

광섬유센서 및 USN 기술의 지하역사 구조건전성 감시시스템 적용방안 연구

Introduction of the Structural Health Monitoring System with Fiber Optic Sensor & USN for Subway Station

신정열* 안태기** 이우동*** 한석윤****
Shin, Jeong Ryol Ahn, Tae Ki Lee, Woo Dong Han, Seok Yoon

ABSTRACT

A subway or an underground railway is one of the representative public transportations which lots of people take everyday. Then, subway station, which is also one of the very important public civil infrastructures, generally services for a long period of time. During the service time of stations, they are easily damaged from environmental corrosion, material aging, fatigue, and the coupling effects with long-term loads and extreme loads. Recently, civil construction work on the places near station often creates lots of damages to the station. As these damages accumulate, the performance of station degenerates due to the above factors. They would inevitably reduce the resisting capacity of station against the disaster; even they bring into the collapse of stations with the structural failure under long-term loads and extreme loads. And, if disaster such as earthquake, fire, etc. happens, it causes huge property damage and threatens the human lives. Because of these above reasons, the structural health monitoring system need to be developed for ensuring the safety of station. In this paper, the development directions of the structural health monitoring system with fiber optic sensor and USN for subway station are briefly described.

1. 서 론

지하철은 매일 수많은 도시민들이 이용하는 대표적인 대중교통수단이다. 그 중, 지하 역사는 오랜 시간동안 이용되는 중요 다중공공시설물 중 하나로서, 점차 대형화 및 복합시설 공간으로 전환되고 있는 추세이다. 그럼에도 불구하고, 지하 역사는 상당기간동안 외부 환경요인과 외부 하중, 건물의 노후화 등으로 인하여 공용연수 경과에 따라 결함 및 이상이 쉽게 발생할 수 있고, 최근 역세권 개발 등으로 인접 공사에 의하여 역사에 결함이 발생할 수 있는 등 역사구조물의 안전문제가 대두되고 있다. 이러한 결함의 누적으로 인하여 역사 본래의 구조적 성능이 저하될 수 있으며 재난 발생 시 큰 인명, 재산 피해를 야기할 수도 있다. 또한, 소방방재청에 따르면, 2007년 1월 국내 내륙지역인 평창에 발생한 규모 4.8의 지진 발생 이후 2008년 3월까지 국내에 24차례의 지진이 발생한 바 있다(도표1 참조).

* 책임저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 도시교통기술개발센터, 선임연구원

E-mail : jrshin@krrri.re.kr

TEL : (031)460-5716 FAX : (031)460-5749

** 한국철도기술연구원, 선임연구원

*** 한국철도기술연구원, 책임연구원

**** 한국철도기술연구원, 도시철도표준화연구단장, 수석연구원

이러한 가운데 실제 규모 5안팎의 중규모 지진이 70년대 말부터 10여 차례 발생되고 있는 것을 포함하여, 최근 들어 국내에 지진이 자주 발생한다는 점에서 사회적인 불안이 커지고 있다. 이에, 안전한 지하철의 운영을 위해서는 외부하중과 인접공사뿐만 아니라 지진 등의 재난 발생 전후의 지하 역사구조물의 구조 건전성을 상시 감시하여 이용승객의 안전을 보장할 수 있는 실시간 감시시스템의 개발이 필요하다.

한편, 2010년 u-사회로의 진입을 앞두고 가정, 교통, 환경, 의료뿐만 아니라 이러한 시설물 관리 등 다양한 분야에 정보통신 기술을 융합한 IT 컨버전스 기술이 도입되고 있는 추세이다. 현재, 역사구조물의 건전성 평가는 인력 위주의 일회성 육안검사 및 정밀안전검사에 의존하고 있으나, 구조물의 결함이나 이상을 센서를 통하여 스스로 감지하여 유지보수작업자에게 알려줌으로써 작업자가 결함에 대하여 적절하게 적시에 조치할 수 있도록 IT 융합기술을 활용한 상시 건전성 감시시스템의 개발 및 구축이 필요하다.

그러므로, 본 논문에서는 지하 역사구조물의 건전성 감시시스템 개발과 관련하여 광섬유센서와 유비쿼터스 센서 네트워크기술과 같은 IT 융합기술의 적용 방안과 향후 개발될 감시시스템의 기술규격(안)에 대하여 간략히 기술하였다.

도표 1. 국내 지진 발생 사례(평창 지진 이후, 소방방재청 제공)

날짜	장소	규모	날짜	장소	규모
2008. 3	강화도	2.7	2007. 7	강원도 태백	2.2
	전남 신안군	2.7	2007. 6	경북 울산해역	2.2
	경북 청도	2.0	2007. 5	경남 마산	2.1
2008. 2	경북 경주	2.2		충남 태안	2.5
2008. 1	충남 금산	2.2		경북 영양	2.4
2007.12	부산 해운대	2.7		경북 김천	2.2
2007.10	경북 예천	2.5		경북 울산해역	2.1
	강원 동해시	2.9		충북 영동	2.2
	경북 영덕해역	2.1		충북 보은	2.1
2007. 9	경북 영덕	2.2	2007. 3	경북 김천	2.9
	경북 영덕	3.0	2007. 2	부산 기장군	2.2
2007. 8	강원도 정선	2.4	2007. 1	강원도 평창	4.8

2. 감시시스템 구축 배경

2.1 지진재해대책법 주요 골자

국내 도시철도 역사구조물 특히, 70년대부터 건설되어 사용 중인 역사구조물 대부분은 지진에 대비한 내진 설계가 거의 이루어지지 않아 대형 지진이 아니더라도 평창 지진과 같은 중규모 정도의 지진

에도 상당한 붕괴 위험상태에 노출되어 있을 뿐만 아니라, 지진 이외 장기간에 걸친 열차 통과시의 진동과 역사 내·외부에서의 진동 등으로 구조물이 손상받을 수도 있다. 그렇기 때문에, 지진 등 재난 발생으로 인한 사회적 혼란을 막기 위하여 재난 발생시 재난 피해의 정확한 파악과 그에 따른 적절하고도 신속한 대처 등의 대응체계 마련이 절실히 필요한 상황이다.

그리하여, 2008년 3월 국가에서는 지진재해대책법을 제정하여 지진의 관측·예방·대비 및 대응, 내진 대책(耐震對策)과 지진재해를 줄이기 위해 필요한 사항을 규정한 바 있다. 본 법률의 주요 골자를 살펴보면, 도시철도 시설물과 같이 지진으로 인하여 심각한 피해가 우려되는 주요 시설물에 지진가속도를 상시 측정할 수 있는 시스템을 설치토록 하였으며, 지진 발생시 신속한 지진정보 수집과 분석으로 피해지역 및 정도 등을 파악하고 신속한 초기 대응이 가능하도록 지진재해대응체계를 구축·운영하도록 하였다. 또한, 지진 발생시 시설물의 계속 사용 가능 여부 등에 대한 위험도를 평가하도록 하였다.

그러므로, 개발을 추진 중인 역사구조물 건전성 감시시스템이 성공적으로 구축·운영된다면 실시간으로 지진 등의 진동 감시뿐만 아니라 역사구조물 내부의 피해지역 및 정도를 파악하여 신속한 대처가 가능하게 될 뿐만 아니라, 기존 정밀안전진단결과와 연계하여 역사구조물의 사용 가능 여부를 실시간으로 평가할 수 있어 본 지진재해대책법에 부합하는 시스템이라 할 수 있다.

2.2 역세권 개발

새로운 도시철도 노선이 들어서면, 역사를 중심으로 주택 건설이 많이 늘어나고 이로 인한 상권 개발 등 역세권 개발이 활발히 일어나게 되며 역사가 존재하는 한 역세권 지역내 개발은 지속적으로 일어나게 된다. 최근, 이러한 역세권 개발에 따른 역사 구조물 주변의 인접공사가 역사구조물에 미치는 안전 문제가 대두되고 있다. 아래 그림은 최근에 발생한 대표적인 공사장 붕괴 사고로서 역사 구조물 근처에서 이러한 붕괴 사고가 발생했다면 하루에도 수많은 사람들이 이용하는 역사 구조물의 안전에 큰 영향을 미쳤을 것은 자명하다.



(a) 경의선 가좌역 인접
공사장 붕괴(2007.6, 한국경제)



(b) 여의도 공사장 붕괴
(2007.9, 블로그/paulpaoro)



(c) 동탄신도시 공사장
붕괴(2007.11, 연합뉴스)

그림 1. 최근 공사장 붕괴 사례

3. 시설물 관리에의 IT 융합기술 현황

기존의 도시철도 역사 구조물의 건전성 평가는 계획된 인력 검사와 분석에 의한 감시체계여서 역사 구조물의 실시간 건전성에 대한 정확한 평가 정보의 획득이 어려운 실정이다. 그리하여 최근 구조물의 건전성 감시와 관련된 센서기술 등 스마트 기술에 대한 연구가 지속적으로 수행되어져 오고 있는데, 이러한 스마트 기술은 그림 2에서 보듯이 구조물의 결함이나 이상을 스스로 감지하는 센싱 단계, 신호가 전송되어 모니터에 현시되는 모니터링 단계, 지능적인 평가 프로그램에 의거 감시·감독자가 측정된 신호를 이용하여 구조물의 건전성을 평가하는 평가·분석 단계, 평가결과를 토대로 유지보수작업자가 결함 및 이상에 대하여 적시에 보수·보강하는 피드백 단계로 나뉘어 진다. 현재까지 일반 고층 건물이나 교량, 터널, 사면 등의 토목 구조물에 스마트 기술이 적용되기 시작하면서 이러한 시설물 관리에 IT기술이 융합된 컨버전스 기술 연구가 빠르게 발전하고 있다.

한편, 센서에 의한 물리량 센싱 작업은 지하 역사구조물의 안전성을 판별하는 기본적인 자료를 제공하기 때문에 측정 신호의 손실없는 전송과 신호결과에 대한 왜곡없는 즉, 신호의 신뢰성이 매우 중요하다. 지하 역사구조물의 경우 이러한 센싱 작업에의 문제점을 살펴보면, 넓은 역사구조물인 관계로 측정 센서가 광범위하게 설치되어야 한다는 점과, 측정된 신호를 신호처리장치까지 장거리 전송해야 하는 문제, 센싱과 전송 중에 전자기적 잡음, 온도 등 여러 외부환경 변화요인에 상시 노출되어 있는 문제 등이 있다. 최근 이러한 센싱 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 각광받고 있는 기술 중에 센서 네트워크 기술과 광섬유센서 기술이 도입되고 있다.



그림 2. 스마트 건전성 감시기술

3.1 무선 센서 네트워크 기술

기존 전기저항식 센서에 의한 측정 작업은 센서와 계측기기 간의 거리 제한 문제뿐만 아니라 1:1 와이어 설치작업 등 여러 번거로움이 있었으며, 전자기적 잡음 발생 우려와 계측기기의 제한으로 센서 수에도 제한을 받았다.

하지만, 최근 들어 센서와 계측기기간의 거리 제한과 와이어 작업의 번거로움을 해소하기 위하여 무선 센서기술이 도입되고 있으며, 광범위한 센서의 정보 전송을 위한 센서 네트워크 기술이 각광받고

있다. 이러한 무선 센서 네트워크 기술에 대한 세계 표준으로 Zigbee 표준과 Bluetooth 표준이 있다.

Zigbee 표준기술은 Bluetooth 기술에 비해 저가격, 초소형, 저전력 소모의 근거리 통신기술로서 일반적으로 그림 3과 같이 센서간 Mesh 네트워크 구조를 형성하여 센서의 정보 손실을 최소화 하며 IEEE802.15.4를 기반으로 반경 10~20m 내에서 센서간 250kbps 속도로 근거리 통신이 가능한 기술이다. 각 센서 노드들은 중계(릴레이) 노드를 이용하여 같은 네트워크를 구성하는 노드의 전파 도달거리 밖에 있는 다른 노드와 통신할 수 있어 장거리 무선 전송이 가능하다. 특히, 전력 소모량이 작고 가격이 싸서 향후 유비쿼터스 핵심 솔루션으로 각광받고 있는 기술 중의 하나이다.

한편, Bluetooth 기술은 Zigbee 기술에 비하여 다소 높은 가격이지만 이 역시 소형, 저가격, 저전력 소모의 무선 네트워크 기술로서, 근거리 송수신기를 장치에 직접 혹은 어댑터를 통해 탑재되어 무선 환경을 제공해 주는 기술이다. 무선험경은 세계적으로 이용 가능한 주파수 대역인 2.4GHz 밴드를 이용하며 720Kbps 정도의 데이터 전송 속도를 갖는다. Bluetooth 기술은 사용자 요구에 따라 다양한 전송 거리를 지원할 수 있는데 일반적으로 10m 반경내에서 좋은 정보 전송능력을 가지며 감도 좋은 AP를 이용한다면 개방 공간에서 100m까지 전송능력을 갖는다.

국내에서 영종대교 현수교 구간에 Zigbee를 이용하여 가속도와 변형률, 풍향 및 풍속에 대하여 감시시스템을 구축한 사례가 있으며, 이밖에 KTX열차 주행중의 진동 및 가속도, 해상의 등표구조물의 감시 등 다양한 구조물에 무선 네트워크 감시시스템을 구축한 사례가 있다. 국외에서는 Crossbow사와 Microstrain사에서 각각 Zigbee 기술을 이용한 무선 센서 네트워크 시스템과 MEMS기반의 무선계측기를 이용한 무선 네트워크 시스템을 교량 등의 구조물 모니터링시스템에 적용하고 있다.

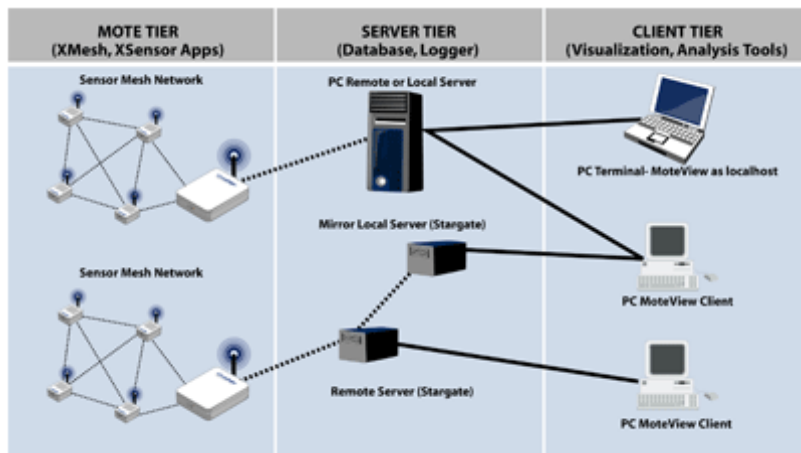


그림 3. 무선 센서 Mesh 네트워크 구성도(Crossbow사)



그림 4. 무선 계측기

(MicroStrain사)
228

3.2 광섬유 센서 기술

3.1절에서 언급한 바와 같이 기존 전기저항식 센서에 의한 측정 작업은 센서와 계측기간 1:1 와이어 작업이 번거로우며 광범위한 역사구조물 전체에 다양한 물리량을 측정하는 수십 개의 센서에 대한 와이어 설치작업은 거의 불가능한 실정이다. 또한, 전송 와이어간의 간섭뿐만 아니라 지하철이라는 특수성으로 인하여 전자기적 외부 환경에 신호가 왜곡될 수도 있다. 그리고, 일회성이 아닌 장기간의 지속적인 역사 모니터링을 위하여 센서의 내구성도 고려하여야 하며, 열차가 운영 중에도 모니터링이 되어야 하므로 센서 설치가 용이하고 전체 구조가 간단하여야 한다. 가장 중요한 점은 광범위한 역사구조물의 충분히 많은 지점에서의 여러 가지 물리량 측정과 함께 여러 항목을 동시에 계측이 가능하여야 한다.

그러므로, 최근 신호 모니터링에 각광을 받고 있는 FBG 광섬유센서는 (1)경제적이며, (2)크기가 작고 가벼우며, (3)매우 유연하여 설치가 용이할 뿐만 아니라, (4)전자기적 영향이 전혀 없고, (5)내구성이 뛰어나며, 무엇보다도 (6)다양한 물리량을 하나의 광섬유로 모두 측정이 가능한 즉, 멀티플렉싱(multiplexing)이 가능하다. FBG 광섬유센서는 광섬유에 삽입된 브래그 격자(Bragg Grating)는 특정 파장대 만의 빛을 반사시키며 다른 파장의 빛은 통과시키는데, 구조물에 변형 발생시 광섬유가 국부적으로 변형이 발생하게 되어 브래그 격자의 초기 파장과 다른 파장의 빛을 반사시키는 원리를 이용하는 것이다. 이러한 광섬유 브래그 격자를 하나의 광섬유에 여러 개 형성함으로써 가속도, 변형률, 온도 등 여러 개의 물리량을 동시에 측정할 수 있는 즉, 멀티플렉싱이 가능하다.

최근 국내뿐만 아니라 국외에서도 이러한 FBG 광섬유센서를 이용하여 교량, 터널, 고층 건물 등 다양한 구조물의 감시에 폭넓게 활용되고 있다.

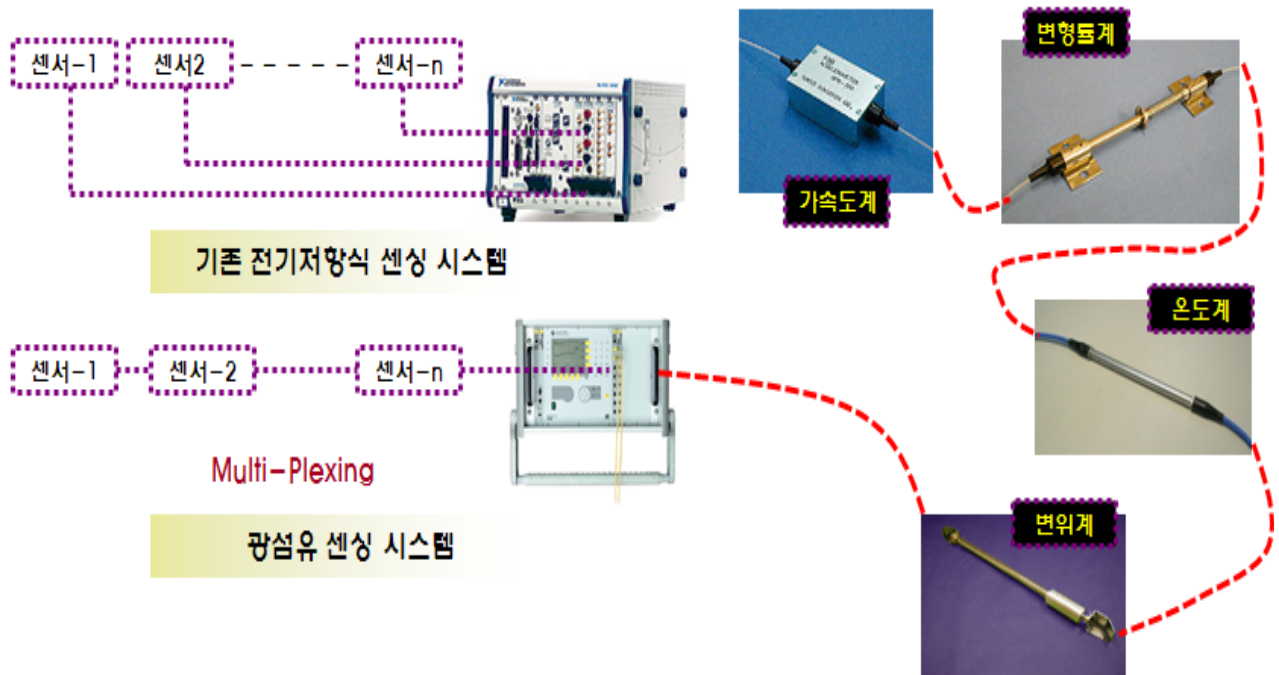


그림 5. 기존 전기저항식 센싱시스템 vs. 광섬유 센싱시스템(멀티플렉싱)

4. 감시시스템 구성도(안)

그림 6은 광섬유 센서와 센서 네트워크 기술을 활용하여 역사구조물의 건전성을 감시하는 시스템의 개략적인 구성도(안)을 나타내었다. 지진 등의 재난과 상시 열차진동 등에 대한 역사구조물의 건전성 감시는 FBG 광섬유센서를 이용하여 역사 전체를 감시하는 시스템으로 구성하였으며, 그때 그때 발생하는 역사 인접공사에 대한 역사의 건전성 감시는 해당 부분에 센서를 설치하고 무선 센서 네트워크 기술을 활용하여 신호를 전송받도록 시스템을 구성하였다. 이렇게 측정·전송된 신호는 역사 계측실을 통하여 서버에 저장되고 도시철도운영기관 자체망을 통하여 종합관제실과 역무실에서 역사구조물의 건전성을 실시간으로 감시하게 된다. 서버에 설치되는 지능형 역사 건전성 평가 소프트웨어를 통하여 역사 구조물에 이상 징후 발생시 경고음을 발생하도록 하여 적시에 조치가 이루어지도록 하는 일종의 지능형 감시시스템이다.

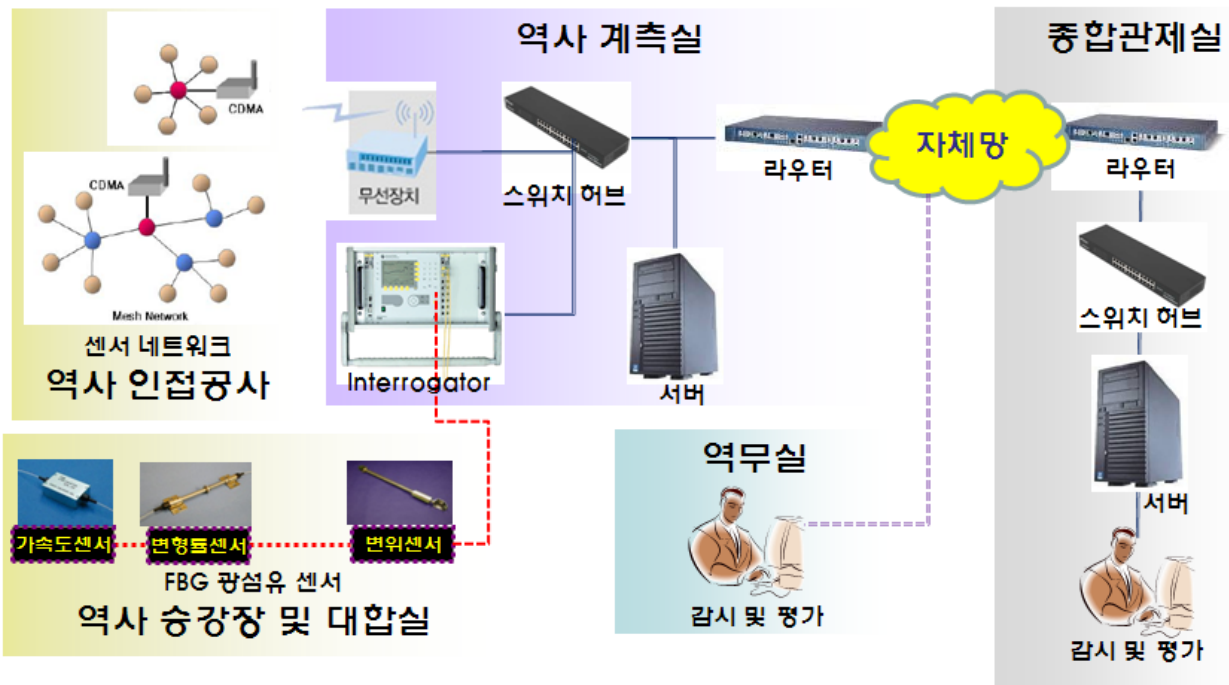


그림 6. 역사구조물 건전성 감시시스템 구성도(안)

5. 감시시스템 기술 규격

감시시스템의 기술규격을 아래와 같이 일반사항과 지능형 소프트웨어, 감시시스템 하드웨어적인 측면으로 구분하여 기술하였다.

도표 2. 역사구조물 건전성 감시시스템 기술규격(안)

구분	기술 규격
일반 사항	<ul style="list-style-type: none"> -역사 및 종합관제실 설비 추가 시 시스템 확장이 용이하도록 하여야 한다. -진동, 충격 등 외부환경에 잘 견디는 견고성과 24시간 이상 동작에도 적합한 안정성을 갖추어야 한다. -전원 및 네트워크 장애로 시스템이 중단된 후 다시 복구되면 별도의 조작 없이 자

	<p>동으로 정상기능이 수행되도록 하여야 한다.</p> <p>-구성품은 견고하고 쉽게 설치될 수 있도록 하여야 하며, 유지보수 및 장애 발생시 점검, 보수, 교체가 편리한 구조로 하여야 한다.</p> <p>-각종 센서는 서로의 정보 교환을 위하여 필요한 통신 프로토콜을 정의하여야 한다.</p>
<p>의사결정지원 지능형 소프트웨어</p>	<p>-역사 구조물의 안전진단결과와 연계하여 종합적으로 해당 역사의 건전성을 판별할 수 있어야 한다.</p> <p>-지능형 소프트웨어는 역무실, 관리분소, 종합사령실 내의 서버에 설치되어 각 설치 장소별 고유의 기능을 수행할 수 있어야 한다.</p> <p>-역무실에 설치된 지능형 소프트웨어는 센서로부터 입력되는 주변 상황 정보를 종합적으로 판단하여 긴급 및 위험 상황을 감지하는 기능을 수행한다.</p> <p>-관리분소 및 종합사령실에 설치된 지능형 소프트웨어는 각 역사에 위치한 감시 시스템과 정보를 주고받아 종합 감시 기능을 수행 하여야 한다.</p> <p>-탐지된 긴급 상황을 관련자 또는 관련기관에 효과적으로 알리는 기능을 제공 하여야 한다.</p>
<p>건전성 감시시스템 하드웨어</p>	<p>-역사 구조물 건전성 감시 항목별 센서 및 노드 설치 위치 및 방법, 신호의 전송방법, 평가방법 등을 표준화한다.</p> <p>-일부 센서 혹은 송수신장치가 장애가 나더라도 센싱 신호의 전송에 문제가 발생하지 않도록 시스템을 설계하여야 한다.</p> <p>-최신의 IT 및 스마트 기술이 접목된 시스템으로 구축하고, 향후 기술 확장성이 용이한 시스템으로 구축한다.</p> <p>-기존에 설치된 감시시스템과의 호환성 및 인터페이스를 고려하여야 한다.</p>

6. 결론

본 논문에서는 지하 역사구조물의 건전성 감시시스템 개발과 관련하여, 광섬유센서와 Zigbee, Bluetooth 등 유비쿼터스 센서 네트워크기술과 같은 IT 융합기술의 국내외 기술현황을 살펴보고, 지하 역사구조물의 센싱 환경을 고려하여 이러한 광섬유센서와 무선 센서 네트워크 기술을 도시철도 역사구조물 건전성 감시시스템에 적용하는 방안을 살펴보았다. 아울러, 향후 개발될 감시시스템의 기술규격(안)에 대하여 간략히 기술하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원(07도시철도표준화A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 이규완, "국내외 건전성 모니터링 기술개발 현황," 도시철도표준화2단계연구개발사업 전문가초청세미나 자료, 2008
2. Shin J. R.(2007), "Introduction of the Smart Health-monitoring & Self-diagnosis System with the Ubiquitous Sensor Network for Subway Station", a treatise of the 7th China-Korea-Japan Railway Seminar, p.33 ~ p.39