

# 케이블교량의 부재 설계를 지배하는 하중조합에 대한 신뢰도지수 평가

백인열<sup>1\*</sup> · 윤태용<sup>1</sup>

<sup>1</sup>가천대학교 토목환경공학과

## Evaluation of Reliability Index of Governing Load Combination for Design of Cable Supported Bridge Members

Inyeol Paik<sup>1\*</sup> and Taeyong Yoon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Songnam, 461-701, Korea

### Abstract

In this paper the reliability analyses of the cable-supported bridge design code which is recently issued in Korea are performed and the results are presented. Governing load combinations for the member design and the statistical properties of the main members are introduced and the analysis is performed using an example cable-stayed bridge for which the design is performed following the load and resistance factors defined in the design code. The reliability analysis shows the target reliability index can be achieved by applying load and resistance factors and the application of the resistance modification factor can enhance the reliability level if the importance of the bridge needs to be increased. The sensitivity analysis reveals that decreasing uncertainty of the cable strength is critical for obtaining the target reliability index. The study results show that the design using the load and resistance factors of the code can achieve the target reliability indexes for the design of cable supported bridge.

**Keywords** : cable-supported bridge, limit state design, target reliability, load and resistance factor, resistance modification factor, sensitivity analysis

### 1. 서론

케이블교량 설계 및 시공 사례 증가와 건설시장의 국제화에 대응하기 위하여 경쟁력 있는 설계기준의 개발이 절실하게 필요한 실정이다. 일반교량의 경우에는 최근 유럽 및 미국의 선진 설계기준의 개념을 도입한 도로교설계기준-한계상태설계법(2012; highway bridge design code-limit state design method, 이후 HBDC-LSD)이 제정되었다. 최근에는 일반교량의 한계상태설계 개념과 일관성을 유지하면서 케이블교량의 특성을 반영한 연구를 바탕으로 HBDC-LSD의 케이블교량편(2014; cable bridge design code, 이후 CBDC)이 제정되었다.

설계에 적용하는 주요 변동하중인 활하중, 풍하중, 지진하중 등이 설계수명, 재현주기 및 초과확률을 기준으로 정의되는

통계변수이며, 콘크리트 등 구조물을 이루는 재료의 강도 또한 편차를 가지는 통계변수이므로, 구조물의 안전 여유를 나타내는 설계의 안전율은 통계 및 확률에 기반한 신뢰도지수로 나타내는 것이 합리적이다. 이미 국제적으로 선진 설계기준인 Eurocode(2001), AASHTO LRFD(2014)는 신뢰도지수를 이용하여 안전율을 나타내고 있다. 이들 설계기준에서는 구조물이 목표로 하는 신뢰도지수를 설정하고, 이를 달성할 수 있도록 하중계수와 저항계수를 설계자에게 제시함으로써 설계자는 별도의 신뢰도분석을 수행하지 않아도 설계의 목표신뢰도를 얻을 수 있도록 하는 형식을 취하고 있다. 이를 위해서는 설계기준의 개발 과정에서 하중조합에 대한 신뢰도분석이 선행되어 하중계수 및 저항계수에 대한 보정이 필요하다.

교량설계기준의 보정에 관한 대표적인 선행연구인 Nowak(1999)의 보고서에서는 하중 및 저항강도의 통계특성과 목

\* Corresponding author:

Tel: +82-31-750-5340; E-mail: pinyeol@gachon.ac.kr

Received November 14 2014; Revised November 27 2014

Accepted November 28 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

표신뢰도지수를 제시하고 있으며, 특히 활하중의 목표신뢰도지수를 3.5로 정하여 이후 설계기준의 보정에 기본이 되고 있다. Ghosn 등(2003)은 풍하중, 지진하중 등 극치하중 연구를 통하여 하중의 통계특성을 정리하고 활하중과는 다른 신뢰도지수를 제시한 연구를 수행하였다. 케이블교량의 신뢰도지수에 관한 대표적인 연구인 Imai 등(2001)에서는 허용 응력설계법에 의하여 설계된 실제 케이블교량의 신뢰도를 산정하여 케이블의 신뢰도지수가 거더에 비하여 매우 높음을 보여주었다. 또한, CBDC의 보정을 위한 연구에서 Lee (2014)는 선행 연구들을 종합하여 케이블 교량의 주요 하중들에 대한 일관된 통계적 정의를 시도하였고, 국제적인 선진 설계기준의 개념을 도입하고 보다 확대하여 부재별로 목표신뢰도지수를 제안하였다.

이 논문에서는 CBDC의 설계하중조합을 중심으로 케이블 교량의 주요 부재별로 설계의 안전율이 확보됨을 신뢰도분석을 통하여 제시한다. CBDC에 제시된 하중조합을 적용하여 국내에서 설계된 주 경간 1.2km인 prototype 사장교(SLSB R&D center, 2012)를 대상으로 부재별 설계력과 설계강도 검토를 통하여 설계를 지배하는 하중조합과 목표신뢰도지수와 의 관계를 분석하였다.

## 2. 설계하중조합 및 신뢰도지수

### 2.1 하중조합의 구성

CBDC는 HBDC-LSD의 한계상태설계법과 같이 하중계수와 저항계수로 구성된 하중조합을 만족하도록 설계한다.

$$\sum_i \gamma_i Q_i \leq \phi_{rm} R_r \quad (1)$$

여기서,  $\gamma_i$ 는 하중계수,  $Q_i$ 는 하중효과,  $\phi_{rm}$ 은 저항수정계수,  $R_r$ 은 계수저항이며, 강재 보강거더와 케이블에 대하여는  $R_r = \phi R_n$ 을 적용하고, 콘크리트 주탑은  $R_r = R\{\phi_i X_i\}$ 을 적용하며,  $R_n$ 은 단면의 공칭저항강도,  $\phi$ 는 저항계수,  $\phi_i$ 는 재료계수,  $X_i$ 는 재료의 기준강도이다.

극한한계상태(ultimate limit state, ULS)와 극단상황 한계상태(extreme event limit state, ELS) 하중조합은 주로 하나의 대표하중을 중심으로 동반 하중들을 조합하여 구성한다. 이 연구에서 대상으로 한 하중조합은 Table 1과 같다. ULS 하중조합은 대표하중이 활하중인 하중조합 I(이후 ULS I-L), 풍하중이 대표하중인 하중조합 III(이후 ULS III-W), 고정하중이 지배적인 하중조합인 하중조합 IV(이후 ULS IV-D)이며, ELS 하중조합은 대표하중이 지

Table 1 Design load cases of cable bridge design code

Load case	Load	DC DW	L+I	Q	W	TU	SD EO	EQ
	ULS	I	$\gamma_p$	1.8	1.0	-	0.5	1.0
III		-		1.7		-		
IV		-		-		-		
ELS	I	1.0	-	-	-	-	-	1.0

진하중인 ELS 하중조합 I(이후 ELS I-EQ)이다.

Table 1에서 DC는 부재의 중량, DW는 포장의 중량, L+I는 활하중 및 충격하중, Q는 부력, 유수압, 파압, W는 풍하중, TU는 온도변화의 영향, SD는 지점침하, EO는 제작오차, EQ는 지진하중이다.

고정하중 DC와 DW의 하중계수  $\gamma_p$ 는 고정하중에 의한 하중영향이 유리한 경우와 불리한 경우를 고려하여 최대하중계수로 각각 1.1~1.25와 1.25~1.35를 최소하중계수로 각각 0.85와 0.8을 적용한다.

이 논문의 목적은 CBDC의 설계하중조합이 목표 신뢰도지수를 확보하는지 알아보기 위함이며, 이를 위하여 부재를 지배하는 하중조합이 요구하는 하중효과와 정확하게 일치하는 단면에 대하여 신뢰도를 산정할 필요가 있다. 즉, 식 (1)이 등식이 되는 경우의 공칭저항강도를 산정하기 위하여, 하중조합과 일치하는 저항효과 값에서 저항계수 또는 재료계수를 제외한 경우를 구한다. 예를 들면, 케이블에 대하여 저항수정계수가 1인 경우에  $R_n = (\sum_i \gamma_i Q_i) / \phi$ 로 구한다.

### 2.2 목표신뢰도지수

CBDC에서는 설계하중조합의 목표신뢰도지수  $\beta_T$ 를 하중별로 구분하여 Table 2와 같이 제시하고 있다. 풍하중의 재현주기는 교량의 설계수명과 같은 100년이며, 지진하중의 재현주기는 2400년으로 설정되었다.  $\beta_T$ 는 파괴확률  $p_f$ 에 대한 10진법 숫자를 중심으로 산정되었으며, 두 값 사이의 관계는 식 (2)와 같다.

$$\beta_T = \Phi^{-1}[1 - p_f] \quad (2)$$

Table 2 Target reliability indexes for load cases and classes

Class	Load case	$p_f$	$\beta_T$
Class 1	ULS I	$10^{-4}$	3.72
	ULS III	$10^{-3}$	3.09
	ELS I	$10^{-2}$	2.33
Class 0	ULS I	$10^{-4.5}$	4.00
	ULS III	$10^{-3.5}$	3.41

풍하중조합과 지진하중조합에 대하여 AASHTO LRFD의 적용성을 위한 신뢰도분석을 수행한 Ghosn 등(2003)의 연구에서는 75년 재현주기에 대하여 각각 3.07과 2.78 수준의 신뢰도지수를 결과로 주고 있다. 이는 Table 2에서 풍하중과 지진하중조합에 대하여 활하중조합보다 낮은 목표신뢰도지수를 정의하고 있는 것과 일맥상통한다.

Table 2에 따른 케이블교량의 부재별 목표신뢰도지수를 살펴보면, 보강거더는 활하중조합이 지배하중조합이므로  $\beta_T = 3.72$ 이고, 주탑은 풍하중과 지진하중조합이 지배하므로 각각  $\beta_T = 3.09, 2.33$ 이다. 한편, 기존에 허용응력설계법으로 설계되어 오던 케이블에 대하여는 설계의 급격한 변화를 방지하되 최근 케이블 재료와 시공기술의 발전을 감안하여, 기존설계에 상응하되 다소 경제적인 수준을 신뢰도지수로 환산하여  $\beta_T = 6.0$ 으로 정하고 있다.

### 2.3 신뢰도지수 산정

구조물의 저항과 설계하중조합의 하중효과와의 차이로 나타나는 안전여유인 한계상태함수는 다음과 같이 표시된다.

$$g = R - \sum_i Q_i \tag{3}$$

여기서,  $g$ 는 한계상태함수,  $R$ 은 구조저항,  $Q$ 는 하중효과를 나타내는 통계변수들이다.

$g=0$ 인 경우는 한계상태(limit state)이며,  $g < 0$ 이 되는 경우를 파괴라고 할 때, 파괴확률에 상응하는 신뢰도지수를 구하게 된다. 이 연구에서는 신뢰도지수의 산정방법 중 대표적인 Rackwitz-Fiezzler 변환을 통한 일гей차모멘트법(AFORM)을 적용하였으며, 신뢰도지수  $\beta$ 는 식 (4)와 같다.

여기서,  $X'_i = (X_i - \mu_i) / \sigma_i$ 는 감소변량(reduced variate),  $x'_i$ 는 설계점(design point)에서의 값이며,  $\mu_i$ 와  $\sigma_i$ 는 각각  $X_i$ 의 평균과 표준편차이다.

$$\beta = \frac{-\sum_i x'_i \left( \frac{\partial g}{\partial X'_i} \right)^*}{\sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial g}{\partial X'_i} \right)^2}} \tag{4}$$

그러나 신뢰도지수와 설계점의 값은 서로 연관되어 있으므로 신뢰도지수를 직접 구할 수는 없고,  $X'_i$  축에 대한 민감도지수(sensitivity index)  $\alpha_i$ 를 이용하여  $x'_i$  값이 수렴될 때까지 반복계산을 수행하여야 한다.

신뢰도지수는 민감도  $\alpha_i$ 와 밀접한 관련이 있다. 설계점의

$x'_i$ 와  $\alpha_i$ 의 관계는 식 (5)와 같으며, 이에 상응하는 민감도는 식 (6)과 같다.

$$x'_i = -\alpha_i \beta \tag{5}$$

$$\alpha_i = \frac{\left( \frac{\partial g}{\partial X'_i} \right)^*}{\sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial g}{\partial X'_i} \right)^2}} \tag{6}$$

### 3. 케이블교량의 주요 부재 설계단면력

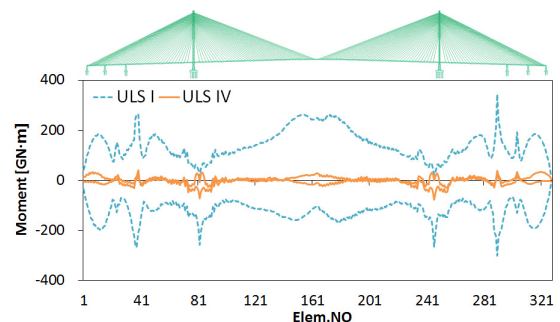
케이블 교량의 주요 부재를 설계함에 있어서, 설계단면력을 산정하기 위해서는 여러 하중조합 중 설계를 지배하는 하중조합을 선정하게 된다. 이 논문에서는 하중조합의 신뢰도지수에 대한 연구에 초점이 있으므로, 설계하중에 근접하는 단면력을 산정하기 위하여 하중조합에 의한 하중효과를 설계단면력으로 결정하였다. 해석 대상 교량은 CBDC에 따라 국내에서 prototype 설계된 주 경간 1.2km, 측 경간 520m, 주탑 높이 283.5m인 사장교이다. 구조해석은 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS로 수행하여 하중효과를 구하였다. Table 3은 CBDC에서 부재별로 제시하고 있는 저항계수와 저항수정계수를 나타낸다.

**Table 3** Resistance factors and resistance modification factors

Member	$\phi$	Member	Load case	$\phi_{rm}$
Stiffening girder	1.00	Main member	ULS I	0.95
			ULS IV	
Concrete pylon	$\phi_c = 0.65$		ULS III	0.90
	$\phi_s = 0.90$	ELS I	1.00	
Cable	0.78	Cable	0.83	

#### 3.1 보강거더의 설계단면력

보강거더에 대한 설계단면력은 중력방향의 하중조합에 의하여 지배되므로 하중조합 중 ULS I-L과 ULS IV-D에 대



**Fig. 1** Moment of stiffened girder for design load cases

하여 비교하였다. 보강거더에 대한 설계하중조합의 모멘트 산정 결과는 Fig. 1과 같으며 교량 전 구간에 대하여 ULS I-L이 지배적인 결과를 나타내었다.

### 3.2 케이블의 설계단면력

케이블 설계단면력도 중력방향의 하중조합이 지배적이므로 검토대상의 하중조합 중 ULS I-L 과 ULS IV-D에 대하여 비교하였다. 케이블에 대한 설계하중조합의 단면력 산정 결과는 Fig. 2와 같으며 모든 케이블에 대하여 ULS I-L이 지배적인 하중조합으로 나타났다. 다만 주탑 부분에서 두 설계 하중조합에 의한 케이블 장력의 크기가 거의 비슷하였다.

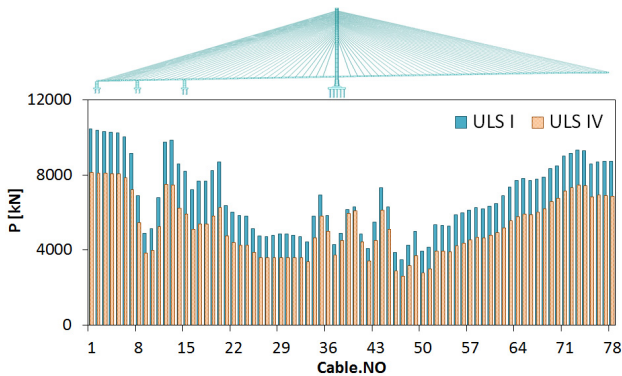


Fig. 2 Cable tension for design load cases

### 3.3 콘크리트 주탑의 설계단면력

콘크리트 주탑 설계는 콘크리트와 철근의 재료계수의 영향을 받게 되며 하중조합과 단면제원에 따라서 설계강도에 미치는 재료계수의 영향은 다르게 된다. 이 연구에서 해석을 수행한 예제 교량의 단면별 저항계수는 식 (7)과 같이 재료계수를 적용한 설계강도( $R_d$ )를 공칭강도( $R_n$ )로 나눈 값을 등가의 저항계수( $\phi_{eq}$ )로 하고 Table 4와 같이 산정하였다.

$$\phi_{eq} = \frac{R_d\{\phi_c f_{ck}, \phi_s f_y\}}{R_n\{f_{ck}, f_y\}} \quad (7)$$

Table 4 Example of equivalent resistance factor for concrete pylon

Section.NO	$\phi_{eq}$ (L)	$\phi_{eq}$ (T)
1	0.77	0.80
2	0.73	0.72
3	0.82	0.82
4	0.85	0.77
5	0.72	0.71
6	0.80	0.79

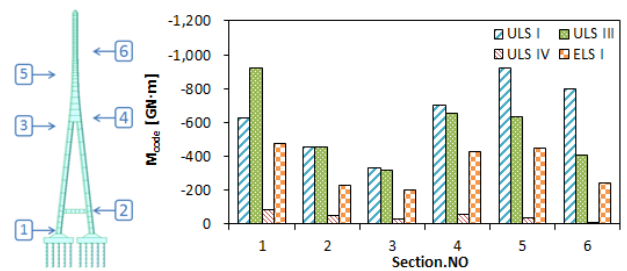


Fig. 3 Longitudinal moment of concrete pylon for load cases

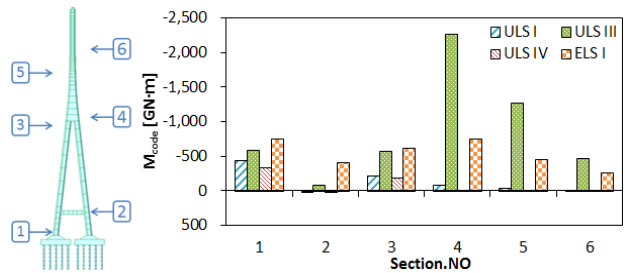


Fig. 4 Transverse moment of concrete pylon for load cases

이 연구에서는 신뢰도지수의 하한값을 구하기 위하여, 모든 단면에 대하여 Table 4의 최대값인  $\phi_{eq} = 0.85$ 를 적용하였다. Table 4에서 L은 교축방향 T는 교축직각방향을 의미한다. 등가의 저항계수를 적용한 설계휨강도 산정 시, 방향성을 고려하여 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 교축방향과 교축직각방향 모멘트를 산정하였다.

교축방향모멘트는 주탑 최하단인 단면1에서 ULS III-W가 가장 큰 값을 주고 있다. 그 이외의 단면에서는 ULS I-L이 가장 큰 하중효과를 나타내는데, 이는 케이블이 집중되어 있는 구간으로 케이블을 통하여 연직하중이 전달되기 때문이다. 교축직각방향은 주탑 하단에서 ELS I-EQG가 설계를 지배하고 윗부분은 ULS III-W가 가장 큰 하중효과를 나타내었다.

### 3.4 하중조합의 하중비율 및 하중구성

부재별로 설계를 지배하는 하중조합에서 주하중 비율을 살펴보면, 보강거더의 경우 ULS I-L 주요하중에 대한 부모멘트는 Fig. 5와 같다. 또한, 여기서  $R_{min}$ 은 설계하중조합으로 산정된 부모멘트의 설계 단면력이며, ULS I-L의 주하중인 활하중의 비율은 평균 0.61이고 최대 0.85를 보였다. Fig. 5의 가운데 부분은 교량 주경간의 중앙부분에 해당하는 곳으로 DC와 DW의 모멘트의 방향이 반대이고 크기는 서로 비슷한 모습을 보이고 있다. 또한, 주하중인 L+I와 DC는 같은 방향의 하중효과를 나타내고 있으므로 DC의 하중계수는 주하중과 같은 방향의 안전율을 확보하게 된다. 반면에 DW

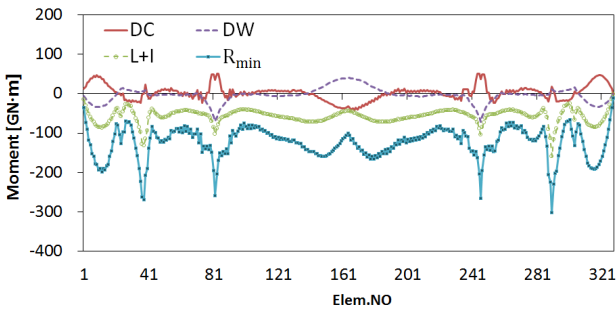


Fig. 5 Load component of ULS I for stiffening girder

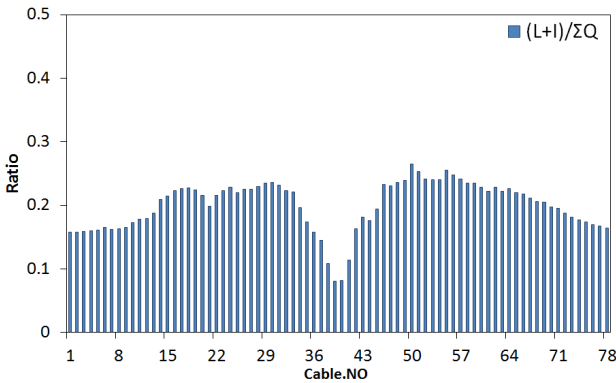


Fig. 6 Live load ratio of ULS I for cable

의 경우에는 L+I와 반대의 하중효과를 나타내고 있으므로 DW의 하중계수는 주하중과 반대 방향의 안전율을 나타내게 되어 하중조합 안전율을 감소시키는 결과를 초래한다. 이러한 현상은 콘크리트 주탑 부근과 교량 양단부분에서도 DC와 L+I 사이에서 동일하게 서로 반대인 양상을 보이고 있다.

마찬가지로 케이블의 경우에도 ULS I-L이 설계를 지배하였기 때문에 하중조합의 비계수하중에 대한 케이블의 활하중 비율을 살펴보면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 주탑 부분 케이블의 활하중비율이 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 이는

설계 단면력의 감소로 이어진다.

또한, 콘크리트 주탑의 모멘트의 경우 Table 5와 같이 하중조합의 종류와 검토단면에 따라 그 비율이 다르게 나타난다. 주로 교축방향은 중력방향 하중에 의한 하중효과가 두드러지며 교축직각방향은 횡방향 하중에 의한 하중효과가 차지하는 비중이 크게 나타나게 된다.

#### 4. 케이블교량의 신뢰도 평가

##### 4.1 설계변수의 통계특성

케이블교량의 주요부재에 대하여 신뢰도해석을 위하여 한계상태함수의 확률변수에 대한 통계특성을 고려하였다. 부재 강도와 하중에 사용된 통계특성은 Table 6과 7에 나타내었다. 콘크리트 주탑 부재강도의 통계특성은 몬테카를로 시뮬레이션(MCS:monte carlo simulation)을 이용하여 Table 8과 같이 선행연구를 통하여 작성한 프로그램(Paik *et al.*,

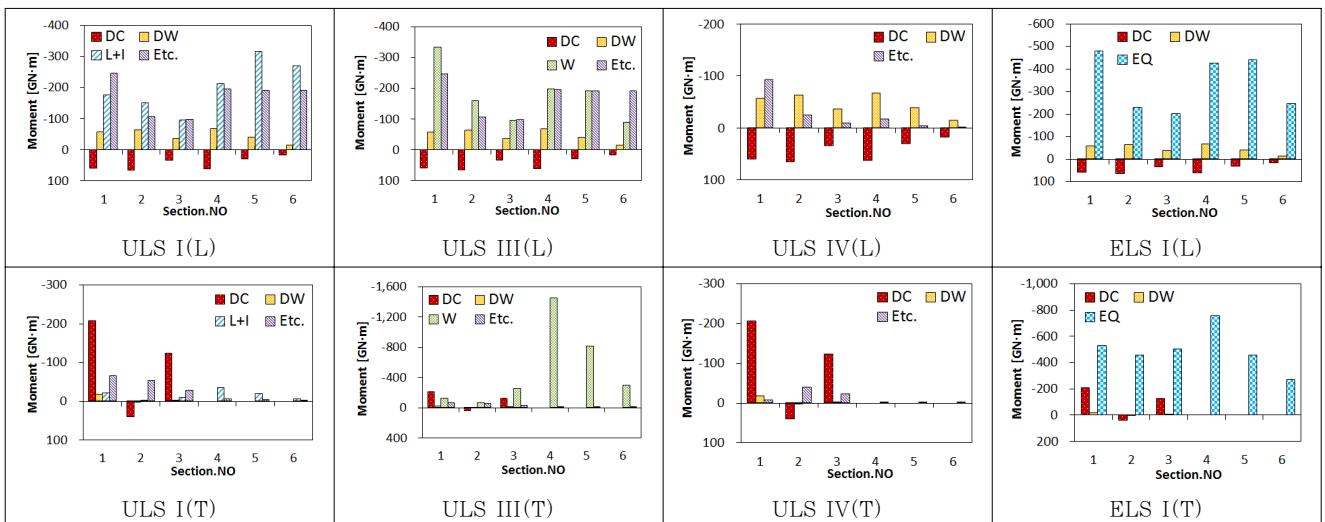
Table 6 Statistical properties of member strengths

Member	$\lambda$	COV	Distribution
Stiffening girder	1.2	0.065	Lognormal
Cable	1.07	0.1	Lognormal
Concrete pylon	1.17	0.13	Lognormal

Table 7 Statistical properties of loads

Load	$\lambda$	COV	Distribution
DC	1.03	0.08	Normal
DW	1.0	0.25	Normal
L+I	1.0	0.2	Lognormal
W	0.989	0.2	Extreme typeI
Etc.(Q, TU, SD, EO)	1.0	0.2	Normal
EQ	0.2337	1.556	Extreme typeII

Table 5 Load component of load cases of pylon moment



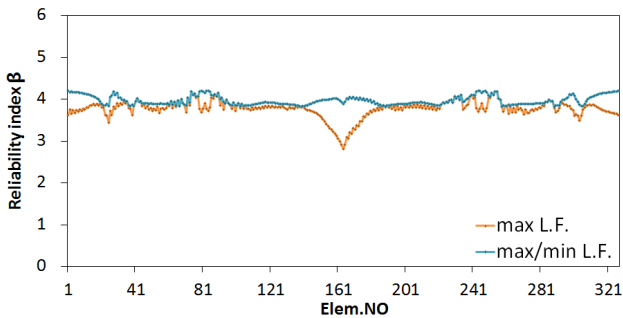
**Table 8** Example statistical properties of concrete pylon

Section No.	Load Case		ULS I-L		ULS III-W		ULS IV-D	
	Bias	COV	Bias	COV	Bias	COV	Bias	COV
section1	1.18	0.13	1.164	0.128	1.182	0.128		
section2	1.18	0.13	1.18	0.13	1.173	0.127		
section3	1.18	0.13	1.17	0.13	1.185	0.127		
section4	1.18	0.13	1.181	0.129	1.181	0.13		
section5	1.17	0.13	1.181	0.131	1.18	0.125		
section6	1.17	0.13	1.182	0.133	1.174	0.131		

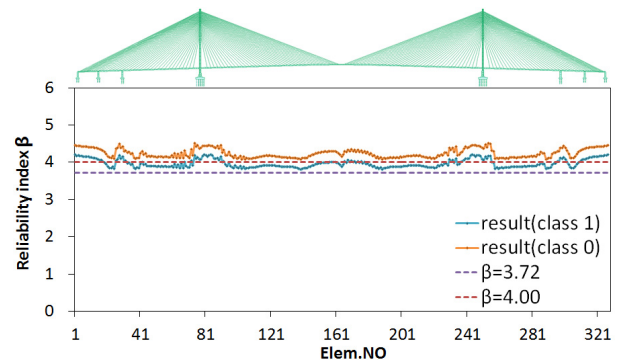
2012)을 적용하여 산정되었다. 이 연구에서는 이들 값 중에서  $\lambda=1.17$ ,  $COV=0.13$ 을 사용하여 신뢰도지수가 하한에 가까운 값을 얻도록 하였다. 그 외의 부재와 하중의 통계특성은 Lee(2014)의 연구결과와 초장대 교량사업단의 연차보고서(SLSB R&D center, 2013)의 연구내용을 적용하여 신뢰도해석을 수행하였다.

### 4.2 보강거더의 신뢰도 지수

보강거더의 경우 단면설계를 지배하는 하중조합이 전 구간 에 걸쳐 ULS I-L이므로 이를 대상으로 신뢰도를 산정하였다. Fig. 5에서 보강거더의 부모멘트에 대한 주요하중효과는 방향성이 반대인 경우가 존재하였는데, 이러한 하중효과의 방향성에 따른 상쇄 효과는 신뢰도지수에 나타나게 된다. Fig. 7은 보강거더를 대상으로 Table 1의 고정하중계수를



**Fig. 7** Reliability indexes of stiffening girder for ULS I



**Fig. 8** Reliability indexes of stiffening girder of class 1 & 0

최대값으로 작용한 경우와 상쇄효과가 있는 반대 방향의 하중에는 최소하중계수를 적용한 경우를 대상으로 신뢰도지수를 산정한 결과이다.

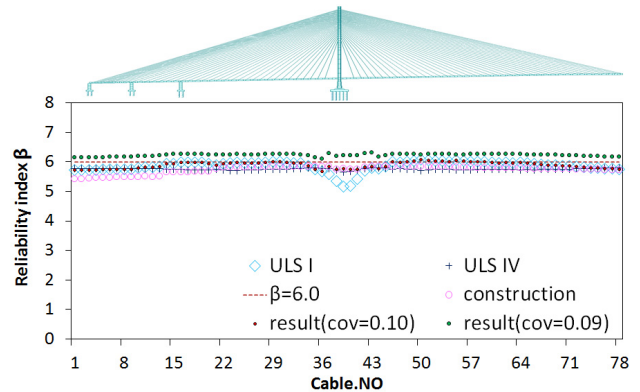
교량의 주경간의 중앙부분과 교량의 양단에서의 신뢰도지수는 두 가지 경우에서 차이를 보이고 있다. 최대 고정하중계수(max L.F.)만을 적용한 경우에는 신뢰도지수가 감소하며, 하중효과의 상쇄를 고려한 최대/최소 고정하중계수(max/min L.F.)를 적용한 경우에는 신뢰도지수가 감소하지 않고 비교적 일정한 수준의 신뢰도지수를 확보하는 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 산정된 보강거더의 신뢰도지수는 Fig. 8과 같다. 하중계수만을 적용한 경우의 신뢰도지수는 전 영역에서  $\beta_T=3.72$ 을 넘고 있으며, 저항수정계수( $\phi_{rm}=0.95$ )를 추가로 적용하는 경우에는 Table 2의 Class 0로 중요도 등급을 높여  $\beta_T=4.0$  이상을 확보함을 보이고 있다.

### 4.3 케이블의 신뢰도 지수

케이블의 경우 보강거더와 마찬가지로 설계를 지배하는 하중조합이 모든 케이블에 대하여 ULS I-L이 지배하였으며, Fig. 2에 보인 바와 같이 ULS I-L과 ULS IV-D의 단면력이 주탑 부근 케이블에서 비슷한 값을 보였다. 주탑 부근 케이블의 경우에는 시공중의 하중조합이 지배하게 된다. 시공중의 하중조합은 CBDC에서 고정하중(DC) 계수는 1.25를 사용하고 가설시하중(ER) 계수는 1.5를 적용한다. ULS I-L과 ULS IV-D 및 시공중 하중조합에 대하여 Fig. 9와 같이 신뢰도를 산정하여 나타내었다. 설계단면력은 주탑 부근의 몇몇 케이블은 시공중 하중조합이 지배하고, 나머지 구간에서는 ULS I-L이 지배적이다. 단면설계를 지배하는 하중조합의 신뢰도지수는 평균적으로 5.90 정도로, 목표신뢰도지수 6.0에 근접한 수준이라고 할 수 있다.

케이블의 신뢰도지수 산정을 좀 더 분석하기 위하여 지배 하중조합인 ULS I-L에 대하여 식 (6)에 따라 하중조합의



**Fig. 9** Reliability indexes of cable for load cases

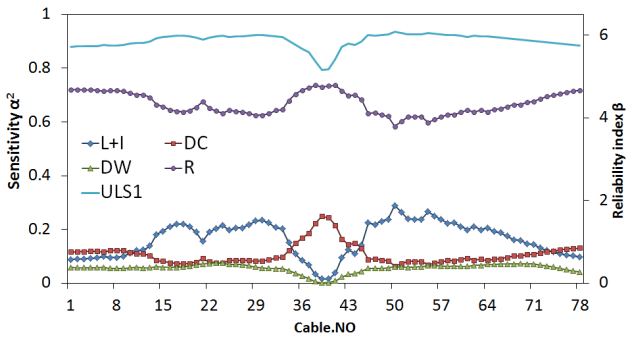


Fig. 10 Sensitivity analysis of cable for ULS I

민감도분석을 수행하였다. Fig. 10에서 설계저항강도 R의 민감도가 상당히 큰 비중을 차지하고 있으며, 주탑 부근과 양단케이블에서는 고정하중 DC, 그 외 부분에서는 활하중 L+I이 다음으로 큰 민감도를 보였다.

결국 케이블 부재의 신뢰도지수는 설계저항강도의 통계특성에 매우 민감한 결과를 가져오게 된다. 만일 Table 6의 케이블 통계특성에서 변동계수를  $COV=0.09$ 로 적용하여 신뢰도지수를 산정하면 전 구간에서 목표신뢰도지수를 만족하게 되며 Fig. 9에 보인 바와 같이 평균적으로 6.23의 신뢰도지수를 확보하게 된다.

또한, Fig. 9의 주탑 부근 케이블에서 ULS I-L의 신뢰도지수가 감소하는 이유는 Fig. 6에서 본 바와 같이 활하중 비율이 감소하기 때문이다. 즉, 하중조합의 주하중인 활하중의 하중계수가 확보해야 할 신뢰도지수가 제대로 나타나지 않게 된다. 이는 Fig. 10의 민감도분석 결과에서도 확인할 수 있는데 주탑 부근에서 케이블의 활하중 민감도가 매우 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.4 콘크리트 주탑의 신뢰도 지수

콘크리트 주탑의 모멘트에 대한 신뢰도평가는 방향성에 따라 교축방향과 교축직각방향에 대하여 수행하였다. 먼저 교축방향 모멘트에 대한 콘크리트 주탑의 신뢰도 분석 결과는 Fig. 11과 같다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 고려된 4가지 하중조합의 신뢰도는 모든 단면에 걸쳐서 비슷한 수준의 신뢰도를 보였다.

또한, 고려된 하중조합 중에서 각 검토단면의 설계를 지배하는 하중조합만을 고려하여 신뢰도지수를 산정하여 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 3과 4에서와 같이 주탑의 하중조합은 검토단면1은 ULS III-W가, 검토단면 2~6은 ULS I-L이 지배적인 하중조합으로 나타났다. ULS I-L의 경우 CBDC의 저항수정계수인 0.95와 ULS III-W의 경우인 0.9를 적용하면 모든 검토단면에서 지배하중조합이 Table 2에 제시

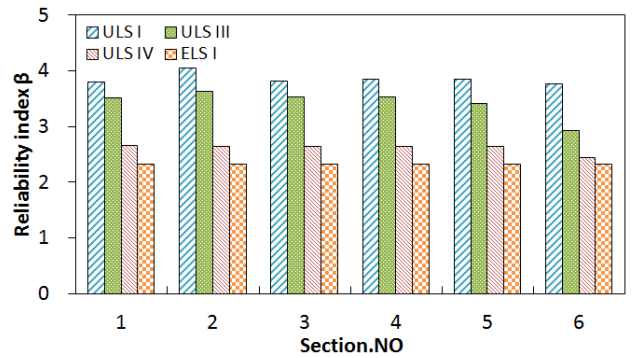


Fig. 11 Reliability indexes of longitudinal moment of pylon for load cases

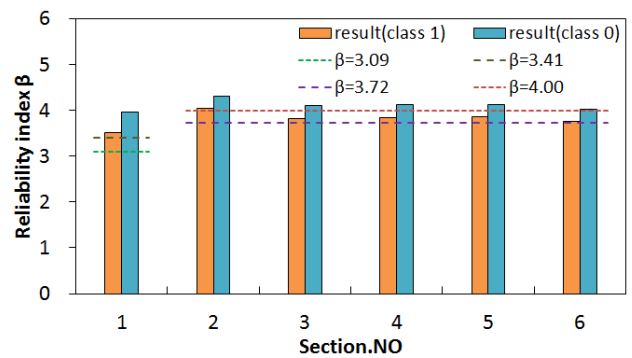


Fig. 12 Reliability indexes of longitudinal moment of pylon of class 1 & 0

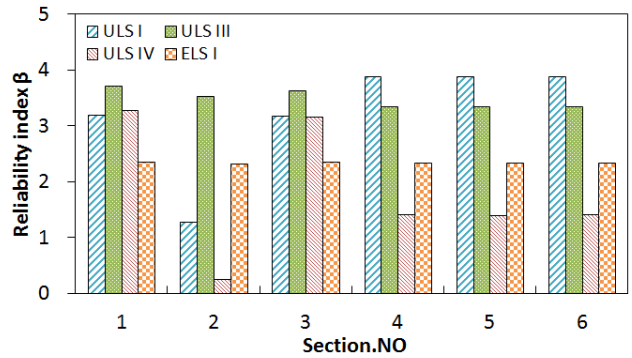


Fig. 13 Reliability indexes of transverse moment of pylon for load cases

한 목표신뢰도 수준을 만족하였다.

교축직각방향 모멘트에 대한 콘크리트 주탑의 신뢰도 분석 결과는 Fig. 13과 같다. 횡방향 하중 조합인 ULS III-W와 ELS I-EQ에 대한 신뢰도는 모든 단면에서 일정한 값을 보인다. 단면2에서 ULS I-L과 ULS IV-D의 신뢰도가 매우 작은 이유는 단면2의 위치에 보강거더를 지지하기 위한 수평 부재가 있으므로 중력방향 하중에 의한 횡방향 모멘트가 작기 때문이다. 또한, 단면 4, 5, 6은 Fig. 4에서 보인 바와 같이 교직방향으로는 자중에 의한 모멘트가 발생하지 않아 ULS IV-D의 신뢰도지수가 작다.

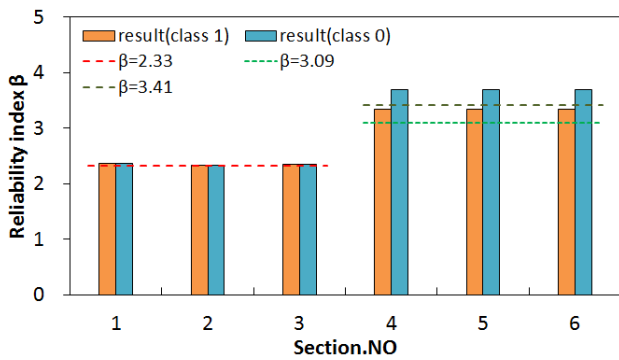


Fig. 14 Reliability indexes of transverse moment of pylon of class 1 & 0

각 단면의 설계를 지배하는 하중조합에 대한 신뢰도지수를 도시하면 Fig. 14와 같다. 검토단면 1~3은 ELS I-EQ이, 검토단면 4~6은 ULS III-W가 지배적인 하중조합이다. ULSIII-W의 경우 저항수정계수는 0.9이며 극단상황한계상태에 대하여는 저항수정계수를 구분하지 않고 있다. 이로부터 모든 단면에서 지배하중조합에 대하여 목표신뢰도지수를 만족함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

이 논문에서는 도로교설계기준(한계상태설계법)의 케이블 교량편(CBDC)을 적용하여 설계된 prototype 사장교를 대상으로 설계기준의 하중조합에 대한 신뢰도 분석을 수행하고 신뢰도지수에 미치는 하중효과에 대한 영향을 분석하였다.

CBDC에서 제시한 하중조합의 하중계수를 이용한 설계는 하중조합별 목표신뢰도지수를 만족시키는 결과를 얻었다. 보강거더는 활하중조합인 ULS I이 설계를 지배하며, ULS I의 하중계수를 적용하면 목표신뢰도지수인 3.72를 확보함을 보였다. 설계등급을 상향하는 경우에는 저항수정계수 0.95를 적용하여 목표신뢰도지수 4.0을 만족함을 보였다. 케이블 설계하중은 ULS I과 시공 중 하중조합이 지배하며 케이블의 목표신뢰도지수인 6.0 수준을 얻을 수 있었다. 특히 케이블 인장강도의 변동계수가 신뢰도에 미치는 민감도가 매우 크게 나타나므로, 케이블 제작의 정밀도가 구조물의 안전에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

콘크리트 주탑의 설계는 교축방향은 ULS I, ULS III이 지배하고, 교직방향은 ULS III과 ELS I이 지배하였다. 설계기준의 하중계수를 적용하여 하중조합별 목표신뢰도지수를 확보함을 확인하였으며, 설계등급을 상향하기 위한 저항수정계수를 적용하여 증가된 목표신뢰도지수를 얻을 수 있었다. 향후 지진하중조합과 같은 극단상황한계상태의 목표신뢰도지수와 활하중이나 풍하중과 같은 극한한계상태의 목표신뢰도지수를

일원화하기 위한 지속적인 연구가 필요하다고 사료된다.

교량 설계의 목표신뢰도지수는 설계기준에서 제시하는 하중조합의 하중계수를 통하여 달성할 수 있도록 고안되었다. 각각의 하중조합에는 주하중이 존재하며 주하중의 하중계수가 해당 하중조합의 신뢰도에 미치는 영향이 크다. 케이블 부재의 ULS I에서 활하중이 차지하는 비율이 낮은 주탑 부근의 케이블은 목표신뢰도보다 낮은 값을 주는 것이 하나의 예이다. 이들 케이블의 설계는 시공 중 하중조합으로 지배되므로 설계의 안전율은 확보된다.

케이블교량의 시공단계에 따른 자중 효과의 방향성과 활하중이나 풍하중과 같은 변동하중의 방향성이 다를 수 있다. 하중조합에 있어서 변동하중의 방향과 비교하여 자중이 유리하게 작용하는 경우와 불리하게 작용하는 경우를 고려하여 설계기준에서는 최대/최소 하중계수를 제시하고 있다. 자중에 대하여 기준에서 제시한 최대/최소 하중계수를 적용하여 균일한 수준의 목표신뢰도지수를 확보함을 확인할 수 있다.

### 감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토교통부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

### References

AASHTO (2014) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

CEN (2001) *Eurocode0 : Basis of Structural Design*, EN1990, European Committee for Standardization.

Ghosn, M., Moses, F., Wang, J. (2003) *Design of Highway Bridges for Extreme Events*, NCHRP Report 489, National Academy Press, Washington, DC. pp.64~70.

Hwang, E.S., Paik, I.Y. (2008) *Basic Theory of Reliability and Reliability-Based Design Code*, Korea Bridge Design & Engineering Research Center, pp.10~24.

Imai, K., Frangopol, D.M. (2001) Reliability-Based Assessment of Suspension Bridges: Application to the Innoshima Bridge, *J. Bridge Eng.*, ASCE, 6, pp.398~411.

Lee, S.H. (2014) Calibration of the Load-Resistance Factors for the Reliability-based Design of Cable-supported Bridges, Ph.D thesis, Dept. of Civil and



- Environmental Engineering., Seoul National University, pp.150~239.
- Lee, S.H., Lee, H.S., Paik, I.** (2014) Employment of Probabilistic Concept in Development of Design Manual for Long-span Cable-supported Bridge, *Proceedings of the 7th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS)*, Shanghai.
- MLTM** (2012, 2014) *Highway Bridge Design Code (Limit State Design Method)*, Korea Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs.
- MLTM** (2014) *Highway Bridge Design Code (Limit State Design Method) : Cable-supported Bridge*, Korea Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs.
- Nowak, A.S.** (1999) Calibration of LRFD Bridge Design Code, NCHRP Report 368, Transportation Research Board, Washington DC., pp.18~20.
- Nowak, A.S., Collins, K.R.** (2000) *Reliability of Structures*, McGraw-Hill, pp.91~137.
- Paik, I., Lee, S.H., Lee, J., Yun, J.U., Lee, H.S.** (2012) Design Life and Reliability-based Design Concept for Long-Span Cable-Supported Bridge, *Proceedings of the International Conference of Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, Seoul.
- Super Long Span Bridge R&D Center** (2012) *Design Report of Prototype Cable-stayed Bridge*, Seoyeong Engineering Co. Ltd.
- Super Long Span Bridge R&D Center** (2013) *Technical Report on Applicability of Design Load Combination*, Gachon University, pp.22~40.

## 요 지

이 논문에서는 케이블교량 설계기준의 설계하중조합에 대한 신뢰도분석을 수행하였다. 설계기준에서 정의한 하중계수와 저항계수를 적용하여 설계된 실제 케이블교량을 대상으로 주 부재별 통계특성과 설계지배 하중조합을 분석하였다. 신뢰도분석을 통하여 하중조합별로 설정된 목표신뢰도지수를 확보됨을 확인하였고, 교량의 중요도를 상향할 수 있는 저항수정계수의 적용성을 검토하였다. 설계변수들이 신뢰도지수에 미치는 민감도 분석을 통하여 케이블의 신뢰도에 중요한 영향을 주는 요소를 분석하였다. 이를 통하여 설계기준의 안전계수들을 적용한 설계를 통하여 케이블교량의 목표신뢰도지수를 확보할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 케이블교량, 한계상태설계법, 목표신뢰도지수, 하중저항계수, 저항수정계수, 민감도 분석