패턴인식기반 역사구조물건전성평가기법에 대한 수치해석 검증분석

Numerical Verification on the Structural-health Evaluation of Subway Stations based on Statistical Pattern Recognition Technique

신정열* · 안태기** · 김진호** · 이창길*** · 남민준**** · 박승희*****

Shin, Jeong-ryol · An, Tae-ki · Kim, Jin-ho · Lee, Changgil · Nam, Min-jun · Park, Seunghee

Abstract

Subway is a representative public transportation that safety, above all, must be ensured. Therefore, subway stations need to be promptly maintained through the early detecting of damage conditions to guarantee the structural health and passengers' safety. However, it could be easily damaged by internal or external loads such as ambient train vibrations and even earthquake loads. For this reason, in this paper, authors suggest the structural-health evaluating algorithm based on the statistical pattern recognition techniques such as supervised and unsupervised learning method. And, also the numerical studies of Chungmuro station was carried out to verify the applicability of it into the structural-health evaluation of station structures.

Key words : Subway station, Structural-health, Pattern recognition, Supervised-learning, Unsupervised-learning

요 지

지하철은 대부분의 시설물이 지하에 위치하고 있는 관계로 안전이 최우선시 되어야하는 교통수단이다. 특히, 역사구조물의 경우 장기간의 반복적인 열차 진동과 역사 인접 공사, 지진 등 내외부에서의 진동, 충격 등으로 구조물이 손상 받을 수 있는 상황이므로, 구조물의 안전성과 이용승객의 안전을 위하여 이러한 위험 손상상태의 조기 감지를 통한 신속한 대처가 가능하도록 상시 건전성 감시가 필요하다. 이에, 본 논문에서는 수치해석을 통해 획득한 가속도 응답 데이터를 이용, 자기학습 및 지도학습의 확률론적 패턴 인식 기법에 접목하여 역사 구조물의 구조 건전성을 평가하는 알고리즘을 제안하였고, 서울지하철 충무로 역사를 대상으로 수치해석을 수행하여 제안한 패턴인식 기반 구조건전성 평가 알고리즘의 적용성을 검증하였다.

핵심용어 : 지하철 역사, 구조 건전성, 패턴인식, 지도학습, 자기학습

1. 서 론

도시철도는 대표적인 도시 대중교통수단으로서 하루 수십 만 명이 이용하고 있으며 대부분의 시설물이 지하에 위치하고 있는 관계로, 안전이 최우선 되어야 하는 교통수단이다. 이러한 지하철 역사구조물 대부분은 지진에 대비한 내진 설계가 거의 이루어지지 않아 중규모 정도의 지진에도 상당한 붕괴 위험상태에 노출되어 있을 뿐만 아니라, 장기간의 반복적인 열차 진동과 역사 인접공사 등 내·외부에서의 진동, 충격 등으로 구조물이 손상 받을 수 있는 상황이므로, 위험 손상상태의 조기 감지를 통한 신속한 대처가 가능하도록 상시 건전성 감시·확인이 필요하다(Shin et al., 2010; 2011). 최근 이러한 토목구조물에 대한 센서기반 건전성 모니터링시스

템에 대한 연구와 수집된 계측센서 정보로부터 구조 건전성을 평가하는 연구가 활발히 이루어져 왔다(Park et al., 2003; Park et al., 2010; 2011). 역사구조물과 관련하여서는 역사구조물의 내진해석 등과 관련하여 구조물의 거동에 대한 수치해석 연구(Kim et al., 2006; Kim et al., 2003)만 이루어졌을 뿐, 역사구조물의 건전성을 감시하고 평가하는 기법 개발에 대한 연구는 최근 몇 년간 저자가 수행한 기초적인 연구(Shin 2009; 2010; 2011)가 전부인 실정이다.

이에, 본 연구를 통하여 스마트 센서기술 및 첨단 정보통신 기술 등을 활용하여 계측된 신호정보로부터, 도시철도 역사의 실시간 및 재난 발생 전후의 역사 구조물의 건전성 상태를 평가하기 위해 패턴인식 기반의 역사 구조건전성 평가 기법을 개발하고자 한다. 현 단계의 연구에서는 무선센서네트

*정회원 · 한국철도기술연구원 저심도철도연구단 선임연구원(E-mail : jrshin@krrri.re.kr)

**한국철도기술연구원 도시철도표준화연구단 책임연구원

***성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

****성균관대학교 u-City공학과 석사과정

*****정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 조교수(교신저자)

위크기술 등을 통하여 획득한 도시철도 역사구조물의 실시간 감시정보를 모사하기 위하여 유한요소모델 수치해석을 수행하고 그 결과를 활용하여 확률론적 패턴인식 기법에 적용함으로써 역사구조물의 건전성을 평가하는 기법을 개발하고자 한다. 본 논문에서는 수치해석을 통하여 선정된 역사 구조물의 취약 부재에 대하여 인위적인 손상을 주고, 제한한 평가 기법의 적용성 검증에 위한 수치해석을 수행하였다. 활용하고자 하는 패턴인식 기법은 크게 자가학습 기반 기법과 지도학습 기반 기법으로 나뉘는데, 자가학습 기반 패턴인식 기법은 실시간으로 역사구조물의 위험 손상 유무를 직관적으로 판단할 수 있으며, 지도학습 기반 패턴인식 기법은 역사구조물의 손상 유형 파악 및 손상을 정량화하는데 도움이 될 것으로 기대한다.

2. 패턴인식 기반 역사 구조건전성 평가기법

2.1 건전성 평가 알고리즘 제안

역사 구조물의 건전성 평가를 위해 제안하는 평가 알고리즘은 Fig. 1과 같은 흐름도를 갖는다. 역사 구조물에서 실제 계측된 가속도 데이터만을 이용하여 구조물의 건전성을 직관적으로 평가하는 자가학습기법(Unsupervised Learning) 건전성 평가 알고리즘과 수치해석을 통한 정상상태 및 손상상태 역사구조물의 응답을 학습데이터로 구축한 후 실제 계측 데이터와의 패턴 매칭을 통해 구조물의 건전성을 전역적으로 평가하는 지도학습기법(Supervised Learning) 건전성 평가 알고리즘으로 구성된다. 먼저, 정상 상태일 때의 역사구조물에 대하여 지진 하중, 열차 하중 등에 대하여 시간이력 해석

및 고유치 해석을 수행하여 그 해석 결과를 DB에 구축하고, 상대적으로 응답이 큰 위험 취약부재와 취약단면을 선정한다. 이렇게 선정된 위험 취약 부재의 단면의 강성을 단계별로 저하시키면서 구조물의 손상을 모사한다. 이렇게 구성된 손상 역사 구조 모델에 대하여 시간 이력 해석 및 고유치 해석을 재수행하여 그 해석 결과를 DB에 구축한다. 구축된 시간 이력 해석 결과로부터 손상 특성을 추출하여 역사 구조계의 거동을 분석하고 손상 유형 및 단계별로 일정 패턴을 수립한다. 이 분석 결과와 실제 역사구조물의 계측 정보를 가지고 Support Vector Machine(SVM)기법 (Vapnik 1995)의 지도학습 기반 패턴인식 기법에 적용하면 손상의 유형별

Fig. 1. A flow chart on an evaluation algorithm of subway stations

분류 및 정량화를 수행할 수 있다. 한편, 별도의 구조해석 없이 실제 역사구조물의 계측 정보만으로 Outlier Analysis 기법(Xie et al., 2002)의 자가학습 기반 패턴인식 기법에 적용하면 직관적으로 위험 손상 유무를 판단할 수 있다.

2.2 패턴인식 기반 건전성 평가 알고리즘

2.2.1 지도학습 기반 건전성 평가 알고리즘

손상분류 및 정량화가 가능한 지도학습 기반 역사 구조 건전성 평가 알고리즘의 흐름도를 Fig. 2에 나타내었다. 지도학습 기반 평가 기법의 첫 번째 절차는 초기 가속도 계측 데이터를 토대로 현 상태의 역사 구조물의 상태를 반영한 FEM 모델을 이용하여 정상 상태 및 손상 위치/수준별 수치해석을 수행하는 것으로 시작된다. 수치해석 결과를 이용하여 손상에 의한 특성을 추출하고 이를 이용하여 손상지수를 계산한다. 역사 구조물의 건전성 상태에 따라 계산된 손상 지수는 특성 그룹을 이루게 되는데, 이 특성을 그룹별로 정리하여 학습 데이터를 구축한다. 이 학습 데이터를 바탕으로 앞서 설명한 Support Vector Machine(SVM) 등의 기법을 이용하여 결정 경계를 설정한다. 실제 가속도 계측 데이터로부터 계산된 손상 지수를 학습 데이터의 결정 경계에 패턴 매칭시키면 손상 위치 및 손상 수준 등의 정량적인 정보를 얻을 수 있다.

2.2.1 지도학습 기반 건전성 평가 알고리즘

직관적인 위험 손상 유무 판단이 가능한 자가학습 기반 역사 구조 건전성 평가 알고리즘의 흐름도를 Fig. 3에 나타내었다. 자가학습 기반 평가 기법의 첫 번째 절차는 지도학습 기반 평가 기법과 달리 별도의 구조물의 수치해석없이 실제 가속도 데이터의 계측에서 출발한다. 계측된 가속도 데이터로부터 손상 특성을 추출하고 이를 이용하여 손상 지수를 산정한다. 도출된 손상 지수를 오름차순 또는 내림차순으로 정리하면 확률분포 패턴을 가지는데, 이를 적절한 확률 분포에

Fig. 2. Supervised learning based algorithm

Fig. 3. Unsupervised learning based algorithm

Fig. 4. Establishment of a threshold value based on generalized extreme value distribution

fitting시킨 후, 획득한 손상지수의 확률 분포에 따른 기대값, 분산 등의 확률 분포의 모수 값을 추정하고 적정 신뢰도 레벨에 해당되는 값을 이용하여 결정 경계를 설정한다. 본 연구에서는 획득한 데이터로부터 도출된 손상 지수의 확률분포가 일반극치분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)를 따르므로 일반극치분포의 신뢰도 구간으로부터 임계치를 도출한다. 임계치 도출 과정을 Fig. 4에 나타내었다. 일반극치분포는 누적 분포 함수의 형태를 가지며 식 (1)을 따른다.

$$GEV \Rightarrow \bar{\Phi}(x; \mu, \sigma, \gamma) = \exp \left\{ - \left[1 + \gamma \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\gamma} \right] \right\} \quad (1)$$

여기서, $1 + \gamma(x - \mu)/\sigma > 0$ 이며, $\mu \in \mathbb{R}$ 은 위치 변수, $\sigma > 0$ 은 스케일 변수, $\gamma \in \mathbb{R}$ 은 형태 변수이다(Coles 2001). 이렇게 설정된 임계치를 손상 유무를 판단하는 경계치라 명명하였고, 이 경계치를 초과하는 손상 지수를 이상치(Outlier)라 하는데, 이상치가 검출된 경우 손상이 발생한 것으로 평가할 수 있고 손상 발생 위치를 알 수 있다.

3. 역사 구조건전성 평가기법 수치해석 검증

3.1. 수치해석 개요

본 연구에서는 범용 해석 프로그램인 Abaqus를 이용하여 유한요소모델 수치해석을 수행하였다. 해석 대상 역사는 충무로 역로서 Fig. 5(a)와 같이 지하 1, 2층은 대합실이며, 지하 3층은 4호선 승강장, 지하 4층은 3호선 승강장으로 이루어진 십자 형태로 교차하는 지하 4층 구조물이다. 해석을 간소화하기 위하여 Fig. 5(b)와 같이 3호선 및 4호선 교차 구조계의 국부 모델을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 교차 구조계 모델은 8절점 육면체 요소를 사용하였으며, 터널 방향(교차 방향)은 무한 강성 요소를 이용하여 구조계 변형 확

Fig. 5. FEM model of the Chungmuro station

Fig. 6 Critical members

장방향을 고정하였고, 터널 벽체의 경계 조건은 주변 지반을 고려하였다. 먼저, 취약 부재 선정을 위하여 지진하중에 대해 해석을 수행하였으며, 그 결과 Fig. 6과 같이 지하 3층의 가운데 3개의 기둥에 응력이 집중되어 이를 취약부재로 선정하였다. 본 연구에서 손상은 기둥의 강성을 저하시키는 것으로 하여 모사하였다.

3.2. 손상 지수 선정

손상 지수의 선정에 앞서, 교량 등의 토목구조물 평가 시 흔히 이용되는 동적 거동 분석에 의한 동특성치를 역사구조물의 손상 지수로의 이용 가능성에 대하여 살펴보았다. 역사구조물의 국부 손상에 의한 전체 구조계의 동적 영향을 살펴 보기 위해, Fig. 7과 같이 취약부재 중 한 개 기둥의 강성을 50% 저하시키는 것으로 손상을 모사하여 교차 구조계 모델의 모드 해석을 수행하였다. Fig. 8은 정상 상태와 손상 상태 각각의 1차 모드에 대한 모드형상으로서, 손상 유무에 상관없이 모드 형상이 유사함을 알 수 있다. 또한, 모드 해석을 통해 도출된 1차 모드의 공진 주파수는 정상 상태에서는 1.4927 Hz, 손상 상태에서는 1.4926 Hz로 손상이 모드 해석 결과에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이러한

Fig. 7. Damage location for modal analysis

Fig. 8. Comparison of 1st mode shape between intact and damaged condition

Fig. 9 Comparison of 25th mode shape between intact and damaged condition

(a) Sensing points at columns

(b) Sensing points at floor and ceiling

Fig. 10. Selected node set for analysis of results

(a) Data obtained from the damaged column

(b) Data obtained from the intact column

Fig. 11. Time-domain signal pattern

결과는 1차 모드뿐만 아니라 일반적으로 구조 건전성 평가에 사용되는 5차 모드 이상의 모드에서도 유사하게 관찰된다. 손상에 의한 모드 형상의 변화는 Fig. 9와 같이 25차 모드 이상에서 뚜렷하게 관찰되는데, 이때의 공진 주파수는 정상 상태에서는 3.8255 Hz, 손상 상태에서는 3.6655 Hz로 약간의

차이를 보였다. 이상에서와 같이, 역사구조물과 같은 복잡계 구조물에서 국부 부재의 손상이 전체 구조계의 응답에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타나, 동적 거동 분석에 의한 동특성치를 패턴인식 기반 역사구조 건전성 평가를 위한 손상 지수로 활용하기에는 그 적용성이 낮은 것으로 판단된다.

이에, 수치해석에 의한 구조물 동적 응답 신호를 이용하여 동특성치를 구하지 않고, 응답 가속도 신호 자체를 손상지수로 이용이 가능한지 그 적용성에 대하여 수치해석을 통하여 살펴보았다. 취약 부재 3개 기둥 별 강성을 10%, 20%, 30% 수준으로 저하시켜 손상을 모사하였고, 가속도 응답 신호 획득 위치는 Fig. 10에서와 같이 각 기둥별 중앙점 3개소와 기둥 좌·우측의 천장과 바닥 각각 10개소로 총 23개소이다.

입력하중은 양쪽 방향에서 동시에 진입하는 열차 하중을 고려하여 상시 진동 상태를 모사하였다. 이때의 손상 위치 및 손상 수준에 따른 수치해석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 손상 위치 별 가속도 데이터의 변화 패턴을 살펴보면 손상 수준에 관계없이 손상을 생성시킨 위치에서 가속도 데이터의 변화가 손상 전후에 발생함을 알 수 있어, 가속도 신호의 에너지량을 역사구조 건전성 평가를 위한 손상 지수로 활용 가능한 것으로 나타났다.

3.3. 수치해석 검증 분석

Fig. 12~18에서와 같이 계측 위치 23개소에서 획득된 가속도 데이터를 이용하여 손상 지수를 산정하고, 이를 이용하여 역사구조물의 손상 유무를 판단함으로써 역사구조물의 건전성 평가 알고리즘을 검증하였다. 여기에서 사용되는 손상 지수는 식 (2)와 같이 계측한 신호의 에너지량을 나타내는 Root Mean Square(RMS)를 이용하며, 기저 신호(Baseline signal)로부터 계산된 RMS에 현재 계측된 신호의 RMS의 차로 나타낸다.

$$DI_i = \left| \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^N x_{i0}^2(t)} - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^N x_i^2(t)} \right| \quad (2)$$

여기서, N 은 계측 샘플 수, $x_{i0}(t)$ 는 정상상태에서 i 번째 센서에서 계측된 시간영역 가속도 신호, $x_i(t)$ 는 i 번째 센서에서 현재 계측된 시간영역 가속도 신호이다.

본 논문에서는 손상 부재 이외의 계측 개소에서 계측된 신호로부터 계산된 손상 지수를 이용하여 2.2절에 제시한 기법을 이용하고 신뢰도구간을 99.9%로 일괄 적용하여 손상 유무 결정 경계치를 설정하였다. Fig. 12~18은 손상 기둥을 변화시켜 가면서 총 23개소에서 획득한 가속도 데이터로부터 산정된 손상 지수를 정규화(Normalized)하여 나타낸 그래프이다. 또한, 각 손상 경우 별로 해당 손상 기둥의 강성을 10%, 20%, 30% 수준으로 저하시켰을 때의 그래프를 각각 나타내었다. 즉, Fig. 6의 취약개소 중 기둥 A에 손상이 발생한 경우의 정규화된 손상 지수 그래프를 3가지 강성저하 수준별로 Fig. 12에 나타내었다. 같은 방식으로, Fig. 13은 기둥 B, Fig. 14는 기둥 C, Fig. 15는 기둥 A, B, Fig. 16

Fig. 12. Detection results (Damaged Column: A)

Fig. 13. Detection results (Damaged Column: B)

Fig. 14. Detection results (Damaged Column: C)

Fig. 15. Detection results (Damaged Column: A and B)

은 기둥 A, C, Fig. 17은 기둥 B, C 그리고, Fig. 18은 기둥 A, B, C에서 각각 손상이 발생한 경우의 정규화된 손상 지수 그래프를 3가지 강성저하 수준별로 나타낸 것이다.

Fig. 12(a)~(c)에서 보듯이, 손상이 발생한 기둥 A(센서번호 31)에서의 손상 지수가 경계치를 초과하여 가장 크게 나타나 손상 발생 유무가 잘 검출되는 것으로 나타났다. 다만, Fig. 12(a)의 강성 저하율이 10% 수준인 경우, 손상이 발생되지 않은 다른 계측 위치(센서번호 33, 202, 203, 206)에서 획득한 데이터의 손상 지수가 경계치를 초과하여 손상이 발생한 것으로 검출되는데, 이는 강성 저하율 10% 손상 수준은 역사구조물의 국부 구조계에 미치는 영향이 타 손상 수준에 비해 상대적으로 낮아 손상 개소에서 손상지수와 타 개소에서의 손상 지수와 크기가 상대적으로 차이가 덜 나는데다가

하중 재분배 효과에 의해 일부 손상 기둥의 근처 개소에서 가속도 응답이 커졌기 때문이라 사료된다. 손상의 위치를 바꾸거나 손상의 개수를 늘린 경우에서도 Fig. 13~18에서 보듯이 이와 유사한 경향을 보인다.

건전성평가 알고리즘에 대한 수치해석 검증결과, 정규화된 손상 지수 그래프에서 보듯이 손상 기둥에서의 손상 지수가 경계치를 넘어 최대값을 나타내며, 비손상 위치에서의 손상 지수보다 상대적으로 큰 것을 알 수 있어 제안한 알고리즘이 역사구조물의 건전성 손상 발생 유무를 판단하는데 활용이 가능할 것으로 사료된다. 다만, Fig. 15(a), 16(a), 18(a)에서와 같이 손상 개소가 여러 곳이면 손상 수준인 강성 저하율이 10% 수준으로 낮은 경우 손상 오진단(false alarm)이 발생할 확률이 있는 것으로 나타났다.

Fig. 16. Detection results (Damaged Column: A and C)

Fig. 17. Detection results (Damaged Column: B and C)

Fig. 18. Detection results (Damaged Column: A, B and C)

4. 결 론

본 논문에서는 수치해석을 통해 획득한 가속도 응답 데이터를 이용, 확률론적 패턴인식 기법에 접목하여 역사 구조물의 구조 건전성을 평가하는 알고리즘을 제안하였고, 서울 지하철 충무로역사를 대상으로 수치해석을 수행하여 제안한 패턴인식 기반 구조건전성 평가 알고리즘의 적용성을 검증하였다. 본 연구에서 사용된 패턴인식 기법은 자가 학습 기반 기법으로는 이상치 해석 기법을, 지도 학습 기반 기법으로는 Support Vector Machine 기법이다.

역사구조물의 구조건전성 평가에 패턴인식 기법의 적용을 위하여 패턴인식의 입력 값인 손상 지수로 적절한 변수를 선정하기 위해 수치해석을 수행하였으며 결과는 다음과 같다: (1) 교량 등과 같은 토목구조물에서 흔히 사용되는 진동모드 및 진동수와 같은 동특성치의 경우, 구조계의 모드 해석 결과로부터 일반적으로 사용되는 저차 모드에서 손상에 의한 영향이 미미하여 동특성치를 손상 지수로 활용하기에는 어려운 것으로 나타났다. (2) 수치해석으로 도출된 시간영역 가속도 응답의 경우에는, 제안한 패턴인식 기반 구조건전성 평가 기법을 통해 충무로 역사의 취약 개소에서의 임의 손상을 잘 검출해 내는 것으로 나타나 가속도 응답 데이터를 손상 지수로 활용이 가능한 것으로 나타났다.

가속도 응답데이터의 에너지량을 나타내는 가속도응답 RMS 값을 손상 지수로 적용하고 수치해석을 통하여 제안한 패턴인식기반 구조건전성 평가 알고리즘의 적용성을 검증하였고 그 결과는 다음과 같다: (1) 충무로 역사의 취약개소로 나타난 3개 기둥에 대한 여러 손상 조합에 대하여 손상 유무를 잘 검출하는 것으로 나타나, 제안한 패턴인식기반 구조 건전성 평가 알고리즘이 실제 역사구조물의 구조 건전성 평가에 충분히 적용이 가능할 것으로 판단된다. (2) 다만, 손상 개소가 여러 곳이고 손상 수준이 작은 경우, 손상이 발생치 않은 일부 개소에서도 손상이 발생한 것으로 오진단하는 경우가 있으므로, 보다 정확한 손상진단을 위해 손상유무 경계치를 설정하는 신뢰도 구간 조정에 대한 연구와 함께 적용 가능한 손상 수준의 범위 설정에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

향후, 충무로역사로부터 실 계측한 가속도 응답을 이용하여 수치해석 모델을 모델업데이트 기법을 통해 실제와 가깝게 모델을 업데이트하고, 이를 활용하여 취약개소의 강성 저하를 통한 가속도응답을 학습데이터로 구축한 후 제안한 패턴인식 기반 구조건전성 평가 알고리즘을 검증하고자 한다. 또한, 구조물의 손상정량화 및 손상유무 판단을 위한 적정 손상 지수에 대한 연구와 함께 신뢰도 구간 조정을 통한 구조물의 위험 손상 유무를 판단하는 결정 경계치 설정에 대한 연구를 진행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시철도표준화 2 단계연구의 연구비지원(07 도시철도표준화 A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Coles, S. (2001) *An introduction to statistical modeling of extreme values*, Springer, Verlag.
- Kim, D.J., Lee, H.C., Jaishi, B. and Lee, S.H. (2006) Damage assessment by finite element model updating & research about detection of structural damage with using mode shape, *Proceedings of KSCE 2006 Structures*, Gwangju, Korea, pp. 2420-2423.
- Kim, J.M., Choi, J.S. and Lee, J.S. (2003) A new hybrid method for nonlinear soil-structure interaction analysis, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 7, No. 6, pp. 1-7.
- Park, G., Sohn, H., Farrar, C.R. and Inman, D.J., (2003) Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward, *Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, No. 6, pp. 451-463.
- Park, S., Kim, J.W., Lee, C. and Park, S.K., (2011) Impedance-based Wireless Debonding Condition Monitoring of CFRP Laminated Concrete Structures, *NDT&E International*, Vol. 44, No. 2, pp. 232-238.
- Park, S., Lee, C. and Sohn, H., (2010) Reference-free Crack Detection using Transfer Impedances, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 12 pp. 2337-2348.
- Shin, J.R., An, T.K., Lee, C. and Park, S. (2011) Numerical studies on the structural-health evaluation of subway stations based on statistical pattern recognition techniques, *Proceedings of Korean Society for Railway 2011*, Hoeng Sung, Korea, pp. 1735-1741.
- Shin, J.R., An, T.K., Park, E.C., Kim, M.S. and Yoon J.G. (2010) Numerical study for the evaluation technique on the health-state of subway stations, *Proceedings of Korean Society for Railway 2010*, Jeju, Korea, pp. 983-989.
- Shin, J.R., Kim, J.H., Ahn, T.K., Han, S.Y., Hwang, K.P. and Kim, Y.S., (2009) A study on dynamic behavior of subway station for structural health-monitoring system, *Proceedings of KSPE 2009*, Jeju, Korea, pp. 1095-1096.
- Vapnik, V.N. (1995) *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer, New York.
- Xie, M., Goh, T. N. and Kuralmani, V. (2002) *Statistical Models and Control Charts for High Quality Processes*, Springer, New York.

© 논문접수일 : 12년 04월 04일

© 심사의뢰일 : 12년 04월 05일

© 심사완료일 : 12년 04월 17일