사장교의 상시감시를 위한 최적 센서 구성

Optimal Sensor Allocation of Cable-Stayed Bridge for Health Monitoring

허 광 희* 최 만 용**

Heo, Gwang-Hee Choi, Mhan-Young

Abstract

It is essential for health monitoring of a cable-stayed bridge to provide more accurate and enough information from the sensors. In experimental modal testing, the chosen measurement locations and the number of measurements have a major influence on the quality of the results. The choice is often difficult for complex structures like a cable-stayed bridge. It is extremely important a cable-stayed bridge to minimize the number of sensing operations required to monitor the structural system. In order to obtain the desired accuracy for the structural test, several issues must take into consideration. Two important issues are the number and location of response sensors. There are usually several alternative locations where different sensors can be located. On the other hand, the number of sensors might be limited due to economic constraints. Therefore, techniques such as methodologies, algorithms etc., which address the issue of limited instrumentation and its effects on resolution and accuracy in health monitoring systems are paramount to a damage diagnosis approach. This paper discusses an optimum sensor placement criterion suitable to the identification of structural damage for continuous health monitoring. A Kinetic Energy optimization technique and an Effective Independence Method are analyzed and numerical and theoretical issues are addressed for a cable-stayed bridge. Its application to a cable-stayed bridge is discussed to optimize the sensor placement for identification and control purposes.

keywords : Cable-Stayed Bridge, Structural Safety, Optimal Transducer, Kinetic Energy.

* 정회원, 건양대학교 전임강사

** 정회원, 한국표준과학연구원, 복임연구원

E-mail : heo@konyang.ac.kr 041-730-5302

* 본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2002년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

첨대사회에서 기간 건설 구조물의 역할이 증가함에 따라, 목적과 용도의 변화와 노후화에 따른 기능적, 구조적 결함으로 인한 대형재해의 가능성이 증가하였다. 대형재해를 예방하기 위하여 구조물의 건전도를 모니터하기 시작하였고, 이러한 모니터링을 위해 많은 연구가들에 의해 효과적인 시스템에 관한 연구가 있었다.[1-8] 이러한 모니터링은 주로 센서에서 데이터를 획득하고, 이들 데이터를 변환하여 구조물의 손상도 평가를 위한 데이터를 분석하는 과정으로 이루어진다. 이와 같은 과정에서 구조물에 부착된 센서로부터 데이터를 가져오는 일은 데이터 획득 시스템에 연결된 유선에 의존해왔고, 최근에는 무선연결을 이용한 원격모니터링시스템의 개발이 진행되고 있다. 또한 데이터를 중앙통제소에 보내기 위해 근거리 지역 네트워크 시스템을 사용하기도 한다. 어느 방법에서도 이러한 시스템은 다량의 데이터처리문제, 데이터의 정확도 등과 같은 문제를 갖고 있다.[2-9] 또한 이들의 모니터링 시스템은 일정한 양의 데이터와 정확한 데이터를 근거로 구조물의 동적특성의 변화를 구조물 훼손의 정도를 추정하는 기술에 이용하여 왔다. 그러므로 어느 위치에 얼마만큼의 계측기를 설치하느냐하는 것은 중요한 일이다.

이러한 시스템은 실시간 계측과 장기 계측이 용이하다는 장점 때문에 구조물의 상시감시 시스템에 활용되고 있으나 실질적으로 데이터를 처리하는 문제는 아주 수치 집약적이며, 수많은 반복 연산을 요구함으로써 감시정보의 질을 최대화하면서 계측기의 수량을 최소화하는 것은 상당히 중요한 일이다.[10-12] 이러한 문제를 해결하기 위해서 많은 연구가들이 산정오차멱등매트릭스 (Estimated Error Covariance Matrix (EECM))의 불변계수(Invariant)를 최소화하는 다양한 방법을 제안했다.[13-14] 그들 중에서 Kammer는 EECM을 이용하여 유효독립법(Effective Independence Method(EIM))을 공간독립(Spatial Independence) 개념을 적용한 새로운 기법으로 개발하여 공간 트러스 구조물에 주로 적용하였다. EIM은 신형 독립이 보장되고, 계측기의 위치의 선택에 있어서 연산이 아주 효과적이다. 그러나 낮고 좁은 간격의 고유 진동수를 소유한 대형 토목 구조물에서는 역시 구조물의 운동에너지(Kinetic Energy)를 최대화하여 계측기 셈을 최적화 하는 것이 높은 감쇠를 소유한 구조물의 손상을 찾는 일에 효과적일 것이라는 판단으로 구조물의 운동에너지의 원리에 의한 새로운 방법이 제시되었다.[21-24] 이 기법은 에너지를 최적화하는 기술(EOT)로써 구조물 시스템에서 측정된 운동에너지를 최대화함으로써 최적 모달 정보를 획득하는데 있다. EOT 알고리즘에서 사용되는 계측모드는 그의 독립성이 보장된다. 이러한 장점으로 장대형토목구조물에 적용되어 그 유용성이 입증되었다.[10-11]

이러한 두 가지 이론을 사장교 구조물에 적용하여 목적함수에 대응하는 선택된 변수(예, 고유치(값) 또는 고유벡터 등등)의 함수로써 Fisher 정보메트릭스 (Fisher Information Matrix)의 행렬식을 최대화하여 오차 메트릭스를 최소화하고 사장교 구조물의 변형 에너지를 극대화하는 계측기의 최적 위치의 알고리즘을 개발하는데 목적이 있다. 따라서 구조물 모니터링의 판정과 구조물의 손상 평가라는 목적을 전제로, 이들 알고리즘을 축소모형사장교에 적용하여 사장교의 구조적 특성이 고려된 사장교의 모니터링에 활용되도록 그 효용성을 입증하여 실용화 가능성을 제시하고자한다.

2. 최적계측위치에 관한 이론적 배경

2.1 유효독립법(EIM)

최적의 계측위치에 관한 문제는 처음에 대형 우주구조물의 효과적인 관리를 위해서 시작되었다. 많은 연구가들 중에서 Shah와 Udwadia 그리고 Udwadia와 Garba는 추정공분산(Covariance of Estimate)을 최소화시킴으로써 대상계측위치의 오차를 최소화하는 이론에 근거를 두고 최적계측문제에 접근했다.[15-18] 이 이론은 통계적인 개념을 바탕으로 추정공분산을 위하여 오차를 최소화 하도록 하는 이론으로 대응모달응답변수와 모달응답인자의 추정변수 차이를 기대치화하여 추정공분산의 오차를 다음 식 1과 같이 계산한다.

$$CoE = E[(q-\bar{q})(q-\bar{q})^T] = [\Phi_\mu^T R^{-1} \Phi_\mu] = Q^{-1} \quad (1)$$

여기서, q는 대응모달응답변수이고, $\bar{q}$는 모달응답 인자의 추정변수이다. 이때 Q는 Fisher 정보매트릭스이다. 이러한 이론적인 배경을 바탕으로 Kammer는 Fisher 정보매트릭스를 최대화함으로써 최적의 계측기의 위치를 선정하는 모달변수의 선형독립성을 유지하도록 다음 식 2와 같이 발전시켜 대형 우주트러스구조물에 적용하였다.

$$EI = \Phi_\mu [\Phi_\mu^T \Phi_\mu]^{-1} \Phi_\mu^T \quad (2)$$

여기서, Φ_μ는 정형화된 모드이며 식 2의 EI는 Φ_μ의 행에 의해서 분포된 직교 사영이며, 멱등원이다. 즉, 이 트레이스는 목적 모드의 수와 일치하는 이 매트릭스의 랭크와 같다. 따라서, 이 매트릭스의 대각선 값은 EI의 랭크로 각 센서의 기여도를 나타낸다.

2.2 최적운동에너지법(EOT)

구조물의 변형운동에너지를 극대화하여 최적계측 문제를 다루는 방법이 에너지 최적화 기술(EOT)로 EIM과는 상반된 개념으로 제안되었다.[11] 구조물 시스템에서 측정된 변형운동 에너지가 최대가 되는 동역학적인 모달정보를 획득하여 구해진 모드형의 선형독립성이 존재하는 고유시스템에서 최소의 에너지를 나타내는 지점을 순차적으로 제거함으로서 최적계측시스템을 구성한다. 일반적으로 구조물 시스템의 운동 에너지의 분포를 다음 식 3과 같이 정의하면,

$$KE = \Phi^T M \Phi \quad (3)$$

여기서, Φ는 측정된 모드형 벡터이다. 이때, 질량 매트릭스 M을 상삼각과 하삼각 매트릭스로 분해하여 각각 $\Psi = U\Phi$, 그리고 $M = LL$로 표현하면 감소된 측정인자의 구성시스템의 모드형의 Projection은 다음 식 4와 같이 표시된다.

$$\bar{\Phi} = \Pr ojection(\Phi)$$
$$\bar{\Psi} = \Pr ojection(\Psi) \quad (4)$$

이와 같은 특성으로 인하여 순차적으로 최소에너지를 함유한 계측기를 제거하여 최종 측정계측기를 선택하는 것은 구조물의 운동 에너지의 측정을 최대화할 수 있는 최소화된 계측기 구성을 찾도록 하기 위한 목적이다. 그러나 에너지 매트릭스가 랭크 빈약도를 일으키면 계측기를 더 이상 제거해서는 안 된다. 질량 매트릭스가 고려 될 때, $\overline{KE}$ 요소의 행 랭크, N은 $\bar{\Phi}$ 매트릭스에서 선형 독립된 사영 벡터의 수와 같다. 따라서 에너지 매트릭스 자신의 고유치 Λ와 고유벡터 Ψ를 고려하면 $\overline{KE}$가 N의 크기를 가진 사각 대칭 양치행렬이기 때문에, EOT의 각각의 연산 절차에서 구하는 고유쌍의 연산은 크게 문제가 되지 않는다. 그러므로 각각의 잔여 계측기의 기여도는 다음 식 5와 같이 EOT 벡터로 나타낼 수 있다.

$$EOT = \sum_{i=1,\dots,m} [\bar{\Psi}\Psi\Lambda^{-\frac{1}{2}}]^2 \quad (5)$$

EOT 벡터는 추정된 모드형이 선형 독립이므로 다음 식 6과 같은 직교 벡터를 이루어야한다.

$$[\bar{\Psi}\Psi\Lambda^{-\frac{1}{2}}]^T [\bar{\Psi}\Psi\Lambda^{-\frac{1}{2}}] = I \quad (6)$$

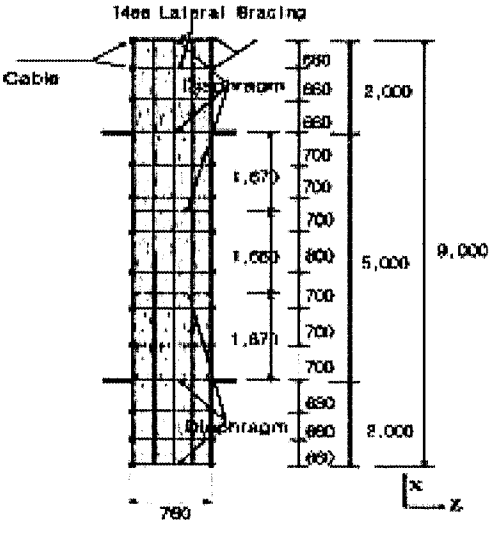
이 방법의 장점 중의 하나로 정규화 계수, $\Lambda^{-\frac{1}{2}}$는 높은 모드의 기여도가 낮은 모드의 기여도를 지배하려는 성향을 제지하므로써 균등한 기회를 준다. 또한 이론적으로 볼 때 남아 있는 계측기의 수는 구하고자 하는 모드의 수와 같다. 그러나, 랭크의 수는 종종 실험 데이터에 잡음이나 기타의 문제로 인하여 구하고자 하는 모드 수보다 많이 사용하는 것이 일반적이다.

3. 사장교모형 설계 및 해석

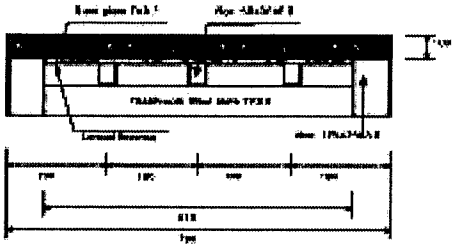
3.1 사장교모형 선정 배경 및 설계

일반적으로 사장교는 구조적인 다양한 특성을 가지고 있다. 이러한 이유들 중에 동적특성 인자에 영향을 주는 대표적인 요소는 비틀림 상수와 뒤틀림 상수에 의한 비틀림 강성(즉, 순수비틀림 강성 + 뒤틀림 강성)과 등가탄성계수가 고려된 케이블의 비선형성과 구조물의 경계조건 등이 대표적인 특성이다.[16,17] 이러한 특성을 최대한 고려하여 본 연구의 목적에 부합하도록 모형교량이 설계되고 제작되었다. 따라서 이와 같은 사장교의 동적인 특성으로는 낮은 대역의 고유치와 좁은 간격 사이에서의 고유벡터를 보여준다.[5,11] 이것은 구조물이 동적 거동에 있어서 비선형성을 내포한 구조적 여분성과 너비와 폭의 장비가 주는 낮은 유연도가 원인일 것이다. 그러므로 본 연구에 적용된 구조물의 설계의 과정은 I-DEAS(SDRC)의 수치적인 동적 모형 실험(Dynamic Simulation)을 통한 반복적인 시행으로, 0 - 100Hz 이내에 10개의 모드가 뜰 수 있도록 구조물을 설계하였다.[12-15] 동시에 비틀림 강성 또는 케이블의 비선형성에 관한 기하학적 변수, 즉, 구조물의 길이, 폭, 보의 크기 또는 구성, 상판 슬래브의 두께, 경계 조건 등을 시행착오와 일부 시방서의 기준에 의거하여 목표로 하는 고유 진동수와, 모드형을 얻을 때까지 실시되었다. 제작 관리 측면에서 이 연구의 주목적인 최적 계측기의 문제를 다루기에 충분한 선에서 교량의 복잡성의 한계를 제한하였다. Fig. 1의 모형사장교는 주경간이 5m이고, 양쪽의 측경간이 각각 2m, 교량의 폭은 0.76m로 설계하였다. 이는 전형적인 3경간 구조의 사장교 설계에 대한 경간비 0.4L+1.0L+0.4L(L:주경간의 길이)을 적용한 것이다[18]. 다음으로, 케이블은 사장교에 있어서 주된강재로 압축에 대한 저항을 무시할 수 있기 때문에 역학적으로 케이블과 유사한 거동을 할 것으로 기대되는 강봉(Rod)을 사용하여 각각 한 면에 3개의 강봉으로 지지되도록 하였으며, 그 직경의 크기(1Ø)는 주경간의 1/4을 한쪽 면의 케이블(3개의 강봉)이 지지할 수 있도록 결정하였다. 또, Box형 각관으로 구성된 주형은 자중(상부 콘크리트를 포함하여 2등고 차선하중 DL18의 1차선 분의 하중을 적재하중으로 도입하여 휨 응력과 주경간의 최대 처짐이 사장교의 허용 최대 처짐을 넘지 않도록 단면을 결정하였다[19]. 마지막으로 주탑의 설계는 활하중에 의한 편재하와 더불어 장 경간과 단 경간의 사하중에 의한 불균형을 고려하여 단면의 1/4의 하중을 고려함과 동시에 충격하중을 고려하여 처짐이 최소화 되도록 설계하였다. 이때 주탑에 대한 허용 처짐량의 계산은 캔틸레버보의 허용 최대 처짐량을 적용하였다. 다음 Fig. 1 (b), (c) 와 (d)은 각각 모형 사장교의 전체적인 형태와 단면 상세도이다.

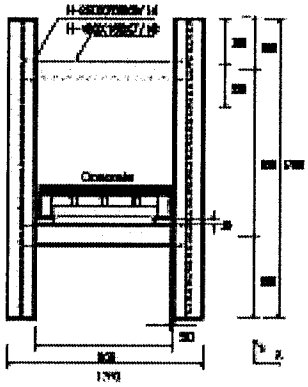
(a) 사장교모형



(b) 교탑 상관



(a) 교량 상판의 횡단면 상세



(b) 주탑의 외형

Fig. 1 사장교 모형(단위 : mm)

3.2 사장교의 해석을 위한 모델링

본 모형 사장교의 동특성을 파악하기 위해 FE의 요소의 특성을 Table 1과 같이 선택하였다. 모형 교량의 상판은 상부의 콘크리트에 의한 영향을 고려하기 위해 각각 재료(콘크리트와 강재)의 성분을 고려한 등가의 환산단면적을 다음 식 7과 같이 계산하여 적용하였다.

$$\rho_{tr} = \frac{A_m \rho_m + A_s \rho_s}{A_{tr}} \qquad (7)$$

여기서, ρ_{tr} : 환산단면의 밀도, ρ_m : 콘크리트의 밀도, ρ_s : 강재의 밀도, A_m : 콘크리트의 단면적, A_s : 강재의 단면적, A_{tr} : 환산단면적

Table 1 FE 해석에 도입된 요소의 특성

Element Type	Mts	No. of Elms.	Mass Density $kgf \cdot sec^2/mm^4$
1D Beam	GIS	312	7.97×10^{-10}
2D Shell(Top plate)	TS	260	1.97×10^{-9}
1D Bar(Rod)	GIS	24	7.97×10^{-10}
2D Shell (Tower & Stiffner)	GIS	484	7.97×10^{-10}

Mts : Materials, GIS :Generic Isotropic Steel,
TS : Transformed Steel, Elms : Elements

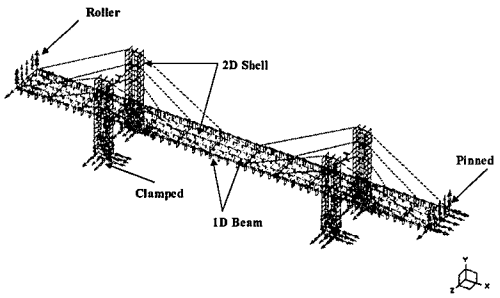
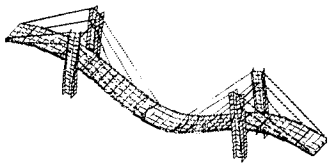


Fig. 2 사장교 모형의 유한요소 모델링

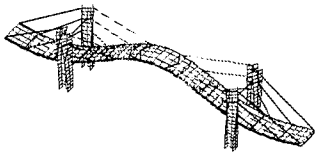
또한 상판을 너무 많은 요소로 분할하여 해석할 경우 구조물의 전체적인 거동이 상부 플레이트 자체의 진동모드에 의해 결정될 가능성을 배제하기 위해 4절점 쉘(Shell)요소를 사용하였다. 본 FE 모델은 총 1080개의 요소와 875개의 절점으로 구성하였고, 상판과 주탑의 연결은 일체로 거동한다고 가정하였다. Fig. 2는 이러한 특성을 고려한 유한요소 모델링을 나타낸다. Fig. 3은 이 모델의 해석결과로써 대체로 모드형은 복합된 혼합형이나, 주로 굽힘모드과 비틀림모드에 지배를 받는 다양한 모양을 보인다.

3.3 FE 자유도와 계측 자유도의 일치

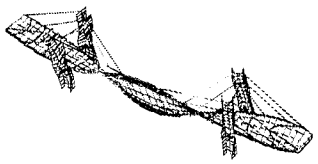
일반적으로 구조물의 수치적인 동적 해석 방법는 SVI(Simultaneous Vector Iteration), 가이언 소거법(Guyan Reduction, GR), Lanzcos 등이 있다.[20] 본 연구에서는 SVI법을 적용하여 동적해석을 했으며, 동시에 가이언 소거법을 적용하여 실계측시에 계측위치의 일치를 위하여 부재요소의 자유도를 응축



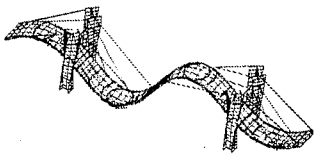
(a) 1차 휨 모드(21.92Hz)



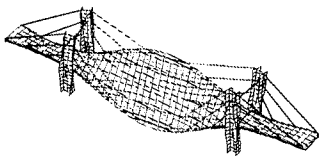
(b) 2차 휨 모드(24.69Hz)



(c) 1차 비틀림 모드(30.27Hz)



(d) 3차 휨 모드(37.93Hz)



(e) 2차 비틀림 모드(38.09Hz)

Fig. 3 시잡교 모델의 유한요소 해석 결과

하였다. 이 방법은 제거된 자유도를 제거하지 않고 남아있는 자유도에 응축시키서 식 8과 같이 응축된 강성, 질량 매트릭스를 구성하여 구조물의 고유치 해석을 수행하는 방법이다. 그러므로 원하는 계측점을 선정하여 자유도를 응축함으로서 실제 계측점과 일치를 시키는 기법이다. 따라서 이 기법을 적용하여 대형 FE 모델이 가지고 있는 자유도(Degree of Freedom)의 수를 감소시켜 적은 수의 자유도로 시스템을 최적화하여 효과적인 동적 해석이 가능하고 계측 데이터와 상호 비교평가에 적용된다.

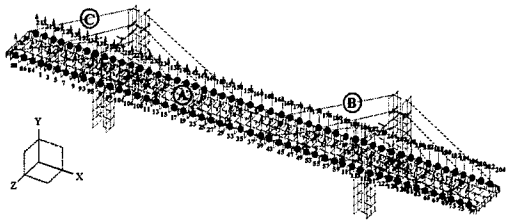


Fig. 4 후보 대상 계측 센서 위치집합 (102개)

$$
\begin{aligned}
K_r &= K_{rr} - K_{ro}K_{oo}^{-1}K_{ro}^{T} \\
M_r &= M_{rr} - M_{ro}K_{oo}^{-1}K_{ro}^{T} - K_{ro}K_{oo}^{-1}M_{ro}^{T} \\
&\quad + K_{ro}K_{oo}^{-1}M_{oo}K_{oo}^{-1}K_{ro}^{T}
\end{aligned} \tag{8}
$$

여기서, 각각 첨자 r : 남아있는 자유도(retained set), o : 생략된 자유도(omitted set) 이다.

4. 최적 계측 센서이론의 수치적 검증

구조물의 모니터링의 관점과 구조물의 손상 평가에 적용해야하는 독수성과 EIM과 EOT의 이론적인 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 모형사장교의 상판의 연직방향 거동을 계측 대상으로 선정하였다. 따라서, Fig. 4와 같이 총 102개의 후보대상의 계측점을 선정하여 5개의 초기 고유모드가 이 두 개의 알고리즘에 적용되었다. 특히, EIM은 순수 정형화된 모드가 적용되었고, EOT는 가이엔 소거법에 의해 계산되어진 정형화된 상삼각 직광 행렬(102x102)이 사용되었다. EIM과 EOT는 각각 Fisher 정보매트릭스와 에너지 매트릭스가 랭크 민약도를 입으킬 때까지 후보 위치가 독립적으로 제거되어 30개의 후보가 남을 때까지 실행되어 다음절의 효용성 평가에 활용된다. 이 두 가지 방법 모두 같은 후보 계측기의 수와 위치에서 시작한다. 또한 기여도가 적은 계측기를 찾기 위해서 선형독립성을 유지하며 매회 최적 기여 계측기를 제거하기 위하여 초기 값의 상대적 백분율로 계산된 Fisher 정보매트릭스와 에너지매트릭스의 행렬식(Determinant)이 사용된다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 이 결과 두 방법 모두 초기 단계에서 아주 안정적인 변화를 보이나 계측기 수가

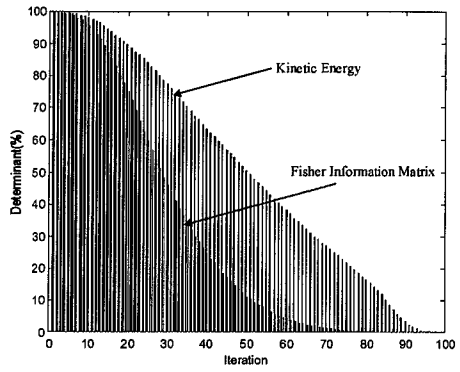


Fig. 5 Fisher 정보매트릭스와 운동에너지의 행렬식

점점 감소하여 약 20%이하의 계측기가 됨 때부터는 EOT가 단연 우월한 모델 정보를 보여주고 있다. 특히, 70%미만이 되면서부터는 Fisher 정보매트릭스는 거의 5%미만의 구조물에 관한 정보로써 사실상 실제 계측데이터로부터 모니터링과 손상평가에 적용이 불가능함을 보여준다.

5. 최적계측이론의 효용성 검증

5.1 손상평가를 위한 유연도법

구조물의 거동으로부터 계측된 유연도의 변화는 구조물의 손상을 평가하기 위한 방법 중의 하나로 많은 연구가들에 의해서 활용되어왔다.[5] 계측된 유연도 매트릭스는 정형화된 모드형과 고유주기의 함수로서 다음 식 9와 같이 정의 할 수 있다.

$$[F]=[\Phi][\Lambda]^{-1}[\Phi]^{T} \tag{9}$$

사실 정적인 유연도는 정적인 강성도의 역수이므로, 유연도 매트릭스는 작용하중과 상응하는 변위의 관계를 다음 식 10과 같이 갖고 있다.

$$\{U\}=[F]\{P\} \tag{10}$$

그러므로, 유연도 매트릭스의 각 열은 관련된 자유도에 작용되어진 단위하중과 상관된 변위의 패턴을 나타낸다. 따라서, 손상을 평가하기 위한 방법으로 손상 전후 구조물의 유연도를 비교하는 것은 고유진동수의 역수관계로 인하여 최초, 혹은 낮은 고유모드형에 지배되기 쉬운 문제가 있다.

5.2 손상평가를 위한 강성도법

일반적인 구조물의 강성도는 다음 식 11과 같다.

$$[S]=\int[B]^{T}[E][B]dv \tag{11}$$

즉, 형상함수[B]와 탄성 매트릭스[E]의 함수이다. 구조물의 손상이란 일반적으로 이와 같은 강성의 저하를 나타내며, 그로 인한 기능적인 저하 또는 붕괴의 현상을 초래한다. 본 연구에서는 FE 해석에서 가이인 소거법에 의해 계산된 강성 저하를 절대계수의 비교에 의해서 활용된다.

5.3 손상평가를 위한 MAC의 활용

힘덕을 받는 일반구조물이 힘으로 인한 변형(ε)과 곡률($\kappa=1/\rho$, 여기서 ρ는 곡률반경)의 관계는 $\varepsilon=\kappa y$로 곡률의 변화가 구조물의 탄성에너지의 변화 량이므로 많은 연구가들이 직접 계측된 변위나 가속도로부터 이들의 상호관계를 유도하여 고유변수 또는 고유모드라 하여 모델정보의 충실도를 확인하는 방법으로 구조물의 손상 여부를 판단하는 근거로 삼았다.[5] 이러한 모델정보를 비교하는 수단은 MAC (Modal Assurance Criterial)을 사용하였다. 이 방법은 효과적인 두 세트의 모드형의 데이터를 수치적으로 비교 분석하는 방법으로 가끔 모델상관계수(Correlation Coefficient)라고도 불리며, 다음과 같은 식 12와 같이 정의된다.[7]

$$MAC(i,j)=\frac{\left|\sum_{k}(\Phi^{a})_{ik}(\Phi^{x})_{jk}\right|^{2}}{\left(\sum_{k}(\Phi^{a})_{ik}(\Phi^{a})_{ik}\right)\left(\sum_{k}(\Phi^{x})_{jk}(\Phi^{x})_{jk}\right)} \tag{12}$$

여기에서 위첨자 a는 이론적 데이터를, 위첨자 e는 실험적 데이터를 나타낸다. 그러나, MAC은 서로 다른 두 Set의 실험, 혹은 같은 실험 데이터의 직교성(Orthogonality)을 검증하는데 사용되기도 한다. 만일에 두 모드가 같다면 MAC은 1을 보이고, 같지 않고 전혀 관련이 없으면 0을 나타낸다. Ewins는 그의 연구에서 상호관련된 모드는 보통 0.9의 수치를, 비관련된 모드는 0.005 정도의 수치를 보인다고 지적하였다.

5.4 원형 구조물과 손상 구조물

하중저하 능력의 감소를 구조물의 손상에 관한 정의로 가정하여 Fig. 4에 보여준 특정한 케이블 A, B, C를 제거함으로써 손상을 유도하였다. 이는 사장교의 특성을 살리고, 손상을 구조물의 비대칭성과 유연도 및 강성도의 저하로 인한 최소의 동적인 특성의 변화를 유도하는데 목표를 두었다.

5.5 최적 계측위치 선택

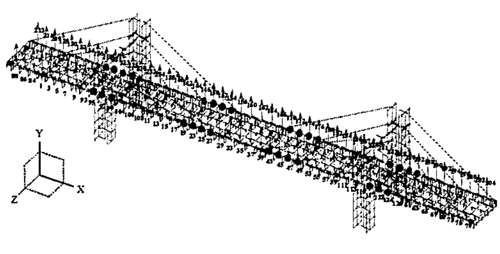
다음 Fig. 4와 같이 가이안 감소법을 적용하여 총 102개의 자유도를 대상후보로 선정하였다. 이 102×102의 자유도를 既知의 해(Known Solution)로 사용한다. 또한 각각의 이론에 의해서 Fig. 6과 같이 선택된 최종 30개의 최적계측위치가 손상평가에 적용된다. 손상을 비교평가하기 위하여 강성도와 유연도의 변화를 이용하고, 또한 MAC을 통하여 각각의 모드의 차이를 수치적으로 비교평가 한다. 최종적으로 각각의 최적계측법에서 선정한 계측위치에서 회득한 총 변형운동에너지를 비교함으로써 모형사장교의 최적계측위치의 유용성과 각 방법의 장단점을 분석, 평가하고 모니터링과 구조물의 손상평가 및 손상위치를 위한 효용성을 제시한다. 또한 각각의 이론에 의해서 선택된 최종 30개의 최적계측위치가 손상평가에 적용된다.

5.6 결과의 분석 및 평가

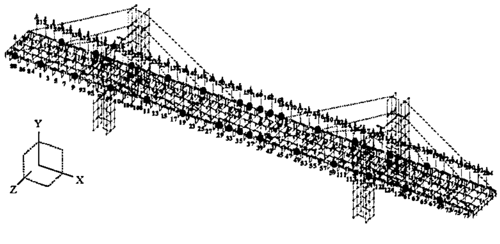
Table 2는 EIM과 EOT에 의해 선택된 30개 센서의 절점과 실제 분석에 사용된 자유도의 번호와의 상관관계를 보여준다. 실제로 결과분석에 사용된 번호는 Table 2에 나타낸 열(Row)의 번호이다.

먼저 유연도의 차이를 보면 주어진 EIM과 EOT의 이론에 따라 선택된 위의 30개의 계측기 위치에서 유연도의 차를 절대 비교를 하여 계산한 결과가 Fig. 7이다. 두 방법 모두 손상에 따른 확연한 결과를 보여주었으나 계측기의 무작위성으로 인하여 정확한 위치를 보이기보다는 손상의 정도를 알리는 양을 이해하는데 만족한 결과를 보였다.

두 번째로 강성도의 차이는 두 가지 방법 모두 Fig. 8과 같이 교량의 손상 부근에 정확한 손상도를 보여준다. 그러나 EIM은 손상주변에 분포된 모호한 결과를 보여준다. 이는 손상위치와 계측기의 위치의 불일치로 인한 결과이다. 이에 비하여 EOT는 분명히 균등한 계측기가 변형 에너지의 분포에 따라 고루 분포되었고, 그 결과 명확한 손상도를 보여주었다.



(a) 5번째 진동형태까지 고려(EIM)

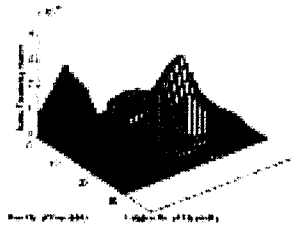


(b) 5번째 진동형태까지 고려(EOT)

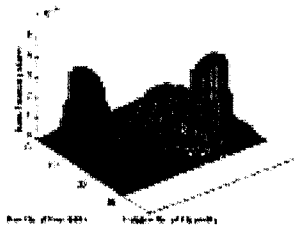
Fig. 6 모형 사장교의 최적 계측 센서 위치

Table 2 최적 계측 센서 위치와 절점의 번호

Row	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
EIM	19	22	25	27	43	45	47	49	96	97	99	117	122	131	146
EOT	1	9	11	19	29	32	35	37	39	49	59	61	69	88	99
Row	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
EIM	150	152	154	170	172	174	176	219	221	223	225	243	245	250	252
EOT	117	125	136	138	145	156	160	162	164	166	176	196	155	225	245

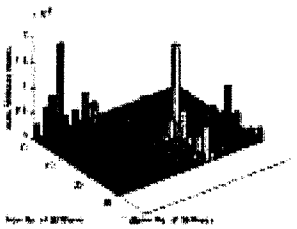


(a) EIM

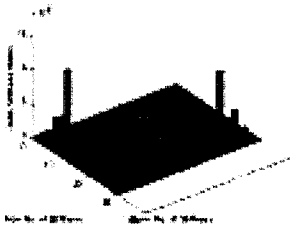


(b) EOT

Fig. 7 유연도의 차이



(a) EIM



(b) EOT

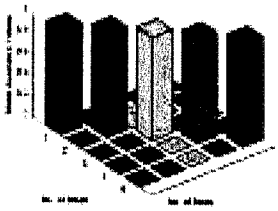
Fig. 8 강성도의 차이

Table 3 EIM에 대한 MAC에 의한 비교

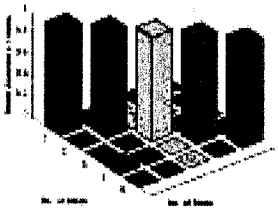
Mode	1	2	3	4	5
1	0.9984	0.0002	0.0002	0.0006	0.0000
2	0.0009	0.9970	0.0013	0.0023	0.0002
3	0.0001	0.0003	0.9969	0.0000	0.0004
4	0.0050	0.0003	0.0002	0.9987	0.0002
5	0.0005	0.0000	0.0001	0.0000	0.9973

Table 4 EOT에 대한 MAC에 의한 비교

Mode	1	2	3	4	5
1	0.9977	0.0002	0.0003	0.0165	0.0001
2	0.0009	0.9970	0.0018	0.0001	0.0005
3	0.0001	0.0004	0.9974	0.0003	0.0000
4	0.0316	0.0001	0.0000	0.9984	0.0001
5	0.0004	0.0001	0.0002	0.0022	0.9783



(a) EIM



(b) EOT

Fig. 9 MAC에 의한 진동형 오드의 비교

Table 3과 4에서, 그리고 Fig. 9에서 EIM과 EOT의 MAC을 통한 결과를 보여준다. 이 결과에서 EIM과 EOT 모두 첫 4개의 모드는 좋은 상관관계를 보이나, 마지막 모드만 약간의 빈약한 관계를 보인다.

이는 실질적으로 구조물에 심각한 기능적인 손상이 없기 때문으로 보인다.

6. 결 론

구조물의 모니터링을 위해 구조물의 성능저하를 실시간으로 계측하기 위한 사장교의 최적계측문제를 위하여 EIM과 EOT의 이론적인 특성을 모형사장교에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 우선 FE해석에서 사용한 무한한 자유도를 계측의 자유도와 일치하도록 Guyan Reduction방법을 응용하여 불필요한 자유도와 잔여 자유도의 요소로 응축하여 대형구조물에 계측위치 선정에 응용법을 제시하였다.
2) 사장교의 특성이 감안된 총 변형에너지의 변화의 계측은 MAC실험의 결과 두 방법 모두 양호한 에너지의 변화를 보였다.
3) 그러나 사장교의 구조적인 특성을 고려한 계측위치를 최소화하여 모니터링이 가능하도록 하기 위한 강성도와 유연도의 변화에서 EOT가 유리함을 보였다.
4) 장기계측에서 데이터의 감소를 위한 모델정보실험에서는 단연 EOT가 유리함을 보였다. 특히 약 20% 이하의 계측기가 될 때부터는 EOT가 단연 우월함을 나타내었다.

이 논문은 1999년도 학술진흥재단의 연구비에 의하여 연구되었음. (과제번호: KRF-99-E00563) 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 학술진흥재단에 대단히 감사합니다. 또한 부분적인 한국표준과학연구원의 연구비 지원에 감사합니다.

참 고 문 헌

1. 조선일보, 1994. 제 22838호, Korea.
2. 조효남, "대형교량의 유지관리를 위한 계측, 모니터링, 콘제시스템개발," 한국과학재단, HOSEF 과제번호 : 961-1203-011-2, 1998.
3. 현대건설(주) 기술연구소, "남해대교 계측보고서-초기치 설정을 위한 재하실험", 1997.
4. 건설도서편집국, "세이콴 교량의 계획과 설계," 도서출판 건설도서, 1983.
5. 건설교통부, "도로교 표준시방서,"대한토목학회, 1996.
6. Alampalli S and Fu G 1994 Remote bridge monitoring system for bridge condition Engineering Research and Development Bureau. New York State Department of Transportation Report 70.
7. Ballard C M and Chen S S 1996 Automated remote monitoring of structural behavior via the Internet SPIE 3rd Annu. Smart Structures and Materials Conf. (San Diego, 1996).
8. D. J. Pines and P. A. Lovell, "Conceptual Framework of Remote Wireless Health Monitoring System for Large Civil Structures," Smart Material and Structures, Vol. 7, No. 5 pp. 627-633, 1998.
9. M. L. Wang and G. Heo, and D. Satpathi, "A Health Monitoring system for large Structural Systems," Smart Material and Structures, Vol. 7, No. 5, p. 627-633, 1998.
10. M. L. Wang and G. Heo, and D. Satpathi, "Dynamic Characterization of a long Span Bridge : A Finite Element Based Approach," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 16, pp. 503-512, 1997.
11. G. Heo, M. L. Wang and D. Satpathi, "Optimal Transducer Placement for Health Monitoring of Long Span Bridge," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 16, pp. 495-502, 1997.
12. Kammer, D. C., "Effect of Model Error on Sensor Placement for On-Orbit Modal Identification of Large Space Structures," Journal of Guidance, Control, and Dynamics Vol. 15, No. 2, 1992.
13. Gwanghee Heo, "An Automated Health Monitoring System for Large Civil Structural System," Ph.D. Dissertation, University of New Mexico, 1997.
14. Udwadia, F. E., "Methodology for Optimum Sensor Locations for Parameter Identification in Dynamic Systems," J. of Eng. Mech., Vol. 120, No. 2, pp. 368-387, February, 1994.
15. Shah, P. C., and Udwadia, F. E., "A Methodology for Optimal Sensor Locations for Identification of Dynamic Systems," Transactions of the ASME, Vol. 45, pp. 188-196, March 1987.

16. Udwadia, F. E.,J. A. Garba "Optimal Sensor Locations for Structural Identification." JPL Proceeding of the Workshop on Identification and Control of Flexible Space Structures. pp. 247-261. April 1985.
17. Wilson, J. C., and Gravelle, W., "Modelling of a Cable-Stayed Bridge for Dynamic Analysis." Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 20. 707-721. 1991.
18. Chang S-P and Kim S 1996 Online structural monitoring of a cable-stayed bridge SPIE 3rd Annu. Smart Structures and Materials Conf. (San Diego, CA. 1996).
19. Doebling S W, Farrar C R, Prime M B and Shevitz D W 1996 Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS.
20. K. J. Bath, "Finite Element Procedures.", Prentice Hall, 1996.

(접수일자 : 2001년 6월 2일)