

研究論文

교량 신축이음장치 용접부의 피로강도 해석

이용복*·정진성**·박영근**·김태윤**·김호경***·박상흡****

Analysis of Fatigue Strength in Expansion Joint Weldment of Bridge

Y. B. Lee*, C. S. Chung**, Y. K. Park**, T. Y. Kim**, H. K. Kim*** and S. H. Park****

Key Words: Expansion Joint(신축이음장치), Stress Concentration Factor(응력집중계수), Fatigue Notch Factor(피로노치계수), Notch Sensitivity(노치민감도), Size Effect(치수효과)

Abstract

This paper is especially concerned with the weldment between support beam and square bar that plays important roles in control box of Expansion Joint as a bridge structure.

Fatigue strength of the weldment is dependent on notch radius from welding defects and material properties. From which, tensile strength(σ_{ult}) and fatigue notch factor(K_t) become important factors to predict fatigue life. The fatigue notch sensitivity(η) for metals can be divided into two types : high and low notch sensitivity. In this work, the Expansion Joint weldment was found to have low notch sensitivity. The maximum strain distribution during static loading is similar to the FEM analysis. Fatigue test of real structure was performed up to 10^6 cycles to be compared with predicted endurance limit.

1. 서 론

국내에서는 항공, 조선, 지하철, 가스시설, 건축, 교량 등 모든 구조물들의 대형 사고가 빈번히 발생하여 많은 인명과 재산의 손실을 겪고 있다. 이

러한 사고는 부실 시공과 관리미숙 등에 따른 원인으로 이미 밝혀진 바와 같다. 산업의 발전과 더불어 모든 구조물은 사용여건이 가혹해지고 대형화 되어가고 있어 항상 사고의 위험이 증가하고 있다. 철도, 교량, 항공기, 공장설비 등 많은 시설물의 급작스러운 파괴 중 대부분의 파괴 원인은 접합부

※ 1998년 2월 27일 접수

* 정회원, 홍익대학교 기계공학과

** 비회원, 홍익대학교 기계공학과 대학원

*** 비회원, 서울산업대학교 자동차공학과

**** 정회원, 천안공전 용접기술과

에서 발생하였고 특히, 용접부에서 균열에 의하여 발생되었다¹⁻⁴⁾. 이상과 같은 이유로 체계적인 연구와 기술을 축적하여 이들 구조물들을 설계 시공함으로써 사고를 미연에 방지하는 것이 중요하다.

대부분의 강 구조물들은 리벳접합, 나사결합 및 용접으로 이루어지고 있으며, 이들 구조물 접합방법 중 작업공정 및 강도면에서 우수한 용접이 점점 그 활용도가 높아지고 있다⁵⁾. 그러나, 용접부에는 용접 과정 중에 필연적으로 기포, 슬래그 혼입, 언더컷, 피트, 고온균열 등 여러 형태의 결함이 존재하기 쉽고⁶⁻⁸⁾, 이들 결함들로부터 균열이 발생, 전파되어 최종 파단에 이르는 경우가 많다. 또한, 용접열로 인하여 국부적으로 팽창 및 수축하는 열소성변형이 생기고 뒤튐림이나 높은 잔류응력이 용접부에 존재하게 되어 용접부의 파괴 및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 되고 있다. 이러한 용접부재를 취약하게 하는 많은 변수들은 안전사용이나 안전설계에 어려움을 주고 있다⁹⁻¹³⁾.

교량 신축이음장치는 상부구조의 변위와 변형을 원활하게 하므로써 2차 응력을 최소화하여 차량이 교량을 안전하게 주행하도록 평탄성을 유지하고 교면 위의 각종 오물이 교량 하부구조로 유입되는 것을 방지하며, 콘크리트 부식을 방지하는 역할을 수행한다. 교량 신축이음장치의 신축량은 상부구조의 온도변화, 동하중, 동하중에 의한 상부구조의 변위, 콘크리트의 크리프와 건조수축, 설치시의 온도, 여유량 등을 고려하여 산정하여야 하며, Rail Type의 경우 신축 허용범위는 80~800mm이며, 1개 Rubber Seal의 신축량은 80mm이다. 본 연구의 대상이 되는 Rail Type 신축이음장치는 컨트롤

박스(Control Box), 고무씰(Rubber Seal), 압축 프로파일(Clamp Profile), 지지보(Support Beam), 탄성 베어링(Elasto-metric Bearing), 구 베어링(Spherical Bearing), 앵커 플레이트(Anchor Plate), 앵커 루프(Anchor Loop) 등으로 구성된다.

차량이 교량을 주행하면서 발생하는 반복하중으로 인한 신축이음장치의 피로강도는 비교적 높은 응력집중이 발생하는 가로보(Square Bar)와 지지보(Support Beam) 사이의 용접부가 지배할 것으로 판단되며, 이에 대한 응력해석, 피로강도 평가, FEM 해석 및 실 구조물 피로실험을 통한 신축이음 구조의 피로 안전성을 확보하고 최적 용접방법을 도출하기 위하여 단계적인 실험 및 해석을 수행하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

인장실험 및 회전 굽힘 피로실험의 재료는 현재 신축이음장치¹⁴⁻¹⁵⁾에 사용되는 ST 52-3 및 SWS 490B를 사용하여 모두 5가지 종류의 시험편을 제작하였다. 시험편의 제작과정을 Fig. 1에 나타내었다. 먼저 회전 굽힘 피로실험을 위한 시험편은 SWS 490B와 ST 52-3 재료를 현장 용접조건(Fig. 1(b) 참조)과 동일하게 용접한 후에 Fig. 1(a)과 같이 절단하고 KS B 0801에 의거하여 Fig. 1(b)와 같이 환봉으로 제작한 SWS 490B와 ST 52-3의 용접시험편을 A-type으로 정하였으

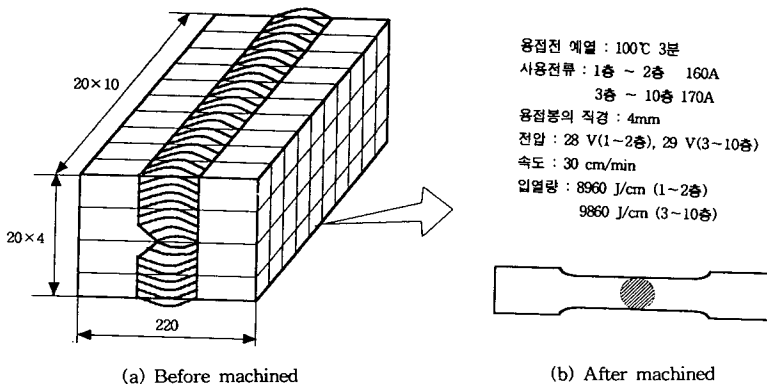


Fig. 1 Manufacturing process of A-type specimens

며, 이와 동일한 형상과 치수로 각각 SWS 490B와 ST 52-3 및 국산 재료의 모재를 사용하여 시험편을 제작하고 재료에 따라 각각 B-type, C-type 및 D-type으로 정하였다. 강재의 인장시험에 사용한 시험편은 KS B 0801에 의거하여 제작하였다. 또한 시험 대상 용착 금속부의 기본 물성치 획득을 위하여 현장 용접조건으로 용접된 재료를 KS B 0801에 의거 판형상으로 제작하였다.

실험을 통한 시험편의 재료 물성치를 Table 1, 주요 재료의 화학적 성분은 Table 2에 각각 나타내었다. 인장시험은 Instron사에서 제작한 25ton 용량의 만능 재료 시험기(dynamic material testing machine)를 사용하여 10mm/min의 속도로 하중을 가하면서 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 교량 신축이음장치의 지지보의 간격은 1.5m 이며 그 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 실험장치 및 방법

피로강도 평가를 위한 실험장치로서는 25ton 및 100ton 용량의 만능 재료 시험기 및 2점지지 2점 하중식 1점 중추 직교식인 균일한 모멘트형 하중 작용 방식의 오노식 회전 굽힘 피로시험기(Ono-type rotating bending fatigue testing machine)를 사용하였다.

실 구조물 정적 재하실험은 100ton 용량의 유압식 만능 재료 시험기를 사용하였다. 하중은 0.5ton 씩

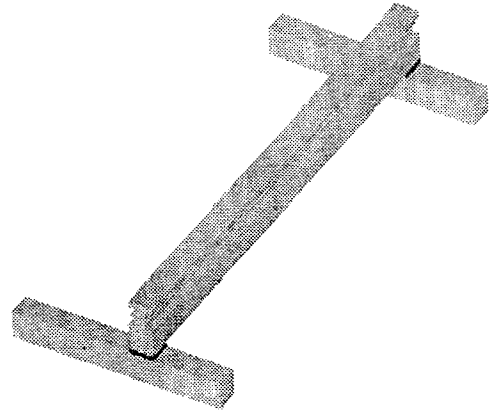


Fig. 2 Shape of expansion joint

증가시켜 최대 15ton까지 적용하였으며, 이와 동시에 10개의 스트레인 게이지를 Fig. 4에서와 같이 실 구조물에 부착하여 각 하중 단계별 변형을 및 최대 변위를 측정하였다.

교량 신축이음장치의 피로강도 향상을 위한 연구의 마지막 단계로서 실제 교량에 사용중인 신축이음장치의 실 구조물 피로실험을 수행하였다. 피로실험 전에 관심대상이 되는 용접부 주변을 세척액으로 청결히 닦고, 침투 탐상을 실시하여 초기 결함이 없음을 확인하였다. 한편 100ton 용량의 만능 재료 시험기를 사용한 실 구조물 피로실험에서는 시험체의 구조상 별도의 그림(grip) 장치를 제작하였다. 실험 대상 구조물의 지지 조건은 실 교량

Table 1. Mechanical properties of testing specimens

specimen type	A-type	B-type	C-type	D-type	Weldment
E (GPa)	209.0	205.0	207.0	204.1	243.3
σ_y (MPa)	357.1	354.0	380.6	361.0	588.4
σ_u (MPa)	548.4	565.1	548.4	586.6	664.5
Elongation (%)	24.4%	37%	29%	31%	20%
Hv (ave.)	see Fig. 3	180.9	188.4	197.5	188.0
ν	-	0.28	-	-	0.3
G (GPa)	-	80.2	-	-	93.6

Table 2. Chemical composition of testing materials (Wt, %)

material	C	Si	Mn	P	S	Cr
B material	0.16	0.38	1.35	0.015	0.002	0.02
C material	0.24	0.60	1.70	0.050	0.050	-
electrode	0.07	0.45	0.97	0.012	0.009	-

에 시공되고 있는 조건과 동일하게 하였고, 피로하중은 양단이 지지보로 지지된 가로보의 정 중앙에서 작용하도록 하였다. 피로실험시 작용하중은 최대 하중을 10ton, 최소 하중을 2ton으로 하여 응력

비(R)가 0.2로, 정현파(sine wave)형이 일정하게 유지하도록 하였으며, Fig. 5에 실 구조물 피로실험의 전경을 나타내었다.

3. FEM 해석

교량 신축이음장치 구조 설계의 정확한 검토와 가장 취약한 부분을 이론적으로 평가하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석에는 I-DEAS로 pre-processing 한 후 solver는 ANSYS 5.3을 사용하였으며 구조물의 거동은 탄성 거동(linear elastic)으로 가정하였다. 모델링은 structural 3D solid 요소를 사용하였다.

Table 3의 조건으로 Fig. 6과 같이 모델링하고, 정적 재하실험에서와 같이 양단이 지지보로 지지된 가로보의 정 중앙에 12.5ton의 하중을 가하였다. 여

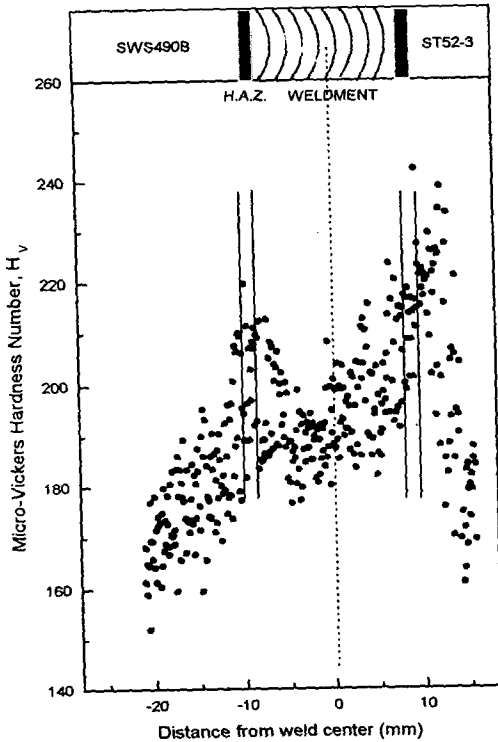


Fig. 3 Micro-vickers hardness distribution of A-type specimen

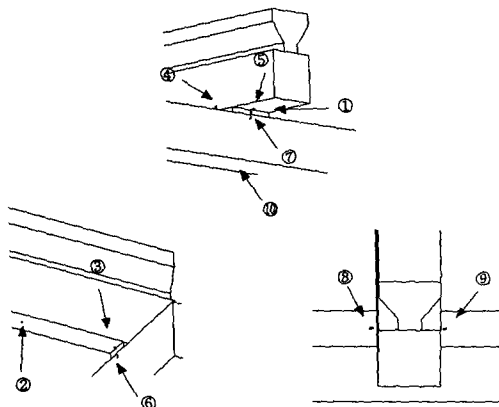


Fig. 4. Positions of strain gages attached to real structure

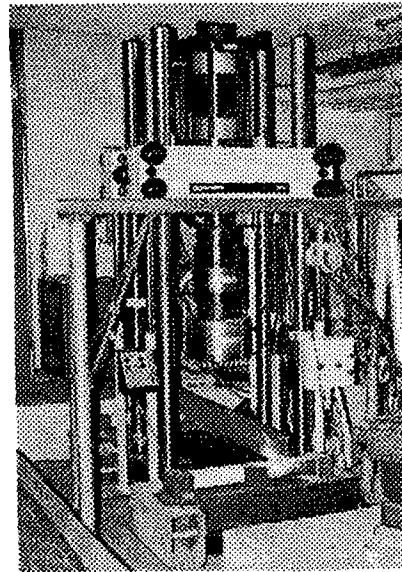


Fig. 5 Fatigue test of real structure/(100ton U. T. M)

Table 3. FEM modeling Processor

Processor	I-DEAS/ANSYS
Assumption	Linear elastic
Element	Structural 3D Solid
	Rigid (weldment)
Number of element	wedge (92) brick (14352)
Number of node	18248
Thermal & Residual stress	not considered

Table 4. Results of FEM analysis

strain gage 부착위치	#2($\mu\epsilon$)	#8($\mu\epsilon$)	#9($\mu\epsilon$)	#10($\mu\epsilon$)	최대치짐(mm)
실험	178.2	-100.9	-116.2	68.5	5.1
해석(1.5m)	136.7	-101.0	-106.5	66.9	2.1
해석(2m)	170.1	-104.3	-112.8	69.8	3.7

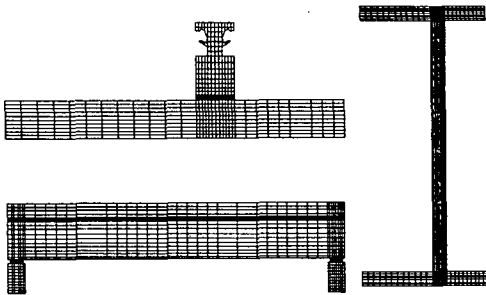


Fig. 6 Analyzed model of expansion joint

기서 12.5ton은 도로교 표준 시방서¹⁶⁾에 의거 DB-24의 후륜하중예 충격계수를 적용한 것이다.

FEM 해석은 지지보의 간격이 현행 1.5m인 모델과 2m로 확장한 모델로 수행하였다. 해석결과(Table 4) 처짐량은 실험과 해석이 큰 차이가 있었으나, 이것은 실험에서는 탄성 받침이 많은 양의 에너지를 흡수한 반면, 유한요소해석에서는 탄성 받침을 고려하지 않았기 때문이다. 실제로 관심대상이 되는 지지보와 가로보에서 용접부의 변형률 분포는 90%이상 접근하였다. 지지보 간격이 2m인 모델로 해석한 결과 최대 처짐은 1.5m모델과 비교하여 80%정도 증가하였으나 용접부 주변의 변형률은 미미한 증가 경향을 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 피로노치계수

피로강도는 구조물 내에 포함되어 있는 노치의 응력집중계수에 반비례하는 경향이 있으며 이것에 대한 관계를 아래와 같은 피로노치계수로 나타내고 있다¹⁷⁾.

$$K_f = \frac{\text{노치가 있는 부재의 피로강도}}{\text{노치가 없는 부재의 피로강도}} \quad (1)$$

한편, 노치효과를 다루는 유용한 개념으로 이용

되는 노치민감도(η)는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (2)$$

여기서, η 의 값은 노치반경과 재료의 영향을 받으며, 노치민감도는 재료의 노치반경이 증가할수록, 그리고 주어진 재료의 인장강도가 클수록 증가하는 경향을 보인다. η 의 값은 0부터 1까지의 범위를 가지며, 노치효과가 최대일 때는 $K_f = K_t$ 일 때이고, 이 때 노치민감도 $\eta=1$ 의 값을 갖는다. $\eta=0$ 즉, $K_f=1$ 일 때 노치에 대한 영향은 없다.

노치민감도와 피로노치계수는 노치반경에 의해 결정되는 실험적 상수로 Peterson¹⁸⁾은 다음과 같이 표현하였다.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\rho}} \quad (3)$$

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{\alpha}{\rho}} \quad (4)$$

여기서, α (Peterson상수)는 길이의 차원을 가진 재료 상수이고 ρ 는 노치반경이다.

Neuber¹⁹⁾는 실험을 통하여 노치민감도와 그에 따른 피로노치계수를 다음과 같이 표현하였다.

$$\eta = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}} \quad (5)$$

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}} \quad (6)$$

여기서, β 는 재료 상수이다.

한편 Hu등²⁰⁾은 재료의 노치민감도를 구별하고 이에 따라 피로노치계수와 응력집중계수의 관계를 규명하여 다음과 같이 분류하였다.

• 노치에 둔감(low sensitivity)한 경우 및 그에 따른 특성

(1) 재료 자체가 노치에 둔감한 것으로서, $K_f = K_t^{2/(4-\sqrt{(\sigma/\sigma_{ult})})}$ 의 식을 이용한다.

(2) 노치선단이 피로노치계수를 감소시키는 압축잔류응력을 갖는다.

(3) $K_f > K_t^*$ (K_t^* : 무딘 노치와 예리한 노치의 관계치) 때, 노치깊이가 일정하면 응력집중계수는 일정하다.

(4) 응력구배의 증가나 시험편의 크기(size)의 감소에 따라 피로노치계수가 감소한다.

• 노치에 민감(low sensitivity)한 경우 및 그에 따른 특성

(1) 재료 자체가 노치민감도가 높은 경우로서, $K_f = K_t^{1/(2-\sqrt{(\sigma/\sigma_{ult})})}$ 의 식을 이용한다.

(2) 노치선단에 인장잔류응력을 가지고 있어 피로노치계수를 증가시킨다.

(3) 치수효과에 의해 피로노치계수가 증가한다.

4.2 S-N 선도와 수명 평가

차량이 교량을 주행하면서 발생하는 반복 하중에 의한 신축이음장치의 피로강도를 평가하기 위하여 먼저 평활재 시험편에 대한 S-N선도를 얻었으며 예측수명과 실험 수명을 비교하였다. Fig. 7에서 평활재 시험편의 예측수명과 실험수명과의 관계를 나타내었다. 가로축은 실험수명을, 세로축은

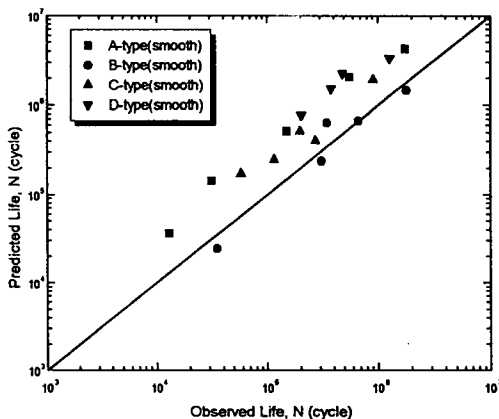


Fig. 7 Relationship between predicted and observed lives of smooth specimens

예측수명을 나타내고 있으며, 비교적 B-Type의 시험편이 예측선도에 근접하고 A, C, D-Type 시험편은 B-Type 시험편에 비해 짧은 수명이 나타남을 볼 수 있다. 그 원인은 B-type에 비해 A, C, D-Type 시험편은 연신률이 작아 피로 수명이 감소된 것으로 판단된다. 한편 노치 시험편에 대해서도 실험결과를 Shigley²¹⁾와 Juvinal²²⁾의 예측을 통한 피로강도와 비교하였다. Fig. 8은 B-Type 노치 시험편에 대한 Shigley와 Juvinal의 S-N선도와 실험값과의 비교를 나타낸 것으로 Juvinal에 의한 예측보다 Shigley에 의한 예측선도가 더 근접하게 나타남을 보여준다. 이것은 Juvinal의 경우 일반적 금속에 대한 S-N선도를 예측하였던 반면, Shigley는 철강재에 대해서 예측하였기 때문이다. 좀 더 정확한 예측을 위해 B-Type 노치 시험편의 경우 노치깊이(a)와 곡률 반경(ρ)을 0.5로 동일하게 가공하여, 응력집중계수를 3으로 일정하게 하였다. 이 때의 노치 시험편에 대한 Peterson¹⁸⁾, Neuber¹⁹⁾, Hu²⁰⁾이 제안한 식을 이용한 피로노치계수는 Table 5와 같다.

B-Type노치 시험편으로 구한 S-N선도 데이터를 이용하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9는 여러 학자

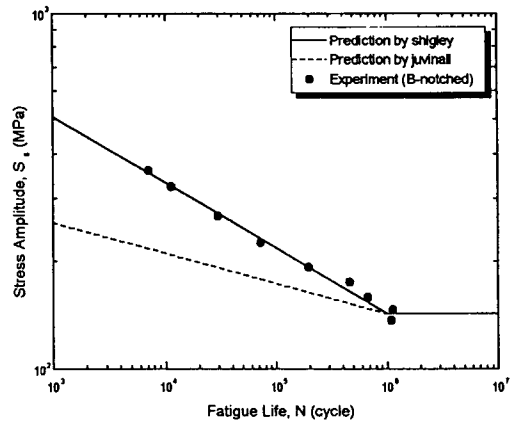


Fig. 8 Comparison of experimental data and S-N curves for notched specimens according to procedures suggested by Shigley, Juvinal

Table 5. Fatigue notch factor for B-type notch specimens ($K_f=3$)

fatigue notch factor	Peterson	Neuber	Hu	
			low sensitivity	high sensitivity
K_f	2.318	2.245	1.893	2.482

에 따라 약간의 차이를 보이고 있는 피로노치계수를 각각 구하여 Shigley의 S-N선도에서 Peterson, Neuber, Hu등이 제안한 식을 사용하여 구한 피로노치계수를 이용하여 S-N선도의 변화와 실험값을 비교한 것으로 Hu등이 제안한 노치에 둔감한 경우에서 예측선도가 실험값과 가장 잘 일치하며 그 외 Peterson, Neuber 및 Hu등의 민감한 경우는 응력진폭이 감소함에 따라 예상수명보다 실험수명이 더 증가함을 보여준다. 또한, Fig. 10은 Peterson,

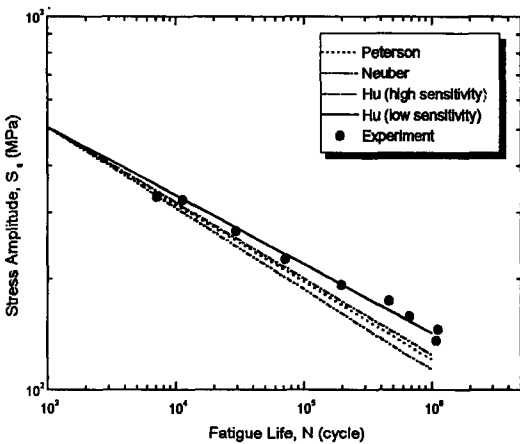


Fig. 9 Comparison of experimental results and alternated S-N curves according to K_f predicted by Peterson, Nueber and Hu. The S-N curves above follow Shigley's method

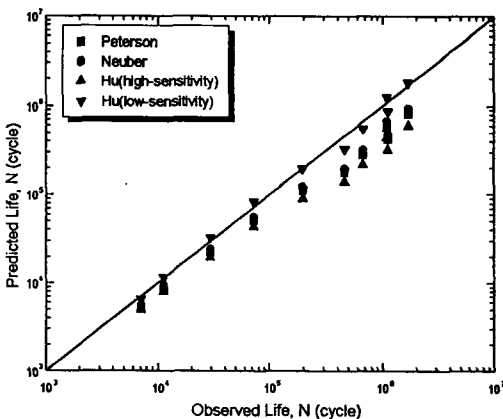


Fig. 10 Comparison of observed and predicted lives according to K_f proposed by Peterson, Neuber and Hu

Neuber, Hu등이 제안한 각각의 피로노치계수의 변화에 따른 예측수명과 실험수명을 비교한 것으로 Hu등의 둔감한 경우가 가장 실험결과와 일치함을 보여준다.

Hu등은 $R=1$ 인 경우, $D \geq 10mm$ 일 때 $\sigma_y/\sigma_{ult} > 0.9$ 이거나 $\sigma_o/\sigma_{ult} > 0.3$ 인 재료의 경우 민감한 경우로 보고, 그 외의 경우 둔감한 경우로 정의하였고, 또한 $D < 10mm$ 인 경우에는 $\sigma_y/\sigma_{ult} > 0.9$ 이거나 $\sigma_o/\sigma_{ult} > 0.45$ 인 재료를 민감한 경우로 정의하였고 그 외의 재료는 둔감한 경우로 정의하였다. 본 실험에서 쓰인 A, B, C, D-Type시편의 σ_y/σ_{ult} 을 계산해보면 A-Type은 0.65, B-Type은 0.63, C-Type은 0.69, D-Type은 0.62로서 모두 둔감한 경우에 속하므로, $K_f = K_t^{2/(4-\sqrt{\sigma_o/\sigma_y})}$ 의 식을 사용하였다. Fig. 11은 노치가 있는 A, B, C, D-Type 시편편의 실험수명과 예측수명을 종합하여 비교한 것으로 거의 일치하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 사실로부터 재료의 인장강도와 피로노치계수는 노치가 있는 재료의 피로수명 예측에 중요한 인자가 됨을 알 수 있으며, 노치민감도에 따라 재료의 피로노치계수를 고려하는 것이 구조물의 피로수명을 평가하는데 중요한 관건으로 판단된다.

Fig. 12는 응력집중계수와 피로노치계수의 관계를 나타낸 것으로, 실험과 가장 잘 일치하는 Hu등의 둔감한 경우에서 응력집중계수가 5이하일 경우 선형적 관계임을 알 수 있다. 또한, Fig. 13에서 교량 신축이음장치에 사용된 재료는 모두 노치에 둔

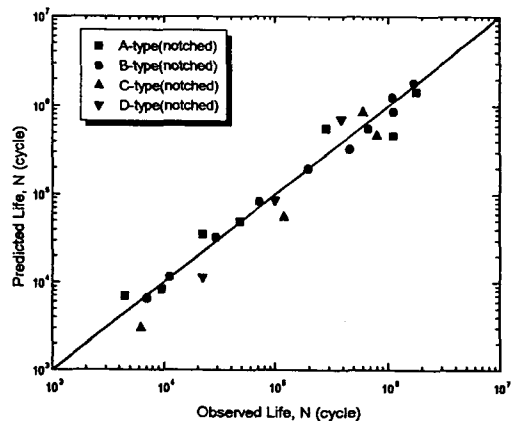


Fig. 11 Comparison of observed and predicted lives on notched specimens

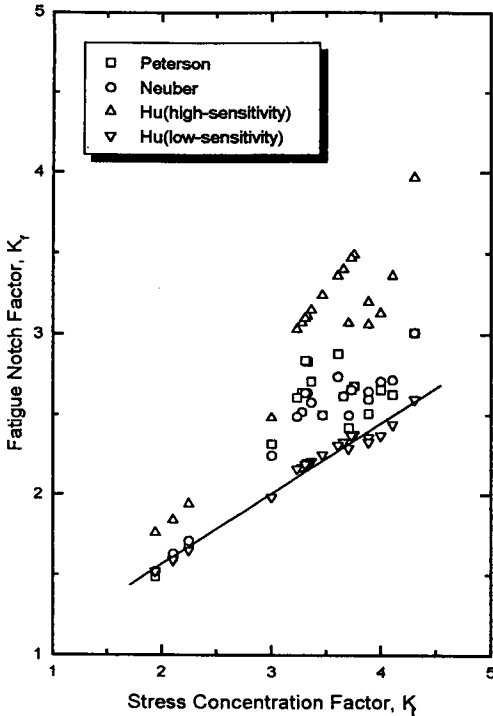


Fig. 12 Relationship between stress concentration factor (K_t) and fatigue notch factor (K_f)

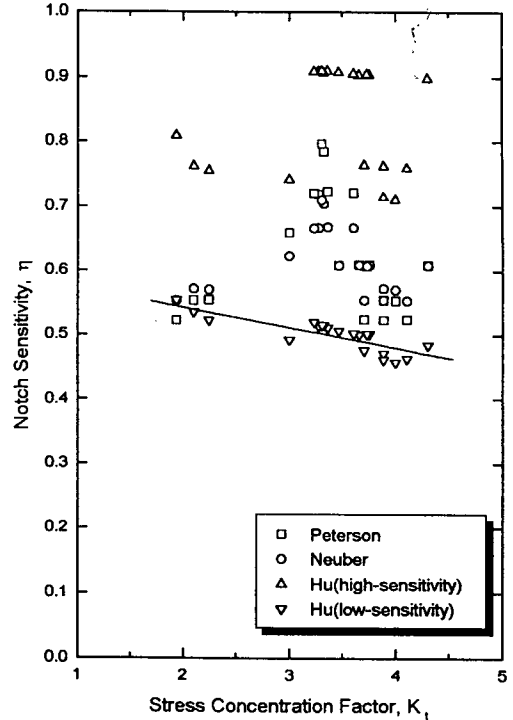


Fig. 13 Relationship between stress concentration factor (K_t) and notch sensitivity (η)

감한 재료로 노치민감도가 대략 0.5 정도의 값을 갖는 것으로 나타났다. 그러므로 용접 구조물의 피로수명 예측에 있어서 노치곡률 반경과 노치길이에 따라 피로노치계수가 변하게 되므로 용접 구조물 제작에 있어서 이러한 결함에 의한 응력집중을 막기 위해서는 용접부 표면을 다듬질 가공함으로써 피로강도를 향상시킬 수 있다.

4.3 실 구조물 피로수명 예측

회전 굽힘 피로실험결과 교량 신축이음장치에 사용된 재료 및 용접부의 노치민감도가 대략 0.5의 값을 갖으며, 용접부의 형상으로부터 구한 응력집중계수가 5이하인 경우의 재료의 피로한도는 약 108MPa 이상이였다. 한편 이 피로한도는 직경 10mm 정도의 시험편에 대한 것이므로 이 결과를 치수가 큰 실 구조물에 적용하는 것은 피로한도를 과대평가하는 것이 된다. 따라서 치수효과를 고려하여 실 구조물에 대한 응력값은 회전 굽힘 실험에서의 치수효과(ζ)에 대한 식을 이용하여, 다음과 같

이 예상하였다²³⁻²⁴⁾.

$$\zeta = \frac{\sigma_{e(d)}}{\sigma_{e(10)}}$$

$$= 1 - \frac{\sigma_{e(10)}}{\sigma_{ut}} (0.522e^{-5.33/d} - 0.306)$$

여기서, $\sigma_{e(d)}$ 는 직경 dmm의 피로한도이고, $\sigma_{e(10)}$ 는 직경 10mm의 피로한도이다.

관심대상이 되는 가로보와 지지보의 용접부에서 실 구조물의 환산 직경을 약 90mm로 계산한 결과 치수효과는 0.93이였다. 따라서 회전 굽힘 피로실험을 통해 얻은 피로한도 108MPa와 치수효과의 관계를 통해 실 구조물의 회전 굽힘 피로한도는 약 100MPa로 예측할 수 있다. 한편, FEM 해석결과 12.5ton의 정적하중 부과시에 관심대상인 용접부에서 최대 응력이 발생하였으나 용접부 주변의 전반적인 응력 분포는 90MPa이하로 평가되였다. 따라서 실 구조물의 작용응력은 90 MPa이하로 평가할 수 있으며, 실제로 10⁶회까지 실시한 실 구조물의

피로실험 결과 어떠한 균열도 발견하지 못하였다.

5. 결 론

교량 신축이음장치 용접부에 대한 FEM해석과 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유한요소 해석결과 관심대상이 되는 지지보와 가로보의 용접부에서 변형률 분포는 실험결과에 90%이상 접근하였다.
- 2) Peterson, Neuber, Hu등이 제안한 각각의 피로노치계수의 변화에 따른 예측 피로수명과 실험수명을 비교한 결과 Hu등이 제안한 피로노치계수중 둔감한 경우를 이용한 예측이 가장 잘 일치하였다.
- 3) 회전 굽힘 피로실험결과 교량 신축이음장치에 사용된 모든 재료 및 용접부의 노치민감도는 응력집중계수가 5이하에서 약0.5의 값을 갖는다.
- 4) FEM 해석결과 12.5ton의 하중 부과시에 관심대상인 용접부에서 최대 응력이 발생하였으나 용접부의 전반적인 응력 분포는 90MPa이하로 예측 피로한도(100MPa) 이하이며 실험결과 10°회까지 균열이 발생하지 않고 안전하였다.

후 기

본 연구는 주식회사 유니슨 산업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ASM International Failure Analysis Committee : Handbook of Case Histories in Failure Analysis, ASM International, (1994)
2. Parker, E. R. : Brittle Behavior of Engineering Structures, John Wiley & Sons Inc., New York. (1957).
3. Boyd, G. M. : Brittle Fracture in Steel Structures, Butterworths, (1970).
4. Liebowitz, H. : Engineering Fundamentals and Environmental Effects Fracture, Vol. III, Academic Press, (1971).
5. Carv, H. B. : Historical Development of Welding, Modern Welding Technology, (1979), p. 11
6. Terasaki, T., Karppi, R., Satoh, K. : Relationship between Critical Stress of HAZ Cracking and Residual Diffusible Hydrogen Content, Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 10, No. 1, April, (1979). pp. 53-57
7. Apblett, W. R., and Pellini, W. S. : Factors which Influence Weld Hot Cracking, Welding Research Supply, (1954). p. 83
8. Nippes, E. F. : The Weld Heat Affected Zone, Welding Journal, Welding Research Supply, January, (1959). pp. 216-226
9. 이용복, 조남익, 박강은 : SS400 용접부의 표면 피로균열거동에 관한 연구, 대한용접학회지, 제14권, 제2호, (1996). pp. 90-95
10. 이용복, 정진성, 조남익 : SS330 용접제에서 재분포 인장잔류응력 및 균열 단함을 고려한 피로거동에 관한 연구, 대한기계학회논문집 (A), 제20권, 제7호, (1996). pp. 2234-2245
11. 대한토목학회 : 성수대교 정밀안전진단 - 최종보고서, (1995)
12. 한국강구조학회 : 세로보 증설방안 및 교체대비 최적접합구조 제시 용역 - 연구결과 보고서, (1996)
13. 서울지방검찰청 : 성수대교 붕괴사건 원인규명 감정단 활동백서, (1995)
14. 한국도로공사 : 신축이음장치에 관한 연구, (1993)
15. AASHTO Standard Specification for Highway Bridges, AASHTO, 13th Editions, (1980)
16. 건설부 : 도로교 표준 시방서, (1992)
17. Dowling, N. E. : Mechanical Behavior of Materials, Prentice Hall Inc., (1993)
18. Peterson, R. E. : Stress Concentration Design Factors, Wiley, New York, (1953)
19. Neuber, H. : Theoretical Determination of Fatigue Strength at Stress Concentration, Report AFML-TR-68-20 Air Force Materials Lab., Wright-Patterson Air Force Base Dayton, Ohio, (1968)
20. Hu Zhi-Zhong, and Cao Shu-Zhen : Relationship between fatigue notch factor and

- strength, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 48, No 1, (1994) pp. 127-136
21. Shigley, J. E. and Mischke, C. R. : *Mechanical Engineering Design*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, (1989)
22. Juvinall, R. C. : *Stress, Strain and Strength*, McGraw-Hill, New York, (1967)
23. Forrest, P. G. : *Fatigue of Metals*, Pergamon Press, Oxford, UK, and Addison-Wesley, Reading, Ma., (1962)
24. Heywood, R. B. : *Designing against Fatigue of Metals*, Reinhold, New York, (1962)