

Modal-Perturbation 기법을 이용한 항만 구조물의 손상부위 추정

Estimations of Offshore Structure Damages by Modal Perturbation Method

조 병 원*
Jo, Byung Wan

한 상 주**
Han, Sang Ju

요 약

구조물의 손상전후에 나타나는 고유진동수와 모드 형상으로 부터 Inverse Modal Perturbation 기법을 이용하여 잔교식 부두나 돌핀과 같은 대규모 항만구조물의 손상도 추정을 위한 모드 기여도 계수를 근사적으로 직접구하는 방법을 제시하였다.

잔교식 항만구조물의 고유치 해석을 통해 구조물의 강성 변화량과 구조물의 고유진동수와 모드 형상의 변화량과 요소 손상도 계수를 도입하여 Inverse Modal Perturbation의 2차항을 고려한 관계식을 유도하고 손상전후에 구조물의 강성 감소로 나타나는 구조물의 손상도를 추정하여 수렴정도를 고찰하였다.

Abstract

An Inverse modal perturbation method was applied to estimate the assessments of the damages at the large-scaled marine structure, such as pier or dolphin, from the structural dynamic natural frequencies and mode shape.

Vibrations of structural stiffness, natural frequencies and mode shapes from the eigenvalue analysis lead to the modal perturbation equations, which were considered with a second order term.

This paper estimates the assessments of the damages for the structure with the decreased stiffness and shows the convergence of perturbation equation.

Keywords : assessment of damage, Offshore structure, Perturbation, Mode participation factor

1. 서 론

항만 구조물은 선박에 의한 충격이나 접안하중, 파랑에 의한 피로 하중, 컨테이너 등의 적체 하중,

대형 크레인 하중, 염해로 인한 재료의 강도 손실 등을 인하여 구조물의 일부가 손상을 입게 되는데 구조물이 물 속에 잠겨 있고, 수중생물이 파일동에 붙어 있으므로 구조물은 손상을 외관으로 관측

* 한양대학교 토목공학과 부교수

** 한양대학교 대학원 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 1997년도 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1997년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

할 수 없는 경우가 많다. 이렇게 손상된 부분을 그대로 방치할 경우, 손상 초기에는 구조물 전체에 미치는 영향이 별로 크지 않다 하더라도 손상이 누적되어 구조물의 붕괴를 초래 할 수 있으므로, 손상 발생 초기에 손상된 부분을 찾아내어 보수 및 보강하는 일은 매우 중요한 일이다.

1982년에 Standstrom R.E.⁽⁵⁾ 등은 구조물의 손상 전후의 동특성값을 측정하여 손상된 부재를 찾아내는 방법을 제시한 바 있으며, 1985년에 J.S.C Yang등은 1985년 발표한 논문에서 구조계의 고유 진동수와 고유 진동 모드를 계산하고, 계 규명 기법(System Identification Technique)을 통하여 손상후 구조물의 질량, 강성, 감쇠 행렬을 규명하는 방법을 보인다. 또한 이보다 먼저 1982년 Masnubu Shinozuka⁽¹⁾등은 관측된 외부 하중과 구조물의 응답 기록을 ARMA(Auto Regressive Moving Average)모델을 사용하여 구조계의 Parameter를 구하는 방법에 대하여 발표하는 등 일련의 계규명 기법에 관한 연구가 수행되어 왔다.

이상에서 언급한 제반 이론들은 동특성의 측정에 별다른 제한을 두고 있지 않다. 그러나 항만 구조물 경우에는 동특성을 측정할 수 있는 구조물의 부위 일부가 물 속에 잠겨 있거나 기타 제한 조건 등으로 인하여 구조물 전체의 거동을 측정하기가 불가능한 경우 등이다. 따라서 제한 조건하에서 측정된 동특성의 변화만으로 구조물의 손상을 밝혀 낼 수 있다면 이러한 방법이 좀 더 실제적인 일 이 될 것이다.

본 논문에서 이와 같이 제한된 가속도 값을 이용하여 구조물의 손상 부위 추정 방법에 대하여 연구하였다. 또한 측정될 수 있는 모드 차수가 제한되므로 정확한 해(Exact Solution)를 구할 수 없기 때문에 측정 및 계산상의 오차를 최소화하는 최적화 기법(Optimization Technique)을 사용하였다.

2. Inverse Modal Perturbation 이론

모든 구조물에는 각 구조물에 따른 고유의 진동 특성(고유 진동수와 고유 모드 형상)이 있다. 구

조물 중 어느 부분에 질량이나 강성의 변화가 발생할 경우 이들 동특성의 값들도 변화하게 되는데 이러한 질량이나 강성의 변화를 찾는 방법을 Inverse Modal Perturbation 방법이라 한다.

2.1 Modal Perturbation 방정식

구조물의 n차 고유치 문제는 다음과 같은 간략한 형태로 표현할 수 있다.

$$K\Phi = M\Phi\omega^2 \quad (1)$$

여기서 K는 강성 행렬, M는 질량행렬, ω 는 고유진동수를 나타내는 대각행렬, Φ 는 모우드 행렬이다.

손상을 입은 구조물은 손상후의 질량, 강성, 고유진동수와 고유 진동 모드의 값은 변화전의 값에 미소의 변량을 더한 것으로 나타낼 수 있다.

$$K' = K + \Delta K \quad (2)$$

$$M' = M + \Delta M \quad (3)$$

$$\omega'^2 = \omega^2 + \Delta\omega^2 \quad (4)$$

$$\Phi' = \Phi + \Delta\Phi \quad (5)$$

여기서 K', M', ω' , Φ' 손상 구조물의 강성 행렬, 질량행렬 Δ , 고유진동수를 나타내는 대각행렬, 모드 행렬이다. 그리고 첨자 Δ 는 미소 변량을 나타낸다.

변화후의 고유진동 모드는 변화전 고유진동 모드의 선형조합으로 아래와 같이 나타낼 수 있는데,

$$\Delta\phi_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} \phi_j \quad (6)$$

여기서 C_{ij} 는 변화후 i번째 모드에 대한 변화전 j번째 모드의 기여도를 나타내는 모드 기여도 계수(Modal Participation Factor)이다. 그러므로 손상된 고유벡터는 행렬형태로 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\Phi' = \Phi(I+C^T) \quad (7)$$

여기서

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(8)에서 [C]는 모우드 기여도 행렬(Mode Participation Matrix)이며, $i=j$ 일때 계수 C_{ij} 값은 0이며, 구조물의 변화가 적으면($i \neq j$) C_{ij} 값은 매우 작은 값을 갖게 된다.

손상된 구조물의 n 차 고유치 문제는 손상되지 않은 구조물의 경우에서와 같이 다음과 같은 간략한 형태로 표현할 수 있다.

$$K'\Phi' = M\Phi' \omega'^2 \quad (9)$$

여기서 식(2)~(5) 그리고 (7)을 (9)식에 대입하면 (9)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(K+\Delta K)\Phi(I+C^T) = (M+\Delta M)\Phi(I+C^T) (\omega^2+\Delta\omega^2) \quad (10)$$

구조물의 손상은 일반적으로 재료의 열화 및 균열등에 의해 발생하고, 강성의 변화에 비해 질량의 변화는 무시할 수 있으므로 손상후 질량행렬은 변하지 않는다고 보아 $\Delta M=0$ 으로 놓을 수 있고, Φ^T 를 전승하면 2차 Perturbation 방정식을 얻을 수 있다.

$$\Phi^T \Delta K \Phi (I+C^T) = \bar{M} (C^T \omega^2 + C^T \Delta \omega^2 - \omega^2 C^T + \Delta \omega^2) \quad (11)$$

여기서, $\bar{M} = \Phi^T M \Phi$: 일반화된 질량행렬

구조물의 강성변화로 인한 동특성의 변화량 등은 실제로 미소한 값이므로 이들간의 2차 이상의

항들을 제외하면 1차 Perturbation 방정식(12)을 구할 수 있다.

$$\Phi^T \Delta K \Phi = \bar{M} \{ (C^T \omega^2 - \omega^2 C^T) + \Delta \omega^2 \} \quad (12)$$

1차 Perturbation 방정식의 좌변항에서 ΔK 구조물의 미지 강성변화량을 나타내고 우변항에서는 측정된 진동수와 모드 형상의 변량을 나타낸다.

그러므로 식(12)의 해를 구함으로써 구조물의 손상을 구할 수 있다.

2.2 강성변화

강성변화를 효과적으로 다루기위해 손상된 부재에 대한 강성변화량으로 표현하면

$$\Delta K = \sum_{e=1}^l \Delta K_e \quad (13)$$

여기서 ΔK_e 는 e 번째 손상부재의 요소강성이다. 요소손상계수 α 를 도입하여 윗식을 나타내면

$$\Delta K_e = K_e \alpha_e \quad (14)$$

여기서, α_e 는 e 번째 손상된 요소 부재강성의 손상계수이고, 손상정도에 따라 α 는 파괴를 나타내는 -1에서 부터 손상이 없는 0의 범위를 갖는다. 그러므로 구조물의 강성변화량은 다음과 같이 최종적으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta K = \sum_{e=1}^l K_e \alpha_e \quad (15)$$

2.3 Inverse Modal Perturbation 방정식

식(15)를 식(12)에 대입함으로써 대각원소와 비대각원소를 분리하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi^T \Delta K \Phi = \begin{cases} \bar{M}_i \Delta \omega_i^2 & \text{for } i=j \\ \bar{M}_j C_{ij} (\omega_i^2 - \omega_j^2) & \text{for } i \neq j \end{cases} \quad (16)$$

$$\Phi^T \Delta K \Phi = \begin{cases} \bar{M}_i \Delta \omega_i^2 & \text{for } i=j \\ \bar{M}_j C_{ij} (\omega_i^2 - \omega_j^2) & \text{for } i \neq j \end{cases} \quad (17)$$

여기서, 1차 Perturbation 방정식은 $i=j$ 인 경우 구조물의 변화로 모드형상의 변화없이 i 번째 요소의 고유진동수변화를 나타내며, $i \neq j$ 인 경우 고유진동수의 변화없이 C_{ij} 를 통해 모드형상의 변화를 구할 수 있다.

k 번째 모드에 대하여 정리하면, Perturbation 방정식은 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$P_k \alpha = Q_k \tag{18}$$

여기서

$$\alpha = \langle \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_1 \rangle^T$$

$$P_k = \begin{bmatrix} \phi_1^T K_1 \phi_k & \phi_1^T K_2 \phi_k & \dots & \phi_1^T K_l \phi_k \\ \phi_2^T K_1 \phi_k & \phi_2^T K_2 \phi_k & \dots & \phi_2^T K_l \phi_k \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_n^T K_1 \phi_k & \phi_n^T K_2 \phi_k & \dots & \phi_n^T K_l \phi_k \end{bmatrix}$$

$$Q_k = \begin{bmatrix} \bar{M}_1 C_{k1} (\omega_k^2 - \omega_1^2) \\ \bar{M}_{k-1} C_{k,k-1} (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) \\ \bar{M}_{k+1} C_{k,k+1} (\omega_k^2 - \omega_{k+1}^2) \\ \bar{M}_n C_{kn} (\omega_k^2 - \omega_n^2) \end{bmatrix}$$

식(18)의 해는 모드 기여도 계수 C_{kj} 관계에서 진동수 의 변화량 $\Delta\omega k^2$ 와 모드기여도계수 C_{ij} 를 표현되는 모드형상 변화량 $\Delta\Phi_k$ 가 요구된다. 고유진동수의 변화량은 측정 자료로 부터 직접 구할 수 있는데 반해서 모드 기여도 계수 C_{kj} 는 측정 자료로 부터 구하기 어렵다.

그래서 모드 기여도 계수를 소거하기위해 변환행렬을 도입하여 전송 한다.

변환행렬 T는 다음과 같다.

$$T_k = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \frac{\phi_1}{M_1(\omega_k^2 - \omega_1^2)} & \dots & \frac{\phi_{k-1}}{M_{k-1}(\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)} & \frac{\phi_k}{M_k \Delta\omega_k^2} & \dots & \frac{\phi_n}{M_n(\omega_k^2 - \omega_n^2)} \end{bmatrix} \tag{19}$$

변환행렬을 도입하여 변환된 행렬은 다음과 같다.

$$P_k^0 \alpha = Q_k^0 \tag{20}$$

여기서 $P_k^0 = T_k P_k$ 그리고 $Q_k^0 = T_k Q_k$ 이다. Q_k^0 는 다음의 형태로 나타낸다.

$$Q_k^0 = \begin{cases} \bar{M}_k (1 + C_{kk}) \Delta\omega_k^2 \\ \phi_k \end{cases} \tag{21}$$

상기 식(21)은 중 측정값인 ϕ_k 은 구조물 전체의 절점중 극히 일부분에서만 측정할 수 있으므로 통상 부재수보다 작다. 그러므로 미지수가 조건식의 수보다 많기 때문에 수학적으로 정확한 해를 구할 수 없으므로 측정 및 예측과정의 최적화 기법을 적용하여 근사적 해를 구할 수 있다.

$$\text{목적함수 min. } J = \sum_{k=1}^{rk} \left\{ \sum_{e=1}^l \phi_k^T K_e \phi_k \alpha_e - \bar{M}_k (1 + C_{kk}) \Delta\omega_k^2 \right\}^2 \tag{27}$$

$$\text{구속조건 } G_j^k(\{\alpha\}) = \langle T_k \rangle^{l+1} [P_k] \{\alpha\} - \beta_k \phi_{ik} \quad (-1 < \alpha_e < 0)$$

여기서 n_k 는 측정된 고유 진동수 이다.

식(22)와 같이 목적함수는 2차식이며, 구속조건은 1차식과 부등식으로 주어지는 최적화 문제이다.

3. 수치 모의 실험(Computer Simulation)

앞에서 서술한 이론에 대한 수치 모의 실험(Computer Simulation)을 위하여 그림1에서는 Pile부재를 택하였으며, 그림2에서는 항만구조물에서 흔히 볼 수 있는 잔교식부두를 단순화시킨 모델에 대해 해석하였다.

각 구조물에 대한 고유치 해석(Eigenvalue Analysis)을 통해 3차, 4차 모드의 고유진동수와, 일반화된 질량 행렬을 단위 행렬(Unit Matrix)이 되도록 정규화 시켜서 고유 진동 모우드를 구하여 Perturbation 영향행렬 [P]을 구성한다. 그리고 부재의 강성을 감소시킨후 고유치 해석을 시행하여 고유 진동수와 구조물의 측정점을 정하여 처음 두개의 모드에서 Mode Shape 값을 비교함으로써

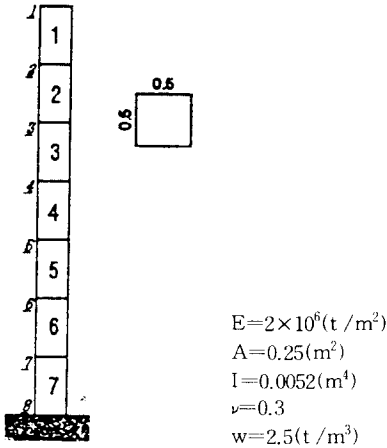


그림 1 구조 해석 모델(구조물 1)

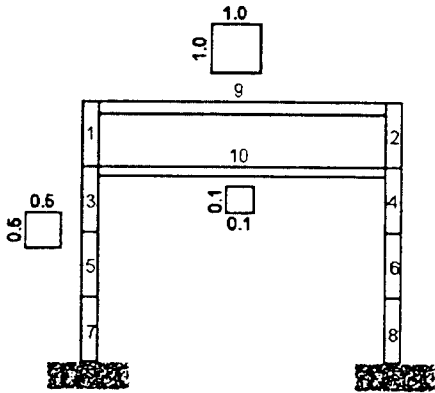


그림 2 구조 해석 모델(구조물 2)

표 1 각 case별 수치모의실험 조건

Chart No.	구조물 Type	손상부위(강성 30%감소)	모드기여도계수 및 Perturbation 방정식
# 1	Type 1	Element 6	C_{12}, C_{21} , or $C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 2	Type 1	Element 6	C_{12}, C_{21} , or $C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 3	Type 2	Element 5	C_{12}, C_{21} , or $C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 4	Type 2	Element 5	C_{12}, C_{21} , or $C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 5	Type 1	Element 6	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 6	Type 1	Element 3	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 7	Type 1	Element 4 & 6	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 8	Type 1	Element 3 & 5 & 7	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 9	Type 2	Element 5	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 10	Type 2	Element 4	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 11	Type 2	Element 1 & 6	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 12	Type 2	Element 1 & 4 & 5	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 13	Type 1	Element 6	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 14	Type 1	Element 6	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 15	Type 2	Element 5	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 16	Type 2	Element 5	$C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$
# 17	Type 1	Element 6	1차 perturbation 방정식
# 18	Type 1	Element 6	2차 perturbation 방정식
# 19	Type 1	Element 4 & 6	1차 perturbation 방정식
# 20	Type 1	Element 4 & 6	2차 perturbation 방정식
# 21	Type 2	Element 5	1차 perturbation 방정식
# 22	Type 2	Element 5	2차 perturbation 방정식

[부재 No. (1,2,3,4,5,6,7,8)]
 $E=2 \times 10^6(t/m^2)$
 $A=0.25(m^2)$
 $I=0.0052(m^4)$
 $\nu=0.3$
 $w=2.5(t/m^3)$

[부재 No. (9)]
 $E=2 \times 10^6(t/m^2)$
 $w=3.0(t/m^3)$

[부재 No. (10)]
 $E=2 \times 10^6(t/m^2)$
 $w=2.5(t/m^3)$

모드에서 Mode Shape 값을 비교함으로써 모드 기여도 계수를 구하는데 첫번째 모델에서는 끝단 가까이 있는 4개의 절점(절점번호 5, 6, 7, 8), 두번째 모델에서는 절점번호 1, 3, 5, 7의 상대적인 변위를 축점으로 선택하여 C_{12}, C_{21} 값을 구하고, 같은 방법을 이용하여 $C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$ 의 값을 계산하였다.

C_{12}, C_{21} 의 값만 사용할 경우, 사용가능한 방정식의 수는 5개가 되며, $C_{12}, C_{21}, C_{13}, C_{23}$ 의 값을 사용할 경우, 사용가능한 방정식의 수는 7개가 된다.

만약 예상 손상부재수를 4개로 가정하면 미지수보다 방정식이 많게 되므로 측정 및 계산상의 오차를 최소화하는 최적화 기법을 이용해 근을 구한다.

수렴정도를 통해 불때 모드 기여도 계수를 2개를 사용할때보다 4개를 사용할때 손상정도를 정확히 추정할수 있었다.(그림 3~그림 6)

모드 기여도 계수를 구하였다.

수치모의 실험은 본 연구의 정확성을 기하기 위하여 여러Case에 대해 실시하였으며 해석시 고려한 Data Conditions은 표 1과 같다.

3.1 모드 기여도 계수별 손상도 추정

임의의 부재에 인위적인 손상(강성의 30%)을 가한 뒤 고유치 해석을 하여 얻은 결과중 1, 2차

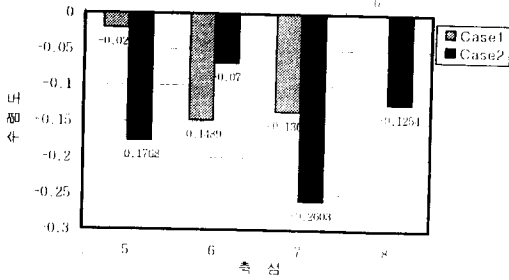


그림 3 모드기여도 계수별 손상도 추정(구조물 1)

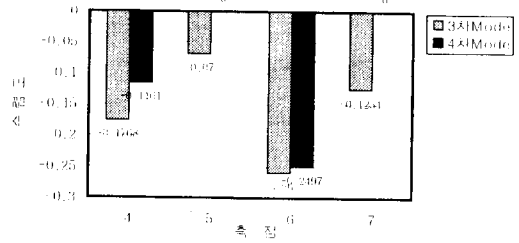


그림 7 구조물 손상부재의 위치 및 갯수에 따른 손상도 추정(구조물 1)

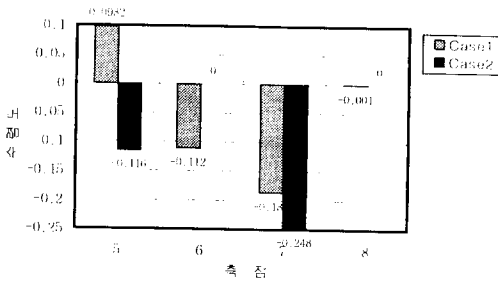


그림 4 모드기여도 계수별 손상도 추정(구조물 1)

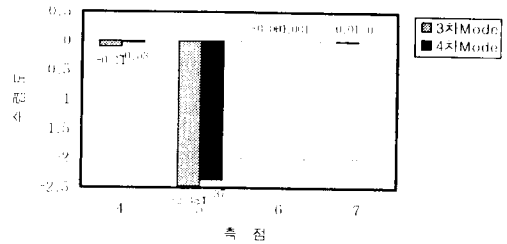


그림 8 구조물 손상부재의 위치 및 갯수에 따른 손상도 추정(구조물 1)

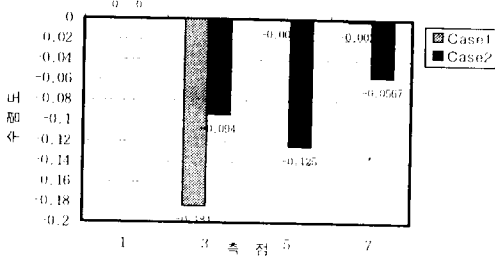


그림 5 모드기여도 계수별 손상도 추정(구조물 2)

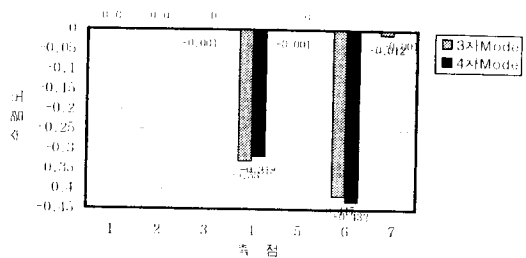


그림 9 구조물 손상부재의 위치 및 갯수에 따른 손상도 추정(구조물 1)

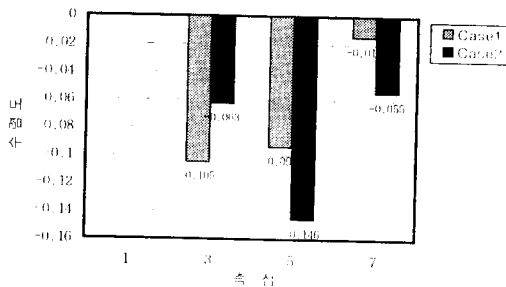


그림 6 모드기여도 계수별 손상도 추정(구조물 2)

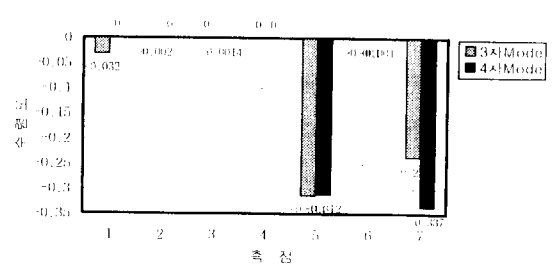


그림 10 구조물 손상부재의 위치 및 갯수에 따른 손상도 추정(구조물 1)

3.2 구조물 손상 부재의 위치와 갯수에 따른 손상도 추정

측정 가능한 진동수를 손상후 2차 모드까지 측정했을 때와 손상후 3차 모드까지 측정했을 때 모우드 기여도 계수 C_{12} , C_{21} , C_{13} , C_{23} 의 4개 값을 모두 사용할 경우에 구조물의 위치와 손상갯수를 바꿔 가면서 요소 손상도 값을 비교함으로써 손상 부재의 위치 및 갯수별 수렴 정도를 고찰한 결과, 구조물의 동특성 변화에 큰 영향을 주는 부재에 대한 추정 결과는 좋았지만, 동특성의 변화에 그다지 영향을 주지 않는 부재에 대해서는 전반적으로 결과는 좋지 않다는 것을 알 수 있다.(그림 7~그림 14)

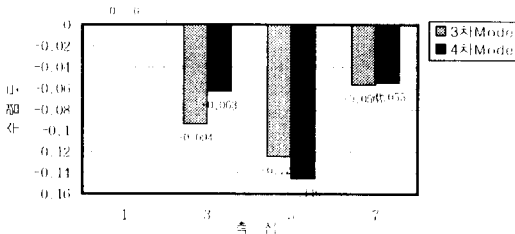


그림 11 구조물 손상부재의 위치 및 갯수에 따른 손상도 추정(구조물 2)

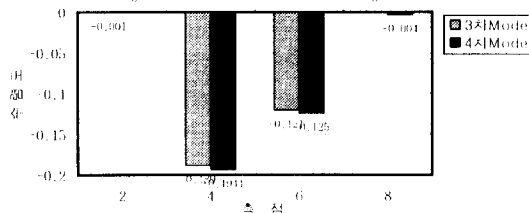


그림 12 구조물 손상부재의 위치 및 갯수에 따른 손상도 추정(구조물 2)

3.3 예상 손상부재수에 따른 손상도 추정

손상이 예상되는 부재수에 따라서 영향 행렬을 구성하여 수렴정도를 고찰 했다. Case1에서는 예상부재 4개를 선택하였으며, Case2에서는 예상부재 7개를 잡았다.

각각의 경우에 대해 수렴결과를 고찰한 결과,

예상 부재를 근사적으로 예측할 수 있다면 예상 부재수를 줄임으로써 계산을 보다 간편하게 할 수 있었다. 따라서, 정확히 예측할수있다면 예상 부재수에는 수렴정도가 크게 좌우되지 않는다.(그림 15~그림 18)

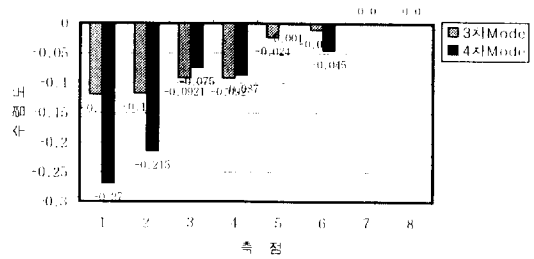


그림 13 구조물 손상부재의 위치 및 갯수에 따른 손상도 추정(구조물 2)

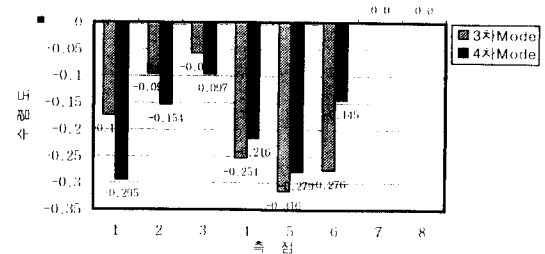


그림 14 구조물 손상부재의 위치 및 갯수에 따른 손상도 추정(구조물 2)

3.4 2차 Modal Perturbation항을 고려한 손상도 추정

Inverse Modal Perturbation식의 2차항을 고려한 경우의 요소손상도 추정결과를 1차항만을 고려한 경우와 비교함으로써 Inverse Modal Perturbation식의 2차항을 고려한 경우의 수렴 정도를 고찰하였다.

수렴정도를 고찰한 결과 2차 Perturbation 방정식에 대한 해의 수렴도는 1차 Perturbation 방정식 보다 더 정확히 수렴한다는 것을 알 수 있었다.(그림 19~그림 24)

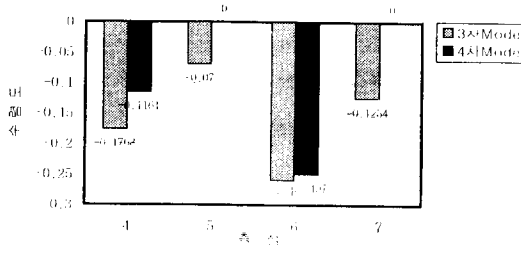


그림 15 예상 손상부재수에 따른 손상도 추정(구조물 1)

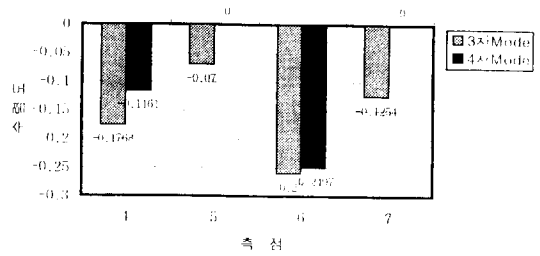


그림 19 2차 Modal perturbation항을 고려한 손상도 추정(구조물 1)

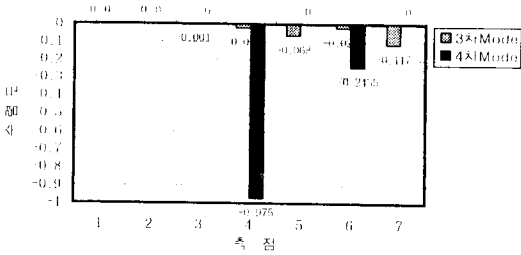


그림 16 예상 손상부재수에 따른 손상도 추정(구조물 1)

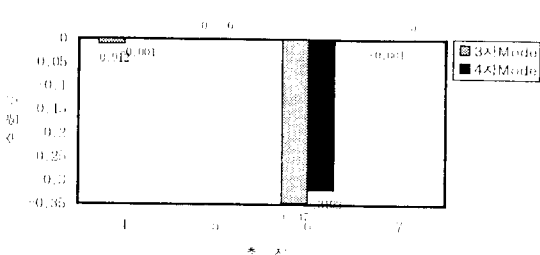


그림 20 2차 Modal perturbation항을 고려한 손상도 추정(구조물 1)

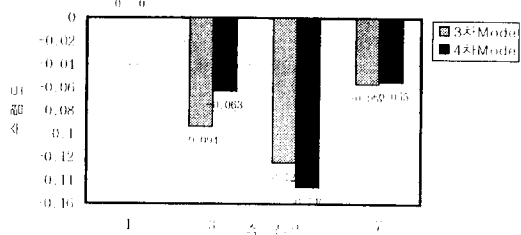


그림 17 예상 손상부재수에 따른 손상도 추정(구조물 2)

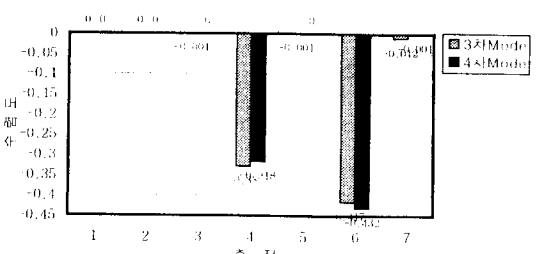


그림 21 2차 Modal perturbation항을 고려한 손상도 추정(구조물 1)

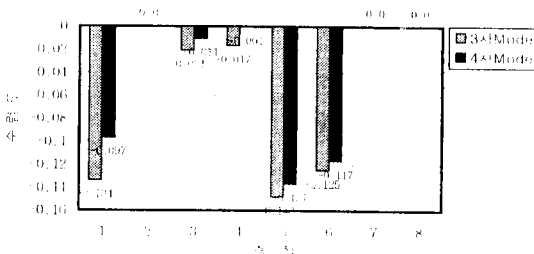


그림 18 예상 손상부재수에 따른 손상도 추정(구조물 2)

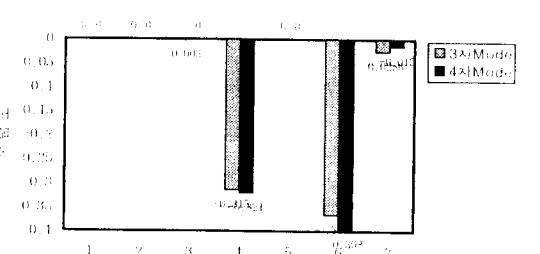


그림 22 2차 Modal perturbation항을 고려한 손상도 추정(구조물 1)

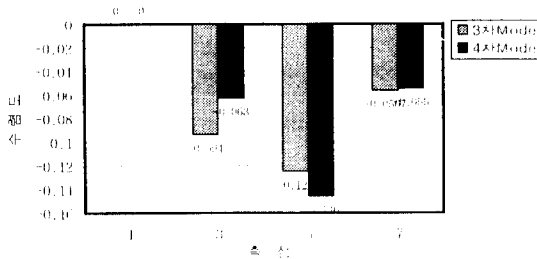


그림 23 2차 Modal perturbation항을 고려한 손상도 추정 (구조물 2)

4. 결 론

제한된 수의 측정자료를 사용하여 Inverse Modal Perturbation 방법을 이용하여 항만 구조물의 손상부위 추정에 관한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 모우드 기여도 계수를 2개를 사용할 때 보다 4개를 사용할 때 손상부위를 정확히 추정해 낼 수 있었다. 측정 자료가 불충분 할 수 있지만 최소 3차 모우드 이상 모우드 해석을 시행함으로써 정확성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 구조물의 동특성 변화에 큰 영향을 주는 부재에 대한 추정 결과는 좋았지만, 동특성의 변화에 그다지 영향을 주지 않는 부재에 대해서는 전반적으로 결과는 좋지 않았다.

그리고 대칭부재가 있는 경우 모우드 형상이 대칭 부재별로 같이 변화하기 때문에 손상을 입은 대칭면에도 요소 손상도가 거의 같은 값이 산출되었다.

(3) 예상 부재를 근사적으로 예측할 수 있다면 예상 부재수를 줄임으로써 계산을 보다 간편하게 할 수 있었다. 따라서, 정확히 예측할 수 있다면 예상 부재수에는 수렴정도가 크게 좌우되지 않는다.

(4) 2차 Perturbation 방정식에 대한 해의 수렴도는 1차 Perturbation 방정식 보다 더 정확히 수렴하였다.

(5) 항만구조물에서는 강성의 수렴도는 좋지 않았지만 어느 정도 손상부위 추정 할 수 있었다.

(6) 이론을 실제적으로 적용하는데 있어서 기존의 선박충격 및 접안 시험으로는 항만구조물의 정확한 가속도값을 얻기 힘들기 때문에 실험적인 연구가 체계적으로 이루어져야 하며 아울러 계규명

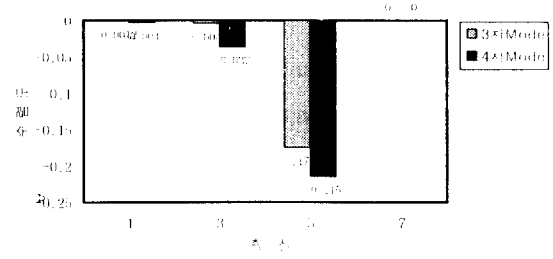


그림 24 2차 Modal perturbation항을 고려한 손상도 추정 (구조물 2)

방법인 SI에 관한 연구가 함께 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- Shinozuka, M., Yun, C-B., and Imai, H., "Identification of Linear Structural Dynamic Systems", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 108, No. EM6, 1982, pp. 1371-1390
- Hart, G. C., and Yao, J. T-P., "System Identification in Structural Dynamics", J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 103, No. EM6, 1977, pp. 1089-1104
- DiPasquale E., and Cakmak, A. S., "Detection and Assessment of Seismic Structural Damage, NCEER Technical Report NCEER-87-0015, Dept. of Civil Engineering, Princeton University, 1987
- Stetson, K. A., "Perturbation Method of Structural Design Relevant to Holographic Vibration Analysis", AIAA Journal, Vol. 13, No. 4, Apr. 1975
- Hoff, C. J., Bernitsas, M. M., Snadstorm, R. E., and Anderson, W. J., "Inverse Modal Perturbation Method for Structural Redesign-Frequency and Mode Shape Constraints", AIAA Journal, Vol. 22, No. 9, Sep. 1984
- 민 진기, "Inverse Modal Perturbation 기법에 의한 구조물 손상의 추정에 관한 연구", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1989
- 윤정방, 홍규선, "구조물 손상의 추정을 위한 Inverse Modal Perturbation 기법.", 대한토목학회 논문집, 1990.12
- 황우현, 장순철, "Matlab 활용", 높이깊이
- 황우현, 장순철, "Matlab 응용1", 높이깊이
- Matlab Optimize Toolbox Manual,