

# 철취부를 갖는 세로보의 피로거동과 보수·보강에 관한 연구(I) -정적거동 및 피로거동의 실험적 고찰-

Study on Fatigue Behavior and Rehabilitation of Stringer with  
Coped Section(I)  
-Experimental Study on Static and Fatigue Behavior-

황 윤 국<sup>1)</sup>                      장 동 일<sup>2)</sup>  
*Hwang, Yoon Koog                      Chang, Dong Il*

요 약 : 철취된 세로보를 갖는 강철도교량의 바닥판에서의 피로거동 및 손상시 보수·보강의 효과를 연구하기 위해 8개 대형시험체에 대한 모형시험을 수행하였다. 실험량을 대상으로 실동용력을 측정하여 기본 용력범위 빈도히스토그램을 작성하고 이에 의한 변동용력의 등가용력범위를 산출하였다. 이 등가용력범위를 기준으로 피로시험의 용력변동범위의 크기를 조정하면서 정적 및 피로시험을 보강전과 보수·보강후로 구분하여 실시하였다. 정적시험에 의하면 재하하중의 크기가 등가실동용력 수준인 시험체의 경우에서 이미 허용용력과 비슷한 용력을 나타내므로서 피로균열의 발생조건을 충족하고 있었다. 손상된 시험체에 대해 다양한 보수 및 보강을 실시하여, 각각의 결과를 비교검토했다. 그 결과 보수효과는 stop hole을 천공하고 고장력볼트를 체결한 경우에 피로균열성장의 지체효과가 뚜렷하게 나타났다. 한편 보강효과는 힘의 지배를 받는 세로보의 경우 인장측 플랜지의 보강이 효과적이며, 복부의 보강은 보강방법으로 적절하지 않음을 알 수 있었다. 또한 직각철취된 세로보의 피로설계등급은 우리나라 시방서 피로설계규정의 E등급에 해당한다는 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT : This study encompasses the performance of static and fatigue test for the 8 large scale test specimens to clarify the fatigue behavior of coped stringer and the effect of the repair and strengthening on the damaged stringer of the floor system in steel railway bridges. For the purpose of the research, the actual stress wave for the existing bridge was measured, the basic stress range frequency histogram was made and the equivalent stress range was calculated. Using the result from the equivalent stress range made

1) 정회원 한국건설기술연구원 수석연구원  
2) 정회원 한양대학교 토목공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

by adjusting the stress range, the static and fatigue test was carried out by identifying the previous rehabilitation and after. As the result of the static tests, it was revealed that the level of local stress under the S1 specimen test of the real equivalent stress range was similar to tensile strength of the test material, and it was consistent with the requirement of the initiation condition of the fatigue crack. Through the various rehabilitation methods to the damaged specimens, the effects of the repair and reinforcement were analyzed. According to the results of the repair effect, bolting the high tension bolt over the stop hole was confirmed to be more adequate method than drilling only stop hole to delay the fatigue crack growth. Furthermore, in case of the stringer subjected by bending moment, the reinforcement over the upper flange side was determined to be a useful strengthening method, and the reinforcement to the web of the stringer was not appropriate to accomodate as a adequate strengthening method. Also it was confirmed that the category of the fatigue design for the coped stringer met with the category E specified on the fatigue design criteria of the Highway Standard Specification in Korea.

**핵심용어** : 실동응력, 절취부를 갖는 세로보, 정적 및 피로거동, 보수·보강, 대형시험체, 응력확대계수

**KEYWORD** : actual stress, coped stringer, static and fatigue behavior, repair and strengthening, large scale specimen, stress intensity factor

## 1. 서론

강교를 설계하는데 있어서의 기본적인 설계기준은 사하중, 교통하중, 풍하중 등 여러 하중의 조합 하중작용에 대해 허용응력과 좌굴강도를 초과하지 않을 것과 피로에 저항할 수 있는 조건등을 만족하도록 정해진다. 피로문제를 제외한 다른 문제는 대체로 시방기준에 따라 해석과 설계가 수행되면 사용중 큰 손상없이 교량을 사용할 수 있다. 그러나 피로문제는 시간이 경과함에 따라 징후를 나타내는 것으로서 단기간의 공용기간 내에는 어떠한 징후도 보이지 않지만 공용기간이 길어지면 서서히 징후가 나타나는 경시성을 갖고 있으며, 또 피로를 지배하는 요소가 공칭응력이 아니고 국부응력이므로, 시방규정에 충실한 해석과 설계가 이루어졌다

하더라도 완성된 구조계의 거동이 설계시 추정된 대로 거동하지 않는다.<sup>(1,2)</sup> 따라서 피로손상을 방지하기 위해서는 실교량에 대한 측정을 통해 검사하는 과정을 거쳐야 완성된 구조계의 국부응력을 정확하게 확인할 수 있다.<sup>(3,4)</sup> 또한 피로문제는 구조물의 축조시 수명기간 동안 완전히 피로균열이 발생하지 않도록 하는 것을 목표로 하지만 현실적으로 이의 실현이 불가능하므로 피로균열의 발생 및 성장을 피할 수 없는 것으로 인정하고, 이를 얼마나 적절하게 유지관리에서 보완할 수 있느냐에 초점을 두고 유지관리 측면의 연구가 반드시 병행되어 한다. 특히 교량과 같이 활하중의 변동이 있고, 사용수명이 긴 구조물은 더욱 그러하다. 즉 피로균열이 발생하고 성장해 가는 과정에서, 어느 시점에 보수·보강이 이루어지는 것이 가장 합리적

인가를 결정하여야 할 것이며, 어느 정도의 균열성장 이후에 피로균열이 직접적인 붕괴원인이 될지를 파악할 필요가 있다. 또한 어떤 보수·보강방법이 가장 효율적인 방안이 될지를 검토하는 것도 피로문제의 중요한 관심사 중의 하나이다.

도로교와 철도교의 바닥틀 연결구조는 다소 차이가 있다. 도로교의 바닥틀은 상판을 통해 차량하중을 간접적으로 받지만 철도교는 열차하중을 직접 받는 구조로 되어있는 경우가 많다.<sup>(5,6)</sup> 무도상궤도는 특히 열차하중을 직접 받기 위해 세로보의 플랜지 일부를 절단하여야 하는 구조이기 때문에 세로보의 휨강성을 저하시키는 것은 물론 기하학적 불연속부에 의해 높은 응력집중을 야기하여 피로균열발생의 취약부가 된다.<sup>(6)</sup> 이와같이 절취부를 갖는 구조상세에 대한 연구는 수학적으로 이 형상에 대한 응력확대계수를 계산하는 식을 제안한 Hasebe 등<sup>(7)</sup>이 있고, 또 다른 응력확대계수의 제안과 절취부를 갖는 보의 피로강도평가가 각각 Albrecht<sup>(8)</sup>와 Cheng<sup>(9)</sup> 등에 의해 수행되었다. Okura<sup>(10,11)</sup>는 강판형교의 주저더와 가로보의 연결부에서 발생할 수 있는 피로균열의 양상을 4개로 분류하고 가로보 연결부의 국부응력을 평가하는 식을 제안하였다. 또 Takena 등<sup>(12)</sup>은 복부가셋트 용접이음의 상세한 국부응력해석과 그 결과를 이용해 균열성장을 해석하므로써 응력분포와 피로수명의 차이를 규명하였다. 더불어 3차원형상 이음에 대한 응력해석에 셀요소를 사용하는 것의 타당성을 밝혔다. 응력집중에 관한 문제는 Noda 등<sup>(13)</sup>이 봉강과 판재에 대해 물체력법을 이용해 해석적으로 구하였다. 그는 공칭응력을  $\sigma_n = 6M/d^2t$  (여기서 d : 최소단면의 폭, t : 판재의 두께, M : 외력모멘트의 크기)로 보고 최대판폭과 절취부의 곡률반경비, 최대판폭과 절취깊이의 비를 변수로 하는 응력집중계수를 계산하였다. 한편 D. Duprat 등<sup>(14)</sup>은, 전통적으로 항공공학 분야에서 피로계산을 Wöhler곡선에 기초하는데, 그 주요 개념이 다양한 형태의 구조물

과 재료에 대한 상당한 량의 시험을 필요로 하면서도 다른 구조물에 의심시킬 수 없다는 불편함을 해소하기 위해 응력집중부에 대한 새로운 피로손상계산법을 고찰하였다. 이 방법은 단축하중 상태에서만 적용가능하다는 단점을 안고 있다.

실제 교량에서 볼 수 있는 피로손상은, 설계시에 검토가 이루어지는 1차응력에 의한 손상이라기보다 대부분의 경우가 설계계산상에서 무시되고 있는 2차응력, 비구조재의 연결부에 생기는 응력이나 설계계산상의 가정과 실제 구조물의 거동이 다르기 때문에 생기는 응력이 원인이 되어 발생하기 때문에 피로손상의 다양성을 충족하는 정량화가 힘들다. 이의 해결방법은 첫째 교량 전체 또는 부재의 강성은 높이는 방법을 생각할 수 있고, 둘째 설계시 국부응력을 엄밀한 구조해석에 의해 산출하고 그것과 이음부의 피로강도로부터 피로설계를 하는 대안을 고려할 수 있으며, 셋째 구조상세의 개선이나 국부변형을 억제시킬 수 있는 방법을 강구할 수 있다. 그러나 어느 방법도 간단하지는 않다. 교량 전체의 강성이나 부재의 강성을 높이는 방법은 가장 확실한 방법일 수는 있으나 매우 비경제적이 되어 실용성이 없고, 국부응력의 엄밀한 해석은 계산이 대단히 번잡하며 피로손상이 발생하는 구조상세가 일반적으로 복잡한 형상으로 되어있기 때문에 실제의 구조상세를 역학적 모델로 치환하기 곤란하여 피로강도를 어떻게 평가하면 좋을지가 명확하지 않는 경우가 많다. 해석적이고 이론적인 방법에 의해 검토되었다라도 이는 특수한 경우에 대한 1회성이 될 뿐이다. 따라서 피로손상문제는 구조상세의 개선이나 국부변형의 억제방법에 의존하여 피로손상문제를 대처해 나가는 것이 일반적인 추세이다. 이 방법을 고려함에 있어서도 구조상세의 국부적인 거동이 구조상세형상의 미세한 차이에 의해서 크게 달라지므로 이론해보다는 실험적인 접근방법을 택하고 있다. 다만 실존하는 교량에 대해서는 국부응력의 측정으로부터 국부응력의 영향선을 구해 구조상세의 변형거동을 추정할 수는 있다.<sup>(4)</sup>

본 연구에서는 실제 교량을 대상으로 측정된 변동응력파를 이용하여 국부응력상태를 충실하게 재현할 수 있도록 모델화한 시험체 및 재하시스템을 활용하여 모형시험을 실시하므로써 해당 구조상세의 국부응력상태, 피로강도 및 보수·보강방법에 대해 정적재하시험, 유한요소해석, 피로시험을 통해 거동상태를 확실하게 밝힌다. 또한 소형시험체에 의한 시험만으로는 실제 교량의 중구파단수명을 밝힐 수 없었던 점을 고려하여, 대형시험체에 대한 시험결과를 기초로 적절한 해석모델을 만들고 해석적인 방법으로 최종 파단수명을 추정해 가는 일환으로서 먼저 시험적 고찰을 논하는 것으로 한다.

## 2. 실 험

### 2.1 시험대상 강재

강교량에서는 주부재의 경우 SWS 490을 주로 사용하고 있으며, 부부재는 SWS 400을 주로 사용하고 있다. 근래들어서는 거의 모든 부재를 주부재 사용강재로 대체하고 있으나 본 연구에서 대상으로 하는 교량은 1970년대 말에 설계된 것으로서 세로보의 강재 재질을 SWS 400C로 사용하였다. 따라서 시험체의 제작도 같은 등급의 강재(최소항복응력 : 2,500kg/cm<sup>2</sup>, 인장강도 : 4,100~5,200kg/cm<sup>2</sup>, 0℃에서의 최소 Charpy 흡수에너지 : 4.8kg·m)를 사용하여 시험을 수행하였다. 물성시험에 의한 이 강재의 기계적 성질은 표 1과 같다. 또 Barsom과 Rolfe<sup>(15)</sup>의 경험식을 이용하여 정적과피인성치를 계산하기 위해 Charpy V-Notch 충격시험을 한 결과는 표 2와 같다.

표 1. SWS 400C 강재의 기계적 성질

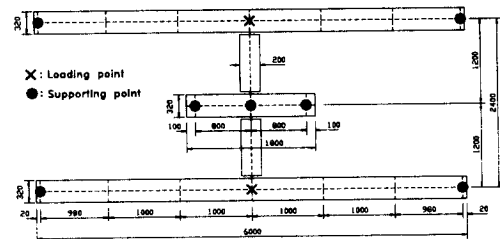
항복응력 $\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	인장강도 $\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 $E$ (kg/cm <sup>2</sup> )	연신률 (%)	Charpy 흡수에너지 (kg·m)
3.197	4.420	2.11×10 <sup>6</sup>	31.7	6.5

표 2. 온도별 흡수에너지의 변화

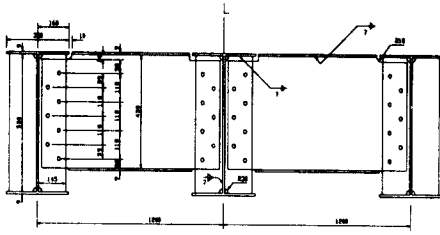
온도 (℃)	흡수에너지 (kg·m)	온도 (℃)	흡수에너지 (kg·m)
-70	0.996	27	6.773
-60	1.139	50	6.982
-50	2.428	100	7.121
-40	2.788	150	7.051
-30	4.437	200	7.121
-20	6.212	300	7.121
10	6.633		

### 2.2 시험체의 제원 및 분류

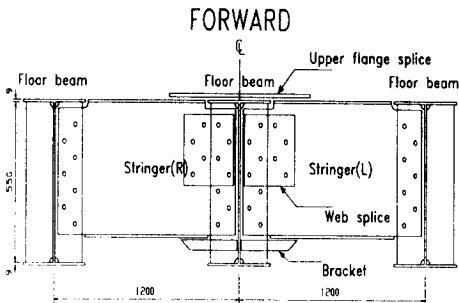
시험체의 개수는 총 8개이며, 시험체의 기본 구성형태는 그림 1(a), (b)와 같다. 시험의 주 대상이 세로보의 절취부이므로 하중의 도입을 위해 중앙에 작은 가로보를 두고 그 양쪽에 긴 가로보를 설치한 다음 중앙가로보와 좌우측의 긴가로보를 세로보로 연결하여 긴가로보의 중앙점에서 하중을 가하는 방식을 택하였다. 사용강재는 모두 두께 9mm이며, 용접은 7mm의 목두께로 필렛용접을 하였다. 가로보와 세로보의 연결은 실교량과 같은 방식의 고정력볼트(F10T M22)로 체결하였다. 보강방식은 전단저항 방식인 세로보의 복부보강, 휨보강인 상부플랜지에 인장판을 덧대는 형식, 그리고 압축보강인 하부플랜지에 브래킷을 설치하는 방식을 조합하여 시험하였다. 보강후의 시험체 형상은 그림 1(c), (d)와 같으며, 보강후의 시험체 형상은 시험에 적용한 모든 보강 방법을 동시에 나타낸 것이다. 시험체의 분류와 시험변수는 표 3에 나타내었다.



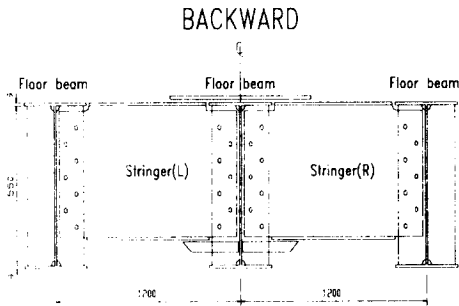
(a) 평면도



(b) 정면도



(c) 보강후의 전면 형상



(d) 보강후의 후면 형상

그림 1. 시험체의 형상 및 제원

### 2.3 시험조건

피로시험 및 정적 측정은 SHIMAZU사에서 제작한 50tonf 용량의 전기유압식 피로시험기를 이용하여 변동진폭하중 하에서 실시하였다. 보수·보강 이전의 시험체는 피로시험에 들어가기 전에 변동응력범위에 해당하는 재하하중의 크기마다 변형을 측정을 실시하고 피로시험을 수행하였으며, 피로시험을 실시하는 과정에서 초기 균열발생수명을 확인하기 위해 지속적으로 균열발생 유무를 검사하였고, 균열이 발생한 이후에는 매 단계마다 사이클 수에 대한 피로균열의 성장길이를 균열경을 이용하여 측정하였다. 피로균열의 발생위치는 시험체중의 2개 세로보 절취부 상단과 이 절취부 아래쪽 하단의 플랜지와 복부의 용접이 시작되는 곳이며, 각각의 위치에서 피로균열의 성장특성이 다르게 나타났다. 그러나 본 연구에서는 피로균열이 집중성장하는 위치를 중점 검토대상으로 고찰하므로써 시험체의 전체거동 보다는 절취형상에 의한 피로균열의 발생 및 성장특성에 주안점을 두었다. 따라서 피로하중의 도입도 절취부의 변동응력이 실동응력 수준이 되도록 적절히 조절하였다.

보수·보강 이후의 시험체는 보수·보강 효과를 상대비교 평가하기 위해 응력범위를 보수·보강 이전의 시험체에 적용하였던 하중중 가장 큰 값을 채택하여 시험을 수행하였다. 시험체의 응력

표 3. 시험체의 분류

시 험 체 구 분		접 합 구 조	응력범위(MPa)	비 고	
보강전	직각절취	S1-R-G	79.97	보수·보강전	
		S2-R-G	96.04	보수·보강전	
		S3-R-G	103.98	보수·보강전	
		S4-R-G	99.37	보수·보강전	
	원형절취	S6-C	Round Coped	119.17	보수·보강전
		S8-C	Beam Flange	148.76	보수·보강전
직각절취의 보수	S5-R-M	Rectangular Coped	96.04→103.98	Stop Hole 보수	
	S7-R-M	Beam Flange	96.04→103.98	Stop Hole 천공후 Bolt 체결	
보강후	직각절취의 보강	R1-WB	Rectangular Coped Beam Flange	복부와 하부플랜지 보강	
		R2-FB		상·하부플랜지의 보강	
		R3-W		복부만 보강	
		R4-FWB		복부와 상·하부플랜지의 보강	

변화를 살펴보기 위한 변형률게이지의 부착위치는 그림 2에 나타내었다.

피로시험에 적용할 하중의 크기를 결정하기 위해 실제 교량을 대상으로 실동응력파를 측정할 때의 측정위치는 세로보 단부 절취부의 피로균열선단으로부터 10mm 떨어진 곳으로 하였다.<sup>(16)</sup> 이 실동응력이력을 Rain Flow Counting Method<sup>(17)</sup>를 이용하여 빈도해석을 실시하고 기본응력빈도 히스토그램을 작성하였다. 이 기본응력빈도 히스토그램의 등가응력범위는  $S_{r,eq} = 79.97$  MPa이며, 다음 식 (1)에 의해 구한다.<sup>(18)</sup>

$$\Delta\sigma_{RMC} = \left[ \frac{\sum n_i \sigma_i^3}{N} \right]^{1/3} \quad (1)$$

여기서  $n_i$  :  $i$ 번째 응력블럭의 빈도수

$\sigma_i$  :  $i$ 번째 응력블럭의 크기

$N$  : 총 응력블럭의 빈도수 (=  $\sum n_i$ )

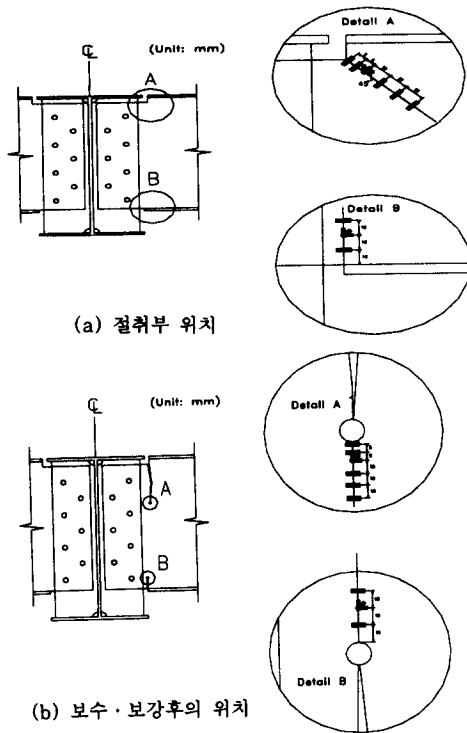


그림 2. 변형률게이지 부착위치(단위: mm)

피로시험중의 재하속도는 시험체의 변위와 시험기의 성능에 따라 다르다. 본 연구에서의 재하속도는 1.0~4.3 Hz의 범위에서 적절하게 조절하였다. 피로시험은 균열이 150mm 진전하였을 때 일단 중지하고 균열선단에 stop hole을 천공한 다음 4가지 유형의 보강을 실시한 후 변동응력범위를 103.98 MPa로 일정하게 유지하여 계속 시험하였다. 보수 시험체는 피로균열이 48mm 성장하였을 때 직경 16mm의 stop hole을 천공하고 피로시험을 계속한 것과 stop hole에 고장력볼트를 체결하고 피로시험을 한 2가지의 경우에 대해 실시하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 정적거동

##### 3.1.1 보강전 시험체

직각절취된 시험체에 변형률게이지를 45° 방향으로 절취부의 선단과 5mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm에 각각 부착하여 측정된 값을 그림으로 나타낸 것이 그림 3이다. 이 그림에서 응력수준의 크기는 S3-R-G 시험체가 가장 크고 S4-R-G 시험체, S2-R-G 시험체, S1-R-G 시험체의 순서로 되어있다. 각 시험체의 앞면과 뒷면의 응력차이가 있으며, 응력집중부에 가까울수록 그 차이가 크고 절취부에서 40mm 정도 떨어진 위치에서는 거의 응력차이를 보이지 않는다. 이러한 경향은 피로시험의 결과에서 피로균열의 길이 측정에서도 복부판의 앞뒷면의 균열길이가 차이를 나타내는 것으로 알 수 있다. 재하 응력수준이 높은 시험체 S3과 S4의 경우는 선단의 응력이 인장강도 433 MPa를 상회하는 수준이 되어 측정할 수 없었다. 재하 하중의 크기가 실동응력의 등가응력인 시험체 S1을 보면 절취부 선단의 응력은 물성시험에서 얻은 허용응력과 거의 같을 만큼 크다. 이는 실동응력측정으로 얻어진 응력수준이 항복응력에 가까운 것으로서 균열의 발생조건을 충족하고 있

음을 나타낸다.

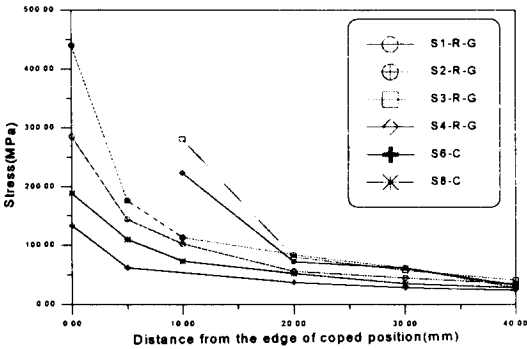


그림 3. 절취부의 응력

### 3.1.2 보강후 시험체

피로균열이 150mm까지 성장한 이후에 16mm의 stop hole을 천공하고 각각 복부의 보강, 복부와 상부플랜지의 보강, 상·하부플랜지 보강 및 복부와 상·하부플랜지의 보강의 4개 형식의 보강방법에 대해 정적응력을 측정된 것을 그림 4에 나타내었다. 변형률계이지는 원공의 선단인 158mm와 수직 아래 방향으로 5mm~40mm 사이에 총 6개를 부착하였다. 이때의 재하하중의 크기는 103.98 MPa로 모두 같은 크기이다.

복부만 보강한 시험체(R3-W)와 복부와 하부플랜지를 보강한 시험체(R1-WB)가 유사한 응력상태를 보이며, 복부와 상부플랜지를 보강한 시험체(R2-FB)와 복부와 상·하부플랜지를 보강한 시험체(R4-FWB)가 유사한 응력상태를 나타내고 있다. 이것은 복부의 보강효과가 크지않다는 것을 의미하는 것이다. 하부플랜지의 보강효과는 복부의 보강 보다 효과적이지만 상부플랜지를 보강하는 것만 못하다. R3-W 시험체와 R1-WB시험체의 균열선단의 응력수준이 다른 2개의 보강형식에 비해 크기는 하지만 각각 항복응력의 64%, 75%에 머물므로서, 동일한 하중강도를 갖는 보수전 시험체 S3-R-G의 절취부 선단응력이 인장강도를 상회하는 것과 비교해 볼 때 상당한 응력 감소효과가 있음을 알 수 있다. 또한 R2-FB 시

험체와 R4-FWB 시험체는 플랜지 보강을 하므로서 플랜지가 휨응력을 부담하여 균열선단부와 균열에서 멀리 떨어진 곳의 응력구배가 거의 차이를 나타내지 않는다. 따라서 플랜지의 보강은 응력을 완화시키는 가장 큰 역할을 한다고 할 수 있다. 이와같은 현상을 좀더 명확하게 나타내는 것이 그림 5의 응력집중율이다. 균열선단으로 부터 40mm 떨어진 곳의 응력이 거의 수평에 가깝게 변하는 점을 고려하여 40mm 떨어진곳의 응력에 대한 상대응력비로서 응력집중율을 나타내면 응력집중의 상대적 경향을 파악할 수 있다. 이 결과에 의하면 보강방식에 의한 차이가 다소 있지만 균열선단으로 부터 20mm 떨어진 곳의 응력집중율이 비슷한 수준으로 된다. 이는 보강을 병행하는 데 있어서 균열선단의 어느 범위까지를 응력분산범위로 삼아야 하는 지를 보여주는 것이다.

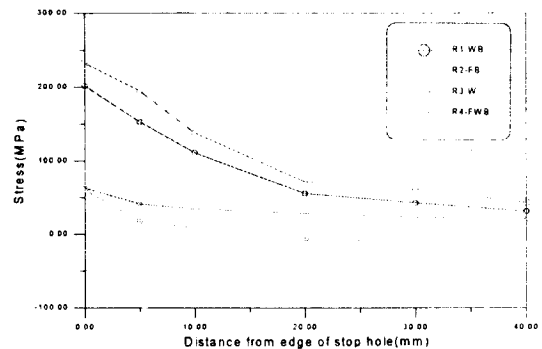


그림 4. 보강후의 균열선단 응력변화

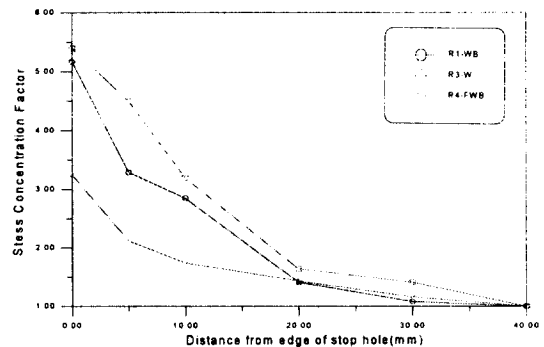


그림 5. 보강후의 균열선단 응력집중율

### 3.1.3 보수후 시험체

S5-R-M은 stop hole만 천공한 것이며, S7-R-M은 stop hole을 천공한 후에 고장력볼트를 체결한 시험체이다. stop hole의 천공은 피로 균열이 48mm 성장한 후 실시하였다. 두 시험체 모두 96.04 MPa의 변동응력범위로 시험하다가 피로균열이 48mm 성장한 다음에는 보강시험체와의 비교를 위해 응력범위를 103.98 MPa로 증가시켜 피로시험을 계속하였다. 이에 대한 정적거동의 정리자료를 그림 6에 나타내었다. S5-R-M의 균열선단응력은 전후면의 응력 차이가 현저하며, 이들은 이미 인장강도 보다 큰 값을 갖으므로써 균열성장에 대한 지체효과를 기대할 수 없는 수준이었다. 이 결과는 그림 8의  $a-N$  선도에서 stop hole 이후의 기울기가 보수 이전 보다 완만해 지지 않는 것과 일치하는 것으로서 stop hole에 의한 응력완화가 이루어 지지 않음을 알 수 있다. S5-R-M 시험체와 같은 응력변동범위를 갖는 S3-R-G 시험체의 경우  $a-N$  선도를 살펴 보면 초기 균열발생단계의 수명이 어느 정도 유지되지만, stop hole에 의한 보수 시험체에서는 S3-R-G 시험체의 초기 균열발생단계의 균열성장률이 훨씬 크다는 점에서 S5-R-M 시험체의 stop hole 선단응력이 크게 나타나는 것을 설명 가능하다. 이로써 힘을 받는 경우 보수효과는 1축재하되는 경우와 달리 stop hole 자체 만으로는 균열성장의 지체를 기대하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 한편 고장력볼트를 체결한 S7-R-M의 경우는 볼트체결로 인해 선단부에서 응력을 측정할 수 없었지만 stop hole만 천공한 시험체의 응력구배와 같은 기울기로 응력이 변화한다고 가정할 때 stop hole 선단응력이 약 368.5 MPa를 보이므로 stop hole만 천공한 경우에 비해 보수효과가 증진됨을 알 수 있다. 그러나 고장력볼트 체결에 의한 균열성장의 지체효과가 그대로  $a-N$  선도에 반영되었다고 할 수는 없다. 그 이유는  $a-N$  선도의 기울기의 변화가 수평을 유지하다

가 미소한 구역 즉, 수평이 끝나는 지점의 일부에서만 약간 완만해진다는 것으로 추정 가능하다. 그러므로 상당한 량의 지체효과처럼 보이는 균열성장률의 수평구간은 고장력볼트를 체결하므로써 응력의 분배가 다른 곳으로 분배된 것에 기인하는 것이라고 할 수 있다. 따라서 stop hole에 고장력볼트를 체결하는 이중보수 방법은 결과적으로 큰 지체효과를 발휘하기는 하지만 수평변화구간에 해당하는 지체효과는 균열이 발생한 위치, 상황 및 외력조건에 따라 그 효과를 다르게 나타낼 수 있는 구간이며, 최소 지체효과는 균열성장률이 수평변화하다가 끝나는 지점의 초기 완만한 기울기를 갖는 부분에 해당한다고 사료된다.

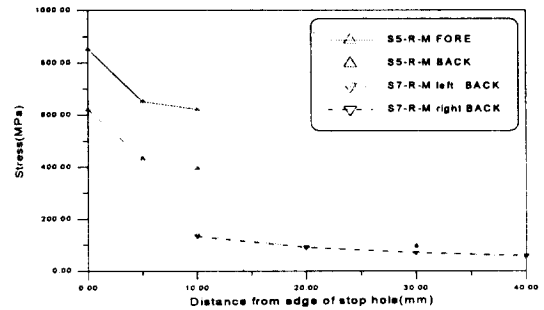


그림 6. 보수후의 균열선단 응력변화

## 3.2 파괴역학적 해석

### 3.2.1 응력확대계수

공칭응력  $\sigma$ 가 작용하는 무한판에 균열길이  $2a$ 의 균열이 존재할 때, 응력확대계수는 다음 식(2)와 같이 정의된다.

$$K = F(a) \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$F(a) = F_S \cdot F_E \cdot F_W \cdot F_G \quad (3)$$

여기서,  $F_S$  : 자유표면 보정계수

$F_E$  : 균열형상 보정계수

$F_W$  : 유한판 보정계수



$F_G$  : 응력집중을 고려한 형상 보정계수  
 식 (2)를 실용적으로 활용하기 위해서는 식 (3)의 값을 구하여 대입하여야 한다. 그런데 절취부를 갖는 단면에 대해 Tada와 Irwin<sup>(19)</sup>은 각각  $F_S$ 를 1.12라고 하였으며,  $F_W = \{\sec(\pi a/W)\}^{1/2}$ ,  $F_E$ 를 1.0으로 적용할 수 있다고 하였다. 기하학적인 불연속에 기인하는  $F_G$ 는 Albrecht와 Yamada<sup>(8)</sup>가 제안한 식 (4) 혹은 식 (5)를 사용하여 구할 수 있다.

$$F_G = \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^n \frac{\sigma_{bi}}{\sigma} \left( \arcsin \frac{b_{i+1}}{a} - \arcsin \frac{b_i}{a} \right) \quad (4)$$

$$F_G = \frac{2}{\pi} \int_0^a \frac{K_T}{\sqrt{a^2 - b^2}} db \quad (5)$$

여기서,  $K_T$  : 응력집중계수

$a$  : 최종 균열길이

$b$  : 절취부 선단으로 부터의 균열길이

시험체를 유한요소해석으로 국부응력을 해석한 결과를 기초로 응력집중계수를 식 (6)과 같이 구해 놓으면 식 (5)를 이용하여 정해진 균열길이의 응력확대계수를 계산하기가 편리하다.

$$K_T = -0.6386 \log b + 3.253 \quad (6)$$

이상의 결과를 종합하여 응력확대계수는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

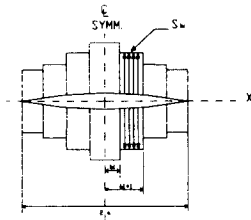


그림 7. Nonuniform Opening Stress를 받는 유한판의 균열

$$K = 1.12 \sqrt{\sec \frac{\pi a}{W}} \cdot F_G \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

### 3.2.2 피로균열 성장수명

피로균열 성장수명  $N_p$ 는 피로균열성장속도  $da/dN$  (mm/cycle)은 응력확대계수범위  $\Delta K$  ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )의 함수로서 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(20)</sup>

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (8)$$

여기서,  $C$ 와  $m$ 은 재료상수이며,  $\Delta K$ 가 가지 인 시험체의 피로균열 성장속도의 측정치로부터 결정된다.

식 (8)의 적용하한계는 한계응력확대계수범위  $\Delta K_{th}$  (Threshold Stress Intensity Factor Range)로 주어진다. 이것은  $da/dN$ 의 측정시  $\Delta K$ 를 작게 하면  $da/dN$ 이 극단적으로 작아져 결국은 균열이 정지하기 때문이다. 이  $\Delta K_{th}$ 는 응력비  $R$ 의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 시험치의 편차도 크다. Barsom은 한계응력확대계수범위  $\Delta K_{th}$ 를 식 (9)와 같이 제안하였다.<sup>(15)</sup>

$$\Delta K_{th} = 6 \quad R \leq 0.1 \quad (9a)$$

$$\Delta K_{th} = 7(1 - 0.85R) \quad R > 0.1 \quad (9b)$$

피로균열성장수명은 식 (8)에 식 (2)를 대입하여 1계상미분방정식을 풀어 계산한다. 따라서  $N_p$ 는 다음 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_p = \frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{\{F(a)\sqrt{\pi a}\}^m} da \cdot \sigma^{-m} \quad (10)$$

### 3.3 피로거동

#### 3.3.1 $a-N$ 선도

그림 8은 균열길이에 대한 사이클의 관계를 나타낸 것이며, 그림 9는 그림 8의 관계를 좀더 명확하게 나타내기 위해 무차원화한 것이다. 그림 8과 그림 9에서 직각절취 시험체인 S1-R-G, S2-R-G, S3-R-G, S4-R-G와 원형절취 시험체인 S6-C, S8-C 그리고 보수를 시행하면서 시험한 시험체인 S5-R-M, S7-R-M을 구분하여 살펴보는 것이 각각의 피로특성을 알아 보기 쉽다. S1~S4는 적용하중의 크기가 클수록 균열성장속도가 빠름을 알 수 있다. 이러한 경향은 원형절취 시험체인 S6-C와 S8-C에서도 마찬가지이다. 변동응력의 크기가 비교적 낮은 S1-R-G와 S2-R-G 시험체, 원형절취부를 갖는 S5-R-M과 S7-R-M 시험체의 초기균열성장속도가 느리지만, 변동응력수준이 104 MPa를 넘거나 일정수준 이상의 균열이 성장한 이후에는 기울기가 비슷해지면서 균열성장속도의 차이를 나타내지 않는다. 절취부에서 시작한 피로균열의 길이가 150mm에 이르렀을 때를 파단으로 보고 균열발생수명과 성장수명을 나타낸 것이 표 4이다.  $a-N$  선도에 의해서도 알 수 있지만, 표 4에 의하면 원형절취 시험체의 균열발생수명은 전체 수

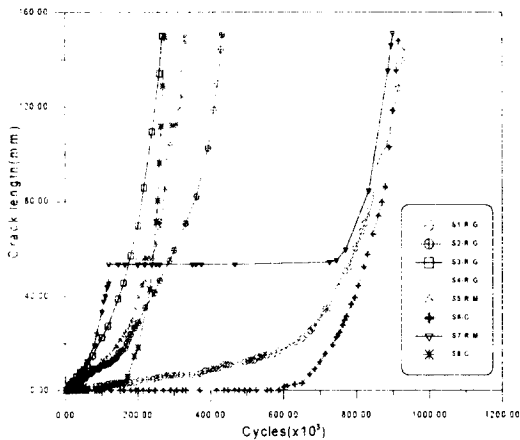


그림 8.  $a-N$  선도

명의 65%~75% 정도를 보이므로서 전체 수명의 상당부분이 발생수명이며, 직각절취 시험체의 경우는 성장수명이 전체 수명을 좌우한다.

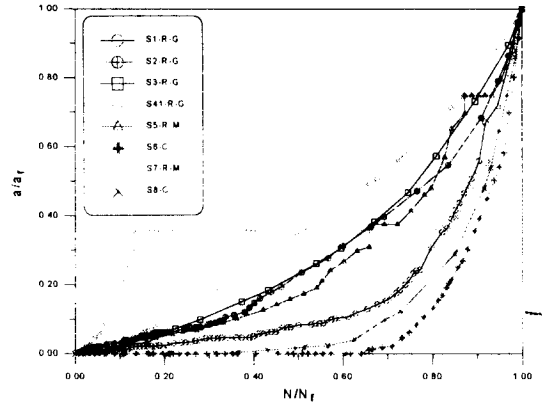


그림 9.  $a/a_i-N/N_f$  선도

표 4. 각 시험체별 응력범위와 피로수명

시 험 체	응력범위(MPa)	총피로수명 ( $\times 10^3$ 회) (발생수명%)	
직각	S1-R-G	79.97	935(43)
	S2-R-G	96.04	433(18)
	S3-R-G	103.98	268(19)
	S4-R-G	99.37	386(17)
원형	S6-C	119.17	916(75)
	S8-C	148.76	274(65)
직각 + 보수	S5-R-M	96.04 → 103.98	332(23)
	S7-R-M	96.04 → 103.98	900(5)

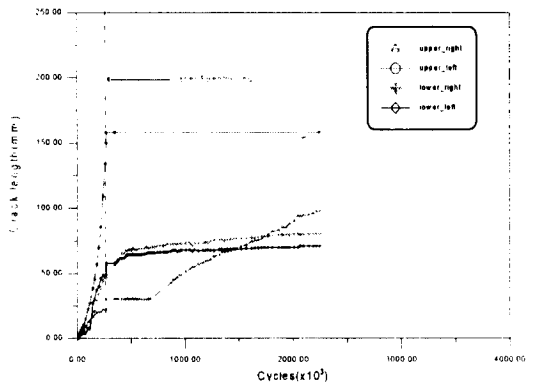


그림 10. R3-W 시험체의  $a-N$  선도

### 3.3.2 S-N 선도

시험체가 파단할 때까지의 반복회수  $N$ 과 그때의 응력범위  $\Delta\sigma(S)$ 를 양대수 그래프에 나타내고 회귀분석을 하면 우하향으로 근사된다 즉 재료상수  $c$ 와  $m$ 을 갖는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\log N = \log c - m \log(\Delta\sigma) \quad (11a)$$

$$S = cN^m \quad (11b)$$

표 4의 S1~S4 시험체의 결과를 기초로 도로교표준시방서<sup>(21)</sup>의 피로설계규정과 비교할 수 있도록 도식화한 것이 그림 11이다. 이때 실험에 의해 제안된 식은 다음의 식 (12)와 같다.

$$S = 2,111 N^{-0.238} \quad (12)$$

식 (12)의 파단수명  $N$ 은 피로균열이 150mm 성장했을 때를 파단수명으로 가정한 경우이며, 이 식에 의한  $2 \times 10^6$  사이클에 대한 피로강도는 68.40 MPa 이다.

### 3.3.3 $\Delta K - da/dN$ 의 관계

그림 8의  $a-N$  선도의 자료를 기초로 Paris-Erdogan이 제안한 식 (8)을 사용하여 균열이 150mm까지 성장해 가는 과정의 응력확대계수와 균열성장률과의 관계를 나타낸 것이 그림 12이다. 또 그림 12의 회귀분석 결과인  $C$ 값과  $m$ 의 결과는 표 5와 같다. Barsom<sup>(15)</sup>이 분석한 결과에 의하면 본 연구에서 대상으로 하는 등급의 강재가 나타내야할 평균적인  $C$ 값과  $m$ 은  $C = 3.6 \times 10^{-10}$ ,  $m = 3$  이다. 한편 Yamada는 변동진폭블럭하중하에서 일반구조용강에 대해 실험한 결과를 기초로  $C$ 와  $m$ 값을  $6.94 \times 10^{-9}$ , 2.90으로 제시하였으며, JSSC에서는  $C$ 와  $m$ 값

을 평균곡선에 대해  $1.5 \times 10^{-11}$ , 2.75으로 제안하고, 최안전곡선에 대해서  $2.7 \times 10^{-11}$  및 2.75로 제안하고 있다. 응력확대계수와 균열성장률의 관계로부터 얻은 본 연구의 재료상수 평균값은 Barsom 또는 Yamada 및 JSSC의 결과와 비교해 볼 때, 직각절취의 경우  $C$ 값은 크지만  $m$ 값은 작고, 원형절취의 경우  $C$ 값은 작은 편이지만  $m$ 값은 다소 크게 평가되는 경향이 있다. 이것은 기존의 연구결과에 의해 구하는 해석적인 피로수명이 본 연구의 시험값 보다 작게 나타난다는 것을 의미하는 것으로서 기존의 연구결과가 안전측의 값을 갖고 있음을 의미하며, 실험체가 다소 커지는 것은 일반적인 경향이다.

표 5.  $C$ 와  $m$  값

시험체	C	m
S1-R-G	5.00E-13	5.26
S2-R-G	2.71E-9	2.91
S3-R-G	4.62E-9	2.85
S4-R-G	1.28E-6	1.38

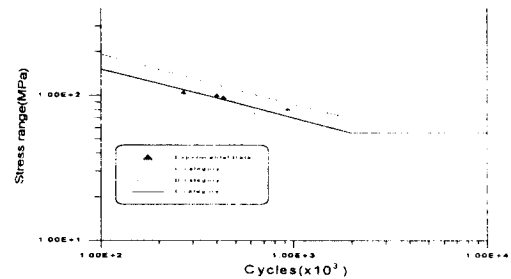


그림 11. S-N 선도

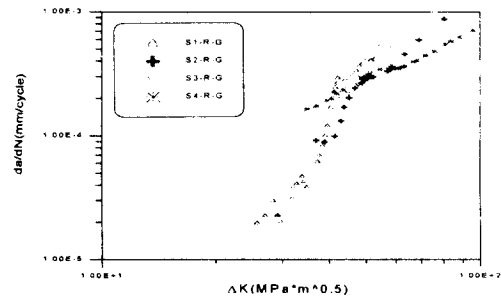


그림 12.  $\Delta K - da/dN$  선도

### 3.4 보수·보강 효과

보수효과를 검토하는 가장 확실한 방법이 균열의 성장과정에 대한 관찰이다. 그림 8과 그림 9 중의 S5와 S7 시험체의 경우는 S7이 stop hole을 천공한 후 고장력볼트를 체결한 것으로서 고장력볼트 체결에 의한 균열의 지체효과가 명백함을 보여주고 있다. S5 시험체의 균열지체수명은 7%로서 균열의 지체라고 할 수 없다. 이것은 stop hole의 크기 만큼의 균열성장에 필요한 수명에 불과하기 때문이다. 그러나 S7 시험체는 지체수명이 66%에 이르러 매우 우수한 보수효과가 있음을 수치적으로 보여 주고 있다.

한편 피로균열이 150mm 성장한 이후 4가지 유형의 보강을 하고 시험한 결과, 복부만 보강한 R3-W 시험체에서만 하부플랜지의 단면급변부에서 균열성장이 계속되었다. 이 결과는 정적거동에서 나타난 결과와 비교해 볼 때, 복부만 보강한 경우 균열선단의 응력이 여전히 높지만 압축부에 대한 보강이 이루어지지 않으면 응력이 다른 척약부로 전이하는 것을 나타내는 예이다. R1, R2, R4 시험체의 결과를 살펴보면, 휨을 받는 부재의 경우에는 인장부를 보강하는 경우 균열선단의 응력이 급격히 저하되면서 균열의 성장이 멈추므로 그 이상의 다른 보강방법을 병행할 필요가 없다는 것을 알 수 있다.

### 4. 결 론

본 연구는 강철도교 바닥판 구조의 세로보 상부플랜지가 절취되어 있는 경우에 대해 세로보 복부에 발생한 균열의 피로거동 및 손상시 보수·보강 효과를 검토하기 위해 실구조물을 모형화한 8개 대형시험체를 시험한 것이다. 정적거동에서 나타난 결과는 재하하중의 크기가 실동용력의 등가응력수준일 때 이미 재료가 갖는 허용응력과 비슷한 응력을 보이므로써 피로균열의 발생조건을 충족하고 있었다. 피로거동에 있어서는 복부 보강효

과가 미미하고, 인장측 플랜지를 보강하는 것이 효과적이며, 다른 보강방법을 병행할 필요가 없는 것으로 나타났다. 보수효과는 stop hole만 천공한 경우에는 보수에 의한 피로균열의 지체효과를 기대하기 어려우며, stop hole에 고장력볼트를 체결하였을 때 피로균열 성장의 지체효과를 얻을 수 있다. 이때의 지체수명은 약 66%에 이른다. S-N선도로부터 인장측 플랜지를 직각절취한 경우의 피로설계등급을 우리나라 시방서와 비교하면 E등급에 해당된다는 것을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- (1) Miki C., Toyofuku T., Yoshimura Y. and Murakoshi J. : Stress Reduction for Fatigue Assessment of Highway Bridges, Struct. Eng./Earthquake Eng., Vol. 4, No. 2, 1987.
- (2) 藤原捻, 村越潤, 鹿島久義 : 鋼プレートガダー橋における應力測定結果に關する報告, 構造工學論文集, Vol. 37 A, 1991.
- (3) Miki C., Goto Y., Yoshimura Y. and Mori T. : Computer Simulation on the Fatigue Load and Fatigue Design of Highway Bridges, Proc. of JSCE, No. 356/I-3, 1985.
- (4) 館石和雄, 竹之内博行, 三木千壽 : 鋼橋部材交差部に生じる局部應力の發生メカニズムと要因分析, 構造工學論文集, Vol. 37 A, 1991.
- (5) S. Kato, O. Yoshikawa, H. Terada and Y. Matsumoto : Studies on Fatigue Damages Based on Strain Measurements of a Highway Bridges, Proc. of JSCE Struc. Eng./Earthquake Eng. Vol. 2, No. 2, 1985.
- (6) John W. Fisher, Ben T. Yen and Dayi Wang : Fatigue Cracking of Steel Bridge Structures(II), FHWA-RD-89-169, 1990.
- (7) Norio Hasebe, Sei Matsuura, Nobuyuki Kondo : Stress Analysis of Strip with a Step and a Crack, Engineering Fracture

- Mechanics Vol. 20, No. 3, 1984.
- (8) Pedro Albrecht, Kentaro Yamada : Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, J. of Struct. Div., Vol. 103, No. 2, ASCE, 1977. 2.
- (9) Michael C. H. Yam, J. J. Rojer Cheng : Fatigue Strength of Coped Steel Beams, J. of Struct. Eng., Vol. 116, No. 9, ASCE, 1990. 9.
- (10) Ichro Okura, Masao Yubisui, Hiroshi Hirano, Yuhshi Fukumoto : Local Stresses at Cross Beam Connections of Plate Girder Bridges, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 5, No. 1, 1988. 4.
- (11) Ichro Okura, Hiroyuki Takikawa, Yuhshi Fukumoto : Structural Parameters Governing Fatigue Cracking in Highway Bridges, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 6, No. 2, 1989. 10.
- (12) 竹名興英, 川上博道, 伊藤文夫, 三木千壽 : ウェブガセット溶接継手の應力解析と疲勞壽命豫測, 日本土木學會論文集, 第392號/I-9, 1988. 4.
- (13) Nao-Aki Noda, Yasushi Takase, Keiji Monda : Stress Concentration Factors for Shoulder Fillets in Round and Flat Bars under Various Loads, Int. J. of Fatigue, Vol. 19, No. 1, 1997.
- (14) D. Duprat, A. Davy, R. Boetsch, R. Boudet : Fatigue Damage Calculation in Stress Concentration Fields under Variable Uniaxial Stress, Int. J. of Fatigue, Vol. 18, No. 4, 1996.
- (15) Barsom J. M., Rolfe S. T. : Fracture and Fatigue Control in Structures -Application of Fracture Mechanics-, Prentice-Hall, 1987.
- (16) 장동일 등 : 한강철교 정밀 안전진단 보고서, 연구보고서, 한국강구조학회, 1994.
- (17) Julie A. Bannantine, Jess J. Comer and James L. Handlock : Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, 1990.
- (18) 大倉一郎 : 鋼橋の疲勞, 東洋書店, 1994.
- (19) Tada H., Paris P. C. and Irwin G. R. : The Stress Analysis of Cracks Handbook, DEL Research Corp., 1973.
- (20) Paris P. C., F. Erdogan : A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Trans. ASME, Series D, Vol. 85, No. 4, 1963.
- (21) 건설교통부 : 도로교표준시방서-설계/시공 및 유지관리편-, 1996.

(접수일자 : 1997. 10. 1)