

브라켓 및 H-빔 부재가 성수대교 붕괴에 미친 영향

Effect of Bracket and H-beam Members on the Sungsoo Grand Bridge Collapse

조효남* 임종권** 안중산***
Cho, Hyo-Nam Lim, Jong-Kwon An, Joong-san

ABSTRACT

This paper presents the results of a major parametric study on the collapse cause of the Sungsoo Grand Bridge, a Gerber-type continuous truss bridge, which had collapsed just at the 15th year since opening to traffic. Among the various collapse causes such as poor design, poor welding, poor maintenance, and heavy traffic loads, this study focuses on the collapse cause assessment incorporating the effects of bracket and H-beam members right below the expansion joint of the suspended truss. A local FEM analysis using fine shell elements is carried out for the more precise estimation of stress range of the vertical pin-connected hanger whose fatigue fracture triggered the collapse of the bridge. Both the conventional S-N approach and the Ang-Munse's fatigue reliability method are used for the evaluation of the fatigue life and fatigue failure probability for the assessment based on all the available results of various field and laboratory tests. From these observations, it may be affirmatively stated that the effects of bracket and H-beam members accelerated the fatigue failure, and thus should be regarded as one of major causes that triggered the bridge collapse.

1. 서론

1994년 10월 21일 오전 7시경 그림 1(a)에 나타나 있는 바와 같이 한강상의 성수대교 10번 교각과 11번 교각사이에 현수트러스가 순식간에 강바닥으로 추락하면서 32명이 사망하고 17명이 부상하는 참사가 발생하였다. 성수대교 붕괴후 서울지방검찰청에 의해 조직된 성수대교 붕괴원인감정단의 성수대교 붕괴사고원인규명감정단 활동백서[1995] 따르면 성수대교붕괴는 그림 1(c)에서 보는 바와 같이 현수트러스의 북쪽 끝단의 3개의 핀 연결 수직재중 하나가 피로파괴되면서 나머지 수직재가 연속적으로 파단되어 붕괴되었음이 밝혀졌다.

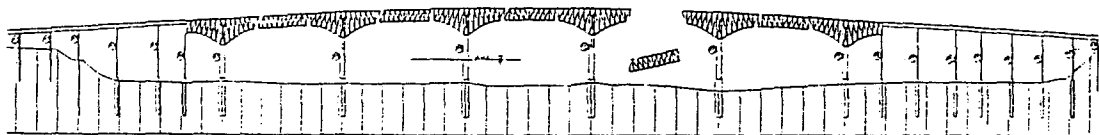
성수대교 붕괴사고의 원인규명감정단 조사에 의하면 몇몇 신축이음부아래 현수트러스의 핀연결부에서 가로보 끝단과 상현재사이의 손상으로 인하여 신축이음부부의 과도한 처짐은 붕괴되기 몇해전부터 발생되어 왔다고 한다. 그러므로 그림 1(c)에서 나타나 있듯이 브라켓과 H-빔부재가 이러한 과도한 처짐과 가로보 끝단의 수직재 이탈을 방지할 목적으로 설치되었다. 1차적으로 브라켓을 설치하였지만 계속적으로 처짐 및 변형이 발생하자 이러한 과도한 변형을 방지할 목적으로 수직재의 아래부분과 사재의 아래부분을 서로 용접과 볼트로 연결시킨 H-빔부재를 설치하기에

* 한양대학교 토목·환경공학과 교수

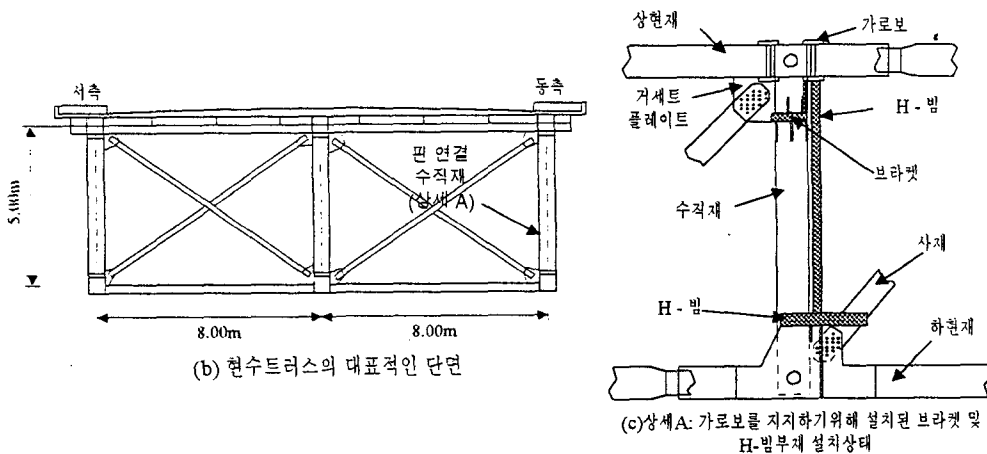
** 한양대학교 산업과학연구소 연구원

*** 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정 - 422 -

이르렀다. 결과적으로 게르버형식교량의 핀연결부 기능을 거의 상실하게 되었다. 설계하중보다 크게 초과된 과적하중 뿐만아니라 이러한 브라켓 및 가로보지지구조물의 부적절한 설치가 수직재의 비정상적인 응력흐름과 국부응력의 증가를 초래 피로파괴성장을 가속화시켰을 것으로 추정되는 바, 원인규명감정단 활동백서[1995]에 따르면 붕괴의 주원인을 부실용접결함으로 판단하였고 단지 3개월간의 불충분한 조사 기간으로 인하여 엄밀한 분석을 해보지 않은 상태에서 브라켓과 H-빔 부재의 효과가 교량붕괴에 미치는 영향이 별로 크지 않는 것으로 결론을 내린 바 있다.



(a)성수대교 전체 측면도



(c)상세 A: 가로보를 지지하기 위해 설치된 브라켓 및 H-빔부재 설치상태

그림 1. 성수대교 상세

따라서 본 연구의 주된 목적은 활동백서[1995]상의 성수대교의 외관조사 추정 실 트럭통행량, 피로시험, 차량재하시험, 그리고 당시 수직재의 연결상태에 대한 가용한 데이터등을 근거로하여 편연결 수직재에 대한 shell요소를 사용한 엄밀한 FEM 국부해석을 통하여 수직재의 피로응력범위를 보다 정확히 평가하므로써 브라켓 및 가로보지지구조물이 편연결 수직재의 피로파괴에 미친 영향을 정량적으로 분석하는데 있다. 이를 통하여 이미 밝혀진 설계부실, 부실용접, 유지관리부실, 과적트럭통행 등의 원인 뿐만아니라 브라켓 및 가로보지지구조물 설치의 부적절한 보수행위가 성수대교의 붕괴에 어느 정도의 영향을 주었는지에 대해 정량적으로 보다 엄밀하게 규명하였다.

2. 구조해석

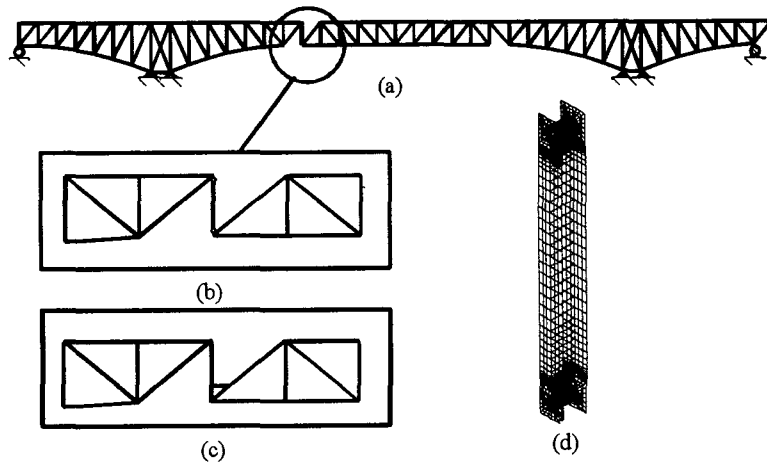
그림 1(C)에서 나타난 바와 같이 브라켓과 H-빔 부재의 설치효과를 고려하여 좀 더 실제적인 피로수명과 피로확률을 평가하기 위하여 트럭통행하중에 의한 좀더 정확한 응력범위의 산출이 필수적이다. 본 연구에서는 이를 위해서 두 단계의 수직재 FEM 해석을 수행하였다. 첫 번째 단계로, 최대 활하중 효과에 의한 전체계 2차원 FEM해석을 하여 편연결 수직재의 국부해석을 위한 경계조건 입력데이터를 구한다. 두 번째 단계는 전체구조계 2차원 FEM해석을 통해 얻은 경계조

건을 바탕으로 교량의 피로수명과 피로파괴확률 평가를 위한 응력집중효과를 세밀한 셀 유한요소를 사용한 FEM 국부해석을 통하여 구한다. 교량의 피로파괴 분석을 위한 피로 하중으로서 도로 교시방서부록[1996]에서 사용하는 표준피로하중인 TL-180을 사용하였다. 이 하중은 AASHTO LRFD 교량설계시방서[1994] 피로하중과 동일하다.

2.1 구조해석모델링

2.1.1 전체구조계 2차원 해석

전체구조계 2차원 해석 모델은 그림 2(a)와 같다. 구조해석은 브라켓과 가로보지지구조물을 설치하지 않은 경우[그림 2(b)]와 설치한 경우[그림 2(c)]로 나누어 붕괴후 외관조사 자료를 바탕으로 최대한 실제상황과 유사하게 모델링하였다. 브라켓과 H-빔부재가 설치되지 않은 경우는 수직재의 양단경계조건을 핀연결 모델(Case I)로 하였다. 그러나 이에 반하여 브라켓과 H-빔부재를 설치한 경우는 수직재 양끝경계를 핀연결조건(Case II)과 강결조건(Case III)으로 모델링하였다.



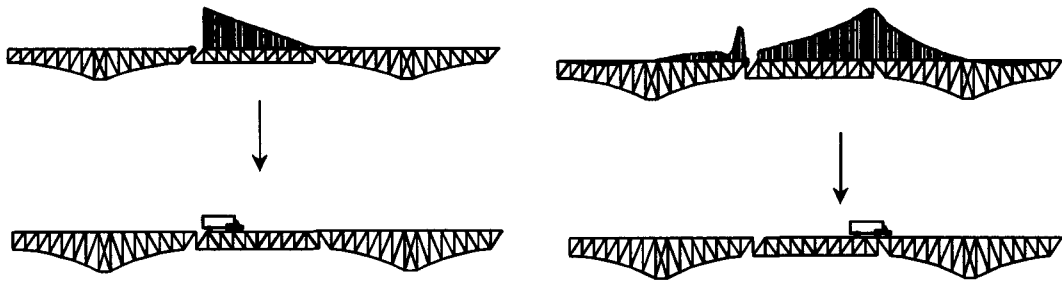
(a) 전체구조계 (b) 브라켓 및 H-빔부재가 설치되지 않은 상태의 핀 연결부 수직재의 2차원 모델
(c) 브라켓 및 H-빔 부재가 설치된 후 핀연결 수직재의 2차원 모델 (d) 국부 FEM해석 모델

그림 2. FEM해석 모델

그림 3은 양단 핀연결조건(Case I)과 양단 강결조건(Case III)에 대한 수직재의 피로응력범위를 구하기 위한 설계하중 재하조건을 구하기 위한 영향선 해석결과를 보여주고 있다. 브라켓과 H-빔 부재의 설치로 인하여 수직재 핀의 기능이 상실되어 수직재 양단이 강결조건이 되면서 핀연결 설계된 수직재 설계시 전혀 고려하지 않았던 매우 높은 모멘트효과가 발생하게 됨을 알 수 있었다.

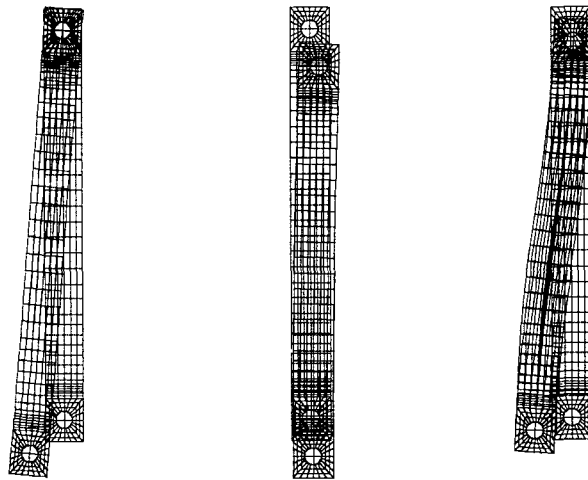
한편 그림 4는 그림 3의 설계하중 재하로부터 얻은 수직재의 하중효과와 경계변위를 가지고 엄밀한 FEM해석을 수행한 결과를 보여주고 있다. 그림 4의 Case I은 브라켓 및 H-빔 부재가 설치되지 않은 양단 핀연결 조건이며 Case II는 브라켓 및 H-빔 부재가 설치된 후 핀연결조건, Case III는 양단이 강결된 조건에 대한 구조해석 결과를 보여주고 있다.

브라켓과 H-빔 부재를 설치하지 않은 설계조건인 Case I의 경우 단지 축변형만이 발생하고 있는 반면 브라켓과 H-빔 부재설치 효과를 고려한 강결조건인 경우 휨변형이 과대하게 발생함을 발견하였다. 결과적으로 브라켓과 가로보지지구조물 설치 오류로 인하여 설계 조건에 비하여 양단 강결조건에서 응력범위가 매우 크게 증가하여 핀연결 수직재의 피로파괴위험도를 크게 높이는 효과를 주었음을 새로이 밝혔다.



(a)Case I: 브라켓 및 H-빔 부재 설치전 수직재 축력 영향선과 최대하중효과 재하위치(양단 편연결) (b) CaseIII: 브라켓 및 H-빔 설치후 수직재 축력 영향선과 최대하중 재하위치(양단강결)

그림 3. 영향선 해석결과



(a) Case I (b) Case II (c) Case III

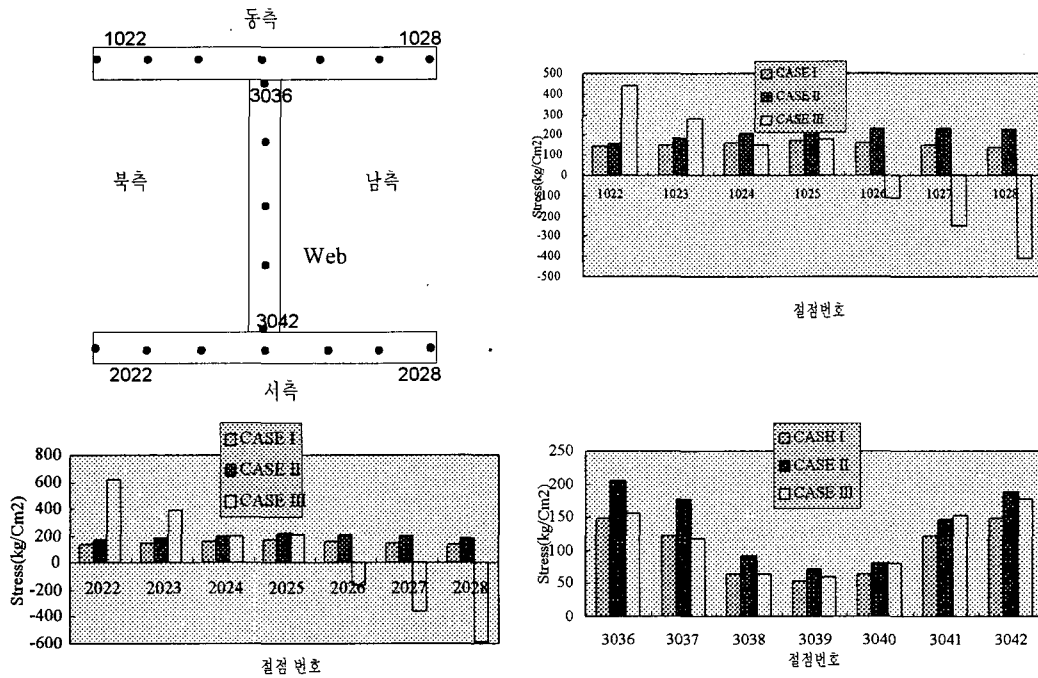
- 註) (a) Case I: 브라켓 및 H-빔 부재가 설치전 양단 편연결조건
 (b) Case II: 브라켓 및 H-빔 부재가 설치후 양단 강결조건
 (c) Case III: 브라켓 및 H-빔 부재가 설치후 양단 강결조건

그림 4. 수직재의 변형도

2.1.2 국부 FEM해석

국부 FEM해석(그림2(d))는 플랜지, 복부, 상하단 편연결부를 shell 요소로 모델링하였다. 국부 FEM해석에 적용될 경계조건은 영향선평가 결과를 이용하여 피로 활하중의 최대효과를 고려한 전체구조계 2차원해석에서 얻어졌다.

그림 5는 앞에서 기술한 세가지 경우에 대하여 현수 트러스의 동쪽 수직재의 국부 FEM응력해석 결과를 보여준다. 상부의 브라켓이 수직재와 거셋플레이트간에 용접되어 강결된 효과로 인하여 상당히 큰 모멘트가 발생하여 응력의 흐름이 상당히 복잡해지고 응력이 집중되는데 그 원인이 있다. 이로 인하여 그림 5에서 보듯이 브라켓과 가로보지구조물 효과를 포함한 Case III 조건의 최대응력(619 kg/cm^2)은 Case I의 최대응력(172 kg/cm^2)의 4배에 가깝게 나타남을 알 수 있다.



註: 1022-1028=국부 FEM 해석시 동측 플랜지 절점번호; 2022-2028= 서측 플랜지 절점번호; 3036-3042= 복부절점번호

그림 5. 수직재 용접 단면 응력 분포

3. 피로수명과 피로파괴확률분석방법

재래적인 S-N법과 Ang-Munse의 피로신뢰성방법을 교량 붕괴원인평가를 위한 피로수명과 피로파괴확률의 평가에 사용하였다.

첫째로, 잘 알려진 재래적인 S-N법을 이용한 피로수명 평가식은 다음과 같다.[Albrecht, 1983; Shaaban and Albrecht 1985]

$$\text{Log}N = C - m \text{Log}S_{req} \quad (1a)$$

여기서 N = 피로수명, Cycle; C = 피로상수; m = S-N 피로곡선의 기울기; S_{req} = 등가응력범위.

재래적으로 등가응력범위는 다음과 같다.

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd} \quad (1b)$$

여기서 S_{rd} = 설계응력범위 α = 응답비 ρ = 트럭중량분포지수

또 ρ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho = (\sum \gamma_i \phi_i^m)^{1/m} \quad (1c)$$

여기서, γ_i = 응력히스토그램에서 i 번째 응력범위의 발생빈도; $\phi_i = S_{rd}$ 에 대한 S_{ri} 의 비 (= S_{ri} / S_{rd})

주어진 S_{req} 로 구한 N을 연도로 환산한 피로년한 Y는 다음식으로부터 수치적으로 구한다.

$$Y = \frac{N}{356 \times ADTT \times n_T} \quad (2)$$

여기서, ADTT= 평균일일트럭통행량, n_T = 단일트럭통행에 의한 반복횟수(일반교량에서 통상적으로 $n_T=1$ 로 취함)

본 논문에서 재래적인 S-N 법뿐만 아니라 본 성수대교의 붕괴원인 조사와 같이 피로수명평가를 위한 제반데이터의 불확실성이 매우 큰 문제에 대해서 그 유용성이 크게 높아지는 피로신뢰성 방법을 적용하였다. 피로신뢰성방법은 최근 여러 학자에 의해 연구된 바 있지만 본 연구에서는 실용적인 Ang-Munse 방법[1975]을 사용하였다. Ang-Munse에 의하면 피로확률은 다음과 같은 함수로 계산된다.

$$F_N(n) = 1 - R_n(n) = 1 - \exp \left[- \frac{365 \times ADTT \times Y_r}{n} \Gamma(1 + \Omega_N^{1.08}) \Omega_N^{1.08} \right] \quad (3)$$

여기서 Y_r = 기대피로파괴 년한(년) ; Γ ()=Gamma Function ; Ω_N = 변동계수 (Ang-Munse 제안값인 0.74사용) ; R_N = 피로반복에 의한 신뢰성수준

4. 조건부 피로파괴확률

브라켓과 가로보지지구조물의 설치 효과로 인한 피로파괴확률의 변화 분석을 위한 조건부 피로파괴 확률의 추정이 필수적이며 다음(4)와 같이 표현될 수 있다[Shaaban and Albrecht 1985].

$$P_{F(cond)} = \frac{F_N(n) - F_N(n_{BR})}{1 - F_N(n_{BR})} \quad (4)$$

여기서 $F_N(\cdot)$: 식(3)의 피로확률계산 함수 ; n은 임의의 피로반복 회수

n_{BR} : 브라켓 및 가로보지지구조물을 설치하였을 때의 피로반복회수

5. 피로수명과 성수대교의 피로 파괴확률

5.1 피로 평가를 위한 데이터

재래적인 S-N방법과 Ang-Munse의 신뢰성방법에서 피로수명평가를 위해서 6개의 주요 파라메타가 있다. 이미 붕괴된 교량에서 응력 히스토그램, 피로하중, 평균일일트럭교통량 등과 같은 중요 파라메타의 실제 데이터를 정확히 얻는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 각 파라메타의 높은 불확실량을 고려할 때 재래적인 S-N방법과 동시에 확률적인 접근 방식으로 평가하는 것이 합리적이다. 본 연구에서 서울지방검찰청의 활동백서에서 제시된 기본데이터를 근거로하여 표 1과 같이 상한치와 하한치를 설정하였다. 최확기대치는 저자의 판단으로 최확기대치를 정하였다.

전문가의 의견을 종합하면 설계하중 TL180(DB18: 32.4ton)보다 무거운 과적트럭하중이 붕괴전 성수대교를 많은 빈도로 통행하였다고 한다. DB-24 보다 무거운 과적트럭하중 통행량이 다른 한강상의 교량보다 많았음은 서울지방검찰청 보고서에 명시되어 있다. 그러므로 피로하중의 하한치와 상한치를 TL180(DB18)과 TL240(DB24)로 각각 선정하였으며 이들 한계 하중의 평균을 최확기대치로 선정하였다. 본 연구에서 피로응력범위는 그림 2에서 보는 바와 같이 국부 FEM 해석의 결과를 기초로 한 동축 수직재의 부분적인 실제 용접상태를 고려하여 산출하였다. 최소값은 양단이 편연결조건인 값을 최대값은 브라켓 및 가로보지지구조물이 설치된후 양단 강결조건인 값을 선정하였다. 브라켓과 H-빔 부재를 설치한 후 실제로 경계조건은 강결조건과 편연결조건의 중간 정도로 판단되어 이들의 평균을 최확기대치를 정하였다.

표 1. 피로해석을 위한 기초 통계치

파라메타	하한치	최확기대치	상한치
과적하중	TL180(DB18)	TL210(DB21)	TL240(DB24)
트럭중량분포지수(ρ)	0.54	0.6225	0.705
응답비(α)	0.5	0.86	1.00
응력범위(kg/Cm ²), S_{ra}	435	780	1125
ADTT	2,500	3,500	4,500
C	2.2967×10^{14}	3.218×10^{14}	4.2653×10^{14}

피로해석을 위해서 ADTT의 최확기대치는 붕괴원인규명감정단세서 '평가한 3,500을 사용하였다. 민감도 분석을 위해서 하한치는 설계치인 2,500을 사용하였고, 중간 평균값이 3,500이 될 수 있도록 상한치는 판단에 의해서 4,500을 사용하였다.

5.2 고찰

앞에서 기술한 피로수명 및 피로파괴확률계산 절차는 프로그램을 작성하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석과정과 수치해석 결과에 대한 구체적이고 자세한 내용은 한양대학교 부설 공학기술연구소 연구보고서 “브라켓 및 가로보지지부재가 성수대교 피로파괴에 미친 영향 연구”[1997]에서 자세히 기술되어 있으며 본 논문에서는 주요 결과만을 제시하였다. 피로수명과 피로파괴확률을 위한 피로분석의 결과를 표 2에 나타냈다. 위에서 언급하였듯이 표에서 Case I은 브라켓 및 H-빔 부재가 설치되지 않은 조건이고, Case III는 브라켓 및 H-빔 부재가 설치된 후 양단 강결조건을 말한다. 피로수명은 개통 후부터 붕괴될 때까지의 년수로 나타내고 피로파괴 확률은 개통이래로 붕괴될 때까지 즉 15년까지의 피로파괴확률을 의미한다.

표 2에서 보여주듯이, Case III 조건에서 표 1의 6개 파라메타가 하한치에서 상한치로 증가함에 따라 피로수명과 피로파괴확률의 변화는 일반적으로 Case I보다 덜 민감하다. 왜냐하면, 다른 파라메타보다 브라켓 및 H-빔 부재의 효과가 더 크게 지배하기 때문이다. 또한 흥미있는 결과는 CaseIII에서 피로수명의 최확기대치가 Case I의 약 절반인 15년으로 실제 파괴된 시간과 거의 비슷한 결과를 얻었다는 것이다.

표 2. 파라메타 변화에 따른 피로수명과 피로파괴확률

피로평가를 위한 파라메타		하한치		최확기대치		상한치	
		피로수명 (년)	피로파괴확률 (%)	피로수명 (년)	피로파괴확률 (%)	피로수명 (년)	피로파괴확률 (%)
ρ	Case I	53	14	34	24	24	38
	CaseIII	16	99.8	15	100	14	100
과적하중	Case I	55	14	34	24	23	39
	CaseIII	16	99.8	15	100	14	100
α	Case I	175	3	34	24	22	41
	CaseIII	25	72	15	100	14	100
S_{ra}	Case I	34	24	34	24	34	24
	CaseIII	21	72	15	100	14	100
ADDT	Case I	48	16	34	24	27	33
	CaseIII	16	100	15	100	14	100
C	Case I	24	37	34	24	47	18
	CaseIII	14	100	15	100	16	100

다음 그림 6은 공용후 브라켓 및 가로보가 설치된 조건하에서의 공용년수에 따른 앞의 세가지 조건별 수직재 조건부 피로파괴확률을 나타낸 것이다. 가로보 끝단을 지지하기 위해 브라켓과 H-빔 부재가 설치된 시점인 13.5년부터 수직재의 경계조건이 변화하고 이에 따라 피로파괴확률이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히, H-빔 부재로 인하여 수직재가 억제된 양단 강결조건은 편연결조건일 때에 비하여 피로파괴확률이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다.

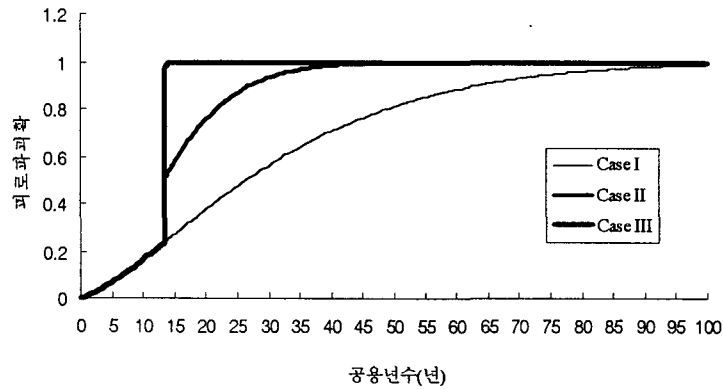


그림 6. 조건부별 피로파괴 확률(Ang-Munse 방법)

고찰결과를 요약하여 보면, 잔존피로수명 및 피로파괴위험도의 평가 결과 브라켓 및 가로보지지 구조물을 고려한 경우 피로수명은 이들을 설치하지 않은 경우의 평균기대수명인 30~40년인 것에 비하여 실제 피로파괴 수명에 근접하는 절반 이하인 15년 정도로 급격히 감소하며 이에 대응하는 피로파괴위험도도 20%에서 100% 정도로 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 성수대교는 편연결 수직재가 초기 부실용접과 과적트럭통행에 의해 지속적으로 피로손상이 어느정도 진행되다가 브라켓 및 가로보지지구조물의 설치로 인하여 피로파괴위험도가 급격히 증가하였고 피로수명이 크게 단축되므로써 결과적으로 피로수명이 15년 될 때에 붕괴되었음을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 엄밀한 국부 FEM 구조해석 결과를 바탕으로 브라켓과 가로보지지구조물이 성수대교의 피로파괴에 미친 영향을 재래적인 S-N 피로해석이론 뿐만아니라 보다 과학적이며 합리적인 피로신뢰성이론기법을 적용하여 정량적으로 보다 엄밀하게 분석하였다.

요약하면, 잔존피로수명 및 피로파괴위험도의 평가 결과 브라켓 및 가로보지지구조물을 고려한 경우 피로수명은 이들을 설치하지 않은 경우의 평균기대수명인 30~40년인 것에 비하여 실제 피로파괴 수명에 근접하는 절반 이하인 15년 정도로 급격히 감소하며 이에 대응하는 피로파괴위험도도 20%에서 100% 정도로 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 성수대교는 편연결 수직재가 초기 부실용접과 과적트럭통행에 의해 지속적으로 피로손상이 어느정도 진행되다가 브라켓 및 가로보지지구조물의 설치로 인하여 피로파괴위험도가 급격히 증가하였고 피로수명이 크게 단축되므로써 결과적으로 피로수명이 15년될 때에 붕괴되었음을 알 수 있었다.

결론적으로 성수대교의 붕괴원인은 파괴위험부재인 게르바 편연결 수직재로 된 교량형식을 채택하면서도 이 위험한 수직재에 대한 부적절한 상세설계, 용접불량 및 제작결함 같은 부실시공, 주기적인 점검·진단·보수와 같은 실제적인 유지관리의 결여, 빈번한 과적 중차량통행의 방치로 균열손상이 진전되어 오다가 브라켓 및 가로보지지구조물의 설치라는 부적절한 보수행위로 인하여 피로파괴위험도가 급격히 증가하여 붕괴에 이르게 되었다고 볼 수 있다.

7. 참고문헌

건설교통부(1996), "도로교표준시방서(부록)", 1996

서울지방검찰청(1995), "성수대교 붕괴사건 원인규명감정단 활동백서", 1995. 6

서울특별시(1995), "성수대교 정밀안전진단 최종보고서", 1995. 5

한양대학교 부설 공학기술 연구소 연구보고서(1997)"브라켓 및 가로보지지부재가 성수대교 피로

파괴에 미친영향 연구" 동아건설산업주식회사

AASHTO(1994) "AASHTO LRFD Design Specifications"

Ang, A. H-S. and Munse, W. H.. (1975), "Practical Reliability Bases for Structural Fatigue. Reprint 2494. ASCE National Struct. Eng. Conf.

Albrecht, P. (1983) "S-N Fatigue Reliability Analysis of Highway Bridges", Probabilistic Fracture Mechanics and Fatigue Methods: Applications for Structural Design and Maintenance, ASTM STP 798, J. M. Blom and J. C. Ekvall, EDs., American Society for Testing and Materials. pp. 184-204

Shaaban, H. and Albrecht, P. (1985), "Fatigue Rating of Steel Highway Bridges", Research Report, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Maryland, College Park, Maryland, USA, May 1985