

1989년도 가을

한국건설구조공학회 학술발표회 논문집

강교량의 실동피로하에서 잔존수명의 추정

Estimation of Remaining Service Life of Steel Highway Bridge under Actual Traffic Load

○ 용 환 선 * 정 경 섭 **
Yong Hwan Sun Jung Kyoung Sup

ABSTRACT

On this condition of steel bridge member having a crack, occasionally it is impossible to measure of stress history and to extract test specimen. Under this situation, tried to estimate remaining service life from statistical data on traffic and existing results of fatigue test without measuring of stress history and fatigue test.

The main results are as following (1) Stress history of simple beam estimated from Montecarlo simulation method with probabilistic model of traffic can be use to estimate remaining fatigue life instead of measuring of stress history. (2) In such a case measuring of remaining fatigue life at bridge member having a crack, influences of RMS model and RMC model on fatigue crack growth rate are not differ without difference of applied stress range. (3) Application of cut off method may be overestimate remaining fatigue life.

1. 서론

강교량에 존재하는 균열이 초기 균열의 범주를 넘어 성장해서 한계균열이 되면 돌발적인 파괴를 일으키므로 균열이 한계균열에 이르기 전에 균열을 정지시키고 보강을 통해 잔존수명을 연장해야 한다. 교량의 유지관리에 필요한 잔존수명은, 단면에 균열이 포함되어 있는 경우, 실동하중하에서 응력이력과 실동하중에 의한 응력이력하에서 균열성장율을 선형파괴역학에 적용하여 구해진다.

균열의 성장거동은 균열끝 응력장의 크기에 따라 변하며 응력장의 크기는 균열의 형상과 함께 응력이력에 따라 변하므로 교량의 활하중열로서 교통류의 특성은 균열의 성장을 지배하는 요소가 된다. 교통류는 통과차량의 중량, 차량의 배열, 차두시간간격이 불규칙하지만 통계적특성을 갖고 있어 교통류의 통계적해석으로 부터 응력이력의 추정이 가능하다.[1] 응력이력은 응력범위발생빈도로 표시할 수 있으며 확률분포한다.[2] 응력범위의 변동이 피로균열성장율에 미치는 영향은 응력비, 작용순서 빈도분포등에 의해 국부적으로 균열성장율을 가속시키거나 지연시키는 경우

가 있으나 거시적인 면에서는 평균균열성장율이 등가응력범위의 정진폭하에서 성장율과 큰 차이가 없어서 선형파괴역학에 유용성이 입증된 RMS (Root Mean Square) 등가응력이 균열성장율의 해석에 주로 사용되어 왔다.[2] 그러나 근년에 (1) 균열발생단계를 무시하고 (2) 고, 저 응력범위 하중블럭의 크기가 균열성장율의 영향을 주지 않을만치 작으며 (3) 모든 하중이 피로한계 이상이고 (4) S - N 관계의 기울기가 선형파괴역학의 Paris법칙에서 기울기가 같다는 조건에서 RMC (Root Mean Cube) 등가응력이 피로신뢰성 해석에 사용되고 있다.[3] 본 연구는 피로균열이 발생한 강교량에서 유지보수를 위하여 잔존수명의 해석이 필요할 때 시간, 경제적문제나 교통상황으로 인해 응력이력의 측정이 곤란하고 시험편의 채취가 불가능한 경우의 해결방법으로서 응력이력을 추정하고 이의 타당성을 검토함과 아울러 시뮬레이션한 응력이력에 의해서 균열성장율을 구할 경우 RMC 등가응력모델의 적용성을 RMS 등가응력모델과 비교검토했다.

2. 교량의 응력이력

2.1 교량의 응력범위발생빈도

본 연구의 대상교량은 경부도로상 서울에서 이

* 정희원 수원대학교 공과대학 토목과 부교수

** 정희원 충북대학교 공과대학 토목과 조교수

정 100km에 위치한 속창교 상행선이며 지간 14.36m의 단순I형교이다. 본 연구에 사용한 응력이력은 변형율계이지를 사용하여 측정하였으며 실측한 응력이력으로 부터 구한 무차원응력범위발생빈도(σ_r/σ_{max}) 히스토그램이 그림 1 과 같다.

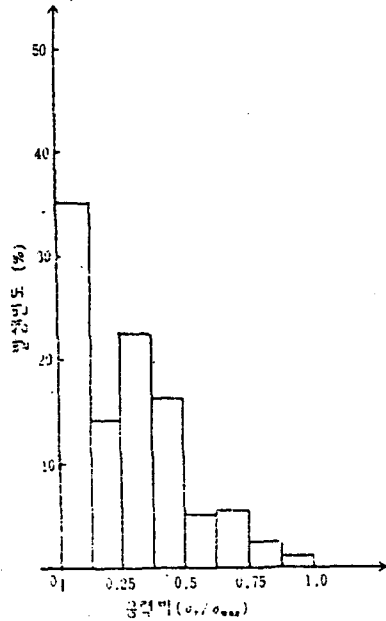


그림 1. 속창교의 무차원응력범위 발생빈도

2.2 응력감소계수 (α)

계산응력과 실응력의 비 (실응력/계산응력) 는 현재까지 캔틸레버교 0.7, 단순교 0.5, 아치교 0.75 이하로 알려져 있다. [5] 본 연구의 대상교량인 속창교의 응력감소계수는 평균 0.30, 표준편차 0.09 이다.

3. 교통류의 통계적특성

3.1. 통과 차종별구성율

교량에 진입하는 차량의 차종구성율은 하중의 진입순서를 결정하는 요소가 된다. 차량의 종류를 소형차(Car), 소형트럭(ST), 버스(Bus), 8톤트럭(LT), 11톤트럭(LLT), 트레일러(TT)로 구분하고, 변형율이력으로 부터 분석한 실측구성율과 문헌14를 기준으로 하여 증가율은 고려한 자료구성율 및 시뮬레이션에서 구한 구성율이 그림2 와 같다.

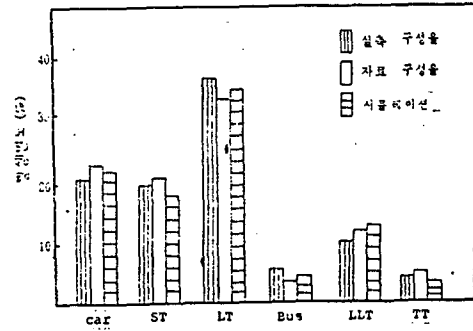


그림 2. 통과 차종별구성율

3.2. 차두시간간격

차두시간간격은 교량위에 재하되는 차량의 연행에 관계되는 것으로 교통류의 지체여부, 시간당 통과횟수, 상대속도분포등을 고려해야 하나 대상교량이 고속도로상에 위치한 관계로 시간당 횟수와 상대속도분포만을 고려하였다. 기존의 연구에서 Miki(6)는 차두시간간격을 자유도 $n=3$ 의 감마분포로, Fisher(7)는 트럭통행만을 대상으로 해서 포아송분포로 추정하였다. 그러나, 구조물에 균열이 존재하면 $\Delta K_{I,II}$ 이하의 낮은 응력범위에서도 발생횟수가 많으면 균열은 성장하므로 (1) 본 연구에서는 소형차 중형차의 통행량을 포함해서 차두시간간격확률밀도분포함수를 구하였고 식 1. 과 같은 분포로 모형화 할 수 있었다.

$$F_T(t) = \frac{1}{2\sqrt{2} \Gamma(\frac{n}{2})} t^{\frac{n}{2}-1} e^{-t/2} \quad (t \geq 0)$$

$$= 0 \quad (\text{elsewhere}) \quad (1)$$

여기서, $F_T(t)$: 차두시간간격

n : 분포함수의 parameter

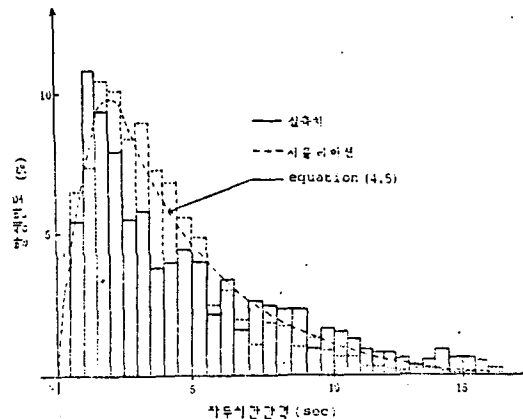


그림 3. 차두시간간격발생빈도

그림 3 은 실측차두시간간격의 발생빈도히스토그램과 식 1 을 사용해서 시뮬레이션방법으로 구한 발생빈도히스토그램이다.

3.3. 차량중량

차량중량은 실교통류에서 정확한 통계적분포로부터 추정해야 하나 실측의 불가능으로 인해 차량의 종류에 따라 적재하중을 포함해서 표 1 과 같이 모델화하였다.

표1. 차량의 중량 (톤)

차종	Car	ST	LT	BUS	LLT	TT
중량	1.5	7.5	17.2	18.7	23.2	32.4

3.4. 응력이력의 시뮬레이션

차량의 통과에 따라 발생하는 피로는 특정위치에 관계없이 위험단면에 관계되는 것이나 본 연구에서는 시간중양부 플랜지 하부를 대상으로 해서 영향선에 의해 모멘트를 구하였다. 차종별구성을, 차두시간간격, 차량중량을 고려한 모멘트 시뮬레이션에서 모멘트발생시간간격 Δt 는 0.05 초, 차량의 속도는 100 km/hr 로 하였으며, 응력범위는 시뮬레이션된 모멘트로 부터 충격계수 (1.21), 횡분배, 응력감소계수를 고려하여 구하였다.

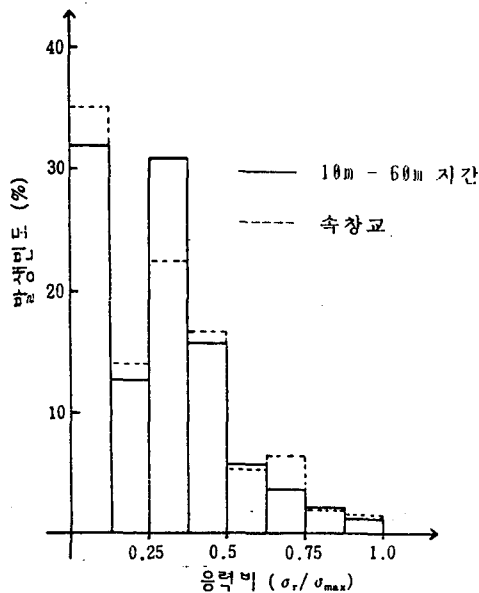


그림 4. 시뮬레이션방법으로구한 응력범위발생빈도

응력이력의 시뮬레이션 결과 무차원응력범위발생빈도가 그림 4 이며 실측응력범위발생빈도와 비교하면, 응력비의 값이 0.375 이하에서 차이가 있다. 이러한 현상은 대,중형차중에서 실교통류에 있어서 화물을 적재치 않은 차량이 포함되므로 인해서 발생된 결과로 생각한다.

고속도로교량에서 단순교의 대부분을 차지하는 15m - 60m 이내의 지간에서 응력범위 발생빈도를 지간별로 구한결과 응력범위발생빈도에 큰차이가 없었으며 지간의 구분없이 구한 단순교에 대한 응력범위발생빈도 히스토그램 및 확률밀도 함수는 그림 5, 식 2 와 같다.

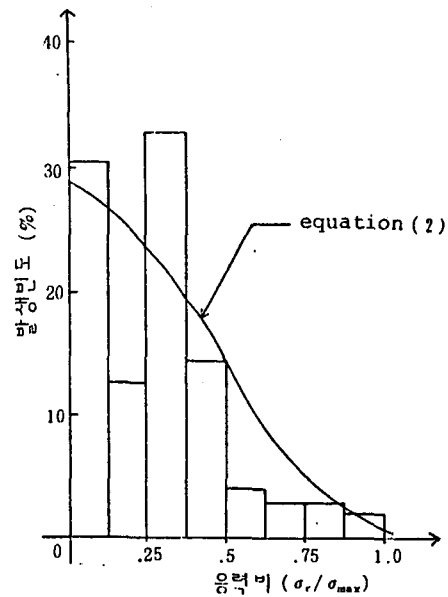


그림 5. 응력범위 발생빈도 히스토그램

$$F(x) = 0.827 x^4 - 1.118 x^3 \quad (0 \leq x \leq 1)$$

$$+ 0.131 + 0.256$$

$$= 0 \quad (\text{Elsewhere}) \quad (2)$$

여기서, X ; σ_r/σ_{max}

4. 피로시험

4.1. 시험편

본 연구에 사용한 강재는 SWS58 이며 시험편은 ASTM E 647-78T 규정에 의거 제작하였다. 시험편의 형상 및 치수는 그림 6 과 같다.

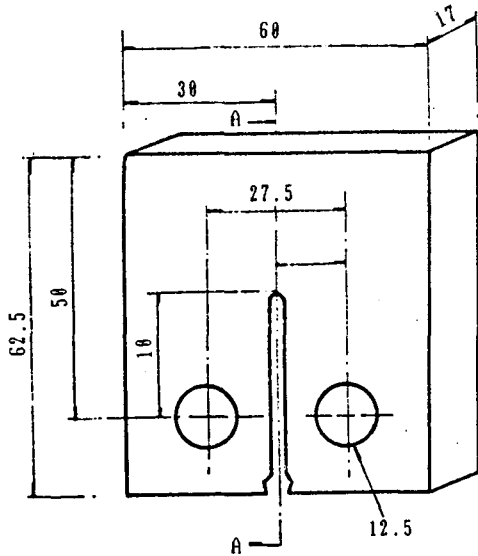


그림 6. 시험편의 형상 및 치수

4.2. 증가하중범위

그림 4의 시물이선방법에 의한 응력범위발생 빈도 히스토그램에서 최대응력범위의 0%, 10%, 20%, 30%를 Cut Off 한 응력이력에 대한 RMS 모델과 RMC 모델의 증가응력범위를 구하고 이로 부터 구한 증가하중범위는 표 2와 같다.

표 2. 증가하중범위

Loading Models	ΔP (kg)
RMS 0%	534.6 (534)
RMS 10%	609.5 (605)
RMS 20%	662.0 (660)
RMS 30%	721.5 (715)
RMC 0%	598.5 (605)
RMC 10%	658.5 (660)
RMC 20%	710.0 (715)
RMC 30%	757.0 (757)

* 괄호안은 작용하중 폭 (ΔP)

5. 피로균열성장율의 해석

표 2의 증가하중범위의 정진폭 피로시험에서 구한 응력강도계수 (ΔK)와 피로균열성장율 (da/dn)의 관계는 그림 7과 같고 $da/dn - \Delta K$ 관계로부터 회귀분석에 의해 구한 기울기 m 과 절편 c 는 표 3과 같다.

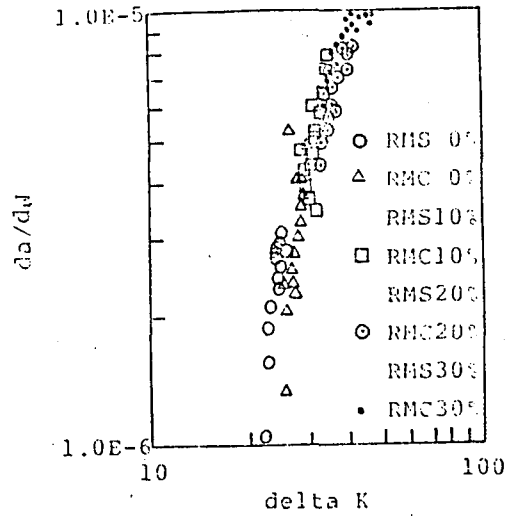


그림 7. 증가하중하에서 $da/dn - \Delta K$ 관계

표 3. 각종 하중범위에서 m 및 c

Loading Model	m	c
RMS 0%	6.6153	1.71 E-15
RMS 10%	4.8949	2.72 E-13
RMC 0%		
RMS 20%	3.8063	9.37 E-12
RMC 10%		
RMS 30%	2.5226	7.67 E-10
RMC 20%		
RMC 30%	2.9578	1.45 E-10

본 실험에서는 실험상의 제약으로 인해 100 회 피로틀 기준으로 하여 실험하였으며 100 만회 피로에서 5 mm 내지 10 mm 까지 균열이 진전하였다. 그림 7 및 표 3에서 RMS 10% 이하와 RMC 0% 이하의 하중범위에서는 ΔK 가 $30 \text{ kg} \sqrt{\text{m}}$ 이하이며 $da/dn - \Delta K$ 의 관계가 ΔK_{th} 부근의 균열성장거동과 유사하다. 그러나 RMS 20% 및 RMC 10% 이상의 하중범위에서는 $m = 3$ 에 접근하여 균열이 안정적 성장거동을 나타낸다.

RMC 모델이 $da/dn - \Delta K$ 관계중 2단계 구간에서의 기울기와 S-N 관계에서의 기울기가 같다는 가정에 근거하기 때문에 균열이 없는 단면에서 잔존수명을 추정하는 경우에는 그림 7에서 보여주는 Cut Off 비 20% 이상에서 $m = 3$ 를 적용하는 것이 적절하다. 그러나 실패통류에 의한 발생응력범위 히스토그램 그림 1과 차종별 구성을 그림 2를 참고하면 소형차, 중형차의 발생빈

도가 43% 가 되는 응력비는 최대응력의 약 22.5% 가 되고 표 3 에서 RMS 0%, RMC 0%, RMS 10% 에서 m 은 3 보다 훨씬 크다. 따라서 균열을 포함하고 있는 강교량의 부재단면에서 소형차와 중형차의 응력이력을 제외하거나 Cut Off 의 비를 RMS 20%, RMC 10% 이상으로 하면 잔존수명이 과다 추정될 우려가 있다.

그림 8 은 무차원 수명 N_i/N_f 에서 균열길이의 변화를 보여준다. N_i/N_f 의 비가 증가함에 따라 균열길이 (a) 는 일정하게 증가하며 균열길이의 증가율은 Cut Off 의 비에 관계없이 비슷하게 증가한다. 따라서 Cut Off 의 비는 균열성장율에 미시적으로나 거시적으로 큰 영향을 미치지 않은 것으로 생각된다.

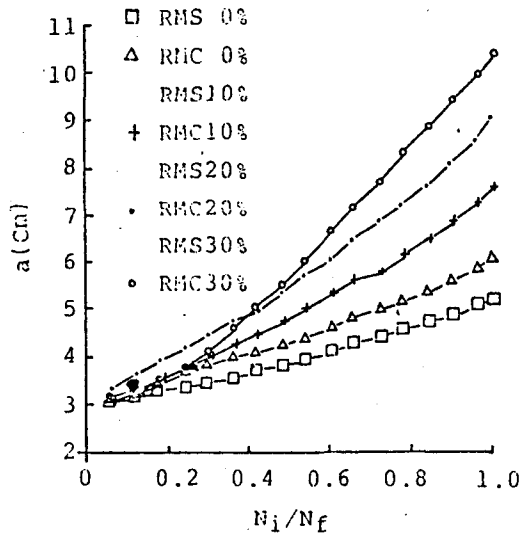


그림 8. 일정수명비에서의 균열길이의 변화

그림 9 는 RMS RMC 등가응력하에서 최종균열길이 a_f 에 대한 무차원 균열길이 (a_i/a_f) 와 균열성장율 (da/dn) 의 관계를 비교한 것이다. 이때, 최종균열길이 a_f 는 타격횟수 100 만회에서 최종균열길이이다. 그림 9 에서 균열성장율은 a_i/a_f 의 증가에 따라 커지고 동일한 a_i/a_f 에서 Cut Off 의 비가 커지면 균열성장율은 빠르다. 각각의 하중범위에서 초기 a_i/a_f 구간이나 Cut Off 의 비가 작은 경우 균열성장율은 편차가 크다. 그러나 거시적인 면에서 균열성장율은 RMC, RMS 에 관계없이 거의 일정한 비율로 a_i/a_f 의 변화에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다.

이상에서 실응력에 근접하는 하중을 작용시켜

피로실험을 하는 경우 거시적인 면에서 RMS 모델이나 RMC 모델은 작용하중의 차이에 의한 영향외에는 균열성장율에 큰 차이가 없으므로 선형과피역학에 적용하기 위한 일정응력 범위의 피로실험을 하는 경우 RMS 나 RMC 응력모델중 어느 것을 사용하여도 무방하다. 다만 균열을 포함하고 있는 단면에서 잔존수명을 추정하는 경우 소형차 중형차의 응력이력을 포함시키고 Cut Off 를 적용하지 않는 것이 잔존수명 추정에 있어서 정확성을 기할수 있다고 생각된다.

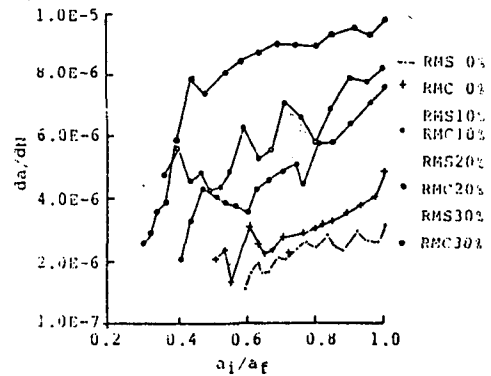


그림 9. a_i/a_f - da/dn 의 관계

표 4 는 RMS, RMC 등가하중범위 피로실험에서 측정피로수명과 계산피로수명을 비교한 것이다. 표 4 에서 N_{fc} 는 초기균열 a_i 에서 최종균열 a_f 까지의 계산피로수명이다.

표 4. 측정수명과 계산수명

Loading Model	Measured Fatigue Life (N)	Calculated Fatigue Life (N_{fc})
RMS 0%	1,000,000	1,008,554
RMS 10%	1,000,000	1,080,447
RMC 0%	1,000,000	1,039,323
RMS 20%	1,000,000	1,002,445
RMC 10%	1,000,000	1,046,424
RMS 30%	1,000,000	
RMC 20%	1,000,000	
RMC 30%	1,000,000	

실측피로수명과 계산피로수명을 비교하면, 차이는 전체하중 범위별로 0.2 - 0.8% 정도가 된다. 강교량의 실동하중하에서 응력이력을 실측

할 경우 발생할 수 있는 측정오차를 고려하면 10% 이하의 오차는 잔존수명 추정에 과도한 영향을 미치지 않는다고 생각된다. 따라서 균열을 갖고있는 강교량의 잔존수명을 추정하는 경우에 최대응력과 교통류의 통계량을 알 수 있으면 기존의연구결과에서 구한 강교량 소재의 m 과 c 를 사용해서 응력이력의 실측없이도 시뮬레이션방법으로 잔존수명을 추정 할 수 있다.

6. 결론

본연구는 시뮬레이션기법에 의하여 응력이력을 추정하고 시뮬레이션한 응력이력의 적합성을 검토하였으며 균열을 갖고 있는 단면에서 잔존수명을 추정하는 경우 등가하중모델중 RMC 모델의 적용성 및 균열성장률에 대한 Cut Off 의 영향을 검토하였으며 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 단순교에서 교통류의 통계적 지표를 사용해서 응력범위 발생빈도를 시뮬레이션방법으로 구할 수 있었으며 실교통류에서 트럭의 적재상태를 정확히 추정할 수 있다면 보다 정확한 응력범위발생확률 밀도함수를 구할 수 있다.

2. 등가응력범위의 두가지 모델 RMS 모델 및 RMC 모델은 균열성장률에 있어서 작용하중범위의 차이에 의한 영향외에는 거시적으로 큰 차이가 없다. 따라서 잔존수명을 선형과과역학에 의해 구하는 경우 어느 것을 사용하여도 무방하다.

3. 수명중단전설개념에 입각한 확률적방법에 의해 잔존수명을 추정하는 경우는 소형차 중형차의 영향을 제외하고 Cut Off 를 적용하는 것이 타당하나 균열을 포함하고 있는 단면에서 잔존수명을 추정하는 경우 소형차 중형차의 영향을 제외하고 Cut Off 를 적용할 경우 잔존수명이 과다하게 추정될 수 있다.

4. 교량의 최대응력과 교통류의 통계적지표 및 대상교량에 사용한 강재의 c 와 m 값을 기존의 자료로부터 사용가능 하다면 응력이력의 실측과 피로시험없이 잔존수명을 구할 수 있다.

참 고 문 헌

[1]. John. A.R, " Stress Histories for Highway Bridges Subjected to Traffic Loading ", PH.D Thesis University of Illinois.1974.

[2]. Rolf. S. T. Balson. J. M, " Fracture and Fatigue Control in Structures", Prentice-Hall. Inc. PP. 268-289, 1977.

[3]. Pedro. A , Kentaro. Y, " Simulation of Service Fatigue Load for Short - Span Highway Bridge ", ASTM. STP, 671, 1979.

[4]. Miki. C, Yoshimura. Y, " Stress Reduction Factor for Fatigue Assessment of Highway Bridges ", Proc. of JSCE, No. 368, 1987.

[5]. 한국도로공사, "고속도로 통행량조사", 1978-1986.

[6]. Miki. C, Goto. Y , " Computer Simulation Studies on the Fatigue Load and Fatigue Design of Highway Bridges", Proc. of JSCE Structural Eng, Vol.2, No.1, 1985.

[7]. Fisher. S. W, Woodward. H. M, "Highcycle Fatigue of Welded Bridge Details", Fritz Engineering Laboratory Report, No. 368-12, 1986.