

롤러코스터의 모니터링을 위한 최적 센서 구성

Optimal Sensor Allocation for Health Monitoring of Roller-Coaster Structure

허 광 희¹⁾

전 승 곤^{2)*}

박 인 준³⁾

Heo, Gwang Hee

Jeon, Seung Gon

Park, In Joon

Abstract

This research aims at the optimal constitution of sensors required to identify the structural shortcoming of roller-coaster. In this research we analyzed the dynamic characteristics of roller-coaster by three dimensional FE modelling, decided on the appropriate location and number of sensors through optimal transducer theory, abstracted the mathematical value of modal features before and after damage on the basis of optimally placed and numbered sensors, and then presented it as a primary information about the basic structure which would be applied to damage estimation. As a target structure, the roller-coaster at Seoul Children's Grand Park was chosen and built as a model reduced by one twentieth in size. In order to consider the Kinetics features particular to the roller-coaster structure, we made an exact three-dimensional FE modelling for the model structure by means of Spline function. As for the proper location and number of sensors, it was done by applying EIM and EOT. We also estimated the damage from the combination of strength, flexibility, and model corelation after abstracting the value of modal features. Finally the optimal transducer theory presented here in this research was proved to be valid, and the structural damage was well identified through changes in strength and flexibility. As a result, we were able to present the optimal constitution of sensors needed for the analysis of dynamic characteristics and the development of techniques in dynamic characteristics, which would ultimately contribute to the development of health monitoring for roller-coaster.

Keywords : Roller-coaster, Optimal sensor location, Effective independence method(EIM), Kinetic energy optimization technique(EOT), Guyan reduction

1. 서론

대형놀이시설구조물은 삶의 질과 여가활동에 대한 인식이 크게 향상되면서 연중 상시적으로 운영되고 있으며, 그 사용 빈도 또한 지속적으로 상승되고 있는 추세이다. 그러나 이와 같은 구조물은 외부 환경에 직/간접적으로 노출되어 시간이 지남에 따라 발생하는 노후화로 인하여 본래의 구조적인 기능과 성능이 저하 혹은 소실되어, 결국 구조물의 안전성 결여 및 내구수명의 단축 등의 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 구조물의 건전성을 평가하기 위해서 특정 부위의 손상평가 및 전체 구조물의 안전을 모니터링 하는 연구가 활발히 수행되고 있다. 최근 전기, 전자, 통신, IT 그리고, 계측기술의 도움으로 실시간으로 구조물의 건전성을 평가하고 결함을 검출하기 위하여 다양한 연구들이 소개되고 있다(조선일보, 1994;

Alampalli et. al, 1994; Ballard et. al, 1996; Chang et. al, 1996; Doebbling et. al, 1996; 조효남, 1998; 현대건설(주), 1997; Pines et. al, 1998). 이러한 모니터링은 주로 센서에서 데이터를 획득하고, 이들 데이터를 변환하여 구조물의 건전도를 평가하기 위한 데이터로 변환되어 분석하는 과정으로 이루어진다. 이 과정에서 구조물에 부착된 센서로부터 데이터를 획득하기 위해서는 유선계측시스템이나 무선계측시스템을 이용한 원격모니터링시스템의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로 구조물에 부착된 센서로부터 계측된 데이터는 중앙통제소로 보내기 위해 근거리 지역 네트워크 시스템 또는 무선 송수신 시스템을 사용하기도 한다. 어느 방법에서도 이들의 시스템은 다량의 데이터처리, 데이터의 정확도 등이 성공적인 모니터링 시스템을 위한 주요한 문제이다(Alampalli et. al, 1994; Ballard et. al, 1996; Chang

1) 정희원, 건양대학교 건설시스템공학과 교수

2) 학생희원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

3) 정희원, 한서대학교 토목공학과 교수

* Corresponding author : gonylife@hanmail.net 041-734-5302

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

et. al, 1996; Doebbling et. al, 1996; 조효남, 1998). 따라서 이들의 모니터링 시스템은 일정한 양의 데이터와 정확한 데이터를 근거로 구조물의 동적특성의 변화로부터 구조물 훼손의 정도를 측정하고 있다. 그러므로 어느 위치에 얼마만큼의 계측기를 설치하느냐 하는, 최적 센서의 구성은 중요한 일이다

또한, 실시간 계측과 장기 계측을 하는 구조물을 모니터링 시스템은 실질적으로 데이터를 처리하는 문제가 아주 수치 집약적이며, 수많은 반복 연산을 요구한다. 따라서 감시정보의 질을 최대화하면서 계측기의 수량을 최소화하는 것은 실시간 모니터링에서 상당히 중요한 일이다 (Wang et. al, 1997-1998, Heo et. al, 1997; Kammer et. al, 1992). 이러한 문제를 해결하기 위해서 많은 연구자들이 산정오차 분산행렬(Estimated Error Covariance Matrix (EECM))의 불변계수(Invariant)를 최소화하는 다양한 방법을 제안했다(Kammer et. al, 1992, Udwadia, 1994). 그들 중에서 Kammer(1992) 등은 EECM을 이용하여 유효독립법(Effective Independence Method (EIM))을 공간독립(Spatial Independence) 개념을 적용한 새로운 기법으로 개발하여 공간 트러스 구조물에 주로 적용하였다. EIM은 선형 독립이 보장되고, 계측기의 위치의 선택에 있어서 연산이 아주 효과적이다.

한편 낮고 좁은 간격의 고유 진동수를 갖는 대형 구조물에서는 역시 구조물의 운동에너지(Kinetic Energy)를 최대화하여 계측기 구성을 최적화 하는 것이 높은 감쇠를 소유한 구조물의 손상을 찾는 일에 효과적일 것이라는 판단으로 구조물의 운동에너지의 원리에 의한 새로운 방법이 제시되었다(Wang et. al, 1997-1998, Heo et. al, 1997; Kammer et. al, 1992; Heo, 1997; Udwadia, 1994). 이 기법은 구조물의 운동에너지를 최적화하는 기술(EOT)으로써 구조물 시스템에서 측정된 운동에너지를 최대화함으로써 최적 모달 정보를 획득하는데 있다. EOT 알고리즘에서 사용되는 계측모드는 그의 독립성이 보장된다. 이러한 장점으로 대형구조물에 적용되어 그 유용성이 입증되었다(Wang et. al, 1997, Heo et. al, 1997).

본 논문에서는 이러한 두 가지 이론을 롤러코스터 구조물에 적용하여 목적함수에 대응하는 선택된 변수(예, 고유치(값) 또는 고유벡터 등)의 함수으로써 Fisher 정보행렬(Fisher Information Matrix)의 적(跡)을 최대화하여 오차 행렬을 최소화하고 롤러코스터구조물의 운동 에너지를 극대화하는 계측기의 최적 위치의 알고리즘을 개발

하는데 목적이 있다. 따라서 구조물 모니터링의 관점과 구조물의 손상 평가라는 목적을 전제로, 이들 알고리즘을 축소모형 롤러코스터에 적용하여 놀이시설구조물의 구조적 특성이 고려된 롤러코스터 구조물의 실시간 모니터링에 활용되도록 그 효용성을 입증하여 실용화 가능성을 제시하고자 한다.

2. 최적센서위치에 관한 이론적 배경

2.1 유효독립법(Effective Independence Method, EIM)

최적의 계측위치에 관한 문제는 처음에 대형 우주구조물의 효과적인 관리를 위해서 시작되었다. 많은 연구자들 중에서 Shah(1987)와 Udwadia(1985) 등은 추정공분산(Covariance of Estimate)을 최소화시킴으로써 대상 계측위치의 오차를 최소화하는 이론에 근거를 두고 최적 계측문제에 접근했다. 이 이론은 통계적인 개념을 바탕으로 추정공분산을 취하여 오차를 최소화 하도록 하는 이론으로 대응모달응답변수와 모달응답인자의 추정변수 차이를 기대치화 하여 추정공분산의 오차를 다음 식 (1)과 같이 계산한다.

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

$$= [\Phi_{fs}^T R^{-1} \Phi_{fs}] = Q^{-1}$$

여기서, q 는 대응모달응답변수, \bar{q} 는 모달응답인자의 추정변수이며, 이때 Q 는 Fisher 정보행렬이다. 이러한 이론적인 배경을 바탕으로 Kammer(1992)는 Fisher 정보행렬을 최대화함으로써 최적의 계측기의 위치를 선정하는 모달변수의 선형독립성을 유지하도록 다음 식 (2)와 같이 발전시켜 대형 우주트러스 구조물에 적용하였다.

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

여기서, Φ_{fs} 는 정형화된 모드이고, 식 (2)의 EIM은 Φ_{fs} 의 행에 의해서 분포된 직교 사영이며, 맥등원(Invariant)이다. 즉, 이 Trace는 목적 모드의 수와 일치하는 이 행렬의 랭크와 같다. 따라서, 이 행렬의 대각선 값은 EIM의 랭크(Rank)로 각 센서의 기여도를 나타낸다.

2.2 최적운동에너지법(EOT)

구조물의 변형운동에너지를 극대화하여 최적계측 문제를 다루는 방법이 에너지 최적화 기술(EOT)로 EIM과는 상반된 개념으로 제안되었다(Heo et. al, 1997). 구조물 시스템에서 측정된 변형운동 에너지가 최대가 되는 동역학적인 모달정보를 획득하여 구해진 모드형의 선형독립성이 존재하는 고유시스템에서 최소의 에너지를 나타내는 지점을 순차적으로 제거함으로써 최적계측시스템을 구성한다. 일반적으로 구조물 시스템의 운동 에너지의 분포를 다음 식 (3)과 같이 Matrix 형태로 정의하면,

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

여기서, Φ 는 측정된 모드형 벡터이다. 이때, 질량 행렬 M 을 상삼각과 하삼각 행렬로 분해하여 각각 $\Psi = L\Phi$, 그리고 $M = LU$ (L : 상삼각 행렬 U : 하삼각 행렬)로 표현하면 운동에너지 매트릭스는 다음과 같이 수정된다.

$$KE = \Psi^T \Psi \quad (4)$$

이 때, 감소된 Configuration에서 Mode Shape(모드형상)의 Projection은 다음 식 (5)와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \bar{\Phi} &= \text{Projection}(\Phi) \\ \bar{\Psi} &= \text{Projection}(\Psi) \end{aligned} \quad (5)$$

계측기의 감소된 세트에 의해서 측정된 에너지는 초기 에너지로부터 계산된다. 따라서 감소된 새로운 운동에너지 시스템은 다음과 같다.

$$\overline{KE} = \bar{\Psi}^T \bar{\Psi} \quad (6)$$

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 행렬이 랭크 결여를 일으키면 계측기를 더 이상 제거해서는 안 된다. 질량 행렬이 정칙행렬(Nonsingular Matrix) 일 때, \overline{KE} 요소의 행 랭크 N 은 $\bar{\Phi}$ 행렬에서 선형 독립된 사영 벡터(Linearly Independent Projected

Vector)의 수와 같다. 따라서 에너지 행렬 자신의 고유치 Λ 와 고유벡터 Ψ 를 고려하면 \overline{KE} 가 N 의 크기를 가진 사각대칭 양치행렬(Positive-definite Matrix)이기 때문에, EOT의 각각의 연산 절차에서 구하는 고유쌍의 연산은 크게 문제가 되지 않는다. 그러므로 각각의 잔여 계측기의 기여도는 다음 식 (7)와 같이 EOT 벡터로 나타낼 수 있다.

$$EOT = \sum_{i=1 \dots m} [\bar{\Psi} \psi \Lambda^{-\frac{1}{2}}]^2 \quad (7)$$

이때, EOT 벡터는 측정된 모드형이 선형 독립이므로 다음 식 (8)과 같은 직교 벡터를 이루어야 한다.

$$[\bar{\Psi} \psi \Lambda^{-\frac{1}{2}}]^T [\bar{\Psi} \psi \Lambda^{-\frac{1}{2}}] = I \quad (8)$$

이 방법의 장점 중의 하나로 정규화 계수, $\Lambda^{-\frac{1}{2}}$ 는 높은 모드의 기여도가 낮은 모드의 기여도를 지배하려는 성향을 제지함으로써 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. 모형 롤러코스터 설계 및 해석

3.1 모형 롤러코스터 선정 배경 및 설계

실제 롤러코스터 구조물의 실시간의 상시 감시를 위한 안정성평가 및 모니터링에 필요한 정보를 획득하기 위하여 실제구조물의 특성과 일치한 모형을 선정하여 실험을 하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구는 서울어린이대공원의 롤러코스터 구조물을 대상 구조물로 선정하여 그 구조물의 구조적인 동특성을 분석하고 모형을 제작하였다. Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 서울대공원에 있는 롤러코스터의 전체 이동구간은 곡선구간과 트위스트 구간, 360° 회전구간, 그리고 전반적으로 큰 동적인 변화가 없는 일반 고속 구간으로 연결되어 총 597m의 경로를 갖는다. 동역학적 관점에서 롤러코스터 구조물의 597m의 운동경로 중에서 동적인 특성의 변화가 가장 크고 급변하는

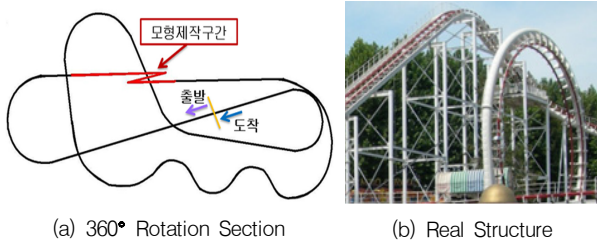


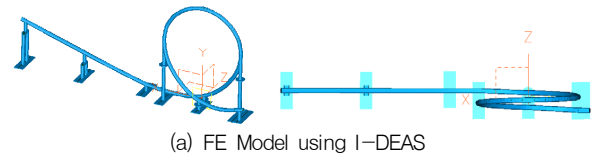
Fig. 1 Roller-coaster Structure in Seoul Children's Grand Park

하중이 작용하는 회전 구간을 선정하였다. 모형 구조물은 실구조물의 동적특성이 반영되도록 1/20로 축소 제작하였다. 축소 모형을 제작하기 위하여 실제 롤러코스터 (Roller-coaster) 구조물의 실시간 안전성 확보와 실구조물이 지니고 있는 구조적인 특성과 역학적인 거동을 반영한 상사성이 충분히 고려된 제작이 중요하므로, 수차례 실제 구조물의 동특성 계측자료를 바탕으로 실제 롤러코스터 구조물의 구조적인 특성을 분석하고 현장을 방문한 결과 롤러코스터의 전체 구간 중 가장 다양한 방향의 외력이 작용할 수 있는 360° 회전구간을 선정하였다. 이 구간은 회전 교차구간이 회전 시에 고속으로 가속을 해서 그 탄력으로 스틸을 가중해야 되는 구간이므로 세로축으로 약간의 타원을 이루어 가속도의 효과를 부각하였다.

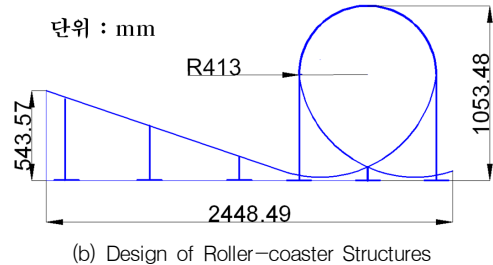
이 구조물의 구조적인 해석을 위하여 실 구조물의 거동을 최대한 반영하기 위하여 스플라인 함수(Spline function)를 이용한 모델링 기법을 개발하여 구조물의 거동특성을 효과적으로 최대한 반영하였고 이와 같은 특성이 반영된 모형을 Fig. 2와 같이 축소 제작하였다. 롤러코스터 모형의 세부 도면은 구조적인 특성을 포함하기 위해서 UGS사의 I-DEAS(상용 구조해석 프로그램)를 이용하여 실구조물의 동적특성(예, 고유진동 수와 모드형상 등)을 갖도록 형상크기와 단면적 등을 수차례 반복적인 수정을 통하여 동특성이 반영되도록 Fig. 2(a)와 같이 교체 수정설계를 하였다. 최종적인 모형 구조물의 제원은 Fig. 2(b)와 같이 직선 구간을 포함한 길이가 총 약 2.5m, 회전 구간의 최고 높이는 약 1.0m 그리고, 타원형의 회전구간은 약 0.4m의 회전반경이 되도록 하였으며, 이를 바탕으로 제작된 모형 구조물은 Fig. 2(c)와 같다.

3.2 롤러코스터의 동적해석

롤러코스터 모형구조물의 동적 거동특성은 최적 계측기의 위치를 결정하는 자료로 활용되고 이와 같이 선정된



(a) FE Model using I-DEAS



(b) Design of Roller-coaster Structures



(c) manufactured Roller-coaster Structure

Fig. 2 Design & Production of Model Structure

위치에서 획득된 데이터는 실시간 모니터링에 활용하게 된다. 따라서 동적인 특성을 충분히 반영할 수 있는 해석이 중요하다.

특히 롤러코스터 구조물이 3차원으로 자유진동이 발생하고 롤러코스터 진행방향으로 롤러코스터가 이동 할 때 마다 강제반복하중이 작용하는 특수성이 있다. 따라서 구조물이 충분한 거동특성을 나타내도록 보요소를 사용하였다. 특히 구조물의 회전 구간의 거동을 잘 나타내도록 Spline 함수를 이용해 완곡 좌표를 생성하여 모델링을 하였다. 또한 계측 데이터와 비교분석하기 위하여 가이언 소거법을 이용하여 응축절점으로 구조물의 특성을 포함하도록 하였으며, 이 절점의 정보로부터 최적의 계측 위치를 결정하였다. 모델링은 UGS사의 I-DEAS를 이용하였다. 제작된 모형 구조물의 물성치는 Table 1과 같고, 380개의 절점(Nodes)과 382개의 보요소로 구조해석을 수행하였다. Fig. 3의 해석결과 실구조물계측결과로부터 예측한 대로 1차 모드가 17.4Hz 그리고, 10차 모드에서 450.0Hz의 주파수모드의 특성을 얻었다. 또한 횡방향 진동이 크고, 회전 구간의 거동이 지배적임을 알 수 있었다.

또한 대체적으로 복합된 혼합형 모드로 주로 굽힘력과 비틀림력에 지배를 받는 다양한 거동 특성을 갖고 있음을

Table 1 Material Properties of the Structure

Properties	Values	Units
Length(L)	2.49	[m]
Cross section(A)	4.03E-4	[m ²]
Geometrical moment of inertia(I)	7.89E-8	[m ⁴]
Modulus of elasticity(E)	2.07E+11	[N/m ²]
Shear modulus of elasticity(G)	8.02E+10	[N/m ²]
Unit mass(ρ)	7850	[Kg/m ³]
Poisson's Ratio(ν)	0.29	•

알 수 있었다.

3.3 응축이론에 의한 FE 및 계측 자유도 일치

일반적으로 구조물의 수치적인 모드해석 방법으로는 SVI(Simultaneous Vector Iteration), 가이언 소거법(Guyan Reduction), Lanczos 등이 있다(Bath, 1996). 본 연구에서는 SVI법을 적용하여 동적해석을 했으며, 동시에 가이언 소거법을 적용하여 실제측시에 계측위치의 일치를 위하여 부재요소의 자유도를 응축하였다(Static Condensation). 이 방법은 고려되지 않는 자유도를 시스템 매트릭스에서 제거하지 않고 남아있는 자유도에 응축시켜서 식 (8)과 같이 응축된 강성, 질량 행렬을 구성하여 구조물의 고유치 해석을 수행하는 방법이다. 그러므로 원하는 계측점을 선정하여 자유도를 응축함으로써 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.

$$\begin{aligned}
 K_r &= K_{rr} - K_{ro}K_{oo}^{-1}K_{ro}^T \\
 M_r &= M_{rr} - M_{ro}K_{oo}^{-1}K_{ro}^T - K_{ro}K_{oo}^{-1}M_{ro}^T \\
 &\quad + K_{ro}K_{oo}^{-1}M_{oo}K_{oo}^{-1}K_{ro}^T
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

여기서, 각각 첨자 r : 남아있는 자유도(retained set), o : 제거된 자유도(omitted set) 이다. 또한 식 (8)은 최적계측 위치를 결정하는데 이용된다.

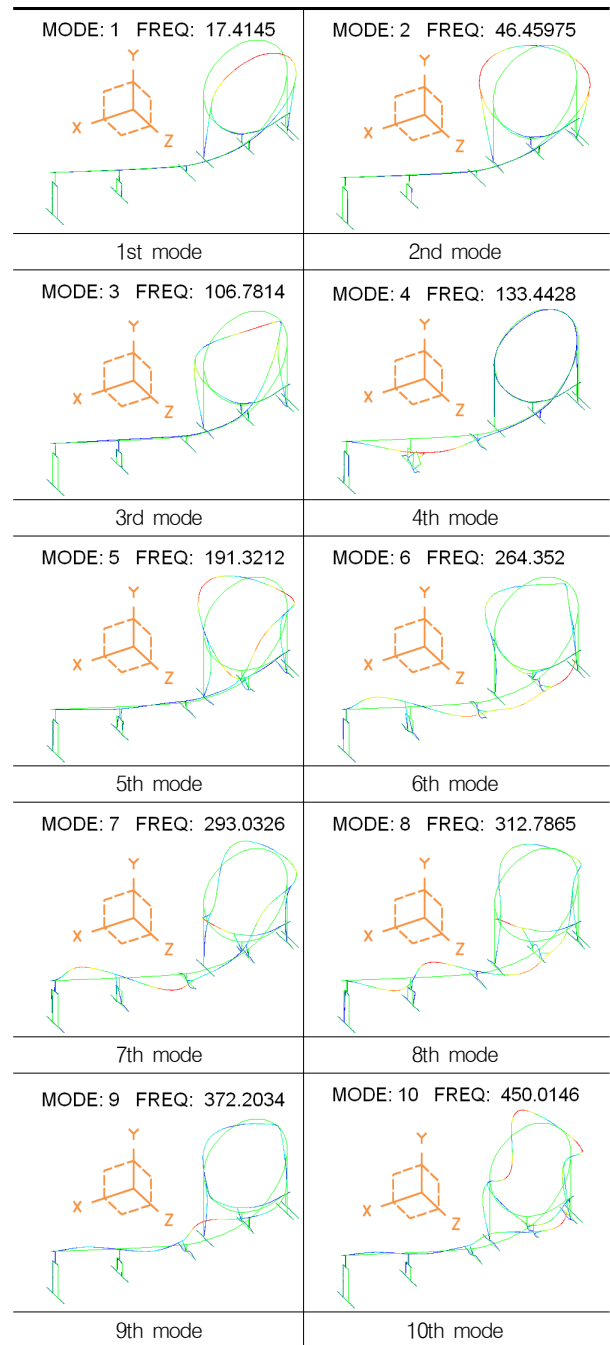


Fig. 3 Analysis Results using I-DEAS

4. 최적 계측 및 센서 이론의 수치적 검증

구조물의 모니터링의 관점과 구조물의 손상 평가에 적용해야하는 특수성과 EIM과 EOT의 이론적인 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 롤리코스터 구조물의 거동 계측 대상으로 선정하였다. 따라서, Fig. 4와 같이 총 89개의 후보대상의 계측점을 선정하여 5개의 초기 고유모

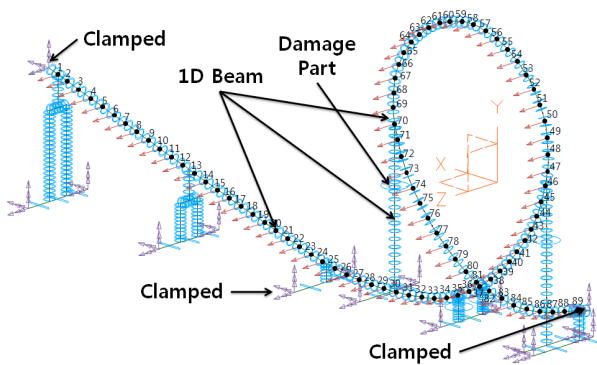


Fig. 4 Candidate Sensor Locations(Total 89EA) & Damage Part

드가 이 두 개의 알고리즘에 적용되었다. 특히, EIM은 순수 정형화된 모드가 적용되었고, EOT는 가이언 소거법에 의해 계산되어진 정형화된 상삼각 질량 행렬(89×89)이 사용되었다.

EIM과 EOT는 각각 Fisher 정보행렬과 에너지 행렬이 랭크 빈약도를 일으킬 때까지 후보 위치가 독립적으로 제거되어 20개의 후보가 남을 때까지 실행되어 다음 절의 효용성 평가에 활용된다. 이 두 가지 방법 모두 같은 후보 계측기의 수와 위치에서 시작한다. 또한 기여도가 적은 계측기를 찾기 위해서 선형독립성을 유지하며 매회 최저 기여 계측기를 제거하기 위하여 초기 값의 상대적 백분율로 계산된 Fisher 정보행렬과 운동에너지의 Determinant가 사용된다. 이들 두 행렬식의 값은 다음 Fig. 5와 같이 나타났으며, 여기서 보는 바와 같이 두 방법 모두 초기 단계에서 아주 안정적인 변화를 보이나 계측기 수가 점점 감소하여 전체의 약 60%(약 30개 계측기 수 감소)이하의 계측기가 될 때부터는 EOT가 단연 우월한 모달 정보를 보여주고 있다. 특히, 10%(약 80개 계측기 수 감소) 미만이 되면서부터는 Fisher 정보행렬은 거의 1%미만의 구조물에 관한 정보로서 사실상 실제 계측데이터로부터 모니터링과 손상평가에 적용이 불가능함을 보여준다.

5. 최적 계측 및 센서 이론의 효용성 검토

5.1 손상평가를 위한 유연도법

구조물의 거동으로부터 계측된 유연도의 변화는 구조물의 손상을 평가하기 위한 방법 중의 하나로 많은 연구가들에 의해서 활용되어왔다¹⁰⁾. 계측된 유연도 행렬은 정형화된 모드형과 고유주기의 함수로서 다음 식 (10)과

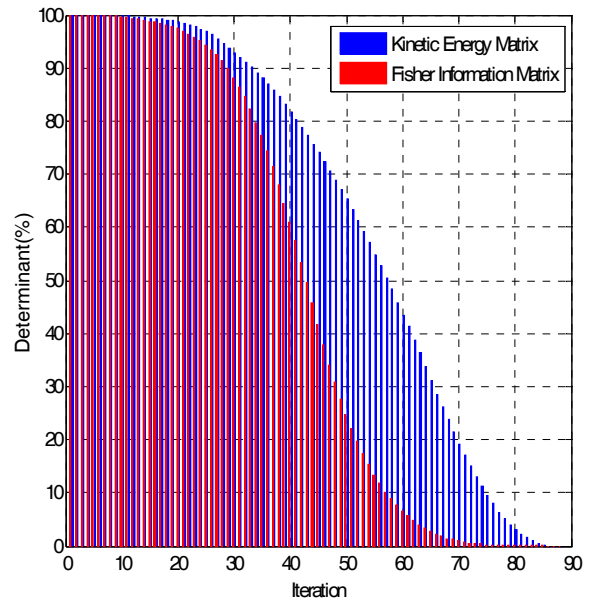


Fig. 5 Fisher Information Matrix vs. Kinetic Energy Matrix

같이 정의 할 수 있다.

$$[F] = [\Phi][\Lambda]^{-1}[\Phi]^T \quad (10)$$

사실 정적인 유연도는 정적인 강성도의 역수이므로, 유연도 행렬은 작용하중과 상응하는 변위의 관계를 다음 식 (11)과 같이 갖고 있다.

$$\{U\} = [F]\{P\} \quad (11)$$

그러므로 유연도 행렬의 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 (12)와 같다.

$$[S] = \int [B]^T [E] [B] dv \quad (12)$$

즉, 형상함수[B]와 탄성 행렬[E]의 함수이다. 구조물

의 손상이란 일반적으로 이와 같은 강성의 저하를 나타내며, 그로 인한 기능적인 저하(불능)의 현상을 초래한다. 본 연구에서는 FE 해석에서 가이언 소거법에 의해 계산된 강성 저하를 절대계수의 비교에 의해서 활용된다.

5.3 손상평가를 위한 MAC의 활용

힘력을 받는 일반구조물이 힘으로 인한 변형(ε)과 곡률($\kappa = 1/\rho$, 여기서 ρ 는 곡률반경)의 관계는 $\varepsilon = \kappa y$ 로 곡률의 변화가 구조물의 탄성에너지의 변화량이므로 많은 연구자들이 직접 계측된 변위나 가속도로부터 이들의 상호관계를 유도하여 고유변수 또는 고유모드라 하여 모달 정보의 충실도를 확인하는 방법으로 구조물의 손상 여부를 판단하는 근거로 삼았다(Doebbling et. al, 1996). 이러한 모달정보를 비교하는 수단은 MAC (Modal Assurance Criteria)을 사용하였다. 이 방법은 효과적인 두 세트의 모드형의 데이터를 수치적으로 비교 분석하는 방법으로 모달상관계수(Correlation Coefficient)라고도 불리며, 다음과 같은 식 (13)과 같이 정의된다(Ewins, 2000).

$$MAC(A, X) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n (\Psi^e)_j (\Psi^a)_j^* \right|^2}{\left(\sum_{j=1}^n (\Psi^e)_j (\Psi^e)_j^* \right) \left(\sum_{j=1}^n (\Psi^a)_j (\Psi^a)_j^* \right)} \quad (13)$$

여기에서 위첨자 a는 이론적 데이터를, 위첨자 e는 실험적 데이터를 나타낸다. 그러나 MAC은 서로 다른 두 Set

의 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. Ewins(2000)는 그의 연구에서 상호관련된 모드는 보통 0.9의 수치를, 비관련된 모드는 0.005 정도의 수치를 보인다고 지적하였다.

5.4 원형 구조물과 손상 구조물

롤러코스터 구조물의 손상은 여러 원인으로 인하여 구조물의 강성도가 저하됨으로써 발생하게 된다. 결국 실제 구조물의 손상은 지진이나 기타 외력으로 인한 하중재하 능력의 감소로 나타낼 수 있으므로, 본 논문에서는 모형 구조물의 기둥 연결부위를 절단하여 손상을 유도하였고, 이때 기둥 연결부의 beam 요소에 대한 단면적(A)을 1/10로 감소시킴으로써 손상을 정의하였다. 이는 롤러코스터 구조물의 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 가이언 소거법을 적용하여 총 89개의 자유도를 대상후보로 선정하였다. 이 89×89의 자유도를 既知의 해(Known Solution)로 사용한다. 또한 각각의 이론(EIM 및 EOT)에 의해서 Fig. 6과 같이 선택된 최종 20개의 최적계측위치가 손상평가에 적용된다. 손상을 비교·평가하기 위하여 유연도(Flexibility) 및 강성도

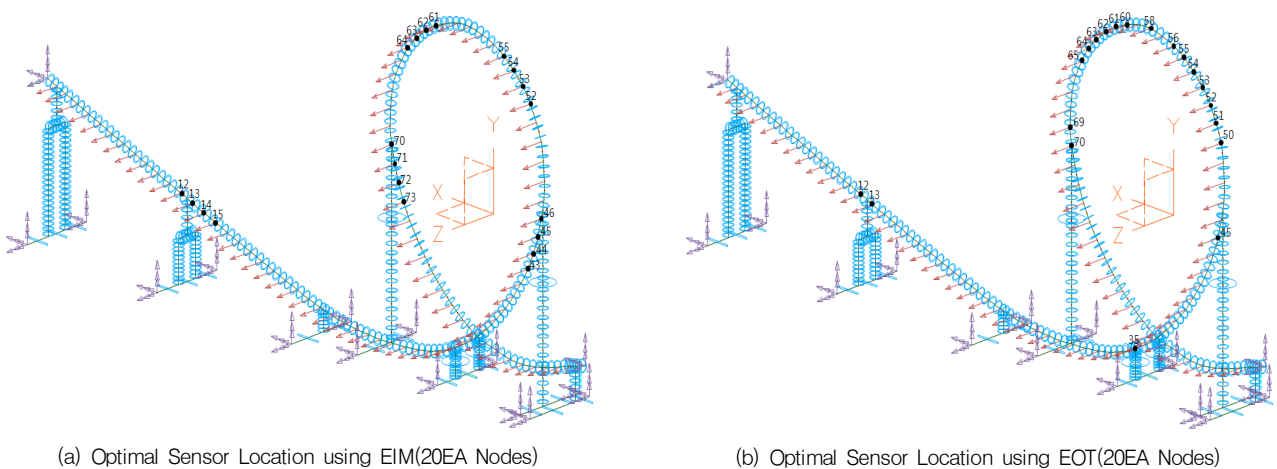


Fig. 6 Optimal Sensor Location of Roller-coaster Structure

Table 2 Optimal Sensor Location & Number of Nodes(20EA)

Row	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EIM	12	13	14	15	43	44	45	46	52	53
EOT	12	13	35	45	50	51	52	53	54	55
Row	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
EIM	54	55	61	62	63	64	70	71	72	73
EOT	56	58	60	61	62	63	64	65	69	70

(Stiffness)의 변화를 이용하고, 또한 MAC을 통하여 각각의 모드의 차이를 수치적으로 비교평가 한다. 최종적으로 각각의 최적계측법에서 선정된 계측위치에서 획득한 총 변형운동에너지를 비교함으로써 모형 롤러코스터의 최적계측위치의 유용성과 각 방법의 장단점을 분석·평가하고, 모니터링과 구조물의 손상위치 및 손상평가를 위한 효율성을 제시한다. 또한 각각의 이론에 의해서 선택된 최종 20개의 최적계측위치가 손상평가에 적용된다.

먼저 유연도의 차이를 보면 주어진 EIM과 EOT의 이론에 따라 선택된 위의 20개의 계측기 위치에서 유연도의 차를 절대 비교하여 계산한 결과는 Fig. 7과 같다. 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 Fig. 8에서 보인 바와 같이 두 가지 방법 모두 교량의 손상 부근에 정확한 손상

Table 3 MAC Values to EIM

Mode	1	2	3	4	5
1	0.9996	0.0016	0.0511	0.0000	0.0014
2	0.0001	0.9958	0.0060	0.0009	0.1067
3	0.0750	0.0013	0.9803	0.0009	0.0096
4	0.0001	0.0004	0.0006	0.9988	0.0003
5	0.0000	0.0920	0.0169	0.0005	0.9869

Table 4 MAC Values to EOT

Mode	1	2	3	4	5
1	0.9999	0.0001	0.3934	0.0000	0.0142
2	0.0005	0.9979	0.0103	0.0131	0.0628
3	0.4286	0.0028	0.9754	0.0000	0.0146
4	0.0012	0.0068	0.0054	0.9968	0.0017
5	0.0034	0.5830	0.0321	0.0088	0.9721

도를 보여준다. 더불어, 엄밀하게는 손상위치에 대한 유연도 및 강성도의 차이는 EIM이 EOT에 비해 상대적으로 손상주변에 분포된 모호한 결과를 보였다.

다음으로는, Table 3, 4 그리고, Fig. 9를 통해 EIM과 EOT의 MAC 결과를 보였다. 여기서 보면, EIM과 EOT 모두 저차 5개 모드에 대한 모드 상관성이 0.9 이상으로 우수한 상관관계를 보였으며, 3차 및 5차 모드에서 약간의 빈약한 관계만을 보였다. 이는 실질적으로 구조물에 심각한 기능적 손상이 없기 때문으로 판단된다.

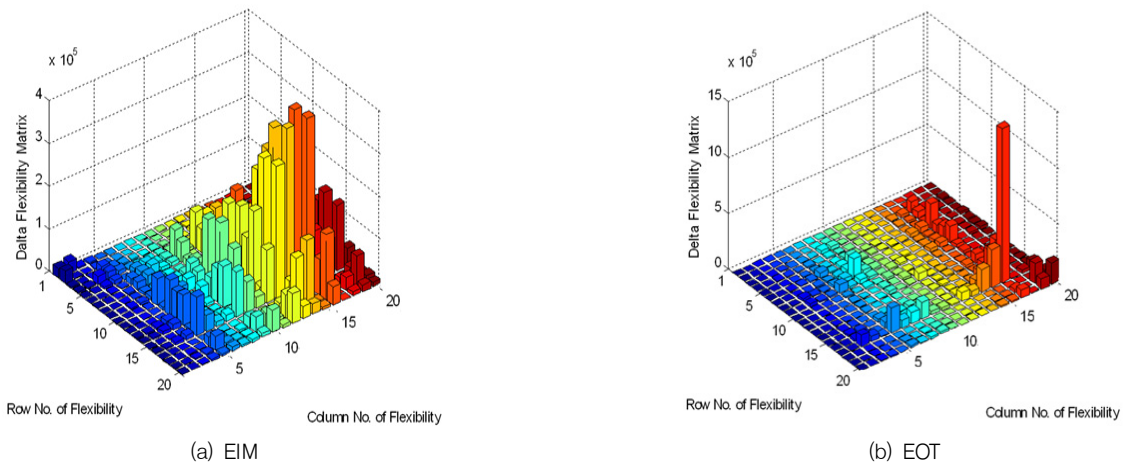


Fig. 7 Difference of Flexibility Matrix

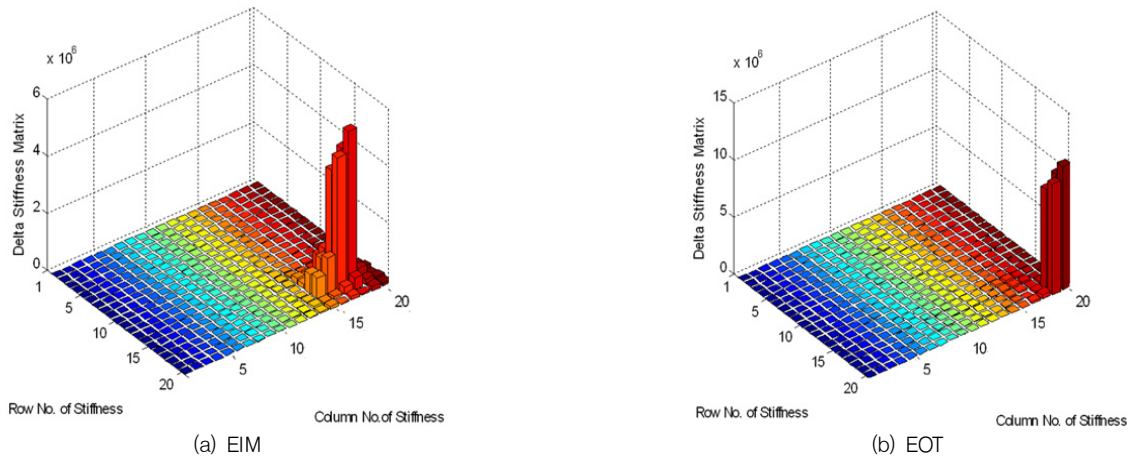


Fig. 8 Differences of Stiffness Matrix

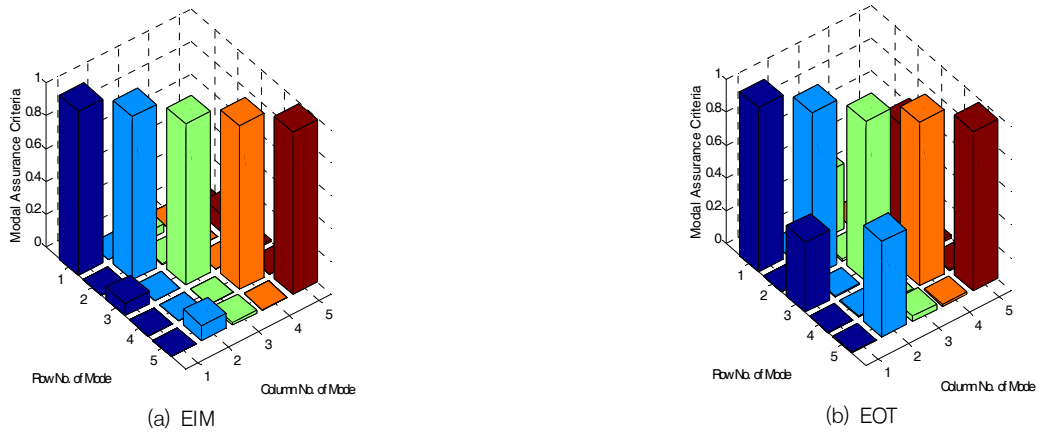


Fig. 9 Plot of MAC Values

6. 결론

본 논문에서는 롤러코스터 구조물의 모니터링 시 구조물의 성능저하를 실시간으로 계측하기 위한 최적계측문제를 위하여 EIM과 EOT의 이론적인 특성을 모형구조물에 적용하였고, 그 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 우선 FE해석에서 사용한 무한한 자유도를 계측의 자유도와 일치하도록 가이던 응축방법을 이용해 불필요한 자유도와 잔여 자유도의 요소로 응축하여 대형 구조물에 계측위치 선정에 응용법을 제시하였다.
- (2) 롤러코스터 구조물의 특성이 감안된 총 변형에너지의 변화는 MAC의 결과 두 방법(EIM 및 EOT) 모두 양호한 에너지의 변화를 보였다.
- (3) 그러나 롤러코스터 구조물의 구조적인 특성을 고려한 계측위치를 최소화하여 모니터링이 가능하도록 하기 위한 강성도와 유연도의 변화에서는 EOT가 유

리함을 보였다.

- (4) 장기계측에서 데이터의 감소를 위한 모달정보 실험에서는 단연 EOT가 유리함을 보였으며, 특히 약 20% (약 20개)이하의 계측기가 될 때부터는 EOT가 EIM 보다 롤러코스터 구조물에 대한 정보를 약 20배 정도 포함함으로써 단연 우월함을 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(소방방재청)의 재원으로 안전기술개발사업(No.NEMA-09-MD-05)의 지원을 받아 수행된 연구임. 본 연구를 위해 지원하여 준 소방방재청에 대단히 감사합니다.

참고문헌

1. 건설교통부, "도로교 표준시방서", 대한토목학회, 1996.

2. 건설도서편집국, “케이블 교량의 계획과 설계”, 도서출판 건설 도서, 1983.
3. 조선일보, 제 22838호, Korea, 1994.
4. 조효남, “대형교량의 유지관리를 위한 계측, 모니터링, 통제시스템개발”, 한국과학재단, HOSEF 과제번호 : 961-1203-011-2, 1998.
5. 현대건설(주) 기술연구소, “남해대교 계측보고서-초기치 설정을 위한 재하실험”, 1997.
6. Alampalli. S. and Fu, G., “Remote bridge monitoring system for bridge condition”, Engineering Research and Development Bureau, New York State Department of Transportation, Report 70, 1994.
7. Ballard, C. M. and Chen, S. S., “Automated remote monitoring of structural behavior via the internet”, SPIE 3rd Annu. Smart Structures and Materials Conf. San Diego, 1996.
8. Bath, K. J., “Finite Element Procedures”, Prentice Hall, 1996.
9. Chang, S. P. and Kim, S., “Online structural monitoring of a cable-stayed bridge”, SPIE 3rd Annu. Smart Structures and Materials Conf. San Diego, CA, 1996.
10. Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prome, M. B. and Shevitz, D. W., “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, 1996.
11. Ewins, D. J., “Modal Testing : Theory, Practice and Application”, R.S.P, 2000.
12. Heo, G., Wang, M. L. and Satpathi, D., “Optimal Transducer Placement for Health Monitoring of Long Span Bridge”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering(16), 1997, pp.495-502.
13. Heo, Gwanghee., “An Automated Health Monitoring System for Large Civil Structural System”, Ph.D. Dissertation, University of New Mexico, 1997.
14. 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.
15. Pines, D. J. and Lovell, P. A., “Conceptual Framework of Remote Wireless Health Monitoring System for Large Civil Structures”, Smart Material and Structures, Vol. 7, No. 5, 1998, pp.627-633.
16. Shah, P. C. and Udawadia, F. E., “A Methodology for Optimal Sensor Locations for Identification of Dynamic Systems”, Transactions of the ASME, Vol. 45, March 1987, pp.188-196.
17. Udawadia, F. E. and Garba, J. A., “Optimal Sensor Locations for Structural Identification”, JPL Proceeding of the Workshop on Identification and Control of Flexible Space Structures, April 1985, pp.247-261.
18. Udawadia, F. E., “Methodology for Optimum Sensor Locations for Parameter Identification in Dynamic Systems”, J. of Eng. Mech., Vol. 120, No. 2, February 1994, pp.368-387.
19. Wang, M. L., Heo, G. and Satpathi, D., “Dynamic Characterization of a long Span Bridge : A Finite Element Based Approach”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering(16), 1997, pp.503-512.
20. Wang, M. L., Heo, G. and Satpathi, D., “A Health Monitoring system for large Structural Systems”, Smart Material and Structures, Vol. 7, No. 5, 1998, pp.627-633.
21. Wilson, J. C. and Gravelle, W., “Modeling of a Cable-Stayed Bridge for Dynamic Analysis”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, 1991, pp.707-721.

(접수일자 : 2011년 2월 18일)

(수정일자 : 2011년 6월 8일)

(심사완료일자 : 2011년 6월 13일)

요 지

본 연구는 롤러코스터 구조물의 구조적인 결함을 검출하기 위해서 요구되는 최적의 센서를 구성하기 위한 연구이다. 특수한 목적과 구조적인 형태의 롤러코스터를 3차원 FE 모델링을 통해 구조적 거동특성을 분석하고, 최적계측/센서 이론을 통해 합리적인 센서 위치 및 개수를 구성하였으며, 구성된 최적 센서 위치 및 개수를 바탕으로 손상 전·후에 따른 수치적인 모달 특성값을 추출해 손상평가에 활용될 기본 구조물에 대한 기초자료를 제공하였다. 본 연구의 대상구조물로 서울 어린이대공원에 위치한 롤러코스터 구조물을 선정하였고, 1/20 크기로 축소된 모형 구조물을 제작·활용하였다. 또한, 롤러코스터의 공간적인 구조의 특성으로 운동학(Kinetics)적 거동에 따른 운동역학(Kinematics)적인 특성이 포함되도록 Spline 함수를 이용해 대상 모형 구조물을 정확히 3차원 FE 모델을 구성 후, 가이언 소거법에 근거한 모달 특성값을 추출하였고, 유효독립법(EIM) 및 최적운동에너지법(EOT) 이론을 바탕으로 최적계측/센서 위치 및 개수를 구성하였으며, 손상 전·후에 따른 모달 특성값을 추출해 크게 강성도, 유연도, 모드상관도의 관계로부터 손상(결함)을 평가하였다. 최종적으로, 본 논문에서 구성된 최적 계측/센서 이론이 타당함을 확인하였고, 강성도 및 유연도 변화를 통해 만족할 수준으로 손상이 규명되었다. 이 결과 롤러코스터 구조물의 건진도 모니터링에 필요한 거동특성 분석 및 결함검출기술 개발에 관한 최적 센서의 구성을 제시 하였다.

핵심 용어 : 롤러코스터, 최적센서위치, 유효독립법(EIM), 최적운동에너지법(EOT), 가이언 소거법