

# 피로균열이 발생한 강판형 철도교 세로보의 보수보강효과

홍성욱

한림성심대학 토목과

(2010. 1. 24. 접수 / 2010. 2. 19. 채택)

## An Effect of Repair & Retrofit of Stringer in Steel Plate Girder Railway Bridge with Fatigue Cracks

Sung-Wook Hong

Department of Civil Engineering, Hallym College

(Received January 24, 2010 / Accepted February 19, 2010)

**Abstract :** In this study, a series of finite element analysis using LUSAS were performed in order to assess the quantitative effects of repair and retrofit of stringer in steel plate girder railway bridge with fatigue cracks. And cut-off types of end part of upper flange were considered as right-angled type and round-angled type. Also, as a method of repair and retrofit of fatigue cracks in stringer, perforation of stop-hole and installation of bracket were considered. From the analysis result, it was possible to assess the fatigue safety and fatigue life of stringer with fatigue cracks, and to estimate the stress intensity factor range in cut-off part of stringer using J-integral method. Also, according to the method of perforation of stop-hole and installation of bracket, it was possible to calculate the crack propagation life at the cut-off part of stringer.

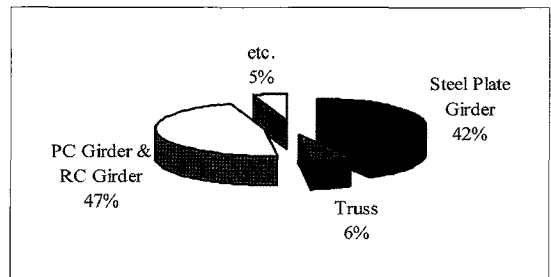
**Key Words :** finite element analysis, fatigue safety, fatigue life, repair and retrofit

### 1. 서론

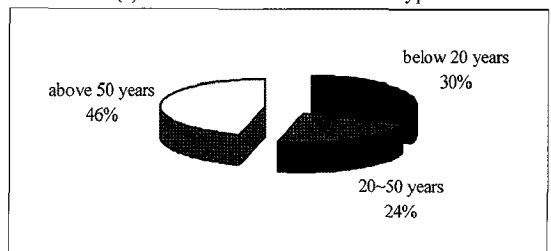
현재 국내에는 총 2,500개소의 철도교가 있는데, 이 중에서 강교량은 연장별 비율이 약 48%를 차지하고 있으며, 교량별 구성비는 Fig. 1(a)와 같다. 또한 강교량의 공용년수에 따른 분포양상은 Fig. 1(b)에서 나타낸 바와 같이 공용기간이 50년 이상인 교량이 전체교량의 약 46%를 차지하고 있다.

이러한 노후 강교량에 있어서 피로와 부식에 의한 손상은 시간이 경과함에 따라서 축적되며, 이들 교량의 수명을 지배하는 중요한 열화요인이다. 더욱이 철도교는 도로교에 비해서 활하중 변동폭이 크고, 특히 사하중이 작은 개상식 구조를 갖는 강철도교를 중심으로 손상사례가 빈번하게 보고되고 있으며, 이에 대한 보수·보강사례 연구도 활발하게 진행되고 있다.

본 연구에서는 약 20년 공용한 철도교를 대상으로 판형교 구간과 트러스교 구간 세로보 절취부에 대한 국부구조해석 및 파괴역학적 평가를 실시해



(a) Classification of Structural Types



(b) Classification of Service Duration

Fig. 1. States of Domestic Railway Bridges

서 직각절취 및 원형절취된 세로보에 대한 피로수명을 산출하고 스톱홀 천공, 브래킷 보강 및 덧판보

강 등과 같은 보수·보강효과에 따른 응력특성의 변화정도와 피로수명을 정량적으로 평가하였다.

## 2. 대상교량의 개요

본 연구대상교량은 Table 1 및 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 1979년에 개통된 강철도교로써, 중앙부는 810m의 중로트러스로 구성되어 있으며, 양측 접속구간은 550m의 하로판형교로 구성되어 있다.

## 3. 시간이력해석

시간이력해석에서는 피로균열이 발생한 것으로 조사된 판형교 구간 세로보를 대상으로 파괴역학적인 방법에 의한 피로수명 산정시 필요한 열차하중특성에 따른 등가응력을 산출하기 위해 하로판형교 구간 S5 경간에 대해 시간이력해석을 실시하여 응력빈도분포를 제시하고, 이것을 기초로 등가

응력을 산정하였다. 구조해석에서는 전체구조계에 대한 해석모델을 기본모델로 하고, 대상교량에 대한 설계하중을 사용하여 세로보에 대해서 영향면 해석을 실시하고, 최대단면력(모멘트)이 발생하는 세로보의 절취부를 대상으로 공칭응력에 대한 시간이력해석을 실시하였다.

### 3.1. 시간이력해석모델

본 연구에서는 하로판형교 S5 경간을 대상으로 LUSAS를 이용해서 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력해석에서 사용된 해석모델의 일례를 나타내면 Fig. 3과 같다.

시간이력해석에서 이용한 하중은 설계차량하중(축하중 10.5tonf)을 세로보 위에 정적으로 재하하였다. 열차이동에 따른 하로판형교 S5 경간내의 각 세로보의 단면력 변화를 조사하기 위해서 축하중의 재하위치를 약 50cm 간격으로 변화시키면서 일련의 시간이력해석을 실시하였다.

### 3.2. 시간이력해석결과

#### (1) 응력이력파형

Table 1. Dimension of the Bridge

교량명	□□철교
준공년도	1979년 9월
상부구조	단순하로판형교 3경간연속트러스교
하부구조	중력식 교각
설계하중	1축당 21톤

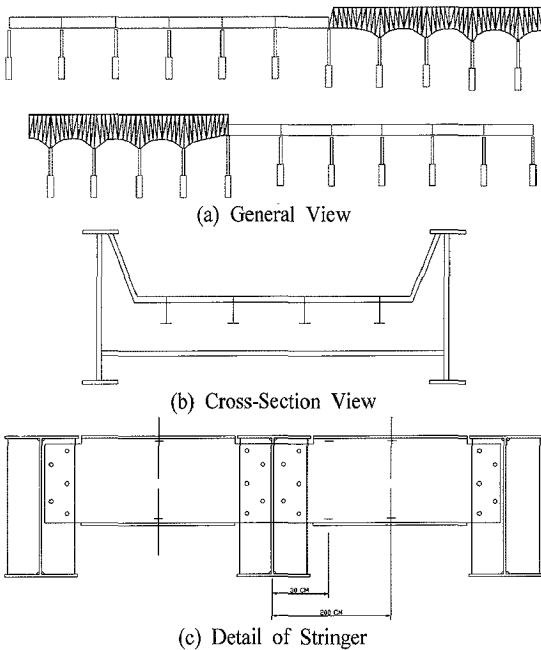


Fig. 2. Dimension of the Bridge.

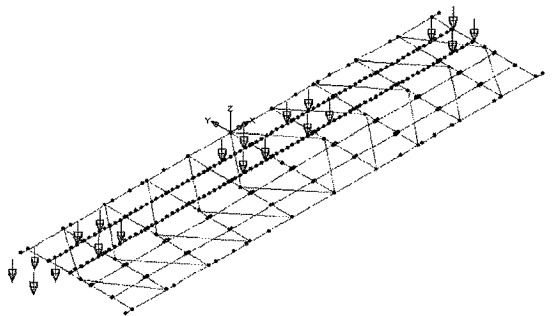


Fig. 3. Model of Time-History Analysis.

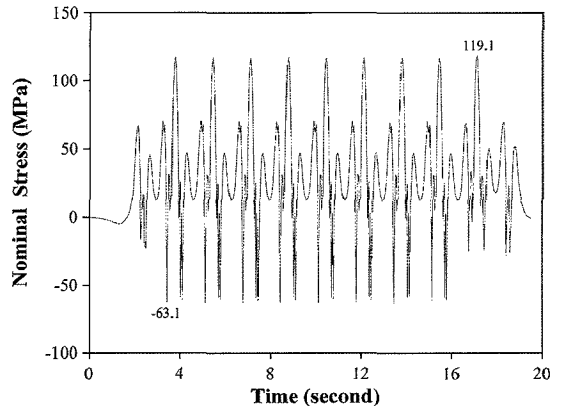


Fig. 4. Time-History Analysis of Reduced Stringer.

본 연구에서 실시한 시간이력해석결과의 일례를 나타내면 Fig. 4와 같다. 여기서, 시간이력해석결과는 세로보 절취부 상단부와 하단부의 최대응력발생위치에 대해 산정하였다.

**(2) 응력빈도히스토그램**

Fig. 4에서 나타낸 시간이력해석결과로부터 낙수법을 이용해서 응력빈도히스토그램을 작성하면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 나타낸 응력빈도히스토그램 작성에서는 피로수명계산의 타당성 및 효율성을 위하여 발생응력범위가 피로수명에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 알려진 최대응력범위의 25% 이하의 응력범위는 삭제하였다.

**4. 국부응력해석**

**4.1. 유한요소해석모델**

세로보 절취부의 응력을 정밀하게 해석하기 위해서 해석대상 세로보를 4절점 쉘요소를 이용해서 Fig. 6과 같이 모델링하였다.

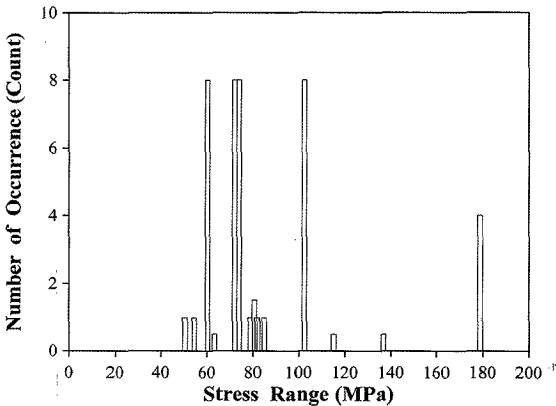


Fig. 5. Stress Histogram of Reduced Stringer.

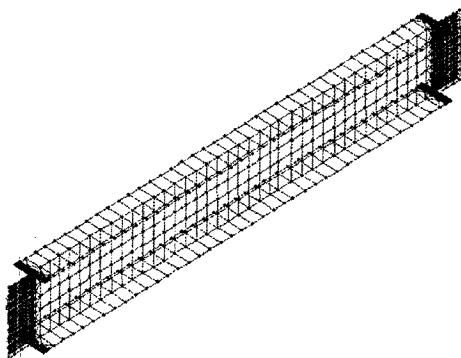


Fig. 6. Finite Element Analysis Model.

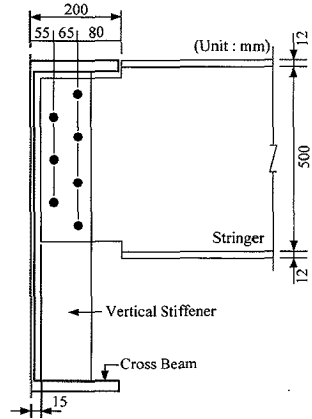


Fig. 7. Details of the Connection between Cross Beam & Stringer.

Fig. 6의 모델링에서 세로보 단부의 볼트연결부는 가로보의 보강판과 모든 방향의 변위가 동일하도록 링크시켰으며, 가로보와 용접된 보강판의 연단은 상대적으로 강성이 매우 큰 보요소를 연결시켜서 가로보의 복부판 역할을 할 수 있도록 하였다.

한편 세로보 모델링시 가로보와 세로보 연결부에 대한 상세를 나타내면 Fig. 7과 같다.

절취부에서의 요소의 크기는 요소크기에 따른 응력크기의 변화를 검토한 결과 절취부 곡률반경의 1/20 이하일 경우 안정된 값을 나타내었다.

따라서 응력이 최대로 집중되는 국부구조의 요소 한변의 크기를 직각절취부(절취부 반경=1.0mm)의 경우 0.0434mm, 원형절취부(절취부 반경=10mm)의 경우 0.0436mm로 하였다. 또한 세로보 복부판에 스톱홀 천공시 스톱홀의 직경을 20mm로 가정해서 원형절취부의 경우와 같은 크기의 요소로 구성하여 집중응력의 크기를 유한요소의 크기에 따라 응력이 변화하는 것과 관련하여 동일한 조건에서 비교할 수 있도록 하였다.

모델링시 하중재하는 보요소 모델에 대한 해석결과 세로보 절취부의 공칭응력이 최대값이 되는 하중재하의 경우를 선정하였다. 세로보 좌측 절취부 단면의 공칭응력은 절취부 위치에서의 단면력인 휨모멘트 4.14(tf·m)와 축력 3.35(tonf)으로부터 선형적인 응력분포로 가정하여 계산하였다. 이때 세로보 절취부 상단의 최대공칭응력은 1,196(kgf/cm<sup>2</sup>)로 계산되었다. 최대응력 산정시 이용한 단면적과 단면2차모멘트는 플랜지가 절취된 세로보의 복부판 제원(높이=46cm, 두께=0.9cm)을 사용하였다. 이 값에 모델보정계수를 곱하여 수정하면 최대공칭응력은 577(kgf/cm<sup>2</sup>)이 된다.

Table 2. Boundary Condition of Reduced Beam

위 치	Fx (tonf)	Mz (tonf · m)
좌	3.35	4.14
우	3.35	-0.79

셀요소 모델의 하중재하는 세로보가 연결된 보 강판 부분의 단면에 Table 2와 같은 단면력을 재하 시켰으며, 동시에 세로보에 재하된 열차의 축하중 은 보요소 모델과 동일한 위치에서 집중하중으로 셀요소 모델의 복부상단에 재하하였다.

4.2. 보수 · 보강방법에 대한 유한요소해석모델

본 연구 대상교량의 판형교 구간에서 피로균열이 발생한 세로보 절취부에 대한 보수 · 보강방법으로 사용된 스톱홀 천공, 덧댐판 설치, 브라켓 설치에 대한 효과를 평가하기 위하여 이들 구조상세에 대한 국부구조해석을 실시하였다.

(1) 스톱홀 천공

세로보 절취부의 피로균열 선단부에 스톱홀을 천공한 경우에 대해서 세로보 복부판의 직각절취 부 선단에서 45°방향으로 10cm되는 곳을 중심으로 지름이 2cm인 스톱홀을 모델링하였으며, 스톱홀 주위의 응력을 정확하게 산출하기 위해서 요소의 크기를 스톱홀 반경의 1/23으로 하였다. 스톱홀을 천공한 세로보 절취부에 대한 모델링의 일례를 나타내면 Fig. 8과 같다.

(2) 덧댐판 설치

본 해석에서 사용한 덧댐판은 실제 보수 · 보강자 료에 근거하여 크기가 43cm×46cm×1.0cm(가로×세 로×두께)인 강판을 사용하는 것으로 가정하였다. 덧 댐판을 설치한 세로보 절취부에 대한 모델링의 일 례를 나타내면 그림 Fig. 9와 같으며, Fig. 9에서 나 타낸 점은 가로보와 세로보를 연결하는 볼트의 위

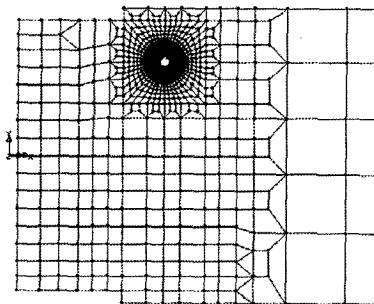


Fig. 8. Modelling of Stringer with StopHole.

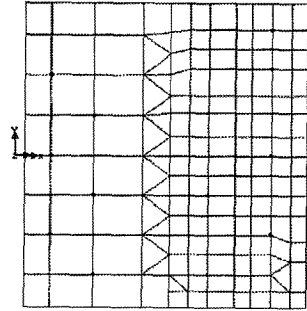


Fig. 9. Modelling of Stringer with Stiffened Plate.

치를 나타낸다.

(3) 덧댐판 및 브라켓 설치

스톱홀 천공에 따른 응력집중을 감소시키기 위 해서 세로보 하부플랜지에 브라켓을 추가로 설치 하였다. 본 해석에서는 스톱홀이 천공된 세로보 절 취부 좌측하단부에만 설치하는 것으로 하였다. 브 라켓을 설치한 세로보 절취부에 대한 모델링의 일 례를 나타내면 Fig. 10과 같다.

4.3. 유한요소해석결과

(1) 세로보 직각절취부

세로보 직각절취부에 대한 유한요소해석결과의 일례를 나타내면 Fig. 11과 같다.

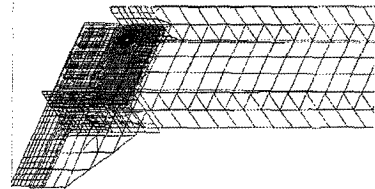


Fig. 10. Modelling of Stringer with Stiffened Plate & Bracket.

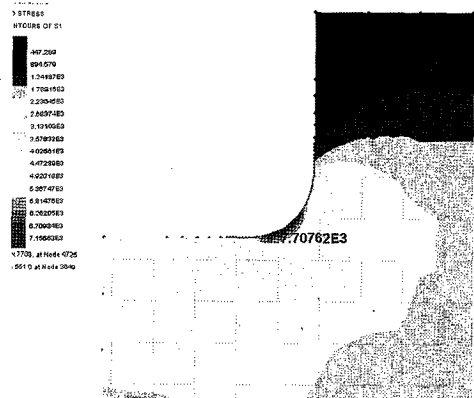


Fig. 11. Result of Right-Angled Reduced Beam.

Fig. 11에서와 같이 세로보 직각절취부에서 발생하는 최대주응력은  $7,708(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 임을 알 수 있으며, 이 값에 모델보정계수를 곱하여 수정하면 최대주응력은  $3,738(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 가 된다. 한편 셸요소모델을 이용해서 구한 세로보 직각절취부에서의 축방향 응력과 보요소모델을 이용해서 절취부 위치에서의 단면력으로부터 구한 공칭응력을 비교하여 나타내면 Fig. 12와 같다.

Fig. 12에서 가로축은 세로보 도심을 기준으로 한 복부의 높이를, 세로축은 복부에서의 응력값을 나타낸 것이다. 셸요소모델을 이용한 해석결과로부터 도출한 응력분포는 절취부 상·하단에서 응력이 집중되어 국부적으로 공칭응력보다 매우 큰 값을 나타내고 있으나, 그 이외의 부분은 공칭응력과 유사한 응력분포특성을 나타내는 것을 알 수 있었다.

### (2) 세로보 원형절취부

세로보 원형절취부에 대한 유한요소해석결과의 일례를 나타내면 Fig. 13과 같다.

Fig. 13에서와 같이 세로보 원형절취부에서 최대

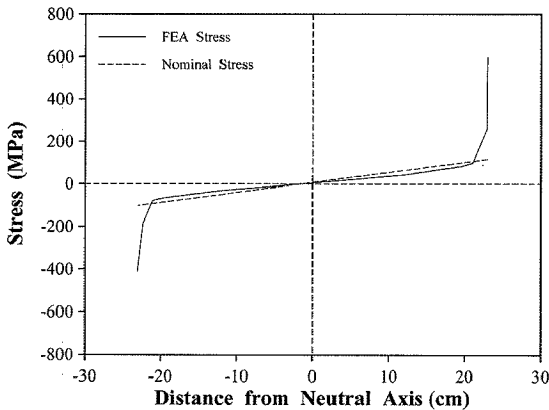


Fig. 12. Stress Distribution of Right-Angled Reduced Beam.

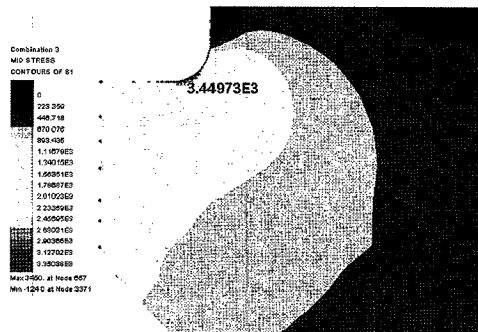


Fig. 13. Result of Round Reduced Beam.

응력은 세로보 절취부 선단에서 발생하며, 최대주응력은  $3,450(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 이며, 이 값에 모델보정계수를 곱하면 최대주응력은  $1,714(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 가 된다. 이 값은 세로보 직각절취부에 대한 최대주응력값의 약 45%임을 알 수 있다. 이는 원형절취부의 기하학적 형상이 직각절취부의 기하학적 형상보다 완만하기 때문에 응력집중이 완화되기 때문인 것으로 생각된다.

### (3) 스톱홀이 천공된 세로보

세로보 직각절취부에 스톱홀을 천공한 경우에 대한 유한요소해석결과의 일례를 나타내면 Fig. 14와 같다.

Fig. 14에서와 같이 스톱홀을 천공한 경우 최대주응력은 스톱홀 하단부에서 발생하고, 최대주응력의 크기는  $6,238(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 이었으며, 이 값에 모델보정계수를 곱하여 수정하면 최대주응력은  $3,025(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 가 된다. 이 값을 세로보 직각절취부의 최대주응력과 비교하면 약 20% 정도 감소하였는데, 이로부터 스톱홀 천공에 의한 보수방법의 효과는 완전한 대책이 될 수 없음을 알 수 있다.

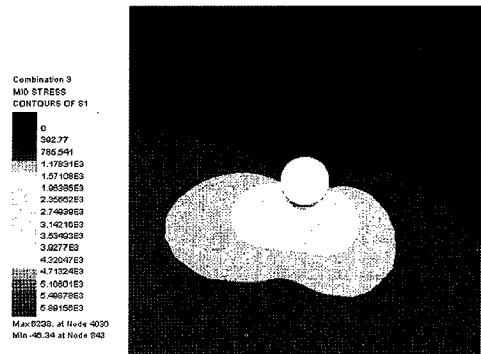


Fig. 14. Result of Stringer with StopHole.

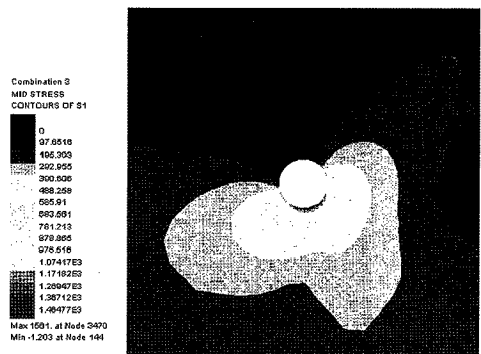


Fig. 15. Result of Stringer with Stiffened Plate.

**(4) 덧댐판을 설치한 세로보**

세로보 직각절취부에 대해서 스톱홀을 천공한 후 덧댐판을 설치한 경우에 대한 유한요소해석결과의 일례를 나타내면 Fig. 15와 같다.

Fig. 15에서와 같이 스톱홀 주위에 덧댐판을 설치한 경우 세로보의 최대주응력은 스톱홀 하단부에서 발생하였으며, 최대주응력은 1,561(kgf/cm<sup>2</sup>)임을 알 수 있다. 이 값에 모델보정계수를 곱하여 수정하면 최대주응력은 757(kgf/cm<sup>2</sup>)가 된다.

이 값을 덧댐판을 설치하지 않고 스톱홀만을 천공한 경우 세로보에서 발생하는 최대주응력과 비교하면 약 75% 감소하는 것을 알 수 있었으며, 이로부터 덧댐판을 설치하는 보수·보강방법은 매우 효과적임을 알 수 있다.

**(5) 덧댐판 및 브라켓을 설치한 세로보**

세로보 직각절취부에 대해서 스톱홀을 천공한 후 덧댐판 및 브라켓을 설치한 경우에 대한 유한요소해석결과의 일례를 나타내면 Fig. 16과 같다.

Fig. 16에서와 같이 스톱홀이 천공된 복부판에 덧댐판을 설치하고 세로보 하부에 브라켓을 설치하는 경우 세로보의 최대주응력은 스톱홀 하단부에서 발생하였으며, 최대주응력은 1,183(kgf/cm<sup>2</sup>)임을 알 수 있으며, 이 값에 모델보정계수를 곱하여 수정하면 최대주응력은 573(kgf/cm<sup>2</sup>)가 된다.

이 값을 브라켓을 설치하지 않은 스톱홀만을 천공한 세로보에서 발생하는 최대주응력과 비교하면 약 85% 감소하는 것을 알 수 있는데, 이로부터 덧댐판 및 브라켓을 설치하는 보수·보강방법은 매우 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 11~16에서 나타난 세로보 절취부와 각 보수·보강방법에 따른 최대주응력 산정결과를 정리해서 나타내면 Table 3과 같다.

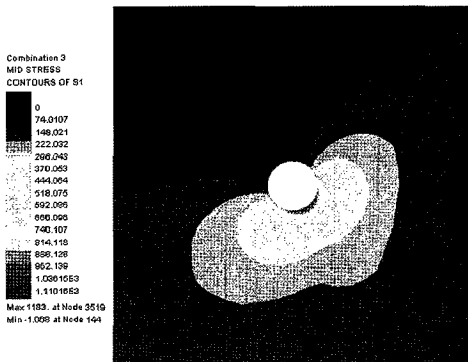


Fig. 16. Result of Stringer with Stiffened Plate & Bracket.

Table 3. Results of Maximum Principal Stress

	직각 절취	원형 절취	스톱홀 천공	덧댐판 보강	브라켓 보강	공칭 응력
계산 응력	3,738	1,714	3,025	757	573	577
응력비	1.0	0.45	0.81	0.20	0.15	-

앞에서도 기술한 것과 같이 직각절취에 비하여 원형으로 절취하거나 보수·보강을 실시하면 최대주응력이 저하하는 것을 알 수 있다.

Table 3으로부터 판형교 세로보 직각 절취부 및 스톱홀의 경우의 최대주응력은 판형교 세로보에 사용된 재료인 SM50A강재의 항복응력 3,200(kgf/cm<sup>2</sup>)를 초과하고 있으나, 원형절취부 및 덧댐판이나 브라켓에 의해 피로균열을 보강하는 경우의 최대주응력은 항복응력보다 작은 것을 알 수 있다.

따라서 세로보 직각절취부의 실제거동에서는 국부적으로 항복강도를 초과하는 높은 응력이 작용하는 부분은 소성변형이 발생하면서 응력의 재분배가 발생하였을 것으로 판단된다.

**5. 결론**

본 연구는 피로균열이 발생한 세로보 절취부에 대한 응력이력해석 및 유한요소해석모델을 이용한 국부응력해석을 실시하였으며, 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 세로보 직각절취부의 국부응력은 재료의 항복강도를 초과하면서 소성변형이 발생하고 응력의 재분배가 발생하였다.
- 2) 세로보 절취부에 대한 보수방법으로 자주 적용되는 스톱홀 천공은 최대응력의 감소폭이 다른 보수보강공법에 비해 적기 때문에 피로균열이 발생한 강철도교량의 보수방법으로는 적절하지 않다.
- 3) 세로보 절취부에 대한 보수보강방법으로 덧댐판을 보강한 후 브라켓을 설치하는 방법이 가장 효과적이었다.

**참고문헌**

- 1) JSCE, "Assessment of Deterioration and Damage in Steel Bridges", Marugen Co. LTD., pp. 10~12, 1996.
- 2) C. Miki, W. Nishigawa, J.W. Fisher, "Inspection of Fatigue Damage in Steel Bridges", Bridge & Foundation, pp. 17~21, 1986.

- 3) P. Albrecht, A.H. Naeemi, "Performance of Weathering Steel in Bridges", Report No.272, Nat. Cooperative Highway Res. Program, 1984.
- 4) M.E. Komp, "Atmospheric Corrosion Ratings of Weathering Steels - Calculations and Significance", Materials Performance, Vol. 26, No. 7, pp. 42~44, 1987.
- 5) S.W. Lee, "Maintenance of Railway Steel Structures", Journal of KSCE, Vol. 12, No. 3, pp. 30~35, 2000.
- 6) 이범희, "강트러스 철도교의 응력분포특성에 관한 연구", 한양대학교 석사학위논문, pp. 7~8, 1997.
- 7) 정태호, "부식에 의한 단면손실이 강철도교의 건전성에 미치는 영향", 한양대학교 석사학위논문, pp. 1~3, 2000.
- 8) 장동일 외, "피로손상이 발생한 강트러스 철도교의 응력이력계측 및 피로수명평가", 한국산업안전학회지, 제15권, 제1호, pp. 132~139, 2000.