

## 고속주행을 고려한 터널 및 사면의 계측시스템 분석 및 개선 방안 연구

### Analysis and development of measurement systems for tunnels and slopes under a high velocity

정재훈<sup>1)</sup>, Jaehoon Chung, 박윤제<sup>2)</sup>, Yoon Je Park, 이래철<sup>3)</sup>, Rae-Chul Lee

<sup>1)</sup> SQ엔지니어링(주) 기술연구소 책임연구원, Chief in Charge, R&D Div., SQ Engineering

<sup>2)</sup> SQ엔지니어링(주) 기술연구소 연구소장, Head, R&D Div., SQ Engineering

<sup>3)</sup> SQ엔지니어링(주) 대표이사, President, SQ Engineering

**SYNOPSIS** : In this study, we dealt with an analysis and development of measurement systems for tunnel and slope structures under a high velocity. Deterioration of tunnel and slope structures becomes a critical issue in regard to both safety and economic concerns. Deterioration itself is inevitable, but condition assessment technology and nondestructive evaluation techniques could provide solutions to ensure public safety by means of detecting damage before serious and expensive degradation consequences occur. We reviewed the existing monitoring and maintenance systems of slopes and tunnels and more advanced directions, especially for highways under high-speed vehicles.

**Keywords** : Tunnel and slopes, monitoring and maintenance system, nondestructive evaluation techniques, high-speed vehicles

## 1. 서 론

본 연구는 고속주행 환경하에서 터널과 사면의 첨단 계측 및 유지관리 기법의 현황 및 문제점을 다각적으로 분석하고 향후 개선방안에 대하여 제안하였다. 현재 국토해양부에서 추진하고 있는 미래형 스마트하이웨이 건설 사업은 고속주행환경에 대한 안전성 확보가 필수적이므로 첨단 기법을 적용한 도로시설물의 계측 및 유지관리가 필요하다. 터널의 경우 구조물의 상태를 실시간으로 계측하고 전송하는 관리기법이 영동고속도로의 일부 구간 등에서 적용되고 있으나, 대부분은 아직도 수기형태의 문서로 관리되고 있다. 사면의 경우는 최근 산사태 등으로 인한 피해가 급증함에 따라 일본의 지방 국도에서 적용되고 있는 첨단 광섬유 센서 등을 적용하여 변위를 계측하고 관리하는 기법을 도입하여 적용하려는 움직임이 활발하다. 이러한 국내 및 국외 첨단 계측 및 유지관리 기법은 향후 센서 및 IT 기술의 발전과 함께 본격적으로 도입될 것으로 기대된다. 현재 국내 IT 기술 수준은 세계적이라고 할 수 있으나, 고속주행하의 도로시스템에 적용할 수 있는 관리전문가와 연계시스템은 미미한 수준이다. 따라서, 첨단 고속도로 시스템고속주행하의 터널 및 사면에 대하여 광섬유 센서를 적용한 국산 계측관리 장비 및 소프트웨어 개발이 바람직하다. 또한, BIM(3차원) 기반으로 도로시설물을 계측 관리하는 시스템이 도입되어 관심이 증대되고 있는 추세이다. 본 연구에서는 터널 및 사면에 대한 계측시스템의 현황 및 문제점을 분석하고 향후 스마트하이웨이와 같은 첨단고속도로 시스템에 적합한 계측시스템의 개선 및 발전 방안의 제시를 연구목적으로 한다.

## 2. 터널 계측시스템 현황

### 2.1 국외 현황

표 1은 외국의 대표적인 터널에 적용된 유지관리계측 시스템을 비교, 검토하여 정리한 것이다. 터널 유지관리계측의 수행방법은 모두 자동계측 시스템을 적용하고 있는데, 이는 공용중인 터널의 경우 터널 내에서의 작업시간이 제약을 받고, 인력으로 계측 자료를 일일이 획득하기가 어려운 이유 때문인 것으로 판단된다. 일본의 경우, 시설물 건설·관리에 관한 개별법에 따라 구분하여 관리하고 있다. 예를 들면, 도로법이나 하천법 등과 같은 법률에 따라 구분된 대상 시설물을 관리 주체가 각각 별도로 유지관리 하고 있다. 일본 도로공단의 경우는 토목구조물의 정기 점검 및 간단한 조치 등으로 나누어서 실시하고 있으며, 터널에 대한 안전점검으로는 일상점검, 1년 단위로 특수 장비를 활용한 정기 점검, 필요한 경우에 수행하는 특별 점검 등이 있으며, 대부분 자체 기술팀 혹은 전문 위탁조직에 의해 수행되고 있다. 세계에서 연장이 가장 길다고 알려진 세이칸 터널은 총연장 53.85km로 최심부는 해면 아래 약 240m (해저하 100m)에 위치하므로 큰 수압을 받는 해저부 총 연장 23.3km에 이르는 장대 해저 터널이다. 이런 특수한 환경조건 때문에 터널 구조물은 일본의 과학 기술력을 총 투입해 토압, 수압, 지진 등에 충분히 견디도록 설계·시공되었다. 그러나 최신의 기술과 최고의 설비를 이용하여 건설되었음에도 해저 터널의 특성상 유지관리의 필요성이 부각되었다. 세이칸 터널의 기능을 항구적으로 보존하기 위해 터널의 지질, 시공법, 용수, 지반주입, 상태변화 등의 전 건설기록의 분석과 장기적인 주변지반의 변화, 지진 등으로 인한 라이닝 변형, 용수량, 수질 등의 변화를 충분히 점검, 계측하여 그 경향을 해석·과각하여 정확한 판단과 적절한 조치를 취할 필요가 있기 때문에 이에 대한 영구 계측시스템이 도입되었다. 이러한 세이칸 터널의 유지관리 방법은 일본 뿐 아니라 금후 건설될 각종 장대 터널에도 중요한 자료를 제공할 것으로 판단된다.

표 1. 외국터널에 대한 유지관리계측 일반사항

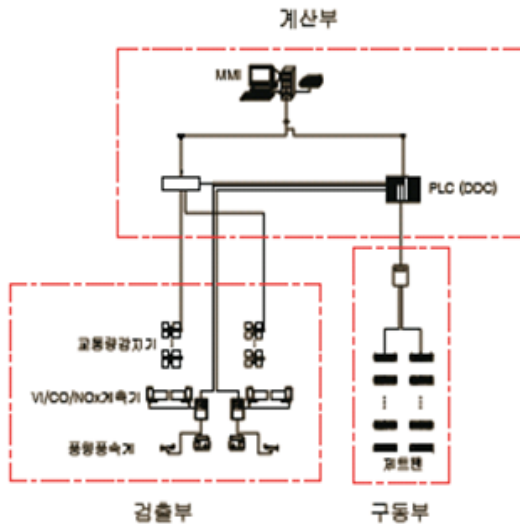
구 분		터널 특징	계측 항목	계측 시스템	적용계측기술	특 징
프랑스 지하철	Bercy역	하부터널시공	변위	자동계측	광변형센서	동적자료 획득
	Chatalet역	신교노선통과	변위	자동계측	광변형센서	관리기준 15±5mm
일본 세이칸 터널		해저터널	내공변위 용수량	자동계측		지진방재시스 템과 연계
홍콩 Eastern Harbor 터널		해저터널 인접터널굴착	변형율 (중방향/횡방향) 수직변위	자동계측	Strain Gage 침하게이지	3차원 변형측정

프랑스는 지방 공공건물과 토목시설물에 대한 안전점검 법령을 1979년에 처음 제정하여 육안점검, 특별안전점검, 상시점검으로 구분하여 관리하고 있다. 육안점검은 매년 점검을 실시하고, 특별 안전점검은 5년 주기로, 상시 점검은 3년 주기로 이루어져 점검보고서를 정부에 제출하도록 하고 있다. 예를 들면, 하루 평균 이용 승객이 약 230만명에 달하는 파리 지하철 구간 중 Chatalet 지하철 역사의 신규 노선증 설공사가 계획시 난공사 구간임을 감안하여 신규 노선공사로 인한 역사의 안정성 여부를 지속적으로 관찰하기 위해 광섬유센서를 이용한 영구적인 유지관리 프로그램이 채택되었다. 계측기 설치시점은 1992년으로 15m 광섬유 변형센서를 10개소에 설치하였고 지하철 운행시 자장 발생에도 불구하고 계측이 순조롭게 수행되었다. 관리기준치는 15m당 ±5mm를 설정하여 지속적으로 관리하고 있으며 만일 이 기준치를 초과하면 경고 조치가 자동적으로 작동하여 지하철 운행관리 중앙사무실에 통보되는 시스템이 채

택되어서 현재까지 기준치를 초과하지는 않았으나 압축량이 꾸준히 누적되고 있다. 광섬유 센서를 활용한 결과 계측치가 정밀할 뿐 아니라, 동적인 계측도 가능하여 지하철 운행시 터널을 포함하여 노반까지도 측정할 수 있어서 관리 성과가 매우 높은 것으로 평가되어 그림 1.2와 같이 계측이 수행되었다. 독일은 준공 직후 실시하는 안전점검과 하자보수기간인 5년 만료 전에 실시하는 안전점검, 1년 주기로 실시하는 구조물 시찰, 6년 주기로 실시하는 정밀점검, 정밀점검에서 발견된 지적사항에 대한 조치여부를 확인하기 위해 육안조사를 실시하는 정기점검으로 나누어서 실시하고 있다. 홍콩의 경우, 중심가인 구룡반도와 홍콩섬을 연결하는 자동차 및 지하철 전용 해저터널은 3개소가 건설되었으며 그중 동쪽의 해저터널인 Eastern Harbor 터널의 총 연장은 3,000m로서 수면에서 70.0m, 해저에서 30.0m 아래 위치한 함형구조물로 시공이 되어 있으며 총 공사기간은 10년이 소요되었다. 본 터널의 유지관리 계측 시행 동기는 본 터널 저면(약 20m)에 직경 2.0m의 하수로 터널이 공사 중에 있어 이 터널의 굴진, 발파, 굴착 등으로 인한 영향으로 공용중인 해저터널에 변위 발생이 예상되어 구조물의 영구 안정성을 도모하고 변위 발생을 사전에 감지하기 위하여 터널 계측을 계획하였다. 각 Gauge의 변위측정가능 범위는 0.001m에서 15mm까지이며 전체 240개의 gauge가 설치되어 Control Box에 온라인으로 연결되어 자동계측 시스템으로 측정되고 있다. 계측기기의 육안확인도 매일 밤 자정인 24시부터 다음날 새벽 04:00까지 수행하며, 이 시간 동안에는 매일 교통을 차단하여 원활한 계측관리를 수행하고 있다. 이러한 계측은 컨트롤 Box을 통해 종합상황실의 컴퓨터로 연결되어 각 시간별 계측 데이터를 출력하고 분석하여 터널의 변위 여부를 수시로 감지하고 있다. 계측수행은 캐나다 R.S.T 사에서 수행하여 데이터를 홍콩터널 유한공사에 제공하면 분석은 유지관리회사인 유한공사에서 수행하는 시스템을 구축하고 있다. 이와 같이 국외에서 유지관리에 적용되는 터널은 근접공사로 인하여 안정성의 저해가 예상되는 경우와 높은 수압 등이 작용하는 해저터널과 같이 특수한 경우에 국한하여 터널 유지관리계측이 실시되고 있음을 알 수 있다. 이것은 국내 터널에 대해 장기적인 안정성에 큰 문제가 없다고 판단되는 일반터널의 경우에도 최신의 자동계측시스템이 적용되고 있는 상황과는 크게 비교된다고 할 수 있다. 다시 말하면 국외 터널의 유지관리계측은 터널의 안정성에 심각한 영향을 줄 수 있는 경우에 한해서만 터널 유지관리계측을 실시하고 있는 것으로서, 이는 유지관리계측의 비용과 효용성을 고려할 때 매우 타당한 것으로 판단된다. 또한, 유지관리계측에 대한 전문회사가 이를 전담하여 계측 자료의 처리, 분석에 대한 전문성을 띠고 있음을 확인할 수 있었다.

## 2.2 국내 현황

국가 주요시설의 건설과 관련한 제반사항은 1987년에 제정된 건설기술관리법을 근거로 하여 운영되었으나 시설물의 준공 후 안전과 유지관리분야에 대한 인식부족 등으로 법적근거를 둔 완벽한 사후관리체계를 구축하지 못하였다. 또한, 기간시설의 확충과 물량위주의 주택건설 등 신규건설사업에만 주력하여 준공후의 관리에 소홀하여 왔고, 유지관리에 관한 법체계가 미흡함에 따라 각각의 관리주체가 관리한 결과, 전문적이고 체계적인 관리를 하지 못하고 있었다. 특히, 1990년 이후 발생한 대형공공시설의 안전사고(창선대교, 성수대교, 삼풍백화점 붕괴 등)는 이와 같은 취약한 관리체계를 그대로 보여준 것으로 이러한 체계 하에서는 항상 국민의 생명과 재산에 위협요소가 상존하게 되고 이는 정상적인 국민경제활동까지 위축시키고 있었다. 이러한 상황을 근본적으로 개선하고 시설물의 기능을 향상시키기 위하여 안전점검 및 유지관리에 관한 업무를 체계화하고 시설물의 관리자등에게 유지관리의 의무와 책임 등을 부여하며, 이를 전문적으로 수행할 수 있는 공신력 있는 전문기관을 육성하는 등의 내용을 담아 의원입법으로 시설물 안전관리에 관한 특별법을 제정·공포(1995년 1월)하게 된 것이다. 2008년 개정된 특별법에서는 교량을 비롯한 터널, 사면에 대한 유지관리 기준을 명시하였으며, 한국시설안전공단을 설립 운영하여 시설물의 안전 및 유지관리, 그와 관련된 기술의 연구·개발·보급 등의 업무를 지원하고 있다. 또한 국토해양부에서는 2004년 “터널 유지관리계측 기준 수립 및 통합운영 프로그램 개발 (한국도로공사 도로교통기술원 수행)” 연구용역을 발주하여 터널의 통합 유지관리 시스템 구축을 지원하고 있다.



(a) 시스템개념도



(b) 터널관리소

그림 1. 영동고속도로 유지관리 계측시스템

한편 영동고속도로 터널구간은 국내 최초로 통합유지관리 계측시스템이 구축되어 운영중이다(그림 1 참조). 영동고속도로 터널구간은 원격관리제어시스템이 구축되어 터널내에서는 광통신망, 관리소에서는 LAN 망이 운영되고 있다. 통합관리시스템은 고속도로전용 광전송망을 이용하게 되며, 터널 별 환기, 소방, 전력, 조명, CCTV, 비상방송, 교통 등 모든 시설이 각각의 서버시스템으로 통합되고 있다. 영동고속도로의 경우, 시스템구성에 필요한 하드웨어분야는 외국에 비하여 손색이 없으나 관리자의 운영을 지원하는 소프트웨어 분야는 상대적으로 많은 부분이 미흡한 실정이다. 특히 터널 화재발생시 감지 및 관리를 지원하는 프로그램 개발 필요하며, 현장관리 인력은 축소를 목적으로 하는 것보다는 효율적인 관리프로그램으로 현장을 지원할 수 있는 시스템 구축이 필요할 것으로 판단된다.

최근, 국가주요시설물 안전관리 네트워크 시범구축 및 운영시스템 개발 (2008, 한국시설관리공단) 연구사업단이 출범하여 각종도로시설물의 첨단 계측시스템 구축을 위한 연구가 진행되고 있다. 기존의 도로터널 계측센서는 반도체, 금속박막, 광학센서 등이나 설치 및 신뢰성 문제가 대두되어 최근에는 설치 간편하고 Loss없이 원거리 신호전송 가능한 광섬유 센서 적용을 목표로 하고 있다(표 2 참조).

표 2. 교량 및 터널에 사용되는 광섬유 센서 시스템의 종류 및 특징

	SOFO (Long Gauge)	DiTeSt(BOTDR)	MuST (FBG)
계측원리	센서 내 광섬유의 신축에 의한 버스의 변화 위치 계측	센서의 산란광의 주파수 특성이 변화하지 않는 회귀시간의 위치를 계측	프리즘광의 파장특성이 변화하지 않을때 계측
계측영역	광역형 0.25~30m	분포형 최장 25km	다점형 0.25~2.0m
분해능	해상도 0.002mm, 정밀도 0.2%	변형률: 0.0002% 온도:0.1도/거리:0.1m	해상도 변형률 0.2 온도:0.1도
측정시간	7초이내(Static), 동시(Dynamic)	5초~2분 (Static)	0.02초(Static), 동시(Dynamic)
적용분야 및 특징	유무선 및 인터넷을 통해 데이터 취득 가능, 모든 구조물의 시공 중 및 유지관리 계측용으로 사용가능	센서의 길이가 매우 길어서 터널 및 교량에 널리 적용됨.	FBG센서를 사용하여 변형, 변형률 및 온도를 측정하며 동시에 정적 및 동적 측정가능.

### 3. 사면 계측시스템 현황

국외의 광섬유를 이용한 연구는 2000년부터 일본 국토교통성과 일본 토목연구소가 주관이 되어 전국에 광섬유 센서를 설치하고 다양한 연구를 수행한 바 있으며, 현재에도 지속적인 기술개발이 시도되고 있다. 그림 2는 일본의 광섬유 센서를 이용한 절토사면 계측시설 설치 현황 및 절토사면에 설치된 광섬유 계측 시스템을 보여준다. 계측은 정량적이고 효과적으로 사면의 안정성을 판단하고 사면붕괴를 예측할 수 있는 중요한 수단이다. 일반적으로 현장에서는 계측결과를 단순히 누적된 수치로만 판단하여 그 활용성이 낮았으며, 측정된 계측값에 대한 신뢰도 또한 낮은 실정이다. 따라서 시간의 함수로 표현되는 계측결과를 계량적 통계기법을 적용하여 분석함으로써 시간에 따른 지반 변위값으로부터 변위의 진행과정과 붕괴시점을 사전에 예측할 수 있는 기법의 개발이 필요하다. 또한 현장에서 실시간으로 얻어지는 계측데이터를 실시간으로 평가하여 붕괴여부를 판단할 수 있는 시스템이 필요하다.



그림 2 일본 내 운용 중인 BOTDR 광섬유 센서 시스템

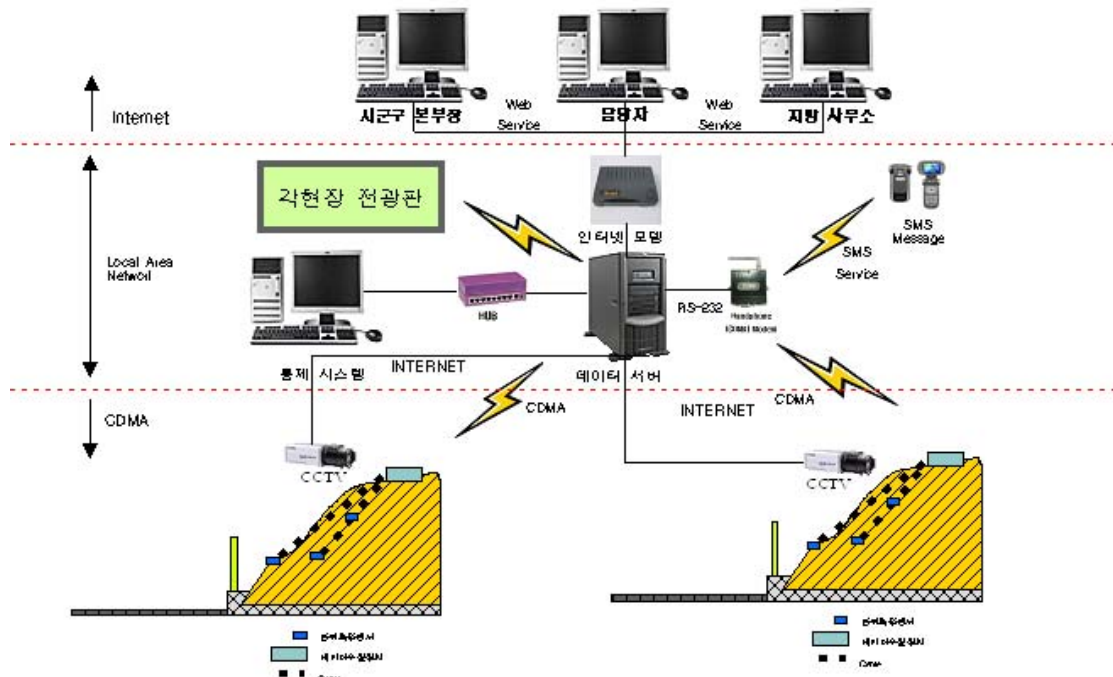


그림 3 휴대폰 및 무선 인터넷을 이용한 사면 유지관리 시스템 개념도

국내에서도 각종 자연재해로 인한 사면의 붕괴로 인한 사회 경제적 피해가 확산되면서 사면의 계측시스템에 대한 적용이 활발히 진행되고 있다. 대표적인 예가 2008년부터 진행 중인 국가주요시설물 안전관리 네트워크 시범구축 및 운영시스템 개발 중 사면분야에 대한 내용이고, 2005년부터 국토해양부가 주관하여 낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발을 위한 연구단이 설립되어 연구를 진행 중이다. 그림 3은 한국방재학회, 한국방재협회 및 시설안전기술공단이 공동으로 개발 중인 휴대폰 및 무선인터넷을 이용한 사면 유지관리 시스템 개념도를 보여준다. 그러나 아직까지 사면분야에 대한 첨단 유지관리계측시스템의 적용은 미미한 실정이다.

#### 4. 결 론

현재 터널 유지관리계측에 대한 최신기술의 지속적인 도입은 계측기 및 계측분석 소프트웨어의 호환성이 확보되지 않는 상태에서 설계나 시공주체에서 무분별하게 적용되고 있다. 이는 최근 터널 설계에서 심화되고 있으며, 이러한 문제를 방지할 경우 향후 터널 유지관리계측 업무의 비효율성을 야기하여 상당한 지장을 초래할 것으로 예상된다. 따라서 터널 유지관리계측 기술에 있어서 하드웨어인 계측기에 대한 일률적인 적용은 어렵다고 하더라도 계측자료를 처리 분석하여 터널의 안정성을 모니터링 하는 소프트웨어에 대한 기술적 통합은 가장 먼저 해결할 과제인 것이다. 최근 대부분의 터널설계에서는 종합적인 터널유지관리시스템 (Tunnel Management System)이 적용되고 있다. 그러나 이를 자세히 살펴보면 이에 대한 구체적인 방법이나 운영방안은 미흡한 실정이다. 이러한 터널 유지관리시스템 (TMS)의 선결문제 중의 하나는 바로 계측자료를 처리, 분석하는 소프트웨어의 호환성이 확보되어야 하며, 유지관리주체별로 이에 대한 통합화가 이루어져야 효율적인 터널유지관리가 이루어질 수 있다고 할 수 있다. 특히, 스마트 하이웨이 주행환경 하에서 이러한 통합적 터널 유지관리 체계는 매우 중요한 과제이다.

사면의 경우, 국내 암종별 특성에 따른 유지관리 기법을 체계화하고 대상사면의 지질, 수리, 수문, 불연속면 특성 등에 따른 붕괴 규모의 예측을 통해 적절한 계측기법을 적용할 수 있는 제도적 장치의 마련이 필요하다. 기존 사면 모니터링 기술은 주로 계측기 설치의 접근성이 고려되지 않은 유선계측시스템을 적용하는 경우가 대부분이기 때문에 설치 및 유지관리에 어려움이 많았으며 자동화 시스템 구축 상용 전원을 사용하는 시스템으로 구축되어 있어 전원공급이 원활하지 않는 곳에서 설치할 경우, 태양열 판넬 등의 부가적인 시스템이 필요하므로 소전력으로 가동하는 시스템의 구축이 필요할 것으로 판단된다. 본문에서 제시한 광섬유 센서의 적용은 사면의 계측시스템의 첨단화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 스마트하이웨이와 같은 고속주행환경하의 다양한 도로시설물의 원활한 계측 및 유지관리 시스템 구축을 위하여 BIM(3차원) 기반의 터널 및 사면 모델링을 통한 통합 계측유지관리 시스템 기술 개발을 제안한다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 07-기술혁신-A01)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

1. 건설교통부(2004), 도로절토사면 유지관리시스템 개발 및 운용.
2. 국립방재연구소(2004), 사면붕괴 감지 및 관측에 관한 연구 I (현장조사 및 국내외사례를 중심으로).
3. 국립방재연구소(2000), 사면붕괴 방지대책 제도화를 위한 기본방안 연구.
4. 한국도로공사(2001), 터널관리 국내외 실태조사 및 유지관리효율화방안 연구.
5. 한국도로공사(2004), 고속도로 절토사면 유지관리시스템 개발 연구.
6. 건설교통부(2008), 국가주요시설물 안전관리 네트워크 시범구축 및 운영시스템 개발.
7. 정도영, 백영인(2008), "BIM기반 비용·일정 통합관리 방안에 관한 연구", **한국건설관리학회** 학술발표대회 논문집, pp. 325-330