

레일형 교량신축이음장치 용접부의 피로강도 평가에 관한 연구

이용복(홍익대), 정진성·정재우*(홍익대 대학원), 박상흠(천안공전)

A Study on the Fatigue Strength Evaluation in Rail-type Expansion Joint Weldment of Bridge

Y. B. Lee(Hong-Ik Univ.), C. S. Chung · J. W. Chung*(Graduate school, Hong-Ik Univ.)
and S. H. Park(Chun-An tech. Col.)

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. Fatigue test of real structure was performed up to 10^6 cycles to be compared with predicted endurance limit.

1. 서론

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

의 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 구성된다¹⁻³⁾.

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 및 실 구조물 피로실험을 통한 신축이음 구조의 피로 안전성을 확보하기 위하여 단계적인 실험 및 해석을 수행하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

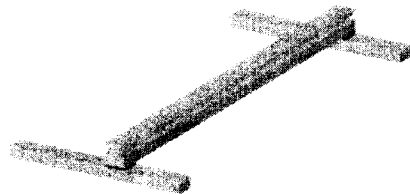


Fig. 1 Shape of expansion joint

인장실험 및 피로실험의 재료는 현재 신축이음장치³⁻⁴⁾에 사용되는 RST 52-3 및 SWS 490B를 사용하여 모두 5가지 종류의 시험편을 제작하였으며 제작과정을 Fig. 1에 나타내었다. 먼저 회전 굽힘 피로 실험을 위한 시험편은 SWS 490B와 RST 52-3 재료를 현장 용접조건(Fig. 2)과 동일하게 용접한 후에

Fig. 2와 같이 절단하고 KS B 0801에 의거하여 환봉으로 제작한 SWS 490B와 RST 52-3의 용접시험편을 A-type으로 정하였으며, 이와 동일한 형상과 치수로 각각 SWS 490B와 RST 52-3를 사용하여 제작하고 재료에 따라 각각 B-type, C-type 및 D-type으로 정하였다. 강재의 인장시험에 사용한 시험편은 KS B 0801에 의거하여 제작하였다. 또한 실험 대상 용착 금속부의 기본 물성치 획득 및 피로실험을 위하여 용착금속부를 KS B 0801에 의거 판형상으로 제작하였다. 피로균열진전실험은 이 시험편에 wire 방전기로 노치를 가공한 SEN 시험편으로 실험하였다. 실험을 통한 시험편의 재료 물성치를 Table 1, 재료의 화학적 성분은 Table 2에 각각 나타내었다.

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_t (MPa)	357.1	354.0	380.6	361.0	588.4
σ_{th} (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	-

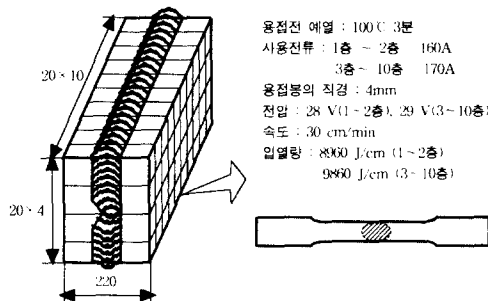


Fig. 2 Manufacturing process of A-type specimen

2.2 실험장치 및 방법

인장시험은 Instron사에서 제작한 25ton 용량의 만능 재료 시험기(dynamic material testing machine)를

사용하여 10mm/min의 속도로 하중을 가하였다. 피로 강도 평가는 5ton, 25ton 및 100ton 용량의 만능 재료 시험기와 회전 굽힘 피로시험기(Ono-type rotating bending fatigue testing machine)를 사용하였다. 용착금속부의 피로균열진전실험은 반복(인장)하중으로, 응력비의 영향과 개구비를 고려하여 피로균열진전속도를 예측하고자 하였다. 응력비의 영향은 두 경우, 즉 최대하중을 일정하게 한 경우와 하중폭을 일정하게 한 경우로 구분하였다.

실 구조물 정적 재하실험과 피로실험은 100ton 용량의 시험기를 사용하였다. 정적실험은 하중을 0.5ton 씩 증가시켜 최대 15ton까지 적용하였으며 피로실험 전에 관심대상이 되는 용접부 주변을 세척액으로 청결히 닦고, 침투 탐상을 실시하여 초기 결함이 없음을 확인하였다. 실 구조물 피로실험에서는 시험체의 구조상 별도의 그립(Grip)장치를 제작하였다. 실험 대상 구조물의 지지 조건은 실 교량에 시공되고 있는 조건과 동일하게 하였고, 피로하중은 양단이 지지보로 지지된 가로보의 정 중앙에서 작용하도록 하였다. 피로실험시 작용 최대 하중을 10ton, 최소 하중을 2ton으로 하여 응력비(R)가 0.2로, 정현파(sine wave)형이 일정하게 유지되도록 하였다.

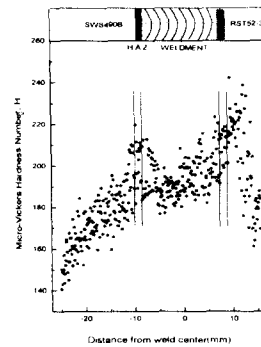


Fig. 3 Micro-vickers hardness distribution of A-type specimen

3. 기초이론

피로강도는 구조물 내에 포함되어 있는 노치의 응력집중계수에 반비례하는 경향이 있으며 이것에 대한 관계를 아래와 같은 피로노치계수로 나타내고 있다⁵⁾.

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

한편, 노치효과를 다루는 유용한 개념으로 이용

되는 노치민감도(η)는 다음과 같이 정의된다.

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

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.

Peterson⁹⁾과 Neuber⁷⁾는 노치반경과 실험을 통한 재료상수를 통해 노치민감도와 피로노치계수를 구하였다. 한편 Hu등⁸⁾은 재료의 노치민감도를 구별하고 이에 따라 피로노치계수와 응력집중계수의 관계를 규명하여 다음과 같이 분류하였다.

- 노치에 둔감(low sensitivity)한 경우
 - (1) 재료 자체가 노치에 둔감한 것으로서, $K_f = K_t^{2/(1 - \sqrt{(\sigma_t/\sigma_{un})})}$ 의 식을 이용한다.
 - (2) 노치선단이 피로노치계수를 감소시키는 압축잔류응력을 갖는다.
 - (3) $K_f > K_f^*$ (K_f^* : 무딘 노치와 예리한 노치의 경계치)때, 노치길이가 일정하면 응력집중계수는 일정하다.
 - (4) 응력구배의 증가나 시험편의 크기(size)의 감소에 따라 피로노치계수가 감소한다.
- 노치에 민감(high sensitivity)한 경우
 - (1) 재료 자체가 노치민감도가 높은 경우로서, $K_f = K_t^{1/(2 - \sqrt{(\sigma_t/\sigma_{un})})}$ 의 식을 이용한다.
 - (2) 노치선단에 인장잔류응력을 가지고 있어 피로노치계수를 증가시킨다.
 - (3) 치수효과에 의해 피로노치계수가 증가한다.

피로균열진전거동은 매우 복잡하고 다양하나, 피로균열진전속도는 대부분 다음과 같은 인자의 함으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = f(\sigma, a, C)$$

여기서, σ 는 응력, a 는 균열길이, C 는 재료상수이다.

Paris⁹⁾는 피로균열진전속도(da/dN)를 응력확대

계수범위(ΔK)의 함수로 표현되는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

여기서, m 은 실험에 의한 재료상수이다.

또한, Forman¹⁰⁾은 피로균열진전속도는 응력확대계수범위와 작용응력의 응력비의 함수로 표현되는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C'(\Delta K)^{m'}}{(1-R)K_{cf} - \Delta K} \quad (4)$$

Forman식은 Paris의 식을 균열선단에서 응력확대계수의 최대값이 재료의 파괴인성치에 도달하면 균열성장속도는 무한히 커진다는 것과 응력비의 영향을 고려하여 수정한 식이다.

Elber¹¹⁾는 균열닫힘(crack closure)개념을 도입하여 피로균열성장속도는 유효응력확대계수범위의 함수로 되는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\frac{da}{dN} = C''(\Delta K_{eff})^{m''} = C''(U \cdot \Delta K)^{m''} \quad (5)$$

여기서, U 는 개구비이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 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. 4에서 평활재 시험편의 예측수명과 실험수명과의 관계를 나타내었다. 가로축은 실험수명을, 세로축은 예측수명을 나타내며, 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.

Table 3 Fatigue notch factor for B-type notch specimen ($K_t=3$)

Fatigue notch factor	Peterson	Neuber	Hu	
			low sensitivity	high sensitivity
K_t	2.318	2.245	1.893	2.482

한편, 노치 시험편에 대해서도 실험결과를 Shigley¹²⁾와 Juvinall¹³⁾의 예측을 통한 피로강도와 비

교하였다.

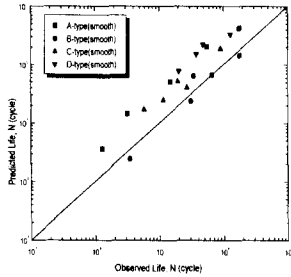


Fig. 4 Comparison of observed and predicted lives on smooth specimens

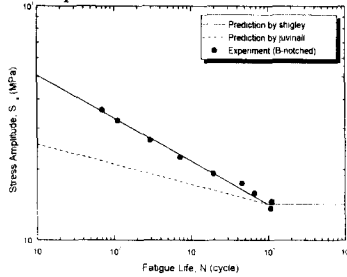


Fig. 5 Comparison of experimental data and S-N curves for notched specimens according to procedures suggested by Shigley, Juvinall

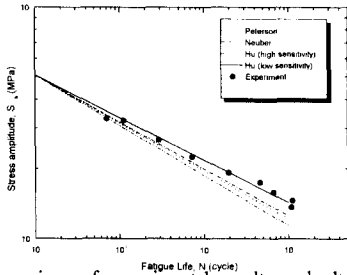


Fig. 6 Comparison of experimental results and alternated S-N curves according to K_f predicted by Peterson, Neuber and Hu. The S-N curves above follow Shigley's method

Fig. 5는 B-Type 노치 시험편에 대한 Shigley와 Juvinall의 S-N선도와 실험값과의 비교를 나타낸 것으로 Juvinall에 의한 예측보다 Shigley에 의한 예측선도가 더 근접하게 나타남을 보여준다. 이것은 Juvinall의 경우 일반적 급속에 대한 S-N선도를 예측하였던 반면, Shigley는 철강재에 대해서 예측하였기 때문이다. 좀 더 정확한 예측을 위해 B-Type 노치 시험편의 경우 노치길이(a)와 곡률 반경(ρ)을 0.5로 동일하게 가공하여, 응력집중계수를 3으로 일정하게 하였다. 이 때의 노치 시험편에 대한 Peterson, Neuber 및 Hu등이 제안한 식을 이용한 피로노치계수를 Table 3과 같다.

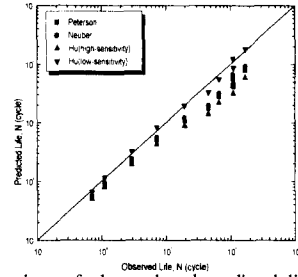


Fig. 7 Comparison of observed and predicted lives according to K_f proposed by Peterson, Neuber and Hu

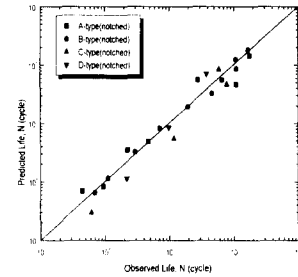


Fig. 8 Comparison of observed and predicted lives on notched specimens

B-Type노치 시험편으로 구한 S-N선도 데이터를 이용하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6은 여러 학자에 따라 약간의 차이를 보이고 있는 피로노치계수를 각각 구하여 Shigley의 S-N선도에서 Peterson, Neuber 및 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 응력집폭이 감소함에 따라 예상수명보다 실험수명이 더 증가함을 보여준다. 또한, Fig. 7은 Peterson, Neuber, Hu등이 제안한 각각의 피로노치계수의 변화에 따른 예측수명과 실험수명을 비교한 것으로 Hu등의 둔감한 경우가 가장 실험결과와 일치함을 보여준다.

Hu등은 $R=-1$ 인 경우, $D \geq 10\text{mm}$ 일 때 $\sigma_o/\sigma_{ult} > 0.9$ 이거나 $\sigma_o/\sigma_{ult} > 0.3$ 인 재료의 경우 민감한 경우로 보고, 그 외의 경우 둔감한 경우로 정의하였고, 또한 $D < 10\text{mm}$ 인 경우에는 $\sigma_o/\sigma_{ult} > 0.9$ 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-Type시험편의 σ_y/σ_{ult} 을 계산해보면 A-Type은 0.65, B-Type은 0.63, C-Type은 0.69,

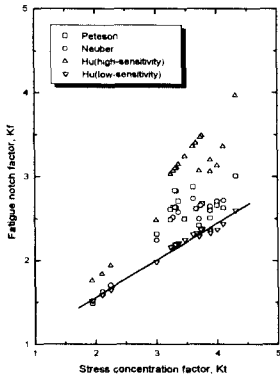


Fig. 9 Relationship between stress concentration factor(K_t) and fatigue notch factor(K_f)

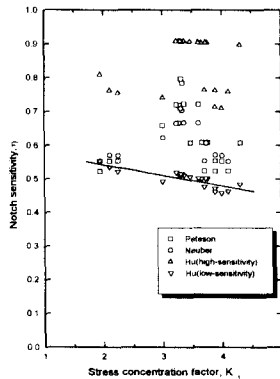


Fig. 10 Relationship between stress concentration factor(K_t) and notch sensitivity(η)

D-Type은 0.62로서 모두 둔감한 경우에 속하므로, $K_f = K_t^{2/(4 - \sqrt{(\sigma_s/\sigma_{ult})})}$ 의 식을 사용하였다. Fig. 8은 노치가 있는 A, B, C, D-Type 시험편의 실험수명과 예측수명을 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. 9는 응력집중계수와 피로노치계수의 관계를 나타낸 것으로, 실험과 가장 잘 일치하는 Hu등의 둔감한 경우에서 응력집중계수가 5이하일 경우 선형적 관계임을 알 수 있다. 또한, Fig. 10에서 교량 신축이음장치에 사용된 재료는 모두 노치에 둔감한 재료로 노치민감도가 대략 0.5 정도의 값을 갖는 것으로 나타났다.

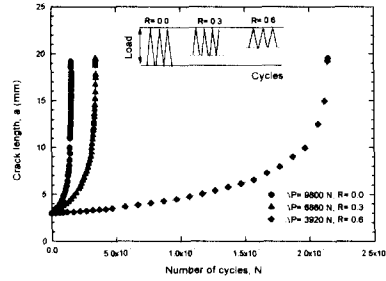


Fig. 11 Crack length vs. number of cycles in constant maximum load condition

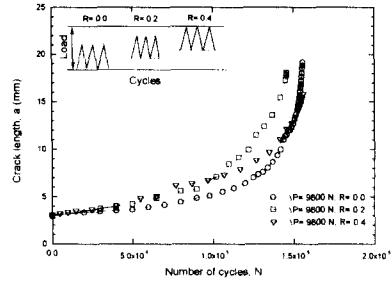


Fig. 12 Crack length vs. number of cycles in constant load range condition

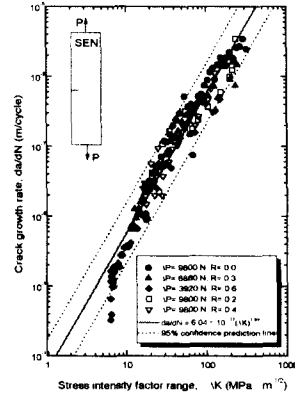


Fig. 13 Crack growth rate vs. stress intensity factor range for expansion joint weldment

4.2 용착금속부의 피로균열진전속도

신축이음장치 용착금속부의 피로균열진전속도를 평가하기 위하여 최대하중을 일정하게 하고 응력비를 변화시켜 R=0, 0.3, 0.6, 하중폭을 일정하게 하고 응력비를 변화시켜 R=0, 0.2, 0.4로 실험을 수행한 결과 Fig. 11, 12에서와 같이 용착금속부의 불균질적인 재료성질로 인하여 과대하중 및 압축잔류응력등의 영향에서 나타나는 균열지연등의 특이한 경향을 나타내며 일반적인 응력비의 영향을 보여주

지 못하였다.

Fig. 13에서와 같이 da/dN - ΔK 선도에서도 불균질적인 재료의 특성이 나타났다. 즉 응력비가 높을수록 일정 ΔK 에 대하여 높은 da/dN 을 나타내어야 하나 그렇지 못하였다. 그러므로 용착금속부의 피로강도평가는 da/dN - ΔK 선도에서 가장 안전측에 해당하는 선도를 택하여야 할 것이다.

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 이상이었다. 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 같이 예측하였다.

$$\zeta = \frac{\sigma_{e(d)}}{\sigma_{e(10)}} = 1 - \frac{\sigma_{e(10)}}{\sigma_{ult}} (0.522 e^{-5.33/d} - 0.306) \quad (6)$$

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

관심대상이 되는 가로보와 지지보의 용접부에서 실 구조물의 환산 직경을 약 90mm로 계산한 결과 치수효과는 0.93이었다. 따라서 회전 굽힘 피로 실험을 통해 얻은 피로한도 108MPa와 치수효과의 관계를 통해 실 구조물의 회전 굽힘 피로한도는 약 100MPa로 예측할 수 있다. 실제로 10^6 회까지 실시한 실구조물 피로실험 결과 어떠한 균열도 발견하지 못하였다.

5. 결 론

- 1) Peterson, Neuber, Hu등이 제안한 각각의 피로노치계수의 변화에 따른 예측피로수명과 실험수명을 비교한 결과 Hu등이 제안한 피로노치계수중 눈감한 경우를 이용한 예측이 가장 잘 일치하였다.
- 2) 회전 굽힘 피로실험결과 교량 신축이음장치에 사용된 모든 재료 및 용접부의 노치민감도는 응력집중계수가 5이하에서 약 0.5의 값을 갖는다.

- 3) 용착금속부의 피로균열진전 실험결과 재료의 불균질성으로 인하여 응력비의 영향이 나타나지 않았다. 그러므로 용착금속부의 피로균열진전수명에 측은 일반적인 응력비의 영향을 고려한 이론식으로는 정확하지 못하다.
- 4) 치수효과를 고려한 실구조물의 피로한도는 100MPa로 예측되었고 피로실험결과 10^6 회 까지 균열이 발생하지 않고 안전하였다.

참고문헌

1. 대한토목학회, "성수대교 정밀안전진단 - 최종보고서", 1995.
2. 한국도로공사, "신축이음장치에 관한 연구", 1993.
3. AASHTO Standard Specification for Highway Bridges, AASHTO, 13th Editions, 1988.
4. 건설부, "도로교 표준 시방서", 1992.
5. Dowling, N. E., "Mechanical Behavior of Materials", Prentice Hall Inc., 1993.
6. Peterson, R. E., "Stress Concentration Design Factors", Wiley, New York, 1953.
7. 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.
8. Hu Zhi-Zhong, and Cao Shu-Zhen, "Relationship between fatigue notch factor and strength", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 48, No 1, pp. 127~136, 1994.
9. Paris, P. and Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Law", J. of Basic Eng., Trans. of ASME, pp. 528~534, 1963.
10. Forman, R. G. and Kearney, V. E. and Engle, R. M. "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures", J. of Basic Eng., Trans. of ASME, Vol. 9, pp. 459, 1967.
11. Elber, Z. W. "The Significance of Fatigue Crack closure", ASME STP 486, pp. 230~242, 1971.
12. Shigley, J. E. and Mischke, C. R., "Mechanical Engineering Design", 5th ed., McGraw-Hill, New York, 1989.
13. Juvinall, R. C., "Stress, Strain and Strength", McGraw-Hill, New York, 1967.