

확률론적 방법에 의한 교량계측시스템의 관리기준치 설정에 관한 연구

김행배¹, 송재호^{2*}

Study for Determination of Management Thresholds of Bridge Structural Health Monitoring System based on Probabilistic Method

Haeng-Bae Kim¹, Jae-Ho Song^{2*}

Abstract: Recently, structural health monitoring system(SHMS) has been applied cable bridges as the effective maintenance tool and the management threshold is considered to assess the status of the bridge in SHMS. The threshold is generally determined by the allowable limit based on design specification because there is no method and standard for threshold calculation. In case of the conventional thresholds, it is difficult to recognize the event, abnormal behavior and gradual damage within the threshold. Therefore, this study reviewed the problem of previous methods and proposed the advanced methodologies based on probabilistic approach for threshold calculation which can be applied to practice work. Gumbel distribution is adopted in order to calculate the threshold for caution and warning states considering the expectations for return periods of 50 and 100 years. The thresholds were individually determined for measurement data and data variation to detect the various abnormal behaviors within allowable range. Finally, it has confirmed that the thresholds by the proposed method is detectable the abnormal behavior of real-time measuring data from SHMS.

Keywords: Cable bridge, Structural health monitoring system, Management threshold, Gumbel distribution, Return period, Data variation

1. 서 론

교량기술의 발전과 더불어 교통량 증가와 물동량 증가로 인하여 장경간을 갖는 특수교량의 시공이 증가되고 있다. 특수교량은 케이블이 주요 구조부재로의 역할을 담당하며, 구조적인 측면에서 복잡한 자유도와 하중전달 메카니즘을 가지고 있어 설계, 시공 및 유지관리에 많은 기술력이 요구된다. 최근에는 설계 및 시공기술과 더불어 완공된 교량이 목표수명까지 효과적으로 운영될 수 있도록 지원하는 유지관리 기술에 대한 관심이 증가하고 있으며, 교량의 상시적인 유지관리 체계로서 계측시스템(structural health monitoring system)이 케이블 교량마다 활발히 도입되고 있는 상황이다.

일반적으로 교량에 구축되는 계측시스템은 구축시점에 따라 시공 중 계측시스템과 공용 중 계측시스템으로 구분할 수 있다. 시공 중에 구축되는 시공 중 계측시스템은 시공단계에 따른 구조물의 응답을 연속적으로 측정하여 시공과정에서 발생할 수 있는 안전사고를 예방하고, 설계에 준하여 시공이 적

절하게 이루어지는가에 대한 참고자료를 제공하는 목적으로 구축된다. 이러한 시공 중 계측시스템은 시공 완료 후 목적에 따라 철거되기도 하고 공용 중 계측시스템으로 이관되기도 한다. 한편, 공용 중 계측시스템은 교량 완공 직전에 구축을 진행하여 통상적으로 교량 개통 전에 시스템의 운영이 시작된다. 즉, 공용 중 계측시스템은 교량의 유지관리를 위한 목적으로 설치되는 것으로 모든 고정하중이 작용된 상태이기 때문에 대부분 활하중에 대한 교량의 응답을 측정하게 된다. 공용 중 계측시스템이 구축되면 측정된 계측결과는 관리기준치와 비교하여 교량의 안전성을 평가하게 되는데, 일반적으로 안전, 주의, 경고와 같이 교량의 상태를 3단계로 구분하고 주의치 및 경고치에 대한 기준치를 설정하여 각 단계별로 적절한 대응책을 마련하게 된다(Kong, 2008).

한편, 국내의 각종 시방서 및 설계기준에서는 교량에 구축된 계측센서의 관리기준치를 산정하는 기준과 방법에 대해 제시하고 있지 않다. 따라서 현재까지는 계측시스템의 관리기준치를 교량의 설계 및 해석자료를 바탕으로 계측센서가 설치된 부재의 허용치에 기초한 주의치 및 경고치가 설정되는 것이 일반적이다. 이와 같은 방식으로 개별 센서별로 설정된 관리기준치는 안전성(safety)을 포함한 교량의 상태를 파악하기 위한 기준으로 활용되며, 획득된 계측데이터가 관리기준치로 설정된 특정값을 초과하는가를 검토하는 절차치

¹정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정

²정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: jhsong@kumoh.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2016년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

관리방법으로 교량 유지관리 계측시스템이 운영된다.

그러나, 실제 교량의 유지관리 시에는 사용재료 및 구조부재의 저항능력과 관련된 안전성 뿐 아니라 안정성(stability)과 이상거동(abnormal behavior) 등을 복합적으로 고려하여 상태를 평가해야 하며, 기존의 절대치 관리방법에서 설계기준에서 제시된 허용치를 기반으로 설정된 관리기준치는 기준치 범위 내에서 발생된 교량의 이벤트, 이상거동 및 점진적으로 발생하는 손상 등과 같은 상태변화를 능동적으로 파악하기에는 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 절대치 관리에 있어 관리기준치 설정의 문제점을 고찰하여 실무에 효과적으로 적용가능한 개선된 관리기준치 설정 및 운영방법을 도출하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 확률론적 접근방법을 도입하였으며 계측데이터의 크기와 함께 구간변화율에 대한 관리기준치를 추가로 설정하여 교량의 상태를 평가하고 유지관리 계측시스템을 운영하는 방법을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 교량 유지관리 계측시스템의 관리기준치

교량 유지관리 계측시스템의 관리기준치는 교량의 특성, 외부조건, 자료의 변화속도 및 다양한 조건들을 검토하여 설정해야 하며, 설정된 관리기준치는 공용 중 교량의 안전성, 안정성 및 이상거동 등을 평가하기 위한 절대적인 척도로 활용된다. 계측시스템에서의 관리기준치는 계측센서로부터 얻어진 신호를 물리량으로 환산한 값과 비교하여 기준치 초과여부에 따라 현재 구조물의 상태, 즉 현시점에서 구조적으로 안전할가를 판단하게 된다. 또한, 관리기준치는 교량의 구조안전성 측면 뿐 아니라 계측시스템 자체의 이상여부 및 효율적인 운영에도 활용된다. 이러한 관리기준치는 통상적으로 일정기간의 계측결과에 대한 일간 최대변화폭과 연간 최대변화폭에 기초하여 식(1)과 식(2)와 같은 개념을 도입하여 계산하거나, 계측결과 및 경향과는 무관하게 설계기준에서 제시된 허용치 혹은 구조해석을 통해 산정할 수 있다.

$$\text{Daily threshold } (\alpha_1 \Delta_{mdt}) + (\alpha_2 \Delta_{mdp}) \quad (1)$$

$$\text{Yearly threshold } \alpha_1 (\Delta_{myt} + \Delta_{mdt}) + \alpha_2 \Delta_{mdp} \quad (2)$$

여기서, α_1 는 온도에 의한 변화폭 허용비, α_2 는 활하중에 의한 변화폭 허용비, Δ_{mdt} 은 온도에 의한 일일 최대변화폭, Δ_{myt} 는 온도에 의한 연간 최대 변화폭, Δ_{mdp} 는 활하중에 의한 일일 최대변화폭이다.

식 (1)과 식 (2)에서 알 수 있듯이 관리기준치는 허용비 α_1 과 α_2 의 크기에 매우 의존적이지만, 허용비에 설정에 대한 기준 및 근거는 전무하기 때문에 실무자는 공학적 근거보다는 경험적 판단에 입각하여 허용비를 결정할 수밖에 없으며, 이는 관리기준치의 신뢰성을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 따라서, 이러한 원인으로 실무에서는 일반적으로 설계기준에서 제시된 허용치에 기초하여 관리기준치를 설정하고 있는 상황이다.

Table 1은 교량 유지관리 계측시스템의 계측항목에 대한 관리기준치를 결정하는 전형적인 방법을 나타내었다. 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 관리기준치를 설정하기 위해서는 년단위의 계측데이터가 필요하지만, 계측시스템의 관리기준치는 구축 후 차량 운행 전에 설정되어야 하기 때문에 초기단계에서의 관리기준치를 설정함에 있어서는 식 (1)과 식 (2)를 사용하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 경험적인 수치를 적용하거나 도로교설계기준 등과 같은 각종 설계기준에서 제시하는 허용치를 기준으로 ‘경고’치를 우선적으로 설정한 후 ‘주의’치는 ‘경고’치의 특정 비율로 낮춰 적용하는 것이 일반적이다. 이 특정 비율은 일반적으로 약 80% 수준이 적용되지만, 케이블 장력의 경우에 일반적으로 허용치에 근접하게 장력이 도입되기 때문에 주의치를 경고치의 80%로 적용하게 되면 도입장력보다 주의치가 작아질 수 있으므로 80% 비율을 일괄적용하기도 어려운 상황이 종종 존재한다.

결국, 관리기준치는 초기단계에서는 설계기준에 입각하여 설정될 수밖에 없는 상황이며, 이후 차량통행과 같은 활하중에 의한 응답, 즉 계측데이터가 누적된 이후에는 합리적이고 공학적인 방법에 의해 이를 재설정하는 것이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 관리기준치 설정에 있어 매개변수들의 불

Table 1 Conventional methodology of threshold determination

Data	Member	Warning	Caution
Acceleration	Pylon, girder	Empirical value	80% of warning
Strain	Pylon, girder	Allowable stress	80% of warning
Deflection	Girder	Allowable deflection	80% of warning
Thermal displacement	Girder	Design distance of expansion joint	80% of warning
Temperature	Pylon, girder	-	-
Cable force	Cable, hanger	Allowable force	80% of warning
Slope	Pylon, girder	Analysis result	80% of warning
Displacement	Pylon, girder	Analysis result	80% of warning
Wind speed	Deck, pylon	Max. instantaneous wind speed(30 m/s)	20m/s
Earthquake	Foundation	MMI scale 5	MMI scale 4

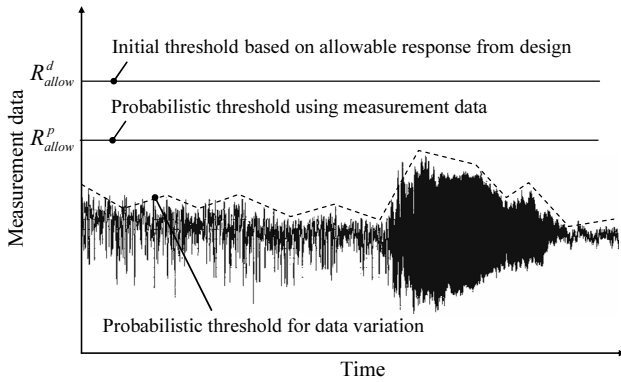


Fig. 1 Conceptual diagram of probabilistic thresholds calculation

확실성을 최대한 배제하고 실측데이터를 이용하여 교량의 실제 거동에 기초한 합리적인 관리기준치를 산정할 수 있도록 재현빈도에 기초한 확률론적인 방법을 도입하였으며, 이러한 확률론적 방법은 계측데이터에 직접 적용되어 데이터의 재현 시간 내에 발생할 수 있는 계측데이터 범위와 함께 계측데이터의 구간변화량에 대한 기준치를 산정하여 관리하는 방법론을 제시하였다. Fig. 1은 본 연구에서 적용한 관리기준치에 대한 개념도이다. 기존의 관리기준치는 설계허용치를 기준으로 설정되기 때문에 매우 보수적인 기준치가 될 수 있으며, 만약 교량의 어떠한 이벤트가 발생하더라도 그로인한 응답이 기준치 범위 내라면 모든 경우에 안전이라고 판단하기 때문에 여러 요인에 의해 발생하는 교량의 상태변화를 파악하기 어렵다는 한계가 존재한다(Wang and et al., 2007).

한편, 본 연구에서와 같이 실측데이터에 확률론적 방법을 도입하여 관리기준치를 설정하게 되면, 그동안 안전하고 정상적인 상태에서의 누적된 실측데이터를 기반으로 발생할 수 있는 최대, 최소치를 산정하여 이를 관리기준치로 설정하기 때문에 교량의 평상시 거동에 근거한 이상거동을 파악할 수 있다. 또한, 계측데이터의 절대크기 뿐 아니라 특정 계측기간 동안 발생한 데이터의 구간변화량은 이상거동을 파악할 수 있는 중요한 지표로 활용될 수 있기 때문에 본 연구에서는 계측데이터의 절대크기 뿐 아니라 구간변화량 자체를 변수로 한 확률분석을 추가로 실시하여 이에 대한 관리기준치를 별도로 적용하는 다중 관리기준치 설정방법을 적용하였다.

2.2 초기 관리기준치 설정

계측데이터를 이용하여 교량의 안전도를 평가함에 있어서 다양한 방법이 존재하지만 실무에서는 관리기준치로 설정된 특정값을 기반으로 이에 대한 초과여부에 따라 상태를 파악하는 절대치 관리방법이 신속하고 직관적인 평가를 할 수 있기 때문에 효과적으로 적용될 수 있다. 절대치 관리방법에서는 상태 파악의 기준이 되는 관리기준치가 매우 중요하지만,

기존의 관리기준치 설정에 있어서는 많은 부분을 설계기준과 경험적인 판단에 의존하고 있기 때문에 설정근거와 적용성에 대한 타당성 검토가 필요하다고 할 수 있다. 대표적인 예로 가속도의 경우 ‘케이블강교량 설계지침’에서 유일하게 가속도의 크기에 대한 기준을 제시하고 있지만, 제시된 기준인 0.5gal은 풍하중에 대한 사용성 기준이기 때문에 운행차량에 의해 발생하는 가속도 크기 제한 기준으로 적용할 수 없다. 그 외 응력의 경우는 설계기준에서 제시된 허용응력을 기준으로 관리기준치가 설정되지만, 응력을 측정하기 위한 변형률계는 대부분이 고정하중이 작용된 이후에 설치되기 때문에 활하중에 의한 응력만으로 관리되어야 하지만, 설계기준에서는 활하중에 대한 허용응력을 별도로 제시하고 있지 않다. 처짐의 경우에도 ‘도로교설계기준’에서 제시하고 있는 활하중에 의한 사용성 기준의 처짐제한값을 단순 사용하고 있으므로 교량의 이상거동을 파악하기 위한 관리기준치로 적용하기에는 무리가 있다.

따라서, 본 연구에서는 Table 2와 같이 초기 관리기준치 설정에 있어서 기존의 설정방법을 보완한 수정된 관리기준치 설정방법을 제안하였다. Table 2에서 가속도의 경우에는 차량하중에 대한 진동기준이 없기 때문에 차량운행으로 발생한

Table 2 Modified methodology of threshold determination

Data	Warning	Caution
Acceleration	Double value of the maximum of previous data	80% of warning
Strain	Allowable stress	Stress range for temp. and live load
Deflection	Analysis result for the combined load of temp. and design live load	Deflection for buffeting vibration
Thermal displacement	Thermal displacement for temp. range of warning	Thermal displacement for temp. range of caution
Temperature	Temp. range of previous data	Temp. range of design spec.
Cable force	Allowable cable force	Changes of cable force for temp. and design live load
Slope	Max. slope for the combined load of live, temp. and wind loads	80% of warning
Displacement	Max. displacement for load combination of live, temp. and wind loads	80% of warning
Wind speed	Average wind speed for 10min. at deck level(30 m/s)	Average wind speed for 10min. at deck level(20 m/s)
Earthquake	MMI scale 5	MMI scale 4

기존 계측데이터를 바탕으로 관리기준치를 산정하며, 경고치를 기존 데이터의 2배로 설정하였다.

처짐의 경우에는 공용 중 교량의 처짐을 유발시키는 가장 큰 요인인 온도와 활하중에 대한 최대 처짐값을 해석적으로 산정하여 이를 경고치로 적용하였으며, 주의치의 경우 풍동 실험 혹은 해석을 통해 풍속 45~50 m/s 수준에서의 베펜딩 진동 변위를 주의치로 설정하였다. 주탑, 보강거더 및 교각 등의 변위와 경사도는 활하중, 온도하중 및 풍하중에 대한 최대응답을 해석을 통해 설정하도록 하였다.

2.3 확률분석에 의한 관리기준치

전술한 바와 같이 교량의 유지관리 계측시스템이 구축된 직후에는 축적된 계측데이터가 없기 때문에 설계기준 등을 기반으로 초기 관리기준치를 설정할 수 밖에 없다. 그러나, 일정기간 동안의 계측데이터가 축적된 이후에는 실측데이터를 적용한 확률분석을 통해 초기에 설정된 관리기준치를 수정한 2차 관리기준치를 산정하는 것이 타당하다. 이러한 2차 관리기준치는 초기에 설정된 관리기준치를 실제 교량의 거동을 고려한 보다 합리적인 수준으로 조절한 것으로 교량의 안전성, 안정성 및 이상거동과 더불어 계측시스템의 신뢰성을 파악할 수 있는 기준으로 활용이 가능하다.

2.3.1 검벨분포를 이용한 재현빈도 분석

계측시스템으로부터 취득된 데이터를 분석함에 있어 구조적 안전성을 판단하는 관점에서는 계측데이터의 최대치와 최소치인 극치 분포가 중요하다. 즉, 계측데이터에서 최대 및 최소 진동가속도, 최대최소 응력, 최대처짐 등의 값과 분포가 관리기준치와 직접적인 상관관계를 갖는다고 할 수 있다. 이와 같이 최대와 최소의 양극치값의 분포는 극치분포(extreme value distribution)로 표현될 수 있으며, 가장 대표적인 극치분포의 형태로는 검벨분포(Gumbel distribution)가 있다. 검벨분포는 빈도해석에 많이 사용되는 분포로서 매개변수 β 가 0이며 Fisher-Tippett Type-I 분포로 알려져 있다. 일반적으로 이상현상 때문에 발생한 계측데이터의 경우에는 최대 및 최소치의 상하한을 정의할 수 없기 때문에 연간 단위의 데이터 빈도 분석에 검벨분포와 같은 확률론적 접근방법을 적용하면 효과적으로 상하한치를 추론가능하다. 검벨분포의 확률밀도 함수와 누적분포함수는 식 (3)과 식 (4)와 같다(Heo, and et al., 2008).

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left\{-\frac{(x-\xi)}{\alpha} - \exp\left[-\frac{(x-\xi)}{\alpha}\right]\right\} \quad (3)$$

$$(-\infty < x < \infty)$$

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{(x-\xi)}{\alpha}\right]\right\} \quad (4)$$

여기서, α 는 $\alpha > 0$ 인 축척매개변수이며, ξ 는 최대확률(mode)이 발생하는 위치를 표시하는 위치변수이다.

본 연구에서는 재현빈도 분석에 식 (5)와 같이 극치값과 평균값과의 차이로 표현되는 데이터 변화량에 대하여 검벨분포를 이용한 재현빈도 N 년에 따른 최대 변화량을 분석한 후, 식 (6)과 같이 계측데이터의 극치 평균값에 재현기간에 따른 변화량을 반영한 수정된 관리기준치 산정식을 유도하였다.

$$\Delta_i^e = X_i^e - \bar{X}_i \quad (5)$$

여기서, Δ_i^e 는 i 기간 동안에 최대 데이터 변화량, X_i^e 는 i 기간 동안의 극치값, \bar{X}_i 는 i 기간 동안의 데이터 평균값이다.

$$X_{threshold} = \bar{X} + \{X^e - \bar{X}\}_N = \bar{X} + \Delta_N^e \quad (6)$$

여기서, \bar{X} 는 분석기간 동안의 극치 평균값, 검벨분포에 의한 Δ_N^e 는 재현기간 N 년에서의 극치 변화량이다.

본 연구에서는 실제 국내의 공용 중인 ○○교량에 구축된 교량 유지관리 계측시스템을 통해 약 20여개월간의 실측 데이터를 취득하여 2차 관리기준치 산정을 위한 검벨분포를 이용한 재현빈도 분석을 수행하였다. Fig. 2는 계측센서별로 20~25개월간의 실제 계측데이터이며 원시데이터를 분석필요한 공학적 단위인 가속도, 변형률, 처짐, 온도, 케이블 장력 및 경사각으로 환산된 데이터로서 확률분석의 입력자료로 처리된 월별 평균값, 최대값 및 최소값을 나타낸다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이, 교량의 경우 고정하중에 비하여 활하중비가 작기 때문에 대부분의 계측데이터는 온도변화에 의존적 거동을 보인다. Fig. 2(a)의 가속도 데이터는 차량운행에 따른 진동이 계측결과의 극값을 형성하므로 온도에 의한 거동경향이 상대적으로 적고, 양과 음의 방향으로 조화진동을 하기 때문에 평균값이 0이 가깝다는 것을 알 수 있다. Fig. 2(f)의 주탑경사의 경우 전형적인 온도거동 경향이 나타나지만, 기울기가 발생하는 방향이 대칭적으로 발생하기 때문에 평균값은 0이 가까운 값을 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 2의 데이터를 이용하여 극치변화량을 산정하고 이에 대한 검벨분포를 이용한 재현기간에 대한 기댓값을 분석한 결과는 Table 3과 같다. 일반적으로 교량은 내구연한 100년에 대해 설계되므로 본 연구에서는 재현기간은 각각 50년, 100년, 200년을 고려하였으며, 산정된 관리기준치의 비교를 위해

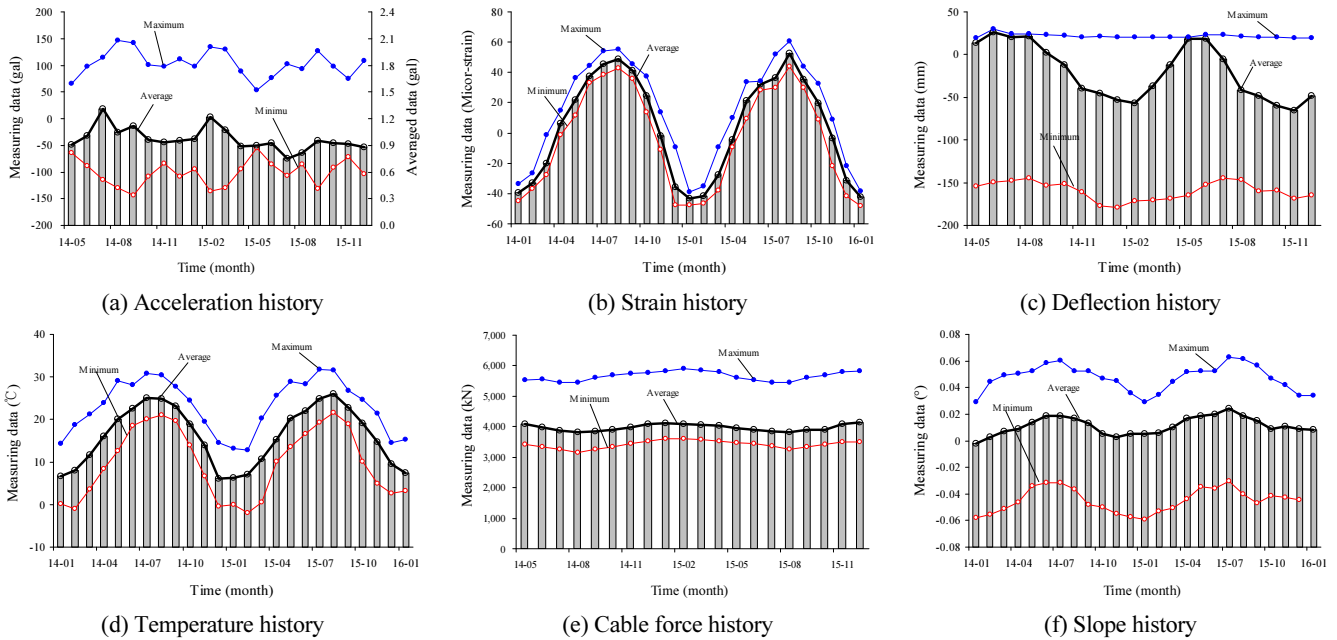


Fig. 2 Long-term measurement data from bridge structural health monitoring system

Table 3 Probabilistic thresholds and expectations according to return periods by Gumbel distribution

Sensors	Max. average	Min. average	Expectations				Initial threshold				Probabilistic threshold			
			50 years		100 years		Caution		Warning		Caution		Warning	
			Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Accelerometer	+146.4	-146.4	+249.7	-249.7	+266.6	-266.6	+450.0	-450.0	+500.0	-500.0	+396.1	-396.1	+412.0	-412.0
Strain gauge	+52.8	-43.5	+38.5	-24.9	+41.8	-26.9	+81.8	-414.4	+102.3	-518.0	+91.2	-68.4	+94.6	-70.4
Deflection meter	+32.2	-65.2	+248.9	-301.5	+272.8	-320.4	+860.0	-860.0	+1,075.0	-1,075.0	+281.1	-366.6	+305.0	-385.6
Thermometer	+26.1	+6.1	+16.7	-17.7	+17.9	-19.1	-	-	-	-	+42.8	-11.6	+43.9	-12.9
Cable force meter	+4,152.4	+3,814.3	+2,270.5	-920.9	+2,338.1	-964.2	+6,073.1	-	+6,748.1	-	+6,422.9	+2,893.4	+6,490.5	-2,850.2
Tilt meter	+0.024	-0.002	+0.079	-0.083	+0.088	-0.086	+0.17	-0.17	+0.19	-0.19	+0.103	-0.085	+0.107	-0.088

초기관리기준치와 확률분석에 의한 관리기준치를 같이 정리하였다. 한편, 본 연구에서는 재현주기 100년의 기댓값을 적용하여 경고값을 계산하였으며, 이는 50년 동안 100년 재현빈도의 값을 초과할 확률이 약 40% 정도라는 것을 의미한다.

Table 3에서와 같이 확률분포에 의해 재산정된 경고 관리기준치는 초기 관리기준치보다 더 작은 값으로 산정되었고, 주의 관리기준치의 경우에는 일부 초기 관리기준치보다 다소 큰 값으로 산정되었다. 그러나, 전반적으로 건전한 교량상태에 대한 실측 데이터를 이용하여 확률분석을 하였기 때문에 계산된 관리기준치는 교량의 실제 거동을 보다 정확히 반영할 수 있는 결과이며, 이를 통해 교량의 이상거동과 함께 계측시스템의 이상거동에 대한 판단도 가능하다. 또한 Table 3에서와 같이 기존의 설계 허용값에 근거한 초기 관리기준치에서는 온도범위와 최소장력값에 대해서는 관리기준치를 제시하기 어려운 점도 존재하는 반면, 확률론적 접근방법을 도입

한 경우에는 실측 데이터를 기반으로 온도의 변화폭, 케이블의 장력변동폭 등을 포함한 모든 항목에 대해서 계측된 데이터의 분포경향을 바탕으로 재현기간에 따른 기댓값을 산정하기 때문에 모든 계측항목에 대한 관리기준치를 설정 가능하다. 특히 가속도의 경우에는 경험적으로 설정되었던 기준치를 공학적인 근거에 의해 설정이 가능하며, 변형률의 경우에는 허용응력값으로 단순히 설정된 보수적인 값에서 실제 응력변동의 경향을 반영한 관리기준으로 수정 적용할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

2.3.2 검별분포를 이용한 구간변화율의 재현빈도 분석

전술한 관리기준치는 모두 계측데이터와 관리기준치를 직접 비교하여 교량의 상태를 파악하는 단순한 절대치 관리방법에 활용된다. 복잡한 분석이 요구되는 실시간 추세분석과 같은 기법들은 복잡한 실시간 추적알고리즘이 요구되기 때문

에 활용성이 낮기 때문이다. 이러한 절대치 관리는 교량의 상태를 직관적으로 파악할 수 있고, 단순하고 손쉽게 적용 가능하며 해당 분야에 대한 공학적 수준에 크게 영향을 받지 않으므로 실무에 효과적으로 사용될 수 있다. 그러나, 절대치 관리 방법에서는 관리기준치를 초과하지 않는 모든 데이터를 정상 및 안전한 상태로 간주하기 때문에 관리기준치 범위 내에서 발생하는 이상거동 및 점진적으로 발생하는 강성저하 등은 파악하기 어려운 단점이 존재한다. 이러한 이상거동은 계측 데이터의 경향분석을 통해서만 파악이 가능하며 본 연구에서는 실무에서 절대치 관리방법으로 이상거동을 파악할 수 있도록 계측데이터에서 구간변화율을 추가적인 데이터로 생성한 후 이에 대한 확률론적 분석을 수행하여 산정된 재현기간 별 기댓값을 기준으로 추가적인 관리기준치를 설정하였다. 임의의 데이터에서 구간변화율은 식 (7)과 같고, 이를 통해 i 기간 동안의 최대 구간변화율 s_i^e 는 식 (8)과 같이 표현될 수 있

다(Suh and Park, 2013).

$$S_i = \frac{X_i - X_{i-1}}{i - 1} \quad (7)$$

$$s_i^{\max} = \text{Max}(S_i^e, \bar{S}_i) \quad (8)$$

여기서, S_i^e 는 i 기간 동안의 구간변화율 극값, \bar{S}_i 는 i 기간 동안의 구간변화율 평균값이다. 식 (7)과 식 (8)로 산정된 확률 변수는 검별분포를 이용한 재현빈도 분석을 통해 식 (9)와 같은 구간변화율에 기초한 이상거동에 대한 관리기준치가 유도 된다.

$$S_{\text{threshold}} = \bar{S}^e + \{S^e - \bar{S}\}_N = \bar{S}^e + s_N^e \quad (9)$$

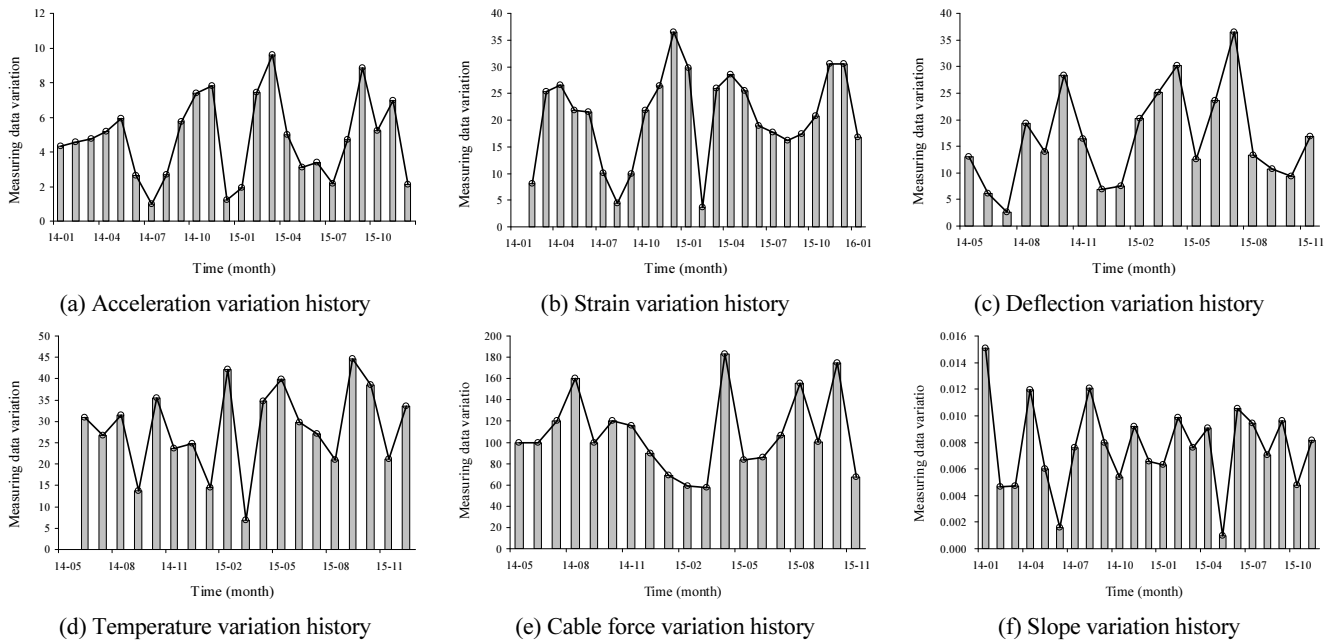


Fig. 3 Variations of long-term measurement data from bridge structural health monitoring system

Table 4 Probabilistic thresholds and expectation for data variations according to return periods by Gumbel distribution

Sensors	Max. average	Min. average	Expectations				Threshold for data variation				Probabilistic threshold			
			50 years		100 years		Caution		Warning		Caution		Warning	
			Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Accelerometer	+44.6	-44.6	+92.3	-92.3	+99.6	-99.6	+136.9	-136.9	+144.3	-144.3	+396.1	-396.1	+412.0	-412.0
Strain gauge	+25.9	-34.0	+31.5	-18.7	+34.5	-20.5	+57.4	-52.7	+60.4	-54.5	+91.2	-68.4	+94.6	-70.4
Deflection meter	+44.2	-36.5	+67.8	-67.2	+74.0	-73.3	+112.0	-103.7	+118.2	-109.8	+281.1	-366.6	+305.0	-385.6
Thermometer	+4.97	+7.8	+6.5	-8.0	+7.1	-8.8	+11.5	+12.1	-15.8	-16.6	+42.8	-11.6	+43.9	-12.9
Cable force meter	+175.0	-99.9	+281.6	-184.0	+308.3	-200.7	+456.6	-283.9	+483.3	-300.6	+6,422.9	+2,893.4	+6,490.5	-2,850.2
Tilt meter	+0.007	-0.008	+0.0189	-0.0167	+0.0207	-0.0182	+0.0259	-0.0247	+0.0277	-0.0262	+0.103	-0.085	+0.107	-0.088

여기서, $\overline{s^c}$ 는 분석기간 동안의 구간변화율 극값의 평균값, $s_{N^c}^e$ 는 검별분포에 의한 재현기간 N 년에서의 구간변화율 극값의 변화량이다.

Fig. 3은 Fig. 2의 데이터의 구간변화율이며 월별 변화량의 크기를 보다 명확하게 파악하기 위하여 비정규화된 데이터이다. Fig. 3에서의 구간변화량은 추가적으로 생성된 계측데이터로 확률분석의 확률변수가 되며 검별분포를 이용한 재현주기 분석 결과는 Table 4와 같다.

즉 절대치 관리방법으로 교량의 안전성과 더불어 이상거동에 대한 평가하기 위해서는 Table 4에서와 같이 계측데이터 자체의 크기와 더불어 구간변화에 따른 관리기준치를 모두 적용하는 것이 바람직하다. 구간변화율에 대한 관리기준치는 그동안의 누적된 계측데이터의 경향으로부터 재현기간 내 발생할 수 있는 데이터의 변동크기를 나타내므로, 이를 이용하면 교량의 이상거동과 이상데이터를 추출하는데 효과적으로 적용가능하다.

2.4 확률론적 관리기준치의 적용 및 고찰

본 연구에서는 제한한 확률론적 접근방법을 통해 산정된 관리기준치의 적용성을 검토하기 위하여 □□교량의 실측 데이터에 확률분석을 통해 산정된 관리기준치를 적용하여 교량의 상태평가를 수행하였다. 산정된 관리기준치의 적용성을 명확히 검토하기 위해서는 공용 중의 관리기준치 범위 내에서 발생한 이상거동과 관련된 데이터가 필요하지만, 실제 교량에서 이상거동이 발생한 사례는 많지 않기 때문에 본 연구에서는 □□교량에서 시공 중에 포장시공으로 인하여 계측결과와 경향이 크게 변화된 사례를 활용한 것이다. 실측된 데이터에 초기 관리기준치, 확률론적 관리기준치 및 구간변화율 관리기준치를 함께 도시한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서는 설계기준에서의 부재 허용응력을 기준으로 328 MPa를 관리기준으로 설정할 경우, 최종적인 계측데이터는 약 300 MPa의 범위로 안전한 상태라 판단할 수 있다. 실제로 부재가 허용응력을 초과하지 않았기 때문에 구조적 안전성 측면에서는 문제가 없다고 판단할 수 있지만, 초기의 100 MPa 범위의 데이터에 급격한 변화가 발생하였음에도 불구하고 관리기준치를 초과하지 않았기 때문에 계측시스템에서는 이상여부의 감지가 불가능하다.

반면, Fig. 4(a)와 같이 실측 데이터를 확률분석하여 50년 재현빈도에 대한 기댓값을 적용한 관리기준치는 137.31 MPa로 산정할 수 있으며, 이 관리기준치를 데이터에 적용할 경우 급격한 데이터 변화가 발생된 구간에서 이상거동이 발생한 것을 감지 가능하며, 특히 Fig. 4(b)의 구간 변화율을 적용한 경우에도 급격한 데이터 변화가 발생된 시점에서 비정상적인

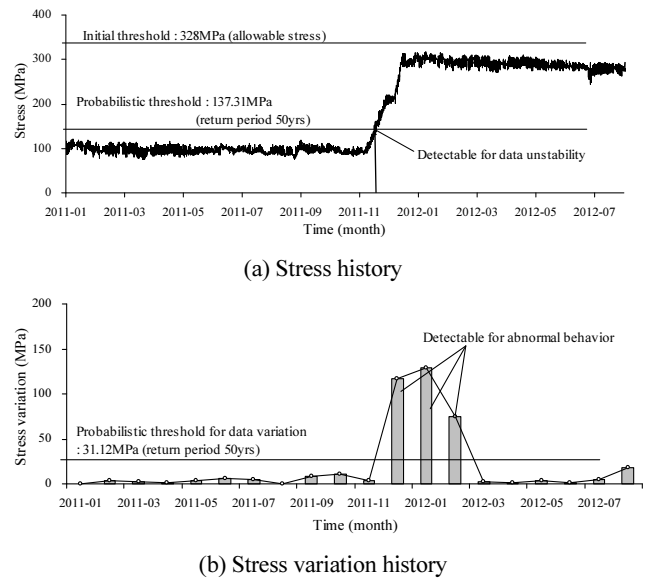


Fig. 4 Application of the proposed thresholds for field measured data

거동이라는 것을 명확하게 파악할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 이상거동 판정은 교량 뿐 아니라 운영 중인 교량 유지관리 계측시스템의 이상여부를 파악하여 적절한 점검 및 보수 시점을 결정하는데 중요한 참고자료로 활용될 수 있다. 또한, 이상거동 판정시에는 신속한 데이터 분석을 통해 유지관리 계측시스템 운영에 있어 데이터의 신뢰도가 지속될 수 있도록 해야 한다.

3. 결론

본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- 1) 설계기준에서 제시된 허용치를 기반으로 설정된 관리기준치는 기준치 범위 내에서 발생한 교량의 이벤트, 이상거동 및 점진적으로 발생하는 손상 등과 같은 상태변화를 능동적으로 파악하기에는 한계가 있으므로, 본 연구에서는 기존의 절대치 관리에 있어 관리기준치 설정의 문제점을 고찰하여 실무에 효과적으로 적용가능한 개선된 관리기준치 설정 및 운영방법으로 확률론적 접근방법에 의한 관리기준치 산정방법을 제안하였다.
- 2) 일정기간동안 누적된 실측 데이터가 없는 초기에 설정된 관리기준치는 운영 중에 실측 데이터를 기반으로 재설정되어야 하는 것이 타당하다. 실측 데이터의 확률분석시 대표적인 극치분포인 검별분포를 이용하였으며, 재현빈도 50년, 100년의 기댓값을 사용하여 100년 내구연한 교량의

주의, 경고치를 산정하였으며, 설계허용치 범위 내에서 발생하는 이상거동을 감지할 수 있도록 계측데이터와 계측데이터의 구간변화율에 대한 관리기준치를 각각 설정하였다.

- 3) 제안된 방법으로 산정된 관리기준치의 적용성을 검증하기 위하여 설계허용치 범위 내에서 급격한 데이터 변화가 발생된 실측 데이터를 확보하여 본 연구에서 산정한 관리기준치에 적용한 결과 통상적인 상태와 비교하여 비정상적인 데이터가 발생한 것을 절대치 관리로도 파악할 수 없다는 것을 확인하였으므로, 본 연구에서 제안된 방법은 교량과 유지관리 계측시스템의 비정상적인 이상거동을 능동적이고 신속하게 감지할 수 있어 실무에 효과적으로 적용가능할 것으로 판단된다.
- 4) 한편, 본 연구의 방법론으로 산정된 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 데이터의 샘플수가 많이 축적될 수록 유리하기 때문에 추후 더 많은 계측데이터가 축적될 수록 보다 신뢰성 있는 관리기준치가 설정될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 교량의 성능은 시간이 경과함에 따라 변화하기 때문에 관리기준치도 연단위로 축적된 데이터를 바탕으로 주기적으로 재설정하여 현재의 교량 상태를 반영하는 것이 바람직하며, 특히 교량이 노후화를 고려할 때 실측 데이터를 바탕으로 합리적인 관리기준치를 설정하는 것은 의미있는 접근이라 할 수 있다.

References

1. Heo, J. H., Lee, D. J., Shin, H. and Nam, W. (2008), A Study on Uncertainty of Risk of Failure Based on Gumbel Distribution, *Journal of Korea Water Resource Association*, 39(8), 659-668.
2. Kong, B. S. (2008), Analysis of New Health Monitoring System for Long Span Bridge over the Sea, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 22(5), 142-147.
3. KRTA (2012), Korea Bridge Design Specification, Korea Road and Traffic Association, Seoul, 5-49.
4. Suh, D. H. and Park, C. B. (2013), A Novel Method of Basic Probability Assignment Calculation with Signal Variation Rate, *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, 8(3), 465-470.
5. Svoboda, V., Petrasek, P. (2005), Bridge Structure State Monitoring, *Conditioning Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, Cranfield, 18, 579-588.
6. Wang, Q., Huang, F. and Gao, Y. (2007), Threshold Value Classification of Bridge Health Monitoring, *Proceedings of International Conference on Health Monitoring of Structure Material and Environment*, Southeast University Press, 1, 337-341.

Received : 02/11/2016

Revised : 02/19/2016

Accepted : 02/22/2016

요 지 : 최근 건설되는 특수교량에는 상시적인 유지관리 체계로서 계측시스템이 활발히 도입되고 있는 상황이다. 일반적으로 계측시스템을 이용한 교량 유지관리 시에는 관리기준치를 설정하여 교량의 상태를 평가하게 되지만, 관리기준치 설정 기준과 방법이 없어 설계허용값에 근거하여 단순하게 설정되고 있는 실정이다. 기존의 방법으로 설정된 관리기준치를 적용할 경우 관리기준치 범위 내에서 발생된 이벤트, 이상 거동 및 점진적으로 발생하는 손상 등과 같은 교량의 상태변화를 파악하기에는 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 절대치 관리에 있어 관리기준치 설정의 문제점을 고찰하여 실무에 효과적으로 적용가능한 개선된 관리기준치 설정 및 운영방법을 도출하였다. 개선된 관리기준치 설정을 위해 검벨분포를 사용한 확률론적 접근방법을 도입하여 재현빈도 50년, 100년의 기댓값에 대한 교량의 주의, 경고치를 산정하였다. 본 연구에서의 관리기준치는 설계허용치 범위 내에서 발생하는 이상거동을 감지할 수 있도록 계측데이터와 계측데이터의 구간변화율에 대한 관리기준치를 각각 설정되었으며, 제안된 방법으로 산정된 관리기준치는 실측 데이터에 대입하여 비정상적인 데이터의 발생여부를 적절하게 파악할 수 있다는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 특수교, 계측시스템, 관리기준치, 검벨분포, 재현빈도, 구간변화량
