

# 연성재료의 초대형 건축물 건전성 진단 모델링 방법론

서희석\*, 이승재\*\*, 유지환\*\*\*

## 요약

현대에는 건축물이 초대형화 되어 가고 있다. 건물 건축에 필요한 기술도 매우 발전할 뿐만 아니라 재료 또한 다양화 되어졌다. 기술에 발전에 따라 건축에 필요한 시간도 단축 된것이 사실이다. 과거부터 현재까지도 건축시간에 따른 연구를 많이 하였다. 하지만 건축의 시간 단축에 대한 중요성도 크지만 건축을 유지, 관리하는 문제도 중요성으로 인식되어져야 한다. 특히 테프론 재질의 막이나, 철근으로 되어 있는 케이블 같은 재료에 대한 안전 진단은 매우 필요하다. 예를 들어 지붕이 막구조로 되어 있는 상암 월드컵 경기장 같은 경우 매일 관리자가 지붕을 올라가 안전에 대해 진단을 하고 있다. 이는 여러 가지의 면에서 효율성이 떨어지고 있는 것이 사실이다. 따라서 이 연구를 통해 건축물의 유지, 관리하기 위한 필요성으로 되고 있는 안전 진단을 효율적으로 하기 위한 방법을 제시 한다. 특히 케이블 재료에 대한 안전진단 방법을 제시하고 시뮬레이션을 수행한다. 그 방법으로 첫번째 케이블 재료를 검사할 수 있는 검사 로봇에 대해 제시하며 둘째, 로봇이 가져온 정보와 관리자가 입력한 정보를 바탕으로 안전성에 대한 시뮬레이션을 수행한다.

## Modeling Methodology of Soft-Type Large Scale Building Health Monitoring

Hee-Suk Seo\*, Seung-Jae Lee\*, Ji-Hwan Yoo\*\*\*

## ABSTRACT

There are modern buildings are going to invite maximum scale. Technology is also very necessary for building construction materials, as well as develop has also been diversified. Depending on the development of technologies to reduce the time needed for construction has become a fact. Until now, under construction since last time was a lot of research. However, shortening the time for building, sustaining the importance of building maintenance and management should be aware of the importance of the issue. The materials of Teflon, reinforced materials, such as the cable is in very need for a safety check. For example, the roof is Sangam World Cup Stadium is a safe climb to the roof of every manager has a diagnosis. The various aspects of it is true that the efficiency is dropping. Therefore, this research through the maintenance of buildings, limited by a need to manage the safety and effective method for diagnosis is presented. The safety check for the cable material and simulation methods are presented. That way, you can check the ingredients first cable inspection robot is presented for the second, the robot retrieved information based on information entered by the safety manager for the simulation is conducted.

Key Words : Large Scale Building Health Monitoring, manage the safety, inspection robot, DEVS simulation, cable

---

\* 한국기술교육대학교 컴퓨터공학부

\*\* 한국기술교육대학교 건축공학부

\*\*\* 한국기술교육대학교 기계정보공학부

· 제1저자(First Author) : 서희석 · 교신저자(Correspondent Author) : 서희석

· 접수일(2010년 3월 4일), 수정일(1차 : 2010년 4월 5일), 게재확정일(2010년 4월 8일)

## 1. 서 론

현대의 건물들은 모두 20층 이상의 초대형 건물로 지어지고 있는 것이 현실이다. 도심 속에는 초대형 건물들이 숲을 이루고 있을 정도이다. 이전의 경우 초대형 건축물을 빠른 시일 안에 건축하는 것을 중요시하게 여겼지만 오늘날에 들어서는 정확한 시공뿐만 아니라 건축 후의 안전에 대한 중요성도 많은 부분을 차지하고 있다.

이에 초대형 건축물의 경우 큰 재앙을 미연에 방지하고 유지보수를 위해서는 지속적인 안전진단이 매우 중요하다. 특히 연성재를 사용하는 구조시스템은 큰 재앙을 미연에 방지하고 유지보수를 위해 지속적인 안전진단이 매우 중요하다. 연성재란 막재와 케이블을 사용하여 인장력에 저항할 수 있는 재료로서, 사용재

료 단면이 적게 들고 구조를 가볍게 하여 구조효율이 높은 효과적인 대공간 구조재이다. 또한 자유로운 형태를 구성할 수 있어서 창의적인 형태로 건축에 아름다움에 표현하는 재료들을 일컫고 있다.

하지만 앞에서 말하듯이 안정을 위해 안전진단은 매우 중요시 되는 점이다. 현재의 안전진단의 대부분은 육안으로만 이루어져 있어 인력의 부족, 검사 사각지대 등의 많은 문제점을 내포하고 있다[1].

예를 들어 마포구 상암지구에 위치한 상암 경기장의 지붕과 같은 테프론 재질의 연성재 구조 재료의 대형 구조물인 경우가 있다. 이런 구조물에 작은 균열이 발생하게 되면 태풍과 강한 바람이 발생하는 경우 지붕이 바람에 찢겨져 전체를 사용할 수 없으며 지붕 전체를 다시 설치해야하는 문제가 발생 할 수 있다. 따라서 관리자는 매일 또는 하루에도 몇 번씩 주기적으로



그림 1. 건정성을 평가가 필요한 건축물들.

Fig. 1. Building need health monitoring.

지붕에 올라가 균열의 유무를 확인하고 안정성을 검증하는 것은 시간과 비용 측면에서 상당한 낭비가 초래된다[2].

따라서 건전성 확인을 위한 여러 방법이 연구되고 있다. 그 중 하나의 예로 상암 경기장 같은 지붕의 인장력을 모니터링 하는 시스템을 구축하는 것이다. 이 시스템에서는 테프론 재질로 구성된 지붕의 곳곳에 인장력을 측정할 수 있는 센서를 부착하여 지붕의 인장력에 변화가 발생하였다는 신호를 감지하면 관리자가 지붕에 올라가 이를 확인 하는 구조를 취한다.

그러나 이러한 모니터링 시스템도 관리자 입장에서는 관리가 매우 불편하게 되어 있다. 모니터링 시스템에서 인장력에 문제가 있다고 하여 해당 부분을 확인하기 위해 지붕에 올라가 이를 확인하면 실제로는 문제가 없는데 균열이 발생한 것으로 오인한 경우가 많이 발생하기 때문이다.

이러한 관리상의 문제점을 획기적으로 해결하기 위하여 구조물 검사 로봇(Construction Inspection Robot)을 이용한다. 로봇은 건축물의 관리자를 대신하여 균열이 의심되는 부분을 확인하여 관리자에게 필요한 영상 정보를 제공할 수 있다[3].

기존의 영상 정보는 카메라를 활용하여 사진 전송을 기본으로 하지만 동영상 전송도 가능하도록 구성하여 필요에 따라서는 동영상을 통해 해당 지역을 관찰할 수 있다. 로봇은 관리자의 번거로움을 획기적으로 해결할 수 있으며, 건축물의 안전에 이상이 발생하는 경우에는 수시로 전송이 가능하다는 장점이 있다.

본 연구는 구조 검사 로봇이 건축물을 검사하고 확인하는 모든 환경에 대하여 시뮬레이션 모델을 구축하고자 한다. 시뮬레이션은 실제 시스템을 구축하고 운영하는데 발생하는 시간의 제약과 공간의 제약을 넘어 다양한 실험을 수행할 수 있는 장점이 있으며, 이러한 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 실제 시스템의 운영에 반영하여 실제 시스템의 성능 향상에 도움을 줄 수 있는 장점이 있다.

시뮬레이션 환경을 구축하기 위하여 DEVS (Discrete Event system Specification) 방법론[4,5]을 사용하여 모델링하고 시뮬레이션을 수행할 것이다. 시뮬레이션 수행 결과를 바탕으로 로봇의 활용도를 높이고자 한다. 시뮬레이션 수행 결과 지붕의 특정 부분에 이상이 수차례 발견된다면, 로봇을 그 지점에 보내 그 지점에 실제 문제가 발생할 가능성이 있는지를 사전에 검사하여 문제점의 확실 유무를 판단 할 수 있을 것이다.

## II. 건물 안전 진단

### 2.1 필요성

서론에서 언급 한 것 같이 현재 우리나라의 산업화 도시화로 인하여 공장, 사무실, 아파트 등을 건설 하는 데 급급하여 안전의 대한 진단이 필요하다. 특히 건물을 짓는 것에 집중 투자 하였지 건물을 관리, 유지보수에는 투자를 하지 않고 있어 건물의 안전 진단의 필요성은 더욱 대두 되고 있다. 이에 정부에서도 '시설물의 안전관리에 대한 특별법'을 제정하여 시행하고 있다.

### 2.2 진단 분류

안전진단은 그 정밀도에 따라 점검과 진단으로 분류할 수 있다. 점검은 육안 및 간단한 기구를 통하여 건물의 상태를 파악하는 것이며, 안전진단은 건물에 대한 제반 조사, 시험으로 건물의 구조 및 구조부재의 상태를 파악한 후 구조해석을 통하여 건물의 안전성을 검토하는 한편 내력이 부족한 부재에 대하여 보수 보강안을 도출해내는 과정이다.

### 2.3 대표적인 진단 방법

#### 2.3.1 육안검사

특별한 계측기 사용하지 않고 육안으로 조사하는 방법으로 구조물의 현장 조사와 각종 성능 저하 상태

를 외관을 통해 검사 한다.

### 2.3.2 비파괴 검사

재료나 제품을 물리적 현상을 이용한 특수방법으로 상처를 내거나, 분해하거나 또는 파괴하거나 하지 않고, 다시 말하면 시험대상물의 원형과 기능을 전혀 변화시키지 않고, 그것의 성질, 상태, 내부구조 등을 알아내는 모든 시험을 말한다. 예를 들어 잘 익은 수박을 고를 때 눈으로 보고만 골랐다면 이것은 전자의 비파괴시험에 속할 것이며, 아르케메데스가 히에로왕의 금관을 물속에 담가 부력이라는 물리적 현상을 이용하여 그것의 순도를 알아낸 시험은 후자의 좁은 뜻의 비파괴 시험이 될것이다.

하중에 저항하게 되며 이러한 특성을 가진 것을 형태 저항 구조라고 한다.

따라서 본 연구는 형태 저항 구조의 케이블 재료를 사용하는 건축물을 주 연구 대상으로 한다. 아래 그림에서 보듯이 한국 최초의 인장 케이블 방식을 사용한 부산월드컵 경기장과 케이블이 주재료로 사용하는 인천대교와 같은 건축 구조물이 예이다.

## III. 구조물 검사 로봇

본 연구를 위해 기존에 제작 되어 있는 구조물 로봇을 바탕으로 새로운 로봇을 제작한다. 기존의 제작 되어 있는 로봇 몸체를 이용하고 케이블 안전 평가를 위한 새로운 로봇 이동 방법을 제시한다.

그림 2. 케이블을 사용한 부산 월드컵 경기장  
Fig. 2. Busan Worldcup stadium Using cable.

### 3.1 연성재 구조의 건축물

이번 연구를 위해 연성재를 주재료로 하는 구조물을 대상으로 한다. 특히 연성재 재료중 케이블을 주재료로 사용하는 건축물을 대상으로 한다.

케이블 재료는 강도가 높고, 경량이며, 유연성이 있어 형상의 자유도가 높고 부재길이의 제한이 없으며 운반이 용이하다는 장점이 있다. 이런 한 점을 이용하여 단독 또는 다른 건축물과 조합되어 건축 구조에 적용 되고 있다[6,7].

만약 구조물이 하중을 받게 되면 케이블은 강성이 없기 때문에 인장력만 생길 수 있는 형태로 변화한다.

작용하는 하중의 형태에 따라 인장 이외에는 다른 응력이 발생하지 않도록 적절한 형태로 변화되어 큰

그림 3. 케이블을 사용한 인천대교  
Fig. 3. Incheon bridge Using cable.

### 3.2 구조물 검사 로봇 본체

구조 검사를 위해 제작한 구조물 검사 로봇의 주요 제원은 다음과 같다. 우리 연구는 막구조 검사물 움직임을 담당하는 Motion Unit 부분은 모터, 기어, T-벨

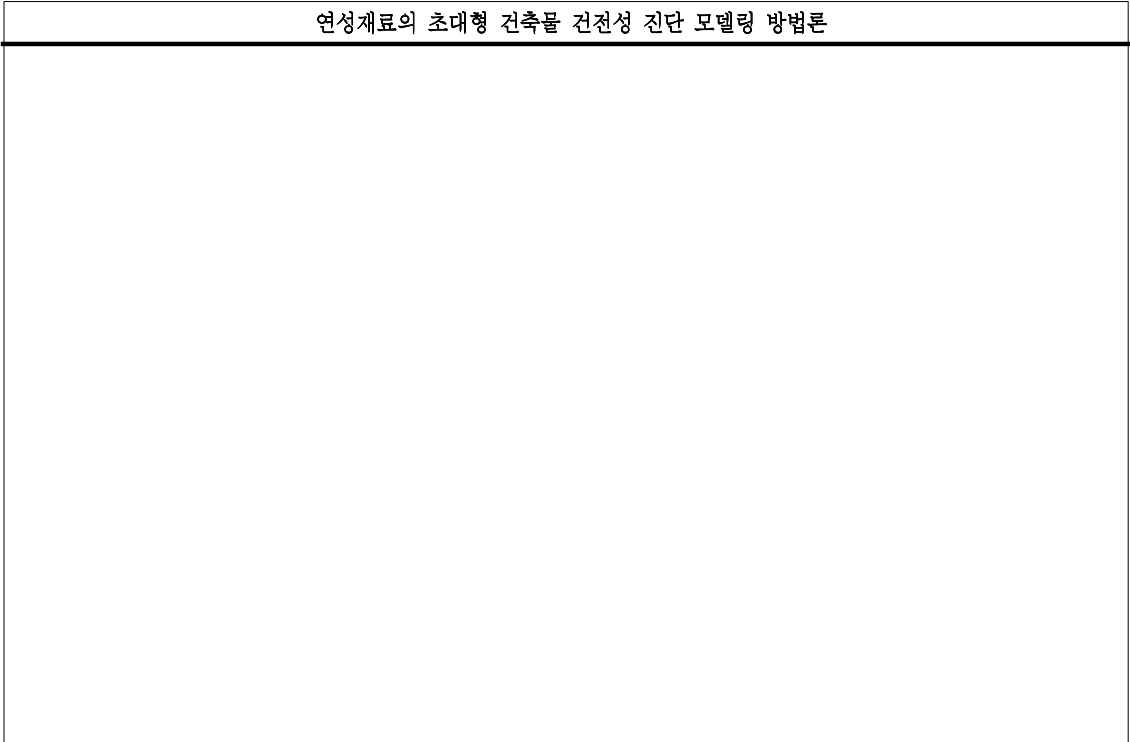


그림 4 건축물 진단로봇 시스템 구성도

Fig. 4. Composition picture of building Health Monitoring system.

트, 바퀴 등으로 구성되는데 모터는 48볼트, 60W의 성능을 갖는 맥스사의 모터를 같은 외형을 갖도록 구성한다.

로봇의 외형을 담당하는 Body unit 은 알루미늄 합금을 사용하여 가벼우면서도 충분한 강성을 갖고 가공성도 우수하도록 한다. Control unit 은 SBC (Single Board Computer)를 사용하도록 구성하였으며 탑재된 운영체제는 윈도우즈 XP를 사용한다. Vision unit 은 카메라를 활용하기 위한 부분으로서 줌인/줌아웃이 가능하고, 사진 촬영, 동영상 촬영이 가능한 카메라를 활용한다. Power unit 은 리튬 폴리머 배터리를 사용한다.

좌표를 인식하기 위한 RFID Reader unit 이 있으며, 촬영 내용을 서버로 보내기 위한 Communication unit 이 대표적으로 존재한다.

로봇은 케이블에 양 끝에 붙어 있는 RFID 태그를

이용 정보를 바탕으로 내가 가야할 방향 거리 등을 계산하게 된다. 계산을 마친 로봇은 자신의 위치를 파악하게 되고 자신이 갈 방향으로 이동하게 된다.

로봇은 수집한 정보를 중앙 서버에 보내기 위해 통신을 하게 된다. 하지만 통신 연결 시 해커나 다른 목적으로 정보를 수정 할 가능성이 존재한다. 따라서 이를 방지하기 위해 통신 내용을 암호화 하는 방법을 이용한다.

### 3.3 케이블 검사를 위한 구조 검사 로봇

본 연구를 위해 케이블 검사를 위해 새로운 매커니즘의 로봇을 개발한다. 로봇 본체의 경우는 막구조 검사 로봇의 사용하는 로봇을 이용한다. 막구조 검사 로봇과 달리 케이블 검사 로봇은 케이블을 어떻게 이동할지가 매우 중요한 부분이다. 따라서 로봇의 이동을 위한 새로운 매커니즘 개발이 필수적이다.

이 연구를 위해 개발된 매커니즘은 아래에서 설명하는 것과 같다. 이번에 개발된 로봇 이동 매커니즘은 매커니즘은 Snake의 형태를 모방하였지만, 기존에 제안된 sanke 형태의 로봇과는 차별화 된다. 4개의 검사 로봇 본체를 이어 하나의 검사 로봇을 제작 한다.

이런 방법을 사용하여 이동 할 시 로봇은 자중과 마찰을 이용하여 케이블에서 미끄러지지 않으면서 등반 할 수 있다. 초기 검사 로봇은 케이블을 감듯이 올라가게 되면 케이블에 등반이 성공하면 케이블을 따라 회전을 하면 이동하게 된다.

그림 5. 케이블 등반 및 rough terrain의 이동을 위해 제작된 메커니즘

Fig. 5. Mechanism for climb cable and move of rough terrain

로봇 본체는 RC-servo 모터를 사용하여 몸체를 회전하게 되며, 소형 DC 모터를 사용하여 바퀴부를 구동시키게 된다.

그림 6. 몸통 회전  
Fig. 6. Turning body

그림 7. 케이블 등반 모습(1)

Fig. 7. picture of climb cable(1)

그림 8. 케이블 등반 모습(2)

Fig. 8. picture of climb cable(2)

## IV. 대상 환경에 대한 DEVS 모델링

### 4.1 DEVS 방법론

Zeigler에 의해 정립된 DEVS 방법론은 연속적인 시간상에서 발생하는 이산 사건을 처리하는 시스템을 시뮬레이션 하기 위해 이론적으로 정립된 모델링 방법론이다.

이는 모델의 구조와 행동을 시뮬레이션 수행으로부터 추상화시키기 위해 모델을 집합 이론적 방법으로 이용한 것으로, 시스템을 계층적(hierarchical)이고 모듈화(modular)된 형식으로 기술한다.

DEVS에서는 기본 (Basic) 모델과 결합 (Coupled) 모델을 정의한다. 기본 모델은 시스템의 동적인 특성을 표현하기 위한 모델이고, 결합 모델은 시스템의 구성 요소간의 상호 작용을 표현하기 위한 모델이다.

이 모델들은 다음의 항들로 명세 할 수 있다.

$$M = \langle X, S, Y, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, t_a \rangle$$

- X is an external input set
- S is a sequential state set
- Y is an external output set
- $\delta_{int}$  is an internal transition function
- $\delta_{ext}$  is an external transition function
- $\lambda$  is an output function
- $t_a$  is a time advance function

$$DN = \langle D, \{M_i\}, \{I_i\}, \{Z_{i,j}\}, select \rangle$$

- D is a set of component name
- $M_i$  is a component basic model
- $I_i$  is a set of influences of I
- $Z_{i,j}$  is an output translation
- select is a tie-breaking function

### 4.2 대상 시스템

<그림 9>는 케이블에 대한 건정성 평가에 대한 전체 구조도이다.

그림 9. 건축물 안전 평가 시스템 구조

Fig. 9. Structure of building safety parity system

CIS(Construction Inspection System)는 사용자가 입력하는 정보와 로봇이 수집한 정보를 바탕으로 케이블의 이상 유무를 시뮬레이션 해 보게 된다. 이를 바탕으로 정말 케이블에 이상이 생겼는지 판단하게 된다. 만약 이상이 생겼을시 관리자는 Robot을 이상이 발생한 곳에 보내게 된다.

Robot 모듈은 여러 개의 로봇들로 이루어진 모델로 케이블의 실제 정보 수치를 파악하게 된다. 이상이 발생한 위치에 도착한 Robot은 케이블에 대한 측정 값을 수집하여 중앙 서버로 전송하게 된다. 이 모듈에 대한 설명은 추후에 다시 하기로 한다. CC(Construction Check) Model은 로봇에서 받은 정보와 관리자가 입력한 정보를 가지고 안전 유무를 계산하게 된다.

CC Model의 Input은 로봇이 수집 하여 보내온 케이블에 관련된 정보, 관리자가 입력하는 정보 등 안전 유무를 판단하는데 이용하는 수치 정보를 입력하는 모듈이다. Input에 대한 설명은 하면, InputValue 모듈은 로봇이 수집해온 케이블의 정보를 계산 할 수 있도록 입력 하게 된다. 이를 통해 입력 받은 정보를 Calculation 모듈로 전달하게 된다.

그림 10. 로봇 모듈  
Fig. 10. Robot Module

Calculation 모듈 같은 경우 로봇이 수집해온 정보와 관리자가 날씨, 습도, 바람세기, 기존에 데이터 등을 입력한 정보를 가지고 계산을 하게 된다. 이 모듈에서는 이미 각 수치 마다 이상이 발생하는 데이터를 미리 저장하고 있어 이상이 발생하면, 이를 바탕으로 이상 유무를 판단하게 된다.

EF 모델은 시뮬레이션의 입력을 생성하는 모듈로서 시뮬레이션의 입력을 생성하는 Genr 모듈과 시뮬레이션의 통계 수집을 위한 Trans 모듈로 구성 된다. 시뮬레이션 수행을 위해서 Genr 모듈에서는 일조량, 기압, 비/눈/우박의 양, 바람, 온도, 습도 등의 환경에 따른 입력을 발생하여 Input 모듈로 전달하게 된다.

<그림 11>에서 보는 것 같이 Calculation 모듈은 Input 모듈에서 받아서 수치 정보를 바탕으로 안정성을 계산하는 모듈이다. Press 압력을 Tension은 케이블에 걸리는 인장력을 말한다.

<그림 11>과 같이 Output Calculation 모듈에서 계산한 수치를 표현하고 안정성에 안정 여부를 표현한다. OutValue는 인장력 및 케이블 건축에 관련된 계산값들을 표현하고, Type은 검사케이블에 안정여부를 표현한다.

그림 11. 계산 모듈  
Fig. 11. Calculation Module

## 4.2 로봇 시스템

<그림 12>에서 보는 것 같이 로봇에 대한 모듈을 말하고 있다. 로봇은 여러 대로 구성되어 있다. 로봇은 몸체를 이루는 Body 부분과 바퀴의 Wheel 부분으로 이루어져 있다. RFID Reader 부분은 로봇이 이동을 하기 위한 방향 및 거리를 측정하기 위한 부분으로 RFID 방식을 사용한다. 그리고 Camera 부분은 현재 문제가 되는 부분의 모습을 촬영하기 위한 장치로 이용된다. 그리고 Authentication 모듈은 로봇의 정보를 서버에 보내는 방법을 정의한 모듈이다.

그림 12. 출력 모듈  
Fig. 12. Output Module

다음 <그림 13>은 Authentication 모듈이 통신을 할 때 다른 악의적인 목적을 가진 사용자를 방지하기 위한 암호화 방법이 정의 되어 있다. 따라서 통신은 PKI 암호화 방법을 이용한다. PKI 방법은 공인 인증서 방식 이라고 불리며 공인인증 서버에서 공개키를 받

아 데이터를 공개키를 이용 암호화 하여 보내면 자신 만 가지고 있는 개인키로 이를 복호화 하는 방식을 말한다.

CA는 이를 위한 공인인증 서버를 말하며 Key는 공개키인 Public key와 개인키인 private Key로 구분된다.

그림 13. 통신 모듈

Fig. 13. communication Module

#### IV. 결론 및 향후과제

케이블과 같은 연성재료를 사용하는 건축 구조물은 수시로 안정 평가가 필요하다. 이를 방지 할 경우 태풍과 같은 강한 바람의 발생에 따라 건축물이 위험해지는 문제점이 발생 할 수가 있다. 하지만 안정성 평가를 위해 관리자가 수시로 확인한다는 자체도 큰 문제점을 내포하고 있는 것이 사실이다.

하지만 부산 월드컵 경기장 또는 인천대교와 같이 주로 연성재료를 사용하는 건축물 같은 경우 구조물 검사 로봇을 이용 안정성 평가를 미리 대신 한다면 문제점을 해결하는 방법 중 하나가 될 수가 있다. 기준이 되는 영상 정보는 카메라를 활용하여 사진 전송을 기본으로 하지만 동영상 전송도 가능하도록 구성하여 필요에 따라서는 동영상을 통해 해당 지역을 관찰할 수 있다. 로봇은 관리자의 번거로움을 획기적으로 해결할 수 있으며, 건축물의 안전에 이상이 발생하는 경우에는 수시로 전송이 가능하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 구조물의 안전성을 평가하기 위한 환경에 DEVS 방법론을 적용하여 전 과정을 시뮬레이션 할 수 있도록 구성하였다. 구조물 검사 로봇이 가져온 정보와 관리자가 입력한 정보를 바탕으로 시뮬레이션은 안정성 평가의 신뢰 여부를 판단하고 기존의 통계 데이터를 바탕으로 건축의 시간에 따른 안정성을 예측 하려고 노력 하였다.

이를 바탕으로 케이블과 같은 연성재 구조의 건축물 뿐만 아니라 모든 초대형 건축물의 안정성 평가를 위한 구조물 검사 로봇을 제작하고 이의 신뢰도를 판단하는 모델링이 필요하다.

#### Acknowledgement

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRF-2008-314-D00453)

#### 참고 문헌

- [1] 이동운, 이상법, "건축물 안전진단 정보분류체계 구축 방안 에 관한 연구 :IDEF 정보 모델링 기법 및 통합건설정보 분류체계를 이용하여", *대한건축학회논문집* 구조계 제20권 제12호 통권 제194호, pp.109-116, 2004
- [2] 손상준, 박태근, "건축물 안전진단 업무 개선방안에 관한 연구" *대한건축학회지회연합회 학술논문집*, 제1권, 제1호, pp.541-549, 2005.
- [3] 서희석, 김용학, "구조물 안전성 평가 환경에 대한 DEVS 방법론 적용," *한국시뮬레이션학회 춘계학술대회*, 대전대학교, pp. 9-14, 2007년.
- [4] B. P. Zeigler, H. Praehofer and T.G. Kim, *Theory of Modeling and Simulation*, Academic Press, 2000.
- [5] H.S. Seo, T.H. Cho, "Simulation Model Design of Security System based on Policy-Based Framework," *Simulation Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*, vol. 79, no. 9, pp. 515-527, Sep. 2003.

