장기계측자료 분석을 통한 케이블지지교량 주요 구조부재에 설치된 지진가속도계측기 재난관리 기준 제안

Proposal of Disaster Management Criteria of Seismic Accelerometers Installed on the Primary Structural Elements of Cable-Supported Bridges Based on Long-Term Data

이승한* · 이덕근** · 박성우*** · 박광연****

Lee, Seung Han*, Lee, Deok Keun**, Park, Sung Woo***, and Park, Kwang-yeun****

Abstract

This study presents a proposal of disaster management criteria of seismic accelerometers installed on primary structural elements of cable-supported bridges. Extreme value distributions of accelerations are estimated with respect to 1 month of a reference time period based on a statistical estimation method that uses the long-term records of acceleration measured at the target cable-supported bridges. Extreme value distributions of the acceleration with respect to reference time periods of 100 years and 1000 years are extrapolated by applying extreme value theory, and the disaster management criteria are proposed based on the mean values of the estimated extreme value distributions of the acceleration. The validity of the proposed disaster management criteria is verified through comparison with the peak values of recorded accelerations during the Gyeongju and Pohang earthquakes.

Key words : Cable-supported Bridge, Seismic Accelerometers, Disaster Management Criteria, Extreme Value Distributions

요 지

이 연구에서는 케이블지지교량의 주요 구조부재에 설치된 지진가속도계측기에서 측정된 가속도에 대한 재난관리 기준을 제안한다. 국내 공용 중인 케이블지지교량에서 장기간 계측된 가속도 기록을 활용하여 통계적 추정기법 적용을 통해 가속도의 1개월 최대치분포를 추정한다. 극치이론의 적용을 통해 가속도의 100년 및 1000년에 대한 최대치분포를 외삽을 통해 추정하고, 추정된 100년 및 1000년 최대치분포의 평균값에 근거하여 관심 및 주의단계에 대한 지진가속도계측기의 관리 기준을 제안한다. 경주지진과 포항지진 발생 시 기록된 최대 가속도와 비교를 통해 제안된 관리 기준의 실효성을 검증한다.

핵심용어 : 케이블지지교량, 지진가속도계측기, 재난관리 기준, 극치분포

1. 서 론

최근 국내외적으로 지구 온난화 등 자연 환경의 급격한

변화로 인하여 태풍과 집중 호우, 폭설, 지진 등 자연재난이
 잦아지고 그로 인한 대규모 피해의 발생이 점차 늘어가는
 추세에 있다. 특히, 최근 국내에서 발생한 경주지진(2016.

*정회원, 한국시설안전공단 국가내진센터 과장(E-mail: shlee@kistec.or.kr)

Member, Manager, National Center for Seismic Safety, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation

**한국시설안전공단 특수교관리센터 부장

General Manager, Long Span Bridge Center, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation

***한국시설안전공단 특수교관리센터 부장

General Manager, Long Span Bridge Center, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation

****교신저자, 정회원, 동아대학교 산학협력단 연구지원실 연구교수(Tel: +82-51-200-6501, Fax: +82-51-200-6507, E-mail: kwangyeun.park@gmail.com)

Corresponding Author, Member, Research Professor, Research Foundation for Industry-Academy Cooperation, Dong-a university

9. 12., 규모 5.8)과 포항지진(2017. 11. 15., 규모 5.4)에 의해 지진에 대한 국민적 우려가 높아지고 있다. 이에 정부에서는 경주지진 이후 지진방재종합대책(CBGD, 2016)을, 포항지진 이후 지진방재개선대책(CBGD, 2018)을 발표하는 등 지진방재와 관련된 국민적 우려를 불식시키기 위한 단기 및 중장기적 대책을 수립 및 실행하고 있다.

현재 지진재난에 대응하는 국내외적 패러다임은 지진발생의 예측 중심의 과거와는 달리 지진발생 시 피해의 경감에 초점을 두는 방향으로 이동하고 있다. 미국에서는 지진재해 대책의 주요 정책방향이 지진발생 시 피해 저감으로 변경되었고, 국가 지진재해 저감 프로그램(National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP)을 통해 시설물 내진성능 확보 및 대응체계 수립 등의 추진해오고 있다(Folger, 2018). 일본에서도 2011 동북부지진 발생 이후 과거의 지진발생의 예측과 관련한 연구만으로는 지진재해로 인한 인명 및 재산 손실의 경감에 더 이상 기여할 수 없다는 한계점을 인지하고, 향후 문부성 주도 지진관련 연구과제가 피해의 경감에 기여할 수 있는 결과로 이어지도록 강조하였다(Lee et al., 2017). 우리나라도 지진방재종합대책(CBGD, 2016)과 지진방재개선대책(CBGD, 2018)에서 ‘지진 조기경보’를 첫째 대책으로 설정하여 지진발생 이후의 2차 피해의 방지를 위해 노력하고 있다. 이를 위한 노력으로 행정안전부(Ministry of the Interior and Safety, MOIS)에서는 2010년 9월에 최초 고시되고, 2017년 7월까지 다섯 차례에 걸쳐 개정 고시된 ‘지진가속도계측기 설치 및 운영기준(MOIS, 2017b)’에 근거하여 전국 주요 지역의 지진관측소에 지진가속도계측기(seismic accelerometer, 이하 ‘지진가속도계’)를 설치하도록 규정하였고, 지진발생 시 조기경보가 가능하도록 하고 있다.

지진발생 시 피해경감을 위해서는 조기경보를 통해 국민에게 대응할 수 있는 시간을 벌어주는 것도 중요하지만, 지진발생 직후 건축물이나 교량, 터널 등과 같은 주요 시설물의 안전성 여부를 긴급하게 평가하여 해당 시설물의 사용가능 여부를 판단해주는 것도 2차 피해의 발생을 최소화 시키는 데에 매우 중요하다. 따라서 지진가속도계는 지진발생 시 조기경보를 위해 지진관측소 암반에 설치 및 운영되어야 하지만, 동시에 주요 시설물의 주요 구조부재에 설치되어 시설물의 안전성을 긴급하게 평가하여 추가적인 재난의 발생을 방지할 수 있도록 운영되어야 할 필요가 있다.

2. 지진가속도계측기 설치 및 운영현황

전술한 바와 같이 행정안전부에서는 주요 시설물에 지진가속도계를 설치 및 운영하도록 규정하고 있다. 「지진화산재해대책법」의 시행령(MOIS, 2017a) 제53조(지진가속도계측 대상 시설 등)에 근거하여 지진가속도계측이 의무화되는

대상 시설물(건축물, 공항시설, 댐 및 저수지, 현수교 및 사장교, 가스시설, 고속철도, 원자력 이용시설, 변전소, 발전용 수력설비 및 화력설비)이 명시하였고, ‘지진가속도계측기 설치 및 운영기준(MOIS, 2017b)’을 통해 대상 시설물별 설치 위치와 수량을 구체화하였다. 교량의 경우, 주 경간장 200 m 이상의 현수교 및 사장교에 한해서 자유장 1개소와 주탑 3개소(기초부, 상판연결부 및 상부), 상판 1개소(주경간의 중앙) 및 케이블 1개소(최외곽 케이블)를 의무적으로 설치하도록 규정하였다. Table 1에는 현수교와 사장교에 대한 지진가속도계 설치 위치의 예를 나타내고 있다. 2018년 10월을 기준으로 현수교 8개소, 사장교 45개소의 총 53개소(고속국도 3개소, 일반국도 26개소, 특별시도/광역시도 10개소, 지방도 11개소, 시도 3개소)가 의무 설치 대상에 해당된다(MOIS, 2017b). 현재 한국시설안전공단(Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, KISTEC) 특수교관리센터에서 위탁관리하고 있는 일반국도 상 20개를 포함한 전국의 주요 대형 현수교 및 사장교에는 대부분 설치가 완료된 상황이다(KISTEC, 2017).

현수교 및 사장교에 설치된 지진가속도계를 이용하여 시설물의 안전성을 긴급하게 평가하고 재난에 대응할 수 있도록 하기 위해서는 해당 지진가속도계 측정값에 대한 관리 기준이 마련되어야 한다. 현재 주탑 기초부에 설치된 지진가속도계의 경우에는 ‘해상교량 재난대응 현장 조치 행동매뉴얼(표준안)(IROCM, 2016)’에 근거하여 측정된 최대 지진가속도 크기를 기준으로 지진재난에 대응하도록 운영되고 있다(Table 2 참조). 그러나 나머지 부재에 설치된 지진가속도계의 경우, 측정 가속도값에 따른 관리 기준의 부재로 인해 이를 활용한 안전성 평가에 활용되고 있지 않고 있다. 다만, 측정된 가속도는 계속해서 기록이 되고 있기 때문에 향후 관리 기준을 설정하는 데에 근거자료로 이용될 수 있으며, 재난 발생 시 측정 가속도의 실시간 보고 체계가 갖추어져 있기 때문에, 관리 기준만 설정되고 나면 재난대응체계에 즉시 활용될 수는 있는 상황이다.

3. 지진가속도계측기 재난관리 기준의 제안

이 장에서는 케이블지지교량에 설치된 지진가속도계의 재난관리 기준을 제안하기 위한 하나의 방안을 제안하였다. 현재 한국시설안전공단 특수교관리센터에서 위탁관리하고 있는 일반국도 상 20개 케이블지지교량 중 12개 교량을 분석대상 교량으로 선정하였다. 교량의 형식과 치수정보 및 재료성질 등 대상 교량의 기본 정보와 함께 지진가속도계의 설치 현황(○: 설치, ×: △: 대체 설치)을 Table 3에 나타내었다. 분석대상 교량들의 이름은 현재 정부의 계측자료 공개 방침에 따라 계측자료를 활용한 연구진행에는 문제가 없으나, 이 논문에 해당 교량의 이름을 공개하는 것은 관리주체의

Table 1. Example of the Installation Locations for Seismic Accelerometer (MOIS, 2017b)

Structural Elements	Installation locations for seismic accelerometer
Free field	3-directional sensor on the base rock near the bridge
Pylon	3 directional sensor on the foundation, 2-directional sensor and 1-directional sensor near deck, 2-directional sensor and 1-directional sensor on the top
Stiffened girder	2-directional sensor and 1directional sensor at the center of the span
Anchor block	3-directional sensor(suspension bridge)
Hanger or Stay cable	1-directional sensor

Table 2. Alert Levels for Earthquake Disaster Situations (IROCM, 2016)

Alert level	Disaster situation	Response manual	Criteria for Earthquake
Attention (Blue)	There is a sign of activity but its level is low. It is unlikely to develop into a national crisis in the near term.	The managing organization shall monitor the signs, and check the cooperation system with the relevant organizations such as the emergency contact network.	ACC.* > 15 gal
Caution (Yellow)	Sign of activity is relatively active. It appears a certain level of tendency to develop into a national crisis.	The managing organization shall operate cooperation system with relevant organizations using collection of related information and reinforcement of information sharing activities.	ACC. > 25 gal Magnitude > 5.0
Alert (Orange)	Sign of activity is active, and the speed and tendency of its development are remarkable. It is likely to develop into a national crisis.	The managing organization shall review the action plan and prepare the mobilization of human and material resources with the relevant organizations.	ACC. > 50 gal
Serious (Red)	Sign of activity is very active, and the speed and tendency of its development are serious. It is certain to develop into a national crisis.	The managing organization shall make efforts to put the relevant capacity as much as possible with relevant organizations and be ready to respond immediately to the national crisis.	ACC. > 100 gal

ACC.*: Peak acceleration measured by seismic accelerometer installed at the foundation of bridge

Table 3. Primary Information of 12 Bridges (KISTEC, 2017)

Bridge name		DE	DS	GBS	GG	JD	JD2	MP	NH	SCP	SR	WD	YG
Types	Bridge type (CB: Cable-stayed Br., SB: Suspension Br.)	CB	CB	CB	CB	CB	CB	CB	SB	CB	SB	CB	CB
	Number of pylon	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2
	Pylon shape (H, A, D(diamond), Y, iY(inverted Y))	iY	A	H	D	A	A	D	H	H	D	A	iY
Dimensions	Total span [m]	400	450	464	1,116	484	484	900	660	436	470	500	590
	Main span [m]	400	280	230	480	344	344	500	404	230	250	200	320
	Pylon height [m]	100	62	90	168	69	69	168	60	89	87	75	112
Materials (S: steel, C: concrete, SC: steel-concrete composite)	Pylon	C	S	C	SC	S	S	C	S	C	C	S	C
	Deck(main span)	SC	S	C	S	S	S	S	S	SC	S	S	C
	Deck (side span)	-	S	C	S	S	S	C	S	SC	S	S	C
Installation conditions of seismic accelerometer	Free filed		○	△	○	○	○	×	△	△	○	○	○
	Pylon	on the top	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		near deck	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		on the foundation	○	○	○	○	○	△	×	○	×	○	○
	Deck		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Hanger or Stay cable		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

승인을 받은 사항이 아니기 때문에 부득이하게 이니셜로 대체하여 표기하였다. NH대교와 DS대교의 경우 자유장에 설치할 적절한 위치가 없어서 각각 앵커리지 내부와 링크룸 내부에 대체 설치하였고, MP대교의 경우에도 주변 지반조건 상의 이유(매립지)로 주탑 기초부 상단의 지진가속도계로 자유장 계측 센서를 대체하였다. 그리고 SR대교의 경우에는 주탑 기초부 상단의 높이가 상시 수면 높이보다 낮아 설치를 제외하였다. 또한, JD2대교의 경우 자유장 지진가속도계는 병렬교량인 JD대교와 공유해서 사용할 수 있으므로 설치하지 않았고, 주탑 기초부가 지중에 매립되어 있어 지상에 노출된 최하단 교각 측면에 대체 설치하였다(Park et al., 2018).

대상 교량의 주탑과 상판에 설치된 지진가속도계에서 16~34개월간 기록된 가속도자료를 활용하여 통계적 추정기법 적용을 통한 가속도의 1개월 최대치분포를 추정하였다. 마지막으로 극치분포 이론의 적용을 통해 측정 가속도의 기준시간(reference time period) 1년, 10년, 100년, 1000년에 대한 최대치분포를 외삽(extrapolation)하였고, 이를 기준으로 관리 기준을 제안하였다. 이 연구에 이용된 지진가속도계 측정 가속도 기록은 지진하중과 함께 차량 활하중 및 풍하중의 영향을 동시에 받고 있기 때문에, 1개월로 설정된 단위기간이 가지는 주기성에 대해서는 고려의 여지가 있다. 차량 활하중을 고려하면, 1일을 기준으로 최대치가 주기성을 가

질 것이라고 예상되는데, 이러한 경우 1일 대신에 약 30일에 해당하는 1개월을 단위기간으로 설정하였다고 해서 이론적으로 문제가 될 이유는 없다. 그러나 풍하중을 고려하면, 계절풍의 영향을 받기 때문에 1개월보다는 1년을 기준으로 최대치가 주기성을 가질 것이라고 생각되며, 따라서 1개월보다는 1년에 대한 최대치분포를 추정한 후 이를 이용하여 외삽하는 것이 더 유의미한 추정이 될 수 있을 것이라 생각된다. 그러나 현재 기록된 가속도자료가 16~34개월간의 자료밖에 없기 때문에 1년 최대치 1~3개만을 가지고 분포를 추정하는 데에는 무리가 있어 이 연구에서는 1개월 최대치를 기준으로 추정하였다. 향후 가속도 자료가 장기간 축적되어 유의미한 개수의 1년 최대치 자료를 사용할 수 있게 된다면, 이 연구에서 제안하는 방법을 이용하되 1년에 대한 최대치분포를 추정하여 장기 분포를 외삽하도록 추천한다.

3.1 가속도 1개월 최대치분포의 추정

12개 대상 교량에서 측정된 가속도를 1개월 단위로 최대값들을 뽑아내어 측정개월 수만큼의 월 최대치들을 생성한 후, 이 값들을 이용하여 가장 근접한 겐블(Gumbel) 분포를 추정하였다. 위치에 따라 2방향 혹은 3방향 지진가속도계가 설치된 곳도 있는데, 지진의 특성 및 케이블지지교량의 거동상의 특성을 고려하여 주탑은 교축(longitudinal)과 교직(transverse)의 수평 2방향을 추정하고, 상판의 경우에는 수직

(vertical)방향을 추정하였다. 분포의 추정을 위해서는 적률법(method of moments)과 오차최소화방법(error minimization method), 최대우도법(maximum likelihood method) 등을 이용할 수 있는데, 이 연구에서는 실무 적용상의 편의성을 고려하여 복잡한 추정과정 없이 측정치와 동일한 평균(mean)과 표준편차(standard deviation, Table 4에는 sigma로 표시)의 검בל 분포를 추정하는 적률법을 이용하였고, 어느 분포를 따르는 것이 더 효과적인지에 대한 고려는 이 연구에서 수행하지 않았다. Eqs. (1)과 (2)에는 각각 검בל 분포를 따르는 확률변수 X 의 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF)와 확률밀도함수(probability density function, PDF)를 나타내었다(Ang and Tang, 2007).

$$F_X(x) = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x-b_n}{a_n}\right)\right\} \quad (1)$$

$$f_X(x) = \frac{1}{a_n} \exp\left\{-\frac{x-b_n}{a_n} - \exp\left(-\frac{x-b_n}{a_n}\right)\right\} \quad (2)$$

여기서, a_n 과 b_n 는 각각 검בל 분포의 배율(scale)과 위치(location)를 결정하는 매개변수(parameter)이며, 각각은 평균(μ_X) 및 표준편차(σ_X)와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$a_n = \frac{\sigma_X \sqrt{6}}{\pi}, \quad b_n = \mu_X - a_n \gamma \quad (3)$$

여기서, $\gamma \approx 0.5772$ (오일러 상수)이다.

Table 4와 Fig. 1에는 SCP대교 주탑의 상부와 상판연결부 및 주경간 중앙 상판에서 측정된 가속도자료를 이용하여 1개월 최대치분포를 추정한 결과를 나타내었다. Table 4의 가운데 5개 열에는 측정 자료의 개수와 평균 및 표준편차, 그리고 Eq. (3)를 이용해서 구한 배율매개변수와 위치매개변수를 나타내었다. 이중 주탑 상부에서 측정된 교축방향 가속도의 1개월 최대치분포를 추정한 결과를 Fig. 1에 그림으로 나타내었다. 그림의 왼쪽에는 월별 최대

Fig. 1. Example of Distribution Estimation Process (SCP bridge)

가속도 34개를 다이아몬드로 표시하여 나타내었고, 이를 이용하여 추정된 가속도 1개월 최대치분포는 굵은 실선으로 나타내었다.

3.2 외삽을 통한 가속도 최대치분포의 추정

ISO2394 (ISO, 1998)에서 사용된 이론을 적용하면, 가속도 1개월 최대치분포를 이용하여 1개월보다 긴 임의의 기간에 대한 가속도 최대치분포의 외삽을 통한 추정이 가능하다. 전체 측정기간(total observation time) t_r 이 Fig. 2의 (a)와 같이 r 회의 단위기간(unit time period) τ 로 나누어질 때, 단위기간 τ 동안의 하중(action)의 최대값 Q 의 누적분포함수 $F_Q^\tau(q)$ 는 측정된 r 회의 자료로부터 Fig. 2의 (b)와 같이 구할 수 있다. 그리고 $F_Q^\tau(q)$ 는 전체 측정기간 t_r 동안의 하중의 최대값 Q 의 누적분포함수 $F_Q^{t_r}(q)$ 와 아래의 Eq. (4)와 같은 관계를 가진다(ISO, 1998; Lee, 2014).

$$F_Q^{t_r}(q) = \{F_Q^\tau(q)\}^r \quad (4)$$

Table 4. Example of Distribution Estimation Process on SCP Bridge

Location		Direction	Estimated Gumbel distribution (1 month)					Mean of extrapolated distribution			
			# of data	Mean	Sigma	scale parameter	location parameter	1 yr	10 yr	100yr	1000yr
Pylon	on the top	Longitudinal	34	22.28	6.62	5.16	19.30	35.10	46.97	58.85	70.73
		Transverse	34	8.98	3.10	2.42	7.58	14.98	20.54	26.10	31.66
	near deck	Longitudinal	34	10.91	4.63	3.61	8.83	19.88	28.19	36.50	44.81
		Transverse	34	5.96	3.48	2.71	4.39	12.70	18.94	25.19	31.43
Deck		Transverse	34	41.49	6.49	5.06	38.57	54.06	65.71	77.36	89.01
		Vertical	34	42.58	6.05	4.72	39.86	54.30	65.16	76.02	86.89

Fig. 2. Extrapolation Process (ISO, 1998)

다음 내용을 적용하면, 가속도 1년(12개월) 최대치분포의 누적분포함수는 가속도 1개월 최대치분포의 누적분포함수를 12제곱함으로써 구할 수 있고, 같은 방법으로 임의의 기간에 대한 최대치분포의 누적분포함수를 구할 수 있다. 또한, 최대치분포가 검볼 분포를 따를 경우 다음의 관계식이 성립한다.

$$F_X^r(x) = \{F_X(x)\}^r = \left[\exp \left\{ - \exp \left(- \frac{x - b_n}{a_n} \right) \right\} \right]^r \quad (5)$$

$$= \exp \left[- \exp \left\{ - \frac{x - (b_n - a_n \ln r)}{a_n} \right\} \right]$$

Eq. (5)가 의미하는 바는 $F_X(x)$ 을 r 제곱한 $F_X^r(x)$ 은 $F_X(x)$ 를 x 방향으로 $a_n \ln r$ 만큼 평행이동 한 결과와 동일하다는 것을 의미한다. Eq. (5)에서 볼 수 있듯이 scale parameter에는 변화가 없고, Eq. (3)의 정의에 따라 표준편차에도 변함이 없음을 의미하며, location parameter와 평균은 x 방향으로 $a_n \ln r$ 만큼 평행이동한 값을 가지게 된다. 이 연구에서 가속도 1개월 최대치분포는 검볼 분포로 추정하였기 때문에 임의의 기간에 대한 최대치분포의 평균과 표준편차를 쉽게 구할 수 있다. SCP대교 주탑의 상부와 상판연결부, 주경간 중앙 상판에서의 가속도 1개월 최대치분포를 이용하여 1년, 10년, 100년, 1000년 최대치분포를 추정한 결과를 Fig. 1에 가속도 1개월 최대치분포와 함께 나타내었다. Table 4의 오른쪽 4개 열에는 외삽을 통해 추정된 4개 최대치분포의 평균값을 나타내었다.

3.3 관리 기준 제안

이 연구의 목적은 케이블지지도교량에 설치된 지진가속도계 중 주탑 기초부 측정 가속도에 대해서만 설정되어 있는 재난관리 기준을 나머지 위치에 대해서도 제안하는 것이다. Table 2에서 제시하고 있는 상황의 정의를 보면, 관심(blue) 단계는 지진의 발생은 확실치 않지만 징후가 보이는 단계를 의미하고, 주의(yellow) 단계는 한반도 내에서 지진이 발생했으나 진원과의 거리가 있어 감쇠에 의해 지진동의 크기는 크게 나타나지 않지만 주의를 요하는 단계를 의미하며, 경고(alert) 및 심각(serious) 단계는 대상교량 주변 지역에서 지진

이 발생했으며, 지진의 규모나 진원과의 거리에 따라 나타나는 지진동의 크기에 따라 지진 재해의 단계를 구분하고 있는 것으로 추정된다. 주의 단계에 대한 기준이 규모 5.0의 지진이 발생하였을 때(주탑기초부 측정가속도가 25 gal일 때와 더불어)로 정의하고 있는 것은 이러한 추정을 뒷받침하고 있다. 이 연구에서는 상시에 측정된 가속도자료를 바탕으로 관리 기준을 제안하고자하기 때문에 관심 단계와 주의 단계에 대한 가속도 예측치 관리 기준만을 제안하는 것이 합리적이라 판단된다. 대상교량 주변 지역에서 지진이 발생한 상황으로 추정되는 경고 단계와 심각 단계에 해당하는 관리 기준은 상시에 측정된 가속도자료에 기반하여 설정될 것이 아니라 대상 케이블지지도교량 각각의 지진해석 결과에 기반하여 설정되어야 한다고 판단된다. 따라서 이 연구에서는 관심 단계와 주의 단계에 대한 가속도 예측치 관리 기준만을 제안하였다.

Table 5는 지진의 규모와 지반운동과의 대략적인 상관관계를 지반운동매개변수(MMI 진도, JMA 진도, 최대지반속도(peak ground velocity, PGV) 및 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA)로 나타난 기상청의 설명 자료를 PGA의 단위만 gal로 환산하여 나타난 표이다(KMA, 2016). Table 2에서 관심 단계와 주의 단계에 대해 제시하고 있는 15 gal과 25 gal의 PGA는 MMI 진도를 기준으로 IV와 V에 상응하는 값으로 설정되었다 추정되며, 이는 대략 규모 4.0~4.9의 지진에 대응한다. 여기서, Table 2에서 규모 5.0 이상의 지진발생 시와 주탑 기초부 가속도가 25 gal 이상으로 측정될 경우를 주의 단계로 정의하고 있는데 반해 Table 5에서 규모 5.0의 지진에 상응하는 PGA가 65 gal 전후로 제시하고 있는 것을 발견할 수 있는데, 이는 Table 5에서는 진앙(epicenter) 기준의 PGA 범위를 제시한 것이고, Table 2에서는 해상교량이 있는 대상지역을 기준으로 거리에 의한 감쇠(attenuation)가 일어난 PGA를 기준 설정에 대한 판단 근거로 제시한 것이라 판단된다. 결론적으로 Table 2에서 주의 단계에 대해 제시하고 있는 PGA 25 gal은 진원 기준 규모 5.0의 지진에 의해 케이블지지도교량이 놓여있는 대상지역에 MMI 진도 V의 지반운동이 관측되는 상황을 기준으로 설정되었다고 해석할 수 있으며, 마찬가지로의 논리로 관심 단계에 대해서는 그보다 조금 더 작은 규모(대략 4.0~4.5)의 지진에 의해 대상 지역에 MMI 진도 IV의 지반운동이 관측되는 상황을 기준으로 해석할 수 있다.

이 연구에서는 앞의 3.1절과 3.2절의 과정을 통해 추정된 100년 및 1000년 최대치분포의 평균값을 각각 관심 단계 및 주의 단계에 대한 가속도 예측치 관리 기준으로 제안하였다. 100년은 일반적인 케이블지지도교량의 설계수명을 생각하여 결정하였고, 1000년은 설계기준에서 제시하는 설계지진의 재현주기를 감안하여 결정하였다. 도로교설계기준(한계상태설계법): 케이블교량편(KRA, 2016)에서는 케이블지지도교량의 설계를 위해 지진하중을 검토할 경우 사용관계

Table 5. Relation Between Magnitude and Intensity of Earthquake (KMA, 2016)

Magnitude	PGV [cm/sec]	MMI intensity	PGA [gal]	JMA intensity
1.0~2.9	~0.07	I	~1	0
3.0~3.9	0.07~0.22	II	1~2.9	I
	0.22~0.65	III	2.9~4.9	
4.0~4.9	0.4~1.9	IV	4.9~23.5	II
	1.9~5.8	V	23.5~65.7	III
5.0~5.9	5.8~11.0	VI	65.7~127	IV
	11.0~22.0	VII	127~235	V
6.0~6.9	22.0~43.0	VIII	235~431	V
	43.0~83.0	IX	431~814	VI
7.0~	83.0~160.0	X	814~1530	VI
	160.0~	XI~XII	1530~	VII

상태, 극단상황한계상태 및 내진설계 시 붕괴방지수준 성능 검증 시에 대해 각각 설계수명 내 초과확률 63%, 8~10% 및 4%에 해당하는 재현주기를 가지는 지진하중의 하중효과를 기준으로 검토하도록 하고 있다. 케이블지지교량의 수명이 100년으로 설정되었을 경우 각각의 재현주기는 100년, 1000년 및 2400년에 해당하며, 각각의 재현주기 지진에 대해 이 설계기준에서 제시하고 있는 설계지반가속도(지진 구역 I, S_B 지반 기준)는 0.0627g (=62 gal), 0.154g (=151 gal) 및 0.22g (=215 gal)이다. 설계를 위해 충분한 안전여유를 확보하기 위해 설정된 설계지반가속도이기 때문에 SCP대교에서 측정한 자료를 통해 추정된 Table 4의 해당기간에 대해 추정된 가속도 최대치분포의 평균보다는 훨씬 큰 값을 가진다.

Table 6에는 대상 교량 12개의 자유장, 주탑(기초부, 상판 연결부, 상부) 및 주경간 중앙 상판에서 측정되는 지진가속도에 대해 이 연구에서 제안하는 관리 기준을 제시하였다. 2장에서 언급한 바와 같이 ‘해상교량 재난대응 현장 조치 행동매뉴얼(표준안)(IROCM 2016)’이 주탑 기초부에서의 가속도를 기준으로 설정하였기 때문에, Table 2에서 제시한 15 gal과 25 gal을 각각 관심 단계와 주의 단계의 관리 기준으로 그대로 적용하였고, 자유장의 경우에도 같은 기준을 제안하였다. 주탑의 상부 및 상판연결부, 주경간 중앙 상판에 설치된 지진가속도계에 대해서는 이 연구에서 제안한 방법에 따라 추정된 100년 및 1000년 최대치분포의 평균값을 관리 기준으로 제안하였다. 그러나 추정을 통해 설정된 관리 기준이 관심 단계와 주의 단계에 대해 각각 10 gal과 20 gal 보다 작은 경우에는 10 gal과 20 gal을 각각에 대한 기준으로 제안하였다.

Table 6에 제시한 각 교량별 및 위치별 가속도 관리 기준 제안 값을 보면 대한 교량의 규모와 형식, 교량이 놓여 있는 위치에 따른 교통량 및 자연환경에 의한 영향에 따라 다른

기준치를 갖도록 설정된 것을 알 수 있다. 이는 이 연구에서 추정을 위해 사용되고 있는 지진가속도계 측정 가속도 최대치는 지진가속도계 관리 기준 마련을 위해 사용되고 있지만 지진뿐만 아니라 바람 및 중차량 등의 여러 복합적인 요인에 의한 영향으로 발생한 가속도의 기록이기 때문이다. 대부분의 교량에서 주탑의 기초에서 상판 연결부, 상부로 갈수록 가속도 관리 기준이 크게 설정된 것과는 달리 현수교인 NH대교에서는 주탑의 상부보다 상판 연결부의 가속도 관리 기준이 크게 설정되었으며, 이는 현수교 주탑에서 주 케이블이 영향을 직접적으로 받는 상부보다 상판 연결부의 진동이 더 크게 나타나는 거동상의 특성을 반영하고 있다. (같은 현수교인 소록대교는 자정식 현수교이며 케이블이 거더 중앙에 1면배치 되어 있고, 사장교와 비슷하게 상판이 주탑 중층부에 고정된 형식이라 거동 특성이 다르게 나타난다.) 상판의 경우 주 경간장 길이가 긴 동이대교(400 m), 목포대교(500 m) 및 남해대교(404 m) 관리기준이 크게 설정되었다.

교량에 설치된 지진가속도계의 관리 기준을 교량에 상판 없이 대형 교량을 기준으로 일괄적으로 설정한다면, 소형 교량에서는 재난상황이 발생해도 관리 기준보다 낮은값으로 계측되었기 때문에 대응하지 않게 되는 결과를 초래하게 된다. 반대로 소형 교량을 기준으로 일괄적으로 설정한다면, 대형 교량에서는 일상적인 상황 아래에서도 매번 재난상황이라 간주하고 빈번하게 긴급출동 등의 대응을 하여야 하는 결과를 초래하게 된다. 결론적으로 이 연구에서 제안하는 관리 기준 설정 방법은 대상 교량의 특성을 반영된 계측결과에 기반을 두고 제안되기 때문에 지진가속도계의 합리적인 운영방향을 제시한다고 볼 수 있다. 또한, 교량별, 부재별 지진가속도계에 개별적으로 제안된 관리 기준치는 지진가속도계 각각에 트리거링(triggering) 값으로서 사전에 설정만 해두면 되기 때문에 실무 적용상으로도 아무런 문제점이 없다.

Table 6. Proposal of Disaster Management Criteria of Seismic Accelerometer [gal]

Alert level	Br.	Location of seismic accelerometer					Br.	Location of seismic accelerometer				
		Free field	Pylon			Deck		Free field	Pylon			Deck
			on the found- ation	near deck	on the top				on the found- ation	near deck	on the top	
Attention (Blue)	DE	15	15	10	20	496	MP	15	-	27	22	360
Caution (Yellow)		25	25	20	22	618		25	-	34	26	443
Attention (Blue)	DS	15	15	13	60	155	NH	15	15	147	96	288
Caution (Yellow)		25	25	20	65	172		25	25	164	109	333
Attention (Blue)	GBS	15	15	26	57	56	SCP	15	15	36	58	77
Caution (Yellow)		25	25	30	64	62		25	25	44	70	89
Attention (Blue)	GG	15	15	11	69	53	SR	15	-	22	28	118
Caution (Yellow)		25	25	20	79	62		25	-	25	33	147
Attention (Blue)	JD	15	15	11	180	117	WD	15	15	50	54	141
Caution (Yellow)		25	25	20	201	124		25	25	58	64	168
Attention (Blue)	JD2	15	15	18	67	98	YG	15	15	-	40	21
Caution (Yellow)		25	25	23	77	111		25	25	-	48	25

3.4 경주 및 포항지진 시 계측값과의 비교

Table 7에는 경주지진 및 포항지진 발생 시에 지진가속도계에 측정된 최대가속도를 Table 6의 관리 기준과 비교하여 나타내었다. 경주지진과 포항지진 발생 시 제안된 관리 기준을 초과한 경우는 굵은 글씨 및 밑줄을 그어 표시하였다. 경주지진 발생 시 NH대교(진앙거리 139 km)와 SCP대교(진앙거리 150 km)에서, 포항지진 시에는 SCP대교(진앙거리 177 km)에서만 관심 단계의 관리 기준을 초과한 가속도가 측정되었고, 이와 관련하여 중요한 점을 발견할 수 있다. NH대교의 경우 경주지진 및 포항지진 시 주탑 기초부의 가속도를 기준으로 기존의 ‘해상교량 재난대응 현장 조치 행동매뉴얼(표준안)(IROCM 2016)’에서 제시하는 관리 기준을 근거로 관심 단계의 재난 상황에 해당되지만, 이 연구에서 제안한 관리 기준을 근거로는 다른 모든 위치에서 관심 단계에 해당되지 않는다. 반대로 SCP대교의 경우에는 기존 기준을 근거로 관심 단계에 해당되지 않지만, 이 연구에서 제안한 관리 기준을 근거로 경주지진 및 포항지진 시 자유장에서 포항지진 시는 주탑 상부에서도 관리 기준을 상회하는 가속도가 측정되어 관심 단계에 해당된다는 점이다.

행정안전부가 지진가속도계를 주탑 기초(혹은 자유장)한 군데만 아니라 현수교 및 사장교 주요 구조부재에 여러 군데에 설치 및 운영하도록 한 근본적인 목적은 재난 상황에 대한 판단을 하나의 계측신호에 근거하여 내리지 말고, 여러 군데에서 계측된 신호에 근거하여 내리라는 데에 있다. 자유장에서 측정된 가속도가 관리 기준치를 상회하더라도 구조부재에서 관리 기준치에 상응하는 위험신호가 감지되지 않으면 최종적으로 안전하다고 결론을 지을 수 있어야

하고, 반대로 자유장에서 측정된 가속도가 관리 기준치보다 안전하다 판단되어도 구조부재에서 관리 기준치를 상회하는 위험 신호가 감지되면 안전성을 고려하여 재난 상황에 대한 대비가 필요하다는 결론이 나와 한다. 이러한 측면에서, Table 7에 제시한 경주지진 및 포항지진 시 NH대교와 SCP대교에서 측정된 가속도 기록은 이 연구에서 제안하는 관리 기준 설정방법이 주탑 기초에서 측정된 가속도에 의존하지 않고 구조 부재에서 측정된 가속도 기록을 기반으로 운영(NH대교)할 수 있도록 하면서도, 지진가속도계 위치별 운영 관리에 따른 크로스체크를 통하여 안전성 측면에서도 우수한 운영이 가능(SCP대교)한 운영관리 방향을 제시하고 있음을 뒷받침해주는 사례를 보여주고 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 ‘지진가속도계측기 설치 및 운영기준(MOIS, 2017b)’에 의해 현수교 및 사장교의 주요 구조부재(자유장 포함)에 설치된 지진가속도계를 효과적으로 활용하기 위한 관리 기준을 제안하였다. 기존의 ‘해상교량 재난대응 현장 조치 행동매뉴얼(표준안)(IROCM 2016)’에서 제시하는 재난관리 기준은 주탑 기초부에서 측정된 가속도에 대해서만 정의되어 있었는데, 이 연구에서는 주탑의 상부 및 상관연결부, 그리고 주 경간의 상관 중앙에 설치된 지진가속도계에서 측정되는 가속도에 대한 관리기준을 제안하는 하나의 방법을 제시였다. 분석대상 12개 교량에서 측정된 가속도 계측자료를 기반으로 통계확률이론을 적용을 통해 1개월 최대치에 대한 분포를 추정하고, 100년 및 1000년

Table 7. Comparison of Proposed Disaster Management Criteria of Seismic Accelerometer and Peak Accelerations Recorded During Gyeongju and Pohang Earthquake [gal]

Alert level	Br.	Location of seismic accelerometer					Br.	Location of seismic accelerometer				
		Free field	Pylon			Deck		Free field	Pylon			Deck
			on the found- ation	near deck	on the top				on the found- ation	near deck	on the top	
Gyeongju earthquake	DE	0.9	0.76	0.97	5.48	5.6	MP	12.93	-	7.13	13.46	49.6
Pohang earthquake		1.18	1.13	1.66	10.8	47.6		5.02	-	11.45	12.87	11.7
Attention (Blue)		15	15	10	20	496		15	-	27	22	360
Caution (Yellow)		25	25	20	22	618		25	-	34	26	443
Gyeongju earthquake	DS	3.14	4.61	8.26	17.92	10.51	NH	3.62	15.99	12.75	13.33	44.16
Pohang earthquake		3.64	4.44	8.90	28.79	13.74		4.56	15.10	64.83	28.30	49.89
Attention (Blue)		15	15	13	60	155		15	15	147	96	288
Caution (Yellow)		25	25	20	65	172		25	25	164	109	333
Gyeongju earthquake	GBS	8.48	0.17	8.56	13.3	11.32	SCP	24.36	14.77	32.17	60.72	17.06
Pohang earthquake		7.44	4.44	8.83	17.70	12.93		19.62	9.71	19.51	33.04	16.81
Attention (Blue)		15	15	26	57	56		15	15	36	58	77
Caution (Yellow)		25	25	30	64	62		25	25	44	70	89
Gyeongju earthquake	GG	1.61	4.66	9.74	46.92	7.12	SR	1.45	-	7.28	8.22	5.95
Pohang earthquake		1.33	4.44	7.71	40.99	7.74		1.62	-	5.35	4.95	5.85
Attention (Blue)		15	15	11	69	53		15	-	22	28	118
Caution (Yellow)		25	25	20	79	62		25	-	25	33	147
Gyeongju earthquake	JD	0.18	0.84	3.7	43.27	19.35	WD	1.69	2.11	28.36	20.24	7.85
Pohang earthquake		1.00	1.07	3.14	30.08	16.69		2.57	1.81	26.96	18.43	7.25
Attention (Blue)		15	15	11	180	117		15	15	50	54	141
Caution (Yellow)		25	25	20	201	124		25	25	58	64	168
Gyeongju earthquake	JD2	0.18	1.39	6.05	20.47	25.18	YG	0.91	1.95	-	5.56	2.78
Pohang earthquake		1.00	1.82	4.49	14.96	16.38		1.38	1.97	-	5.86	4.16
Attention (Blue)		15	15	18	67	98		15	15	-	40	21
Caution (Yellow)		25	25	23	77	111		25	25	-	48	25

최대치에 대한 분포를 외삽을 통해 추정하였으며, 추정된 분포의 평균값을 바탕으로 관심 단계와 주의 단계에 대한 지진가속도계 측정 가속도의 관리 기준을 제안하였다.

이 연구에서 제안하는 관리 기준 설정 방법은 두 가지 측면에서 우수한 점을 발견할 수 있었다. 먼저, 교량의 규모와 형식, 교량이 놓여 있는 위치에 따른 교통량 및 자연환경에 의한 영향 등이 반영되어 예측된 결과에 기반을 두고 제안된 관리 기준이기 때문에 대상 교량의 특성을 맞게 과도하거나 모자라지 않은 합리적인 운영을 가능하게 한다. 다음으로, 주담 기초부 측정 가속도만으로 재난 상황을 판단하는 기존의 관리 기준과 달리 지진가속도계 위치별 운영 관리에 따른 크로스체크를 통한 안전관리가 가능하기 때문에 안전성 측면에서도 우수한 운영이 가능하다.

이 연구에서는 측정된 가속도자료를 바탕으로 관심 단계와 주의 단계에 대한 가속도 예측치 관리 기준만을 제안하였다. 대상교량 주변 지역에서 지진이 발생한 상황으로 추정되는 경고 단계와 심각 단계에 해당하는 관리 기준에 대한 제안도 필요하며, 이는 3.3에서 언급한바와 같이 각 케이블지지고랑의 지진해석 결과를 기반으로 설정되어야 한다고 판단된다. 이와 관련하여 향후 추가적인 연구가 필요하다 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2017-MOIS31-002)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Ang, A.H-S., and Tang, W.H. (2007). *Probability concepts in engineering: Emphasis on application in civil and environmental engineering*. Wiley & Sons.
- CBGD (Cooperation Between Government Departments). (2016). *Comprehensive measures on earthquake disaster prevention*. Press Releases.
- CBGD. (2018). *Improvement measures on earthquake disaster prevention*. Press Releases.
- Folger, P. (2018). *The national earthquake hazards reduction program (NEHRP): Issues in brief* (R43141). Congressional research service, Washington D.C.
- IROCM (Iksan Regional Office for Construction and Management). (2016). *Disaster response manual for offshore bridges*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- ISO (International Organization for Standardization). (1998). *International standard ISO2394: General principles on reliability for structures*.
- KISTEC (Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation). (2017). *2017 Final report of integrated maintenance of cable-supported bridges*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- KMA (Korea Meteorological Administration). (2016). *Explanation of the exact concept about magnitude and intensity of earthquake*. Explanation report.
- KRA (Korea Road Association). (2016). *Korean bridge design code (limit state design): cable-supported bridges*. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Lee, S.H. (2014). *Calibration of the load-resistance factors for the reliability-based design of cable-supported bridges*. Ph.D. dissertation, Seoul National University. Retrieved from http://dcollection.snu.ac.kr/public_resource/pdf/000000018675_20181120153547.pdf
- Lee, S.H., Nishijima, K., Matsushima, S., Miyazawa, M., Mochizuki, K., Iidaka, T., Ueda, K., Kawase, H., Maki, N. (2017) Issues and challenges in seismic risk evaluation and its uncertainty reduction for the Nankai trough earthquake. *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, Kyoto university, No. 60B, pp. 354-365.
- MOIS (Ministry of the interior and safety). (2017a). *Enforcement ordinance of countermeasures against earthquakes and volcanic disasters act*.
- MOIS (Ministry of the interior and safety). (2017b). *Installation and operation manual for the seismic accelerometer*.
- Park, S.W., Lee, S.H., Choi, G. (2018) Seismic response characteristics of domestic cable-supported bridges due to Gyeongju earthquakes: Case study. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 22, No. 5, pp. 1-12.

Received	October 12, 2018
Revised	October 18, 2018
Accepted	October 31, 2018