

지진하중을 받는 사장교의 상태평가를 위한 새로운 통계적 패턴 인식 기술

허광희* · 김충길**

Heo, Gwanghee*, Kim, Chunggil**

New Statistical Pattern Recognition Technology for Condition Assessment of Cable-stayed Bridge on Earthquake Load

ABSTRACT

In spite of its usefulness for health monitoring of structures on steady external load, the statistical pattern recognition technology (SPRT), based on Mahalanobis distance theory (MDT), is not good enough for the health monitoring of structures on large variability external load like earthquake. Damage is usually determined by the difference between the average measured value of undamaged structure and the measure value of damaged one. So when external variability gets larger, the difference gets bigger along, which is thus easily mistaken for a damage. This paper aims to overcome the problem and develop an improved Mahalanobis distance theory (IMDT), that is, a SPRT with revised MDT in order to decrease external variability so that we will be able to continue to monitor the structure on uncertain external variability. This method is experimentally tested to see if it precisely evaluates the health of a cable-stayed bridge on each general random load and earthquake load. As a result, the IMDT is found to be valid in locating structural damage made by damaged cables by means of data from undamaged cables. So it is proved to be effectively applicable to the health monitoring of bridges on external load of variability.

Key words : Statistical pattern recognition technology, Control chart, Mahalanobis distance, Improved mahalanobis distance, Structural health monitoring

초록

마할라노비스 거리 이론에 기초한 통계적 패턴 인식 기술은 안정된 외부하중에 대한 구조물 상태 평가에 대한 유용성에도 불구하고 지진과 같이 큰 변동성의 외부하중에 대한 구조물의 건전도 모니터링에는 취약하다. 손상은 일반적으로 손상되지 않은 구조물의 측정된 값의 평균과 손상된 구조물의 측정값 사이의 차이에 의해 결정된다. 외부 하중의 변동성이 커질수록 더 큰 차이가 발생하고, 이는 손상으로 인식되기 쉽다. 본 논문에서는 이러한 문제를 극복하고 불확실한 외부 하중을 받는 구조물을 지속적으로 모니터링 할 수 있도록 외부 변동성을 감소시키기 위해 마할라노비스 거리 이론을 수정한 통계적 패턴 인식 기술인 개선된 마할라노비스 거리 이론을 개발하였다. 이 방법은 일반적인 임의의 하중과 지진하중에서 정확하게 사장교의 건전도를 평가하는 것을 실험적으로 확인 하였다. 그 결과, IMDT는 손상되지 않은 케이블로부터 획득한 데이터로 손상된 케이블에 의한 구조물의 손상을 파악하는 데 유효한 것을 확인하였다. 따라서 변동성을 지닌 외부하중에 의한 교량의 건전도 모니터링에 효과적으로 적용할 수 있음을 입증하였다.

검색어 : 통계적 패턴인식 기술, 관리차트, 마할라노비스 거리, 개선된 마할라노비스 거리, 구조물상태모니터링

* 정회원 · 건양대학교 건설환경공학과 교수 (heo@kyu.ac.kr)

** 교신저자 · 충남대학교 토목공학과 박사과정 (Corresponding Author · Chungnam National University, cg-kim@hanmail.net)

Received December 6, 2013/ revised December 26, 2013/ accepted March 30, 2014

1. 서론

급속한 사회발전과 시공 기술의 발달에 따라 항만, 공항, 터널, 교량, 고층 빌딩 등 다양한 토목 구조물들이 고층화, 장대화, 대형화 되고 있다. 하지만, 이와 동시에 태풍, 지진과 같은 자연적 재해와 구조물 사용량(사용 인원 및 부가적인 하중), 테러로 인한 구조물의 손상과 같은 인위적인 재해의 증가로 인하여, 구조물의 수명은 시간이 지날수록 많은 위협을 받고 있다. 이에 따라, 구조물의 상태를 평가하고, 급작스런 상황에 대처하고자 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 구조물의 상태 평가 방법을 SHM (Structural Health Monitoring)이라고 한다(Charles and Hoon 2000).

구조물 상태 평가 방법인 SHM은 배열된 센서로부터 계속된 주기적 동적 응답을 사용하여 시간이 지남에 따른 시스템을 관찰하고, 계속된 응답으로 손상 및 불안정한 특징을 찾아내며, 이러한 특징의 통계적 분석을 통하여 구조물의 현재 상태를 규명하는 것이다(Charles and Hoon 2000). 이러한 상태평가 방법은 기존의 직접 손상평가 기술(육안 검사)에 비해 인력의 소모가 적으며, 손상의 위치에 접근할 필요가 없고, 손상평가 시 발생하는 사용자의 불편(차량통제)을 줄일 수 있는 등의 장점으로 인하여 최근 많은 연구자의 관심을 받고 있다(Wang and Ong 2009).

특히, SHM은 구조물에 발생하는 구조물의 노화와 열화 등의 손상에 대한 정보를 정기적인 데이터의 업데이트를 통하여 발견할 수 있으며, 지진이나 폭발 등으로 인한 급작스런 하중으로 인한 구조물의 손상을 거의 실시간으로 찾아 내는 것을 목표로 한다.

앞서 언급한 SHM의 최종 단계는 계속된 응답으로 찾아낸 손상 데이터의 통계적 모델 분석을 통하여 구조물의 현재 상태를 규명하는 것이다. 이러한 통계적 모델 개발은 SHM의 강화를 위하여 많은 주목을 받고 있다(Shon et al., 2004). 통계적 모델 개발은 구조물의 손상 상태를 정량화 하기 위한 손상 특징을 추출하는 알고리즘의 구현이 주된 관심사항이다. 이러한 통계적 모델 개발은 감독학습(supervised learning)와 무감독학습(unsupervised learning)으로 분류할 수 있다. 감독학습은 무손상과 손상데이터 모두를 사용하여, 손상을 분류하기 위하여 높은 수준의 손상 식별이 가능한 진보된 방법이다. 대표적인 예는 응답표면분석(Response Surface Analysis), 피셔 판별분석(Fisher's Discriminant), 인공신경망(Neural Networks), 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms), 지원 벡터 머신(Support Vector Machines) 등이다. 하지만, 무수히 많은 손상 상황에 대한 반복적인 학습이 필요하다. 다음으로 무감독 학습은 손상된 구조물의 학습 없이 적용이 가능한 방법이다. 대표적인 예는 관리 차트 해석(Control Chart Analysis), 아웃라이어 검출(Outlier Detection), 가설검증(Hypothesis Testing) 등이다.

그러나 본질적으로 하나 또는 두 개의 수준의 손상 식별만 가능하다는 제한이 있다(Shon et al., 2004).

다양한 통계적 모델 개발 방법 중 아웃라이어 검출 방법은 데이터들 간의 상호 관계를 분석함으로써 데이터들 속에 숨어 있던 새로운 정보를 추출해 내는 데이터 마이닝방법이다. Ruotolo and Surace (1997)는 이상치 탐지하는 수단으로 매트릭스의 랭크(Rank) 변화를 사용하였다. Worden은 전달률과 마할라노비스 거리에 근거하여 패턴인식 기법을 제안하였다(Worden et al., 2000).

마할라노비스 거리를 이용한 대표적인 연구로는, Nair and Kiremidjian (2007)은 손상평가 방법으로 Gaussian Mixture Model (GMM)을 이용하여 얻은 특정 벡터를 적용한 마할라노비스 거리를 제안하였고, ASCE Benchmark Structure의 해석된 데이터를 이용하여 이를 검증하였다. Anne et al. (2011)은 지진 운동 상태에서 세 개 스펙 교량의 손상 실험을 진행하고, 앞서 제안된 GMM을 이용한 마할라노비스 거리의 손상 식별 정도를 평가하였다. 그러나 Anne et al. (2011)의 연구는 GMM 알고리즘의 효능 및 작은 규모의 실험적 검증으로 다양한 실험을 통하여 추가적인 검증이 남아 있다. 특히 구조적으로 복잡한 구조물에서 국부 손상이 전체 구조 성능에 미치는 영향 등은 고려되지 않았다.

따라서, 본 논문에서 구조적으로 복잡한 사장교의 손상을 식별하기 위하여 통계적 기법을 이용한 손상평가 방법 중 마할라노비스 거리 이론에 근거한 패턴인식 기법에 관심을 두고 연구를 진행하였다. 특히, 기존 연구에서 고려되지 않은 국부 손상이 전체 구조 성능에 미치는 영향을 파악해 보고자 하였다. 이를 위하여 마할라노비스 거리 이론에 대하여 실험적으로 성능을 검증해 보고, 기존 마할라노비스 거리의 한계인 데이터 간의 변동성이 큰 상태에서의 구조물의 상태를 평가하기 위하여 개선된 마할라노비스 거리를 제안하였다. 개선된 마할라노비스 거리 이론을 이용한 통계적 기법의 손상식별 성능은 모형 사장교의 손상 데이터를 이용하였다. 손상 실험은 반복하중과 지진하중으로 모형 사장교를 가진 상태에서 각 하중으로 인한 케이블의 손상 데이터를 획득하여 이를 상태평가에 이용하였다. 특히, 상태평가에 사용된 데이터는 손상되지 않은 특정 케이블에서 측정된 데이터를 이용하였으며, 이를 통하여 케이블의 손상(국부 손상)이 전체적인 구조물의 성능에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고자 하였다. 최종적으로 연구를 통하여 기존의 마할라노비스 거리 이론과 개선된 마할라노비스 거리 이론을 이용한 통계적 기법의 손상 식별 능력을 비교하였으며, 비교 결과 개선된 마할라노비스 거리 이론을 이용한 통계적 기법은 구조적으로 복잡한 사장교 구조물의 손상 평가에 우수한 성능을 발휘함을 확인하였다.

2. 마할라노비스 거리 이론(Mahalanobis Distance, MDT)을 이용한 통계적 기법

일반적으로 두 개의 서로 다른 데이터(x, y)의 거리를 비교하고자 할 때 사용되는 유클리드 거리는 다음의 Eq. (1)과 같다(De Lautour and Omenzetter 2008).

$$D_E(x, y) = \sqrt{(x-y)^T (x-y)} \quad (1)$$

이러한 유클리드 거리는 단순히 두 개의 데이터의 거리를 비교할 뿐, 해당 변수의 변동성(Variability)은 고려되지 않는다. 즉, 높은 변동성을 지닌 데이터는 낮은 변동성을 가진 데이터 보다 낮은 가중치(Standard Deviation)가 부여되어야 한다. 가중치가 고려되지 않는다면, 높은 변동성을 지닌 데이터 자체가 그대로 손상으로 인식이 되기 때문이다. 따라서, Eq. (1)에 가중치를 부여하면, 다음의 Eq. (2)로 표현된다.

$$D_E(u, v) = \sqrt{(x-y)^T R^{-1} (x-y)} \quad (2)$$

여기서, $u = \left(\frac{x_1}{s_1}, \dots, \frac{x_n}{s_n} \right)$, $v = \left(\frac{y_1}{s_1}, \dots, \frac{y_n}{s_n} \right)$, 이며, s_n 는 표준 편차이고, $R = \text{diag}(s_1^2, \dots, s_n^2)$ 이며, 공분산 행렬이다. 만약, R이 대각행렬이 아니고, 각각의 변수가 여러 가지 변수들의 중심 값들로 이루어진 중심에 대해서 갖는 거리를 마할라노비스 거리, 즉 MD 이다. 이러한 관계를 식으로 표현하면 다음의 Eq. (3)과 같다.

$$MD = \sqrt{(x-m)^T R^{-1}(x-m)} \quad (3)$$

여기서, 마할라노비스 거리(MD)에서 x 는 구조물로부터 획득된 관측값, m 은 x 의 평균값이고, R 은 관측값 x 의 공분산 행렬이다. MD는 1930년 인종 형상을 분류하면서 이러한 이론을 소개하였다(Mahalanobis, 1930). 이 이론은 두 지점의 단순한 거리뿐만이 아니라, 변수의 특성을 나타내는 표준편차와 상관계수가 함께 고려된다는 특징을 가지고 있다.

x, y 와 같은 계측값의 MD는 계측과 평균값과의 거리가 표준편차의 몇 배인지를 나타내는 값이다. 즉, 반복하중과 같이 데이터 간의 변동이 크지 않은 상황에서는 이상 상황이 발생하였을 경우, MD는 매우 큰 값을 가질 것이다. 그러나 지진하중과 같이 데이터 간의 변동이 매우 큰 경우, MD는 매우 작은 값이 나올 것이다. 이에 따라 지진하중 상태에서의 손상은 MD를 이용하여서는 식별하기 매우 힘들다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 MD의 단점을 개선하기 위하여 다음의 Eq. (4)와 같은 개선된 마할라노비스 거리(Improved Mahalanobis Distance, IMD)를 제안한다.

$$IMD = \sqrt{(\Delta x - m)^T R^{-1}(\Delta x - m)} \quad (4)$$

Eq. (4)의 Δx 는 손상 전의 x 와 손상 후 \hat{x} 의 차이이다. 새롭게 제안한 IMD는 앞서 언급한 MD의 단점인 데이터간의 큰 변동성에 따른 MD의 감소를 보완하고자, 손상 전과 후의 데이터 간의 차(Δx)를 사용하여 큰 변동성을 지닌 데이터의 변동성을 감소시킨 기술이다.

MD와 IMD를 이용하여 구조물의 상태를 평가하기 위해서는 구조물의 이상 유무를 판단 할 수 있는 기술이 필요하다. 이를 위하여 MD와 IMD 기반의 관리차트를 다음 Eqs. (5)-(7)에 정의하였다(Kim 2011; Honk and Kim 2010).

$$CL(\text{중심선}) = \overline{MD} \quad (5)$$

$$UCL(\text{상한계선}) = \overline{MD} + \alpha\sigma \quad (6)$$

$$LCL(\text{하한계선}) = \overline{MD} - \alpha\sigma \quad (7)$$

여기서, \overline{MD} 는 마할라노비스 거리의 평균값, α 는 표준정규분포에서 신뢰구간 99.7%에 해당하는 신뢰도 수준, σ 는 마할라노비스의 표준편차이다. 계측 데이터로부터 계산된 MD와 IMD 기반의 관리 차트에서 상·하한계선의 범위를 벗어난 데이터에 대해서 구조물의 상태에 이상이 있다고 판단한다.

3. 구조물 손상 실험

3.1 모형 사장교 구조물

실험적 연구를 위한 대상 구조물은 서해대교를 1/200규모로 축소하고, 저차 모드의 고유진동수가 일치하도록 설계한 모형 사장교 구조물을 제작하여 활용하였다. 제작한 모형 사장교는 총 길이 4.2m, 최대 높이 0.7m의 2주탑 교량으로 중앙 경간은 2.2m이며, 건양대학교 건설환경공학과 구조실험실에 설치하였다. 중앙 경간의 상하방향 최대 변위를 발생 시키기 위하여 가진기가 설치된 측의 교대와 상판의 연결은 힌지로 하였고, 다른 3곳의 교대와 상판은 볼러로 연결하였다. 또한, 가진기를 통하여 인가되는 외부하중의 전달을 위하여 폭 0.03m, 길이 4.22m의 횡보 2개에 0.02 * 0.02m의 정사각형 단면을 지닌 길이 0.17m의 가로보를 부착하였다. 이 가로보는 케이블의 연결 및 추가 하중(1kg)을 연결하는

인가 시스템과 계측시스템은 Fig. 3과 같이 구조물에 배치하였다.

구조물의 가진은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 우측 단경간 중앙에서 전자식 진동시험기를 이용하여 상하방향으로 하중을 인가하였다. 이때의 구조물의 응답은 장경간 중앙에 가속도 센서를 설치하여 상하방향 가속도를 획득하였고, 중앙으로부터 우측으로 1, 2번 케이블에 부착된 로드셀로 케이블의 장력을 획득하였다.

3.3 손상데이터 획득 실험

통계적 패턴 인식 기술인 MDT을 이용한 구조물의 상태평가를 위해서는 기본 구조물 상태에서의 MD와 이를 이용한 관리차트의 구성이 선행되어야 한다. 또한, 이를 바탕으로 구조물이 손상된 상태의 데이터를 기반으로 한 MD를 비교하여야 한다. 이러한 과정을 실험적으로 진행하기 위하여 반복하중과 지진하중 조건에서 손상데이터 획득 실험을 진행하였으며, 이때 실험을 위한 케이블의 번호는 다음의 Fig. 4와 같다.

반복하중에 의한 실험은 20Hz 사인파로 10초 동안 구조물을 가진하는 방법으로 80회 진행하였다. 다음으로 지진하중 조건에 의한 실험은 El-centro 지진하중으로 구조물을 가진하는 방법으로 40회 진행하였다. 하중의 인가 횟수는 우측 단경간 케이블 로드셀이 부착된 방향의 케이블 6개가 손상되는 것 시점을 기준으로 하여 설정하였다. 이때, 획득된 무손상 데이터와 케이블의 손상으로 인한 데이터를 이용하여 MD를 계산하고, 이를 이용하여 관리차트를 구성하였다.

4. 실험 결과 및 통계적 패턴인식 기술의 성능 평가

4.1 실험결과

통계적 패턴인식 기술을 이용하여 사장교 구조물의 상태를 평가하기 위하여 반복하중 상태와 지진하중 상태에서 구조물의 응답을 획득하는 실험을 진행하였다. 먼저 대상 구조물을 20Hz의 반복하중으로 가진한 상태에서 실험을 진행하여 획득한 가속도와 케이블의 장력 응답을 다음의 Fig. 5에 그래프로 나타내었다.

Fig. 5의 그래프는 케이블이 손상되지 않은 상태의 데이터와 케이블이 손상된 상태의 데이터 중 2개의 케이블이 손상된 상태와 3개의 케이블이 손상된 상태를 기준으로 작성하였다. Figs. 5(a) and 5(b)에서 확인 할 수 있는 바와 같이, 케이블의 장력에서는 어느 정도의 케이블의 손상에 따른 차이를 보였으나, 가속도응답에서는 손상에 따른 차이를 확인 할 수 없었다.

다음으로 대상 구조물을 El-centro 지진하중으로 가진한 상태에서 실험을 진행하여 획득한 가속도와 케이블의 장력 응답을 다음의 Fig. 6에 그래프로 나타내었다.

Fig. 6의 그래프는 케이블이 손상되지 않은 상태의 데이터와

케이블이 손상된 상태의 데이터 중 4개의 케이블이 손상된 상태와 5개의 케이블이 손상된 상태를 기준으로 작성하였다. Fig. 6(a) and 6(b)에서 확인 할 수 있는 바와 같이, 케이블의 장력과 가속도응답은 손상에 따른 차이를 확인 할 수 없었다.

4.2 관리차트를 이용한 구조물 상태평가

앞선 4.1의 실험결과에서 확인 할 수 있는 바와 같이, 케이블의 장력과 중앙경간의 가속도응답으로 케이블의 손상에 따른 차이를

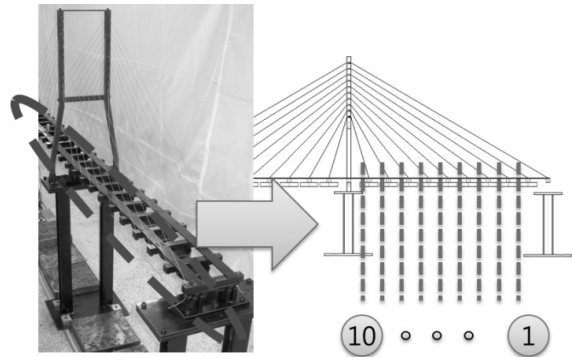
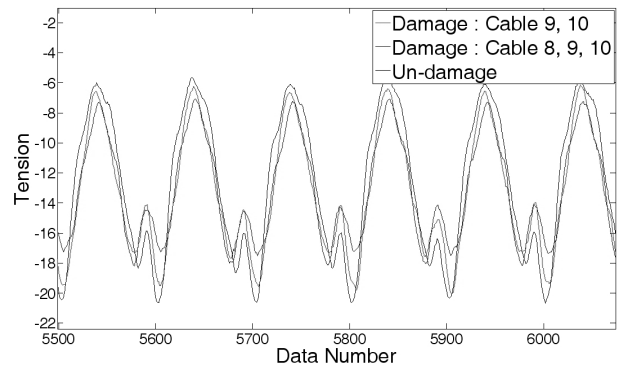
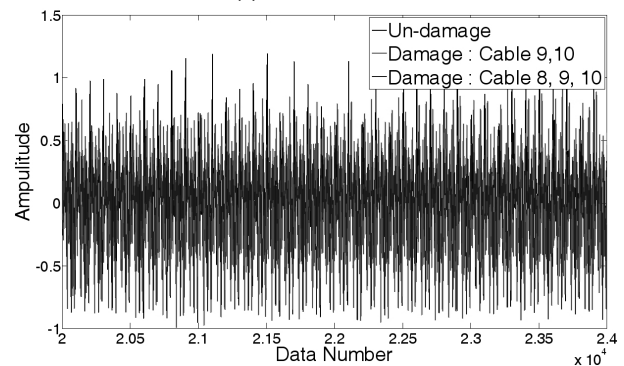


Fig. 4. Cable Number

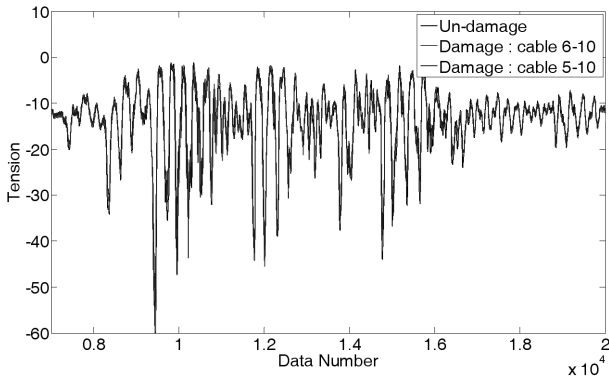


(a) Cable Tension

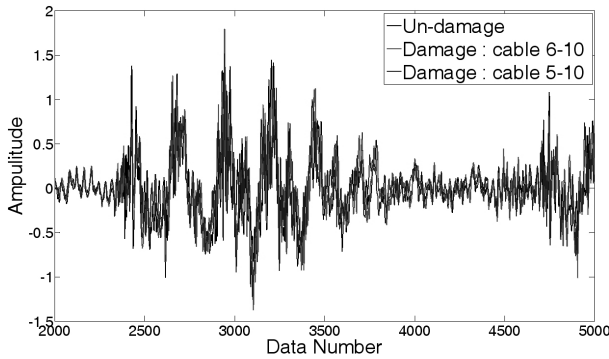


(b) Acceleration of the Center Span

Fig. 5. Response of Structures on General Random Load



(a) Cable Tension



(b) Acceleration of the Center Span

Fig. 6. Response of Structures on Earthquake Load

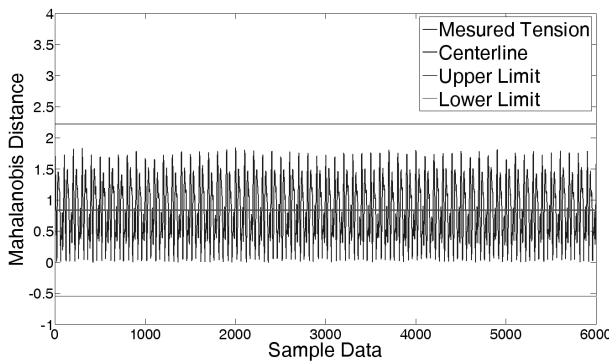


Fig. 7. Control Chart (using MDT)

확인 할 수 없었다. 구조물에서 획득된 데이터만으로 구조물의 상태를 평가 할 수 없는 상태에서 MDT와 IMDT를 이용하여 구조물의 상태를 평가해 보았다. 먼저, 반복하중 상태에서 획득한 데이터를 기반으로 MD를 산출하고 이를 이용하여 관리차트를 다음의 Fig. 7과 같이 구성하였다.

Fig. 7의 관리차트는 반복하중으로 구조물을 가진 상태에서 획득한 무손상 케이블 장력값을 Eq. (3)을 이용하여 MD를 산출하

고, 이를 바탕으로 Eqs. (5)-(7)에 따라 중심선과 상·하 한계선을 설정하였다. Fig. 7의 관리차트를 기준으로 반복하중 상태에서 케이블이 손상되었을 때 획득한 데이터의 MD값으로 구조물의 상태를 평가하였다. Fig. 8은 반복하중 상태에서의 케이블 손상에 따른 관리차트 결과이다.

Fig. 8의 관리차트는 케이블이 손상되지 않은 상태의 관리차트를 기반으로 하여 케이블의 손상 정도에 따라 총 5가지 조건으로 분류하여 구조물의 상태를 평가한 결과이다. Fig. 8에서 확인할 수 있는 바와 같이 MDT를 이용한 관리차트는 손상된 케이블의 수가 증가함에 따라 MD가 증가하였고, 케이블이 3개 이상 손상되는 경우 관리차트의 상한계선을 벗어남을 확인할 수 있다. 이는 케이블이 3개 이상 손상될 경우, 즉각적인 관리가 필요함을 의미한다.

Figs. 7 and 8과 동일한 방법으로 지진하중 상태에서의 구조물의 상태평가를 위한 관리차트를 케이블이 손상되지 않은 상태의 응답으로 구성하고, 이를 바탕으로 케이블의 손상에 따른 구조물의 상태를 평가하였다. Fig. 9 지진하중조건에서 구조물의 상태에 따른 MD로 구성된 관리차트이다.

Fig. 9의 관리차트는 케이블이 손상되지 않은 상태의 관리차트를 기반으로 하여 케이블의 손상 정도에 따라 총 5가지 조건으로 분류하여 구조물의 상태를 평가한 결과이다. Fig. 9에서 확인할 수 있는 바와 같이 지진하중 조건에서 MDT를 이용한 관리차트는 무손상 상태에서도 데이터 간의 변동이 매우 크기 때문에 관리차트의 구성이 정확이 이루어 지지 않고, 손상된 케이블의 수가 증가함에도 불구하고 케이블이 손상되지 않은 상태의 MD와 매우 유사한 값을 보임을 확인할 수 있다. 이는 기존의 MDT로는 지진하중과 같은 데이터 간의 변동성이 큰 경우에 구조물의 상태를 평가하기에는 어려움이 있다.

마지막으로 제안한 IMDT를 이용하여 구조물의 상태를 평가해 보았다. 평가를 위한 진행은 앞선 MD를 이용한 관리차트의 구성 및 케이블 손상에 따른 구조물의 상태평가 방법과 동일하다. 단, IMD산출하기 위하여 Eq. (4)를 이용하였고, 산출된 IMD를 바탕으로 케이블의 손상에 따른 구조물의 상태를 Fig. 10 and Table 1 과 같이 평가하였다.

Fig. 10의 관리차트는 제안한 IMDT를 케이블이 손상되지 않은 상태에서 관리차트를 구성하고, 케이블이 손상됨에 따른 IMD를 계산하여 구조물의 상태를 평가한 그래프이다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 IMDT 기반의 관리차트는 손상된 케이블의 수가 증가함에 따라 IMD가 상·하 한계선을 넘어서고 그 정도가 커짐을 확인할 수 있다. 또한, Table 1에서 보는 바와 같이 무손상 데이터를 기준으로 RMS값을 비교한 결과, 케이블의 손상이 증가할수록 수치가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이 값을 바탕으로 손상 정도를 계산한 결과 경간의 중앙부근의 케이블의 손상됨에

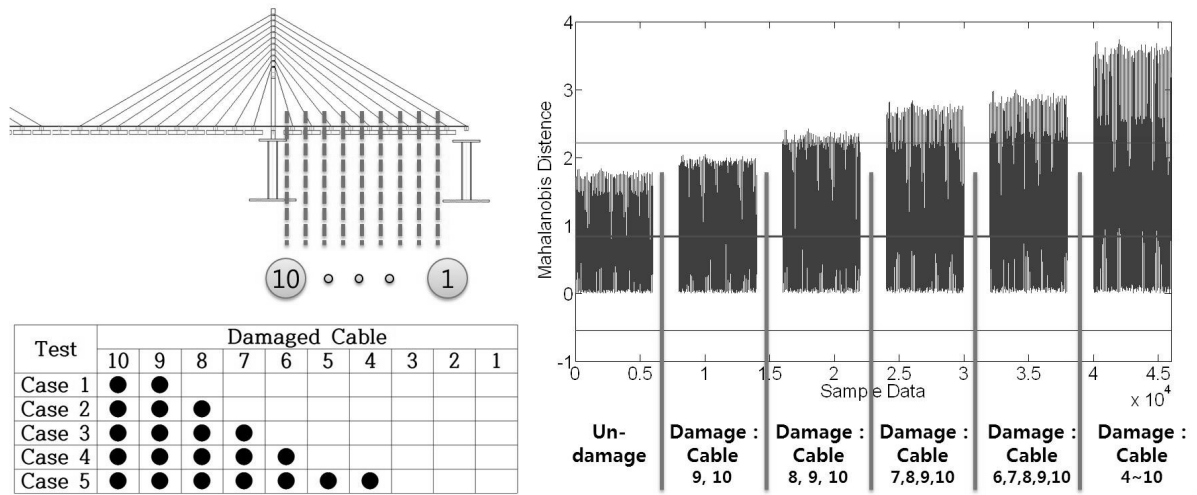


Fig. 8. Performance Evaluation of Control Charts on General Random Load

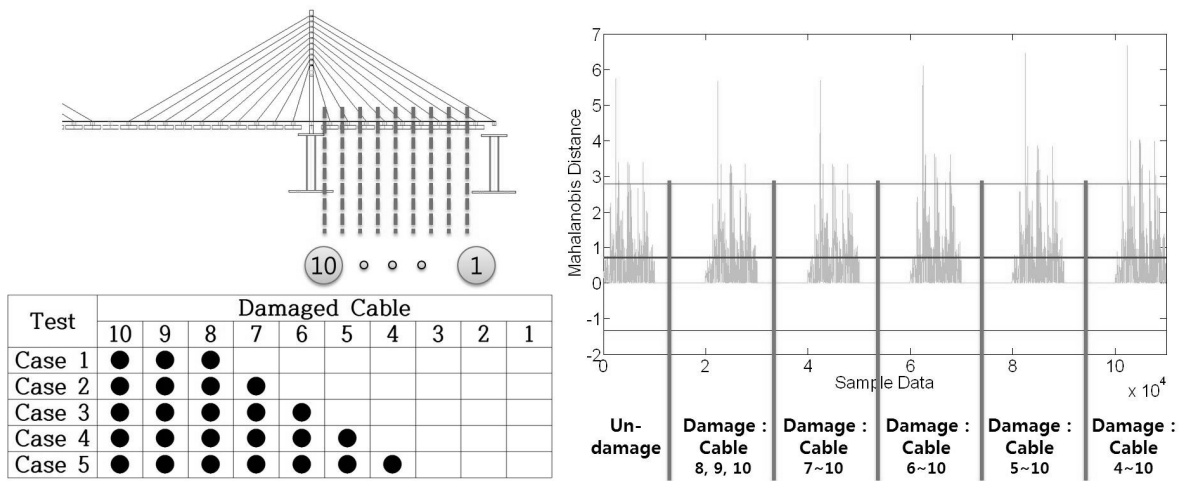


Fig. 9. Performance Evaluation of Control Charts on Earthquake Load

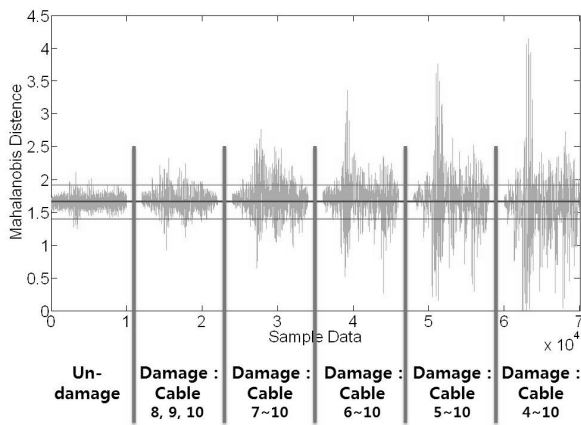


Fig. 10. Performance Evaluation of Control Charts (using IMDT)

Table 1. Comparison of RMS Value

Damaged cable	RMS	None	Damage rate (%)
None	0.0857	1	-
8,9,10	0.1329	1.55	35.48
7-10	0.2254	2.63	61.98
6-10	0.2556	2.98	66.44
5-10	0.3671	4.28	76.63
4-10	0.4597	5.36	81.34

따라 손상의 정도가 크게 증가하는 것을 확인 하였다. 이는 제안한 IMDT가 지진하중과 같은 데이터간의 변동성이 큰 경우에도 구조물의 상태를 정확하게 파악하였다.

5. 결론

본 논문에서는 통계적 패턴인식 기술을 이용하여 구조적으로 복잡한 사장교의 상태를 평가하고자 연구를 진행하였다. 연구에서 적용한 통계적 패턴인식 기술은 비교하고자 하는 데이터 간의 단순한 거리뿐 만 아니라, 변수의 특성을 나타내는 표준편차와 상관 계수가 함께 고려 될 수 있는 마할라노비스 거리 이론을 이용한 관리차트를 적용하였다. 또한, 기존의 마할라노비스 거리 이론의 한계를 극복하기 위하여 개선된 마할라노비스 거리 이론을 제안하고 이를 이용하여 관리차트를 구성하였으며, 이를 증명하기 위하여 국부 손상이 구조물에 미치는 영향을 알아보기 위한 손상평가 실험을 진행하여 통계적 패턴인식 데이터로 활용하였다. 그에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 통계적 패턴인식 기술인 마할라노비스 거리 이론을 이용한 관리차트는 반복하중과 같은 변동성이 작은 외부하중에 의한 구조물의 상태를 적절히 평가하는 것을 확인하였다. 그러나, 지진하중과 같은 변동성이 큰 외부하중으로 인한 구조물의 상태 평가에는 적용이 부적절함을 실험적으로 확인하였다.
- (2) 기존의 마할라노비스 거리 이론을 이용한 관리차트의 한계를 극복하기 위하여 제안한 개선된 마할라노비스 거리 이론은 지진하중과 같은 변동성이 큰 외부하중 상태에서의 구조물의 상태 판단에 우수한 성능을 보임을 확인 하였다.
- (3) 국부손상(케이블의 손상) 상태에서 구조물에 미치는 영향을 판단하기 위한 실험에서 개선된 마할라노비스 거리 이론을 이용한 관리차트는 손상된 케이블 및 손상된 케이블이 속해있는 경간이 아닌 중앙경간의 케이블 데이터만으로 구조물의 상태를 판단함으로써, 통계적 패턴인식 기술로서 적절함을 입증하였다.

이상의 결과를 통하여 본 논문에서 제안한 개선된 마할라노비스 거리 이론은 예측된 동적 응답을 사용하여 구조물의 손상유무를 판단하고, 관리차트를 통하여 현재 상태를 규명할 수 있으며, 국부 손상에 따른 구조물의 상태를 파악할 수 있는 통계적 패턴인식 기술로서의 효율성이 우수함을 입증하였다.

감사의 글

본 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 : NRF-2013R1A2A1A01016192

and NRF-2010-0024250). 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

References

- Anne, S., Kiremidjian, G. K. and Pooya, S. (2011). "A wireless structural monitoring system with embedded damage algorithms and decision support system." *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 7, No. 12, pp. 881-894.
- Charles, R. F. and Hoon, S. (2000). "Pattern recognition for structural health monitoring." *Workshop on Mitigation of Earthquake Disaster by Advanced Technologies*, Las Vegas, NV, USA, LA-UR-00-5565.
- De Lautour, O. R. and Omenzetter, P. (2008). "Visualisation and classification of dynamic structural health monitoring data for assessment of structural condition." *2008 NZSEE Conference*, p. 3.
- Heo, G. and Kim, C. (2012). "Designing a unified wireless system for vibration control." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 38, pp. 72-80.
- Hong, D. S. and Kim, J. T. (2010). "Structural health monitoring of full-scale concrete girder bridge using acceleration response." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 14, No. 1, pp. 165-174 (in Korean).
- Kim, H. S. (2011). *Bridge health monitoring through signal-based data analysis*, Master Dissertation, Inha University, Incheon, Korea.
- Mahalanobis, P. C. (1930). "On tests and measures of group divergence." *Journal of the Asiatic Society of Bengal*, Vol. 26, pp. 541-588.
- Nair, K. K. and Kiremidjian, A. S. (2007). "Time series-based structural damage detection algorithm using gaussian mixtures modeling." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 129, pp. 129-293.
- Ruotolo, R. and Surace, C. (1997). "Damage detection using singular value decomposition." *Proceedings of DAMAS '97*, University of Sheffield, UK, pp. 87-96.
- Sohn, H., Farrar, C. F., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R. and Czarnecki, J. J. (2004). *A review of structural health monitoring literature: 1996-2001*, Report LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA.
- Wang, Z. and Ong, K. C. G. (2009). "Structural damage detection using autoregressive-model-incorporating multivariate exponentially weighted moving average control chart." *Eng Struct*, Vol. 31, No. 5, pp. 1265-1275.
- Worden, K., Manson, G. and N. R. J. (2000). "Damage detection using outlier analysis." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 229, No. 3, pp. 647-667.