

체계신뢰성에 기초한 사장교의 안전도 및 내하력 평가

System Reliability-Based Safety and Capacity Evaluation of Cable-Stayed Bridges

조 효남* 이 승재** 임 종권*** 김 보현****
Cho, Hyo-Nam Lee, Seung-Jae Lim, Jong-Kwon Kim, Bo-Hun

ABSTRACT

A practical approach for the assessment of system reliability-based safety and load carrying capacity under vehicle traffics is proposed for the realistic evaluation of safety and rating of cable-stayed bridges. A partial event tree analysis model incorporating major critical failure paths is suggested as a practical tool for the system reliability analysis and system reliability-based capacity rating. The proposed approach for the system reliability analysis and system reliability-based rating is applied to the safety assessment of the Jindo Bridge which is one of two existing cable-stayed bridges in Korea. The results of analyses at the system level based on the system reliability are compared with those at the element level.

1. 서 론

최근 국·내외적으로 해안, 도서지방 등의 개발로 인해 장대교량의 건설 및 기설 장대교량의 유지관리에 대한 관심이 증대되고 있다. 교량의 유지관리 및 보수보강과 관련된 의사결정은 국가자원의 효율적 사용이라는 경제적 측면은 물론 정치·사회적인 면에서 중요도 및 파급효과는 막대한 것이라 할 수 있다. 교량의 안전도 및 내하력평가는 보수 및 보강대책을 수립한다는 관점에서 유지관리체계의 핵심이 되는 분야이며 특히, 교량의 구조형식이 복잡하고 규모가 크며 노후정도가 심한 교량일수록 분석 및 평가기법의 합리성과 결과의 신뢰도가 중요한 문제로 대두된다. 본 논문에서는 재래적인 방법에 비하여 실질적이고 합리적인 결과를 도출해 낼 수 있는 체계신뢰성 방법에 기초한 안전도 및 내하력 평가모형을 제안하였다. 즉, 강사장교의 실제적인 보유안전도 및 내하력을 시스템 수준에서 평가하기 위하여 휨과 축력을 모두 고려할 수 있는 한계상태모형을 제안하였고, 체계신뢰성해석에 기초한 새로운 내하력평가 방법을 제안하였는데, 이는 신뢰성지수의 FOSM의 형태에서 유도된 등가내하력평가 방법으로서 구조요소 및 구조시스템에 대한 보다 실제적이고 합리적인 보유내하력(P_n)과 내하율(RF)을 구하는 방법이다.

2. 요소수준의 한계상태모형

- * 한양대학교 토목·환경공학과 교수
- ** 쌍용양회공업주식회사 과장
- *** 한양대학교 토목공학과 박사과정
- **** 한양대학교 토목공학과 석사과정

본 연구의 목적이 교량의 안전도와 보유 내하력의 평가에 있기 때문에 사용성한계상태 및 내구성 한계상태는 본 논문에서는 고려하지 않았다. 즉, 신뢰성에 기초한 실제적인 내하력 평가에 필요한 강도한계상태모형만을 제시하였다. 본 연구의 대상구조물인 강상형 사장교의 케이블 요소에 대해서는 선형한계상태모형, 주형 및 주탑의 경우 요소수준에서 휨과 축력을 동시에 고려할 수 있도록 시방서의 조합상관식에 기초한 한계상태모형을 새롭게 제안하였다.

2.1 케이블 파기에 대한 한계상태 모형

일반적으로 부재의 강도가 휨이나 축력 어느 하나만에 지배되는 경우, 한계상태방정식은 저항 R 과 고려하여야 하는 여러 하중효과 S_i 의 항으로 표현되는 다음과 같은 선형한계상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = R - \sum S_i \quad (1)$$

즉, 사장교의 케이블요소와 같이 축력(인장력)이 지배적인 부재의 인장파괴에 대한 한계상태 방정식은 다음과 같다.

$$g(\cdot) = P_{TR} - (P_{TD} + P_{TL}) \quad (2)$$

여기서, P_{TR} = 실저항; P_{TD} , P_{TL} = 사하중과 활하중 각각에 의한 인장력을 나타낸다. 한편 실저항 P_{TR} 은 노후손상계수 D_F 를 도입하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{TR} = P_n N_P D_F \quad (3)$$

여기서, P_N = 공칭모멘트; D_F = 노후손상계수 ; $N_P = P_N$ 과 D_F 의 추정에 관련된 불확실량을 내포하는 랜덤변량(=MFPD); 이때, M =재료강도관련 랜덤변량; F =제작시공 관련 랜덤변량; P =해석과 모델링 관련 랜덤 변량; D = 노후손상 추정관련 랜덤변량 나타낸다. 또한, 사하중과 활하중 각각에 의한 실인장력 P_{TD} , P_{TL} 은 식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{TD} = p_D D_n N_D \quad (4)$$

$$P_{TL} = p_L L_n K N_L \quad (5)$$

여기서, p_D , p_L = 단위사하중 및 활하중에 의한 영향계수; D_n , L_n = 공칭 사하중 및 활하중 효과; K = 응답비 = $K_s(1+i)$, 이때 K_s = 측정응력/계산응력; i = 충격계수 N_D , $N_L = D_n$, L_n 의 추정에 관련된 불확실량 및 실재하효과에 대한 편기를 조정하기 위한 각각의 랜덤변량을 나타낸다.

2.2 주형 및 주탑에 대한 한계상태모형

사장교에 있어서 주형과 주탑은 축력의 영향을 무시할 수 없으므로 휨과 축방향력을 동시에 고려할 수 있는 조합상관식에 기초하여 안전도 및 내하력을 평가하여야 보다 합리적이다. 본 연구에서는 이 경우의 한계상태방정식을 미국의 AASHTO LRFD 시방서나 우리나라 도로교표준시방서 하중저항계수설계편의 축력과 휨의 조합하중에 대한 상관식에 기초하여 다음 식 (6)과 같이 실용적으로 제안하였다.

$$g(\cdot) = 1 - \left\{ \frac{P_{CD} + P_{CL}}{P_R} + C \frac{M_D + M_L}{M_R \left(1 - \frac{P_{CD} + P_{CL}}{P_e} \right)} \right\} \quad (6)$$

여기서, P_R , M_R = 단면의 실좌굴강도 및 실저항모멘트 ; P_e = Euler 좌굴강도; C = 등가모멘

트계수; P_{CD}, P_{CL}, M_D, M_L = 단면력을 나타낸다 이때 $P_R, M_R, P_{CD}, P_{CL}, M_D, M_L$ 등은 식(2)의 경우과 마찬가지로 각종 불확실량에 대한 편기를 고려한 값이다.

3. 체계신뢰성 해석모형

기설 사장교의 신뢰성평가는 대부분의 경우 저항 및 하중에 관련된 여러가지 불확실량에 대한 오차와 신뢰성해석 모델링 및 수치해석에 수반되는 오차 등으로 인하여 매우 복잡하고 어렵기 때문에 사장교에 대한 가장 효과적인 신뢰성 모델링은 근사적이면서도 실용적인 방법으로 개발되어야 할 것으로 사료된다. 한편, 사장교는 주형, 주탑케이블 등의 여러 구조요소로 이루어진 복잡한 구조시스템을 형성하고 있기 때문에 매우 높은 여유성을 가지게 된다[1]. 따라서 구조전체로서의 실질적인 안전도를 평가하기 위해서는 체계신뢰성해석을 수행해야 하며[2], 이때 시스템붕괴를 형성하는 파괴모드(failure mode)는 고차의 여유성으로 인하여 여타 구조 형식의 교량에 비하여 다양하다. 즉 구조물이 고차의 여유성을 가지고 있는 경우 어떤 단일 부재 또는 단면이 강도한계상태에 도달한 경우를 구조시스템 전체의 파괴로 보는 것이 아니라 여유성을 상실할 수 있는 단계에 이르기 위한 파괴 경로(failure path)를 형성하는 몇몇 요소가 한계상태에 도달한 경우를 구조시스템 전체의 파괴(system failure)로 보며 체계신뢰성에 기초한 구조물의 안전도는 지배단면의 요소신뢰성해석에 의한 결과보다 높게 평가되는 것이 일반적이다[3][4].

3.1 구조요소의 파괴모형

구조물의 체계신뢰성 해석에 있어서 파괴단면의 역학적 거동은 매우 중요하다 즉, 하중-변위 특성에 따라 단면의 거동을 이상적으로 완전연성(perfectly ductile) 또는 완전취성(perfectly brittle), 또는 전 강도의 일부만을 발휘하는 반연성(반취성)재료의 특성을 따르는 것으로 모델링할 수 있다(그림 1 참조). 체계신뢰성해석 결과는 구조요소 모델링에 있어서 이러한 재료의 특성을 어떻게 반영하는가에 따라 크게 좌우될 수 있으므로 보다 합리적인 재료의 특성을 고려하는 것이 중요하다. 대부분의 일반적인 구조요소의 경우 실질적인 거동이 이상적으로 완전연성 또는 완전취성의 어느 한쪽에 해당된다고 보기는 어려우며 취성과 연성의 중간적인 특성을 지닌 것으로 보는 것이 합리적이다. 즉, 잔존강도비를 모수 $\gamma (=M_{residual}/M_{cr})$ 로 나타낸다면 완전취성요소의 경우 $\gamma=0$ 이며 완전연성요소는 $\gamma=1$ 이라 할 수 있다. 본 논문에서는 케이블요소의 경우 완전연성요소로 모델링하였고 주형과 주탑의 경우 반연성(반취성)요소로 모델링하였는데 충분히 안전측으로 고려하여 후좌굴 잔존강도를 극한강도의 50%($M_{residual}/M_{cr}=\gamma=0.5$)를 적용하였다.

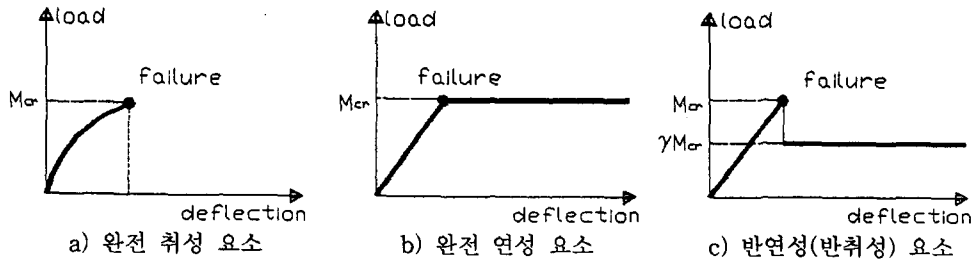


그림 1. 재료의 성질에 따른 하중-변위 특성

3.2 시스템 파괴모형

이론적으로 사장교와 같은 고차의 여유성을 가진 구조물의 붕괴가 발생한다는 것은 구조 시스템 용량이 한계상태에 도달했음을 의미한다. 시스템 파괴(system failure) 또는 시스템 저항능력(system resistance)을 모형화하기 위한 다양한 이론적 또는 실용적 접근방법이 제시되어 왔으나 본 논문에서는 비선형 구조해석이 필요없으면서 체계신뢰성 문제에 있어서 실용적이고도 효과적으로 응용가능한 해석모형을 적용하였다. 즉, 사장교의 시스템 파괴상태는 파괴메카니즘을 형성하는 여러 가지 가능한 파괴경로중 어느 하나가 발생하는 것으로 정의할 수 있다. 이러한 시스템 파괴상태에 대한 시스템 모형화에 있어서, 사장교의 체계신뢰성 문제는 지배적인 파괴경로만을 고려한 부분 ETA(Event Tree

Analysis)모형으로 정식화하였다(그림 3 참조). 각 구조요소에 작용하는 하중효과는 3차원 모델링에 기초하였다. 파괴위험단면중 어느 하나가 먼저 파괴되는 조건하에서의 신뢰성해석을 위하여 재료의 잔존강도에 기초한 가상의 소성 휨모멘트를 구조해석에 고려하였다($\gamma=0.5$).

4. 신뢰성평가

구조전체로서의 실질적인 안전도를 평가하기 위한 체계신뢰성해석의 예비 단계로서 요소신뢰성 해석을 수행하였다.

구조신뢰성은 파괴확률에 의해서 개념적으로 추정되고 수치적으로 평가될 수 있지만, 실제적으로는 구조요소나 시스템의 상대적인 보유안전율은 신뢰성지수 β 에 의해서 가장 잘 표현될 수 있다. 한편, 파괴확률 P_F 와 신뢰성지수 β 의 관계는 다음과 같다.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_F) \quad (7)$$

여기서, P_F = 파괴확률; Φ^{-1} = 표준정규분포함수의 역함수를 나타낸다.

사장교의 신뢰성해석에는 다양한 수치해석방법이 사용될 수 있지만, 본 논문에서는 조합하중하의 사장교의 한계상태방정식을 양함수의 형태로 변환시켜서 가장 간편하고 실용적인 해석기법인 AFOSM 알고리즘[6]과 MCS알고리즘을 주로 사용하였다.

다음 표 1에 본 논문의 신뢰성해석을 위해 사용한 하중, 저항관련 불확실량을 나타내었다. 통계적 불확실량은 여러 참고문헌을 기초로 합리적이라 판단되는 수준에서 결정하였다[1][5][6].

표 1. 통계적 불확실량

		평균공칭비	COV	분포형
저항	휨	1.10	0.13	Lognormal
	축력	1.08	0.15	Lognormal
	케이블요소의 인장	1.10	0.11	Lognormal
하중효과	사하중	1.05	0.10	Normal
	활하중	1.24	0.25	Lognormal

5. 신뢰성에 기초한 등가내하력 평가

5.1 LRFR 규준식에 의한 내하력 평가

기존의 내하력평가 방법에는 허용응력법에 의한 WSR(Working Stress Rating)방법과 AASHTO에서 사용하는 LFR(Load Factor Rating) 방법 등이 있다. 그러나 이들은 교량의 노후 손상이나 실제적 구조거동을 제대로 반영하지 못하기 때문에 이러한 재래적인 방법으로 평가된 공칭하중이나 보유내하력은 노후손상된 교량의 실보유 내하력으로 간주하기 어렵다. 따라서 최근 시설교량의 노후손상상태, 교량의 실응답 및 불확실성을 명시적으로 포함시키므로서 실보유내하력을 합리적으로 평가할 수 있는 신뢰성에 기초한 LRFR방법이 제안된 바 있다[6][7]. 그러나, 이러한 방법 또한 휨 또는 전단, 축력 등의 단일파괴모드만 고려될 수 있으며 본 연구의 사장교의 주탑 또는 주형 등과 같이 휨 뿐만아니라 큰 축력을 받는 요소에 대해서는 엄밀한 내하력 평가식으로는 사용하기에 무리가 있다. 따라서 본 논문에서는 AASHTO시방서 및 도로교시방서의 하중저항계수 설계편에 규정되어 있는 휨과 축력을 동시에 받는 부재의 설계식으로 사용되고 있는 조합상관식을 내하력평가식으로 개선하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{\gamma_d P_d + \gamma_L P_L K RF}{0.85 P_{cr} D_{Fp}} + \frac{C(\gamma_d M_d + \gamma_L M_L K RF)}{\phi_b D_{Fb} M_n \left(1 - \frac{\gamma_d P_d + \gamma_L P_L K RF}{P_e}\right)} = 1 \quad (8)$$

여기서, RF = 공용내하율; M_d, M_L, P_d, P_L = 각각 모멘트와 축력에 대한 사하중 효과 및 활하중 효과; $\psi', \gamma_D, \gamma_L$ = 각각 공칭저항, 사하중 및 활하중 관련안전계수; D_{Fc}, D_{Fb} = 축방향강도 및 휨강도에 대한 노후손상계수; K = 응답비를 나타낸다. 한편, 안전계수 $\psi_b, \psi_c, \gamma_D, \gamma_L$ 는 신뢰성이론에 근거하여 현행시방서의 안전수준을 점검한 후 공학적 판단하에 구조형식별로 보정(calibration)을 실시하여 결정되는 값이다. 그러나 본 논문에서는 강사장교의 하중 및 저항관련 안전계수를 실용적으로 도로교시방서에서 적용하고 있는 계수를 그대로 적용하였다. 식 (8)에서 내하율 RF 에 관하여 합리적인 해를 계산하면 휨과 축력을 동시에 고려할 수 있는 재래적인 단일과피모드에 기초한 내하력평가방법보다 실질적인 내하력평가가 가능하리라 판단된다.

5.2 신뢰성에 기초한 등가 내하력 평가

본 논문에서는 β -평가기준으로서 본 연구자에 의해 개발되어 이미 여러 대상구조물에 성공적인 적용사례[2][8]가 있는 신뢰성에 기초한 새로운 내하력평가 방법이 사장교에도 효율적으로 적용될 수 있음을 보였다. 즉 지금까지 교량의 내하력은 기준식에 의하여 평가되어 왔으나 본 논문에서 적용한 방법은 기준식을 사용하지 않고서도 신뢰성지수 β 를 이용하여 곧바로 교량의 보유내하력을 손쉽게 구할 수 있는 보다 실제적이고 합리적인 방법으로 사료된다. 자세한 유도 과정은 참고문헌[3]에 있으므로 여기서는 핵심만 간략히 언급하고자 한다.

주어진 평가하중 대한 신뢰성지수 β 를 수치해석에 의하여 구하면, 특정한 목표신뢰성에 대응하는 교량의 등가내하력 P_n 을 FOSM모형의 Fitting Curve로 부터 평가하중과 목표신뢰성지수의 함수로서 직접 구할 수 있다. 즉, 등가내하력 P_n 은 다음 식(9)와 같이 유도된다.

$$P_n = \frac{(P_{R2} + \eta D_n)^{\Delta\beta_1/\Delta\beta}}{(P_{R1} + \eta D_n)^{\Delta\beta_2/\Delta\beta}} - \eta D_n \quad (9)$$

여기서, $\Delta\beta_1 = \beta_1 - \beta_0$; $\Delta\beta_2 = \beta_2 - \beta_0$; β_1, β_2 = 각각 두개의 평가하중 P_{R1}, P_{R2} 에 따른 신뢰성지수; β_0 = 목표신뢰성지수를 나타내며, η 는 평균 단위사하중효과와 평균 단위활하중 효과의 비($= \overline{c_D}/\overline{c_L}$)를 개념적으로 내포하고 있는 매개변수이다.

이와 같이 본 연구에 적용한 신뢰성에 기초한 등가내하력 평가방법은 두개의 평가하중 P_{R1}, P_{R2} 각각에 대한 신뢰성지수만 구하게 되면 목표신뢰성지수(β_0)에 대한 사장교의 보유내하력을 평가할 수 있게 되는 새로운 개념의 내하력평가 방법으로서 상관식과 같이 기준식에 의해서는 추정할 수 없었던 교량의 실제내하력평가나 특히 내하율(RF)의 수치적인 평가 자체가 거의 불가능하였던 체계신뢰성 방법에 모두 적용할 수 있는 매우 유용한 방법이라고 생각된다.

6. 적용에 및 고찰

6.1 대상교량

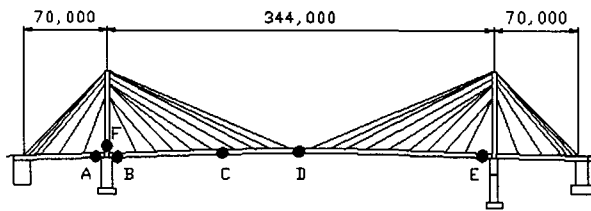
본 논문에서 수치해석의 대상으로 한 교량은 강사장교인 진도대교로서 울돌목해협을 가로질러 전남 해남과 진도를 연결하고 있는 우리나라 최초의 사장교이다. 진도대교는 폭 11.7m, 길이 484m의 강상자형 주형과 69m 높이의 강상자형 주탑 2개 그리고 68개의 locked coil type cable로 구성되어 있다. 교량은 설계활하중이 우리나라의 DB18하중에 해당하는 AASHTO의 HS-20-44하중인 2등교이다. 표 2에는 진도대교의 일반사항에 대하여 정리하였다. 본 대상구조물은 1993년 본 저자들에 의하여 외관조사, 비파괴시험, 정·동적 재하시험 및 내하력평가 등 광범위한 정밀안전진단 단이 수행된 바 있으며 그 결과 획득된 데이터를 표 3에 요약 정리하였다[9].

표 2. 진도대교의 일반사항

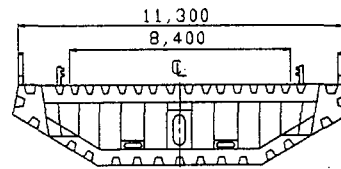
위 치	전남 해남군 문내면 학동리-진도군 군내면 녹진리
구조형식	3경간 연속 강상자형 사장교
연 장	70 + 344 + 70 = 484 m
교 폭	11.7m
설계하중	AASHTO HS-20-44(DB-18)

표 3. 현장시험결과

거더	응답비 K_s		고유진동수, ω_D (수직방향)	
	주탑	케이블	1차모드	2차모드
0.99	1.10	0.91	0.52	0.72



(a) 종단면도



(b) 주형 단면도

그림 2. 대상교량

6.2 신뢰성 해석결과

대상교량에 대한 주요단면의 요소수준의 신뢰성해석결과를 정리하여 시스템수준 신뢰성해석 결과와 비교하여 표 4에 정리하였다. 그림 3은 체계신뢰성 해석을 위한 Level II의 ETA 모델 및 해석결과를 보여주고 있다. 우선 표 4의 요소수준의 신뢰성지수를 살펴보면, 주형중앙부의 신뢰성지수가 3.32로서 교통하중에 대해서 상대적으로 신뢰성이 가장 낮아 내하력 지배단면임을 알 수 있었다. 또한 Level II에 해당하는 주요 파괴경로만을 고려한 부분 ETA모델을 기초로 평가한 결과 체계신뢰성지수가 3.86으로 요소수준에서 지배단면 신뢰성지수인 3.32보다 다소 높은 결과를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서 제안하는 체계신뢰성 해석방법은 구조물의 여유성이 고려된 상당히 합리적이며 실제적인 결과를 보여주는 것으로 사료된다. 또한, 외관조사와 현장실험결과에 따른 구조물 건전도에 대한 공학적 판단에 비추어 볼 때, 이러한 결과는 본 연구에서 제안하고 있는 체계신뢰성해석 방법이 실 구조물에 적용할 수 있는 합리적이며 실용적인 방법으로 사료된다.

표 4. 신뢰성 해석결과

지배단면		파괴모드	신뢰성지수(β)	신뢰성지수(β)	
				요소수준	시스템수준
주형	중앙부	휨모멘트+축력	3.32	3.32*	3.86
	주탑부 지점	휨모멘트+축력	4.79		
주탑 하단		휨모멘트+축력	4.99		
케이블		축력	6.28		

* 는 요소수준에서 가장 지배적인 단면의 해석결과

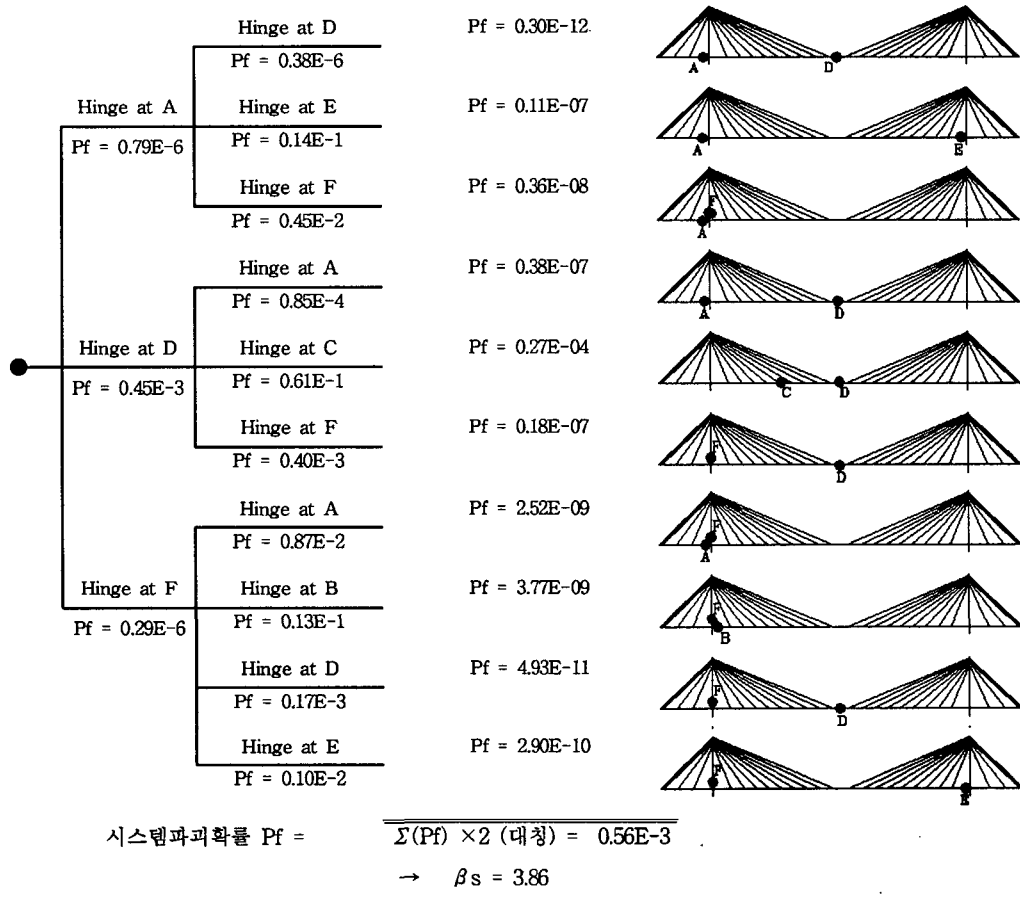


그림 3. 부분 ETA모델과 체계신뢰성 해석결과

6.3 등가 내하력평가 결과

표 5에는 본 연구에서 제안한 시방서규준식에 기초한 조합상관식 및 신뢰성에 기초한 내하력평가 결과를 비교하여 제시하였다. 본 논문에서 가장 중점적으로 다루고 있는 체계신뢰성해석에 기초한 등가내하력 평가결과를 요소수준의 결과와 비교해 보면 요소수준에서의 내하율 RF가 가장 지배적인 단면인 주형중앙부에 대하여 각각 0.92, 1.09로 체계신뢰성해석에 의한 결과인 1.18보다 다소 낮은 결과를 보여주고 있다. 이는 요소수준에서의 평가 결과가 구조물의 시스템 여유성을 반영하지 못하는데 그 이유가 있는 것으로 사료되며 앞서 언급한 신뢰성지수의 추세와도 유사한 결과를 준다. 또한 요소수준에서도 신뢰성방법이 LRFR 규준식에 의한 결과보다 내하력이 다소 크게 평가되었는데 이는 본 논문에서 제안하고 있는 등가내하력 평가방법에 의한 결과가 구조물의 실제 상태에 따라 추정된 β 에 대응하는 내하력을 직접 구할 수 있는 방법이라는 점을 고려하면 보다 합리적이고 타당한 방법이라 사료된다. 즉, 주형지점부 및 주탑하단의 경우처럼 조합하중을 받는 경우에는 규준식에 의하여 내하력을 평가하기는 어렵게 되고 내하력을 신뢰성평가를 바탕으로 등가내하력 즉, 보유내하력을 산출할 수 있기 때문에, 본 논문에서 제안하고 있는 등가내하력 평가방법은 축력, 휨+축력 등 지배적 한계상태가 다양한 경우에는 물론, 사장교와 같이 교차의 부정정성으로 인한 구조물의 여유성을 합리적으로 반영하고자 체계신뢰성 기법을 적용하는 경우에 내하력 평가기법으로 더욱 효과적으로 사용할 수 있을 것이라 사료된다.

표 5. 내하력평가결과

단면		요소수준				시스템 수준 (신뢰성방법에 의한 등가내하력 평가)	
		LRFR		신뢰성방법에 의한 등가내하력 평가		RF	Pn
		RF	Pn	RF	Pn		
주형	중앙부	0.92	DL-16.6	1.09	DL-19.7	1.18	DL-21.3
	지점부	1.37	DL-24.7	1.27	DL-22.9		
주탑		3.00	DL-54.0	2.28	DL-41.2		

7. 결론

본 논문에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 재래적인 방법에 비하여 실질적이고 합리적인 결과를 도출해 낼 수 있는 체계신뢰성 방법에 기초한 사장교의 안전도 및 내하력 평가모형을 제시하였다.
- 2) 체계신뢰성 해석결과 본 논문에서 제안한 방법은 기존의 요소신뢰성 방법에 비해 구조물의 여유성을 충분히 반영하는 상당히 합리적이며 실제적인 결과를 보여주는 실용적인 방법으로 사료된다.
- 3) 본 연구에서 제안하는 신뢰성평가에 기초한 사장교의 보유내하력 즉, 등가내하력 평가방법은 목표신뢰성지수에 대한 교량의 실제적인 보유내하력을 손쉽게 구할 수 있는 새로운 개념의 내하력평가 방법으로서 비선형이나, 상관형식 또는 음함수 형태의 일반적인계상태방정식의 경우와 같이 보유내하력을 해석적으로는 구할 수 없는 경우, 또는 체계신뢰성 방법등과 같은 지금까지 규준식에 의해서는 추정할 수 없었던 교량의 내하력평가 문제에 적용할 수 있는 매우 유용한 방법임을 알 수 있었다.

8. 참고문헌

- [1] Bruneau, M.(1992), "Evaluation of System-Reliability Methods for Cable-Stayed Bridge Design", *J. of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 4.
- [2] Cho, H. N. and Lee, S. J. and Kang, K. K. (1994). "Assessment of System Reliability and Capacity-Rating of Composite Steel Box-Girder Highway Bridges". *J. Struct. Mech Earthquake Eng. Japan Society of Civil Engineering*. No. 495/ I-28, pp. 13-20.
- [3] Tabsh, S. W., and Nowak, A. S (1991). "Reliability of highway girder bridges" *J. Struct. Engrg., ASCE*, 117(8), 2373-2388.
- [4] Cho, H. N., Lee, S. J. and Lim, J. K. (1993), "System Reliability - Based Evaluation of Bridge System Redundancy and Strength, " The 2nd Korea - France Joint Seminar on Computational Mechanics in Structural Engineering, KOSEF, Seoul, Korea, Sep. 6-9, pp. 177 ~186.
- [5] Ellingwood, B., Galambos, T. V., MacGregor, J. C. and Cornell, C. A. (1980), "Development of a Probability-Based Load Criterion for the American National Standard A58," *National Bureau of Standard SP-577*, Washington D.C., June.
- [6] Shin, J. C., Cho, H. N., and Chang, D. I. (1989), "A Practical Reliability-Based Capacity Rating of Existing Road Bridges," *Proc of JSCE*, No. 398/I-10, Vol. 5, No. 2, pp. 245s-254s, Oct.
- [7] Cho, H. N. and Ang, A. H-S.(1989), "Reliability Assessment and Reliability-Based Rating of Existing Road Bridges, "5th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '89), San Francisco, Calif., USA, pp. 2235-2238.
- [8] Cho, H. N. and Lim J. K. and Lee, W. K.(1995) "Reliability-Based Safety Assessment and Berth-Capacity Rating of Aged Wharf Structures", *Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications(APSSRA95)* Tokyo, Japan, Nov. 12-14, pp.140-147.
- [9] 건설부(1993), "진도대교 안전진단", 한국건설기술연구원, 한양대학교 산업과학연구소, 1993.