

콘크리트 교량 및 터널 구조물의 최신 유지관리 계측기술

The Newest Measuring Technology for the Maintenance of Concrete Bridge and Tunnel Structures



박석균*
Seok-Kyun Park

1. 서 론

구조물 유지관리를 위한 최신 계측기술의 공통점과 주된 기술동향은 계측시스템을 자동화 또는 지능화 하는 것이다. 이러한 경향은 비단 계측시스템에만 국한 되지 않고 계측결과에 대한 해석시스템, 더 나아가 평가시스템에까지 이어져 가는 추세에 있다. 이러한 동향은 특히 사회기반 시설물의 중추적 역할을 담당하고 있는 교량 및 터널 구조물을 중심으로 더욱 활발한 기술개발 연구가 진행되고 있다.

이와 관련하여 본 기술기사에서서는 우리와 건설 및 환경여건이 비교적 유사한 일본의 최신 유지관리관련 계측기술의 연구 사례를 선택하여 해당 기술을 소개코자 한다.

본 자료를 통해 현재 국내에서도 수행 중인 상기 동향의 연구에 대한 성과와 서로 비교 분석해 보도록 함으로써 향후 연구방향이나 보완대책 설정 등에 조금이나마 도움이 되었으면 하는 뜻에서 자료를 정리하여 보았다.

특히, 우리도 이미 고속철도가 상용화됨에 따라 그 사회적 공헌과 더불어 안전운행에 대한 관심도 갈수록 높아지고 있는 만큼, 우리보다 그 역사가 오래된 일본의 고속철도를 주된 모델(터널에 대해서는 일반철도와 지하철 구조물도 포함)로 하여 교량 및 터널 구조물의 최신 유지관리 계측기술에 대해 알아보았다. 이에 따라 본 자료의 많은 부분은 최근 일본콘크리트공학협회에서 발행한 학회지 특집호(Vol. 44, No. 5, 2006년 5월호), 일본토목학회에서 발행한 학회지(Vol. 82, 1997년 8월호, Vol. 83, 1998년 3월호) 등에서 언급한 주제에 가까운 기술기사를 발췌하여 가급적 원본에 가깝게 번역 정리하였다. 이에 대한 인용원본은 참고문헌에 표기하였다.

* 정희원, 대전대학교 토목공학과 부교수
skpark@dju.ac.kr

2. 철도교량 및 궤도슬래브구조물의 최신 유지관리 계측기술

철도교량 및 궤도슬래브구조물에 대한 최신계측기술로서, 최근 일본의 고속철도 신칸센(新幹線)에 적용되고 있는 최신 유지관리용 계측기술을 소개한다. 본 소개에 앞서 참고로 일본의 핵심 고속철도 노선을 담당하고 있는 도카이도(東海道) 신칸센에서 채택하여 실시하고 있는 최근의 토목구조물 유지관리용 검사 흐름도를 <그림 1>에 나타내었다.

2.1 닥터엘로우(doctor yellow)에 의한 계측

도카이도(東海道) 신칸센(新幹線) 열차 통과 시의 지상설비의 이상을 발견하는 설비로서, 신칸센 영업열차와 전용시험열차가 활용되고 있다. 상용되고 있는 주된 것에는 영업열차와 같은 최고속도 270 km/h로 계측하는 전기궤도 종합시험차(닥터엘로우라 호칭 : <사진 1>)와 복수의 영업열차에 특별히 탑재된 자동동요계측시스템(레이더스라 함)이 있다. 닥터엘로우에서는 10일에 1회의 빈도로 전선(全線)의 궤도 비정상 상태를 밀리단위로 계

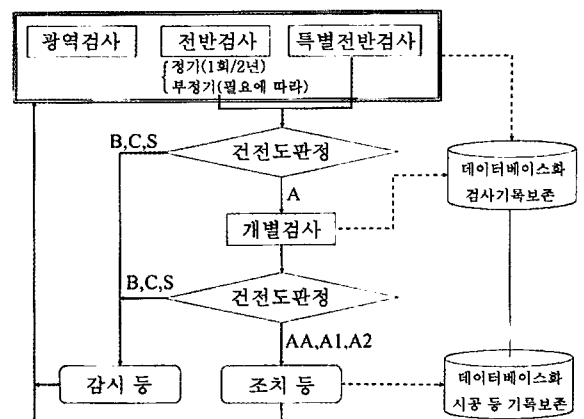


그림 1. 토목구조물 유지관리용 검사 흐름도¹⁾

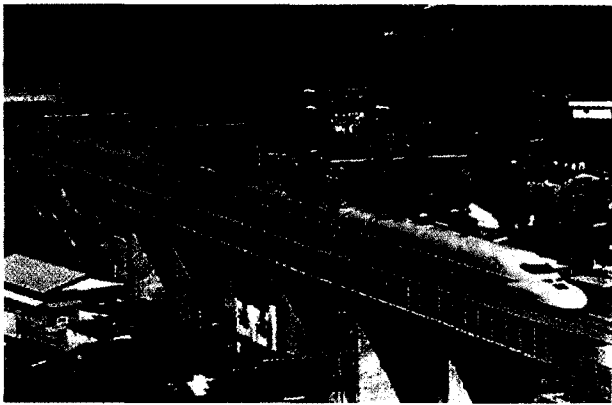


사진 1. 닥터엘로우¹⁾

측합과 더불어 차체·축박스의 동요가속도를 측정하고 있다. 계측결과는 궤도의 유지관리업무에 사용되고 있고, 도카이도 신칸센의 안전수송 확보, 탑승 시설물의 유지를 지원하고 있다.

10일마다 운용하는 닥터엘로우를 보완할 목적으로 영업열차의 수 편성에는 레이더스가 장착되어 있다. 레이더스에서는 차체의 동요가속도에 의한 계측관리를 실시하고 있고, 궤도상태에 한하지 않고 토목구조물에 발생한 이상 상태를 감시하고 있다. 가령 관리값을 넘는 동요가속도가 확인된 경우에는 도카이도 신칸센 전선에 설치되어 있는 전용의 LCX(동축(同軸) 케이블)에 의해 위치정보 등이 즉시 자동 전송된다.

현재, 성토구간에 대한 궤도슬래브의 함몰 등의 큰 변상(變狀)감지에는 유효하다고 사료되며, 향후 더욱 토목구조물의 이상 유지관리에 도움이 되는 새로운 지전을 얻기 위해 열차 통과 시 축박스의 동요가속도 데이터의 수집 및 분석을 수행하고 있다. 이와 관련하여, <그림 2>에는 닥터엘로우에 의한 지상설비의 상태감시 예로서 반년간에 걸친 축박스 가속도계에 의한

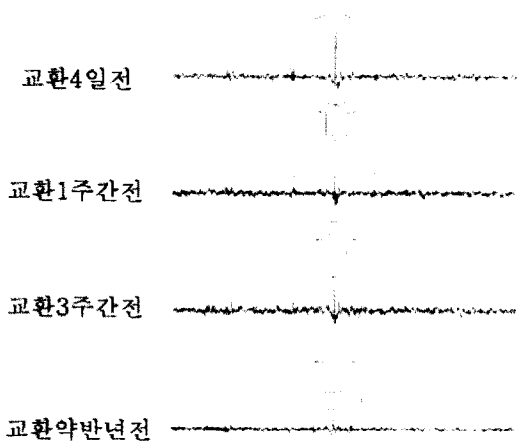


그림 2. 축박스 가속도의 증가상태 감시(레일 내부결합 감시)¹⁾

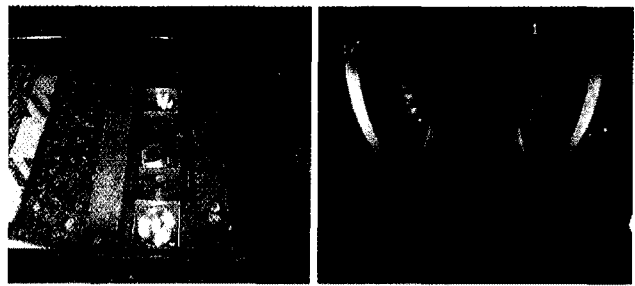


사진 2. 비디오카메라 설치상황 및 270 km/h시 열차 상판하부 취득화상¹⁾

상태감시결과로부터 레일 내부결합에 수반되는 가속도값의 증가개소를 파악하여 레일의 일부(12 m)를 교환한 예를 나타내었다.

또한, 주행 중의 영업열차 상판하부 상태를 파악할 목적에서 궤도상에 <사진 2(좌)>와 같이 고속비디오카메라를 설치하여 동화상 감시를 하는 경우도 있다. 270 km/h 주행시의 열차 상판하부 화상을 참고로 <사진 2(우)>에 나타내었다. 촬영 및 기록은 1/60 s간격으로 실시하고 있으며, 270 km/h 주행열차에서는 1.25 m 간격으로 선명한 화상이 얻어지고 있다. 본 감시기술에 의해 고속주행중의 열차 상판하부 감시와 적설현황 감시 등의 활용을 검토 중이다.

2.2 적외선카메라에 의한 콘크리트 변상(變狀) 검사

콘크리트의 박리, 박락 원인이 되는 들뜸, 균열개소의 추출방법으로서의 접근에 의한 육안검사와 타음검사가 중심이다. 그렇지만, 고가교, 교각 등의 높은 곳에서는 건전성을 확인하기 위해 접근에 의한 육안검사가 곤란한 경우가 있다. 또, 전문기술자의 개인차에 의한 검사결과의 변동도 예상된다. 이 때문에 물체로부터 방사되는 적외선에 의해 내부검지가 가능한 적외선 카메라를 사용한 검사에 대해서 JR 도카이(東海)에서는 1991년부터 연구를 하여 왔다.

일반적으로 절대영도 이상의 모든 물체는 표면으로부터 적외선을 방사한다. 이 방사량은 물체의 온도와 상관관계가 있기 때문에, 이 방사되는 적외선 차를 검출함으로써 내부변상 열화를 검지한다. 콘크리트의 들뜸 등으로 생기는 공기층이 있으면 건전한 개소에서와는 표면온도의 전달차가 있어, 적외선 방사량의 차로서 식별 가능하게 된다.

얻어진 온도분포 데이터를 가시화 가능하도록 화상해석 하여, 들뜸, 균열개소를 추출할 수 있는 결과가 얻어질 수 있기 때문에 일부 실용화 되고 있다. 이에 대한 추가해설은 3.1.1에서도 언급하였다.

현재는 <사진 3>과 같은 실물모형의 RC고가교를 사용해서 각종 기상조건하의 계측확인 작업을 실시 중에 있다.

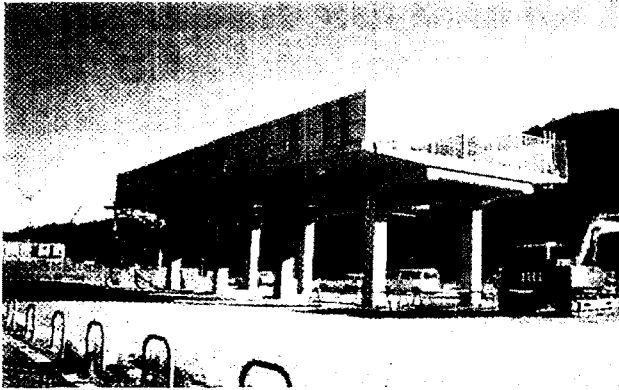


사진 3. 실물모형의 RC고가교¹⁾

2.3 충격진동시험에 의한 RC고가교의 건전도 평가

RC구조물에 균열이 발생하면 RC구조물의 고유진동수는 저하되는 것으로 알려져 있다. 그래서 현장에서 소형의 추를 자유낙하시켜 구조물에 충격을 주어 고유진동수를 계속하는 동적 충격진동시험법이 제안되었다. 도카이도 신칸센에서는 RC구조물의 상시 건전도 평가방법으로서 1991년부터 충격진동시험을 채용하고 있다. 지진에 의해 구조물에 피해가 발생한 경우, 철도사업자는 구조물의 손상레벨에 의해 열차의 운행가능여부의 판단을 필요로 한다. 이를 위해 정량적으로 정확히 손상레벨을 평가할 계측방법이 필요하였다. RC구조물의 사용성능의 건전도 평가에서는 충격진동시험에 의한 「고유진동수 파악에 의한 건전도 평가 시스템」을 확립하고 있다.

RC구조물의 고유진동수가 저하해 건전하지 않다고 판정된 경우, 종래는 그 원인이 구조물의 본체, 기둥과 기초공 중 어느 쪽에 있는가를 특정짓는 것이 곤란하였다. 그래서 탄성매스진동 모델에 의한 고유치 해석방법을 이용해 기둥의 강성과 지반탄성계수를 각각 정량적으로 파악할 수 있는 평가방법을 개발하였다. 효고켄(兵庫縣)남부(南部)지진(우리에겐 고베지진으로 알려져 있음) 발생 후, RC구조물의 건전도 파악을 위해 충격진동시험을 위해 피해지역에서 실시하였다. 예를 들면, 어느 고가교에서는 지진 전후에서 전체계 1차고유진동수가 0.4 Hz, 기둥 부분계 2차진동수가 12 Hz 저하하였다. 그 결과, 충격진동시험으로부터 얻어지는 라멘고가교의 2종류 고유진동수와 모드형상을 설명가능하게 하는 2가지의 변수가 해석에 의해 산출되는 것을 확인하였다. 이 기둥의 강성과 지반탄성계수의 해석치는 각각의 건전도를 설명할 수 있는 값이다. 앞의 예에서는 기둥의 강성이 약 30%, 지반의 수평탄성계수가 약 50% 저하되어 있었다.

고유진동수의 저하상황을 파악하고, 고유치해석으로부터 구할 부재의 저하강성비와 정적 비선형해석에 의한 소성율과의 관계에서 손상레벨은 평가 가능하다. <그림 3>에 손상레벨 평

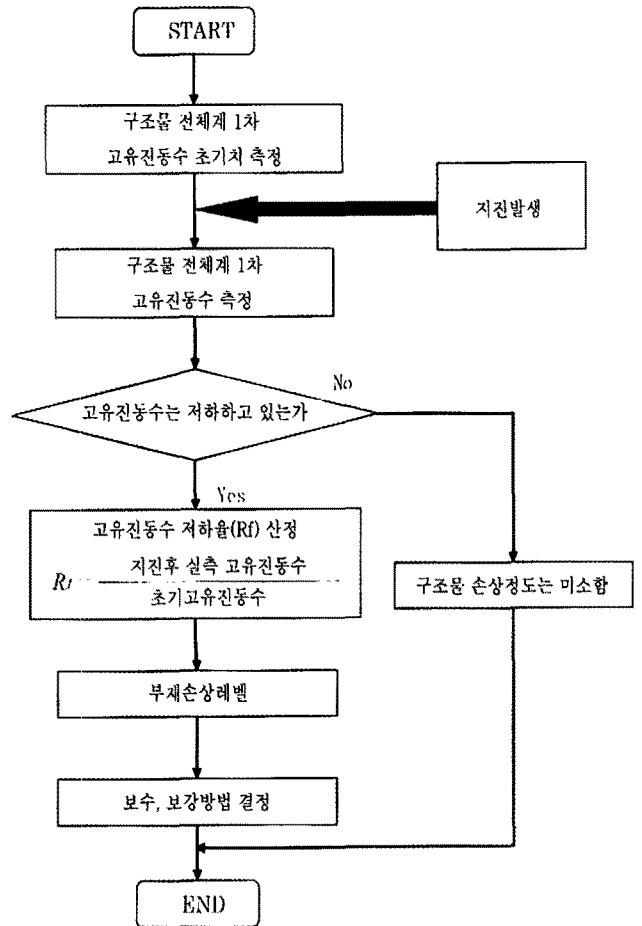


그림 3. RC라멘교 고가교의 손상평가 흐름도¹⁾

가방법의 기본적인 절차를 흐름도로 나타내었다. 구체적으로는 구조물의 전체계 1차고유진동수를 계속해서 건전한 상태의 초기치에 대한 고유진동수의 저하비율을 판정한다. 저하비율이 큰 경우는 측정된 고유진동수로부터 고유치해석에 의한 역해석을 하여 저하강성비를 계산하고, 미리 산출해 놓은 소성율과의 관계식으로부터 소성율을 추정함으로써 손상레벨을 직접 평가한다. 한편, 고유진동수의 초기치에 대한 저하율을 측정함으로써 구조물 전체계의 손상유무를 추정할 수 있다. 여기서, 고유진동수의 저하비율이 큰 경우에는 고유치해석에 의해 부재마다의 저하강성비를 파악해서 부재의 손상레벨을 추정한다. 또한, 저하강성비는 구조물이 지진을 받은 후에 충격진동시험에 의해 측정된 구조물 전체계 1차 및 기둥 부분계 2차고유진동수에 기초한 고유치해석에 의해 계산한다. 또한, 지진 시 이외에도 충격진동시험에 의한 계측관리가 실시되고 있다. 예를 들면, 홍수시의 철도고가의 안정성 확인 시에 교각의 세굴량 추정에 충격진동시험을 활용하고 있다. 도카이도 신칸센 후지가와(富士川)교량에서는 홍수 시 상정위험 세굴량이 되는 경우의 고유진동수를 정해 놓고, 열차의 운전재개 가부판단에 활용하고 있다.

2.4 레이저도플러 속도계에 의한 RC구조물의 건전도 평가

2.4.1 구조물 미동의 비접촉 측정방법

도카이 신칸센에서는 전선(全線) 100m마다 상시미동측정 데이터를 취득하고 있고, 구조물 상부 및 지반 각각에서 탁월 주파수 및 증폭배율을 알 수 있다. 이들 데이터는 지진 시 구조물의 공진에 의한 피해(被災)손상레벨의 추정도구로서 활용하고 있다. 상시미동계측은 사용상태에서의 계측이 가능하다. 그렇지만, 상시미동은 진폭이 극히 작기 때문에 고정도의 계측이 곤란한 것으로 여겨지고 있다. 또한, 계측센서의 설치 시에 높은 곳에서의 위험작업이 수반되고, 계측점 수의 증가는 과도한 비용과 시간을 요한다.

최근, 열차주행에 따른 구조물의 거동 모니터링 방법으로서 레이저도플러 속도계(이하, LDV)에 의한 계측방법을 활용한 구조물의 손상도 평가에 관한 연구가 수행되고 있다.

LDV란 진동하는 물체의 계측점에서의 속도를 레이저를 이용해 계측하는 광학적 기기이다. 입사레이저와 반사레이저 사이에 생기는 도플러효과에 기초해 대상부위의 속도를 계측한다. 그 원리는 <그림 4>와 같다. 어느 일정한 주파수 성분을 갖는 레이저광을 <그림 4>에서와 같이 어느 속도에서 이동하고 있는 물체에 쏘아붙이면, 이동물체가 속도성분에 비례해서 그 주파수가 변화한다. 물체에 조사(照査)하는 레이저광(입사광)의 주파수를 f_0 , 물체의 속도를 v , 조사하는 레이저광의 파장을 λ_0 , 입사광과 물체의 이동방향이 이루는 각도를 θ 라 하면, 물체로부터의 반사광 주파수 f_r 은 다음 식(1)로 주어진다.

$$f_r = \frac{\lambda_0 f_0 + v \cdot \cos \theta}{\lambda_0 f_0 - v \cdot \cos \theta} \cdot f_0 \quad (1)$$

따라서, 입사광에 대한 반사광 주파수의 변화량 f_D 는 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_D = |f_0 - f_r| = \frac{2v \cdot \cos \theta \cdot f_0}{\lambda_0 f_0 - v \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

여기서, $\lambda_0 f_0 \gg v \cdot \cos \theta$ 이기 때문에 도플러주파수 f_D 는 다음 식(3)과 같이 얻어진다.

$$f_D \approx 2v \cdot \cos \theta / \lambda_0 \quad (3)$$

LDV에서 사용되는 레이저광의 파장 λ_0 는 극히 안정되어 있기 때문에, 도플러주파수 f_D 와 타겟의 이동속도 v 는 비례관계에 있다. 레이저광의 조사방향과 물체의 이동방향이 이루는 각 θ 가 얻어지면, 도플러주파수 f_D 를 측정함으로써 물체가 갖는 조사방향의 이동속도를 구할 수 있다.

LDV의 특징으로서는 비접촉이면서 장거리 계측이 가능한 점, 속도 분해능이 매우 높아 고주파수대역이 매우 넓은 점을 들 수 있다. 이 때문에 계측기기의 설치가 곤란한 조건에서의 계측이나 상시미동과 같은 미소한 진동을 고주파수 성분까지 계측하는 것이 가능하다. 더욱이 레이저센서 헤드에 스캐닝유닛을 설치함으로써 다점계측에 의한 공간적이며 고밀도의 계측이 가능하다.

도카이도 신칸센에서도 LDV에 의한 각종 측정법, 진동모드형의 확인방법 등의 구축 및 국부진동모드형의 확인에 관한 기존의 연구성과를 참고로 하여 유지관리에 적용하고 있다. 예를 들면, 강철도교의 열차주행에 수반되는 특수한 거동을 LDV로 설명하였다. 또한, 철도고가교를 대상으로 LDV를 이용한 상시미동과 열차주행에 의한 강제가진 시의 진동성상(진동모드, 고유진동수)의 파악연구도 이루어지고 있다(사진 4).

LDV를 이용한 열차주행 시의 동적특성은 구조물 전체와 더불어 국부진동의 고유진동수를 확인할 수 있다. 이에 따라, LDV에 의한 진동계측만으로도 RC구조물의 건전도 평가와 변상부위의 추정도 가능할 것으로 사료된다. 현재는 <사진 5>에

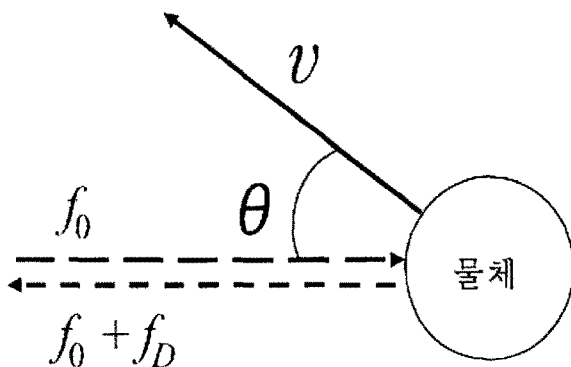


그림 4. 이동물체로의 레이저 조사(照査)와 반사광 주파수변화²⁾

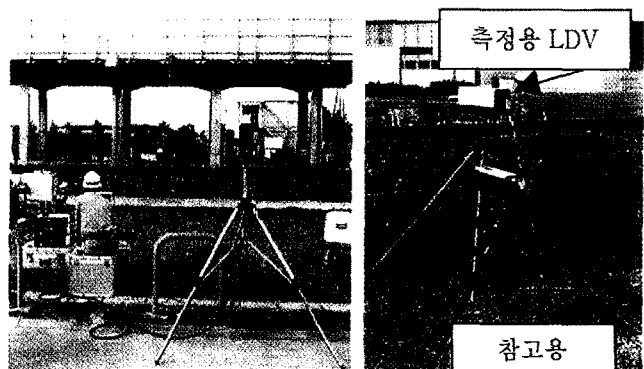


사진 4. 실물모형 RC고가교의 LDV 측정²⁾

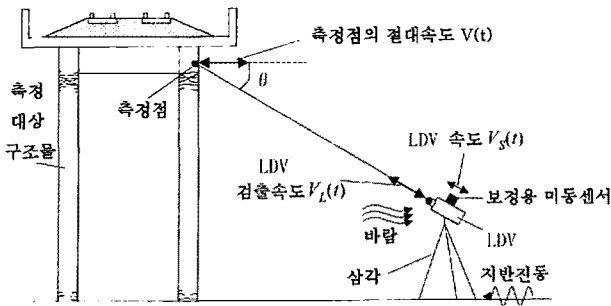


그림 5. 비접촉 미동측정과 LDV 본체의 진동제거²⁾

나타낸 실물모형의 RC고가교에서 작위적으로 고가교의 일부 변상을 만들고, 그 개소를 LDV에 의해 파악하기 위한 계측시스템을 구축 중에 있다.

그러나 센서와 측정 대상 간의 상대속도를 검출하는 LDV를 이용하여 진폭레벨이 아주 작은 미동을 측정하는 경우, 측정기록에 반영되는 LDV 본체의 진동영향이 커진다. 옥외에서의 구조물 측정에서는 <그림 5>에서 보는 바와 같이 LDV와 삼각(三脚)으로부터 형성되는 계의 고유진동과 지반에 입력되는 각종 노이즈 진동 및 바람 등의 외란 영향은 무시할 수 없다. 특히, 지진 후의 손상도 검사에 적용하는 경우에는 복구공사 등에 의한 높은 노이즈레벨 하에서 계측을 실시할 필요가 있어 그 영향이 심각하다.

그래서 LDV와 삼각(三脚)으로부터 형성되는 계의 고유진동과 지반에 입력되는 각종 노이즈 진동 및 바람 등의 외란에 의한 LDV 본체의 진동영향을 제거하고, 보다 고정도의 미동측정을 실현하기 위해 측정대상의 진동주파수 영역에 있어서 LDV와 등가인 감도를 갖는 접촉형 미동센서를 LDV에 부착하여 LDV 본체의 진동속도를 기록하며, 그 기록을 이용해 LDV 본체의 진동영향을 제거하는 방법이 있다(그림 6). 이에 대해서는 뒤의 적용사례에서 다시 상세히 언급하겠다.

한편, 구조물의 진동모드를 얻는 경우에는 구조물 상의 복수점 진동측정을 실시할 필요가 있다. 다수의 LDV와 스캐닝형 LDV 시스템을 이용하면, 구조물의 진동모드는 얻어지지만 현상에서는 측정시스템이 매우 고가가 된다. 그래서 단순한 장치구성에 이와 더불어 시간영역에서 비정상인 미동의 비접촉 측정에 의해 구조물의 진동모드를 얻는 방법을 검토하였다.

구조물 각부의 미동을 비접촉 측정할 때에 구조물 상의 어느 기준점의 미동 $V_R(t)$ 를 다른 LDV 또는 종래(접촉형)의 미동센서로 동시 측정하고, 대상으로 하는 모드성분의 스펙트럼 진폭(각부 측정시의 기준점 진동레벨) S_{Rmax} 를 조사하여 그 값에서 비접촉 측정에 의한 구조물 각부의 진동스펙트럼 진폭 S^{max} 을 제거해서 각부 측정시의 진동레벨로 기준화한 모드진

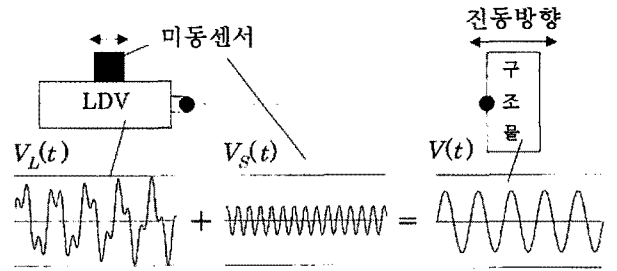


그림 6. 보정방법 개요²⁾

폭 S_{Rmax} 를 <그림 7>의 상부와 같이 얻는다. 기준점은 대상으로 하는 모드의 진동성분을 검출할 수 있는 임의의 위치에 설정하면 된다. 철도고가교 등 구조가 단순한 구조물에서는 저차(低次)의 진동모드 개형(概形)은 예측가능하기 때문에 얻어진 모드 진폭치를 이용해 구조물의 진동모드를 <그림 7>의 하부와 같이 확인할 수 있다. 또한, 각 측정점과 기준점의 미동 위상차를 고려하면 보다 고차의 모드 확인도 가능하다.

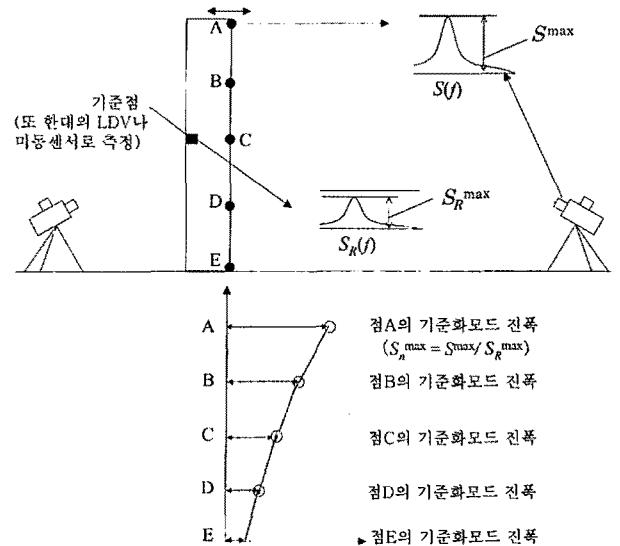


그림 7. LDV 1~2대에 의한 진동모드 추정법²⁾

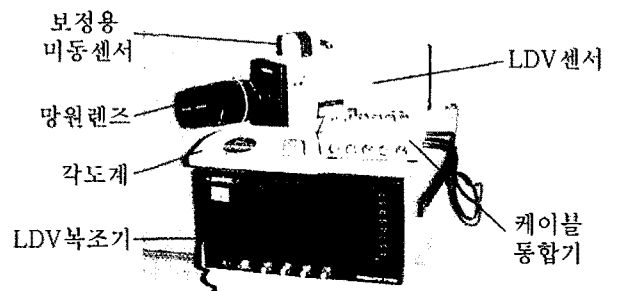


사진 5. 종래의 비접촉 측정 센서의 구성²⁾



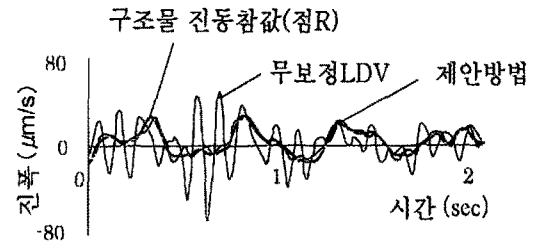
사진 6. 구조물 검사용 LDV 프록토타입²⁾

참고로, <사진 5>에는 종래의 비접촉 측정 센서 장치들, <사진 6>에는 실용화를 목적으로 개발한 구조물 검사용 LDV를 나타내었다.

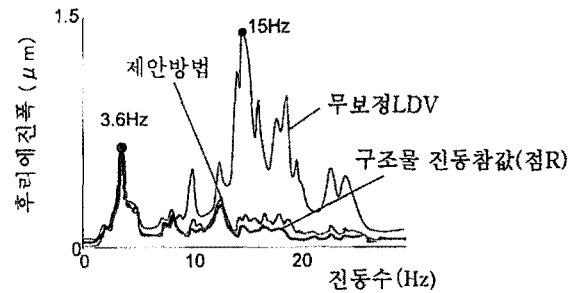
2.4.2 적용사례

(1) 미동측정에 의한 RC라멘구조의 진동특성 확인

철도고가교의 진동진단에 대한 적용성을 검증할 목적으로 RC라멘 구조물에 대해 현지측정을 실시하였다. 대상 구조물의 단면형상과 측정방법을 <그림 8>에 나타내었다. 대상구조물은 2층 RC라멘구조로서, 구조물로부터 약 5m 떨어진 지반 상으로부터 미동센서를 부가한 LVD로 구조물 상의 점 A~E의 미동을 순서대로 시간마다 0.1sec 단위로 측정하였다. 각 점 측정 시에 점 R에 설치한 미동센서로 미동을 동시 측정하였다. 점 A측정 시에 얻어진 결과를 <그림 9>에 나타내었다. 무보정한 LDV의 기록이 LDV 본체의 진동영향에 의한 10 ~ 20 Hz의 고주파성분을



(a) 측정파형



(b) 측정파형의 후리에스펙트럼

그림 9. 보정방법의 효과²⁾

많이 포함하고 있는 것에 반해, 제안방법에 의한 보정 후 결과는 점 A근방의 점 R에 설치된 미동센서의 기록(구조물 진동의 참값)과 대단히 가깝고, 구조물의 1차고유진동수(3.6 Hz)도 측정 가능하였다. 다음은 제안방법에 의해 RC라멘 구조물의 하층부 기둥의 1차 진동모드를 추정하였다. 점 A ~ E의 미동 스펙트럼의 3.6 Hz 성분(Smax)을 동시 측정된 기준점 R의 미동 스펙트럼과 같은 진동수 성분분((SRmax)으로 나누어서 각 점 측정 시의 진동레벨로 기준화 하고, 기준화 한 모드진폭Snmax을 얻었다. 결과를 점 A모드 진폭 및 높이를 1로 하여 별도로 실시한 구조물의 1차 진동모드의 수치해석값과 합쳐 <그림 10>에 나타내었다. 해석치와 제안방법에 의한 추정치는 잘 일치하여, 제안방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

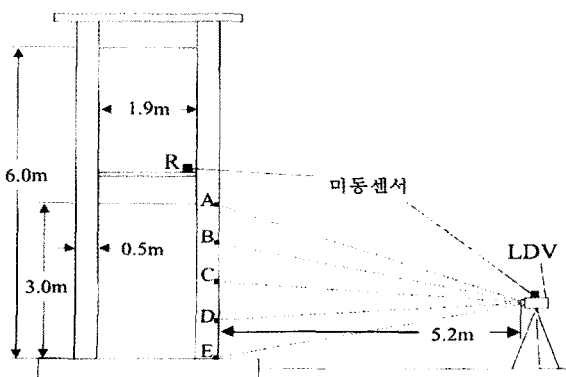


그림 8. 대상 구조물의 단면형상과 측정방법²⁾

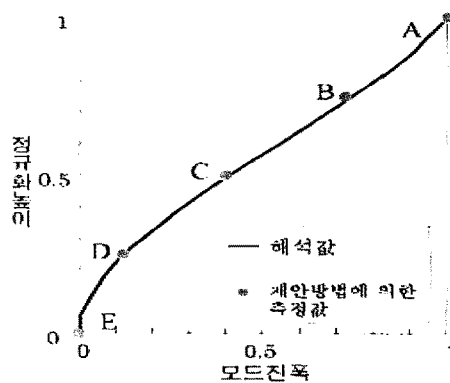


그림 10. 1차 진동모드의 해석치와 추정치²⁾

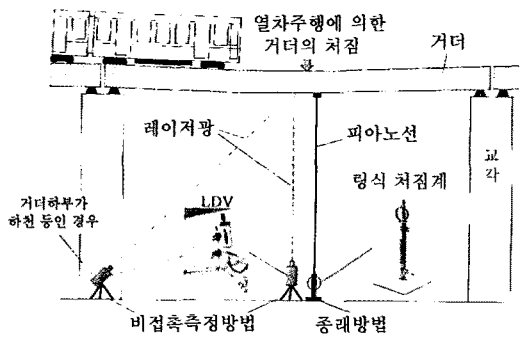


그림 11. 거더 처짐의 비접촉측정방법과 종래방법²⁾

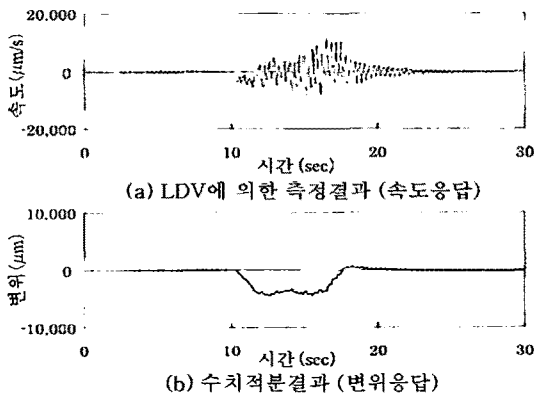


그림 12. 거더 처짐의 비접촉 측정결과와 일례²⁾

(2) 교량의 처짐측정

철도교의 거더 건전도조사로서 열차주행 시 거더의 처짐 측정이 실시된다. <그림 11>에서 보는 바와 같이, 종래, 거더의 처짐은 거더에 설치한 피아노선을 매개로 하여 지상에 설치한 링식 변위계로 측정해 왔지만, 작업효율의 향상 및 거더 하부에서의 작업이 곤란한 경우가 있었다. 이와 같은 문제점을 해결할 목적으로 거더 처짐의 비접촉 측정기술개발에 몰두하고 있다. 현재, 거더 하부로부터 LDV로 측정된 거더의 속도응답 수치적분에 의해 열차주행 시 거더의 처짐 파형을 재현할 수 있어, 종래방법과 동등한 최대처짐량이 얻어짐을 확인하고 있다.

측정 예로서, 강 하부 거더(스팬 35m, 거더 하부높이 16m)의 열차주행 시 거더의 처짐을 비접촉으로 측정할 결과를 <그림 12>에 나타내었다. 거더의 처짐파형에는 열차주행에 의한 약 8초에 걸쳐 천천히 처지는 매우 긴 주기성분이 포함되어 있다. 향후에는 실용화를 목적으로 거더에 비스듬히 입사시켜 측정하는 경우의 정도(精度) 확인 및 향상방법에 관해 연구할 예정이다.

2.5 CCD카메라에 의한 RC구조물의 침하량 계측

구조물의 동적 침하량을 측정하는 경우, 링식 처짐계와 다이얼게이지식 변위계, 혹은 레이저변위계 등이 이용되는 경우가 많다. 그러나 이들 사용에는 구조물에 근접한 정점이 필요하고, 주변 지반도 구조물과 함께 침하하는 경우에는 이들을 이용할 수 없다. 또한, 레이저레벨이나 토털스테이션 등 거리를 둔 장소로부터 침하량을 측정할 수 있는 기기도 있지만, 일반적으로 샘플링레이트가 낮아 동적 침하량 계측에는 적합하지 않다.

최근, 도카이도 신칸센에서는 주변지반과 더불어 침하될 가능성이 있는 구조물의 침하량을 영업시간대에 측정할 목적으로 CCD카메라와 고성능 망원렌즈를 조합한 망원경렌즈 병용형 CCD식 침하계를 채용한 사례가 있다. 이에 따라 지금까지 종래 난문제였던 침하계측관리가 극히 용이해졌다.

3. 터널구조물의 최신 유지관리 계측기술

3.1 터널 구조물의 검사 자동화기술

일본의 경우는 1991년부터 터널 내공단면을 측정하는 장치 및 터널 내면을 촬영하는 장치가 개발되고 있으며, 카메라의 렌즈와 필름 사이에 슬릿을 넣어 필름의 전송속도와 카메라의 이동속도를 동조시킴으로써 피사체를 연속 촬영하는 슬릿카메라가 일부에서 실용화되고 있다. 그러나 슬릿카메라에 의한 터널 라이닝 표면의 촬영은 취급이 번거로울뿐더러, 화상이 아닐로그데

표 1. 라이닝 표면을 촬영·기록하는 시스템³⁾

항 목	개 요	검사정도와 검출능력
슬릿카메라	슬릿카메라에 의해 터널차륜이동 직각방향으로 촬영한 것을 화상처리에 의해 이어 맞추어 연속벽면 전개도를 작성한다.	1회에 1km 폭 0.2 ~ 0.3mm 균열도 검출
	주행속도와 필름의 전송속도를 동조한 카메라에 의해 연속벽면 사진을 얻는다.	30 ~ 40km/h 폭 1mm이하 균열을 검출
라인센서카메라 (적외선) (가시화상)	주행시 히터로 벽면을 강제가열하고, 적외선 방사량을 적외선카메라로 촬영하여 화상처리후 박리를 검출. 가시카메라(CCD)에 의해 균열, 누수 등을 검출하고 전개도를 자동작성	4km/h 깊이 50mm의 박락, 폭 1mm의 균열 등을 검출
라인센서카메라 (가시화상)	주행하면서 벽면을 주사하여 화상을 얻고, 연속주사화면으로부터 전개도를 작성	10km/h 폭 1mm 균열을 검출
레이저스캐닝 (가시화상)	레이저빔으로 전체주위를 스캐닝하고 화상처리하여 연속벽면 화상을 얻어 전개도를 작성	4 ~ 7km/h 이하 폭 0.5mm 균열을 검출

이러하기 때문에 터널 라이닝 곡률에 의한 화상 변형 등의 문제를 화상처리에 의해 보정할 수 없는 문제가 있다. 이 때문에 1990년경부터는 새롭게 디지털화상에 의해 터널 라이닝 표면을 직접 촬영하는 기술이 <표 1>과 같이 개발되어 왔다.

3.1.1 적외선·CCD카메라를 탑재한 터널검사차

(1) 박리검지

적외선카메라에 의한 박리검지 원리는 미리 인공적으로 터널벽면을 가열하고, 벽면이 식으려고 할 때 건전한 부분은 터널 라이닝 배면으로의 열전도가 높기 때문에 라이닝 표면온도가 급속히 저하함에 반해, 박리부분에 발생하고 있는 얇은 공기층이 라이닝표면으로의 열전도를 차단하기 때문에 라이닝표면의 온도저하가 약간 늦어진다. 이 때, 발생하는 건전한 부분과 박리된 부분의 온도차를 적외선 카메라로 촬영하는 것이다. 이 원리를 그림으로 나타내면 <그림 13>과 같다. 이러한 개념을 기계식 자동화하여 <사진 7>과 같이 터널 내의 본선 상을 주행하며 검사차의 선두에 탑재한 히터에 의해 터널 라이닝 내면을 강제 가열한 후, 후방에 탑재한 적외선카메라로 촬영하여 터널 라이닝 내면깊이 50 mm까지의 박리·누수를 자동검출 하는 장치도 개발되어 실용화에 이르고 있다.

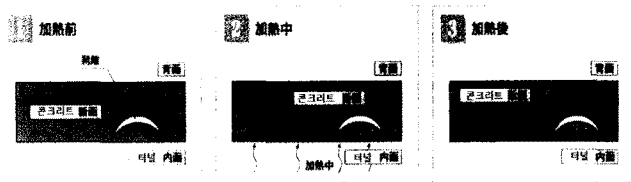
(2) 누수·균열검지

육안조사를 대신하는 변상(變狀)검지기술은 일부 사업자에 의해 이미 실용화되어 있고, 일본의 에이단(營團)지하철은 CCD카메라에 의해 터널벽면을 촬영하였다. CCD카메라는 적외선카메라와 같이 후방의 카메라차에 탑재하여, 적외선카메라와 동 위치를 시속 2 km로 폭 2 m의 띠상으로 촬영한다. 검지할 수 있는 균열폭은 1 mm 이상이다.

(3) 화상처리

적외선화상과 CCD화상을 각각 독립해서 컴퓨터처리하고 있다. 전자의 경우는 휘도레벨이 높은 곳을 박리로 판정하

그림 13. 적외선카메라에 의한 박리검지원리



고, 후자의 경우는 균열추출과 그 이외의 변상을 별도 실시하여 최종적으로 종합적인 변상검출을 하고 있다.

(4) 건전도 판정

구조물의 건전성에 크게 영향을 미친다고 생각되는 「누수」, 「균열」, 「박리」 3종류의 변상을 평가대상으로 하여, 3종류의 변상정도를 나타내는 속성 데이터에 대해 평가점수를 설정해 위험성에 가중치를 두어 각 속성 데이터의 평가점수 합을 취함으로써 각종 변상의 건전성을 판정하는 것으로 하였다. 1999년 1월부터 시스템이 완성되어 지하철 영업선 터널에서 데이터의 취득을 실시 중이지만, 각 양각색의 터널형태에 의해 데이터에 불충분한 부분도 발견되고 있기 때문에, 향후에는 전선(全線)의 터널데이터를 측정하면서 기능개선을 피하여 항상 건전하고 안전한 터널을 유지하기 위해서 유효하게 활용하여 갈 계획이다.

이러한 문제를 개선하기 위한 방법의 일환으로서, 검사정도를 향상시키기 위한 보조공법을 채택하여 터널 라이닝 표면의 얼룩 또는 오염부분을 고압수로 세정하는 공법 및 육안관찰용 가설비계를 대체할 수 있는 터널 검사전용 작업차도 <사진 8>와 같이 기계화되어 사용되고 있다.

3.2 레이저법에 의한 자동 균열해석시스템(도로, 터널 병용)

3.2.1 배경

포장도로나 터널라이닝 표면, 교량상판 등의 아스팔트와 콘크

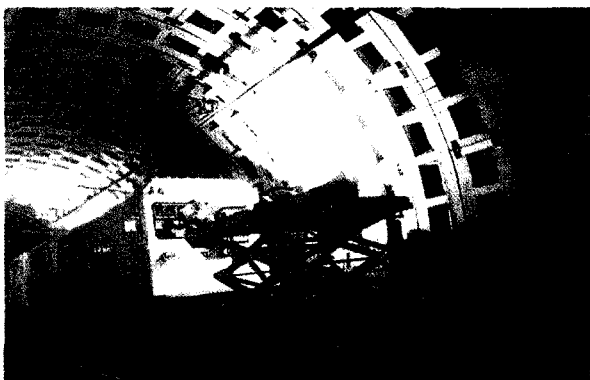


사진 7. 적외선·CCD카메라를 탑재한 터널검사차³⁾

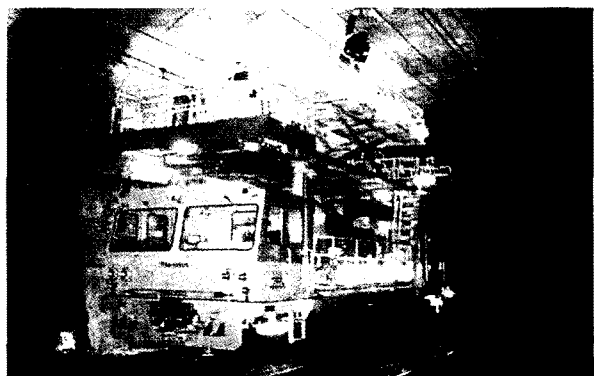


사진 8. 터널 검사전용 작업차³⁾

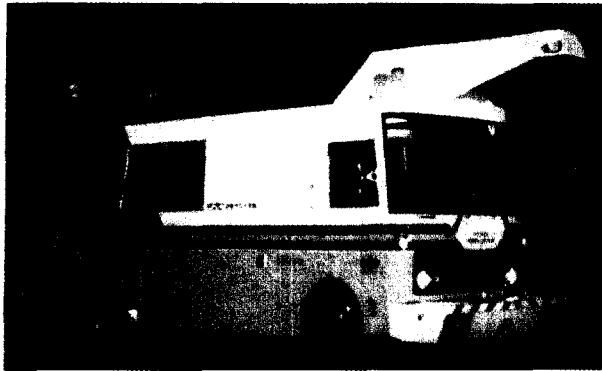


사진 9. 레이저계측차⁴⁾

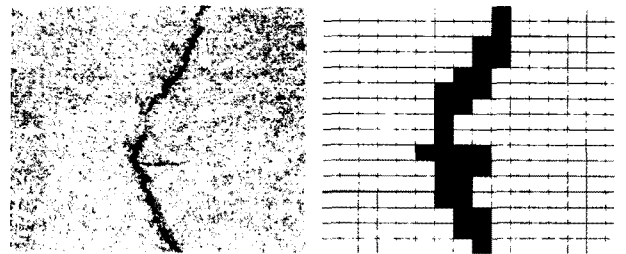
리트 구조물의 손상파괴를 미연에 방지하여 오랜 동안 구조물을 유지시키기 위해 적절한 손상정보의 수집과 평가가 중요시 되고 있다. 손상조사항목의 하나로서 균열조사가 있고, 이 조사를 수행하기 위한 장치로 <사진 9>와 은 레이저와 비디오기술을 응용한 계측차가 있다.

계측차는 탑재된 계측장치에 따라 포장이나 구조물의 표면에 레이저광을 횡단 방향으로 주사(走査)하여 표면성상영향에 따라 변화된 반사광량을 광센서로 검출해 전기신호로 변환해서 자기 테이프에 기록해 가는 것으로, 차량주행에 의해 연속해 2차원 화상데이터를 구축할 수 있다. 그 후, 수록된 화상데이터를 디스플레이로 표시하고 시각판독에 의해 균열검출을 하지만, 평가자의 숙련도에 따른 결과의 변동과 재현성도 문제가 되고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 일본의 (주)코마츠(小松)제작소와 코마츠엔지니어링(주)에서는 아스팔트와 콘크리트 구조물의 화상으로부터 균열을 자동적으로 검출하는 연구를 수행하여, 가변슬릿법이 균열의 길이, 폭, 방향을 추출하는 유효한 방법인 것을 명확히 하였다. 바로 이 연구성과를 기반으로 균열추출처리를 행하는 전용기를 개발해 이미 실용화하고 있어, 본 시스템에 대하여 소개한다.

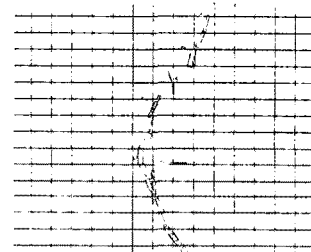
3.2.2 균열추출 처리방법과 처리전용기

계측차로 얻어진 화상데이터는 방대하다. 예를 들면, 도로폭 4m의 일반도로에서 주행거리 60km의 계측을 행한 때의 데이터량은 240기가바이트에 이른다. 이와 같은 방대한 화상데이터로부터 고속으로 균열을 검출하기 위해서는 유효한 데이터를 적은 정보로 압축하는 것이 좋다. 가변슬릿법은 균열의 부분적인 길이, 폭, 방향이라고 하는 유효한 특징량을 추출할 수 있고, 후단의 인식부에서는 압축된 정보만 취급하기 때문에 고속처리가 가능해 진다. 균열추출 처리전용기는 처리단위 512×512화소 화상으로부터 균열이 존재한다고 생각되는 영역을 고속으로 판정하는 1차 판정처리, 균열의 부분적인 길이, 폭, 방향을 추출

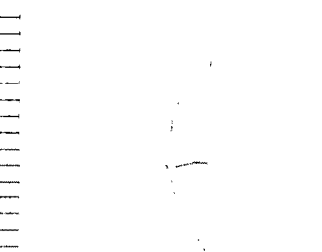


(a) 원화상

(b) 1차판정처리결과



(c) 세그먼트추출처리결과



(d) 인식처리결과

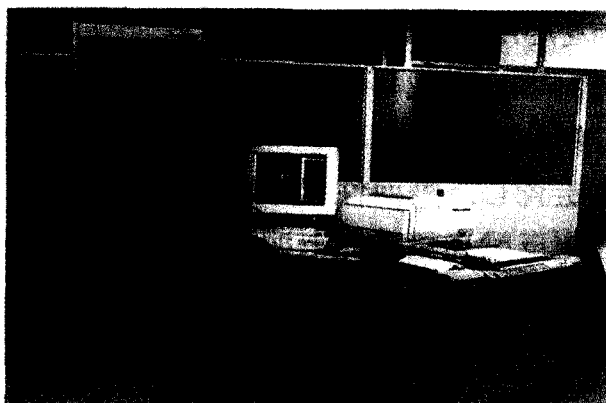
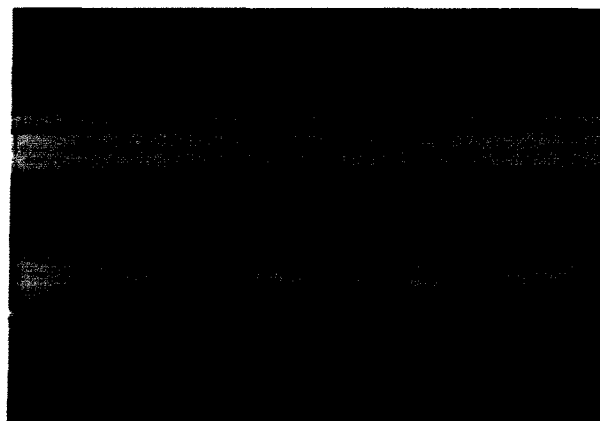
사진 10. 화상처리 프로세스⁴⁾

하는 세그먼트추출처리, 세그먼트의 연속성으로부터 균열을 판단하는 인식처리의 3가지 프로세스로 되고, 각 프로세스는 모듈화 되어 병행처리에 의한 고속처리를 가능하게 하고 있다. 전용기는 포장도로를 시작으로 교량, 터널 등의 평가시스템으로 활용할 수 있고 범용성을 가지고 있다.

<사진 10>은 512×512화소의 화상을 균열추출 처리전용기로 처리한 때의 각 프로세스마다의 결과이고, 원화상은 실제 아스팔트노면의 화상이다. 1차 판정처리는 32×32화소영역(슬릿이라 부른다) 중의 균열이라 생각되는 선분 정보를 고속으로 판정한다. 검은 부분이 선분 있음으로 판정된 슬릿이다. 이 후, 1차 판정처리에 의해 판정된 슬릿에 대하여 가변 슬릿법에 의한 처리에서 세그먼트데이터를 추출하고, 인식처리에 의해 선으로서 균열을 복원한다.

3.2.3 평가시스템

<사진 11>에 나타난 평가시스템에서는 화상전체를 균열추출 처리전용기로 자동처리 하는 경우와 미리 화상을 디스플레이로 표시하고 필요한 범위를 선택하여 그 범위를 자동처리 하는 반 자동처리를 선택할 수 있다. 선택 후, 512×512화소 크기의 화상마다 전용기에 전송해 자동처리 한다. 그러나 균열추출 처리전용기는 모든 화상에 대응할 수 있을 뿐 아니라, 노면의 얼룩이나 오염 등에 의해 균열과 구별이 어려운 점과 얇은 균열과 같은 경우는 검출오차의 원인이 된다. 그래서 평가시스템에서는 전용기로 검출 처리한 결과를 화상에 겹쳐 표시시켜 사람의 시각에 의해 대화 수정하는 기능을 갖추고 있다. <사진 12>는 가시스템

사진 11. 평가시스템⁴⁾사진 12. 균열전개도⁵⁾

으로 처리한 결과를 화상 상에 겹쳐 표시한 것으로 균열을 폭별로 색 지워 출력시킨 것이다. 특히, 종래의 시각관독에서는 해석하기 어려운 균열폭을 정확하고 용이하게 출력할 수 있다.

4. 결 론

지금까지 일본에서 연구되고 실용화 되고 있는 최신의 교량 및 터널 구조물의 유지관리 계측기술을 철도 시설물을 중심으로 소개하였다. 일부분의 기술은 이미 국내에서도 활발히 연구되고 있지만, 본격적으로 현장 구조물에 대해 기계식 자동화 시스템으로서 다각적으로 적용되는 사례에까지는 아직 충분히 미치지 못하고 있다. 구조물의 효과적이며 효율적인 유지관리는 한 국가의 경제적 국력을 좌우 할 사회간접자본을 가장 효율적으로 운용할 수 있다는 측면에서 그 중요성은 매우 크다 할 수 있다. 이와 같은 중요성을 인식하여 선진각국에서는 이 분야의 연구사업에 막대한 예산과 역량을 투입해 그 성과와 결실을 하

나하나 이루어나가고 있다. 따라서 우리도 이와 같은 경쟁에서 IT강국이라는 명성에 걸맞게 보다 발전된 현장 자동화 시스템 기술개발에 더욱 진념할 필요가 있다. 본 자료가 그러한 발전에 다소나마 유익한 정보로서 도움이 되었으면 한다. □

참고문헌

1. 關雅樹, “新幹線構造物における新しい計測技術の現状と今後の展望”, 콘크리트工學, Vol. 44, No. 5, 2006, 5, pp. 18 ~ 21.
2. 上半文, “構造物診断作業の効率化を目的とした微動の非接觸測定技術”, 콘크리트工學, Vol.44, No.5, 2006, 5, pp. 77 ~ 81.
3. 田川謙一, 伊藤裕一, 關雅樹, “鐵道トンネルの検査の自動化について”, 콘크리트工學, Vol.44, No.5, 2006, 5, pp.82 ~ 85.
4. 寺田啓治, 船見尚彦, 自動ひびわれ解析システム, 土木學會誌, Vol. 83, 1998, 3, pp. 25 ~ 26.
5. 한국시설안전기술공단, “콘크리트 및 강재 비파괴시험평가·검증방안연구 보고서”, 2002, 12, pp. 429 ~ 434.

원고 모집 안내

「한국콘크리트학회지」는 콘크리트 관련 학문과 기술에 대한 정보를 제공하기 위해 발행되고 있습니다. 본 학회지를 통해서 자신의 연구 결과, 경험한 사례 등을 콘크리트 관련 기술자들과 함께 나누길 원하시는 분께서는 다음과 같은 형태로 참여하실 수 있습니다. 여러분의 육고를 기다리겠습니다.

- 원고 주제 : 포토에세이(사진, 서예, 시 등), 특집기사, 기술기사, 공사기사, 원로와의 대화, 해외번역기사, 해외연구소 소개, 국제학술대회 참가기, 현장탐방, 논단, 우리회사소개 등
- 원고 분량 : 4매 ~ 6매 내외(A4용지 기준)
- 제출처 : TEL : (02)568-5985~7 FAX : (02)568-1918 E-mail : kke@kci.or.kr

우리회사소개* 원고 모집

우리회사소개 코너는 우리 학회의 6,000여 회원 및 단체에게 회사를 홍보할 수 있는 기회입니다. 우리회사소개란에 소개하고자 하는 회사나 단체, 연구소, 벤처기업 등은 아래와 같이 원고를 투고하실 수 있습니다.(단, 지난 5년 동안 우리회사소개나 벤처기업소개란에 소개되었던 회사는 제외하며, 학회 특별회원사에게 우선권을 부여 합니다.)