 설치 후 파손된 것으로 기재되어 있으나, 계측 결과로 미루어 판단한 결과 생존한 것으로 간주할 수 있었다. 아스팔트포장 변형률계의 경우 계측 신호의 이상 여부 및 단자 바깥 여부를 판단하기가 콘크리트포장에 비하여 상대적으로 어렵다. 콘크리트 슬래브의 변형률계는 상하부가 동일 위치에 매설되었지만, 아스팔트 변형률계는 단면 취약부의 형성을 우려하여 지그재그로 동일 깊이에 매설되어 있어 변형률 분포를 확인하기가 상대적으로 어려웠다. 그 결과 표층에 변형률계가 매설되어 최소 깊이방향으로 3개 이상의 지점이 확보된 경우에는 계측 결과의 이상 여부가 판단이 가능했지만, 2개 지점만 확보된 대부분의 단면에서는 이상 여부 판단이 어려웠다. 또한, 계측한 단면수가 콘크리트포장에 비하여 많은 이유로 각 단면별 계측 횟수는 오히려 작았다. 그 결과 일부 단면에서는 신호가 이상한 것으로 추정되지만 확실히 판단하기 어려운 경우도 나타났다. 표 4에 나타난 결과를 보면 신호 없음으로 구분되는 변형률계가 2개소로, 파손 및 회수된 2개를 포함하여 총 4개의 변형률계가 손실되었다. 이는 374개 변형률계 중 1.06%의 손실률로 상당히 우수한 결과로 판단된다. 신호 이상과 극성 바뀜으로 표기된 사례들 중 표의 해당 칸에 ()가 들어간 숫자는 자료 부족으로 인하여 명확한 결론을 도출하지는 못하였지만, 계측 결과에 문제가 있는 것으로 간주한 변형률계 갯수이다.

본 검토 결과를 토대로 판단해 보면 아스팔트 포장의 경우에 중간층과 기층 상부에 변형률계를 매설할

표 4. 계측 결과 신뢰도 검토로 판정한 아스팔트 변형률계 오류 개수

	신호 없음	신호 이상	노이즈 많음	극성 바뀜	단자 바깥	파손 및 회수	총합
콘크리트	2	7(3)	1	3(3)	-	2	48(6)
발생비율	0.53%	1.87% (0.80%)	0.27%	0.80% (0.80%)	0.0%	0.53%	4.01% (1.60%)

기 보다는 표층과 기층 하부 쪽에 더 치중하여 변형률계를 매설하는 것이 더 양호한 계측 결과를 도출할 수 있었을 것이라 판단된다. 향후에 품질관리 센터나 장기공용성 관측구간 등 아스팔트포장에 변형률계를 매설할 경우에는 이를 반영하는 것이 바람직하다.

5. 결론

시험도로 계측 결과는 방대한 분량의 아날로그 데이터로 이루어져 있다. 이를 효과적으로 사용하기 위해서는 일정한 규칙을 정하고 그에 따라 최대값 등 방대한 분량의 아날로그 데이터에서 필요한 정보를 정리해야 한다. 여기서는 시험도로에서 얻어진 아스팔트 및 콘크리트포장에 매설된 변형률계의 계측 결과를 정리하는 방법론을 제시하였다. 또한 계측 결과에 포함된 노이즈에 대한 필터링이 필요할 경우 적용할 수 있는 차단 주파수를 제시하였다.

다음으로 정리된 시험도로 계측 결과를 토대로 변형률계의 신뢰도를 판단하였다. 이를 통하여 잡음이 많거나 파형이 이상한 변형률계들을 선별하였다. 그러나, 망실된 변형률계나, 신호가 전혀 잡히지 않는 변형률계들을 제외한 나머지는 계측 횟수가 거듭되면서 상황이 변하는 경우도 있었다. 여기서는 시험도로 운영 초기에 얻어진 계측 결과들을 기초로 판단한 것으로서, 향후 변화 추이를 지켜볼 필요가 있다. 아스팔트 변형률계의 경우에는 점탄성 거동을 보이는 아스팔트 혼합물의 특성상 계측 신호의 이상 여부를 판단하기가 상대적으로 더 어려웠다. 향후에 추가적인 계측 결과들을 더하여 계측 신호의 이상 여부를 판단할 필요가 있다. 그리고 전체적인 계측기 상황으

로 볼 때 아스팔트 변형률계의 경우 중간층과 기층 상부 보다는 표층과 기층하부에 변형률계의 매설 수치를 늘리는 것이 변형률 관측에 더 유리하다. 시험도로의 경우에 표층에 매설된 변형률계의 조기 파손 우려로 표층 매설 물량을 최소화하였지만, 준공 후 약 2년이 지난 시점에서도 기대 이상의 생존율을 보이고 있는바, 향후 포장분야 계측기 설치에서 이와 같은 사실이 반영되길 희망한다.

계측 검토 결과 콘크리트 및 아스팔트포장에 매설된 전체 변형률계 중 97%이상이 현재 생존하고 있음을 확인하였고, 계측기의 극성, 단자 위치, 계측관리 프로그램 설정 오류 등 계측 오차를 유발하는 경우들을 모두 확인하였다. 이외에도, 일부 변형률계에서 간혹 노이즈가 심하게 발생하는 현상들을 확인할 수 있었다. 그러나 이런 현상은 매번 동일한 변형률계에서 발생하는 것이 아니라 무작위(Random)하게 발생하는 경우도 확인했다. 따라서 이는 변형률계 및 배선의 이상이라기보다는, 계측함체와 데이터저를 연결하는 커넥터와 같은 부분이 문제로 추정된다.

본 검증은 시험도로 자료를 본격적으로 활용하기 전에 필수적으로 수행하여야 하는 검증 작업이다. 특히 극성이 바뀌는 경우의 계측값을 그대로 활용할 경우 큰 혼선을 일으킬 수 있기 때문이다. 본 결과는 이후 시험도로 계측 과정에 반영되어 문제가 발생된 대

부분의 계측기의 신뢰도는 회복되었고 신뢰성 향상에 크게 기여하였다. 여기서 제시하는 과정은 시험도로뿐만 아니라 포장에 매설된 계측기를 활용하는 경우에 모두 통용될 수 있는 방법론이다. 따라서 이와 같은 과정을 거친다면 기존에 검증 없이 적용된 계측값의 불확실성을 상당부분 제거할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 통해 얻어진 계측 결과는 구조해석 분석과 연계하여 지속적으로 연구되고 있으며, 연구 결과는 빠른 시일 내에 후속 연구로 제시될 예정이다.

참고문헌

1. 김연복 외, 2003, 한국형 포장설계법 개발 및 포장성능 개선방안 연구, 콘크리트포장 설계법 분야, 연구보고서, 건설교통부
2. 김지원 외, 2002, 시험도로의 건설과 운영에 관한 연구, 연구보고서, 한국도로공사, 도로교통기술원
3. Kim, Jiwon, 2000, Three-dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Multi-layered System, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
4. 김지원 외, 2004, 시험도로 포장의 거동과 공용성 자료의 보정 및 분석 보고서, 한국도로공사, 도로교통기술원

회원의 신상변동사항(이사, 전근, 승진 등)이 있으면
학회 사무국으로 연락주시기 바랍니다.
현재 반송되는 우편물이 너무 많습니다.

- 전 화 : (02)3272-1992
- 전 송 : (02)3272-1994
- E-mail : kospe@hanmail.net