

교량 상판 하부 안전점검 로봇개발

Development of Robotic Inspection System over Bridge Superstructure

남 순 성* 장 정 환** 양 경 택***

Nam, Soon-Sung Jang, Jung-Whan Yang, Kyung-Taek

요 약

도로를 통과하는 차량 통행량의 증가는 장기적으로 교량에 구조적인 손상을 유발시키기 때문에 교량의 유지관리 측면에서 심각한 문제로 대두되고 있으며 준공 단계부터 구조물의 유지관리에 대하여 관심을 기울이지 않으면 공용기간 중 만족할 만한 기능의 유지 및 확보는 불가능하다. 또한, 공용 중에 균열이나 변형 등과 같은 열화손상을 조기에 발견하여 기능상의 장애나 사고를 미연에 방지하기 위해서는 정기적인 점검을 통하여 유지관리를 실시해야 하나 이에 관한 관심도가 상대적으로 낮아 구조물 유지관리에 대한 새로운 인식의 전환과 이와 관련된 기술개발이 절실히 요구되고 있다. 본 연구는 현재 굴절차 또는 점검차에 점검 인력이 직접 탑승하여 실시하는 육안조사를 대체하기 위하여 작은 카메라가 부착된 로봇(Machine Vision System)이 장착된 Linear Motion Control System을 교량 하부에 설치하고 작업자는 교량 상부에서 외관조사를 수행함으로써 점검자에 따라 주관적으로 점검결과가 도출되는 문제를 근본적으로 해결하고 점검시 안전성을 대폭 개선하며 화상에 접촉된 열화 손상 자료를 이미지 프로세싱 기법을 이용하여 객관적이고 정량적인 자료로 저장 및 제공함으로써 교량 유지관리시스템을 위한 데이터베이스를 구축하는데 기여할 수 있는 교량 하부 외관조사 자동화 시스템을 개발하는 데에 그 목적을 두고 있으며 본 시스템을 통하여 교량의 보수·보강 시기를 보다 객관적으로 산정할 수 있어서 현재 매년 기하급수적으로 늘어나는 교량의 보수·보강 비용을 상당히 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

키워드: machine vision system, linear motion control system, 굴절차, 교량 BMS, CAD 도면화

1. 서 론

도로를 통과하는 차량하중 및 통행량의 증가로 인해 발생하는 하중효과는 교량에 급격한 손상을 유발시키기 때문에 교량의 유지관리측면에서 심각한 문제로 대두되고 있어서 준공 단계부터 구조물의 유지관리에 대하여 관심을 기울이지 않으면 공용기간 중 만족할 만한 기능의 유지 및 확보는 불가능하다. 또한, 공용 중에 균열이나 변형 등과 같은 열화손상을 조기에 발견하여 기능상의 장애나 사고를 미연에 방지하기 위해서는 정기적인 점검을 통하여 유지관리를 실시해야 한다. 그러나, 지금까지 건설기술 개발은 설계 및 시공기술의 개발에 역점을 두어왔기 때문에 기존 구조물의 유지관리에 대한 관심도가 상대적으로 낮아 이에 대한 기술개발이 설계 및 시공기술에 비하여

낙후된 실정이며, 강구조물 뿐만 아니라 내구성이 반영구적인 콘크리트 구조물에서도 다양한 열화손상 요인에 의해서 각종 구조성능 저하 현상들이 빈번히 발생하고 있어 이에 대한 대책으로 구조물 유지관리에 대한 새로운 인식의 전환이 절실히 요구되고 있다. 따라서, 교량의 유지관리 업무를 경제적으로 수행하기 위해서는 유지관리의 과학화와 체계화가 중요하며, 현재 발달하고 있는 컴퓨터, 측정·계측장비, 구조안전성 평가기법, 보수·보강공법 등을 바탕으로 하여 향후에는 하나의 의사결정과정에서 해결할 수 있는 합리적인 유지관리체계의 도입 및 운영이 불가피하다고 판단된다.

본 연구는 현재 굴절차 또는 점검차에 직접 교량진단 기술자가 탑승하여 육안에 의해 점검하는 시스템을 작은 카메라가 부착된 로봇으로 대체함으로써 점검인력 및 안전성을 대폭 개선하는 한편 점검자에 따라 주관적인 결과가 나오는 것을 정량적인 자료를 제공하여 정확하고 안정적이며 경제적인 점검을 하기위한 것이다. 또한 장비가 소규모화됨으로서 점검차로 인한 교통통제의 필요성을 제거하는 부수적인 효과도 기대하고 있다.

* ㈜이제이텍 대표이사, 공학박사

** ㈜이제이텍 부장, 공학박사

*** 대림대학 메카트로닉스과 부교수, 공학박사

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술연구개발사업 연구비 지원에 의한 연구의 일부임. 과제번호 목적 A-10.

2. 로봇 시스템 구성 및 특징

2.1 시스템 구성

본 시스템은 그 응용에 있어 그림 1~그림 3과 같으며 구성상 다음의 2가지 시스템의 조합으로 나눌 수 있다.

① 외관조사용 카메라 시스템: 조사용 카메라의 focus와 zoom lens의 조정기구부에 엔코더나 포텐서미터를 설치하고, 대상 균열부에 대하여 카메라의 zoom과 focus를 조정함으로써 focus와 zoom lens의 센서에서 출력되는 전기적 신호를 받아 micro-processing 기술로 처리하여 구조물의 균열 및 폭을 산정하는 기능을 수행한다.

② 교량 외관조사 시스템: 조사대상 경간 양단의 교각 부위에 레일 또는 강선을 교축 방향으로 설치하고, Linear Motion Control System을 설치하며, 그 위에 위치제어가 가능한 카메라를 부착한 후 원하는 지점의 영상을 유선 및 무선으로 전송하여 이를 수신장치인 컴퓨터로 판독하는 기능을 수행한다.

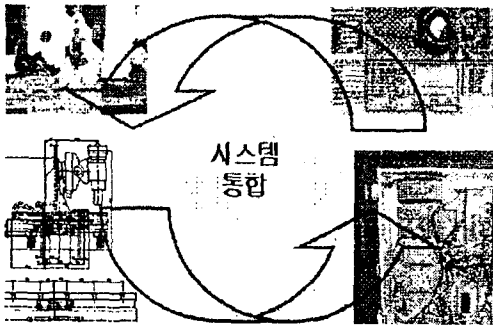


그림 1. 교량 외관조사 자동화 시스템의 개념도

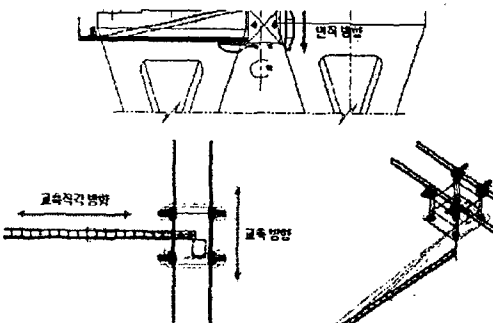


그림 2. 이동식 점검차형 교량 외관조사 시스템

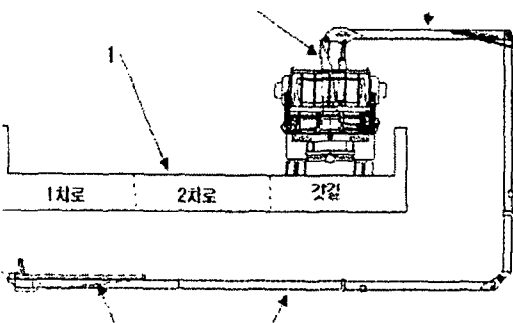


그림 3. 굴절차형 교량 외관조사 시스템

2.2. 구동원리

2축 스칼라 로봇에 상하 및 좌우 회전제어가 가능한 팬 구동부(pan drive)와 틸트 구동부(tilt drive)가 부착된 카메라를 설치하여 교량하부의 상태를 영상으로 유선 또는 무선으로 전송하고, 전송된 영상을 비전 프로그램을 이용하여 영상 처리하는 방식으로 외관검사를 수행하게 된다. 2축 스칼라 로봇은 아래 그림과 같이 직선이송용의 1축 모터와 회전이송용의 2축 모터로 구동하는 것을 기본으로 하며 제어방식은 유선 또는 무선방식을 택하여 작업자는 현장에서 리모콘을 이용해 원하는 정확한 위치로 신속하게 카메라를 이동시키며 작업시간을 단축시킬 수 있게 한다.

카메라 줌 시스템은 고배율 줌렌즈를 채용하고 있으며, 팬 구동부와 틸트 구동부를 이용하여 좌우 360도, 상하 90도 회전이 가능해 교량 하부에서 모든 방향으로의 검사가 가능하다. 또한 카메라 줌 시스템에는 영상 송수신회로가 있어, 촬영한 영상을 모니터링 장치로 사용되는 컴퓨터에 유선 또는 무선으로 전송하고, 전송된 화상은 컴퓨터에 내장된 비전 프로그램에 의하여 영상처리를 거쳐 균열 폭 및 길이를 산정하며, 영상자료는 비디오나 영상파일로 컴퓨터에 저장시키어 추후 검사결과와 비교분석이 가능하도록 한다(그림 4. 참조).

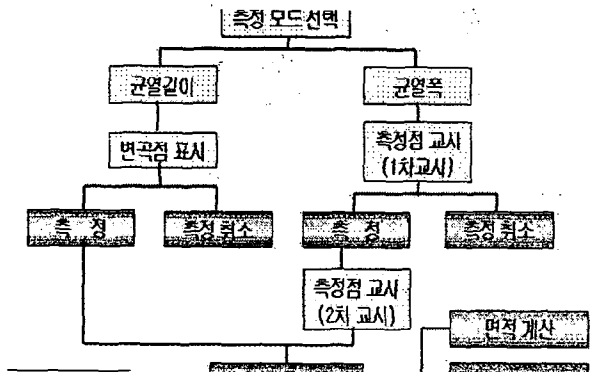


그림 4. 시스템 프로그램 구성도

균열부의 길이와 폭을 산정하기 위해서 화상 데이터의 1개의 픽셀 크기를 결정해야 하는데 이는 카메라의 줌과 포커스관련 렌즈를 구동하는 직류모터에 엔코더나 포텐서미터 등의 센서를 달아 두 센서의 출력을 제어기에 전송하여 사전에 보정한 데이터를 이용하여 프로그램 상에서 자동으로 단위 픽셀의 크기를 결정하고 이에 따른 균열의 폭과 길이를 산정하게 한다.

2.3 시스템 특징

머신 비전 시스템(Machine Vision System)은 교량하부 외관조사 자동화시스템의 핵심 부분으로서 다음과 같은 특징이 있다.

- Computer Vision System에 의하여 균열의 폭 및 길이를 객관적으로 산정할 수 있다(균열 0.1mm/(2~5m) 측정

가능).

- 리모콘으로 조작함으로써 최대 접근을 실현이 가능하다.
- 측정된 결함 위치를 영상파일로 저장함으로써 결함정보의 객관적인 자료화가 가능하다.
- 작업자는 안전한 위치에서 카메라부를 이송시킴으로써 작업의 안전성을 최대한 확보할 수 있다.
- 현장작업 인력을 최소화하여 경제성을 제고할 수 있다.

3. 개발내용

3.1 머신 비전 시스템

자체 개발한 머신 비전 시스템은 그림 5와 같이 팬·틸트 드라이브, 줌 렌즈, CCD 카메라, 콘트롤러 및 균열 폭 및 길이 측정 프로그램으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 현장 적용을 위한 성능 개선을 위해 카메라 2대를 추가 부착하여 균열 폭 및 길이 측정시 효율성을 배가할 수 있도록 수정·보완하였다.

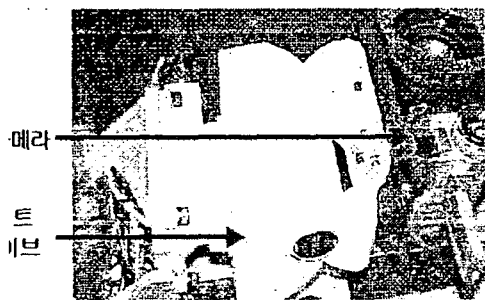


그림 5. 카메라부

3.2 Linear Motion Control System

그림 6과 같이 머신 비전 시스템을 장착하고, 교축직각 방향을 이동하면서 점검할 수 있도록 하는 부분이다. 본 연구에서는 왕복 2차로 규모의 콘크리트 교량을 점검할 수 있도록 현장 적용성을 고려하여 개발하였으며 사용자의 사전 프로그램 설정치 입력에 의해 자동으로 구동되도록 하였다.



그림 6. 기구부

3.3 이송기구부의 PLC 제어

카메라 비전 시스템을 교축 및 교축직각 방향의 원하는 위치로 이동시키는 물론 scanning을 원하는 영역을 교량의 기준점으로부터 좌표 설정하고, 각 방향의 증분치(Dx, Dy)를 입력하면 기구부가 자동으로 이동하면서, 카메라 비전 시스템이 작동하여 교량 하부 이미지를 캡처 및 저장할 수 있도록 그림 6과 같은 PLC 제어 시스템을 개발하였다.

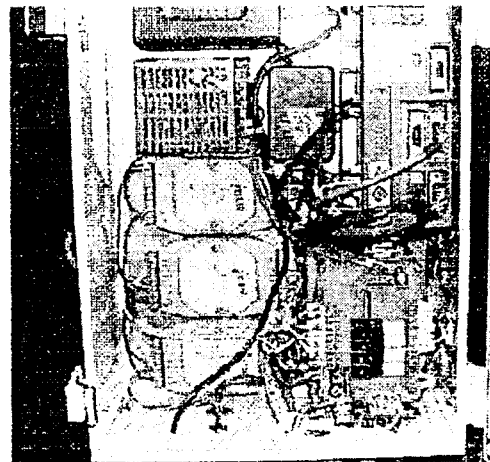


그림 7. 기구부 컨트롤러

3.4 교량 외관조사망도용 프로그램 개발 및 BMS와의 연계

그림 8 및 그림 9와 같이 본 시스템으로 영상 계측한 자료를 기존의 BMS와 연계하여 그 효율성을 높이기 위하여 측정된 단위 영상데이터를 합성하여 하나의 영상화면으로 조합한 뒤, 사용자가 scroll하며 대상 균열에 대한 정보를 입력할 수 있고 또한 이를 CAD 파일로 변환하여 기존의 BMS와 연계가 가능토록 하였다. 단지 기존의 BMS의 구성 및 입/출력 형식이 다양하여 특정 형식의 BMS에 적합하게 프로그램을 개발하기 보다는 그림 10과 같이 Auto-CAD 형식의 file로 저장할 수 있게끔 하여 기존의 BMS와 호환성을 제고하도록 하였다.

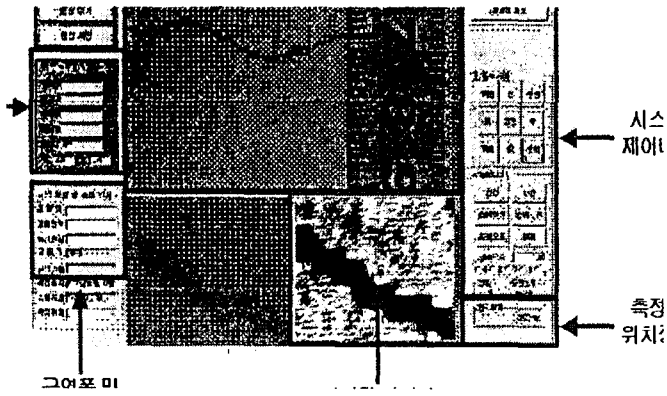


그림 8. 영상정보 처리 (1)

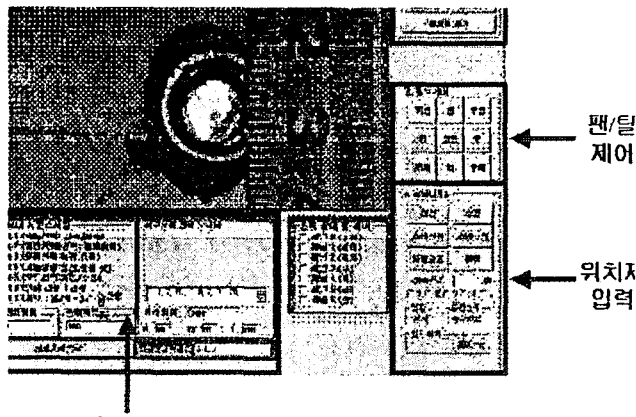


그림 9 영상정보 처리 (2)

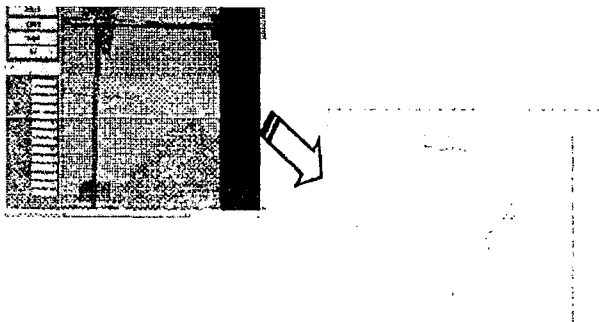


그림 10. CAD 도면화

3.5 현장적용을 위한 다양한 기구부 설계

본 연구에서 개발된 균열 검사용 vision system hardware와 software의 현장 적용성을 제고하기 위하여 대상교량의 형식별로 다양한 형태의 기구부 및 적용방법을 개발하고 이를 도면화하여 추후 다양한 방법으로 개발된 제품을 응용토록 하였으며 본 연구에서는 검사대상 교량의 형식 및 환경에 따라 다음과 같은 경우의 적용방법을 개발하였으며 이를 도면화하여 향후 제작이 가능토록 하였다.

- 레일을 이용하는 경우
- 케이블 위를 이동하는 소형 로봇을 이용하는 경우
- 4절 링크를 채용한 굴절차를 이용하는 경우

- 강교의 외관검사에 적용하는 경우

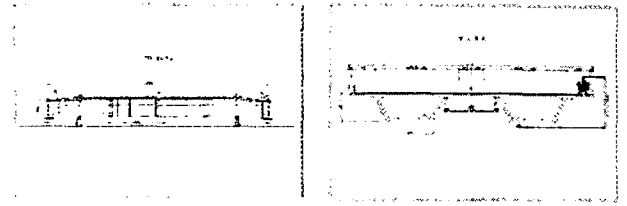


그림 11. OO대교 적용설계 예 (1)

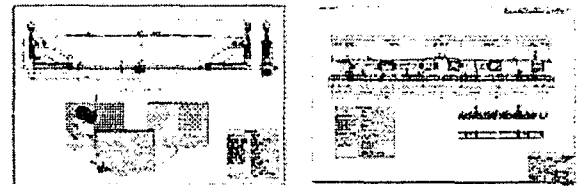


그림 12. OO대교 적용설계 예 (2)

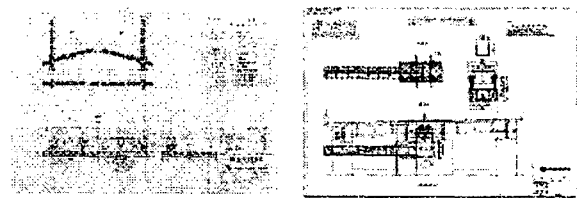


그림 13. OO교 적용설계 예

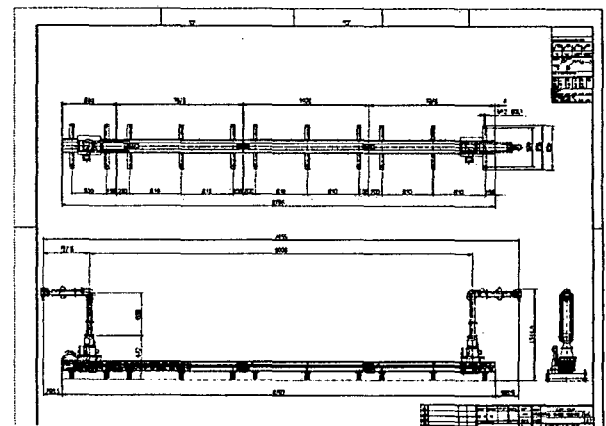


그림 14. 스크라 로봇

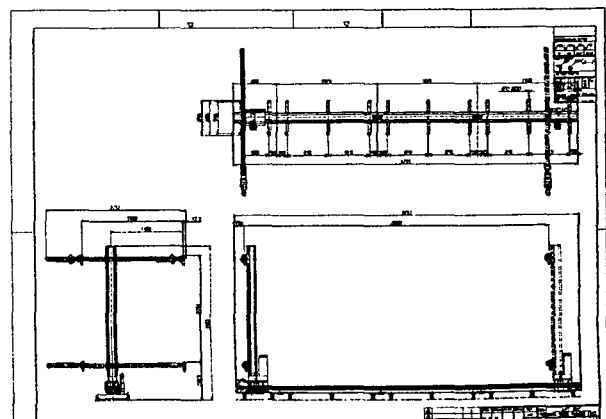


그림 15. 직교좌표 로봇

4. 기대효과

4.1 기술적 측면

고도의 산업사회를 맞이하여 대부분의 생산시설이 자동화되어 가는 추세에 있는데 반하여 건설업의 생산품은 다종다양하여 건설자재 및 구조물의 규격화, 공장 생산화가 어려운 점 등의 특성 때문에 직접, 간접적으로 자동화의 기술개발에 많은 제약을 받아 자동화 추진이 늦어지고 있는 것으로 보인다. 그러나 자동화 기술은 생산성 향상 등의 직접적인 효과뿐만 아니라, 작업환경의 개선, 위험한 작업으로부터의 보호 등과 같은 사회적인 측면의 간접효과 때문에 그 필요성은 더욱 높은 것으로 판단된다. 본 연구개발로 인하여 기대되는 기술적 파급효과는 다음과 같다.

① 첨단 산업의 육성: 산업 자동화기술의 집합체인 종합 시스템으로 PLC 콘트롤 제어 시스템, Linear Motion Control System, Computer Vision System 등을 기반으로 하며, 자동화 요소 기술인 인버터, 엔코더, 포텐서미터 등의 센서 기술 산업과 같은 첨단산업을 육성한다.

② 교량관리 데이터베이스 구축: 본 연구는 Computer Vision System을 이용하여 교량의 결함 부분을 이미지 파일로 저장하고, 이를 자료화하여 교량의 이력관리 데이터베이스를 효율적으로 구축할 수 있도록 한다.

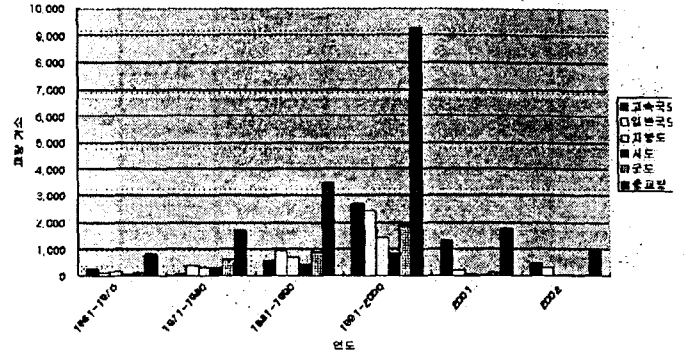
③ 건설분야 자동화(로봇)기술 활성화: 본 연구는 교량의 유지관리 업무 중 외관조사의 자동화 업무를 대체할 수 있는 국한된 기술이지만, 본 요소기술을 시공로봇, 보수·보강 건설로봇에 접목하여 건설현장의 위험요인을 최소화하며, 건설현장에의 자동화 기술 적용을 활성화한다.

④ 노하우 이용기회 확대: 본 연구는 Digital Image Processing을 요소기술로 하는 Computer Vision System으로 터널 내부의 상태조사, LNG 탱크 내부 검사 등과 같은 구조물의 외관조사를 수행하는데 본 기술의 노하우 이용기회를 확대한다.

⑤ 건설현장의 안전문화 정착: 외관조사를 육안점검에서 자동화(로봇)기술로 대체함으로써 효율성 향상 등의 직접적인 효과뿐만 아니라 작업환경의 개선, 위험작업으로부터의 보호 등과 같은 사회적인 간접효과 등을 들 수 있으며, 건설현장의 안전 시스템의 도입으로 안전 문화를 정착한다.

4.2 경제·산업적 측면

교량 구조물은 교량소통을 용이하게 하고, 불가능한 지역의 통행을 가능하게 하는 중요한 사회간접시설로서 1970년 이래로 계속하여 증가추세에 있다. 현재(2003년 기준) 교량개소는 18,174개, 총 연장 1,413,420m이며, 1970년 이래로 17,217개, 1,373,923m가 증가되었다. 연도별 교량현황은 그림 16과 같다.



| 연도별 합계 | 고속국도 | 일반국도 | 지방도 | 시도 | 군도 | 통교량 |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 53개 | 4,447 | 2,741 | 1,771 | 3,775 | 18,174 |

그림 16. 연도별 교량 현황

교량 구조물은 일단 건설되면 열화부위를 간단히 교체할 수 없기 때문에 구조물의 유지관리를 위한 주기적인 점검 및 진단은 대단히 중요하며, 효율적인 유지관리라는 측면에서도 기존 구조물의 정기적인 점검 및 진단을 실시하여 교량의 결함부위를 조기에 발견하여 보수·보강함으로써 교량의 수명연장을 도모할 수 있다. 현재 유지관리에 좀 더 관심을 기울여야 할 10년 이상 된 교량도 12,000여 개가 존재하며, 최근 10여 년간 교량 유지관리를 위한 일반국도 및 고속국도 보수 현황을 보면 표 1과 같다.

표 1. 교량 보수비 집행 현황 (단위: 백만원)

| 연도 | 일반국도 | | 고속도로 | | 총 계 | |
|------|--------|---------|-------|--------|--------|---------|
| | 개소 | 비용 | 개소 | 비용 | 개소 | 비용 |
| 1988 | 274 | 6,757 | 153 | 5,318 | 428 | 12,075 |
| 1989 | 204 | 10,712 | 244 | 7,896 | 448 | 18,068 |
| 1990 | 202 | 10,712 | 224 | 6,332 | 426 | 17,044 |
| 1991 | 284 | 11,182 | 233 | 10,325 | 517 | 21,507 |
| 1992 | 195 | 13,329 | 240 | 17,364 | 435 | 30,693 |
| 1993 | 558 | 11,157 | 1,177 | 16,647 | 1,735 | 27,804 |
| 1994 | 843 | 57,376 | 1,232 | 19,483 | 2,075 | 76,859 |
| 1995 | 11,157 | 120,345 | - | - | - | - |
| 1996 | 1,044 | 129,971 | 650 | 56,592 | 1,694 | 186,563 |
| 1997 | 2,001 | 141,088 | 1,450 | 44,061 | 3,451 | 185,149 |
| 1998 | 1,080 | 139,934 | 1,968 | 48,526 | 3,048 | 188,460 |
| 1999 | 11,020 | 134,189 | 1,375 | 42,096 | 12,395 | 176,285 |

표 1에서 보는 바와 같이 1999년 총 교량 보수비는 1,760여억 원에 이르며, 이것은 1988년에 비하여 14.6배 증가하였다. 이와 같은 추세는 교량의 증가와 교량의 연령이 증가함에 따라 더욱 더 가속될 것으로 사료된다.

본 연구는 교량의 점검 및 진단의 기본이 되는 육안조사를 교량하부에 외관조사 자동화 시스템을 설치하여 대체함으로써 교량의 일상점검을 용이하도록 함은 물론 교량의 열화부분을 조기에 파악하고, 데이터베이스를 구축하는데 기본적 자료를 제공하고, 보수·보강 시기를 산정하는 데에 기여한다. 따라서, 현재의 보수·보강 비용을 상당히 절감할 수 있을 것으로 기대된다. Steel Box 교량으로 왕복 6차로 500m 구간을 예를 들어 기존에 사용되고

있는 이동식 점검차와 외관조사 자동화 시스템을 적용하여 정기 점검을 수행할 때 필요한 인력 및 초기투자 비용을 개략적으로 비교하면 표 2와 같다.

표 2. 이동식 점검차와 교량 외관조사 자동화 시스템의 비교

| 구 분 | | 이동식 점검차(A) | 교량 외관조사 자동화 시스템(B) | 대 비 (B/A) |
|------------------------------|------|---------------|--------------------------|--------------|
| 초기 투자 비용 | 태일시공 | 310,000,000 | 250,000,000 | 81% |
| | 점검대차 | 238,000,000 | 200,000,000 | 84% |
| | 총 계 | 548,000,000 | 450,000,000 | 82% |
| 점검인력 (man·day) (고급기술자) | 외 업 | 28 | 16 | 57% |
| | 내 업 | 6 | 4 | 67% |
| | 총 계 | 34 | 20 | 59% |

주) 교량 외관조사 시스템의 경우 필요에 따라 굴절차를 대여하여 작업해야 한다.

5. 결론

교량 구조물의 경우 검사 부위가 넓고 접근성 및 안전성이 떨어지는 부위가 많다. 이러한 구조물의 특성은 육안 검사자의 행동양식에 많은 영향을 주며, 이로 인해 검사의 오류 및 누락 가능성이 매우 높다. 이러한 문제점 해결과 육안 검사자의 안전성 보장을 위하여 구조물 시각검사의 기계화 요구가 증대된다. 본 연구는 상기와 같은 문제점을 극복하기 위함이고, 대부분의 교량에 적용 가능하며 특히 다음과 같은 교량에 적용하면 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 전망된다.

- 고속철도 교량, 영종대교와 같은 연육교, 도심지 주간선도로 교량 및 철도교 등과 같은 운행차량이 빈번하거나 운행을 중단할 수 없는 교량

- PS 콘크리트 교량, 대하천 횡단교량, 해상 횡단 교량과 같은 장대 및 광폭 교량

- 산악지방 통과 교량, 고속철도 교량, 해상 및 수상 교량과 같은 점검 작업원 접근이 어려운 교량

또한 도심지 전력, 통신용 공동구, 고속도로 하부 통과 BOX 구조물등 주기적인 점검이 필요한 지하 BOX 구조물의 생력화와 검사의 정확성을 높이는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 교량 점검 편람, 1999.11, 한국건설기술연구원
2. 교량 유지관리 시스템 개발 및 운용에 관한 연구, 1999, 한국도로공사
3. 구조물 안전진단 및 성능평가 시스템 개발, 1998, 한국도로공사
4. 이성원, 터널의 외관조사를 위한 터널 스캐닝 시스템, 1998.6, 건설기술정보
5. 교량계측·모니터링 시스템의 중앙통합운영 체계 구축, 1999, 한국도로공사
6. 건설교통통계연보, 통계청
7. 교량현황조사서, 2003.05.23, 건설교통부
8. 시설물 안전관리에 관한 특별법, 1995.1 건설교통부
9. 구조물 안전 계측 및 수명평가 Workshop, 1999.1, 한국표준과학연구원
10. 서보모터 제어이론과 실습, 아경산업 자동화연구소, 도서출판 성안당, 2001.
11. Smith, J. I., Modern Operational Circuit Design, John Wiley & Sons, Inc., New York (1971)
12. Data Translation Product Handbook, Vol. 2, 2000
13. Jain, A.K., Fundamentals of Digital Image Processing, Prentice Hall, 1982.
14. Bollinger, J. G., Computer Control of Machines and Process, Addison Wesley Co., Inc., 1990
15. 2001 건설기술연구개발사업(연구과제명-교량 외관조사 자동화 시스템 실용화 연구)사업설명서, 이케이텍, 2003.

Abstract

The increase of traffic over a bridge has been emerged as one of the most severe problems in view of bridge maintenance, since the load effect caused by the vehicle passage over the bridge has brought out a long-term damage to bridge structure, and it is nearly impossible to maintain operational serviceability of bridge to user's satisfactory level without any concern on bridge maintenance at the phase of completion. Moreover, bridge maintenance operation should be performed by regular inspection over the bridge to prevent structural malfunction or unexpected accidents from breaking out by monitoring on cracks or deformations during service. Therefore, technical breakthrough related to this uninterested field of bridge maintenance leading the public to the turning point of recognition is desperately needed. This study has the aim of development on automated inspection system to lower surface of bridge superstructures to replace the conventional system of bridge inspection with the naked eye, where the monitoring staff is directly on board to refractive or other type of maintenance vehicles, with which it is expected that we can solve the problems essentially where the results of inspection are varied to change with subjective manner from monitoring staff, increase stabilities in safety during the inspection, and make contribution to construct data base by providing objective and quantitative data and materials through image processing method over data captured by cameras. By this system it is also expected that objective estimation over the right time of maintenance and reinforcement work will lead enormous decrease in maintenance cost.

Keywords : machine vision system, linear motion control system, refractive vehicle, BMS, CAD image processing