

스마트 센서 시스템을 이용한 구조물의 모달 인자 추출

Identify Modal Parameter by The Output Response of Structure Using Smart Sensor System

이 우 상* 허 광 희** 박 기 태*** 전 준 룡****
Lee, Woo-Sang Heo, Gwang-Hee Park, Ki-Tae Jeon, Joon-Ryong

Abstract

In this study, the research was carried out on how to identify the modal parameter by acquiring the output response of the structure only through the smart sensor system. The objective of this research is to verify the performance and the on-site adaptability of the smart sensor system that have been actively researched as the advanced measuring system so far. Smart Sensor System was developed so that the real-time dynamic measurement can be performed by means of MEMS-type accelerated sensor, 8 bit CPU, wireless MODEM. In the modal parameter identification test, random excitation was added to the cantilever beam, and then the response of the structure was obtained using the smart sensor system and the wire measurement system respectively. In analyzing the data, modal parameter was identified using NExT & ERA algorithm. Furthermore, the optimal measurement location was selected through EOT algorithm in order to obtain the qualified output response. Result of the test, it was possible to verify the on-site applicability of the smart sensor.

요 지

본 논문에서는 구조물의 응답 신호만을 스마트 센서 시스템으로 획득하여 모달 인자들을 추출하는 연구를 수행하였다. 본 연구의 목적은 최근에 차세대 계측시스템으로 활발히 연구 되고 있는 스마트 센서 시스템의 성능과 현장 적용 가능성을 검증하는데 있다. 본 연구에 사용된 스마트 센서 시스템은 MEMS형 가속도 센서와 8bit CPU, 무선모뎀을 이용하여 실시간 동적계측이 가능하도록 개발되었다. 모달 인자 추출 실험은 모형 캔틸레버 보에 임의의 가진을 가한 후, 구조물의 응답을 스마트 센서와 범용계측장비로 각각 획득하였다. 데이터 분석은 NExT & ERA 알고리즘을 이용하여 모달 인자를 추출하였다. 또한, 양질의 데이터를 획득하기 위하여 EOT알고리즘으로 최적의 계측위치를 선정하였다. 실험 결과, 스마트 센서의 현장 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

Keywords : EOT, ERA, Modal parameter, NExT, Smart sensor

핵심 용어 : 고유계측원기법, 자연가진기법, 모달 인자, 최적계측위치, 스마트 센서

* 정희원, 한국건설기술연구원 복합구조연구실 Post-Doc

** 정희원, 건양대학교 토목공학과 교수

*** 정희원, 한국건설기술연구원 복합구조연구실 선임연구원

**** 학생회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

E-mail : slws@kict.re.kr 018-420-0731

•본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근에 토목 구조물은 구조형식에 있어서 장대하고 복잡해져 가고 있으며, 사회적, 경제적인 질적 향상에 부응하여 구조물의 안전에 대한 욕구가 증대되고 있다. 또한 근래에는 전 세계적으로 예기치 않은 기상이변으로 인한 자연재해가 증가하고 있어, 사회기반시설에 대한 안전관리가 그 어느 때보다도 중요시 되고 있다. 이러한 이유로 인하여 국내에서는 90년대 중반 처음으로 남해대교에 상시모니터링시스템을 도입 한 이후 현재에는 현수교와 사장교와 같은 장대교량을 중심으로 전국 중요교량 40여 개소에 상시모니터링시스템을 설치하여 실시간으로 교량의 상태를 감시하고 있다. 그러나 현재 운용 중에 있는 상시모니터링시스템의 높은 초기 설치비용과 유지관리 비용은 중소 규모 교량에 대한 상시모니터링시스템의 보급을 어렵게 만드는 가장 큰 요소가 되고 있다.⁽⁹⁾ 이러한 이유로 인하여 저 비용 모니터링시스템에 대한 필요성이 전 세계적으로 요구되었고, 그 해결 방안으로 무선데이터 통신(wireless), 저가(low cost), 저 전력(low power), 지능화(Intelligence)가 가능한 스마트센서장치에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. Straser는 처음으로 유선 계측 시스템의 케이블 작업으로 인한 높은 초기 설치비용과 유지관리 비용을 줄이기 위한 방법으로 무선 통신에 의한 계측 시스템을 제안하였다.⁽¹⁴⁾ 그 이후 무선 통신 기능과 지능화 기능이 있는 스탠포드 대학에서 처음으로 개발을 시작한 WiMMS, MEMS 센서를 내장한 UCI에서 개발한 DuraNode, USN(Ubiquaters Sensor Network) 구성이 가능하고 전력 소모가 적고, 소형이면서 다양한 센서가 부착된 MICA Mote 시스템이 개발 중에 있다.⁽³⁾ 또한 이러한 스마트 센서를 구조물 모니터링 시스템에 적용하는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 현재 구조물의 장시간 노후화 정도와 손상추정은 주로 동적 파라미터(고유주파수, 감쇠계수, 모드형상 등)의 변화를 이용하고 있다.⁽⁴⁾ 이와 관련하여 Lynch 등은 WiMMS를 이용하여 강제 진동을 받는 5층 모형구조물과 Alamos Canyon Bridge의 FRF(Frequency Response Function)를 획득하는 실험을 통하여 스

마트 센서 장치를 이용한 구조물의 동특성 분석실험을 실시하였다.⁽⁵⁾ 또한 Shinozuka 등은 DuraNode를 이용하여 충격 햄머(Impact Hammer)로 가진한 강재 트러스 보도 육교의 응답을 계측하여 동특성을 분석하는 연구를 수행하였다.⁽⁶⁾ 이러한 연구 결과들은 스마트 센서 장치가 구조물의 동특성 분석을 통한 모니터링 시스템에 적용이 가능함을 확인시켜주었다. 그러나 이와 같은 연구들은 실험 대상 구조물에 인위적인 외력을 가한 후, 외력과 응답신호를 측정하여 모달 인자들을 추출하는 방법으로 실 구조물에 적용하기에는 많은 문제점들을 가지고 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위한 연구로서 응답신호만을 이용하여 구조물의 모달 인자들을 추출하는 연구가 기존 계측시스템을 기반으로 수행되어졌다. 이 중에 많은 연구자들에 의해 자연가진 기법(NEXt)이 연구되었으며, 특히, Dyke와 Caicedo 등은 실 구조물을 대상으로 실험한 결과 자연가진 기법이 교량의 건전도를 모니터링하는데 효과적임을 입증하였다.^{(7),(8)}

본 논문에서는 스마트센서의 성능과 현장 적용 가능성을 구체적으로 검증하기 위한 목적으로 기존에 연구 발표한 결과를 바탕으로 모형 구조물을 이용하여 상시 가진 상태에서 획득한 구조물의 응답신호를 스마트센서로 획득하여 모달 인자를 추출하는 연구를 수행하였다.⁽²⁾ 이를 위하여 무선 모델과 MEMS 가속도 센서, 8bit 마이크로컨트롤러, 메모리로 구성된 스마트센서를 자체 개발하였다. 획득한 데이터의 분석은 NEXt & ERA 알고리즘을 사용하여 모달 인자를 추출하였으며, 결과의 분석은 범용 유선계측시스템의 분석 결과와 비교하여 실시하였다. 또한 양질의 데이터를 얻기 위한 방법으로 최적운동에너지법을 이용한 최적 계측 위치 선정을 통하여 센서의 부착 위치를 결정하였다. 연구 결과, 스마트 센서의 현장 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

2. 스마트 센서의 개발

본 연구에서 사용한 스마트센서장치는 Fig. 1과 같이 가속도 센서가 부착된 센서 모듈과 마이크로컨트롤러가 위치한 제어 및 처리 모듈, 무선통신을 담당하는

무선 모뎀 모듈로 구성하였다.⁽¹⁾ 가속도 센서로는 MEMS 기술로 제작되어 가격에 비하여 성능이 우수하고 측정 범위가 작은 대신에 민감도가 우수하며, 소형이며, 전력 소모량이 적은 Analog Devices사의 ADXL203 센서를 사용하였다. ADXL203 센서의 특징으로는 일반 전자 소자와 함께 PCB 에 부착이 용이하고 저항 소자와 캐패시터 소자를 사용하여 간편하게 센서 대역폭을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 센서 시스템 모듈의 성능을 100Hz의 샘플링 율, 50Hz의 대역폭(Bandwidth)으로 설계하였으며 실시간으로 측정이 가능하도록 무선 모뎀 모듈을 설계하였다. 또한 구조물에 센서의 부착이 편리하도록 센서 시스템 모듈은 별도의 알루미늄 케이스로 제작하였다. 통신거리는 약 300m이다. Fig. 2은 본 연구를 통하여 설

계·제작된 스마트 센서의 시제품이며, Table 1는 ADXL203의 성능을 요약하여 나타낸 것이다.

3. 상시진동에 의한 동특성 분석 기법

3.1 최적계측위치 알고리즘

구조물의 상태를 세밀하게 측정하기 위해서는 조밀한 배열의 계측기 구성이 이루어 져야 하는데 현실적으로 계측기의 수는 제한적인 수밖에 없다. 이러한 이유로는 경제적인 요인과 계측 시스템의 데이터 처리에 한계가 있기 때문이다. 그러므로 효과적인 계측시스템을 구축하기 위해서는 구조물의 감시정보의 질을 최대화 하면서 센서의 수량을 최소화하기 위한 최적계측시스템의 구축이 필요하다.

최적계측위치의 선정 문제는 많은 연구가들에 의해서 다양한 방법들이 제안되었다. 그들 중에서 허광희 등은 토목구조물과 같은 저주파수 대역의 진동특성을 갖는 구조물에는 응답 운동에너지(Kinetic Energy)

Table 1 ADXL203 센서의 성능

측정범위 (g)	민감도 (mV/g)	공급전원 (V)	공급전류 (mA)	사용온도범위 (°C)
±1.7	1000	5	0.7	-40~125C

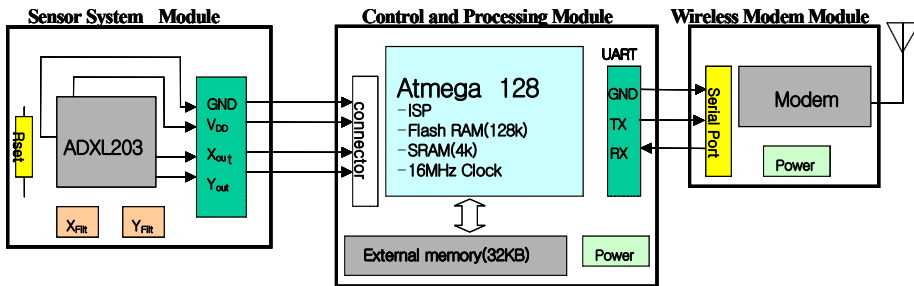


Fig. 1 스마트 센서의 구성

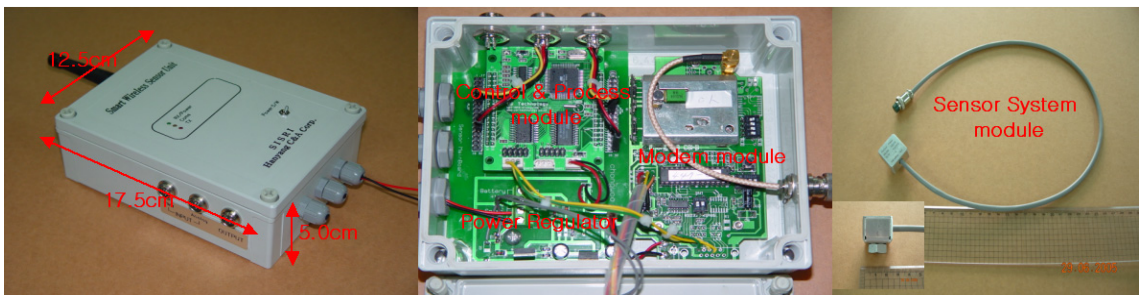


Fig. 2 스마트 센서의 시제품

를 최대도 획득할 수 있는 위치를 찾는 최적운동에너지법(Kinetic Energy Optimization Techniques : EOT)이 적합하다는 연구결과를 발표하였다.⁽¹⁰⁾

구조물 시스템에서 측정된 변형운동 에너지가 최대가 되는 동역학적인 모달 정보를 획득하여 최소의 에너지를 나타내는 지점을 순차적으로 제거함으로써 최적계측시스템을 구성하는 알고리즘이 최적운동에너지법(Kinetic Energy Optimization Technique)이다. 일반적으로 구조물 시스템의 운동 에너지의 분포를 다음 식 (1)과 같이 정의한다.

$$[KE] = \{\Phi\}^T [M] \{\Phi\} \quad (1)$$

여기서, $\{\Phi\}$ 는 측정된 모드형상 벡터이다. 식 (1)에서 시스템의 질량 행렬인 $[M]$ 을 상부대각행렬 $[U]$ 와 하부대각행렬 $[L]$ 로 Cholesky 분해하여 운동 에너지 $[KE]$ 을 다시 유도하면 식 (2)과 같다.

$$[KE] = [\Psi]^T [\Psi] \quad (2)$$

여기서, $[M] = [L][U]$ 이므로 $[\Psi] = [U]\{\Phi\}$ 이다. 그리고 감소된 계측기로 구성된 시스템의 모드형상 사영(Projection)은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \overline{\Phi} &= projection(\Phi) \\ \overline{\Psi} &= projectoin(\Psi) \end{aligned} \quad (3)$$

이와 유사한 방법으로 감소된 계측 시스템으로부터 획득한 에너지는 모든 계측기로부터 획득한 에너지에서 제거된 계측기가 기여한 에너지를 제외하는 방법으로 구할 수 있는데, 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\overline{KE}] = [\overline{\Psi}]^T [\overline{\Psi}] \quad (4)$$

이와 같은 특성으로 인하여 최종 계측기를 배치하는 목적은 구조물의 운동 에너지의 측정을 최대화할 수 있는 최소화된 계측기의 구성을 찾는 데 목적이 있다. 질량 매트릭스가 역행렬이 존재할 때 비특이(Non-

Singular)행렬 $[\overline{KE}]$ 의 열 랭크 N은 $\{\overline{\Phi}\}$ 에서 선형 독립 사영 벡터의 수와 같다. 따라서 에너지 매트릭스의 고유치(Eigenvalue) Θ , 고유벡터(Eigenvector) Γ 는 다음 식에서 얻는다.

$$[\overline{KE}][\Gamma] = [\Gamma][\Theta] \quad (5)$$

행렬, $[\overline{KE}]$ 가 N의 크기를 가진 사각, 대칭, 양의 한정 행렬이기 때문에, EOT의 각각의 연산 절차에서 구하는 고유치 쌍의 연산은 크게 문제가 되지 않는다. 그러므로 각각의 잔여 계측기의 기여도는 다음의 EOT 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\{EOT\} = \sum_{j=1 \dots N} \left[[\overline{\Psi}][\Gamma][\Theta]^{-\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (6)$$

$\{EOT\}$ 에서 최소의 기여도를 보이는 계측기를 하나씩 제거하고, 제거된 새로운 매트릭스의 랭크 반약도를 확인한다.

3.2 상시가진에 의한 동특성 산출 알고리즘

3.2.1 자연가진기법(NExT)

강제 가진법은 구조물을 가진시키기 위한 인위적인 입력 가진을 구조물에 발생시켜야 하고, 가진된 입력 신호의 측정이 필요하기 때문에 가진을 위한 특별한 장치가 필요하다. 그리고 구조물에 진동을 발생시키기 위한 가진력에 의해 구조물이 손상을 입을 수가 있다.⁽¹¹⁾ 이러한 강제 가진법이 가지는 문제점을 해결하기 위한 방안으로 많은 연구자들에 의해 자연가진기법(Natural Excitation Technique : NExT)이 연구되었다.⁽⁸⁾ 이것은 외부 가진력을 불특정 정상상태의 외부 가진으로 가정하게 되면, 강제 진동을 갖는 운동 방정식의 형태가 상호상관함수(Cross Correlation Function : CCF)에 의해 2계 체차미분방정식의 형태로 표현되는 특성을 이용한 기법이다.

자유도계를 갖는 선형감쇠시스템에서 외부 가진과

응답이 불규칙 정상상태라고 가정하면 운동방정식은 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [C]\{\dot{X}(t)\} + K\{X(t)\} = \{F(t)\} \quad (7)$$

여기서, $[M]$ 는 질량 행렬(Mass Matrix), $[C]$ 는 감쇠 행렬(Damping Matrix), $[K]$ 는 강성 행렬(Stiffness Matrix), $\{F(t)\}$ 는 하중 벡터(Force Vectors), $\{\ddot{X}(t)\}, \{\dot{X}(t)\}, \{X(t)\}$ 는 가속도, 속도, 변위 벡터 이다.

동적 특성치 행렬은 결정론적인 것으로 가정하고 양변에 기준응답 신호를 곱하여 확률의 기대치를 취하면 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{R_{\ddot{X}X_i}(t,s)\} + [C]\{R_{\dot{X}X_i}(t,s)\} + [K]\{R_{XX_i}(t,s)\} = \{R_{FX_i}(t,s)\} \quad (8)$$

여기서 $\{R(\cdot)\}$ 는 상관함수의 벡터를 나타낸다. $\{\ddot{X}(t)\}, \{\dot{X}(t)\}, \{X(t)\}$ 가 불특정 정상과정이라면 식 (8)은 다음 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{R_{\ddot{X}X_i}(\tau)\} + [C]\{R_{\dot{X}X_i}(\tau)\} + [K]\{R_{XX_i}(\tau)\} = 0 \quad (9)$$

여기서, 상호상관함수, $\{R_{XX_i}\} = E[\{X(t)\} \cdot \{X_i(t+\tau)\}]$ 이고, 변위 벡터의 항이 상관함수로 표현되고 자유 진동을 갖는 운동방정식으로 표현된다.

이 기법은 유한개의 계측위치로부터 측정된 응답 신호들 간에 교차파워스펙트럼(Cross Power Spectrum : CPS)을 획득하여 다음 식 (10)과 같이 상호상관함수와 교차파워스펙트럼이 푸리에(Fourier) 쌍(Pair)으로 존재한다는 점을 이용하여 교차파워스펙트럼을 역 푸리에 변환하여 상호상관함수를 얻을 수 있다.

$$\{R_{AB}(n)\} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \{\Omega_{AB}(k)\} e^{j(2\pi kn/N)} \quad (10)$$

$$(n = 0, 1, 2, \dots, N-1)$$

여기서, $\{R_{AB}\}$ 는 상호상관함수이며, $\{\Omega_{AB}\}$ 는 이산된 교차파워스펙트럼이고, N 은 한주기에 포함된 데이터의 수, n 은 시간 영역에서의 데이터 번호, k 는 주파수 성분을 나타낸다. 이렇게 변환된 상호상관함수는 시간 영역의 동특성분석 알고리즘에 의해 구조물의 동적 특성을 분석할 수 있다.

3.2.2 고유계 구현기법(ERA)

시간 영역에서의 특성분석 기법은 다양하지만, 고유계 구현기법(Eigensystem Realization Algorithm : ERA)은 경 감쇠를 갖는 구조물의 특성분석에 적합하고, 다중 입출력 모델에 효과적인 기법이다. 이 알고리즘은 획득된 상호상관함수를 이용하여 구성된 다음 식 (11)과 같은 Hankel 행렬로 시작된다.⁽¹²⁾⁽¹³⁾

$$[H(k-1)] = \begin{bmatrix} [Y(k)] & [Y(k+1)] & [Y(k+s-1)] \\ [Y(k+1)] & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ [Y(k+r-1)] & \dots & [Y(k+s+r-2)] \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, $[Y(k)]$ 는 임펄스응답 행렬이며, r 과 s 는 각각 Hankel 행렬의 행과 열의 수이다. 식 (11)에서 적절한 크기의 행과 열을 선택하여 $[H(0)]$ 를 산출하고, 식 (12)과 같이 Hankel 행렬에 대해 특이치 분해(Singular Value Decomposition)를 수행한다.

$$[H(0)] = [R][\Xi][S]^T \cong [R_n][\Xi_n][S_n]^T \quad (12)$$

여기서, $[R]$, $[S]$ 는 비 특이행렬(Non-Singular)이고, $[\Xi]$ 는 양의 대각 행렬로 $[H(0)]$ 의 특이 값이다. 그리고 $[R_n]$, $[S_n]$, $[\Xi_n]$ 은 수치적 모드(물리적 의미가 없음)에 대응되는 극히 작은 특이 값에 대응하는 행과 열을 제거하여 획득한 행렬이다. 또, $[\Xi]$ 는 대각

행렬이므로 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$[H(0)] \cong ([R_N][\Xi_N]^{1/2})([\Xi_N]^{1/2}[S_N]^T) \quad (13)$$

하중이 작용하지 않고, 초기변위가 $x(0)$ 로 주어진 시스템의 경우, 이산시간 상태 공간에서의 Markov 변수에 의해 식 (11)은 식 (14)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(k-1) &= \mathbf{P}\mathbf{A}^{k-1}\mathbf{Q} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{k-1} \end{bmatrix} \mathbf{A}^{k-1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}\mathbf{x}(0) & \mathbf{A}^2\mathbf{x}(0) & \mathbf{L} & \mathbf{A}^r\mathbf{x}(0) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, A 와 C 는 각각 시스템 행렬과 출력 행렬이다. 그리고 $X(0)$ 는 초기조건 벡터이며, k 는 이산시간에서 k 번째 샘플을 의미한다. 식 (14)에서 $k=1$ 과 $k=2$ 를 고려하여 P 와 Q 를 구하고, 각각을 조합하여 식 (15)와 같이 상태공간에서의 시스템 행렬과 출력 행렬을 정의한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \Xi_N^{-1/2} \mathbf{R}_N^T \mathbf{H}(1) \mathbf{S}_N \Xi_N^{-1/2} \\ \mathbf{C} &= [\mathbf{I} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{L} \quad \mathbf{0}] \mathbf{R}_N \Xi_N^{1/2} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, I 는 항등 행렬이고, 0 은 영 행렬이다. 따라서 시스템의 고유주파수는 구조물의 질량, 감쇠, 강성 등의 항으로 구성된 시스템 행렬 A 의 고유 값으로부터 직접 획득하게 된다. 그리고 구조물의 모드 형상은 다음 식 (16)과 같이 시스템 행렬 A 의 고유벡터에 출력 행렬을 곱하여 획득하게 된다.

$$\Phi = C\Psi \quad (16)$$

여기서, Φ 는 모드 형상이고, Ψ 는 시스템 행렬 A 의 고유벡터이다.

4. 동특성 분석 실험

4.1 실험체

4.1.1 실험 구조물의 제원

본 연구에서는 힘 모드에 의해 구조물의 전체적인 거동 특성이 결정되도록 캔틸레버 보를 제작하여 동특성 분석 실험을 수행하였다. 캔틸레버 보는 Fig. 3과 같이 구조용 강재를 이용하여 제작되었으며, 모형 구조물의 총 길이는 0.9m로 제작되었다. 보의 폭과 두께는 6cm와 0.3cm로 하여 횡 방향의 동적 응답이 주축 방향으로 발생하는 동적 응답에 영향을 받지 않도록 하였고, Table 2는 사용된 보의 재료적 특성치이다.

4.1.2 모형 구조물의 FE해석

모형 구조물의 최적계측위치 선정에 필요한 질량 행렬과 모드 벡터를 획득하고 동특성 분석을 위한 참고 자료로 활용하기 위하여 제작된 캔틸레버 보의 FE해석을 수행하였다.

FE 모델은 2절점 보 요소(Beam Element)를 이용하여 구성하였다. Table 2에 재료적 특성치들은 강재료의 일반적인 제원에 근거하여 결정되었다. 전체적인 캔틸레버 보의 FE 모델은 총 10개의 요소와 11개의 절점을 갖는다. FE 모델은 EDS의 I-DEAS를 이용하여 모드해석이 수행되었으며, Table 3과 Fig. 4

Table 2 캔틸레버 보의 재료 물성치

Property	Length (m)	Area (m ²)	Modulus of Elasticity (kgf/cm ²)	Mass (kgf/m ³)
Value	0.9	1.8 × 10 ⁻⁴	2.0 × 10 ⁶	7820

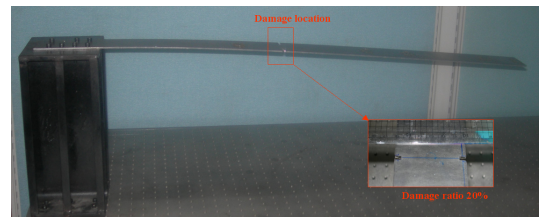
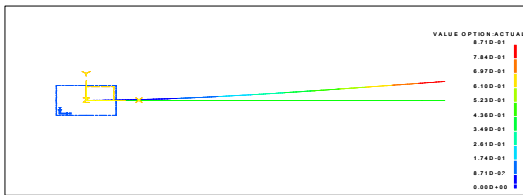


Fig. 3 실험용 캔틸레버 보

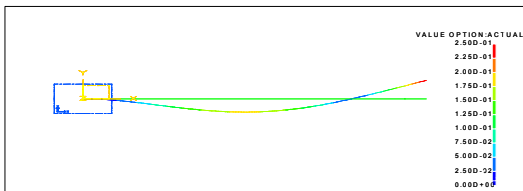
는 각각 해석에 의한 캔틸레버 보의 고유 진동수와 모드 형상을 나타낸 것이다. 제작된 캔틸레버 보는 1차에서 4차까지의 모드가 주파수 범위 2.95~101.55Hz 까지 분포하고 있으며 모드 형상은 굽힘에 지배를 받는 모양을 보인다.

Table 3 캔틸레버 보의 FE 해석 결과

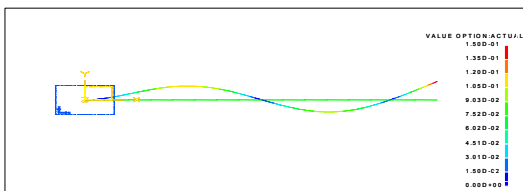
Mode	1st Mode(Hz)	2nd Mode(Hz)	3rd Mode(Hz)	4th Mode(Hz)
Frequencies	2.95	18.48	51.76	101.55



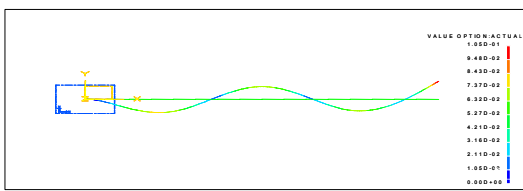
(a) 1차 휨 모드



(b) 2차 휨 모드



(c) 3차 휨 모드



(d) 4차 휨 모드

Fig. 4 캔틸레버 보의 모드형상

4.2 EOT에 의한 최적 계측 위치 선정

본 연구에서는 EOT알고리즘을 이용하여 실험 대상 구조물의 최적계측위치를 결정하였다. 실험 대상 구조물인 캔틸레버 보에 Fig. 5와 같이 총 10개의 초기 계측 점을 선정하여 EOT 알고리즘을 이용하여 4개의 초기 고유모드를 최적으로 계측 할 수 있는 4개의 계측기 위치를 선정하였다.

EOT을 사용하기 위하여 가이언 소거법에 의해 계산되어진 정형화된 질량 행렬과 모드 벡터(Mode Vector)가 사용되었다. 또한 기여도가 적은 계측기를 찾기 위해서 선형독립성을 유지하며 매회 최저 기여 계측기를 제거하기 위하여 초기 값의 상대적 백분율로 계산된 에너지 행렬식이 사용된다. Fig. 6는 최적운동 에너지법에 의한 최적계측위치 선정 알고리즘에 목적 모드 수의 변화를 주어 계측기의 수에 따른 구조물의 운동 에너지 획득 성능을 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 최적운동에너지법의 초기 단계에서는 목적 모드의 수에 관계없이 공통적으로 아주 안정적인 운동에너지의 변화를 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 측정할 계측기 수를 점차적으로 감소 시켜 초기 후보 계측점의 수와 비교하여 약 2개 이상의 계측기를 제거하게 되면 운동에너지가 급속히 감소함을 알 수 있다. 또한 목적 모드의 수가 적을수록 에너지의 감소비율이 적게 나타났다.

모형 구조물에는 에너지 매트릭스가 랭크 빈약도를 일으킬 때까지 계측기를 제거하여 Fig. 7와 같이 4개의 계측기 위치를 선정하였다. 계측 목표 모드 수는 스마트 센서의 가속도 센서의 성능을 고려하여 초기 3개의 모드를 분석 목표 모드로 설정하였다. Table 4는 계측기의 반복적인 제거에 따른 각각의 계측 위치의 기여도를 정리한 것이다.

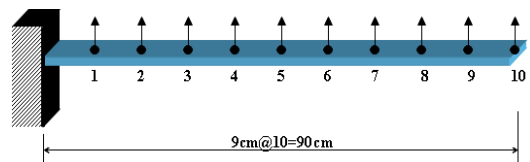
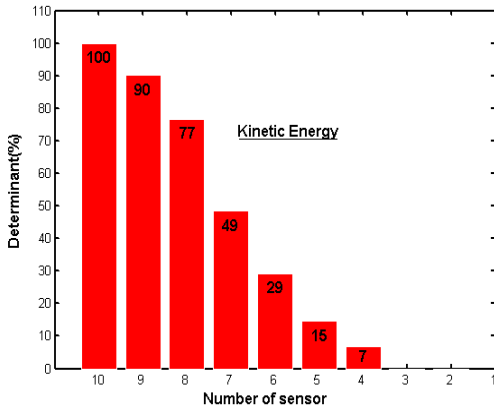
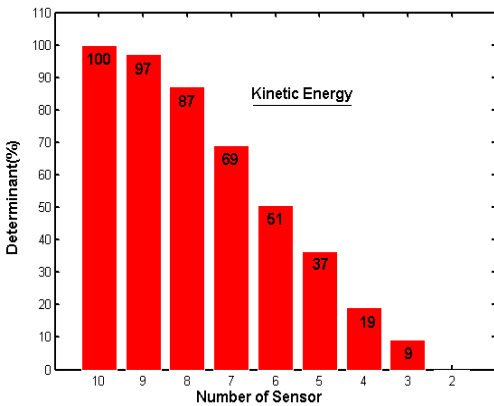


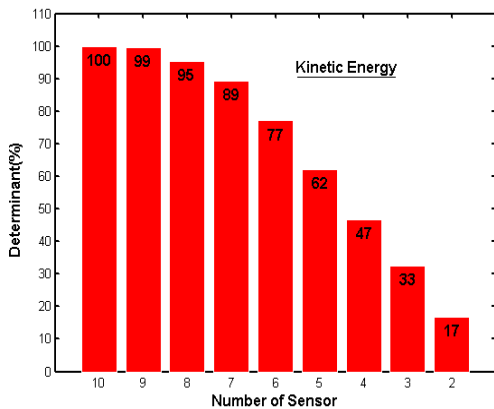
Fig. 5 초기 센서 선정 위치



(a) 4개의 모드를 고려한 경우



(b) 3개의 모드를 고려한 경우



(c) 2개의 모드를 고려한 경우

Fig. 6 모드 수에 따른 운동에너지의 Determinant

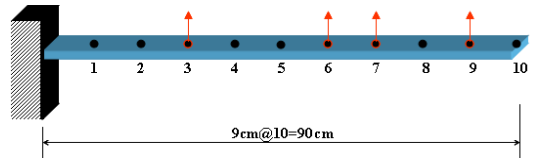


Fig. 7 EOT기반의 3개 모드를 고려한 최적 센서 위치

Table 4 캔틸레버 보의 초기 센서 위치 EOT 값

Sensor Placement	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Step: 1	0.0291	0.1981	0.3550	0.3137	0.2544	0.3327	0.3511	0.2603	0.8041	0.1016
Step: 2		0.2040	0.3650	0.3201	0.2553	0.3334	0.3535	0.2616	0.8051	0.1020
Step: 3		0.2068	0.3677	0.3202	0.2578	0.3408	0.3559	0.2632	0.8875	
Step: 4			0.4611	0.3839	0.2684	0.3441	0.3735	0.2729	0.8962	
Step: 5			0.5144	0.4719		0.4205	0.4084	0.2789	0.9058	
Step: 6			0.5303	0.4737		0.4861	0.5265		0.9834	
Result			Select			Select	Select		Select	

4.3 동특성 분석

스마트 센서 시스템을 교량의 모니터링에 효과적으로 적용하기 위해서는 상시 가진 상황에서의 동특성 분석 성능이 요구된다. 따라서 본 실험에서는 스마트 센서 장치가 실 구조물의 모니터링 시스템에 적용 가능한지를 평가하기 위하여 NExT와 ERA를 이용하여 상시 진동으로부터 획득한 구조물 응답을 분석하여 모달 인자들을 추출하였다.

4.3.1 계측 시스템 구성

스마트 센서 시스템을 이용한 구조물의 상시 진동에 의한 응답 측정 및 획득을 위하여 Fig. 8과 같이 준 실시간 모드의 스마트 센서 장치 3개와 컨트롤박스로 구성된 시스템을 이용하였다. 사용된 센서는 민감도 성능이 우수한 아날로그 출력 센서인 ADXL 203을 사용하였다. 실험은 준 실시간 모드로 설정된 스마트 센서 장치를 이용하여 계측 점(Point)의 위치는 Fig. 9과 같이 총 4개의 계측 점에서 캔틸레버 보로 발생하는 출력 신호를 192Hz의 샘플링율로 1024개의 데이터를 5회 평균하여 획득 하였으며, 기준(Reference) 채널은 목적하는 모든 모드(1~3차의 휨 모드)의 응

답을 적절하게 반영할 수 있도록 10번 절점으로 설정하였다.

실험 결과 비교를 위한 유선 측정 장비로는 8채널의 HP-VXI 1432시스템과, MTS사의 T-DAS를 이용하여 데이터를 획득하였다. 그리고 가속도의 계측을 위해서는 민감도가 500mV/G이며, 측정 주파수의 범위는 1-3000Hz를 갖는 Dytran모델 3134D의 가속도계 5개(기준 채널 1개 포함)를 Fig. 10과 같이 부착하였다. 대상 구조물인 캔틸레버 보의 동적 특성을 분석하기 위해 CPS가 측정되었다. 측정 데이터의 각 프레임당 크기는 1024로 설정하였다. 샘플링 주파수는 Nyquist 주파수를 고려하여 목적 모드인 3차 휨 모드를 획득하기에 충분하도록 250Hz로 설정하였다. 또한, 측정 잡음을 제거하고 전기적 신호의 왜곡을 피하기 위해 Hanning 창을 이용하였다.

구조물에 가해진 상시 진동은 캔틸레버 보의 외부에서 임의로 발생시켰으며, 외부 가진력에 대한 측정 없었다. 상시 진동을 측정하여 구조물의 동적 응답 분석을 위한 목적 모드는 1~3차까지의 휨 모드로 제한하였다.

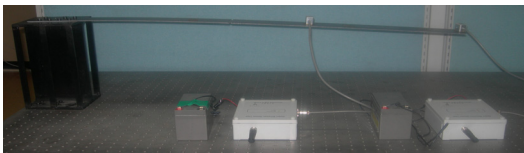


Fig. 8 스마트센서를 이용한 실험

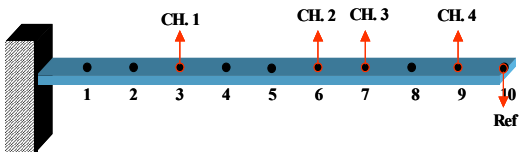


Fig. 9 실험을 위한 센서 부착 위치

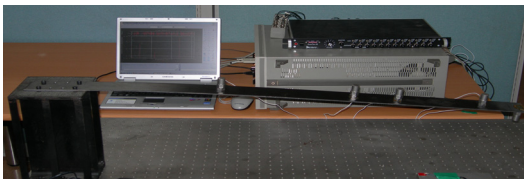


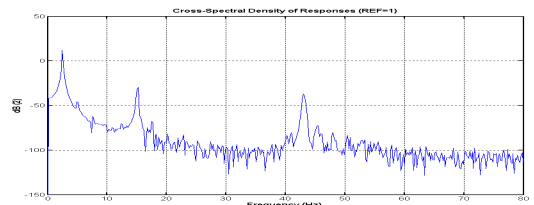
Fig. 10 유선계측시스템을 이용한 실험

4.3.2 측정 결과 분석

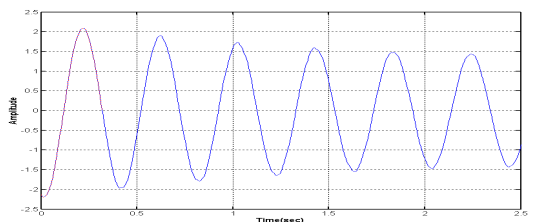
획득한 데이터의 분석은 Los Alamos National Lab에서 개발한 DIAMOND 프로그램을 이용하였다. DIAMOND는 NExT와 ERA 알고리즘 모듈이 내장되어 있어 구조물의 동특성 분석이 가능한 MATLAB 기반의 프로그램이다. Fig. 11은 계측된 데이터를 DIAMOND의 NExT 모듈을 이용하여 교차 파워 스펙트럼(CPS)과 이를 역 푸리에 변환하여 상호 상관 함수(CCF)로 변환된 스마트 센서 시스템과 유선 계측 시스템의 대표적인 신호처리 결과를 나타낸 것이다. ERA 모듈은 NExT 모듈에 의하여 최종적으로 획득한 각 계측 점의 CCF을 이용하여 구조물의 동특

Table 5 캔틸레버 보의 고유진동수와 댐핑계수 분석결과

모드	인자	고유진동수 (Hz)	감쇠비
		1st	스마트센서
	HP-VXI	2.53	2.52
2nd	스마트센서	15.54	0.98
	HP-VXI	16.33	1.13
3rd	스마트센서	42.69	0.41
	HP-VXI	46.54	0.51



(a) Cross Power Spectrum



(b) Cross Correlation Function

Fig. 11 CH2에서의 Cross Power Spectrum과 Cross Correlation Function

Table 6 캔틸레버 보의 MAC Value 분석 결과

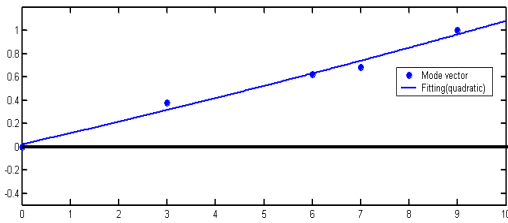
SWMAS	Wire Measurement System		
	1st Mode	2nd Mode	3rd Mode
1st Mode	0.9852	0.3201	0.0195
2nd Mode	0.1610	0.9510	0.0244
3rd Mode	0.0296	0.0268	0.9070

성을 분석한다. Fig 11에서 보는 바와 같이 측정 범위 내에서 목적했던 1~3차의 휨 모드가 모두 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 방법으로 실험의 목표 모드인 처음 세 개 모드의 고유진동수와 댐핑 계수들을 분석하여 유선 계측 시스템의 측정 데이터 분석 결과와 Table 5에 비교 정리하였다.

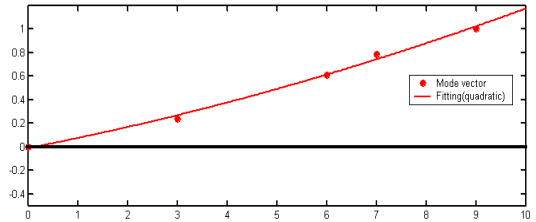
실험에 의해 분석된 구조물의 고유진동수는 유선 계측 시스템으로 측정된 응답을 분석한 결과와 비교하여

1차에서는 약 3%의 오차를 보이고 있고, 2차 모드는 5%, 3차 모드는 8%의 오차를 보여, 고차 모드로 갈수록 스마트 센서 시스템의 센서의 성능이 저하되는 경향을 보였다. 이러한 원인으로 스마트 센서 장치의 마이크로컨트롤러에 내장된 Timer의 성능 문제나 무선모뎀으로 데이터 전송과 수신시 시간지연(Time Delay) 현상이 발생하는 것으로 분석된다. 또한 감쇠비(Damping ratio)의 분석 결과, 고유진동수의 분석 결과와 같이 유선 계측 시스템으로 획득한 응답 신호를 분석한 결과가 스마트 센서 시스템의 분석 결과에 비하여 감쇠비가 각각의 모드에서 크게 분석되었다.

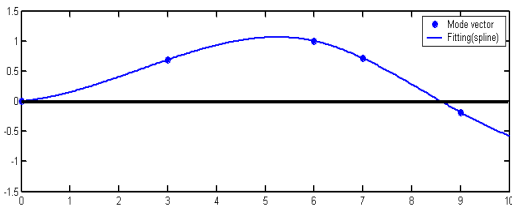
Fig. 12와 13은 실험에 의하여 분석한 캔틸레버 보의 모드 형상들을 Curve Fitting을 수행하여 나타낸 것이다. 이와 같이 두 가지 방법에 의해 획득한 모드



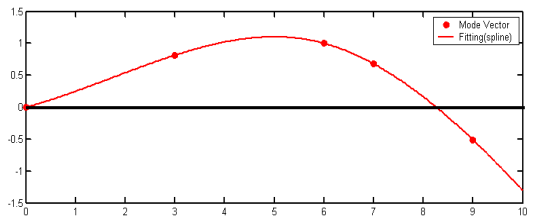
(a) 1차 휨 모드



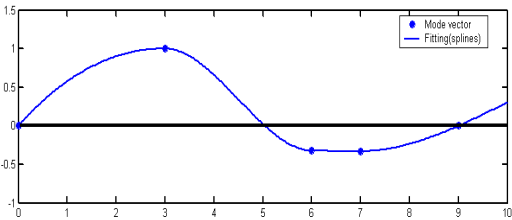
(a) 1차 휨 모드



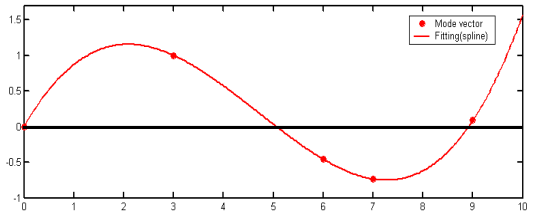
(b) 2차 휨 모드



(b) 2차 휨 모드



(c) 3차 휨 모드



(c) 3차 휨 모드

Fig. 12 캔틸레버 보의 모드 형상(스마트센서)

Fig. 13 캔틸레버 보의 모드형상(유선계측시스템)

형상의 상관관계를 수치적으로 분석하기 위하여 MAC 알고리즘을 이용하였다. Ewins등의 연구 결과에 의하면 MAC의 지표 값이 0.9이상이면 상관관계가 우수하다고 판단하게 된다. 그렇지만, 상관관계 지표가 절점(계측 점)의 수에 많은 영향을 받게 되기 때문에 실

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B05)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

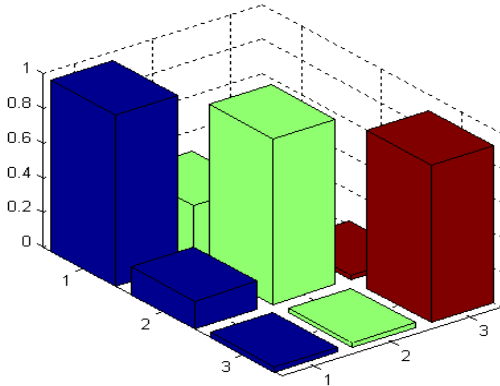


Fig. 14 캔틸레버 보의 MAC value

험 등과 같이 계측 점의 수에 제약을 받게 되는 경우에는 0.8까지도 허용하고 있다.⁽⁴⁾

Table 6과 Fig. 14은 캔틸레버 보의 실험에 의해 획득한 모드와 해석에 의해 획득한 모드 간의 상관관계를 나타낸 것이다. MAC 분석결과, 두 시스템사이의 모드 형상은 전체 모드에서 상관관계 지표가 0.9이상으로 높게 나타났다. 그러나 고유진동수의 비교 결과와 같이 고차 모드로 갈수록 상관관계의 지표가 하락하는 경향을 보였다.

5. 결론

본 논문에서는 모형 구조물의 상시가진에 의한 동특성 분석 실험을 통하여 스마트 센서의 성능 대한 연구를 수행하였다. 스마트 센서 시스템으로 획득한 구조물의 응답신호와 범용 유선계측시스템으로 획득한 응답신호를 NExT 와 ERA 알고리즘을 사용하여 모형 구조물의 고유진동수와 감쇠비, 모드 형상을 추출하여 비교 분석한 결과, 우수한 일치관계를 보여 스마트 센서의 현장 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

1. 허광희, 이우상, 김만구, "스마트 센서 기술을 이용한 구조물 건전도 모니터링 시스템 Part I: 스마트 센서의 개발과 성능평가" 한국구조물진단학회지, 제11권, 제2호, 2007. 03. pp. 134-144.
2. 허광희, 이우상, 신재철, "SWMAS의 성능 검증을 위한 구조물의 동특성 분석" 한국구조물진단학회지, 제9권, 제4호, 2005. 10.
3. Kurata, N., Spencer Jr., B.F., Ruiz-Sandoval, M., Miyamoto, Y. and Sako, Y., "A study on building risk monitoring using wireless sensor network MICA-Mote". First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, Japan, November 13-15, 2003.
4. Ewins, D. J., Modal Testing : Theory, Practice and Application, R. S. P. 2000.
5. Lynch, J.P., et al., "Field Validation of a Wireless Structural Monitoring System on the Alamosa Canyon Bridge", SPIE 10th, San Diego, CA, USA, March, 2003.
6. Masanobu Shinozuka, Maria Q.Feng, Pai Chou, Yangbo Chen, chulsung Park, "MEMS-Based Wireless Real-Time Health Monitoring of Bridge", The 3rd International conference on Earthquake Engineering Najing, China, 8, 2004.
7. Caicedo J.M., Dyke S.J., "Phase II SHM Benchmark Studies: Application of the NExT and ERA for Damage Detection", Proceedings of the IMAC XXI Conference, Orlando, Florida, February 3~6, 2003.
8. Caicedo, J.M., Dyke, S.J., Johnson, E. A., "NExT and ERA for Phase I of the IASC-ASCE Benchmark Problem: Simulated Data", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, submitted, 2002.
9. Straser, E.G. and Kiremidjian, A.S., "A modular

-
- wireless damage monitoring system for structures". Report No. 128, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 1998.
10. Heo, G., Wang, M. L. and Satpathi, D., "Optimal Transducer Placement for Health Monitoring of Long Span Bridge" Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 16, 1997, pp. 495-502.
 11. Salawu, O.S. and Williams, C., "Review of Full-Scale Dynamic Testing of Bridge Structures", Engineering Structure, Vol. 17, No. 2, 1995, pp. 113-121.
 12. Jung, J.N., Applied System Identification, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1994.
 13. Jung, J.N. and Pappa, R.S., "An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction", Journal of Guidance, Control and Dynamics, AIAA, Vol. 8, No. 5, 1985, pp. 620-627.
 14. Straser, E.G. and Kiremidjian A.S., "A modular visual approach to damage monitoring for civil structures." Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials. 2719, 1996, pp. 112-122.
- (접수일자 : 2007년 8월 16일)
(심사완료일자 : 2007년 12월 20일)