



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시, 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리, 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지, 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

하이브리드 구조건전성 모니터링에 의한
강관형 거더교의 손상검색에 관한 연구



2008 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

해양공학과

도 한 성

공 학 석 사 학 위 논 문

하이브리드 구조건전성 모니터링에 의한
강관형 거더교의 손상검색에 관한 연구



지도교수 김 정 태

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2008년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

해양공학과

도 한 성

도한성의 공학석사 학위논문을 인준함

2007년 12 월 21 일

주 심 공학박사 류 연 선 인

부 심 공학박사 나 원 배 인

부 심 공학박사 김 정 태 인



목 차

List of Figures	iii
List of Tables	v
List of Symbols	vi
ABSTRACT	vii
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 필요성	1
1.2 하이브리드 모니터링의 연구동향	2
1.3 연구목적 및 내용	3
2. 강판형 거더교의 특징과 손상유형	5
2.1 강판형 거더교의 특징	5
2.2 강교량의 손상유형	6
3. 구조건전성 모니터링 기법	7
3.1 가속도 센서를 이용한 모니터링 기법	8
3.1.1 손상발생 모니터링 기법	8
3.1.2 손상위치 및 손상크기 모니터링 기법	10
3.2 PZT 센서를 이용한 모니터링 기법	12
4. 하이브리드 건전성 모니터링 기법의 개요	14
5. 가속도 센서의 수를 선정하기 위한 수치실험	16
5.1 수치구조물 및 손상 시나리오	16
5.1.1 수치구조물	16
5.1.2 손상시나리오	18
5.2 수치실험 검증 결과	19
5.2.1 실험결과 : 수치실험 I	21
5.2.2 실험결과 : 수치실험 II	29
5.2.3 실험결과 : 수치실험 III	33
6. 실험검증	37

6.1 대상구조물 및 손상 시나리오	37
6.1.1 실험구조물	37
6.1.2 손상시나리오	41
6.2 손상 모니터링 단계 I - 손상발생 경보	43
6.3 손상 모니터링 단계 II - 손상유형 구분	47
6.4 손상 모니터링 단계 III - 손상위치/크기 평가	50
6.4.1 손상이 휨 강성 감소에 의한 경우	50
6.4.2 손상이 지점부 손상에 의한 경우	55
7. 요약 및 결론	59
참고문헌	61
APPENDICES	64
A. Crack3 발생이후 볼트풀림이 발생한 경우에 대한 실험 결과	64



List of Figures

- Fig. 2.1 Fatigue Crack of Steel Bridges(경갑수 외, 1998).
- Fig. 3.1 1-D Model of a PZT with Its Host Structure.
- Fig. 4.1 Hybrid Health Monitoring Scheme for Steel Girder Bridges.
- Fig. 5.1 Elevation View of FE Model.
- Fig. 5.2 Numerical Mode Shapes from FE Model for Target Structure.
- Fig. 5.3 Damage Severity.
- Fig. 5.4 Example of MBDD Result.
- Fig. 5.5 Position of Sensors on Each Girder.
- Fig. 5.6 Mode Shape of North Girder Obtained by 7 Sensors.
- Fig. 5.7 Mode Shape of North Girder Obtained by 9 Sensors.
- Fig. 5.8 Mode Shape of North Girder Obtained by 11 Sensors.
- Fig. 6.1 Model of Steel Plate Girder Bridge for Test.
- Fig. 6.2 Description of Model Plate Girder Bridge.
- Fig. 6.3 Sensor Locations Using 11 Accelerometers for the Roving Test.
- Fig. 6.4 Time Response of Acceleration Signal.
- Fig. 6.5 Attached PZT Sensor.
- Fig. 6.6 Acceleration Measurement Instruments.
- Fig. 6.7 Impedance Measurement Instruments.
- Fig. 6.8 Cutting Flange of North Girder.
- Fig. 6.9 Bolts Connecting Girder to Support System.
- Fig. 6.10 Frequency Response Functions for each Crack.
- Fig. 6.11 Frequency Response Ratio for each Crack.
- Fig. 6.12 Global Damage Alarming by FRRAC : Stiffness-Loss Occurrence.
- Fig. 6.13 Frequency Response Functions for each Bolt-Loss.
- Fig. 6.14 Frequency Response Ratio for each Bolt-Loss.
- Fig. 6.15 Global Damage Alarming by FRRAC : Support Damage.
- Fig. 6.16 Damage Classification Result for Stiffness-Loss.
- Fig. 6.17 Damage Classification Result for Support-Damage.
- Fig. 6.18 Coefficient of Cross Correlation for Damage Scenarios.
- Fig. 6.19 Mode Shapes from Target Structure.
- Fig. 6.20 Comparison of Mode Shape for Stiffness-Loss(North Girder).
- Fig. 6.21 Damage Estimation Result by using MBDD Method.

Fig. 6.22 Damage Estimation Result by using FBDD Method.

Fig. 6.23 Steel Plate Girder Bridge with Four Axial Supports.

Fig. 6.24 Comparison of Mode Shape for Support-Damage(North Girder).



List of Tables

Table 5.1 Natural Frequencies of FE Model

Table 5.2 Damage Scenarios for Numerical Test

Table 5.3 Damage Alarming Result : Numerical Test I

Table 5.4 MBDD Result : Numerical Test I for 7 sensors on Girder

Table 5.5 MBDD Result : Numerical Test I for 9 sensors on Girder

Table 5.6 MBDD Result : Numerical Test I for 11 sensors on Girder

Table 5.7 Damage Alarming Result : Numerical Test II

Table 5.8 MBDD Result : Numerical Test II for 7 sensors on Girder

Table 5.9 MBDD Result : Numerical Test II for 9 sensors on Girder

Table 5.10 MBDD Result : Numerical Test II for 11 sensors on Girder

Table 5.11 Damage Alarming Result : Numerical Test III

Table 5.12 MBDD Result : Numerical Test III for 7 sensors on Girder

Table 5.13 MBDD Result : Numerical Test III for 9 sensors on Girder

Table 5.14 MBDD Result : Numerical Test III for 11 sensors on Girder

Table 6.1 Damage Scenarios

Table 6.2 Mean and Standard Deviation of FRRAC for each Crack

Table 6.3 Mean and Standard Deviation of FRRAC for each Bolt-Loss

Table 6.4 Resonant Frequency Change for Stiffness-Loss

Table 6.5 Resonant Frequency Change for Support-Damage

Table 6.6 Coefficient of Cross Correlation for Damage Scenarios

Table 6.7 Comparison of Natural Frequencies for Stiffness-Loss

Table 6.8 Comparison of Natural Frequencies for Support-Damage

Table 6.8 Modal Amplitude of Support Element : Undamage

Table 6.9 Modal Amplitude of Support Element : Damage 1

Table 6.10 Modal Amplitude of Support Element : Damage 2

Table 6.11 Modal Amplitude of Support Element : Damage 3

Table 6.12 Modal Amplitude of Support Element : Damage 4

Table 6.13 Result of Damage Severity Estimation : Damage 1

Table 6.14 Result of Damage Severity Estimation : Damage 2

Table 6.15 Result of Damage Severity Estimation : Damage 3

Table 6.16 Result of Damage Severity Estimation : Damage 4

List of Symbols

$U(f)$	force transformed into frequency domain
$V(f)$	displacement transformed into frequency domain
m	mass of the structural system
c	damping of the structural system
k	stiffness of the structural system
ω_k	k th natural frequency
$S_{i,i+1}(\omega_k)$	cross-spectral density functions
$S_{i,i}(\omega_k)$	auto-spectral density functions
κ_j	stiffness of the j th element
$\phi_i(x)$	mode shape of i th modal vector
β_j	damage localization index for the j th location
F_{ij}	fraction of modal energy for the i th mode that is concentrated in j th element
Z_i	fractional change in the i th eigenvalue due to damage
e_{ij}	localization error for the i th mode and the j th location
S_{ij}	strain tensor
S_{ijkl}	compliance tensor
E_k	electric field
$\mathcal{E}$	permittivity
T_{kl}	stress tensor
d_{ikl}	piezoelectric constant
D_i	electric displacement
Y_{xx}^E	complex Young's modulus of the PZT with zero electric field
d_{3x}	PZT coupling constant in the arbitrary
ε_{33}^T	dielectric constant at zero stress

A Study on Damage Detection in Steel Plate Girder Bridges using Hybrid Structural Health Monitoring

Han-Sung Do

Department of Ocean Engineering, Graduate School.
Pukyong National University

ABSTRACT

Major damage-types of steel plate girder bridges include flexural crack and support failure. Over the past two decades, many researchers have attempted to detect the damages in various-type bridges by using changes of vibration and impedance characteristics. However, the following problems still remain to be solved for successful damage detection in steel plate girder bridges: (1) the damage types of steel plate girder bridges cannot be easily recognized from the vibration-based techniques, (2) the impedance-based techniques should need too many sensors (i.e., PZT sensors) for damage detection in the entire structure. In order to overcome these problems, a hybrid health monitoring scheme that can alarm damage occurrence, classify damage-types, and identify damage locations and severities in steel plate girder bridges by using acceleration sensors and PZT sensors is proposed. In order to achieve the objective, the following approaches are implemented. Firstly, a hybrid damage monitoring scheme for steel plate girder bridges is newly designed. Secondly, damage monitoring techniques are selected for the hybrid damage monitoring. Thirdly, the numerical test is performed to select most suitable number of acceleration sensor for third step in hybrid monitoring scheme. Finally, the feasibility and practicality of the proposed damage monitoring scheme are evaluated from laboratory tests on model plate girder bridges for which acceleration responses were measured for several damage cases such as flexural crack and support damages.

1. 서론

1.1 연구배경 및 필요성

교량이나 고층건물과 같은 사회기반 구조물들은 공용 기간 동안 지진, 폭풍, 차량 및 화재 등으로부터 심한 하중과 충격을 받게 되고, 또한 피로 파괴를 유발하는 여러 종류의 활화중을 견뎌야 한다. 구조물에 손상을 주는 여러 요인은 구조물의 내구성과 사용성의 저하를 초래한다. 시간이 경과함에 따라 이런 구조물들은 설계 시 고려되지 않았던 각종 요인들에 의해 손상이 발생하게 되고, 발견되지 못한 손상은 지속적인 손상의 진전에 의하여 결국 구조물의 붕괴로 이어지게 된다. 이러한 손상을 조기에 발견하여 적절한 조치를 취하지 않으면 막대한 인명 피해와 경제적 손실을 입게 된다. 이에 따라 공용중인 구조물의 상태를 정확하게 진단하고 구조물을 안전하게 유지하기 위한 신뢰성 있는 구조건전성 모니터링(Structural Health Monitoring, SHM) 체계의 구축에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Kim and Stubbs, 1995; Kim et al., 2007b; Cornwell et al., 1999; Yozo Fujino, 2006; Liu et al., 1994; Yun et al., 2000).

SHM 시스템은 구조물의 사용 하에서 안전을 지속적으로 감시하는 종합적인 체계이다. 토목공학 및 교량공학 분야에서의 SHM 관련 연구는 1980년대 초반에 시작되었다. 이러한 연구의 대부분은 고유진동수, 모드형상 및 감쇠 등 구조물의 동적 특성치(modal parameter)를 사용하여 구조물의 이상 여부를 판단하였다. 이상적인 구조물 건전성 평가 시스템이 갖추어야 할 전제 조건은 첫째, 구조물의 손상을 발견 할 수 있어야 하고, 둘째, 손상이 발견되었다면 손상의 위치를 가려내고, 셋째, 손상의 정도를 측정할 수 있어야 하며, 넷째, 구조물의 잔여수명을 예측 할 수 있어야 한다(Rytter, 1993).

국내의 경우 교량의 증가와 더불어 과거 콘크리트 교량이 대부분을 차지하고 있던 때와는 달리 전체 교량에서 강교량이 차지하는 비율이 매우 높아졌다. 특히, 철도교의 경우 강관형교가 전체 교량의 약 47%를 차지하고 있다. 그러나 판형교의 상당수는 공용연수의 증가와 교량의 특성에 의해서 손상을 입고 있다. 판형교의 손상 부위는 상부구조가 23%, 하부구조

및 교좌부가 각각 41%와 35%를 차지하고 있다. 하부구조 및 교좌부의 손상은 전체의 76%를 차지하고 있으며, 교량에서 발생하는 충격과 교좌의 구조적 불량에 주원인으로 판단된다(최은수 등, 2005). 이에, 판형교에 발생한 상·하부구조 및 교좌부의 이상거동을 조기에 발견하여 조취를 취할 수 있다면, 시설물의 대규모 손상이나 붕괴를 사전에 방지할 수 있으며 이는 막대한 인명 피해와 경제적 손실의 최소화를 가능하게 할 것이다.

강판형교와 같이 복잡한 거동을 가진 구조물의 손상을 발견하기 위해서는 구조물의 전 영역을 대상으로 한 모니터링뿐만 아니라 손상이 예측되어지는 특정 영역에서의 모니터링이 병행되어야 할 것이다. 구조물의 전 영역을 대상으로 한 모니터링은 주로 센서 개수에 따라 다양한 영역에서 이용되어 질 수 있는 가속도 센서를 이용하여 고유진동수와 모드형상 등의 진동 특성치의 변화를 감지한다. 이러한 진동 특성치의 변화로부터 구조 특성치의 변화를 식별하여 구조물의 손상 여부를 알 수 있다. 하지만 손상의 위치와 크기가 모드 특성 민감도의 변화를 작게 발생 시키는 경우에는 손상 검색이 어렵다. 반면, 구조물의 지점부와 같이 특정 영역을 대상으로 한 모니터링은 주로 압전/전왜 효과를 이용한 PZT 센서와 같은 스마트 센서를 이용한다. 초기의 미소 손상에도 민감하게 반응하는 고주파수 대역의 진동특성을 이용함으로써 구조물의 상태를 판별한다. PZT 센서는 경제성이 우수하고, 현장 적용성이 뛰어나다. 하지만 파괴위험 부위의 손상여부 규명에 용이한 PZT 센서도 모니터링 영역이 협소하다는 단점이 따른다(Bhalla and Soh, 2003). 이에 각각의 센서의 장점을 이용하여 전역적 모니터링과 국부적 모니터링을 병행하는 하이브리드 모니터링 체계가 요구되어진다.

1.2 하이브리드 모니터링의 연구동향

1970년대 초부터 많은 연구자들은 구조물의 전역적인 동적 특성을 이용하여 구조물의 손상을 발견하기 위한 연구들을 수행해 왔다. Adams et al.(1978)은 진동모드섭동이론에 근거하여 선형 구조계의 구조특성변화를 추정하는 연구를 하였으며, Chen and Garba(1988)은 다자유도 선형 구조계의 민감도 해석을 통해 강성도 또는 유연도 등의 구조 특성치 변화에

대한 연구를 수행하였다. Kim and Stubbs(1995)는 진동모드의 변화를 사용하여 구조계의 손상도를 유연도, 강성도의 상대적인 변화인 손상지수로서 예측하는 방법에 대한 연구가 수행되었다. 최근에는 동적거동을 바탕으로 이에 적합한 수학적 모델을 재구성하는 SI(System Identification) 기법, 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm), 인공신경망(Artificial Neural Network)에 관한 연구가 활발히 수행되어지고 있다(Sohn et al., 2003; Kim et al., 2007a; Lee et al., 2006).

또한, PZT 센서로부터 계측된 고주파수영역의 EMI(electro mechanical impedance) 신호의 변화로부터 센서 인접부의 협소한 영역의 변화를 감지하는 기법을 이용하는 국부적 모니터링에서는 Sun 등(1995)이 스마트 재료를 이용하는 임피던스 기반의 구조건전성 모니터링 기법을 개발하였고 새로운 비파괴 손상검색 기법을 제안하였다. 그리고 Park 등(2000)은 지점부의 변화와 온도의 변화의 영향을 고려하여 콘크리트 벽에 발생하는 손상을 실시간으로 발견하기 위한 연구를 수행하였고, Bhalla 등(2003)이 구조특성의 변화와 임피던스의 관계에 대한 단자유도에서의 알고리즘 정의와 실험적 규명을 하였다.

그러나 강판형 거더교와 같은 복합적인 거동에 의하여 다양한 손상 유형을 가지는 경우에는 손상 검색을 수행하기 위해 다음과 같은 문제점이 여전히 남아 있다. 첫 번째로, 강판형 거더교의 손상 유형이 구조물의 전 영역을 대상으로 한 모니터링 기법만으로는 쉽게 인식되지 않는다. 두 번째로, 임피던스 기반의 기법들은 전체 구조물의 손상 발견을 위하여 너무 많은 센서를 필요로 한다. 이러한 문제를 극복하기 위하여, 본 논문에서는 강판형 거더교의 대표적인 손상 유형인 휨 강성의 감소와 지점부의 손상을 동시에 발견할 수 있는 새로운 하이브리드 모니터링 기법을 제시하고자 한다.

1.3 연구목적 및 내용

본 논문의 목적은 구조물의 전 영역을 대상으로 한 모니터링에 유용한 가속도 센서와 센서 인접부의 특정 영역 상태의 변화에 민감한 PZT 센서를 이용한 하이브리드 건전성 모니터링 체계를 구축하고 이를, 두 개의 대표적인 손상 유형으로 휨 강성의 감소와 지점부의 손상을 가지는 강판

형 거더교를 대상으로 한 실험을 통해 검증하는 것이다.

이와 같은 목적을 달성하기 위해 다음과 같은 연구를 수행하였다. 우선, 하이브리드 건전성 모니터링 시스템의 이론적 체계가 정리되었다. 하이브리드 체계는 세 가지 단계로 구성하였다. 첫 번째 단계에서는 가속도 특징의 변화를 모니터링 함으로써 손상의 발생 유무를 발견하며, 두 번째 단계에서는 임피던스 특징의 패턴 변화를 인지함으로써 손상의 유형을 분류한다. 마지막 단계에서는 모드 형상 기반 기법과 고유진동수 기반의 기법 등을 사용함으로써 휨 강성의 감소 및 지점부의 손상 위치와 크기를 평가한다. 다음으로 구조물의 전역적인 모니터링을 위해 사용되어 질 가속도 센서의 최적의 수를 결정하기 위해 수치실험이 이루어 졌다. 마지막으로, 제안된 이론의 실용성을 강판형 거더교의 축소모형에 대한 실험을 통해 검증하였다.



2. 강판형 거더교의 특징과 손상유형

2.1 강판형 거더교의 특징

강판형 거더교는 강판과 앵글 등을 갖고 그의 단면을 I 자형으로 만든 것이며 이 강판과 앵글을 합성하여 주형으로 사용하는 교량이다. 한 주형의 단면은 플랜지(flange)와 복부(web)로 나누어지고 플랜지는 앵글과 덮판(cover plate)으로 되어 있으며 상부에 있는 것을 상부플랜지(upper flange), 하부에 있는 것을 하부플랜지(lower flange)라고 한다. 복부의 강판은 대개 한 장이고 드물게 두 장으로 되어 있는 강판이 있으며, 이것을 복판(web plate)이라고 한다. 판형교는 가장 오래 전부터 사용되어지고 있는 교량 형식으로 트러스 또는 그 이외의 형식에 비하여 형상이 간명하기 때문에 제작·가설에 드는 비용이 비교적 저렴하다.

강판형교는 휨과 전단응력을 동시에 받는 구조이므로 거더 그 자체의 역학적 효율은 현수교·아치교·트러스교 등에 비하여 오히려 뒤떨어진다. 그것 때문에 복부판을 가급적 얇게 하여 강의 중량을 절감하고자 한다. 물론 복부판의 내하력을 저하시키지 않기 위해 종횡으로 적당한 보강재를 설치한다.

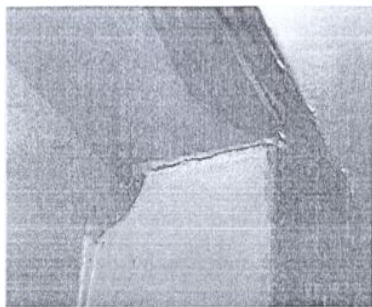
단면의 구성에 있어서는 웹은 되도록 휨모멘트에 저항하므로 얇은 편이 능률적이다. 좌굴방지를 위해 종횡으로 보강재를 쓰는 방법과 비교적 두꺼운 판을 써서 최소한의 보강재만 쓰는 방법이 있다. 전자는 경량으로 강도의 높이를 단면을 만들 수 있지만 가공도는 높게 된다. 교량 주형 등은 주로 이와 같이 생각하여 설계한다. 후자는 중량은 늘어나지만 플랜지 항복후의 내하력도 기대되므로 가공도가 떨어진다.

단순보의 중앙부는 휨 모멘트가 크고, 전단력은 작게 된다. 반대로 지점 부근은 휨 모멘트는 작으나 전단력은 크게 된다. 그런데 중앙에서는 웹이 여유 있고, 지점 부근에서는 플랜지가 여유가 생기므로 전체로는 재료의 낭비가 있게 된다. 연속보로 하면 중간지점 부근에서는 부(-)의 휨 모멘트가 크게 되어 이것이 지간중앙의 휨 모멘트를 감소시켜 플랜지는 유효하게 사용되며 지점상의 불연속점이 되어 자동차의 주행성이 좋게 되고, 내진적으로 좋게 된다.

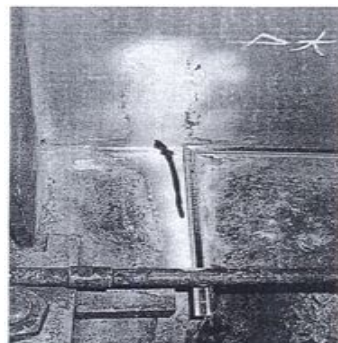
2.2 강교량의 손상유형

강교량의 손상원인은 재료·구조형식에 기인하는 교량본체에 의한 것과 지반·주변의 지형에 기인한 주변 환경에 의한 것이 있다. 주변 환경에 의해 교량의 변위·변형이나 균열이 발생한 경우에 그 원인을 재료·구조에 의한 것으로 판단해 원인규명이 불명확해지는 경우가 많다.

일반적으로 강재는 콘크리트에 비해 고강도 재료이므로 경량화 및 장대화가 가능하다는 장점이 있지만 이로 인해 활하중이 차지하는 비율이 콘크리트교량에 비해 크므로 피로(fatigue)의 영향을 많이 받고, 도장과 피막이 열화된 경우 부식의 영향을 받기 쉬운 약점도 있다. 이와 같은 피로와 부식에 의한 손상은 시간 경과에 따라 누적되는 성질이 있으므로 강교량의 수명을 지배하는 주요한 변수가 된다. 이 중 피로에 의한 손상의 경우, 강구조 부재는 콘크리트에 비해 인성과 연성이 풍부하므로, 미세한 피로균열이 발생하더라도 이것이 곧바로 부재 또는 구조물의 붕괴로 이어지는 않으므로 초기단계에 적절한 보수 또는 보강을 실시하면 원래의 기능을 회복할 수 있다. 현재까지 강교량에서 확인된 피로파괴의 주원인은 이음부의 형상에 따른 응력집중, 면외변형, 2차응력, 용접결함, 진동 등으로 알려져 있다. Fig. 2.1(a)와 (b)는 각각 수직보강재의 상단과 용접접합부에 발생한 피로균열을 나타낸 것이다(경갑수 외, 1998). 그 외 강교량에 빈번히 생기는 손상으로는 고장력볼트의 지연파괴, 마모에 의한 열화손상, 화재로 인한 손상, 시공 부주의로 인한 변형 등이 있다(한국강구조학회, 2004).



(a) Top Portion of Vertical Stiffener



(b) Welding Copula

Fig. 2.1 Fatigue Crack of Steel Bridges(경갑수 외, 1998).

3. 구조건전성 모니터링 기법

구조건전성 모니터링은 취득된 데이터와 검사가 수행된 영역에 따라 전역적과 국부적으로 분류되어 진다(Doebling et al., 1998; Zou et al., 2000). 가속도 센서를 이용한 건전성 모니터링은 전체 구조물의 정보를 얻기 위하여 주로 전역적 모니터링을 수행한다. 전역적 구조건전성 모니터링은 전체 구조물의 동적 응답을 비교함으로써 손상을 식별하고 그 위치와 크기를 알아낸다.

가속도 데이터기반 구조건전성 모니터링은 시간 응답, 주파수 응답 그리고 모드 정보와 같은 진동 특징들의 유형에 기초하여 세 가지 다른 방법으로 나누어진다. 우선, 구조물의 외력과 진동 응답의 시간 이력을 이용하여 손상을 평가할 수 있다. 시간 영역 기법들은 센서 배열에 따라 전역적 뿐만 아니라 국부적인 손상의 발생 유무를 알아낼 수 있다. 다음으로, 손상 발생을 구조물의 주파수 응답을 이용하여 발견한다. 주파수 응답이 질량, 감쇠, 강성과 같은 구조적인 특성들의 함수라는 것이 기본적인 개념이다. 손상은 구조물의 특성들을 변화 시키고 결국 구조물의 주파수 응답을 변화 시킨다. 그러나 주파수 영역 기법들은 손상 위치와 크기를 평가하기에는 적절하지 못하다. 마지막으로, 손상 위치와 크기는 고유 진동수, 모드 형상, 모드 감쇠비와 같은 모드 파라미터들을 사용하여 평가한다. 모드 기반 기법들은 제한된 센서 배열을 이용하여 얻어진 저주파수 범위의 모드 정보들을 사용함으로써 구조물의 전역적인 본래의 모습을 평가할 수 있다. 그러나 이 기법은 초기의 작은 손상을 발견하지 못한다. 또한, 얻어진 정보로부터 변화를 식별하기 위하여 기본 모델이 필요하다.

이에 반하여, PZT 센서를 이용한 임피던스 데이터기반 건전성 모니터링은 좁은 영역의 정보를 얻는 국부적 모니터링을 수행한다. 그러나 전체 구조물의 정보를 얻지는 못한다. 국부적 영역에서 구조물의 본래의 특성에서 변화가 생기면 전기-기계적 임피던스의 변화를 야기 시킨다는 것을 기본 개념으로 하고 있다. 손상은 국부 영역에서의 임피던스 신호들의 변화를 측정함으로써 발견된다. 임피던스 기반 기법들은 실시간 건전성 모니터링이 가능하고 특별히 초기의 미소 손상을 발견하기에 유용하다.

앞에서 언급된 내용들을 고려하여, 강판형 거더교의 두 손상 유형인 강

성감소와 지점부 손상을 발견하기 위하여 가속도 데이터기반과 임피던스 데이터기반이 혼합된 하이브리드 구조건전성 모니터링 기법들 선정하였다. 우선, 강판형 거더교의 두 손상 유형 중 한 가지 혹은 두 가지 모든 손상을 발견하기 위해 주파수 응답의 변화를 이용한 전역적 손상 경보 기법이 선정되었다. 다음으로, 지점부의 손상을 발견하기 위해 전기-기계 임피던스의 변화를 이용한 국부적 손상 경보 기법이 선정되었다. 마지막으로, 모드형상 기반과 고유진동수 기반의 기법들을 적용하여 손상의 위치와 손상의 크기를 평가하였다.

3.1 가속도 센서를 이용한 모니터링 기법

3.1.1 손상발생 모니터링 기법

가. 주파수 응답비 보증지수 (FRRAC)

손상발생유무를 알기 위한 모니터링 기법으로 대상 구조물로부터 취득되어진 주파수 응답 데이터를 이용하여 구조물 전체의 손상이 발생한 것을 알려주는 FRRAC 기법이 선정되었다. 주파수 응답은 질량, 댐핑, 그리고 강성과 같은 구조적 특성들의 함수라는 것이 기본적인 적용 개념이다.

주파수 영역에서의 입력하중과 구조물응답 사이의 관계로부터 다음과 같은 주파수 응답함수(FRF)를 얻을 수 있다(Bendat and Piersol, 1993).

$$H(f) = \frac{V(f)}{U(f)} = \frac{1}{-m(2\pi f)^2 + ic(2\pi f) + \kappa} \quad (3.1)$$

여기서 $U(f)$ 와 $V(f)$ 는 각각 주파수 영역으로 변형된 외력과 변위이다. 또한, m, c, k 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성이다. k 번째 고유진동수 ω_k 를 가지는 조화하중을 고려하면, 같은 시간에 여러 점에 가해지는 가진 주파수가 ω_k 인 조화하중에 의한 변위의 비는 다음과 같다.

$$\frac{V_i(\omega_\kappa)}{V_{i+1}(\omega_\kappa)} = \frac{\sum_{j=1}^m H_{i,j}(\omega_\kappa) U_j(\omega_\kappa)}{\sum_{j=1}^m H_{i+1,j}(\omega_\kappa) U_j(\omega_\kappa)} = \frac{H_i(\omega_\kappa)}{H_{i+1}(\omega_\kappa)} \quad (3.2)$$

따라서 두 점에서의 응답 사이의 주파수 응답비를 구할 수 있다.

$$FRR_{i,i+1}(\omega_\kappa) = \frac{S_{i,i}(\omega_\kappa)}{S_{i,i+1}(\omega_\kappa)} = \frac{E[V_i^*(\omega_\kappa)V_i(\omega_\kappa)]}{E[V_{i+1}^*(\omega_\kappa)V_{i+1}(\omega_\kappa)]} = \frac{H_i(\omega_\kappa)}{H_{i+1}(\omega_\kappa)} \quad (3.3)$$

여기서 $S_{i,i+1}(\omega_\kappa)$, $S_{i,i}(\omega_\kappa)$ 는 각각 상호스펙트럼(cross-spectral)과 자기스펙트럼(auto-spectral) 밀도 함수를 나타낸다.

손상이 발생하게 되면 가속도 응답이 영향을 받게 되고 결과적으로 가속도 응답비가 변화하게 된다. 구조물의 비 손상 상태의 주파수 응답비와 손상된 상태의 주파수 응답비를 비교함으로써 구조물의 손상유무를 알 수 있는 FRRAC는 식 (3.4)와 같이 정의된다.

$$FRRAC(b,d) = \frac{\{FRR_b^T FRR_d\}^2}{\{FRR_b^T FRR_b\} \{FRR_d^T FRR_d\}} \quad (3.4)$$

여기서 b 와 d 는 각각 비 손상 상태와 손상 상태를 나타내며, 식 (3.4)는 손상전의 주파수 응답비 FRR_b 와 손상후의 주파수 응답비 FRR_d 의 선형 관계를 나타낸다. 만약 손상이 발생하지 않았다면 1.00에 가까운 값을 나타내며, 손상이 발생하였다면 1.00으로부터 감소한 값을 나타낸다.

3.1.2 손상위치 및 손상크기 모니터링 기법

가. 모드형상기반 손상검색 기법 (MBDD) (Kim et al., 2003)

손상 전후의 모드 에너지 변화로부터 손상을 판별하는 기법이다. 이와 같은 모드형상 기반 손상검색 기법을 이용한 j 번째 위치의 손상지수는 식 (3.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_j = \frac{\kappa_j}{\kappa_j^*} = \sum_i \gamma_{ij}^* / \sum_i (\gamma_i g_i + \gamma_{ij}) \quad (3.5)$$

여기서 κ_j 는 비손상 상태에서 j 번째 부재의 강성을 나타내고, κ_j^* 는 손상된 상태에서 j 번째 부재의 강성을 나타낸다. 그리고 $\gamma_j, \gamma_{ij}, \gamma_{ij}^*$ 및 g_i 는 식 (3.6)~ (3.9)와 같다.

$$\gamma_i = \int_0^L [\phi_i''(x)]^2 dx \quad (3.6)$$

$$\gamma_{ij} = \int_j [\phi_{ij}''(x)]^2 dx \quad (3.7)$$

$$\gamma_{ij}^* = \int_j [\phi_{ij}^{**}(x)]^2 dx \quad (3.8)$$

$$g_i = \frac{1}{nd} \left(\frac{\delta \omega_i^2}{\omega_i^2} \right) \quad (3.9)$$

여기서 ϕ_i'' 는 i 번째 모드에 대한 모드 곡률을 나타내고, $\phi_{ij}''(x), \phi_{ij}^{**}(x)$ 는 각각 비손상과 손상 상태의 i 번째 모드에 대한 j 번째 위치의 모드 곡률을 나타낸다. 그리고 $\delta \omega_i^2 / \omega_i^2$ 는 손상 전후의 고유치 변화율을 의미하고, nd 는 손상 개수를 나타낸다. 식 (3.6)~(3.9)에서 모든 항은 실험 모드 해석으로부터 추출이 가능하다.

최종적으로 손상을 판정하기 위하여 식 (3.5)를 통계적인 패턴인식에 의해 가설검증의 기각영역을 설정한다. 다음으로 손상지수 β_j 를 정규화한

후, 위치 j 의 정규 손상지수가 기각영역에 속하는 지 여부를 확인하여 손상을 식별할 수 있다.

나. 고유진동수기반 손상검색 기법 (FBDD) (Kim et al., 2003)

손상 전후의 고유진동수의 변화로부터 손상을 판별하는 기법으로 알고리즘을 요약하면 다음과 같다. 고유진동수를 검출할 가속도계 위치를 선정하여 대상 구조계에 대한 고유진동해석으로부터 모드 i 의 모드형상 ϕ_i 를 구한다. 구해진 모드형상으로부터 i 와 위치 j 의 모드민감도 F_{ij} 를 구할 수 있다. 다음으로 손상 전후의 고유진동수를 측정하여 모드 i 의 고유치의 변화율 Z_i 을 구할 수 있다. 마지막으로 모드 i 와 위치 j 에서 손상 위치지수 e_{ij} 를 계산하고 손상위치지수로부터 손상지수 β_j 를 구할 수 있다.

$$F_{ij} = \frac{\{\phi_i\}^T [C_j] \{\phi_i\}}{\{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\}} \quad (3.10)$$

$$Z_i = \delta \omega_i^2 / \omega_i^2 \quad (3.11)$$

$$e_{ij} = Z_m / \sum_{k=1}^{NM} Z_k - F_{mq} / \sum_{k=1}^{NM} F_{kq} \quad (3.12)$$

$$\beta_j = \left[\sum_{i=1}^{NM} e_{ij}^2 \right]^{-1/2} \quad (3.13)$$

여기서 $0 \leq \beta_j < \infty$ 이고 만일 손상지수가 국부적인 최대점에 도달한다면 j 위치에서 손상이 발생된 것을 의미한다.

3.2 PZT 센서를 이용한 모니터링 기법 (Park et al., 2000; Park et al., 2004; 이인규 등., 2006)

임피던스기반 모니터링 기법은 압전(piezoelectric) 재료를 사용한다. 압전성(piezoelectricity)은 1880년대 Jacques and Pierre Curie에 의해 석영에 대한 실험도중에 발견되었다. 일반적으로 압전성은 재료의 기계적 그리고 전기적 거동사이의 연관성을 의미한다. 이는 압전재료(piezoelectric materials)가 외부적 힘 또는 진동을 받을 때 압전재료 표면의 전기부하를 일으키거나 역으로, 전기적 입력을 받을 때 기계적인 변형을 일으키는 것을 의미한다. 많은 결정구조를 가진 재료는 압전성을 지니며 소수의 재료들만이 공학적으로 이용 가능할 만큼 충분한 압전성을 지니는데, 석영, 로셀염, 압전재료, 바륨-티탄산염 그리고 폴리머 필름이 있다. 나노크기에서 보면, 결정구조 단위 셀 안에 불균형한 부하분포에 의해 압전성이 나타나는데 이 결정구조가 기계적으로 변형되었을 때 양과 음의 부하의 차이를 발생한다. 이 차이로 인해 결정구조 내에 전기적 양극성을 발생시킨다.

압전재료에 대해, 전기적이고 기계적인 변수 사이의 관계는 다음의 식 (3.14)와 같다.

$$\begin{aligned} S_{ij} &= s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \\ D_i &= d_{ikl} T_{kl} + \epsilon_{ik}^T E_k \end{aligned} \quad (3.14)$$

여기서 i, j, k, l 은 1,2,3(혹은 x, y, z)의 값을 가지며, S_{ij} 은 변형률, s_{ijkl}^E 은 외력을 받았을 때 재료의 탄력성 및 유연성을 나타내는 컴플라이언스(compliance), E_k 는 전기장, ϵ 는 전기 유전율, T_{kl} 은 응력, d_{ikl} 은 압전상수, 그리고 D_i 은 전기적 처짐이다. 첨자 E 와 T 는 각각 상수의 값들이 일정한 전기장과 일정한 응력에서 얻어졌다는 것을 나타낸다.

압전 재료 중에 가장 일반적인 PZT 패치(patch)와 그것이 부착된 구조물 사이의 상호작용은 Fig. 3.1과 같다. PZT는 기계적 상호작용을 보다 강화시키기 위해 매우 강한 접착물질에 의해 구조물의 표면에 직접적으로 부착된다. 부착된 PZT는 발생된 교류 전압 때문에 축 진동이 작용하고

있는 얇은 막대로 간주한다. 막대의 한쪽 끝은 고정되어있고, 반면 다른 끝은 외적 구조물에 연결되어 있다. 구조물에 부착되어진 PZT에 관한 파동 방정식의 해로부터 다음과 같은 전기적 어드미턴스(admittance)에 의존하는 고유진동수에 관한 식이 유도된다.

$$Y(\omega) = i\omega a(\overline{\epsilon_{33}^T}(1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E) \quad (3.15)$$

여기서 Y 는 전기적 어드미턴스(임피던스의 역수), Z_a 와 Z_s 는 각각 PZT 재료와 구조물의 기계적 임피던스, Y_{xx}^E 는 PZT의 영률(Young's modulus), d_{3x} 는 0 응력에서의 임의의 x방향에 작용하는 PZT의 결합 상수, ϵ_{33}^T 은 0 응력에서의 유전체 상수, δ 은 PZT의 유전체 감소 탄젠트, 그리고 a 는 PZT의 기하상수이다.

구조물의 질량, 감쇠 및 강성과 관련하여 EMI(Electro Mechanical Impedance) 신호가 생성되며 동특성을 이용하여 특징을 분석할 수 있다. 따라서 손상에 따른 구조계의 변화로부터 손상 전후의 임피던스가 변화하고 이는 어드미턴스의 크기와 공진 주파수에 변화를 준다. 이로부터 구조 규명이 가능하고 손상검색이 이루어진다.

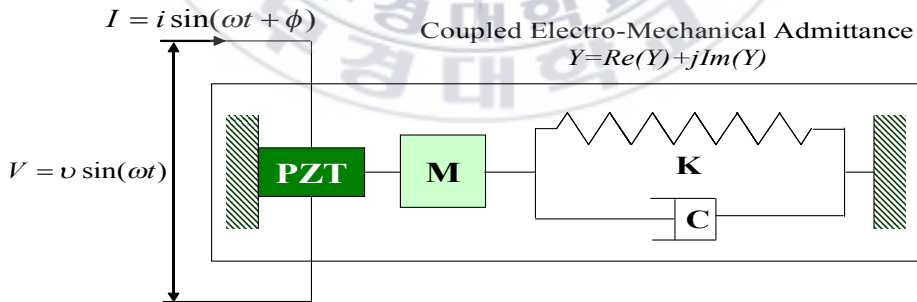


Fig. 3.1 1-D Model of a PZT with Its Host Structure(Park et al., 2000).

4. 하이브리드 건전성 모니터링 알고리즘

하이브리드 건전성 모니터링 기법은 가속도 데이터를 이용한 전역적 모니터링 기법과 임피던스 데이터를 이용한 국부적 모니터링 기법들이 병행되어 작용하는 기법이다. 이 기법은 강판형 거더교의 대표적인 두 손상 유형인 휨 강성 감소와 지점부의 볼트 풀림을 다루기 위한 필요성에 의해 제시되었다. 강판형교의 손상을 평가하기 위한 절절한 하이브리드 체계를 세우기 위하여 다루어야 하는 부분이 있다. 그 첫 번째는 두 개의 다른 손상 유형에 의해 발생하는 진동 특성과 임피던스 특성을 규정하는 것이다. 그것은 손상 발생 경보 이후에, 얻어진 정보들로부터 각각의 손상 유형을 구별할 수 있는 것과 관련이 있다. 하지만 그 이전에 손상 발생의 정확한 경보가 각각의 손상 유형에 대한 위치와 크기를 평가하기 위해 선행되어야 할 것이다. 두 번째 수행되어야 할 것은 각각의 손상 유형에 대한 적절한 건전성 모니터링 기법이 제시되어야 한다.

강판형 거더교에 대한 위의 두 가지 과제를 다루기 위하여, 연속적으로 가속도 데이터기반과 임피던스 데이터기반 기법을 사용하는 하이브리드 모니터링 체계를 제시하였다. 세 단계로 구성된 하이브리드 모니터링 체계는 Fig. 4.1과 같다. 단계 1에서는 손상의 발생을 경보하는 단계이고, 단계 2에서는 손상의 유형을 구분하는 단계이다. 그리고 마지막 단계 3에서는 손상의 위치와 크기를 평가한다.

단계 1에서, 손상의 발생은 대상 구조물의 주파수 응답 변화를 사용함으로써 전역적으로 경보된다. 식 (3.4)에 나타낸 FRRAC가 구조물의 손상 유무를 알기 위하여 사용되었다. FRRAC는 대상 구조물에 부착된 가속도 응답을 측정함으로써 얻어진다. 대상 구조물에 손상이 발생하는 한, 가속도 응답은 영향을 받을 것이고 결과적으로 FRRAC가 감소될 것이다. 다시 말해, FRRAC의 변화를 통해 강판형 거더교의 휨 강성의 감소와 지점부의 손상을 발견 하게 될 것이다. 만약, 가속도 신호의 변화가 없다면(‘아니오’의 경우) 계속적인 모니터링을 수행하게 되며, 가속도 신호의 변화가 있다면(‘예’의 경우) 단계 2에 대한 모니터링을 수행하게 된다.

단계 2에서는 임피던스 데이터의 변화를 이용함으로써 경보된 손상을 분류하였다. 식 (3.15)에 설명된 임피던스 변화는 센서 주변의 협소한 영

역에서만 민감도를 가지는 PZT센서 주변의 국부적인 영역의 손상을 발견하기 위하여 적용되었다. 센서를 지점부에 부착시킴으로써 지점부의 손상을 알아낼 수 있다. 그러나 거더의 강성 변화에는 반응을 보이지 않는다. 그럼으로, 임피던스 데이터를 통하여 지점부의 손상이 발생하였는지 아닌지를 알아 낼 수 있다. 만약, 임피던스 신호의 변화가 없다면(‘아니오’의 경우) 손상 유형이 휨 강성 감소로 분류될 것이며, 임피던스 신호의 변화가 발생하였다면(‘예’의 경우) 손상 유형을 지점부의 손상으로 분류할 것이다.

마지막 단계 3에서는 분류된 손상을 손상 위치와 크기를 평가하기 위하여 상세하게 검토하게 된다. ‘강성 감소’의 경우에는 식(3.5)와 (3.13)을 이용하여 손상의 위치와 크기를 평가한다. ‘지점부 손상’의 경우에는 식(3.5)의 식을 이용하여 손상의 크기를 평가했다.

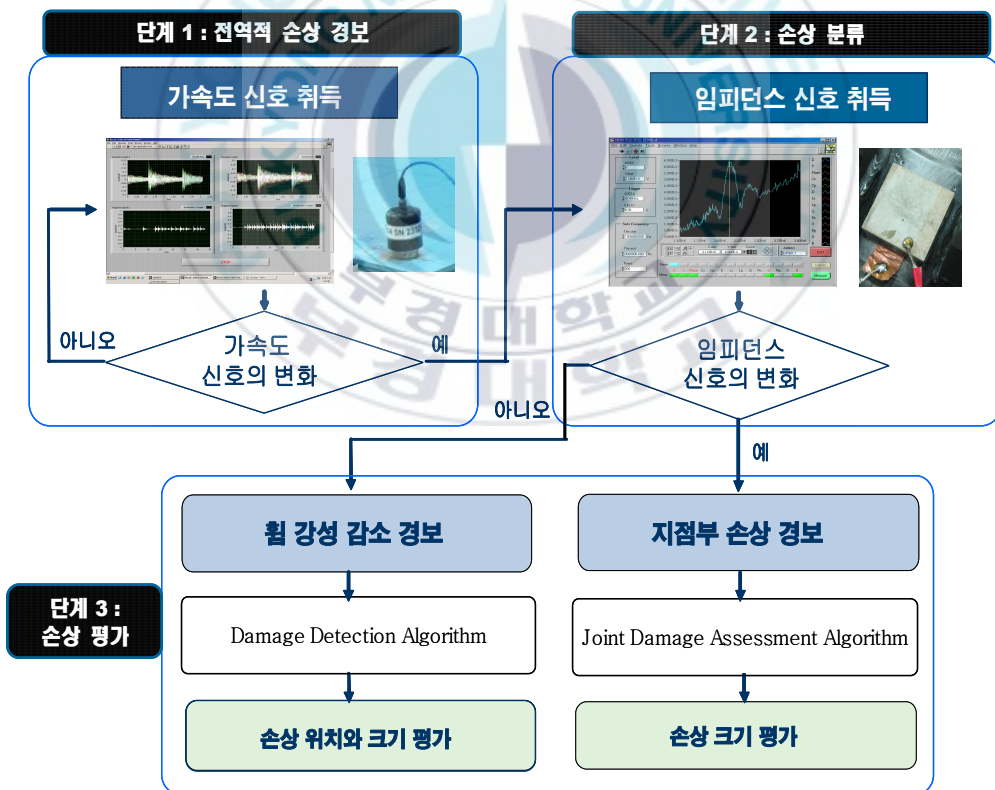


Fig. 4.1 Hybrid Health Monitoring Scheme for Steel Girder Bridges.

5. 가속도 센서의 수를 선정하기 위한 수치실험

5.1. 수치구조물 및 손상 시나리오

5.1.1 수치구조물

본 논문에서 제안된 하이브리드 구조건전성 모니터링의 실용성을 검증하기 위해 앞서 실험에 사용될 가속도 센서의 최적의 수를 선정하기 위해 수치실험이 이루어졌다. 가속도 센서의 개수는 모드형상을 결정하게 되며 이러한 모드형상을 이용하는 기법에서는 구조물에 부착될 가속도 센서의 수가 중요한 요인이 된다. 본 논문에서 손상의 위치와 크기를 판별하기 위해 적용할 기법들 중 식 (3.5)에 제시된 MBDD 기법을 이용하여 최적의 센서 수를 결정하였다. 이와 같은 수치실험을 위해 Fig. 5.1과 같이 단순 지지 된 강판형 거더의 유한요소 모델을 선정하였다. 대상모델의 수치해석을 위하여 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/Civil을 이용하였으며, 유한요소 모델은 절점 1,481개, 요소 1,434개를 판요소를 이용하여 모델링하였다. 대상모델의 물성치는 탄성계수 $E = 210 GPa$, 프아송비 $\nu = 0.3$, 그리고 단위중량 $\rho = 7850 kg / m^3$ 이며, 그 크기는 지간길이 $L = 2m$, 주 거더 사이의 거리는 $B = 0.4m$, 높이 $H = 0.13m$ 이다. 거더의 고유주파수 성분을 얻기 위한 모드해석에 있어 교량의 지점조건을 최대한 실제와 유사하게 모사하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서 사용된 모형 강판형교는 탄성 받침에 의해 지지되어 있으므로 지점부분은 지점에 수직방향 즉, z 축 방향으로 축방향 스프링 요소를 설치하여 모델링 하였다. 스프링 요소의 초기 강성은 지점부분의 크기를 고려하여 $10^6 N/m$ 로 설정하였다. Table 5.1과 Fig. 5.2는 모형 강판형 거더의 실제 측정 가능한 모드형상과 같은 거동을 보이고 있는 1, 2차 휨 모드와 1, 2차 비틀림 모드의 모드별 주파수와 모드형상을 나타낸 것이다.

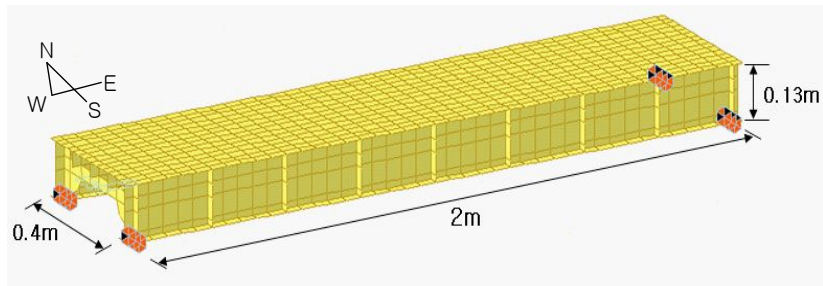


Fig. 5.1 Elevation View of FE Model.

Table 5.1 Natural Frequencies of FE Model

No	Mode	Frequency (Hz)
1	1st Bending	79.41
2	1st Torsion	83.28
3	2nd Bending	217.85
4	2nd Torsion	271.63

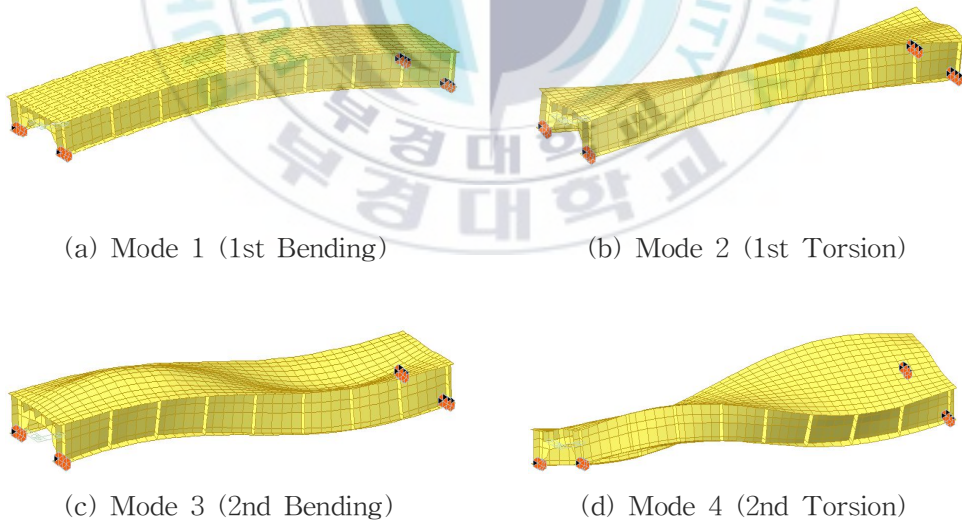


Fig. 5.2 Numerical Mode Shapes from FE Model for Target Structure.

5.1.2 손상시나리오

수치실험을 위한 손상시나리오는 Table 5.2와 Fig. 5.3과 같다. 손상위치로 South 거더의 지간중앙 L/2 위치와 North 거더의 East 지점으로부터 L/4 지간 위치를 선정하였다. 이는 각각 1차 휨모드와 2차 휨모드의 크기가 최대가 되는 지점이다. 손상크기로는 거더의 하부플랜지에 Crack이 발생한 것으로 모사하였다. 손상 크기를 나타낸 Crack①과 ②와 ③은 각각 플랜지의 1/4, 2/4, 4/4의 Crack이 발생한 경우이며, 그 폭은 모두 1.5mm로 동일하다.

Table 5.2 Damage Scenarios for Numerical Test

Damage Case	Damage Scenarios	
	Location	Severity
1	South 거더의 지간중앙 L/2 위치	Crack①
2		Crack②
3		Crack③
4	North 거더의 East 지점으로부터 L/4 지간 위치	Crack①
5		Crack②
6		Crack③

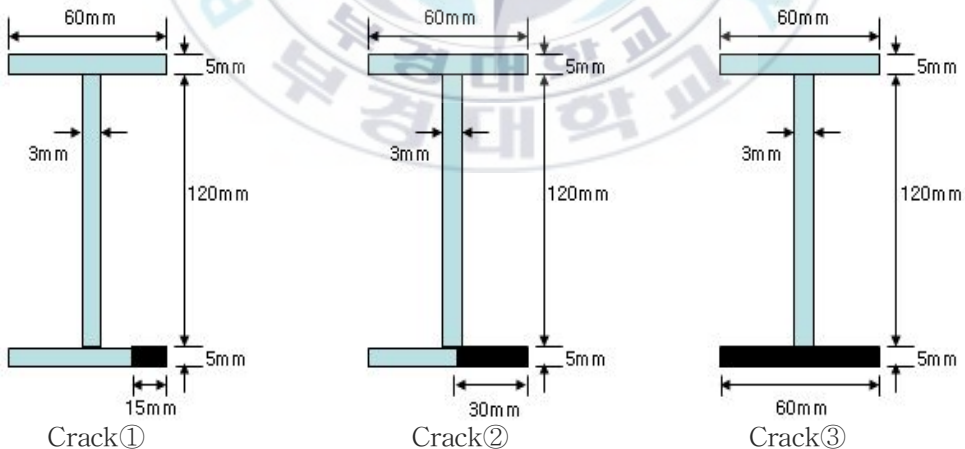


Fig. 5.3 Damage Severity.

5.2 수치실험 검증 결과

거더 위에 부착될 가속도 센서의 수를 결정하기 위하여 각 거더 위에 7개, 9개, 11개의 가속도 센서가 부착되었을 때 얻어진 모드영역의 데이터를 이용한 MBDD 결과를 비교하였다. MBDD 결과는 각 수치실험에 대해 1, 2차 휨 모드와 1, 2차 비틀림 모드를 모두 이용한 경우(From modes 1-4)와 1, 2차 휨 모드만을 이용한 경우(From modes 1&3)에 대해 비교하였다. 이를 위해 다음과 같은 3가지 수치실험이 이루어졌으며, 본 수치실험을 위해 모두 27개의 유한요소 모델이 사용되었다.

수치실험 I) Undamage의 모드형상을 Reference로 이용하여 Damage Cases 1, 2, 3의 손상검색

수치실험 II) Undamage의 모드형상을 Reference로 이용하여 Damage Cases 4, 5, 6의 손상검색

수치실험 III) Damage Case 3의 모드형상을 Reference로 이용하여 Damage Case 4, 5, 6의 손상검색

최종적으로 손상을 판정하기 위하여 식 (3.5)를 통계적인 패턴인식에 의해 가설검증의 기각영역 99.4%(Confidence Level 2.5)의 신뢰도를 설정하였다. 손상지수를 정규화한 후, 위치 j 의 정규 손상지수가 기각영역에 속하는 지 여부를 확인하여 손상을 식별하였다. 이상과 같은 과정을 통해 MBDD를 수행한 예를 Fig. 5.4에 도시하였다. 그림에서 x축은 각 센서 사이를 10개의 요소로 나눈 요소번호를 나타내고, y축은 신뢰도 지수를 나타낸다. 신뢰도 지수 2.5 이상되는 영역을 99.4%의 신뢰도를 가지는 손상 영역이라 볼 수 있으며, 화살표는 실제 손상 위치를 나타낸다. 따라서 Fig. 5.4의 결과는 정확하게 손상 위치를 식별하였음을 알 수 있다.

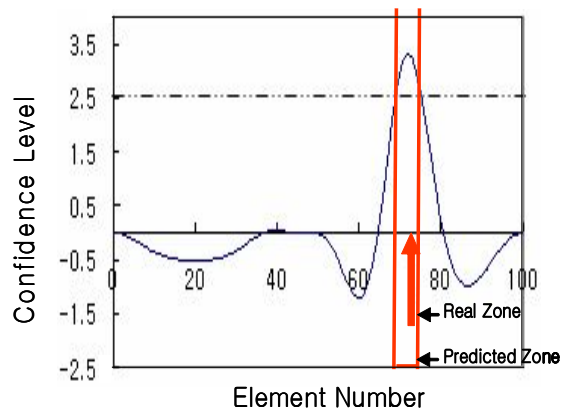
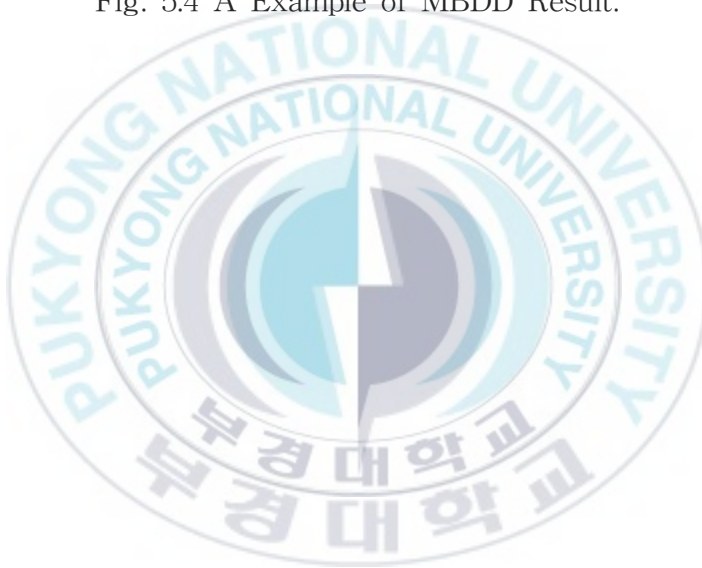
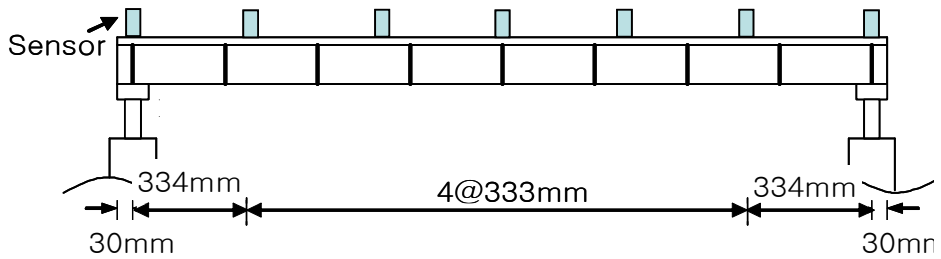


Fig. 5.4 A Example of MBDD Result.

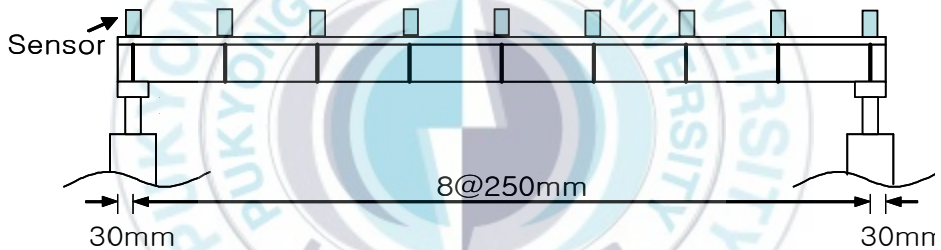


5.2.1 실험결과 : 수치실험 I

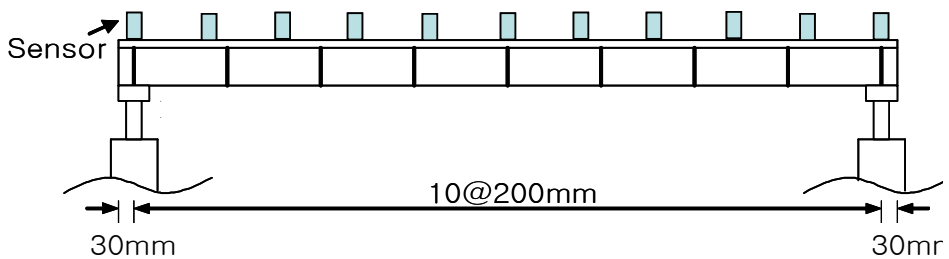
7, 9, 11개의 가속도 센서의 위치는 Fig. 5.5와 같고 각각의 센서 위치에 대한 손상 전후의 모드형상은 Fig. 5.6~8과 같다.



(a) 7 Sensors

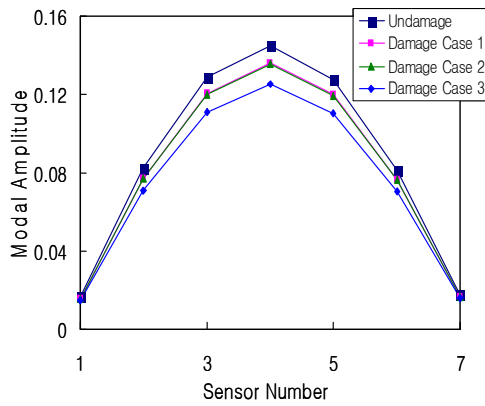


(b) 9 Sensors

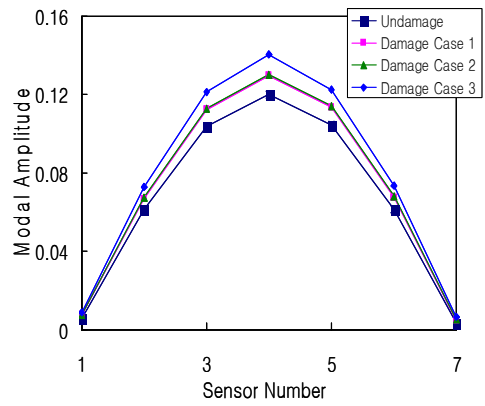


(c) 11 Sensors

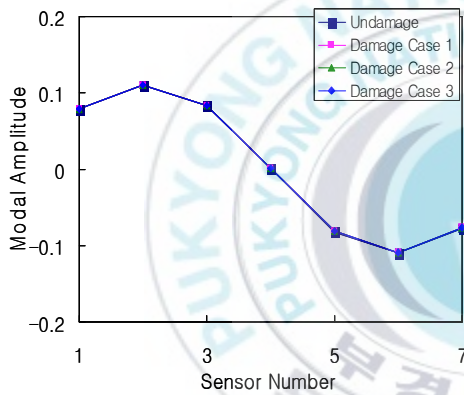
Fig. 5.5 Position of Sensors on Each Girder.



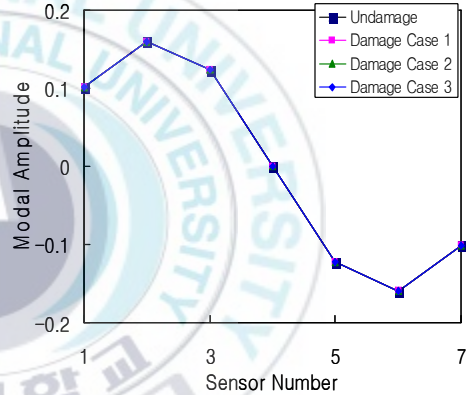
(a) Mode 1 (1st Bending)



(b) Mode 2 (1st Torsion)

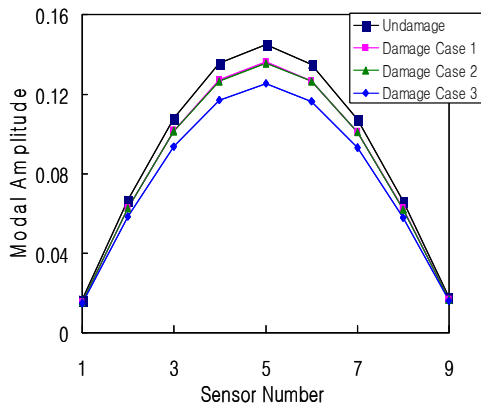


(c) Mode 3 (2nd Bending)

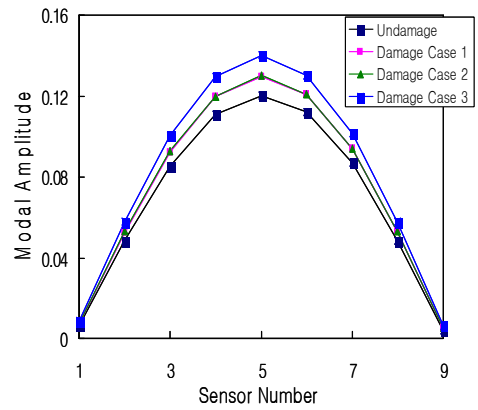


(d) Mode 4 (2nd Torsion)

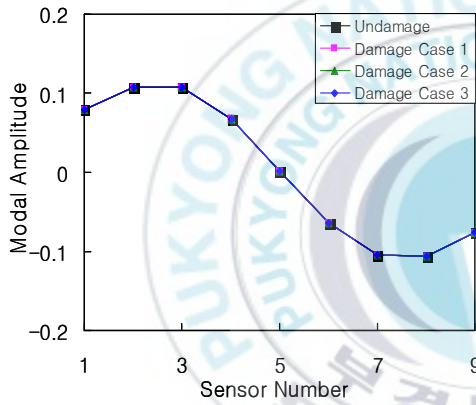
Fig. 5.6 Mode Shape of North Girder Obtained by 7 Sensors.



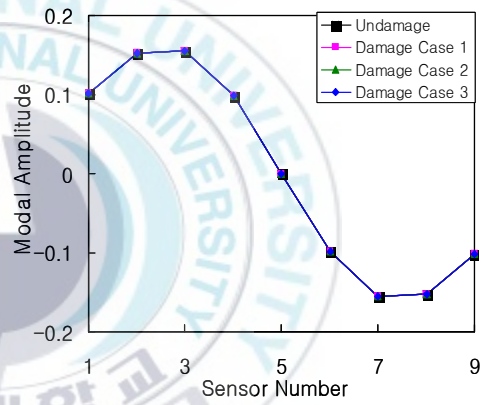
(a) Mode 1 (1st Bending)



(b) Mode 2 (1st Torsion)

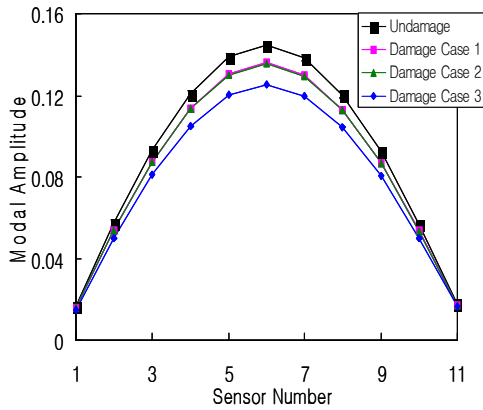


(c) Mode 3 (2nd Bending)

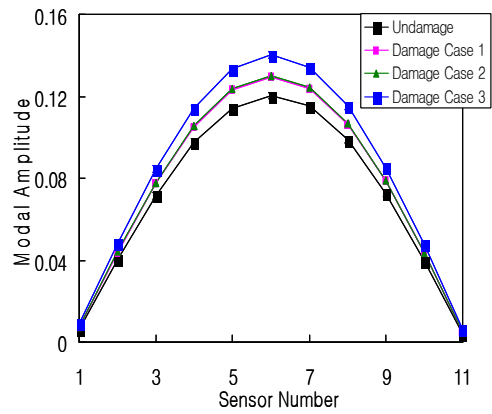


(d) Mode 4 (2nd Torsion)

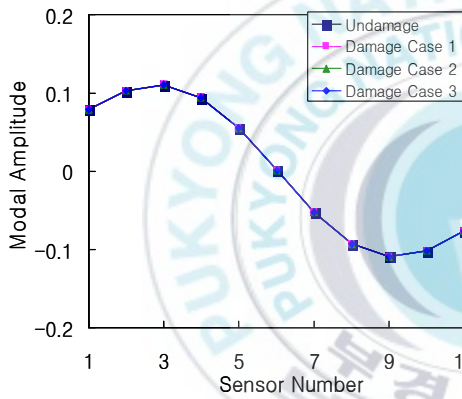
Fig. 5.7 Mode Shape of North Girder Obtained by 9 Sensors.



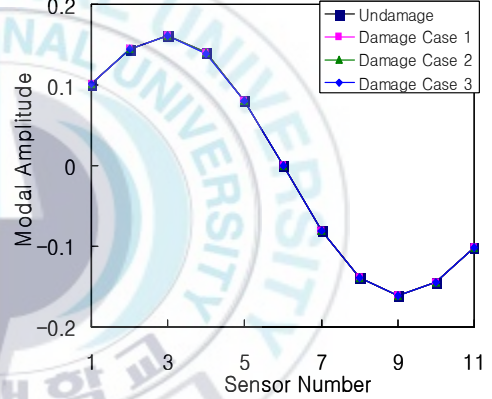
(a) Mode 1 (1st Bending)



(b) Mode 2 (1st Torsion)



(c) Mode 3 (2nd Bending)



(d) Mode 4 (2nd Torsion)

Fig. 5.8 Mode Shape of North Girder Obtained by 11 Sensors.

Undamage의 모드형상을 Reference로 이용하여 Damage Case 1,2,3의 손상검색의 결과를 Table 5.3과 Table 5.4~6에 나타내었다. Table 5.3은 각 거더에 부착된 센서 수에 따라 손상경보 여부를 정리한 것이며, Table 5.4~6은 MBDD 결과를 정리한 것이다. 결과로부터 각 거더 위에 7개의 센서를 부착할 경우 손상 경보가 이루어 지지 않았으며, 9개 및 11개의 센서를 부착하였을 경우에는 정확하게 손상 경보가 이루어짐을 알 수 있다.

Table 5.3 Damage Alarming Result : Numerical Test I
(O : correct alarming / X : false alarming / - : no alarming)

Number of Sensors	Damage Case	From Modes 1-4		From Modes 1&3	
		South Girder	North Girder	South Girder	North Girder
7	Case 1	-	-	-	-
	Case 2	-	-	-	-
	Case 3	-	X	-	X
9	Case 1	O	-	O	-
	Case 2	O	-	O	-
	Case 3	O	-	O	-
11	Case 1	O	-	O	-
	Case 2	O	-	O	-
	Case 3	O	-	O	-

Table 5.4 MBDD Result : Numerical Test I for 7 Sensors on Girder

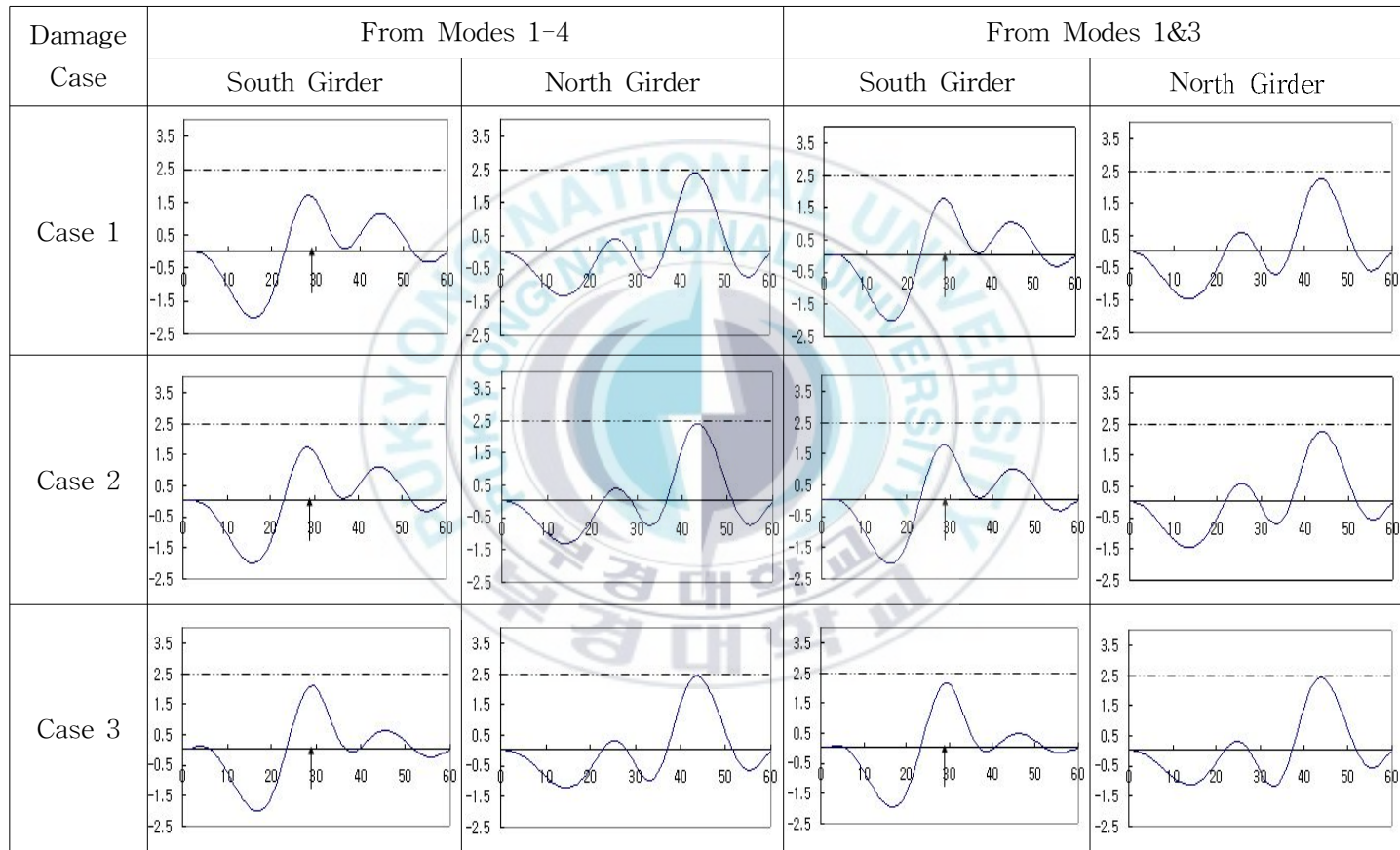


Table 5.5 MBDD Result : Numerical Test I for 9 Sensors on Girder

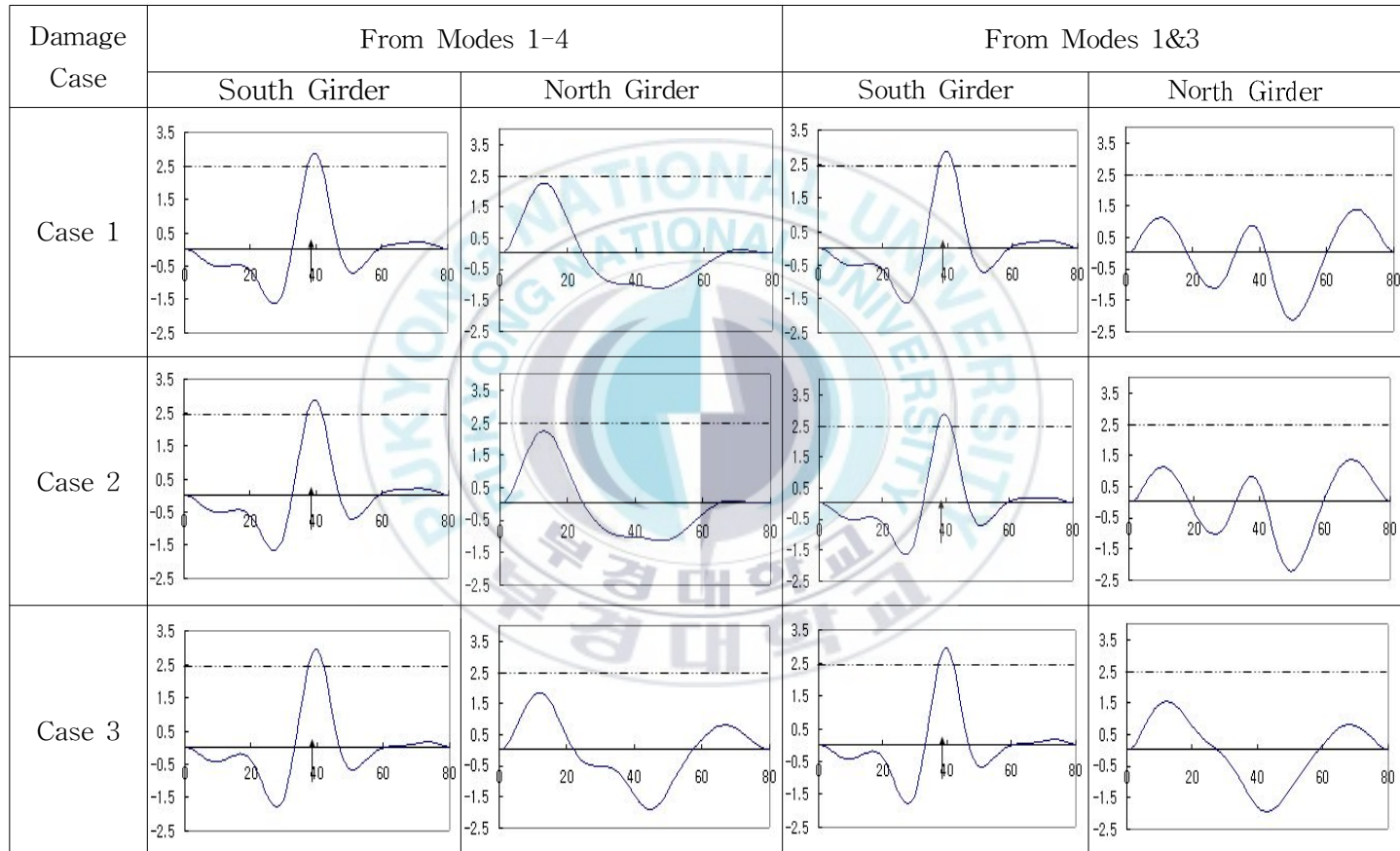
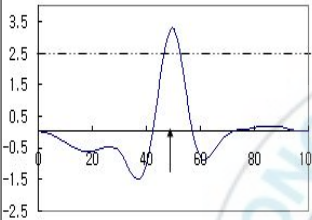
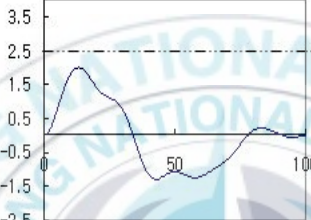
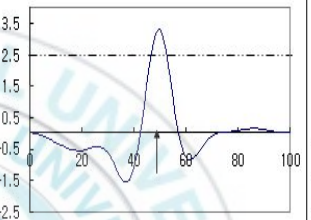
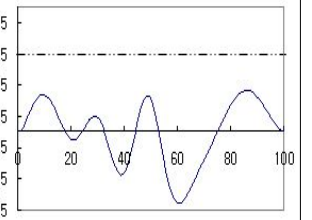
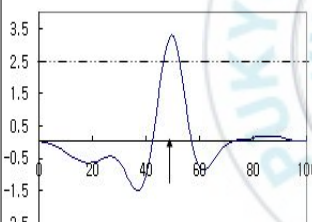
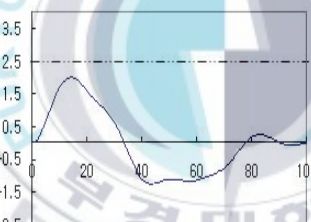
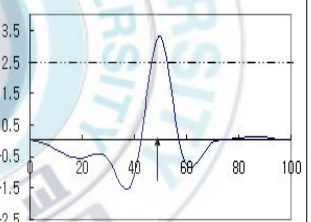
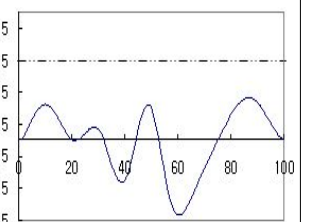
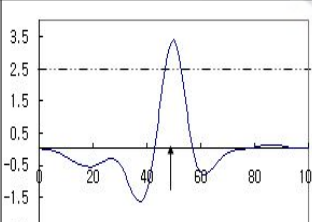
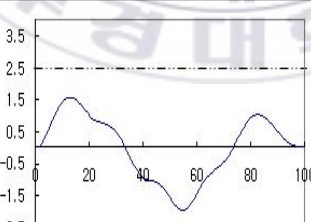
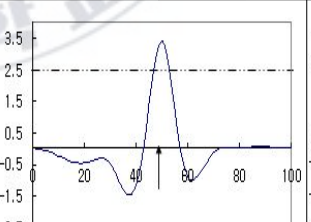
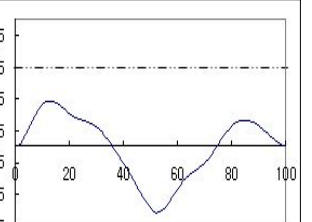


Table 5.6 MBDD Result : Numerical Test for 11 Sensors on Girder

Damage Case	From Modes 1-4		From Modes 1&3	
	South Girder	North Girder	South Girder	North Girder
Case 1				
Case 2				
Case 3				

5.2.2 실험결과 : 수치실험 II

Undamage의 모드형상을 Reference로 이용하여 Damage Case 4,5,6의 손상검색 결과를 Table 5.7과 Table 5.8~10에 나타내었다. Table 5.7는 각 거더에 부착된 센서 수에 따라 손상경보 여부를 정리한 것이며, Table 5.8~10은 MBDD 결과를 정리한 것이다. 두 번째 실험결과 역시 7개의 센서를 사용하였을 경우에는 손상경보가 이루어지지 않았고 9개 및 11개의 센서를 사용하였을 경우에만 정확하게 손상경보가 이루어졌다. 하지만 첫 번째 실험결과와는 달리 9개의 센서를 사용하였을 경우, 손상이 없는 거더에서도 손상이 있는 것으로 간주되고 있는 것을 알 수 있다.

Table 5.7 Damage Alarming Result : Numerical Test II

(O : correct alarming / X : false alarming / - : no alarming)

Number of Sensors	Damage Case	From Modes 1-4		From Modes 1&3	
		South Girder	North Girder	South Girder	North Girder
7	Case 4	-	-	-	-
	Case 5	-	-	-	-
	Case 6	-	-	-	-
9	Case 4	-	O	X	O
	Case 5	-	O	X	O
	Case 6	X	O	X	O
11	Case 4	-	O	-	O
	Case 5	-	O	-	O
	Case 6	-	O	-	O

Table 5.8 MBDD Result : Numerical Test II for 7 Sensors on Girder

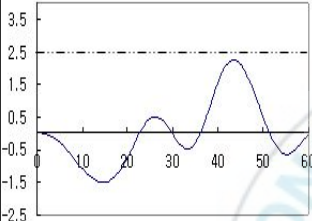
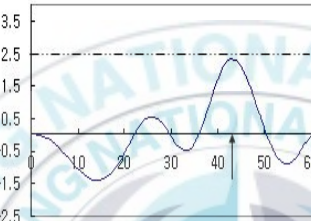
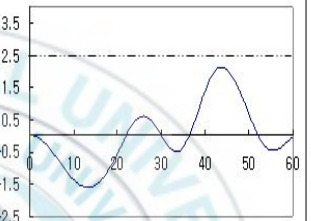
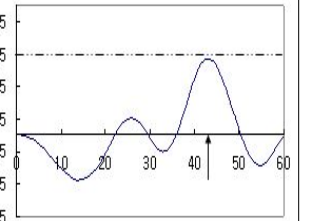
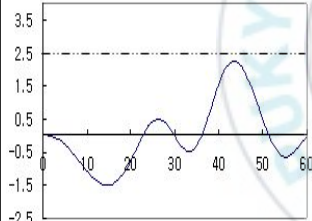
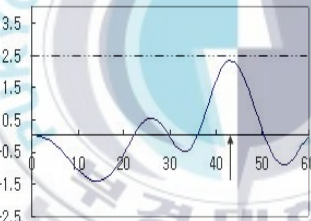
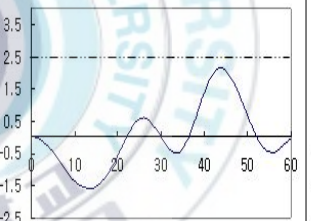
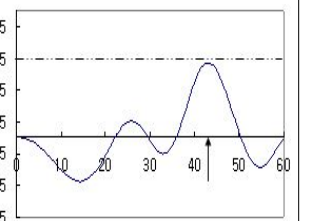
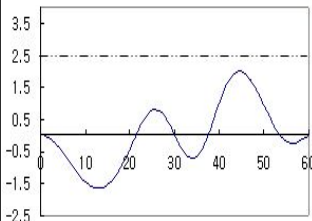
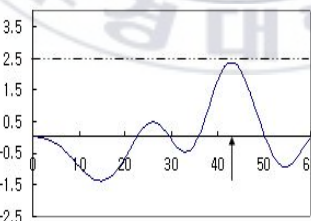
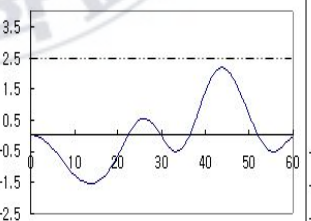
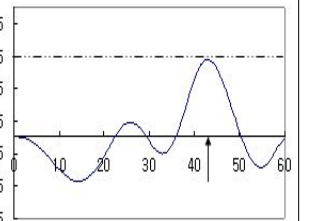
Damage Case	From Modes 1-4		From Modes 1&3	
	South Girder	North Girder	South Girder	North Girder
Case 4				
Case 5				
Case 6				

Table 5.9 MBDD Result : Numerical Test II for 9 Sensors on Girder

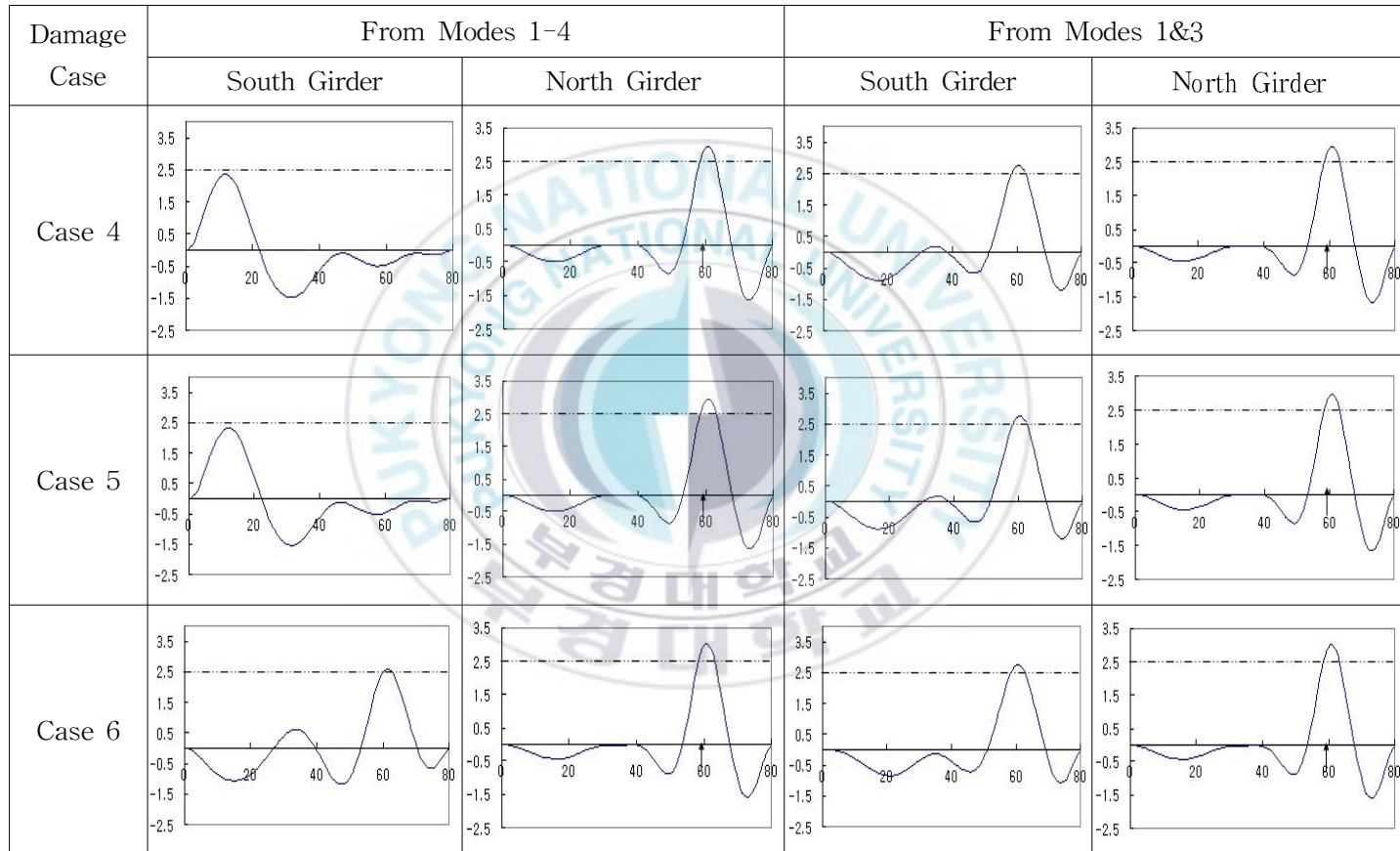


Table 5.10 MBDD Result : Numerical Test II for 11 Sensors on Girder

Damage Case	From Modes 1-4		From Modes 1&3	
	South Girder	North Girder	South Girder	North Girder
Case 4				
Case 5				
Case 6				

5.2.3 실험결과 : 수치실험 III

Damage Case 3의 모드형상을 Reference로 이용하여 Damage Case 4,5,6의 손상검색 결과를 Table 5.11과 Table 5.12~14에 나타내었다. Table 5.11은 각 거더에 부착된 센서 수에 따라 손상경보 여부를 정리한 것이며, Table 5.12~14은 MBDD 결과를 정리한 것이다. 세 번째 수치실험결과 두 번째와 같은 결과의 손상 경보가 이루어짐을 알 수 있다.

Table 5.11 Damage Alarming Result : Numerical Test III

(O : correct alarming / X : false alarming / - : no alarming)

Number of Sensors	Damage Case	From Modes 1-4		From Modes 1&3	
		South Girder	North Girder	South Girder	North Girder
7	Case 4	-	-	-	-
	Case 5	-	-	-	-
	Case 6	-	-	-	-
9	Case 4	-	O	X	O
	Case 5	-	O	X	O
	Case 6	X	O	X	O
11	Case 4	-	O	-	O
	Case 5	-	O	-	O
	Case 6	-	O	-	O

Table 5.12 MBDD Result : Numerical Test III for 7 Sensors on Girder

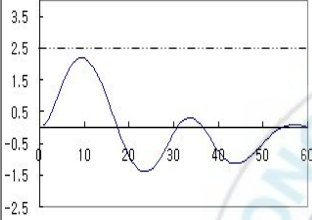
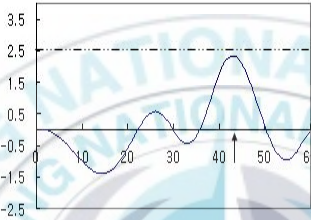
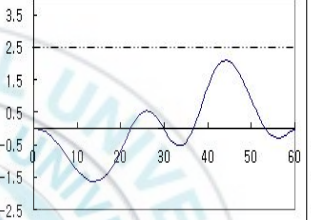
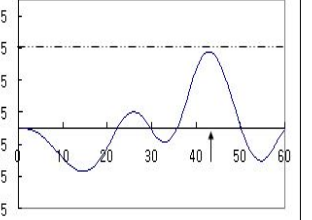
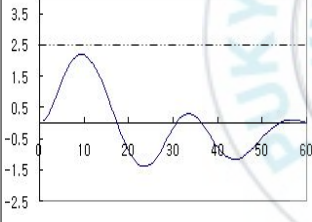
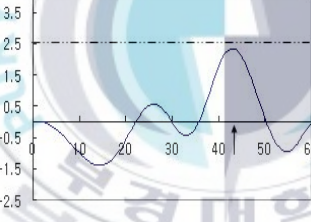
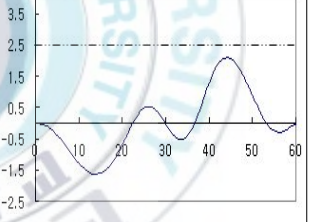
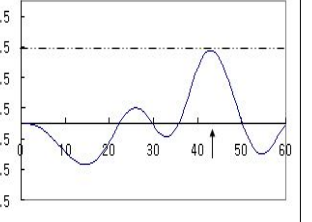
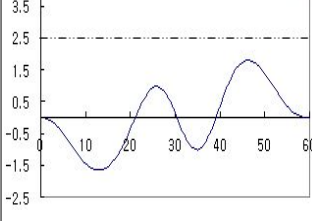
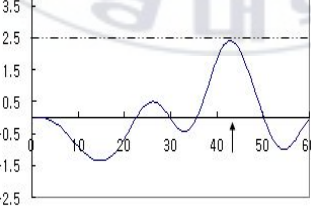
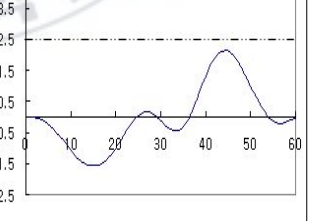
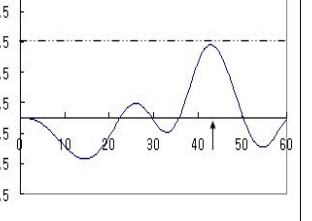
Damage Case	From Modes 1-4		From Modes 1&3	
	South Girder	North Girder	South Girder	North Girder
Case 4				
Case 5				
Case 6				

Table 5.13 MBDD Result : Numerical Test III for 9 Sensors on Girder

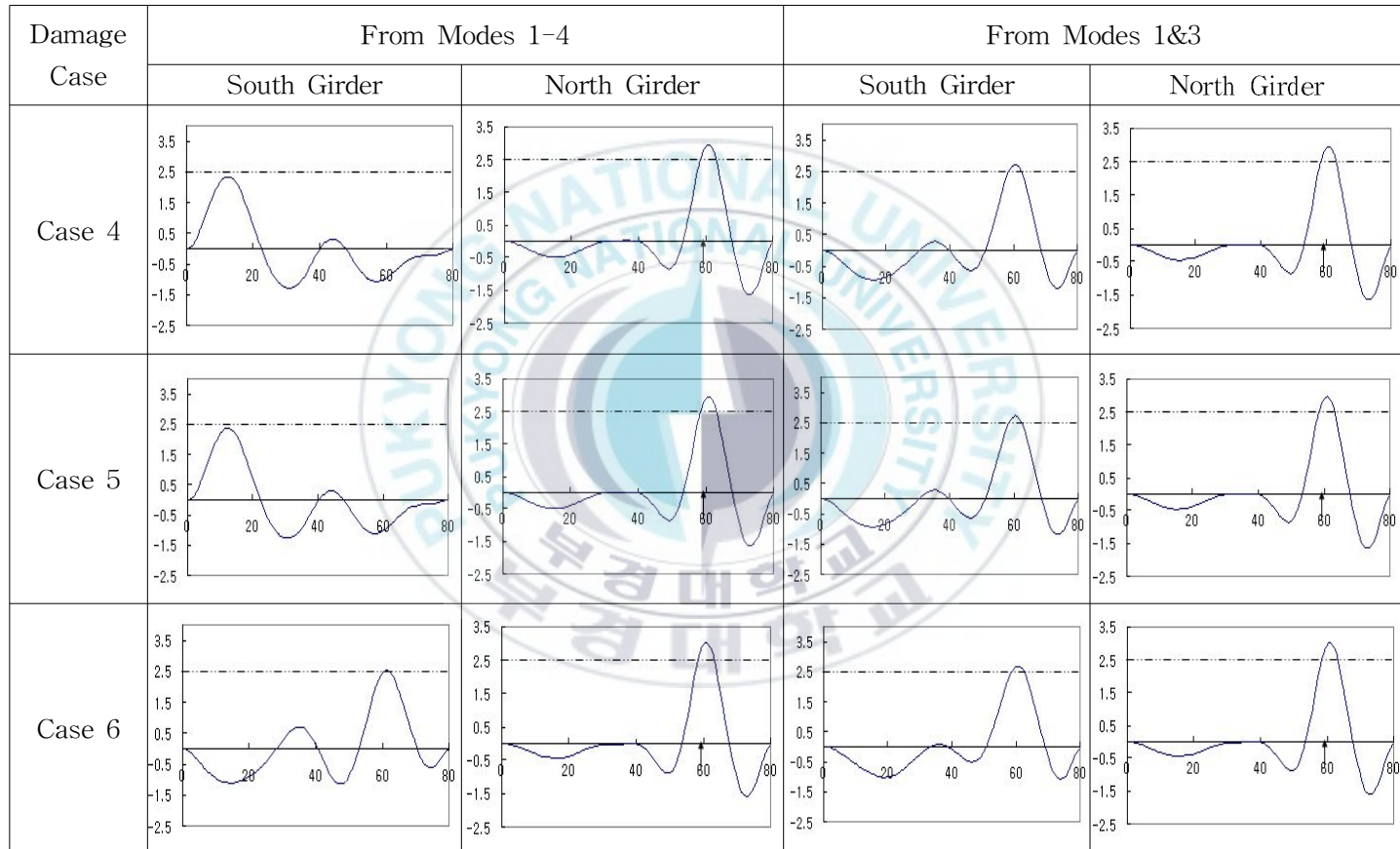
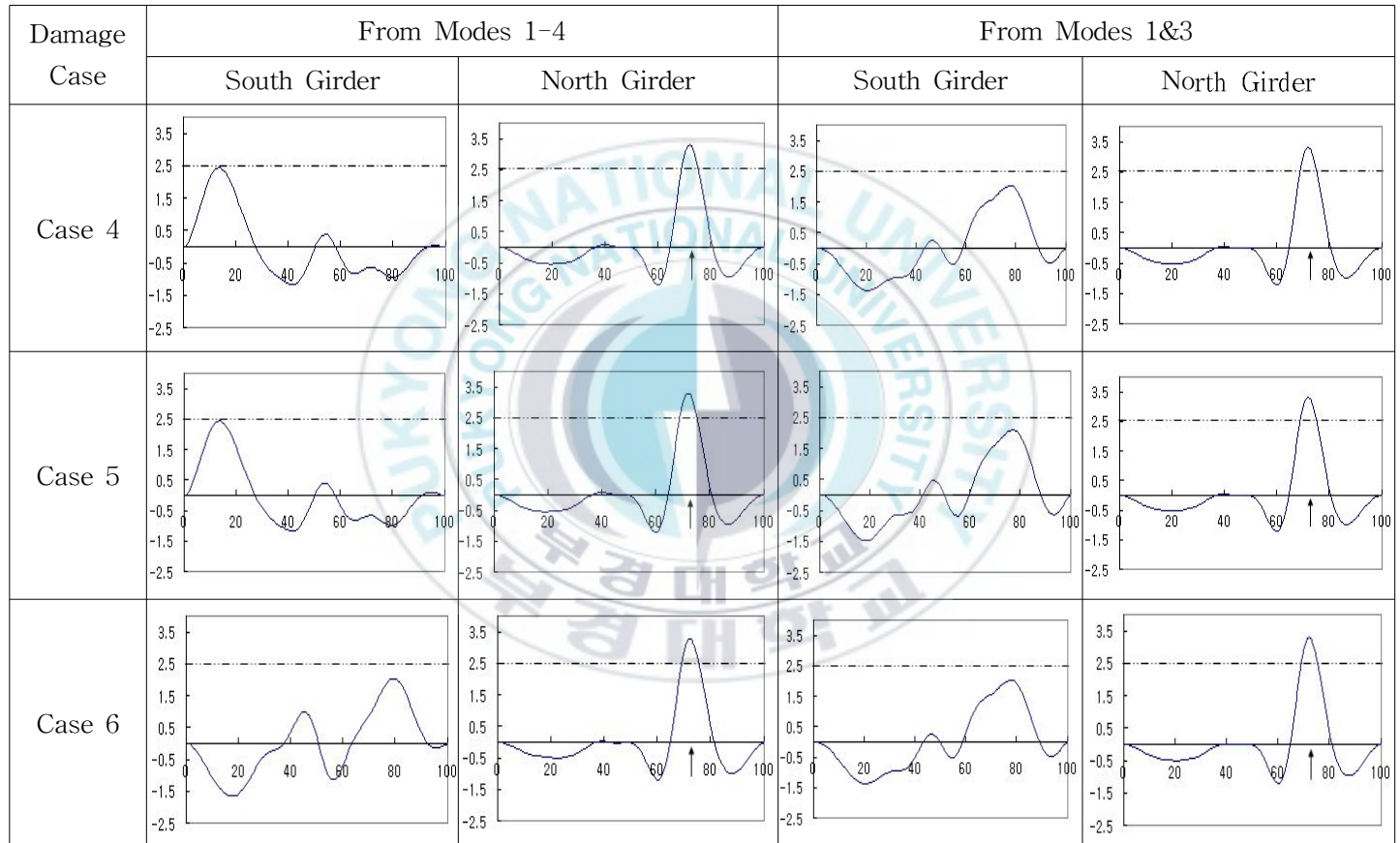


Table 5.14 MBDD Result : Numerical Test III for 11 Sensors on Girder



6. 실험검증

6.1. 대상구조물 및 손상 시나리오

6.1.1 실험구조물

본 논문을 위해 주형에 가로보가 연결되어 있고 가로보가 세로보의 하부에 위치하여 세로보를 지지하고 있는 강판형 거더의 가장 일반적인 형태를 실험모형으로 제작하였다. 판형 거더에서 하중은 주로 주형이 받게 되는데 주형의 상부 및 하부 플랜지에서는 굽힘에, 복부판에서는 전단력에 저항하기 위해서 I-형 단면으로 설계된 것이고 가로보나 세로보도 굽힘이나 비틀림에 저항하기 위해서 단면형상이 폭에 비해 높이의 길이가 긴 형태로 제작되었다. 지점부에서 힌지지점은 횡축방향에 대한 회전만 허용하고 로울러지점은 횡축방향에 대한 회전과 종축방향의 변위를 허용하도록 설계되었다. 가로보 위에 설치되는 세로보는 연속보로 제작, 설치되었다.

강판형 거더 모형의 재질은 스테인레스-스틸(stainless-steel)을 사용하였고 탄성계수는 210GPa 이고 밀도는 7850kg/m^3 이다. 제작시 지점부를 제외한 모든 연결은 용접연결에 의해 이루어졌다. 주형에 지점부 보강재와 중간 수직보강재 9개를 등간격으로 각각 제작하였다. 각각의 보강재에 가로보를 연결함으로서 두 개의 주형이 연결되었고 가로보의 상부에 3개의 세로보를 등간격으로 설치하였다. 주형과 세로보 위에 상판을 얹음으로 강판형 거더 모형이 완성되었다. 실험연구에 사용된 강판형 거더교의 축소 모형은 Fig. 6.1과 같으며, 그 치수와 형상은 Fig. 6.2와 같다. Fig. 6.2(a)는 대상구조물의 지간 길이와 지점 조건을, Fig. 6.2(b)는 덱(deck)과 거더(girder)의 형상과 각 부재의 치수를 나타낸 것이다.

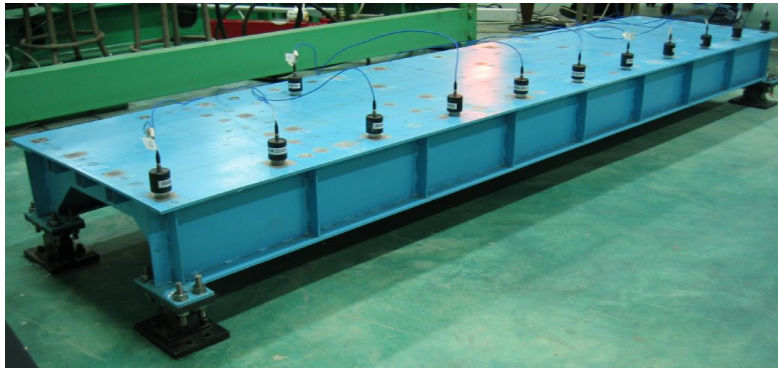
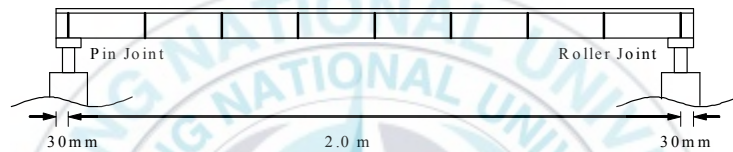
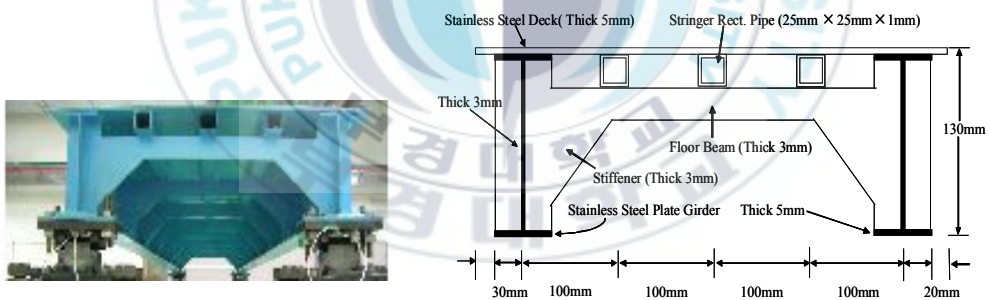


Fig. 6.1 Model of Steel Plate Girder Bridge for Test.



(a) Model Bridge Schematic



(b) Deck and Girders

Fig. 6.2 Description of Model Plate Girder Bridge.

실험 구조물에 사용된 센서들의 위치 및 배열은 Fig. 6.3과 같다. 수치 실험 결과로부터 실험검증을 위해 사용할 가속도 센서의 수를 각 거더당 11개로 하였다. 하나의 거더 위에 가속도 센서를 등간격으로 배열하여 계측 한 뒤 반대편 거더로 한번 이동시켜 총 22개의 위치에서 가속도를 계측하는 것으로 하였다. 가용한 가속도계는 총 12개로 22군데를 모두 계측하기 위하여 19번 가속도계와 20번 가속도계 사이로부터 0.065m 떨어진

위치에 reference 센서를 설치하고 남은 11개의 센서를 다음 위치로 이동하여 계측하는 roving test를 실시하였다. 1V/g의 아주 작은 민감도와 0.06~450Hz의 주파수 범위($\pm 5\%$)를 가지는 PCB 393B04 가속도계가 실험을 위해 사용되었다. 수직 방향으로의 동적 응답은 1kHz의 샘플링 주파수로 측정되었다. 가속도 데이터 취득을 위하여 16채널의 PCB Signal Conditioner, Terminal Block과 MATLAB이 사용되었다. 주파수 응답함수와 모드특성은 실험에서 획득된 가속도 데이터를 주파수영역분해법(FDD)을 통해 추출되었다(Yi and Yun, 2004). 실험 구조물로부터 측정된 가속도 신호는 Fig. 6.4와 같다.

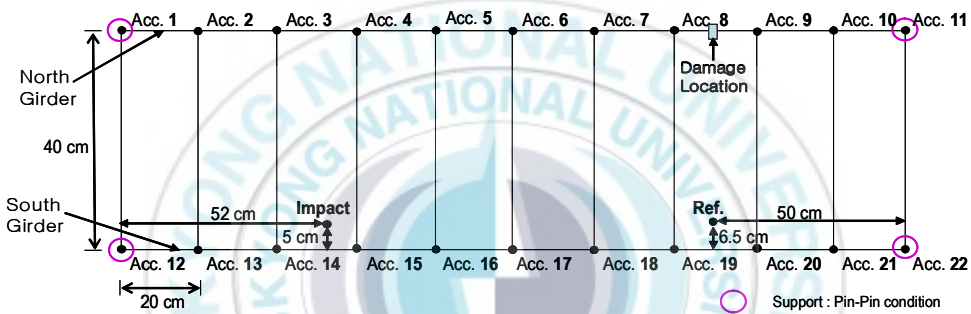


Fig. 6.3 Sensor Locations Using 11 Accelerometers for the Roving Test.

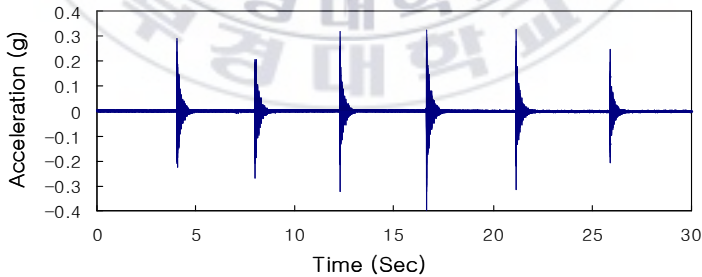


Fig. 6.4 Time Respose of Acceleration Signal.

임피던스 측정을 위하여 Fig. 6.5와 같이 PZT 패치(25 × 25mm, PZT 5A Plate)는 지점부의 하면부에 부착되었다. 데이터 취득을 위하여 임피던스 분석기인 HIOKI 3532와 LabVIEW 소프트웨어가 내장된 PC가 사용되었다.

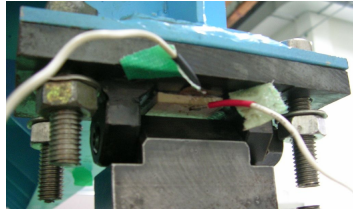


Fig. 6.5 Attached PZT Sensor.

실험을 위해 사용된 장비는 크게 센서, 데이터 수집장치(Data Acquisition System, DAQ), 그리고 신호처리 소프트웨어로 나눌 수 있으며 Fig. 6.6과 Fig. 6.7에 나타내었다. Fig. 6.6(a)~(c)는 각각 가속도 취득을 위해 사용된 가속도 센서, 임팩트 해머 가진기, Signal Conditioner를, Fig. 6.7(a)~(c)는 PZT Patch, 임피던스 분석기를 나타내었다.



(a) PCB 393B04

(b) Dytran Model 2850A

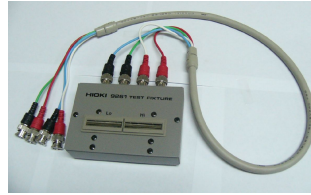


(c) Signal Conditioner

Fig. 6.6 Acceleration Measurement Instruments.



(a) PZT Patch



(b) 9261 TEST FIXTURE



(c) LCR HiTESTER (Hiyoki 3532)

Fig. 6.7 Impedance Measurement Instruments.

6.1.2 손상 시나리오

가. 휨 강성 감소

휨 균열에 의한 강성 감소 모니터링을 위해 전기톱을 이용하여 강판형 거더의 하부 플랜지를 절단 하였다. 수치실험 III에서와 같이, North 거더의 East 지점으로부터 $L/4$ 지간에 균열이 발생한 것으로 하였다. 균열의 크기는 플랜지 폭의 $1/4$, $2/4$, $4/4$ 로 각각 도입 하였다. 실험을 위해 도입한 균열은 Fig. 6.8과 같다.

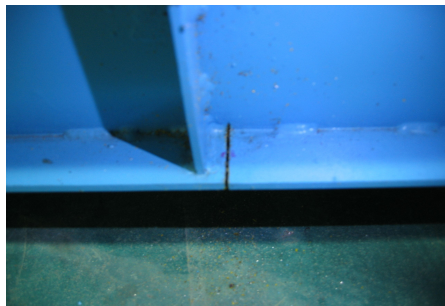


Fig. 6.8 Cutting Flange of North Girder.

나. 지점부 손상

손상 발생 지점부(support)는 Fig. 6.3의 1번 센서 아래인 North 거더의 West 지점부를 선정하였다. 지점부 손상의 유형은 볼트풀림 상황을 선정하였으며, Fig. 6.9와 같이 상부 거더와 하부 지점을 연결하는 4개의 볼트 연결부를 대상으로 볼트의 체결 상태를 조절하여 손상을 도입하였다.



Fig. 6.9 Bolts Connecting Girder to Support System

휨 강성 감소와 지점부 손상에 대한 7개의 손상 시나리오를 Table 6.1에 요약하였다.

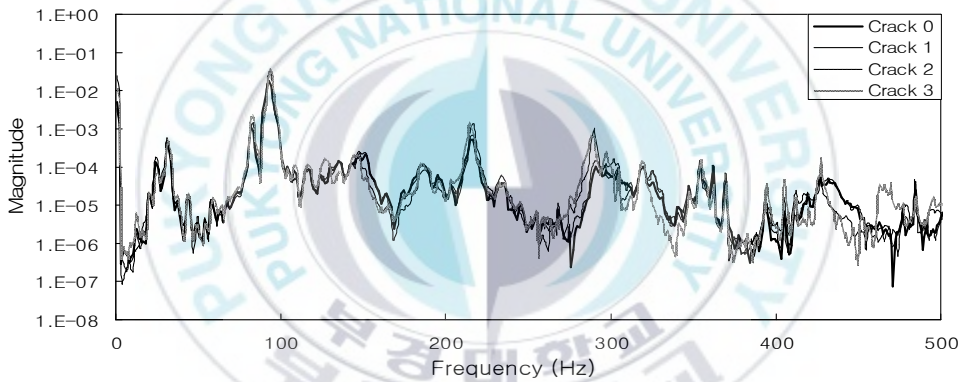
Table 6.1 Damage Scenarios

Damage Case	Damage Scenario	
0	Undamaged	-
1	North거더 East지점부터 L/4위치	플랜지 폭의 1/4 절단
2	North거더 East지점부터 L/4위치	플랜지 폭의 2/4 절단
3	North거더 East지점부터 L/4위치	플랜지 폭의 4/4 절단
4	North거더 West 지점 Bolt 1	볼트 풀림
5	North거더 West 지점 Bolts 1, 2	볼트 풀림
6	North거더 West 지점 Bolts 1, 2, 3	볼트 풀림
7	North거더 West 지점 Bolts 1, 2, 3, 4	볼트 풀림

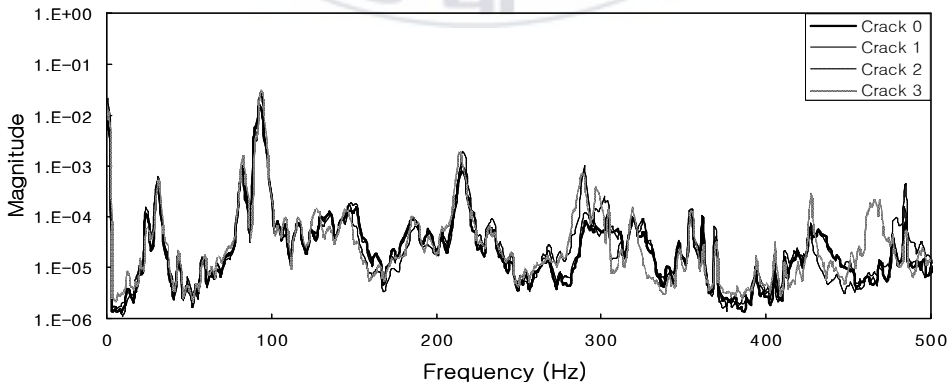
6.2 손상 모니터링 단계 I - 손상발생 경보

손상 모니터링 첫 번째 단계에서는 식 (3.4)에 설명된 FRRAC를 사용하여 구조물의 전역적인 손상발생을 경보한다.

우선, Crack에 의한 휨 강성의 감소를 발견하기 위해 FRR가 지점부 손상을 발견하기 위한 경우와 동일하게 Fig. 6.3에 보여진 센서 3과 6에서 측정된 FRF 데이터로부터 얻어졌다. 두 개의 FRF는 각각 Fig. 6.10(a), (b)와 같고 FRR은 Fig. 6.11과 같다. 그리고 Crack이 발생되기 전과 Crack 1과 2, 그리고 3에 의한 FRRAC의 변화가 Fig. 6.12에 나타나 있으며, 각각의 경우에 대해 실시된 8회 test의 평균과 표준편차는 Table 6.2에 나타나 있다.

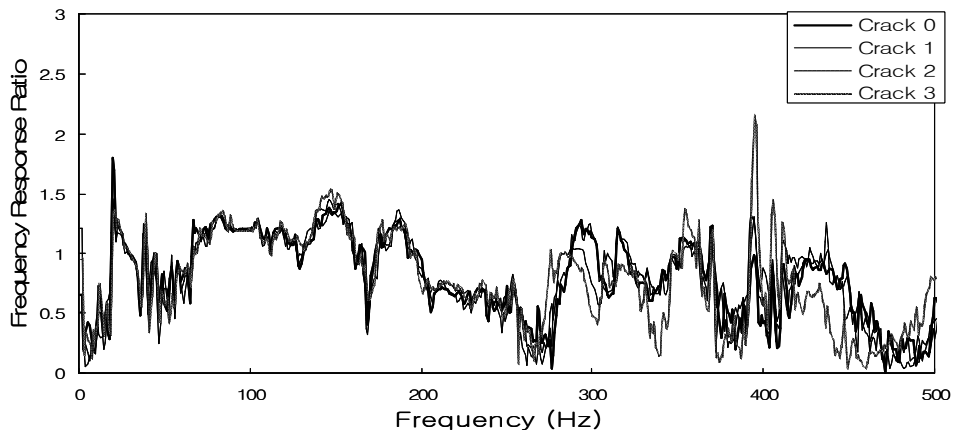


(a) FRF(3): Sensor 3



(b) FRF(6): Sensor 6

Fig. 6.10 Frequency Response Functions for each Crack.



$$FRR(3,6)=FRF(3)/FRF(6)$$

Fig. 6.11 Frequency Response Ratio for each Crack.

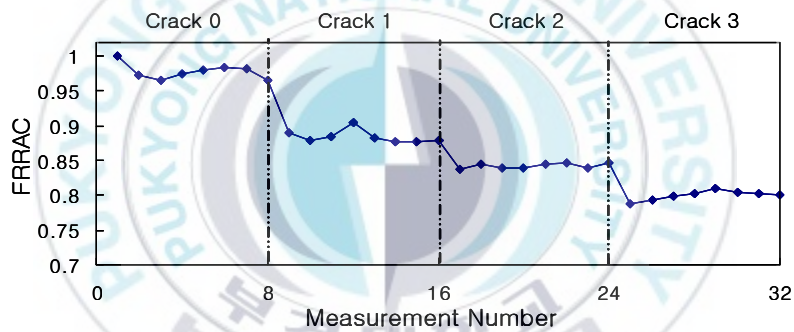


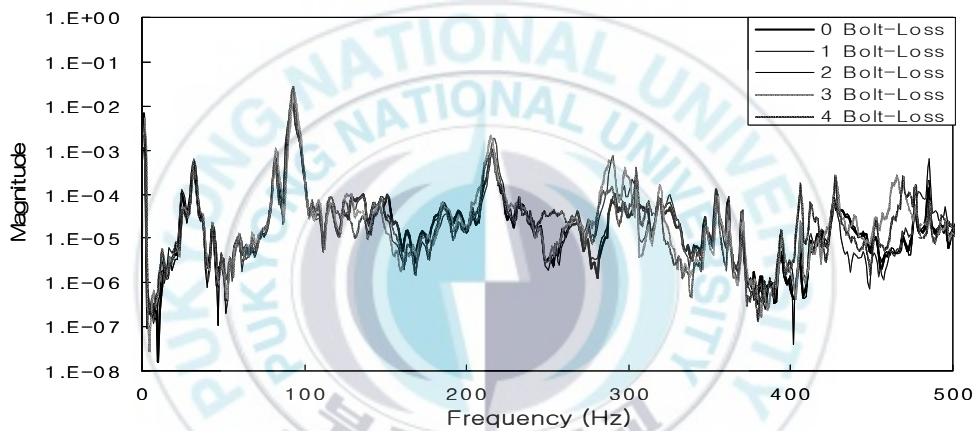
Fig. 6.12 Global Damage Alarming by FRRAC : Stiffness-Loss Occurrence.

Table 6.2 Mean and Standard Deviation of FRRAC for each Crack

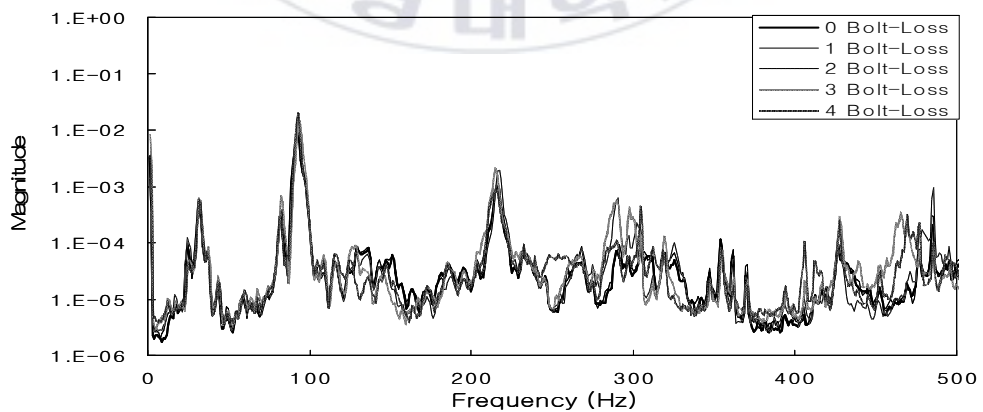
Damage Case	FRRAC	
	Mean	S.D.(%)
Crack 0	0.9773	1.17
Crack 1	0.8844	0.95
Crack 2	0.8421	0.36
Crack 3	0.7999	0.69

다음으로, 볼트 풀림에 의한 지점부의 손상을 발견하기 위해 가속도 신호가 Fig. 6.3에서 보여진 센서 3과 6에서 측정되었다. 식 (3.3)에 설명된

주파수 응답비(FRR)는 두 센서로부터 얻어진 주파수 응답함수(FRF)로부터 구해졌다. 식 (3.1)로부터 구해진 센서 3과 6에서의 FRF의 값은 각각 Fig. 6.13(a)와 (b)에 나타내었다. 그리고 두 FRF로부터 얻어진 FRR은 Fig. 6.14와 같다. 볼트 손상이 있기 전과 각각의 볼트 손상 시나리오에 의한 지점부 손상에 의한 FRRAC 값의 변화는 Fig. 6.15에 나타나 있으며, 그 평균과 표준편차는 Table 6.3에 나타나 있다. 각각의 유형에 대해 4번씩의 FRRAC 값을 구했으며 모두 20개의 FRRAC 값을 연속적으로 나타내었다. FRRAC 값은 발생한 지점부 손상에 따라 1이란 값으로부터 감소되었다.

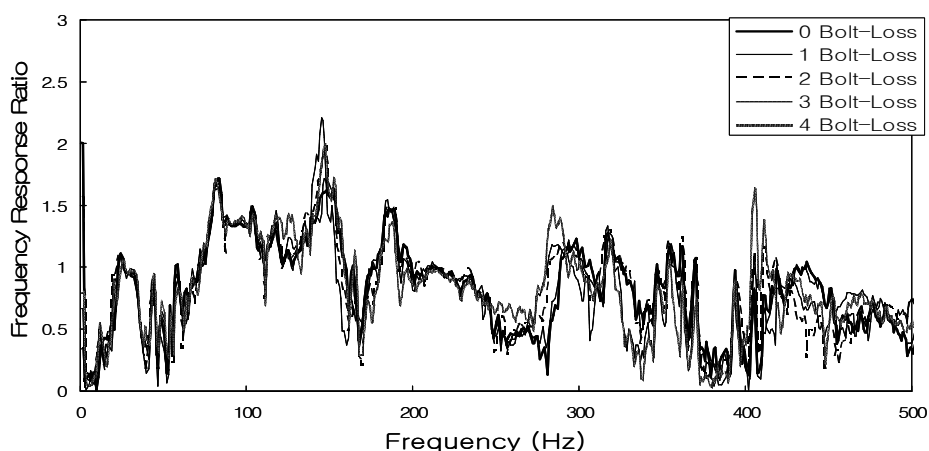


(a) FRF(3): Sensor 3



(b) FRF(6): Sensor 6

Fig. 6.13 Frequency Response Functions for each Bolt-Loss.



$$FRR(3,6)=FRF(3)/FRF(6)$$

Fig. 6.14 Frequency Response Ratio for each Bolt-Loss.

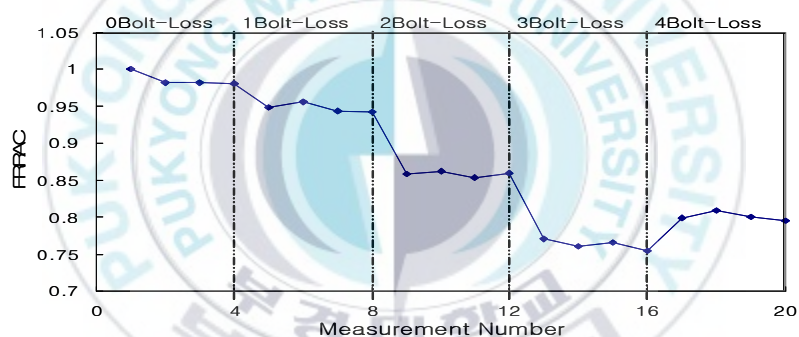


Fig. 6.15 Global Damage Alarming by FRRAC : Support Damage.

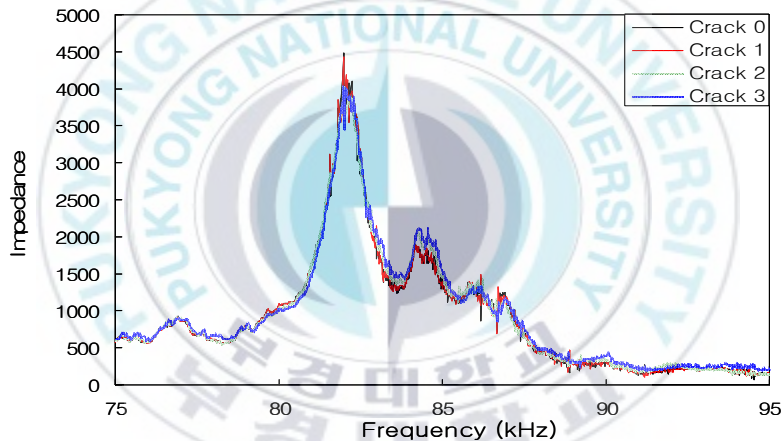
Table 6.3 Mean and Standard Deviation of FRRAC for each Bolt-Loss

Damage Case	FRRAC	
	Mean	S.D.(%)
0 Bolt-Loss	0.9859	0.94
1 Bolt-Loss	0.9475	0.61
2 Bolt-Loss	0.8582	0.38
3 Bolt-Loss	0.7628	0.67
4 Bolt-Loss	0.8007	0.57

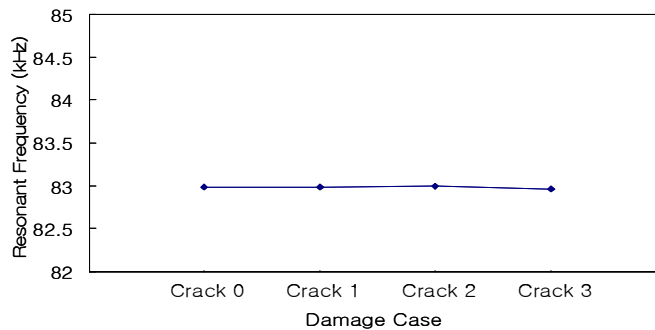
6.3 손상 모니터링 단계 II - 손상유형 구분

손상 모니터링 두 번째 단계에서는 식 (3.15)에 설명된 임피던스 신호의 변화를 사용하여 경보된 손상유형을 분류하였다.

우선, Crack에 의한 휨 강성 감소에 대하여 PZT 센서로부터 임피던스 실수부의 신호가 Fig. 6.16(a)에서와 같이 측정되었다. 임피던스 신호의 변화를 발견하기 위하여 주파수 범위를 75~95kHz로 정했다. 손상에 의한 공진주파수의 변화와 그 크기는 Fig. 6.16(b)와 Table 6.4에 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이 공진주파수의 뚜렷한 변화가 발생되지 않았으므로, 휨 강성의 변화는 임피던스 신호에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.



(a) EM Impedance Change



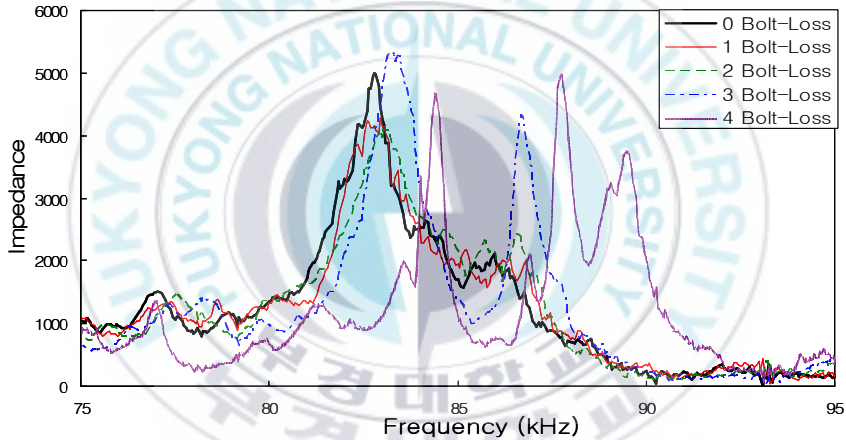
(b) Resonant Frequency Change

Fig. 6.16 Damage Classification Result for Stiffness-Loss.

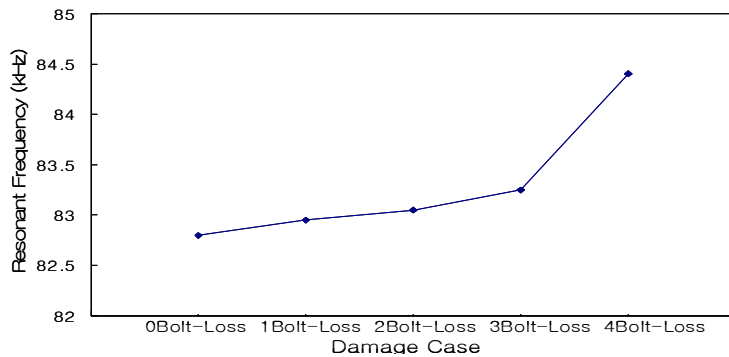
Table 6.4 Resonant Frequency Change for Stiffness-Loss

Damage Case	Resonant Frequency (kHz)
Crack 0	82.98
Crack 1	82.98
Crack 2	83
Crack 3	82.96

다음으로, 각각의 지점부의 손상 유형에 대해 PZT 센서로부터 측정된 임피던스 실수부의 신호가 Fig. 6.17(a)에 나타나 있다. 휨 강성이 감소한 경우와 동일하게 주파수 범위를 75~95 kHz로 정했다. 또한, 손상에 의한 임피던스 신호의 변화는 Fig. 6.17(b)와 Table 6.5에서와 같이 공진주파수 변화에 의해 정량화된다. 공진주파수의 변화는 경보된 손상이 지점부의 손상에 기인한 것이라는 것을 명백히 나타내주고 있다.



(a) EM Impedance Change



(b) Resonant Frequency Change

Fig. 6.17 Damage Classification Result for Support-Damage.

Table 6.5 Resonant Frequency Change for Support-Damage

Damage Case	Resonant Frequency (kHz)
0 Bolt-Loss	82.8
1 Bolt-Loss	82.95
2 Bolt-Loss	83.05
3 Bolt-Loss	83.25
4 Bolt-Loss	84.4

Fig. 6.18과 Table 6.6에는 각 손상 Case에 대한 상호상관 관계(Cross Correlation)의 계수를 구한 값을 나타내었다. 결과로부터 손상 Case 1~3는 변화가 없으나 Case 4에서 부터는 손상에 따라 1이란 값으로부터 감소되었다.

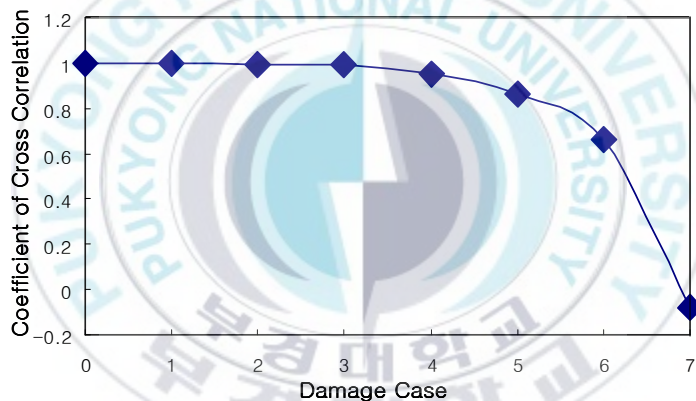


Fig. 6.18 Coefficient of Cross Correlation for Damage Scenarios.

Table 6.6 Coefficient of Cross Correlation for Damage Scenarios

Damage Case	Damage Scenario	Coefficient of Cross Correlation
0	Undamage	1.0000
1	Crack 1	0.9953
2	Crack 2	0.9944
3	Crack 3	0.9924
4	1 Bolt-Loss	0.9471
5	2 Bolt-Loss	0.8604
6	3 Bolt-Loss	0.6570
7	4 Bolt-Loss	-0.0801

두 결과는 임피던스 신호의 변화를 이용하면 경보된 손상유형을 분류할 수 있음을 나타낸다. 다시 말해, 첫 번째 단계에서 경보된 손상 이후에 임피던스 신호를 모니터링 하였을 때, 임피던스 신호의 변화가 발생하면 지점부의 손상이 발생하였음을 예측할 수 있고 임피던스 신호의 변화가 발생하지 않으면 휨 강성의 감소가 일어났음을 예측할 수 있다.

6.4 손상 모니터링 단계 III - 손상 위치/크기 평가

손상 모니터링의 마지막 단계에서는 두 번째 단계에서 구분된 두 손상 유형에 대해 좀 더 정밀하게 손상 위치 및 크기까지 평가를 하게 된다. 두 번째 단계에서 임피던스 신호 변화 유무에 따라 휨 강성에 의한 손상과 지점부 손상이 구분 지어지면, 식 (3.5)~(3.13)의 식들의 이론들을 적용하여 손상이 발생한 위치 및 손상의 크기를 평가하게 된다.

6.4.1 손상이 휨 강성 감소에 의한 경우

두 번째 단계에서 임피던스 신호 변화가 없어 휨 강성 감소에 의해 손상이 발생한 것으로 구분지어지면, 식 (3.5)와 (3.13)을 이용하여 손상이 발생한 위치 및 손상의 크기를 평가하게 된다. ARTeMIS 소프트웨어를 이용하여 얻어진 강판형 거더의 모드형상은 Fig. 6.19와 같고, North Girder의 균열에 의한 손상 전후의 모드형상과 고유진동수의 변화는 Fig. 6.20과 Table 6.7에 각각 나타내었다.



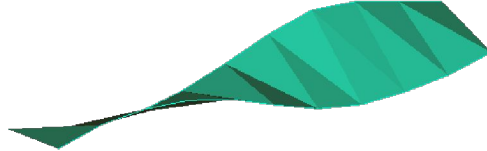
(a) Mode 1 (1st Bending)



(b) Mode 2 (1st Torsion)

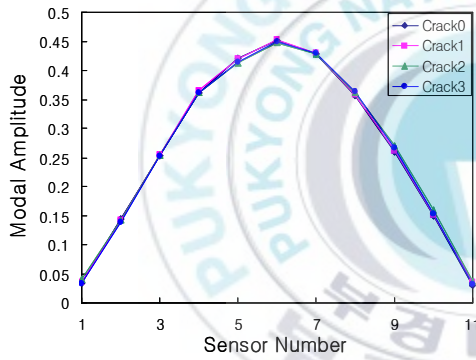


(c) Mode 3 (2nd Bending)

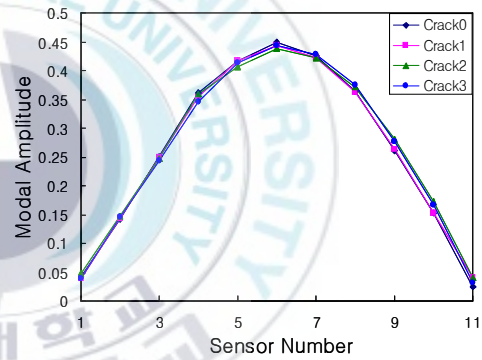


(d) Mode 4 (2nd Torsion)

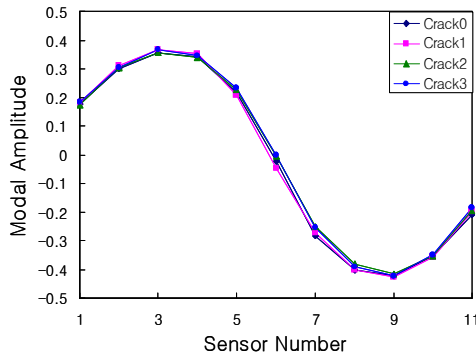
Fig. 6.19 Mode Shapes from Target Structure.



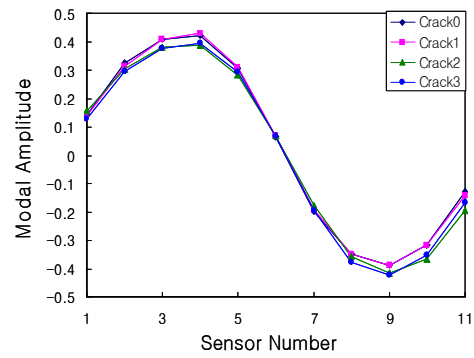
(a) First Bending Mode



(b) First Torsional Mode



(c) Second Bending Mode



(d) Second Torsional Mode

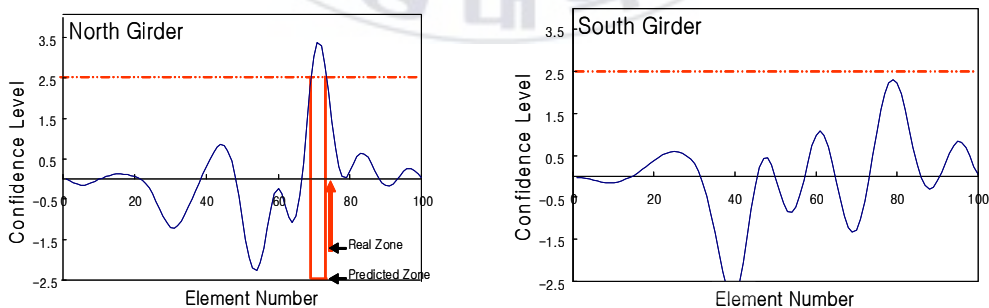
Fig. 6.20 Comparison of Mode Shape for Stiffness-Loss(North Girder).

Table 6.7 Comparison of Natural Frequencies for Stiffness-Loss

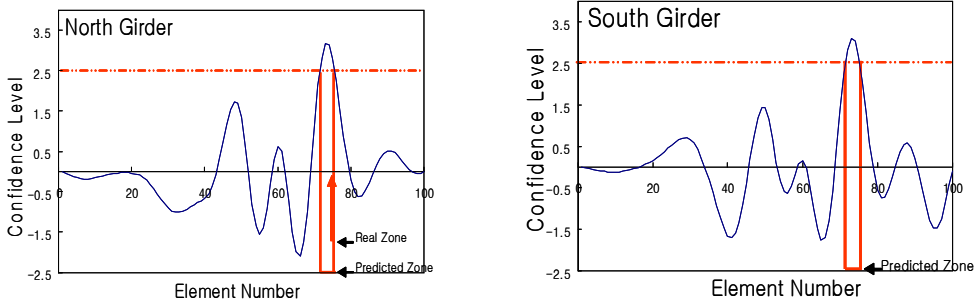
Damage Case	Frequency			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Crack0	91.31	107.42	219.24	292
Crack1	90.82	106.9	217.8	291
Crack2	90.34	106.59	217.18	290.86
Crack3	89.17	105.43	216.57	289.92

가. MBDD 적용

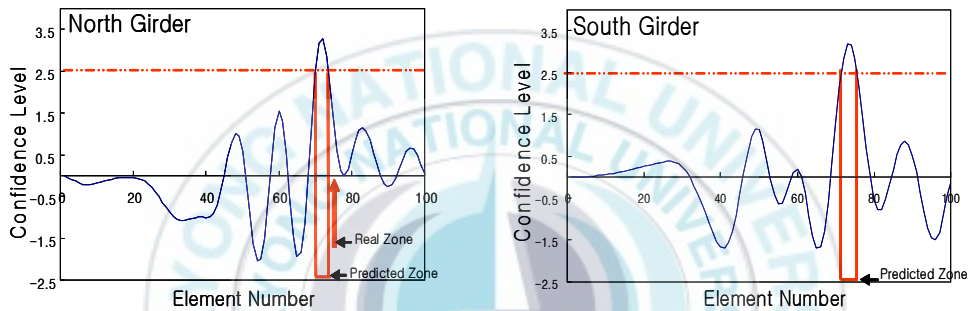
경보된 손상이 강성의 감소에 기인한 것이라고 결정되면, MBDD 기법을 손상의 위치와 크기를 평가하기 위해 이용할 수 있다. 손상지수는 식 (3.5)에 따라 산정된다. 정규화된 손상지수는 두 강성 감소 유형에 따른 손상 위치와 크기 예측을 위한 MBDD 기법에 따라 산정되고, 그 결과는 Fig. 6.21과 같다. MBDD를 위해 사용한 Mode는 수치실험 결과를 토대로 1차, 2차 휨모드만 사용하였다. 균열이 발생한 North Girder의 경우, 약간의 손상위치 오차를 보여주고 있지만, 비교적 정확하게 손상위치를 예측하고 있다. 하지만 균열이 발생하지 않은 South Girder의 경우에도 North Girder와 유사한 곳에 손상이 발생한 것으로 예측하고 있다.



(a) Crack0 vs Crack 1



(b) Crack 0 vs Crack 2

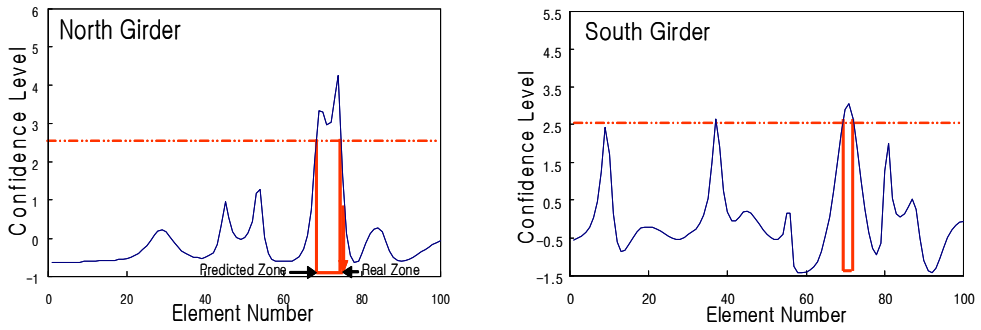


(c) Crack 0 vs Crack 3

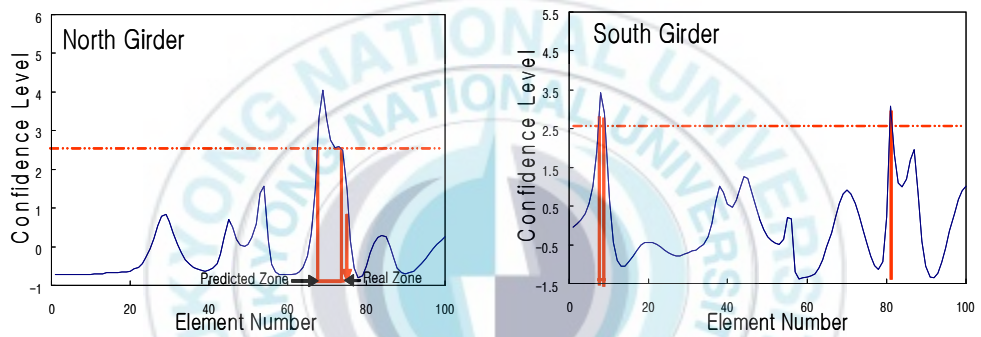
Fig. 6.21 Damage Estimation Result by using MBDD Method.

나. FBDD 적용

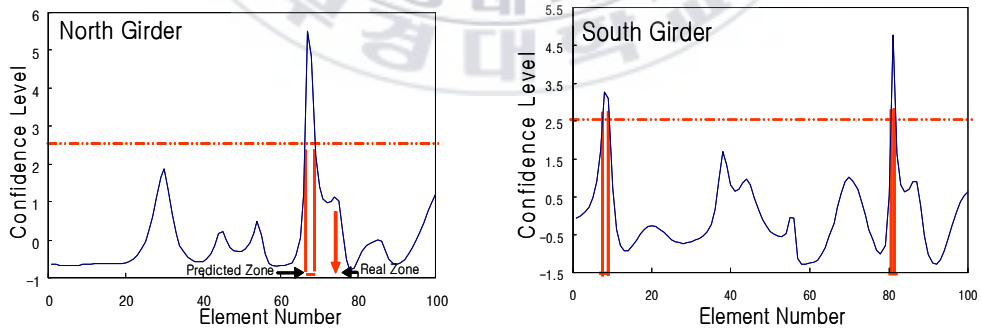
경보된 손상이 강성의 감소에 기인한 것이라고 결정되면, 손상 전후의 고유진동수의 변화로부터 손상을 판별하는 FBDD 기법을 손상의 위치와 크기를 평가하기 위해 이용할 수 있다. 손상지수는 식 (3.13)에 따라 산정된다. 정규화된 손상지수는 두 강성 감소 유형에 따른 손상 위치와 크기 예측을 위한 FBDD 기법에 따라 산정되고, 그 결과는 Fig. 6.22와 같다. FBDD를 위해 사용한 Mode는 수치실험 결과를 토대로 1차, 2차 휨모드만 사용하였다. 균열이 발생한 North Girder의 경우, 균열 1과 2에 대해 약간의 손상위치 오차를 보여주고 있지만, 비교적 정확하게 손상위치를 예측하고 있다. 하지만 균열 3의 경우 정확한 손상위치를 예측하지 못했으며, 균열이 발생하지 않은 South Girder의 경우에도 North Girder와 유사한 곳에 손상이 발생한 것으로 예측하고 있다.



(a) Crack 0 vs Crack 1



(b) Crack 0 vs Crack 2



(c) Crack 0 vs Crack 3

Fig. 6.22 Damage Estimation Result by using FBDD Method.

6.4.2 손상이 지점부 손상에 의한 경우

두 번째 단계에서 임피던스 신호 변화가 발생하여 지점부 손상이 발생한 것으로 구분지어지면, Fig.6.23과 같이 4개의 지점부를 각각 축부재로 가지는 구조물로 고려할 수 있다. 여기서, S1이 지점부 손상 위치이다.

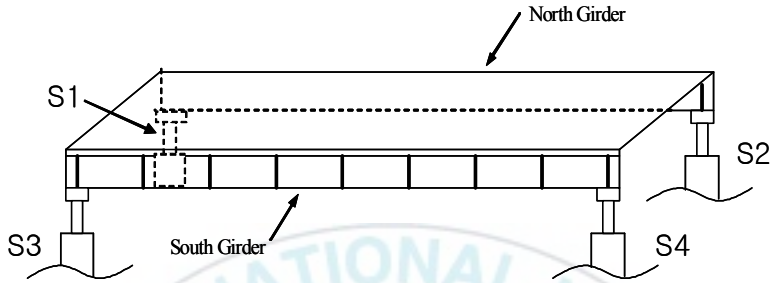


Fig. 6.23 Steel Plate Girder Bridge with Four Axial Supports.

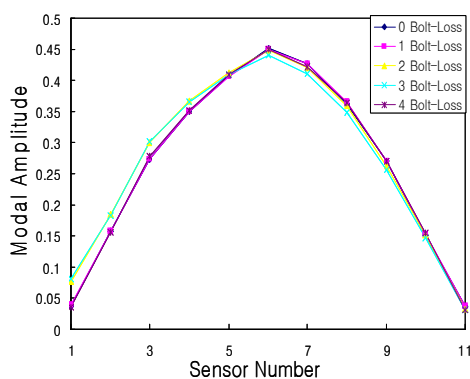
지점부 손상의 크기는 식 (3.5)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_j = \frac{k_j^* - k_j}{k_j} = \frac{1}{\beta_j} - 1 \quad (6.1)$$

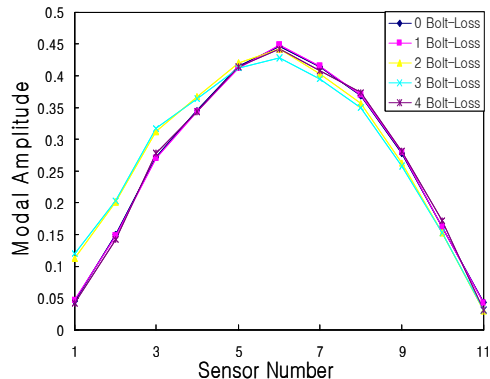
위 식은 다시 식(3.6)~(3.9)를 적용하여 식 (6.2)와 같이 정리할 수 있다. 다만, 각각의 지점부를 축부재로 고려하였으므로, ϕ_j'' 대신 ϕ_j 를 적용한다.

$$\alpha_j = \frac{\phi_j^{*2} - \phi_j^2}{\phi_j^2} \quad (6.2)$$

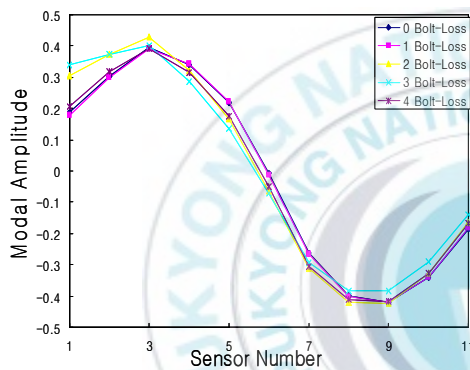
손상 전후에 대한 모드형상의 변화는 Fig. 6.24와 같고, 고유진동수의 변화는 Table 6.8과 같다. 그리고 S1~4 지점의 손상 전후의 ϕ_j 의 크기는 Table 6.8~6.12와 같고, 식(6.2)에 대입을 한 결과는 Table 6.13~6.16과 같다.



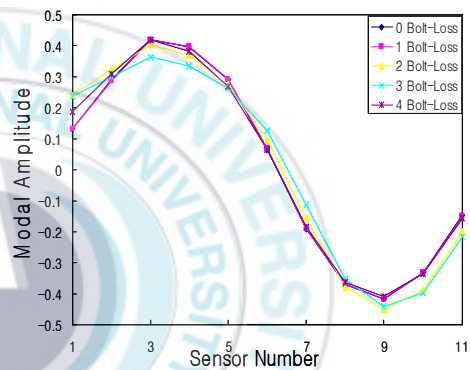
(a) First Bending Mode



(b) First Torsional Mode



(c) Second Bending Mode



(d) Second Torsional Mode

Fig. 6.24 Comparison of Mode Shape for Support-Damage(North Girder).

Table 6.8 Comparison of Natural Frequencies for Support-Damage

Damage Case	Frequency			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
0 Bolt-Loss	90.33	106.45	217.77	289.10
1 Bolt-Loss	90.33	105.96	217.77	289.10
2 Bolt-Loss	86.91	103.52	212.40	279.79
3 Bolt-Loss	85.94	103.03	211.91	279.30
4 Bolt-Loss	86.91	103.03	212.40	285.64

Table 6.9 Modal Amplitude of Support Element : Undamage

Support Element	Modal Amplitude			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
S1	0.0379050	0.045400	0.187450	0.132462
S2	0.0373850	0.042990	0.185811	0.147690
S3	0.0046920	0.003346	0.035750	0.046260
S4	0.0452950	0.038111	0.269375	0.156560

Table 6.10 Modal Amplitude of Support Element : Damage 1

Support Element	Modal Amplitude			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
S1	0.038434	0.047380	0.179860	0.132630
S2	0.037319	0.042790	0.182007	0.148950
S3	0.006554	0.005053	0.038780	0.049340
S4	0.046564	0.042846	0.275838	0.167997

Table 6.11 Modal Amplitude of Support Element : Damage 2

Support Element	Modal Amplitude			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
S1	0.075809	0.112720	0.304918	0.240260
S2	0.032317	0.029590	0.164840	0.198761
S3	0.008233	0.005222	0.041972	0.074316
S4	0.040941	0.045410	0.257450	0.067760

Table 6.12 Modal Amplitude of Support Element : Damage 3

Support Element	Modal Amplitude			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
S1	0.081668	0.119670	0.338174	0.238430
S2	0.030769	0.030980	0.138930	0.215815
S3	0.007001	0.005720	0.021020	0.083048
S4	0.041850	0.044083	0.254010	0.003100

Table 6.13 Modal Amplitude of Support Element : Damage 4

Support Element	Modal Amplitude			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
S1	0.035814	0.041590	0.206600	0.188421
S2	0.031917	0.031410	0.165838	0.154780
S3	0.004726	0.003545	0.046770	0.051990
S4	0.037061	0.044049	0.252891	0.132435

Table 6.14 Result of Damage Severity Estimation : Damage 1

Support Element	Mode			
	1	2	3	4
S1	0.028107	0.088981	-0.079323	0.002538
S2	-0.003528	-0.009145	-0.040526	0.017163
S3	0.951178	1.280587	0.176456	0.137741
S4	0.056818	0.263921	0.048561	0.151440

Table 6.15 Result of Damage Severity Estimation : Damage 2

Support Element	Modal Amplitude			
	1	2	3	4
S1	2.999894	5.163306	1.646146	2.289800
S2	-0.252748	-0.526242	-0.212958	0.811149
S3	2.078933	1.435689	0.378452	1.581129
S4	-0.183011	0.419719	-0.086550	-0.812657

Table 6.16 Result of Damage Severity Estimation : Damage 3

Support Element	Modal Amplitude			
	1	2	3	4
S1	3.642061	5.946297	2.254828	2.240065
S2	-0.322621	-0.480582	-0.440928	1.135282
S3	1.226405	1.922404	-0.654270	2.223320
S4	-0.146329	0.337955	-0.110825	-0.999608

Table 6.17 Result of Damage Severity Estimation : Damage 4

Support Element	Modal Amplitude			
	1	2	3	4
S1	-0.107285	-0.161068	0.214810	1.023373
S2	-0.271131	-0.466234	-0.203428	0.098245
S3	0.014545	0.122485	0.711545	0.263382
S4	-0.330526	0.335892	-0.118642	-0.284444

7. 요약 및 결론

본 논문에서는 가속도 센서와 PZT 센서를 이용하여 전역적 모니터링과 국부적 모니터링을 병행하는 하이브리드 건전성 모니터링 체계를 구축하고 이를, 두 개의 대표적인 손상 유형으로 휨 강성의 감소와 지점부의 손상을 가지는 강판형 거더교를 대상으로 한 실험을 통해 검증해 보았다.

하이브리드 체계의 첫 번째 단계로 주파수 응답비 보증지수(FRRAC)를 적용한 가속도 특징의 변화를 모니터링 함으로써 손상의 발생 유무를 발견하였으며, 두 번째 단계에서는 임피던스 특징의 패턴 변화를 인지함으로써 손상의 유형을 분류하였다. 마지막 단계에서는 모드 형상 기반 기법(MBDD)과 고유진동수 기반의 기법(FBDD) 등을 사용함으로써 휨 강성의 감소와 지점부 손상의 위치 및 크기를 평가하였다. 제안된 하이브리드 이론에 대한 검증 결과 및 결론은 다음과 같다.

- (1) 하이브리드 체계의 첫 번째 단계에서, 강판형 거더교의 손상정보를 위해 적용된 주파수 응답비 보증지수(FRRAC)는 휨 강성 감소와 지점부 손상 모두에 대해 정확하게 경보하였다.
- (2) 지점부 손상 발견을 위해 부착된 PZT 센서로부터의 임피던스 특징의 변화는, 휨 강성 감소의 경우에는 발생하지 않았으나, 지점부의 손상에 대해서는 그 크기에 따라 일정한 변화를 보였다. 결과로부터, 두 번째 단계에서 손상의 유형을 분류하는 것이 가능함을 알 수 있다.

(3) 마지막 단계에서 휨 강성의 위치와 크기를 평가하기 위해 적용된 두 기법 모두 다소 오차가 있지만, 비교적 정확하게 손상위치를 예측하였다. 하지만, 손상이 발생하지 않은 거더에서도 유사한 위치에 손상을 예측하였다.

만약 지점부의 손상과 같이 특정 영역에서의 손상이 발생했을 경우, 기존의 전역적 모니터링 기법만을 이용하여 손상 검색을 수행하면 손상위치를 명확하게 판단하기 힘들다. 따라서 국부적인 모니터링 기법이 동시에 요구된다. 그러므로 본 연구와 같이 전역적 모니터링을 통하여 손상의 발생 유무를 판단하고 국부적 모니터링을 통하여 손상 유형을 선별하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 과정을 적용한 하이브리드 건전성 모니터링 체계를 구축하고, 실험을 통하여 효과적이고 신뢰할 수 있는 구조 건전성 모니터링임을 검증하였다.



참 고 문 헌

- 경갑수, 김학수, 채원규(1998), “강교의 피로”, 건설도서.
- 김용수 저(2005), “MATLAB 입문과 활용”, 높이깊이.
- 김정태, 나원배, 홍동수, 이병준(2006), “가속도 및 임피던스 신호의 특징 분류를 통한 교량 연결부의 하이브리드 손상 모니터링 기법”, 한국지진공학회 논문집, 제 10권, 제 6호, pp. 57-65.
- 김진배 편저(1998), “교량의 유지관리”, 구미서관.
- 백종훈(2002), “손상지수법과 구조식별 기법을 통한 균열된 모형 강판형교의 손상 검색”, 공학석사학위논문, 부경대학교.
- 송기범 저(1998), “강구조공학”, 형설출판사.
- 이병준(2006), “전역-국부 혼합 건전성 모니터링에 의한 구조물 연결부의 손상검색에 관한 연구”, 공학석사학위논문, 부경대학교.
- 이인규, 박효경, 김재홍(2006), “Lamb파 전달을 이용한 볼트 연결된 얇은 강판부재의 손상해석”, 대한토목학회논문집, 제 26권 제 4A호.
- 윤재웅(2001), “강판형교 모형의 진동모드특성에 대한 실험적 연구”, 공학석사학위논문, 부경대학교.
- 최은수, 김현민, 오지택, 김성일(2005년 6월), “철도교용 고무패드 설치에 따른 판형교의 동적 거동 분석”, 한국강구조공학회 논문집, 제 17권 3호.
- 한국강구조공학회(2004), “강구조공학”, 구미서관.
- 홍동수(2007), “가속도 응답 신호를 이용한 PSC 거터교의 손상 모니터링 체계에 관한 연구”, 공학석사학위논문, 부경대학교.
- Bendat, J.S. and Piersol, A.G. (1993), "Engineering applications of correlation and spectral analysis", Wiley, USA.
- Bhalla S. and Soh, C.K.(2003), "Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers", Earthquake Eng. Struct. Dyn., Vol. 32, pp. 1897-1916.
- Chen, J., Garba, J.A.(1988), "On-orbit damaged assessment for large space structures", AIAA Journal, Vol. 26, No. 9, pp. 1119-1126.
- Cornwell, P., Doebling, S.W. and Farrar, C.R.(1999), "Application of the Strain Energy Damage Detection Method to Plate-Like Structures",

- Journal of Sound and Vibration, 224(2), 359-374.
- Doebeling, S.W., Farrar, C.R., and Prime, M.B.(1998), "A summary review of vibration-based damage identification methods", The Shock Vibration Digest, Vol. 30, No. 2, pp. 91-105.
- Hong, D.S., Kim, J.T., Na, W.B., Park S.H. and Park, G.H.(2007), "Hybrid Monitoring System for PSC Girder Bridges using Vibration- Impedance Signatures", The Twentieth KKCNN Symposium on Civil Engineering, October 4-5, Korea.
- Kim, J.T. and Norris Stubbs(1995), "Model-Uncertainty Impact and Damage- Detection Accuracy in Plate Girder", Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 10.
- Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M. and Norris Stubbs(2003), "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape - based method", Engineering Structures, Vol. 25, pp. 57-67.
- Kim, J.T., Park, J.H., Yoon, H.S. and Yi, J.H.(2007a), "Vibration-based damage detection in beams using genetic algorithm", Smart Structures and System, Vol. 3, No. 3, pp. 263-280.
- Kim, B.H., Park, T.H., Shin, H.Y. and Yoon, T.Y.(2007b), "A Comparative Study of the Tension Estimation Methods for Cable Supported Bridges", Steel Structures, Vol. 7, pp. 77-84.
- Lee, J.J. and Yun, C.B.(2006), "Two-step approaches for effective bridge health monitoring", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 23, No. 1, pp. 75-95.
- Liu, S.C., Chong, K.P. and Singh, M.P.(1994), "Civil infrastructure systems research: hazard mitigation and intelligent material systems", Smart Mater. Struct. 3, A169-A174.
- MATLAB Ver. 6.5(2000), Wavelet Application, MathWorks Inc.
- Park Gyuhae, Cudney, Harley H. and Inman, Daniel J.(2000), "Impedance- Based Health Monitoring of Civil Structural Components", Journal of Infrastructure Systems, Vol. 6, No. 4.
- Park, S.H., Yi, J.H., Yun, C.B. and Roh, Y.R.(2004), "Impedance-based

- Damage Detection for Civil Infrastructures", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 425~433.
- Rytter, A.(1993), "Vibration based inspection of civil engineering structures," Ph. D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.
- Sohn H., Farrar C.R., Hemez, F.M., Shucnk, D.D., Strnemates, D.W., and Nadler, B.R.(2003), "A review of structural health monitoring literature 1996-2001", LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos.
- Stubbs, N. & Kim, J.T.(1994), "Field Verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm", Texas A&M University Report prepared for New Mexico State University.
- Sun, F., Chaudhry, Z., Liang, C., and Rogers, C.A.(1995), "Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator", J. Intelligent Mat. Sys. and Struct. 6, 134-139.
- Yozo Fujino(2006), "Use of Vibration for Monitoring of Bridges and Transportation Infrastructure", The 8th International Conference on Motion and Vibration Control, Keynote2.
- Yun, C.B., Bahng, E.Y.(2000), "Substructural identification using neural networks", Computers and Structures, Vol. 77, pp. 41-52.
- Zou, Y., Tong, L., and Steven, G.P.(2000), "Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures - a review", Journal of Sound and Vibration, Vol. 230, No. 2, pp. 357-378.

APPENDICES

A. Crack3 발생이후 볼트풀림이 발생한 경우에 대한 실험 결과

실험일시 : 07년 12월 29일 13시~17시

실험 중 온도변화 : 13.7~13.8℃

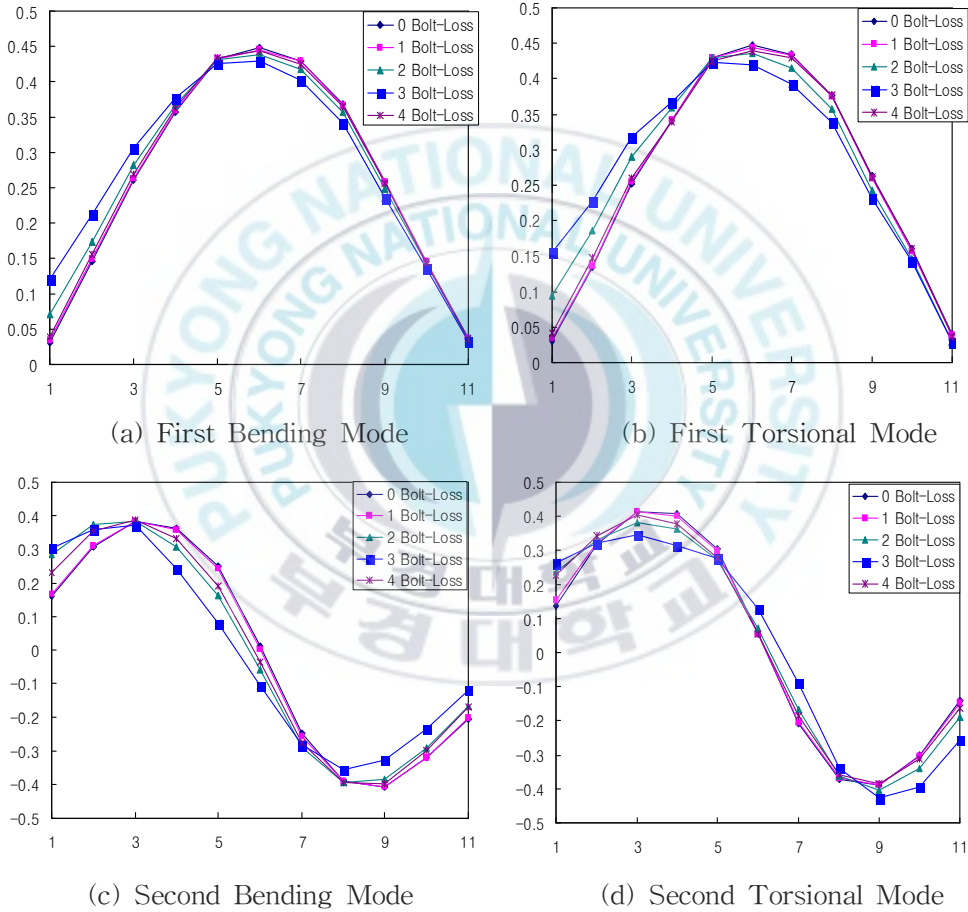


Fig. 1. Comparison of Mode Shape for Support-Damage(North Girder).

Table 1. Comparison of Natural Frequencies for Support-Damage

Damage Case	Frequency			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
0 Bolt-Loss	90.82	106.9	218.3	290
1 Bolt-Loss	90.33	106.4	218.7	289.1
2 Bolt-Loss	86.91	104	210.9	280.8
3 Bolt-Loss	83.5	102.5	199.2	277.8
4 Bolt-Loss	86.91	103	213.4	283.2

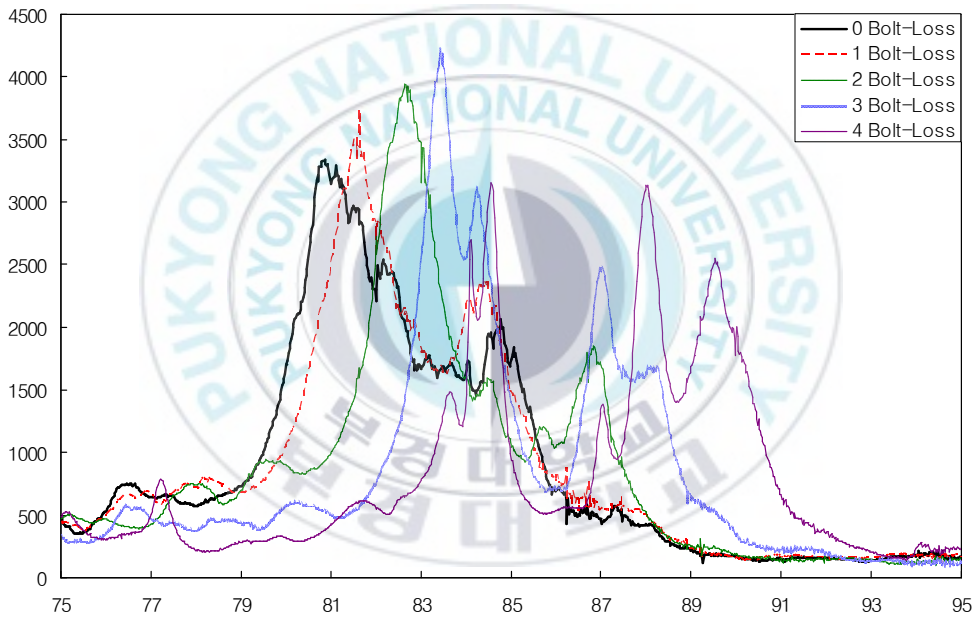


Fig. 2. EM Impedance Change for Support-Damage

감사의 글

4년이 넘는 긴 시간동안 부족한 제자를 학문적 가르침뿐만 아니라 바른 길로 인도해주신 지도교수 김정태 교수님께 감사의 말씀 올립니다. 본 논문을 심사해주시고 매 수업 시간마다 학문적 열정을 보여주셨던 류연선 교수님, 학과 선배의 따뜻함으로 애정 어린 충고를 해 주신 나원배 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 또한, 학부과정과 대학원 석사 과정동안 많은 가르침을 주셨던 윤길수 교수님, 류청로 교수님, 김현태 교수님, 이인철 교수님, 김윤태 교수님께도 깊이 감사드립니다.

2년의 대학원 과정동안 언제나 저의 든든한 헬퍼가 되어 주시고 학문적 열의를 몸소 보여 주셨던 박사과정 박재형 선배님과 참 많은 것을 주고받았다고 여겨지는 친형 같은 홍동수 선배님, 따뜻함으로 저에게 관심을 가져주셨던 조현만 박사님께 감사의 말씀드립니다. 또한, 연구실생활 동안 동고동락하며 쌍둥이 동생이 되어버린 동기 이정미, 실험을 할 때 든든한 도움을 주었던 남땀 소녀 이소영, 함께한 시간이 얼마 되지 않아서 좋은 추억을 심어주지 못한 것 같아 많은 아쉬움이 남는 Ho Duc Duy, 지금은 졸업을 하시고 사회인으로 그 역량을 발휘하고 계시는 이영규 선배님 이하 SSeL의 멋진 선배님들께도 고마운 마음을 전합니다.

힘든 연구실 생활동안 말벗이 되어주었고 앞으로 연구실의 주역이 되어야 할 조국래 군과 방장으로서의 기대가 막중한 정찬일 군, 지금은 이국에서 열공(?)하고 있을 신송기 군에게도 고마움을 전합니다. 마지막으로, 연구실의 든든한 축이 되는 신인영 군과 이포영, 허용진 군, 이소라 양에게 선배님들에게는 든든한 도움이 되는 후배로 후배들에게는 모범이 되는 선배로 거듭나기를 당부 드리며, 누구보다도 외롭고 힘들 두 막둥이 김동현, 이동희 후배에게 초심을 잊어버리지 말라는 말을 전하고 싶습니다.

인생을 함께 공유할 수 있는 친구 조무용, 최재영, 오승현, 이승훈, 이진선, 인생을 공유하기에 부족함 없는 동생 서수영, 조화용, 하나, 우성진 에게도 고마움을 전합니다. 3년이란 시간동안 옆에서 묵묵히 나의 짜증을 다 받아 주면서 삶의 의지와 희망을 주었던 이형미양에게도 깊은 감사드립니다.

끝으로, 항상 뜨거운 사랑으로 이 못난 아들을 믿어주시고 몸소 근면과 성실, 절약 정신을 심어 주신 존경하고 사랑하는 아버님, 어머님께 이 줄고를 바칩니다. 그리고 잔소리 대마왕이지만 인생의 선배 같은 여동생 도미영양에게도 감사의 마음을 표합니다.

2007년 마지막 날 도한성