

현수교의 시공절차와 인위적 불확실성을 고려한 구조신뢰성 평가

Structural Reliability Evaluation Considering Construction Stage and Epistemic Uncertainty of Suspension Bridges

한성호* · 신재철**

Han, Sung Ho · Shin, Jae Chul

Abstract

This study presented the basic data for determining reasonable construction method and evaluating the structural safety of suspension bridges. The analytical program was developed to conduct initial shape and natural frequency analysis, construction stage analysis and reliability analysis considering construction sequences. This program was based on analysis models of suspension bridges and reliability theories used in the previous study. A construction method was established considering various construction variables such as construction order and construction direction of girder and synchronized construction of main and side span etc. The dynamic construction analysis by a construction scheme was conducted with the developed program. Benefits of the characteristic analysis by the construction scheme was presented estimating structural response of critical members respectively. Structural reliability analysis by construction stage was conducted considering aleatory uncertainties. The safety of suspension bridges by established construction method was quantitatively estimated using reliability index and failure probability. Analytical results were re-estimated considering epistemic uncertainties, and critical percentile distributions of risk at the construction stage were presented using the frequency histogram.

Keywords : *dynamic construction analysis, synchronized construction, structural reliability analysis, structural safety frequency histogram, uncertainty*

요 지

본 연구에서는 현수교의 합리적인 시공방안 결정 및 구조안전성 평가에 대한 기초자료를 제시하였다. 기 연구된 현수교의 해석모델 및 신뢰성이론을 바탕으로 초기형상해석, 자유진동해석, 시공변수를 고려한 시공단계해석 및 신뢰성해석 등을 수행할 수 있는 수치해석프로그램을 개발하였다. 현수교의 시공방안은 보강형의 시공순서, 시공방향 및 주경간과 측경간의 동시 시공성 등의 다양한 시공변수를 고려하여 설정하였다. 시공방안에 따른 동적시공단계해석은 작성된 해석프로그램에 의해 수행하였으며 주요부재의 응답특성을 검토하여 각각의 시공방안에 대한 장·단점을 제시하였다. 시공단계별 구조신뢰성해석은 자연적 불확실성을 고려하여 신뢰성지수 및 파괴확률을 산정함으로써, 설정된 시공방안에 따른 현수교의 안전성을 정량적으로 평가하였다. 아울러, 인위적 불확실성을 고려하여 산정된 해석결과에 대해 재평가하였으며, 시공단계 위험성의 주요 퍼센트 분포를 빈도수 히스토그램을 이용하여 제시하였다.

핵심용어 : 동적시공해석, 동시시공성, 구조신뢰성해석, 구조안전성, 빈도수 히스토그램, 불확실성

1. 서 론

일반적으로 사장교나 현수교와 같은 케이블 지지 장경간 교량은 완성단계 보다 시공 중에 구조적으로 취약한 것으로 알려져 있다. 시공도중 지진 및 설계 풍속이하의 바람에 의해 교량이 붕괴되거나, 안전도 검토 없이 반입된 시공 장비 및 가설재 등에 의한 과하중에 의해 교량 붕괴사고가 발생할 가능성이 있다(방명석(1999), 한국건설기술연구원(1996)). 따라서 완성구조계를 기본으로 해석해야 할 뿐만 아니라, 다양한 시공변수를 고려한 시공방안을 가정하여 수정과 재해

석, 구조안전성 검토가 필수적으로 수행되어야 할 것이다(현대건설기술연구소(1994)). 최근 장대교량의 구조설계 및 시공과정에 대한 역학적 거동 특성을 파악하기 위해 정적해석을 비롯한 지진응답해석, 내풍해석 및 시공단계해석 등에 관한 연구가 많이 시행되고 있다(건설교통부(2000), 방명석(2007), Gimsing(1988), Nazmy 등(1990)). 장대교량의 시공 단계 및 완성구조계에 대한 구조안전성 평가는 기존의 결정론적 방법에 비해서 부재강성 및 외부하중에 포함된 불확실성의 영향을 고려할 수 있는 구조신뢰성해석 방안을 이용하는 것이 합리적일 것이다(한성호 등(2005), Ang(2007)). 또

*정회원 · 충남대학교 토목공학과 · 공학박사 (E-mail : han2001@cnu.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 충남대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : shin120@cnu.ac.kr)

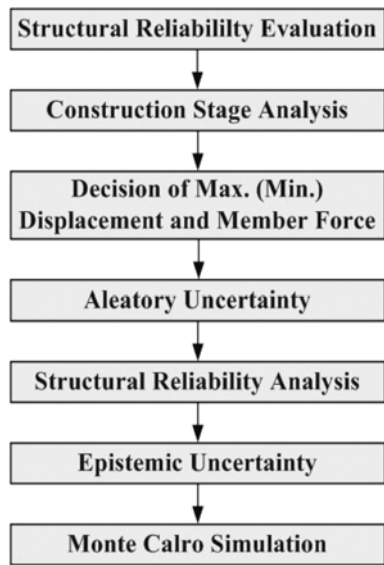


그림 1. 구조신뢰성 평가 및 시공단계해석 개요도

한 불확실성은 자연적 불확실성(Aleatory Uncertainty)과 인위적 불확실성(Epistemic Uncertainty) 등의 형태로 구분하여 평가하는 것이 중요하다(Ang(2007)).

따라서 본 연구에서는 시공 중 현수교의 구조안전성 평가를 위해 시공변수를 고려한 동적시공단계해석 및 구조신뢰성해석을 수행하고자 한다. 이를 위해 시공변수를 고려하여 동적시공단계해석 및 구조신뢰성해석을 수행할 수 있는 해석프로그램을 개발하였다. 보강형의 시공순서, 시공방향 및 주경간과 측경간의 동시 시공과정 등을 현수교의 시공변수로 고려하여 다양한 시공단계해석 조건을 설정하였으며, 각각의 시공조건에 따른 동적시공단계해석은 개발된 해석프로그램을 이용하여 수행하였다. 동적시공단계해석에 따른 주케이블 긴장력, 절점변위 및 부재력 응답 특성 등을 검토하여 시공방향별 장·단점을 비교, 평가하였다. 또한 해석결과를 바탕으로 자연적 불확실성을 고려한 구조신뢰성해석을 수행하여 신뢰성지수 및 파괴확률을 산정함으로써, 현수교의 시공방안에 따른 구조안전성을 정량적으로 평가하였다. 아울러 평가된 신뢰성지수 및 파괴확률에 대해 인위적 불확실성을 고려하여 주요 퍼센트 분포에 대해 재평가 하였다. 그림 1은 본 연구에서 수행한 동적시공단계해석 및 구조안전성 평가과정에 대한 개요도를 도시한 것이다.

2. 현수교의 시공단계해석 모델 및 구조신뢰성해석

2.1 현수교의 시공단계해석 모델

본 연구에서는 기존 연구에서 제시된 탄성현수선요소, 3차원 프레임요소 및 시공상태를 모사하기 위한 3차원 절점연결요소 등을 이용하여 동적시공단계해석을 수행하기 위한 해석모델을 결정하였다(김철영(1993), 김호경(1993), 안상섭(1991)). 현수교는 케이블 지중으로 인한 새그의 영향과 보강형 및 주탑에 작용하는 매우 큰 축력 등에 의한 기하학적 비선형성을 고려하기 위해 탄성현수선요소를 이용하여 케이블요소를 모델링하였다. 또한 보강형과 주탑의 모델링을 위해 각 방향의 변위, 회전 및 뒹(Warping)등의 7개의 자유도를 갖는 3차원 프레임요소를 적용하였다. 아울러, 보강형

의 시공상태를 모사하기 위해 회전변형을 원하는 만큼 자유롭게 전달할 수 있는 3차원 절점연결요소를 이용하였다.

2.2 구조신뢰성해석

현수교의 시공안전성에 대한 정량적 평가는 동적시공단계해석 결과 및 AFOSM(Advanced First Order Second Moment) 방법을 이용하여 구조신뢰성해석을 수행하였다(Rackwitz 등(1978)). 주탑의 경우, 축력과 휨모멘트가 동시에 작용하고 있으며 주케이블의 경우, 케이블긴장력이 작용하고 있으므로, 한계상태방정식을 정의하기 위한 확률변수는 축력, 휨모멘트, 단면이차모멘트, 케이블긴장력 및 단면적 등을 고려하였다.

$$f_p = \frac{P(\cdot)}{A(\cdot)_p} + \frac{M_{22}(\cdot)}{I_{22}(\cdot)_p} C_z + \frac{M_{33}(\cdot)}{I_{33}(\cdot)_p} C_y \quad (1)$$

$$f_c = \frac{T(\cdot)}{A(\cdot)_c} \quad (2)$$

여기서 f_p, f_c : 주탑 및 케이블 응력

$P(\cdot)$: 주탑의 축력

$M_{22}(\cdot), M_{33}(\cdot)$: 주탑의 방향별 휨모멘트

$T(\cdot)$: 주케이블 긴장력

$A(\cdot)_p, A(\cdot)_c$: 주탑 및 케이블의 단면적

$I_{22}(\cdot)_p, I_{33}(\cdot)_p$: 주탑의 방향별 단면이차모멘트

c_y, c_z : 단면도심으로 부터의 최대거리

따라서 한계상태방정식은 부재응력 식을 이용하여 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$g(\cdot)_{f_p} = f_p = \frac{P(\cdot)}{A(\cdot)_p} + \frac{M_{22}(\cdot)}{I_{22}(\cdot)_p} C_z + \frac{M_{33}(\cdot)}{I_{33}(\cdot)_p} C_y \quad (3)$$

$$g(\cdot)_{f_c} = f_c = \frac{T(\cdot)}{A(\cdot)_c} \quad (4)$$

여기서 f_{y_p}, f_{y_c} : 주탑 및 케이블의 극한응력

확률변수의 불확실성은 다음과 같은 두 가지 형태로 구분하는 것이 중요하다. 이른바, 자연적 및 인위적 불확실성이며, 각각 다른 속성을 가지고 있다. 자연적 불확실성은 자연의 무작위성(Randomness)과 관계가 있으며, 구조물의 파괴확률 및 위험도를 유도하는데 있어 영향을 주는 반면, 인위적 불확실성은 실제 구조물의 모델링 등의 오류에 의한 불완전성과 관계가 있으며, 평가된 해석결과의 가능 범위를 결정하는데 있어 영향을 미친다(Ang(2006)). 따라서 현수교의 파괴확률은 부재강성, 케이블긴장력 및 적용하중에 의한 부재력의 무작위성이 반영되어야 할 것이다. 또한 부재강성, 케이블긴장력 및 적용하중에 의한 부재력의 평균 및 중앙값(Median)의 평가에 있어서 인위적 불확실성 때문에 실제 파괴확률은 확률변수로서 고려되어야 할 것이다.

3. 시공변수를 고려한 현수교의 시공단계해석

본 연구는 기존 시공단계별 정적응답에 관한 연구(방명석(2007))를 바탕으로 한 연속 논문으로 보강형의 시공순서, 시공방향 및 동시 시공성 등을 시공변수로 고려한 8개의 시공방안에 대해 동적시공단계해석을 수행하였다. 현수교의 시공단계는 27단계로 구분하였으며, 각각의 시공방안에 대해 응답특성을 분석한 후, 제시한 시공방안에 따른 장·단점을 비

표 1. 주·측경간 보강형의 시공방향 및 동시 시공성을 고려한 시공방향

구분	주경간 보강형의 시공방향	측경간 보강형의 시공방향	동시 시공성
Case 1	중앙경간 (중앙) → 주탑	앵커리지 → 주탑	×
Case 2	주탑 → 중앙경간 (중앙)	앵커리지 → 주탑	×
Case 3	중앙경간 (중앙) → 주탑	주탑 → 앵커리지	×
Case 4	주탑 → 중앙경간 (중앙)	주탑 → 앵커리지	×
Case 5	중앙경간 (중앙) → 주탑	앵커리지 → 주탑	○
Case 6	주탑 → 중앙경간 (중앙)	앵커리지 → 주탑	○
Case 7	중앙경간 (중앙) → 주탑	주탑 → 앵커리지	○
Case 8	주탑 → 중앙경간 (중앙)	주탑 → 앵커리지	○

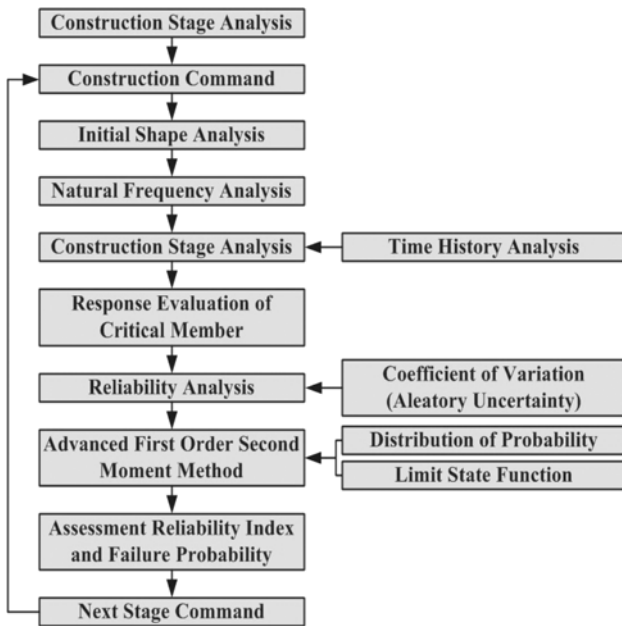


그림 2. 동적시공단계해석 및 구조신뢰성해석 알고리즘

교, 평가하였다. 시공방안(Case 1-8)은 표 1에 도시하였다. 현수교의 동적시공단계해석 모델링은 202개의 탄성현수선요소, 174개의 3차원 프레임요소, 204개의 3차원 절점연결요소 및 379개의 절점을 이용하였다. 그림 3에 도시된 해석알고리즘은 기존 시공단계 해석프로그램(김호경(1993), 방명석(2007))에 구조신뢰성해석 알고리즘을 추가하여 확장시킨 것이다. 개발된 해석프로그램은 시공명령어에 따라 시공조건을 고려한 구조시스템을 결정하여 동적시공단계해석 및 구조신뢰성해석을 수행할 수 있는 해석 수단이다. 타정식 3경간 단 순지지 현수교인 대상 구조물은 2개의 문형 라멘식 주탑과

표 2. 대상 현수교의 단면 및 구조제원

구분	보강형	주탑	케이블
단위길이당 중량 (tonf/m)	4.235	0.512	0.6908
단면적 (m ²)	0.22044	0.06518	0.08356
탄성계수 (tonf/m ²)	2.1 × 10 ⁷	2.1 × 10 ⁷	2.0 × 10 ⁷
단면이차모멘트 I ₃₃ (m ⁴)	0.1316	0.0530	-
단면이차모멘트 I ₂₂ (m ⁴)	3.2667	0.0427	-
비틀림상수 J (m ⁴)	0.4933	0.5000	-

표 3. 대상 현수교의 구조형식

구분	내용
구조형식	3경간 2хин지 강상판 타정식 현수교
총연장	128 m + 404 m + 128 m = 660 m
교 폭	차도 : 7.2 m 보도 : 1.2 × 2 m

직교 이방성박스형 강상판 보강형으로 구성되어 있다. 현수교의 주요제원 및 구조형식은 표 2, 3에 정리하였으며, 그림 3은 동적시공단계해석 및 평가에 이용된 수치해석모델 및 주요부재를 도시한 것이다(건설교통부(1993), 한성호 등(2005)).

3.1 시공단계별 자유진동해석

시공방안별 자유진동해석을 수행한 결과, 시공 중 대상 현수교는 그림 4에 도시된 것과 같이 주경간 보강형의 시공방향에 따라 모드별 고유진동수는 완성구조계와 확연히 다른 양상을 확인할 수 있다. 현수교의 거동특성을 파악하는데 있어서 중요한 주요 저차모드의 경우, Case 1, 3과 Case 2, 4의 결과는 주경간 보강형이 완성되는 시공 17단계 까지는 완전히 다른 결과를 나타낸 이후, 시공 18단계부터 완성구조

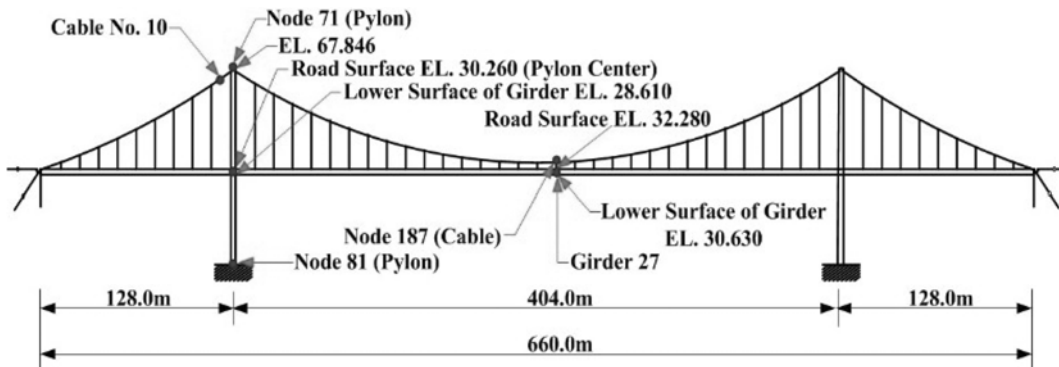


그림 3. 대상 현수교의 수치모델 및 주요부재 위치

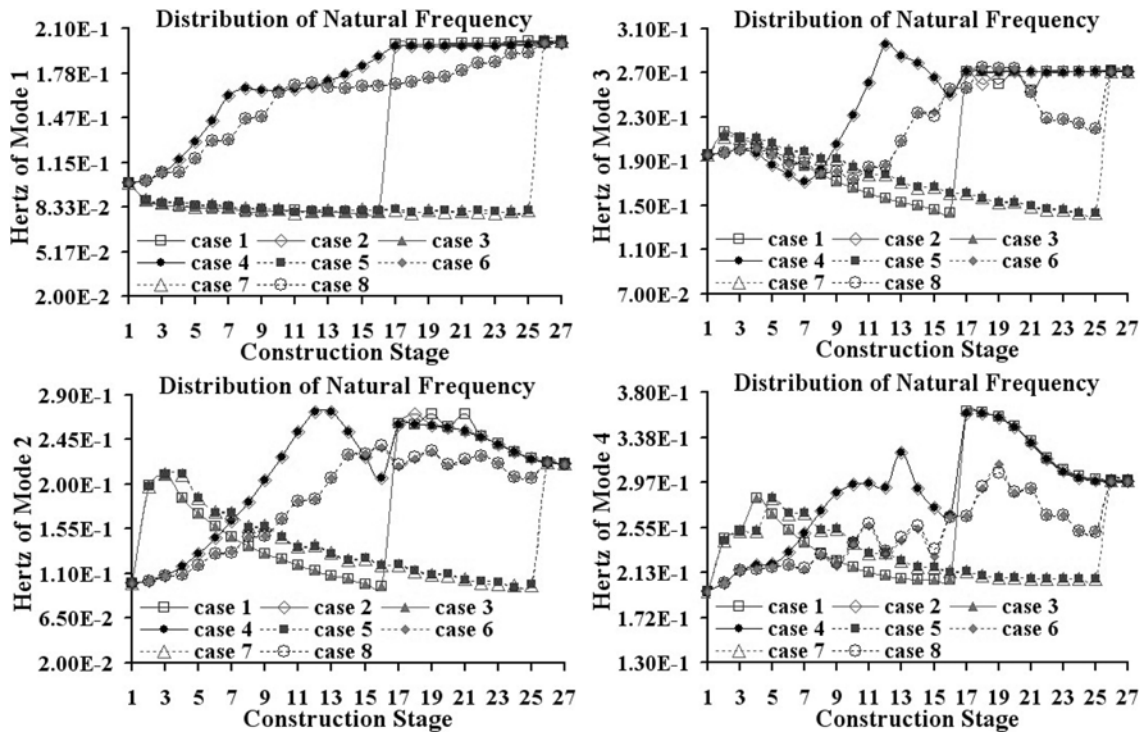


그림 4. 시공방안에 따른 시공단계별 고유진동수

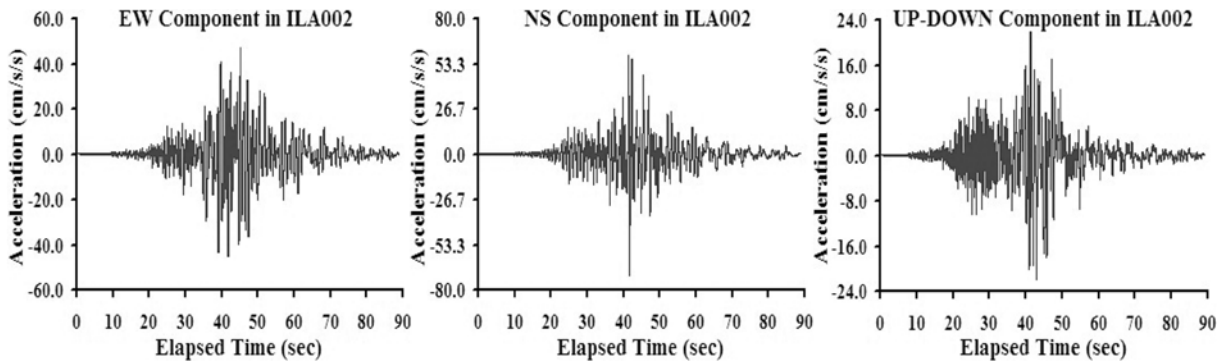


그림 5. 입력지진동의 성분별 가속도 시간이력

계가 형성될 때까지 비슷한 양상을 나타냈다. 동시 시공성을 고려한 Case 5, 7과 Case 6, 8의 경우, 주·측경간 보강형이 완성되기 직전인 25단계 까지 완전히 다른 양상을 나타냈다. 실제 구조물 시공 시, 경제성뿐만 아니라 대상 구조계의 역학적 거동특성 및 안전성 등을 충분히 고찰하기 위해 자유진동해석 결과에 대한 세부적인 검토는 필수적일 것이다.

3.2 동적시공단계해석

현수교의 주요부재에 대해 동적시공단계해석을 수행한 후, 시공방안별 장·단점을 비교, 평가하였다. 주케이블의 경우, 주케이블 긴장력 및 주케이블 중앙부의 절점변위에 대한 응답양상을 검토하였다. 주탑의 경우, 최상단부의 절점변위 및 최하단부의 부재력 응답양상을 평가하였다. 가속도 시간이력은 일반적인 지진특성을 갖는 입력지진동을 선정하였다. 그러나 최근 발생한 지진의 경우 수직성분이 매우 큰 특성을 가지고 있다. 또한 대상 현수교 구조물은 완성계 및 시공단계에서 매우 유연하므로 수직성분에 대해 매우 민감한 응답양상을 보인다는 점을 고려하여 0.154 g로 정규화한 후, 앵커리지 및 주탑의 탄성 지지점에 세 방향(E-W(교축방향), N-S(교축직각방향) 및 Up-Down(수직방향))으로 동시에 작용하

는 것으로 가정하였다. 시공방안별 시간이력해석 시 구조물에 대한 감쇠는 Rayleigh 감쇠를 이용하였다(Chopra(1995)). 수치해법은 Newmark-방법을 이용하여 수행하였다. 그림 5은 본 연구에서 선정한 입력지진동의 각각의 방향별 가속도 시간이력을 도시한 것이다.

3.2.1 입력지진동에 의한 주케이블 긴장력 평가

입력지진동에 따른 주케이블 긴장력 응답양상은 시공방안

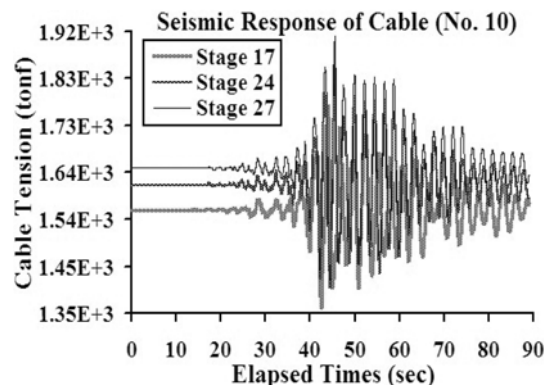


그림 6. 입력지진동에 따른 주케이블 긴장력 응답

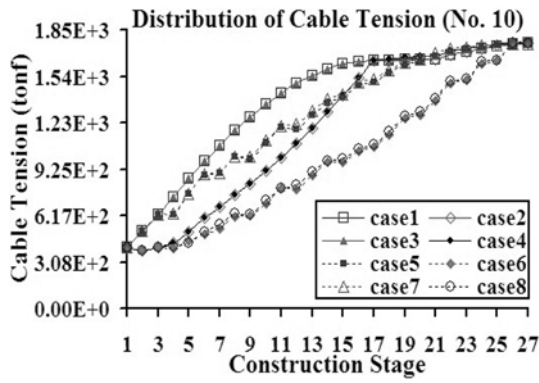


그림 7. 시공단계별 주케이블 긴장력

별 시간이력해석 과정을 통해 평가하였다. 그림 6은 Case 1의 주요 시공단계에 대한 시간이력해석 결과를 도시한 것이다. 또한 그림 7은 완성구조계의 정적해석에서 최대 응답이 산정된 #10번 케이블요소의 시공단계별 동적응답 결과를 도시한 것이다.

주·측경간을 따로 시공하는 Case 1-4의 경우, 주경간 보강형의 완성단계인 시공 17단계까지는 상당히 다른 응답양상을 보이는 반면, 시공 18~27단계까지의 응답양상은 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한 시공 17단계까지는 응답의 증가율이 크게 나타났던 이후, 이후 완성구조계까지의 응답은 상대적으로 완만하게 증가하는 양상을 나타냈다. 동

시 시공성을 고려한 Case 5-8의 응답은 주경간 시공방향에 따라서 상당한 응답 차이를 보였으나, 시공 초기부터 완성구조계까지 선형적 응답양상을 나타냈다.

3.2.2 입력지진동에 의한 절점변위 응답 평가

시공방안을 고려한 절점변위 응답은 주탑의 경우, 최상단부 #71번 절점, 주케이블의 경우, 중앙부인 #187번 절점에 대해 평가하였으며, 그림 8, 9은 주탑 및 주케이블의 동적시공단계해석 결과를 도시한 것이다. 주탑에 대한 각 방향별 동적절점변위 응답을 검토한 결과(그림 8) 교축방향(X-Direction) 응답의 경우, Case 1-4는 주경간 보강형이 완성된 후, 측경간 보강형의 시공이 진행되면서 절대 최대 응답은 시공 19단계에서 산정되었으며, 점차적으로 감소하여 완성구조계를 형성하였다. 반면, 동시 시공방안인 Case 5-8은 시공초기에 증가 양상을 보인 이후, 시공 11단계부터 일정한 양상을 나타냈다. 또한 Case 6, 8은 시공 12단계까지 증가 양상을 보인 이후, 점차적으로 감소하는 양상을 나타냈다. 수직방향(Z-Direction) 응답의 경우, Case 1-4는 주경간 보강형이 시공되면서 증가하는 양상을 보였으나, 시공 7, 8단계에서 절대 최대 응답이 산정된 이후, 점차적으로 감소하여 완성구조계를 형성하였다. 그러나 Case 5-8은 시공방안에 따라서 상당히 다른 응답양상이 검토되었다. Case 6, 8은 시공 7단계에서 최대 응답이 산정된 이후, Case 1-4의 양상

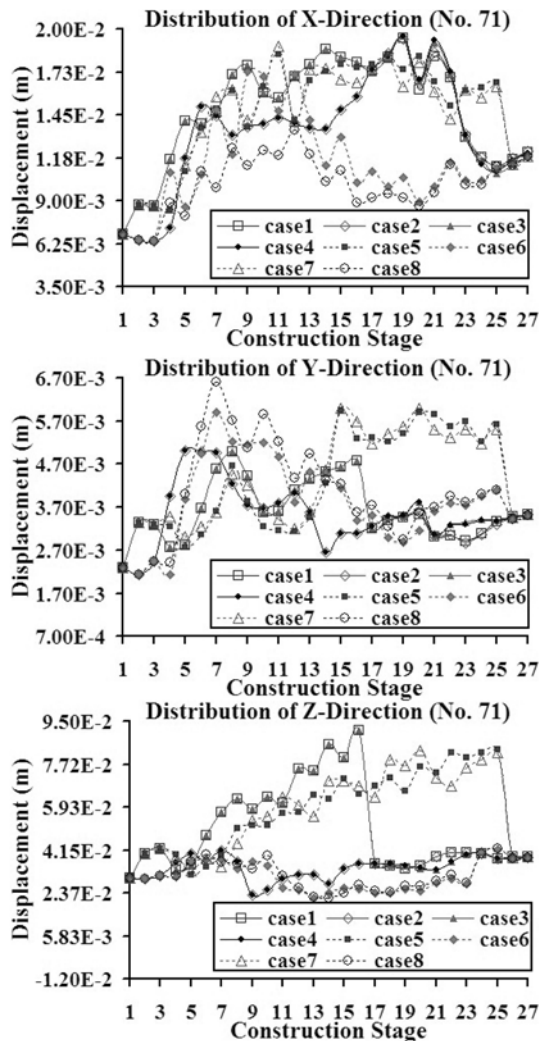


그림 8. 시공단계별 주탑 상단부의 최대 절점변위 응답

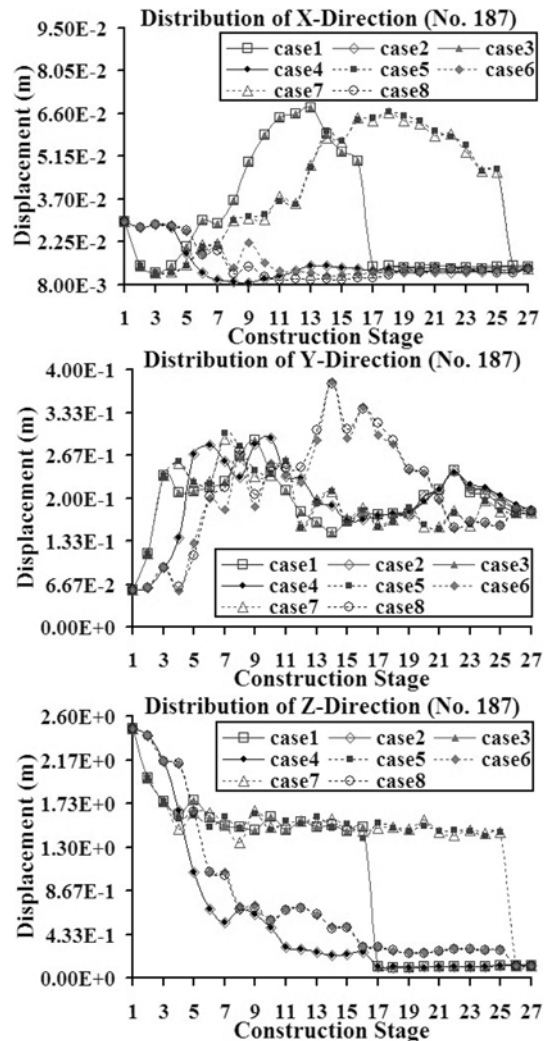


그림 9. 시공단계별 주경간 주케이블의 최대 절점변위 응답

과 같이 점차적으로 감소하는 양상을 보인 반면, Case 5, 7은 시공 15단계까지 증가하는 양상을 보이다가 완성구조계가 형성되기 직전까지 일정한 응답양상을 나타냈다. 교축직각방향(Y-Direction)의 응답은 주경간의 시공방향에 따라 완전히 다른 응답양상이 나타났다. Case 1, 3과 Case 5, 7은 주경간이 완성될 때까지 점진적인 증가 양상을 보였으며, 주경간이 완성된 이후, 급격히 감소하는 양상을 나타낸 반면, Case 2, 4와 Case 6, 8의 응답은 전반적으로 일정한 양상을 나타냈다.

주케이בל 중앙부에 대한 각 방향별 동적절점변위 응답을 검토한 결과(그림 9) 교축방향 응답은 Case 1, 3의 경우, 절대 최대 응답이 산정된 시공 13단계까지, Case 5, 7의 경우, 절대 최대 응답이 산정된 시공 18단계까지 점진적인 증가 양상을 보였으며, 주경간 완성단계에서 급격히 감소하는 반면, Case 2, 4와 Case 6, 8의 응답은 시공 1단계에서 가장 큰 응답이 산정된 이후, 전반적으로 감소하는 양상을 나타냈다. 수직방향 응답의 경우, Case 1-4 및 Case 5, 7은 시공되면서 증가하는 양상을 보였으나, 시공 5, 7-9단계에서 절대 최대 응답이 산정된 이후, 점차적으로 감소하여 완성구조계를 형성하였다. 그러나 Case 6, 8은 시공 14단계에서 절대 최대 응답이 산정된 이후, 점차적으로 감소하는 양상을 보이며, 완성구조계를 형성하였다. 교축직각방향의 응답은 주경간의 시공방향에 따라 완전히 다른 응답 양상이

나타났다. Case 1, 3과 Case 5, 7은 시공 1단계에서 절대 최대 응답이 산정된 이후, 주경간이 완성될 때까지 일정한 양상을 보였으며, 주경간이 완성된 이후, 급격히 감소하는 양상을 나타낸 반면, Case 2, 4와 Case 6, 8의 응답은 시공 1단계에서 최대 응답을 보인 이후, 시공이 진행되면서 점차적으로 감소하는 양상을 나타냈다.

3.2.3 입력지진동에 의한 부재력 응답 평가

시공방안별 부재력 응답은 주탑에서 최대 축력 및 휨모멘트가 발생하는 기초부 부재에 대하여 검토하였으며, 시공변수를 고려한 시공단계별 절대 최대 동적응답양상을 평가하여 그림 10에 도시하였다. 입력지진동에 따른 축력 및 교축직각방향 휨모멘트(M_{22})에 대한 응답양상은 각각의 시공방안별로 절대 최대 응답을 나타낸 시공단계가 일정하지 않았으나, 주목해야 할 점은 주경간 시공방향에 따라 응답양상이 완전히 상이한 결과를 보인다는 것이다. Case 1, 3과 Case 5, 7은 주경간이 완성될 때까지 선형적인 증가 양상을 보였으며, 주경간이 완성된 이후, 급격히 감소하는 응답양상을 나타낸 반면, Case 2, 4와 Case 6, 8의 응답은 시공 초기에 최대 응답을 보인 이후, 전반적으로 일정한 양상을 보였다.

교축방향 휨모멘트(M_{33})의 경우, 전반적인 응답양상은 많은 차이를 보이지 않았으나, 다양한 결과가 검토되었다. Case 1, 3과 Case 5, 7은 시공초기에 Case 2, 4와 Case 6, 8에 비해 큰 응답 양상을 나타냈다.

주요부재의 입력지진동에 따른 대상 현수교의 시공단계별 동적응답특성은 다음과 같이 요약·정리할 수 있다. 주케이בל 긴장력의 경우, 시공전반에 걸쳐 선형적 증가 양상을 나타낸 동시 시공성을 고려한 방안이 우수한 것으로 평가되었다. 절점변위 및 부재력 응답의 경우, 다양한 응답 양상을 나타냈으나, 전반적인 양상을 유추해보면 Case 1, 3과 Case 5, 7에 비해 Case 2, 4와 Case 6, 8의 경우가 비교적 유리한 시공방안으로 검토되었다.

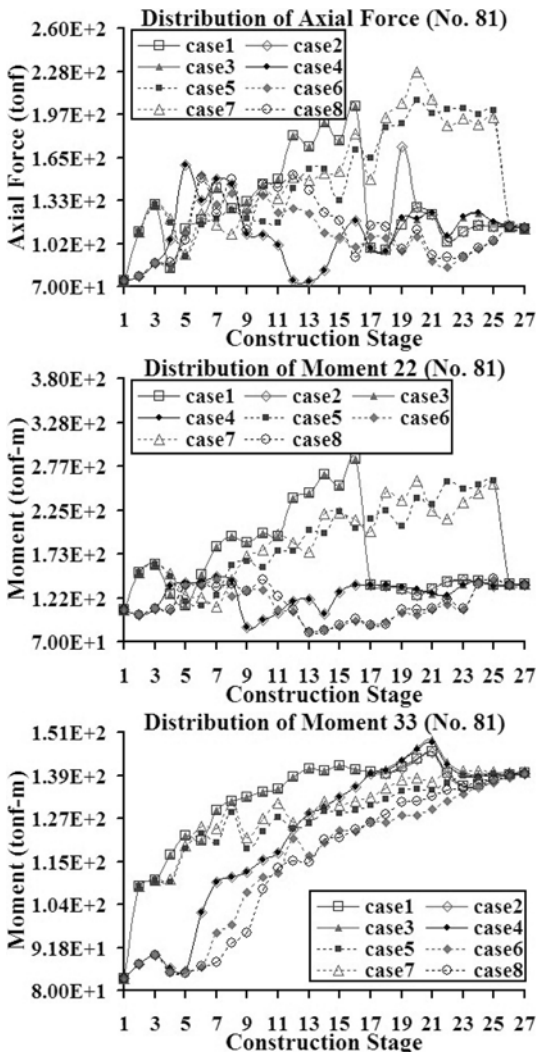


그림 10. 시공단계별 주탑 기초부의 최대 부재력 응답

4. 시공방안별 구조신뢰성해석

대상 현수교의 시공방안별 안전성을 정량적으로 파악하기 위한 구조신뢰성해석은 전 장에서 수행한 동적시공단계해석결과를 이용하여 수행하였다. 구조신뢰성해석에 이용된 AFOSM 방법은 기본 확률변수들을 표준정규분포를 갖는 새로운 변수로 선형 변환하여 변환된 좌표공간의 원점으로부터 가장 가까운 거리에 있는 파괴면상의 한 점(MPFP; Most Probable Failure Point or Design Point, Checking Point)에서 선형 근사함으로써, 언급한 불변성이 결여되는 문제를 해결할 수 있는 방법이다. 또한 연성(상관)확률변수들을 비연성(비상관)확률변수들로 바꾸어 연성을 해결하였으며, Rackwitz 등(1978)은 등가정규변환 방법을 도입함으로써, 연성 비정규분포를 갖는 기본변수들의 한계상태방정식이 비선형 함수인 경우에도 정확한 해석 결과를 산정할 수 있게 제시하였다.

4.1 확률분포 및 가정사항

확률분포는 극한응력, 부재강성의 경우, 정규분포(Normal

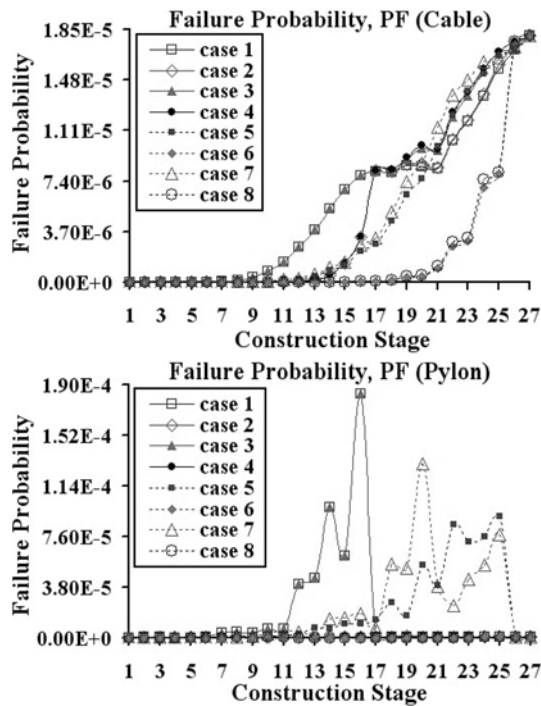


그림 11. 주케이블 및 주탑의 시공단계별 최대 파괴확률

Distribution), 입력지진동에 의한 케이블긴장력 및 부재력의 경우, 대수정규분포(Log-normal Distribution)를 갖는 것으로 가정하였으며, 확률변수는 서로 비연성(Non-Correlation) 관계를 갖는 것으로 가정하였다(Ang(2007)). 대상 현수교의 극한 응력은 케이블의 경우, 16,000 kgf/cm², SWS41 강재인 보강형 및 주탑의 경우, 3,200 kgf/cm²로 검토된 결과를 이용하였다(건설교통부 (1993)). 극한응력의 변동계수(Coefficient of Variation)는 15%, 부재강성의 경우, 10%, 입력지진동에 의한 부재력 응답의 경우, 25%로 가정하여 신뢰성해석을 수행하였다(건설교통부(2005), 한성호 등(2005), Nowak(1993)).

4.2 구조신뢰성해석 결과

현수교의 시공단계별 구조신뢰성해석은 동적 최대응답과 가장한 변동계수에 따른 확률변수의 표준편차를 산정한 후, 식 (3), (4)와 같이 정의된 한계상태방정식을 이용하여 수행하였다. 그림 12는 대상 현수교의 주탑 기초부 및 최대 긴장력이 발생한 #10번 주케이블의 시공단계별 파괴확률을 도시한 것이다. 신뢰성해석 결과 주케이블의 경우, 시공단계가 진행되면서 고정하중의 증가로 인해 파괴확률의 증가 양상을 나타냈으며, 최종단계에서 최대 파괴확률은 1.806E-5로 산정되었다. 시공방안에 따른 양상은 동시 시공성을 고려한 경우가 비교적 우수한 것으로 평가되었다. 주탑의 경우, 파괴확률 양상은 주경간 보강형의 시공방안에 따라 확연히 다른 양상을 나타냈으며, Case 2, 4와 Case 6, 8이 안전한 시공방안으로 평가되었다. Case 1, 3의 시공 16단계에서 최대 파괴확률은 1.835E-4로 산정되었으며, 완성구조계의 파괴확률은 7.280E-7로 검토되었다.

평가된 신뢰성지수는 일반적인 목표신뢰성지수인 3-4이상의 결과를 나타냈다. 그러나 주탑의 시공방안에 따른 해석결과는 상이한 결과를 확인할 수 있었다. Case 1, 3, 5, 7의 경우, 3.563~3.743로 산정되었으며, Case 2, 4, 6, 8의 경

표 3. 위험 시공단계의 신뢰성지수 및 파괴확률 분포 (인위적 불확실성)

Percentile	Pylon (Case 1, 3; Stage 16)		Main Cable (All Cases; Stage 27)	
	P_f	β	P_f	β
Mean	1.829E-04	3.5593	1.810E-05	4.1423
Median	1.823E-04	3.5617	1.813E-05	4.1422
25% P_f ; 75% β	1.495E-04	4.1984	1.509E-05	4.8075
10% P_f ; 90% β	1.213E-04	4.7632	1.234E-05	5.4151

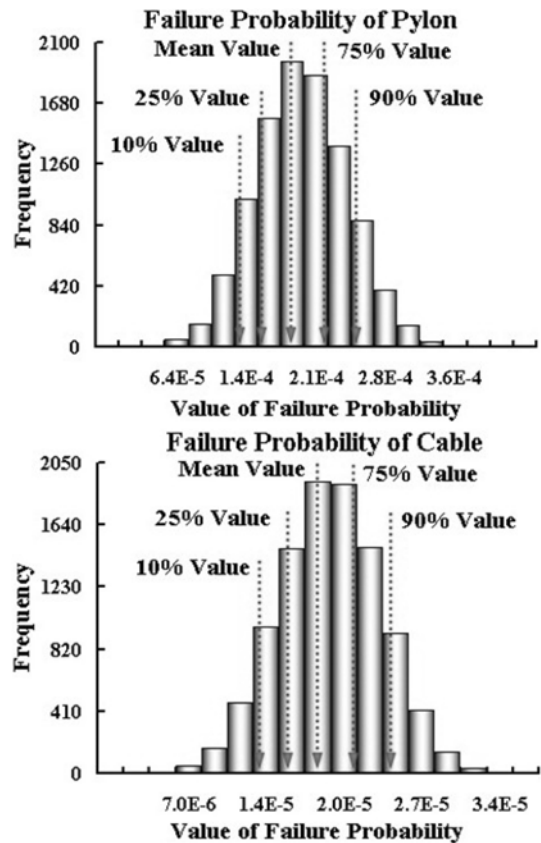


그림 12. 인위적 불확실성에 따른 위험 시공단계의 파괴확률 히스토그램

우, 4.630~4.817로 평가되었다. 이상과 같이 제시된 해석결과는 부재의 극한응력, 부재강성 및 지진하중 등의 영향에 따른 부재력 응답의 평균 및 중앙값 등의 평가에 있어서 인위적 불확실성이 고려되지 않았다. 따라서 인위적 불확실성의 영향으로 인해 산정된 파괴확률과 이에 상응하는 신뢰성지수는 각각 불확실성을 포함하는 확률변수로 간주되어야 한다. 변동계수의 측면에서 인위적 불확실성에 대한 영향은 극한응력 및 부재강성의 경우 10%, 입력지진동에 따른 케이블 긴장력 및 부재력 응답의 경우 20%로 가정하였다. 또한 확률분포는 정규분포를 갖는 것으로 가정하였다. 그림 12, 13는 Monte Carlo Simulation을 이용하여 인위적 불확실성을 고려한 파괴확률과 신뢰성지수의 전체적인 양상을 평가하기 위해 히스토그램으로 도시한 것이다. Monte Carlo Simulation을 위해 Matlab 7.0을 이용하였으며, 해석결과의 정확성을 위해 Simulation 횟수는 10,000회를 설정하였다. 그림 13은 파괴확률이 가장 크게 산정된 시공단계의 빈도수(Frequency)를 나타낸 히스토그램이며, 그림 12는 파괴확률에 상응하는 신

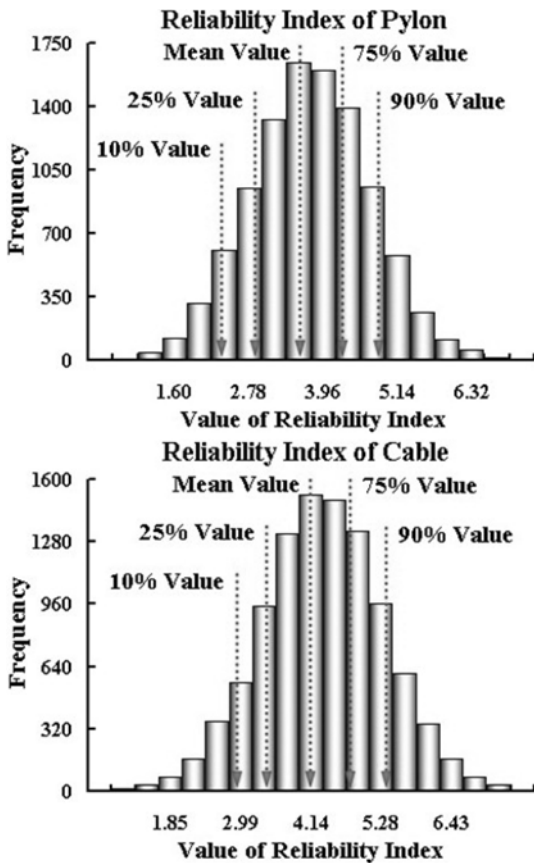


그림 13. 인위적 불확실에 따른 위험 시공단계의 신뢰성지수 히스토그램

뢰성지수를 도사한 것이다. 그림 12, 13의 평균, 50%, 75% 및 90% 분포에 해당되는 신뢰성지수 및 이에 상응하는 파괴확률은 표 4에 상세히 정리하였다.

표 4에 제시된 것과 같이 인위적 불확실성을 고려하여 평가된 75% 또는 90% 신뢰성지수 및 이에 상응하는 파괴확률은 설계자 및 발주자의 견지에서 대상 구조물에 내재된 위험에 충분히 대처하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 장 경간 현수교를 대상으로 다양한 시공조건 및 변수를 고려하여 시공단계별 응답특성을 평가하였다. 또한 자연적 불확실성 및 인위적 불확실성을 고려한 신뢰성 해석을 수행하였다. 자유진동해석 결과는 시공방안에 따라 확연히 다른 양상을 확인할 수 있으므로 시공방안 선정에 있어서 필수적으로 검토되어야 할 것이다. 구조물의 최적설계를 위해 필수적인 시공방안별 절점변위, 부재력 및 주케이 불균장력에 대한 응답양상은 자유진동해석 결과와 부합하며, 주경간의 시공방향이 매우 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 주경간 보강형의 시공방향과 동시 시공성을 적절히 조합하면 보다 이상적인 시공을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 불확실성을 고려하여 검토된 신뢰성지수 및 파괴확률은 시공조건에 따른 구조안전성을 정량적으로 검토할 수 있어 시공방안별 우수성에 대한 실질적인 평가기준을

제공할 수 있는 것으로 판단된다. 특히, 위험 시공단계에 대한 신뢰성지수 및 상응하는 파괴확률의 주요 퍼센트 분포는 현수교의 구조설계 및 시공방안 결정 시 설계자 및 발주자에게 기초자료 및 합리적인 평가기준을 제공할 것으로 기대된다. 추후, 장 경간 교량의 동적시공단계해석 시, 지진특성 및 풍하중 등을 고려하여 시공방안별 구조응답특성 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 아울러 구조신뢰성해석 수행 시, 장경간 교량에 내재된 불확실성의 영향에 따른 재평가 과정에 대해 상세한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 건설교통부(1993) 남해대교 안전진단 보고서.
 건설교통부(2005) 도로교 표준시방서.
 건설교통부(2000) 장대교량의 내풍성능 향상에 관한 연구.
 김철영(1993) 지진하중에 대한 사장교의 휨-비틀 해석, 박사학위 논문, 서울대학교.
 김호경(1993) 시공단계를 고려한 현수교의 3차원 해석, 박사학위 논문, 서울대학교.
 방명석(1999) 현수교의 기하학적 비선형을 고려한 동적 및 시공단계별 해석, 한국안전학회 논문집, 한국안전학회, 제14권 제4호, pp. 148-157.
 방명석(2007) The Safety Erection Method of Suspension Bridges by Construction Sequence Analysis, *Journal of the KOSOS*, Vol. 22, No. 4, pp. 55-62.
 안상섭(1991) *Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Spatial Cable Networks using Elastic Catenary Cable Element*, 석사학위논문, 서울대학교.
 한국건설기술연구원(1996) 장대교량의 설계 및 시공에 관한 연구.
 한성호, 신재철(2005) 지진하중을 받는 사장교의 확률 유한요소 해석 및 신뢰성해석, 한국전산구조공학회 논문집, 한국전산구조공학회, 제18권, 제1호, pp. 29-42.
 한성호, 신재철(2005) 근거리지진을 받는 현수교의 지진응답특성 및 신뢰성해석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제25권 제6A호, pp. 969-979.
 현대건설기술연구소(1994) 현수교의 시공단계해석 시스템 개발 최종보고서.
 현대건설기술연구소(1994) 합성형 사장교의 시공단계 해석 및 시공관리 시스템 연구.
 Ang, A.H.-S. and Tang, W.H. (2007) *Probability Concepts in Engineering, 2nd Edition*, John Wiley & Sons, Inc.
 Chopra A.K. (1995) *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Inc.
 Gimsing, N.J. (1988) *Cable Supported Bridges, Concept and Design*, John Wiley & Sons Inc.
 Nazmy, A.S. and Abdel-Ghaffar, A.M. (1990) Three-dimensional nonlinear static analysis of cable-stayed bridges, *Computers & Structures*, Vol. 34, No. 2, pp. 257-271.
 Nowak, A.S. (1993) *Calibration of LRFD Bridge Design Code*. National Cooperative Highway Research: Final Report.
 Rackwitz, R. and Fiesseler B. (1978) Structural reliability under combined random load sequences, *Computers & Structures*, Vol. 9, No. 5, pp. 489-494.
 Wang, P.H., Tseng, T.C., and Yang, C.G. (1993) Initial shape of cable-stayed bridges, *Computers & Structures*, Vol. 46, No. 6, pp. 1095-1106.

(접수일: 2008.7.30/심사일: 2008.9.2/심사완료일: 2009.1.9)