

# 鋼道路橋의 疲勞信賴性 解析을 위한 實用的 模型

A Practical Model for the Fatigue Reliability Analysis of Steel Highway Bridges

申	載	喆*	張	東	一***
Shin,	Jae	Chul	Chang,	Dong	Il
李	承	宰**	趙	孝	南****
Lee,	Sung	Jae	Cho,	Hyo	Nam

## 요 약

본 研究에서는 鋼道路橋의 疲勞破損의 위험을 예측할 수 있는 實用的 模型을 개발하였다. 提案된 疲勞解析 模型은 疲勞信賴性 理論과 橋梁의 疲勞壽命에 영향을 미치는 여러가지 요인들을 고려하여 유도되었다.

疲勞信賴性 函數는 Weibull分布로 가정하였고, Weibull의 數值計算形態는 鋼材의 疲勞壽命과 變振幅載荷로 인한 應力範圍 등의 統計的 不確實量을 모두 포함하는 Ang-Munse의 식을 사용하였다. 疲勞解析模型에는 橋梁耐用 기간중에 발생할 수 있는 日平均交通量(ADTT)의 變化, 載荷履歷의 變化, 維推調査의 效果 등을 고려하였다.

應力範圍 柱狀圖는 既說 橋梁에 대한 현장실측결과로부터 구한 랜덤 應力波로부터 作圖하고, 그 結果 구해지는 應力範圍分布는 Beta分布로 모형화 하였다.

본 研究에서 제안한 疲勞解析 방법을 실제 既說 橋梁에 대해 적용한 결과, 제안된 疲勞解析模型과 수치 계산을 위하여 개발된 전산프로그램은 기설 노후 강교의 疲勞 耐荷力 判定이나 殘存壽命의 豫測등을 위한 實用的인 方法으로 사용될 수 있다고 생각된다.

## Abstract

A practical model for predicting the risk of fatigue failure of steel highway bridges is developed in this study. The proposed model is derived from fatigue reliability methods by incorporating various factors which may affect the fatigue life of bridges.

The fatigue reliability function is assumed to follow the Weibull distribution. The computational form of the Weibull is adopted from Ang-Munse's approach that includes all the statistical uncertainties of the

\*충남대학교 토목공학과 조교수  
 \*\*한양대학교 토목공학과 조교  
 \*\*\*정회원, 한양대학교 토목공학과 교수  
 \*\*\*\*정회원, 부회장, 한양대학교 토목공학과 교수

[ ] 이 논문에 대한 토론을 1988년 12월 31일까지 본학회에 보내주시면, 그 결과를 1989년 6월호에 게재하겠습니다.

fatigue life of steel members and the stress ranges under variable amplitude loadings. The model accounts for the variation in ADTT, the change in stress history and the effects of inspections, which may occur during the service life of bridges.

Stress range histograms are collected from the random stress spectra based on the field measurements of an existing bridge, and, thus, the resulting stress range frequency distribution is modelled with a beta distribution.

The results of applications of the proposed fatigue analysis methods to an existing bridge show that the proposed models with the computer program developed for numerical computations can be used as a practical tool for the fatigue rating or for the prediction of the remaining fatigue life of deteriorated existing steel bridges.

### 1. 序 論

우리나라 대부분의 鋼道路橋는 橋梁 設計壽命이 다 되었거나, 交通量의 급증과 重量化로 인하여 기능적으로 점점 쇠퇴해 가고 있으며, 이들은 적절한 보수, 보강 및 복구, 대치계획의 수립에 앞서 합리적인 殘存壽命의 추정, 疲勞耐荷力 判定 등의 평가가 반드시 선행되어야 할 것이다.

이는 비록 橋梁이 그 設計壽命을 다 하였다 하더라도 구조적으로 큰 결함을 나타내지 않을 경우에는 실제적인 殘存壽命의 기대치를 분석, 평가할 수 있는 합리적인 방법을 개발한다면 경제적이며 효율적인 橋梁 維持管理가 가능하게 될 것이다. 그러나, 현재로서는 既設 鋼道路橋의 疲勞破損의 危險度 및 殘存壽命을 산정할 수 있는 유용하고 실용적인 방법이 미흡한 실정에 있다.

따라서, 이를 위한 합리적 模型의 개발은 현 시점에서 매우 중요할 것이며, 특히 鋼道路橋의 疲勞에 대한 抵抗은 應力履歷(Stress History)과 각 詳細部位(Detail)의 疲勞抵抗 능력에 지배받게 되는데 이들의 많은 不確實性에 비추어 불배 疲勞에 관한 解釋에 있어서 確率論的 접근방법 즉, 疲勞信賴性理論의 도입이 가장 효과적일 것이라 생각된다.

그러므로, 본 研究의 주된 目的은 疲勞信賴性理論에 의거하여 既設橋梁에 요구되는 특정한 許容破壞確率 또는 最小의 目標信賴性指數( $\beta_0$ )를 초과함이 없이 사용되어질 수 있는 합리적 殘存壽命의 推定과 그 疲勞耐荷力を 判定할 수

있는 실용적인 模型을 제시코자 하는 것이며, 또한 여기에는 橋梁의 實상황을 그대로 반영하고자 交通量의 變化, 載荷履歷의 變化, 橋梁維持調査의 效果 등을 포함하였다.

### 2. 鋼道路橋의 疲勞信賴性 解析模型

#### 2.1. 基本 概念

疲勞信賴性理論에서  $N$ 을 疲勞壽命을 나타내는 確率變數라 한다면, 應力範圍(Stress Range)의 反復回數  $n$ 에서의 疲勞信賴度(Fatigue Reliability)는 反復回數  $n$ 까지 疲勞破損(Fatigue Failure)이 일어나지 않을 確率로서 정의된다. 즉,

$$R_N(n) = P(N > n) \tag{1}$$

반면에,  $n$ 과 같거나 작은 反復回數에서 疲勞破損이 일어날 確率  $F_N(n)$ 은 疲勞危險度(Fatigue Risk Level) 또는 疲勞破損確率로 일컬어지며 다음과 같이 표현된다.

$$F_N(n) = P(N \leq n) \tag{2}$$

따라서,  $R_N(n)$ 과  $F_N(n)$ 은 다음과 같은 補確率關係를 갖는다.

$$R_N(n) = 1 - F_N(n) \tag{3}$$

이 疲勞信賴度  $R_N(n)$ 을 계산하는 방법에는 여러가지가 있으나, 최근에 발표된 方法으로는 Shaaban-Albrecht<sup>5</sup>의 方法과 Ang-Munse<sup>2</sup>의 方法이 있다.

Shaaban-Albrecht는 全確率定理에 의해 疲勞破壞確率  $F_N(n)$ 을 다음과 같이 유도하였다.

$$F_N(n) = \sum_{j=0}^n \sum_{i=1}^k P_N(j/S_{r1}) P(S_{r1}) \tag{4}$$

그런데, 여기서  $P_N(j/S_{FH})$ 가 의미하는 바와 같이 각 應力範圍에 따르는 破壞確率의 確率密度函數(Probability Density Function:PDF)를 필요로 하는데, 이는 각각의 應力範圍로 常振幅載荷(Constant Amplitude Loading)하여 얻은 疲勞試驗 Data가 없이는 그 分布를 알아낼 수가 없다. 그러므로, 이 방법은 현실적으로 적용이 불가능하다.

반면에, Ang-Munse<sup>2</sup>는 疲勞試驗 N은 직접 Weibull 分布를 갖는다고 가정하고 또, 疲勞壽命의 하한치가 零일 경우 形狀係數(Shape Parameter) k와 疲勞壽命 N의 變動係數  $V_{RN}$ 간의 근사적 관계를 이용하여  $R_N(n)$ 을

$$R_N(n) = \exp\left[-\frac{n}{\bar{n}} \left\{ \Gamma\left(1 + V_{RN}^{1.08}\right) \right\} V_{RN}^{-1.08}\right] \quad (5)$$

여기서  $\Gamma(\cdot)$ :Gamma 函數와 같이 표현하였다.

이때,  $\bar{n}$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$\bar{n} = C / E(Sr^m) \quad (6)$$

여기서 C, m:회귀직선상수-절편과 기울기

이때,  $E(Sr^m)$ 은 應力範圍 Sr의 PDF의 m차모멘트로서 그 分布를 Beta分布로 가정하여 두 母數를 q와 r이라 하면,

$$E(Sr^m) = S_{rmax}^m \frac{\Gamma(m+q)\Gamma(q+r)}{\Gamma(q)\Gamma(m+q+r)} \quad (7)$$

로 유도된다. 여기서,  $S_{rmax}$ 는 Beta分布의 상한치를 나타내며, 이들 식의 유도는 생략하기로 한다.<sup>2)</sup>

즉, Ang와 Munse의 方法은  $R_N(n)$ 을 平均壽命 n와 疲勞壽命의 變動係數  $V_{RN}$ 의 항으로 나타내므로 鋼橋梁의 疲勞信賴性解析에 實用적으로 도입될 수 있을 것이며, 따라서, 본 研究에서는 이 方法을 이용하여 疲勞信賴性 解析模型을 제안하였다.

이상의 解析模型에 아래에 기술한 交通量의 變化 및 交通維持調查結果 등을 고려한 疲勞信賴性(信賴性 指數 및 破壞確率) 및 殘存壽命의 계산은 본 研究를 위해 개발된 Program FATIGUE로 수행가능하며 문헌 6에 수록되어 있다.

## 2.2 實交通量 變化를 고려한 模型

橋梁에 재하되는 트럭하중은 그 重量과 交通量에 있어서 사용기간중 變化를 하게되며, 특히 근래에 와서 트럭의 超重量化와 交通量의 증가는 가속되고 있는 실정이다. 이와 같은 實 교통荷重의 증가는 橋梁의 殘存壽命의 期待值를 크게 감소시키는 요인이 되며, 따라서, 이의 變化는 橋梁의 疲勞解析模型에 반드시 반영되어야 하는 것이다.

현행 AASHTO의 疲勞規準<sup>1</sup>에서는 日平均트럭交通量(Average Daily Truck Traffic:ADTT)을 일정한 상수로 하고 있으나, 실제로 이는 設計壽命간 變化를 하게 될 것이다.

Shaaban과 Albrecht<sup>5</sup>는 이의 變化를 강도로교의 疲勞信賴性 解析模型에 포함시키기 위하여 ADTT가 橋梁 開通時부터 매년 일정한 비율로 증가되는 模型을 사용하였다. 그러나, 이는 도로의 限界交通量을 무시하였기 때문에 장래의 ADTT를 지나치게 크게 추정함으로써 그에 따른 殘存壽命을 기대이상으로 낮게 산정하는 結果를 가져온다. 실제로는 道路의 交通量은 사용기간중 계속 증가하지만, 그 도로의 限界交通量에 이르렀던 이상 증가하지 않는다고 보는 게 타당하다.

따라서, 본 研究에서는 그림1과 같이 수년간은 일정비율로 증가하지만 限界交通量까지 그 증가비율이 점차 둔화되는 模型을 사용하였다.

교통량이 일정하게 증가하는 경우에 Y년까지 교량이 받는 반복회수 n은

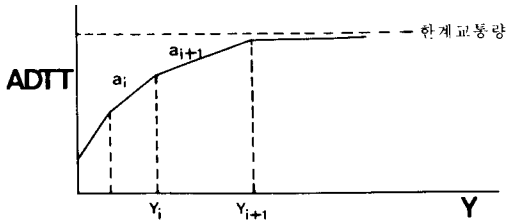
$$n = 365 \frac{Y}{2} \{2 \times ADTT(1) + (Y-A) a\} \quad (8)$$

여기서, a는 연간 ADTT증가율

반면에 본 연구와 같이 부분선형(piecewise linear)으로 증가하는 경우에는

$$n = 365 \sum \frac{Y_i}{2} \{2 \times ADTT\left(\sum_{k=1}^{i-1} Y_k + 1\right) + (Y_i - 1)a_i\} \quad (9)$$

여기서  $a_i$ 는  $i$ 번째 ADTT 증가율  
 $Y_i$ 는  $a_i$ 년의 시작년도



(그림 1) 교통량 변화 모델

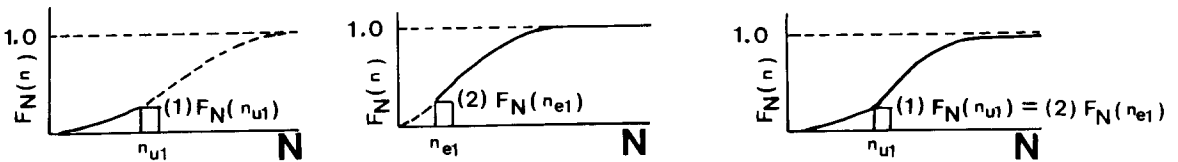
2.3 載荷履歷(Loading History) 變化를 고려한 模型

전술한 바와 같이 트럭하중의 重量化와 橋梁의 전반적 노후화는 載荷履歷의 變化를 초래하며 이에 따른 應力範圍分布의 變化를 Shaaban-Albrecht<sup>5</sup>가 사용한 방법에 따라 그림2와 같이 模型化 하였다.

즉, 反復回數  $n_{u1}$ 까지는 分布 No.1이 작용하고, 그 이후부터 分布 No.2가 작용하는 경우  $n_{u1}$ 과  $n_{e1}$  각각의 破壞確率에 같아지는 점에서  $n_{e1}$ 이 계산되고, 결과적 破壞確率의 累積分布函數(Cumulative Distribution Function:CDF)는 그림2의 (C)와 같이 조합되는 模型을 채택하였다.

2.4 橋梁維持調査 結果를 고려한 模型

橋梁은 정기적으로 또는 노후손상이 심화되었을 때 조사된다. 이때, 첫번째 橋梁調査가 실시됐을 때까지의 反復回數를  $n$ 이라 하자. 橋梁調査중 어떤 큰 균열(Critical Crack)이 발견되었다면, 그 剖材는 보수, 복구되고, 이후의 疲勞被害(Fatigue Damage)는 反復回數  $n_i+1$  부터 다시 시작될



A. 파괴확률분포 1

B. 파괴확률분포 2

C. 결과적 파괴확률분포

(그림 2) 응력범위 분포의 변화

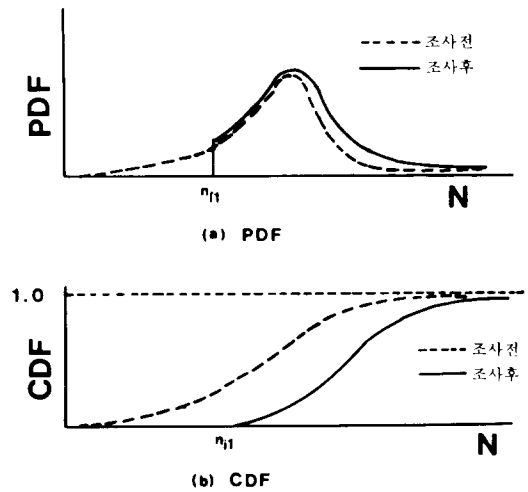
것이다.

반면에, 균열이 발견되지 않을 경우는 反復回數  $n_{ii}$ 까지 破壞가 일어나지 않았음을 의미하므로 破壞確率分布는 다음과 같은 條件付確率로서 표현된다.

$$P_N(n|N > n_{ii}) = \frac{P_N(n)}{P_N(n_{ii})} ; n > n_{ii} \quad (10)$$

$$F_N(n|N > n_{ii}) = \frac{F_N(n) - F_N(n_{ii})}{R_N(n_{ii})} ; n > n_{ii} \quad (11)$$

그림3에 이를 도식적으로 표현하였다.



(그림 3) 교량유지조사의 효과

3. 疲勞壽命의 統計的 解析

현행의 疲勞規準에서는 疲勞壽命의 不確實量을 고려하는데 있어서, 疲勞試驗 Data의 變動性만을 고려하여 logN-logS 平均회귀직선을 疲勞

試驗 Data의 標準偏差의 2배인  $2\sigma$ 만큼 왼쪽으로 이동시킴으로서 許容S-N선도를 규정하고 있다. 그러나, 疲勞壽命N은 疲勞試驗 Data의 不確實量 뿐만 아니라, 제작 및 시공, 疲勞解析模型의 가정 등에 따르는 각종 不確實量을 모두 포함한다.

따라서, 본 연구에서는 각종 不確實量을 解析에 모두 포함시켰는데, 疲勞壽命N에 대하여 Taylor 급수전개하여 第1階項近似化(First Order Approximation)를 사용하면, 그 총 變動係數인  $V_{RN}$ 은 다음과 같이 표현될 수 있음을 알 수 있다.

$$V_{RN}^2 = V_N^2 + V_F^2 + V_C^2 + m^2 V_S^2 \quad (12)$$

여기서,  $V_{RN}$ : 疲勞壽命 N으로 표현되는 抵抗의 총 變動係數

$V_N$ : 회귀직선에 대한 疲勞試驗 Data 자체의 變動係數

$V_F$ : 疲勞解析模型과 Minor의 가정시 발생하는 오차로 인한 變動係數

$V_S$ : 平均應力範圍에 관련된 變動係數, 應力解析, 衝擊係數의 선택에 따른 오차포함

$V_C$ : 제작과 시공정도에 대한 不確實量을 반영하는 S-N회귀상수에 관련된 變動係數

여기서,  $V_F$ ,  $V_C$ ,  $V_S$ 의 값은 Ang과 Munse가 여러가지 판단을 기초로 각각 0.15, 0.40, 0.10으로 산정한 바 있다.<sup>2)</sup> 이를 기초로 Nolan<sup>9)</sup>은  $V_N$ 에 관한 기존의 각 Data를 수집하여  $V_{RN}$ 에 대한 통계치를 각 連結種類(Category)별로 정리하였다.

본 研究에서는 국내에 이들 자료에 관한 자료

1) 抵抗不確實量에 관한 統計值

Category	절편 (C)	기온기 (m)	$\sigma_R$	$V_{RN}$
A	11.121	3.178	0.221	0.9
B	10.870	3.372	0.147	0.72
C*	10.085	3.097	0.158	0.61
C	10.0384	3.25	0.0628	0.60
D	9.603	3.071	0.108	0.60
E	9.2916	3.095	0.1006	0.60
E'	9.1664	3.2	0.1943	0.60

가 충분치 못하기는 하지만, 우리나라 강구조 剖材의 제작수준이 외국의 경우에 비해 크게 손색이 없다는 판단아래 이들의 統計值를 그대로 사용하여 解析하였으며, 그 統計值들은 각 連結種類별 회귀상수 C, m과 疲勞試驗 Data의 標準偏差  $\sigma$ 과 함께 표1에 정리하였다.

4. 應力範圍의 統計的 解析

본 논문에서는 應力範圍의 分布를 Beta分布로 가정하였는데 Beta分布는 상한치와 하한치를 가지며, 또 두 母數 q, r의 선택에 따라 모양을 다양하게 변화시킬 수 있는 특성을 가지므로 應力範圍分布를 나타내는데 적절한 分布이다.

하한치가 0이고, 상한치가  $S_{rmax}$ 인 경우 Beta 分布의 PDF는 다음과 같다.

$$f_{sr}(S_r) = \frac{1}{B(q, r)} \frac{S_r^{q-1} (S_{rmax} - S_r)^{r-1}}{S_{rmax}^{q+r-1}} \quad ; 0 < S_r < S_{rmax} \quad (13)$$

이때,  $B(q, r)$ 은 Beta函數로서 Gamma函數와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$B(q, r) = \frac{\Gamma(q) \Gamma(r)}{\Gamma(q+r)} \quad (14)$$

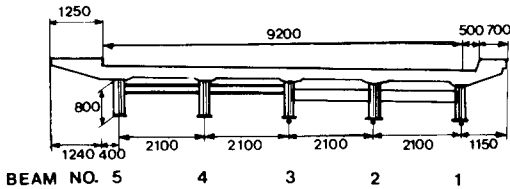
본 研究에서는 Beta分布로 관측된 應力範圍柱狀度에 Fitting하기 위하여, 관측자료의 CDF와 임의로 가정된 두 母數 q, r을 가지는  $S_{rmax}$ 로 標準化된 Beta分布의 CDF를 얻어서 두개의 CDF의 最大偏差 |Dmax|를 반복시행에 의해 점점하는 알고리즘을 채택하였다. 이 |Dmax|가 最大가 될 때의 母數 q, r은 관측된 應力範圍分布의 最良推定值가 된다. 이 알고리즘을 CODING한 Program PARAME는 문헌 6에 수록되어 있고, 이 프로그램에서는 두 母數 q, r의 추정뿐 아니라 적합도 검정을 위한 Min|Dmax|와 Dmax의 변화에 대한 Contour Line을 구하여 q, r의 변화에 따른 예민도 해석도 행하였다.

5. 適用例 및 結果分析

5.1 對象橋梁의 選定 및 應力波의 獲得

본 研究에서 提案된 疲勞解析模型을 實際의 鋼橋梁에 적용하기 위하여 對象으로 한 橋梁은 淸안에 있는 경부고속도로선상의 서울에서 이정 100.34km에 위치한 속창교 상행선으로서 1969년 6월에 준공되어 당해 12월에 開通된 橋長 15m 의 단순 I형교이다. 이 橋梁은 I-Beam으로 구성되어 있고, 각 Beam은 한쪽 단부로부터 3.97m 지점에 高張력보울트로 연결되어 있다. 橋梁의 중앙단면도는 그림 4에 나타나 있다. Strain gage 는 각 Beam의 高유의 應力波를 얻기 위하여, 그림4에 표시한 바와 같이 Beam No.1, 2, 3 세곳 의 중앙부에 부착하였으며, 측정은 주간과 야간 두번에 걸쳐 실시하였다. 즉, 주간의 交通梁이 가장 많은 12:00-14:00 사이와 야간의 트럭 交通量이 가장 많은 20:00-24:00 사이에 측정을 행하였다. Multi-Coder로 기록된 스트레인파의 일례를 그림5에 예시하였으며, 표2에 각 Beam에 대한 주, 야간과 두개의 합 의 도수분포표를 수록 하였다.

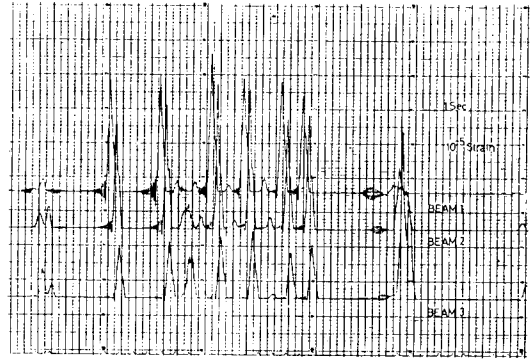
이때, 세개의 스트레인파가 모두 空車의 8ton 트럭의 파라고 생각되는  $11/90 \times 10^{-6}$  strain(≈25 kg/cm<sup>2</sup>) 보다 작은 경우의 Strain은 무시하였다.



(그림 4) 중앙단면도 및 Gage 부착위치 (단위 : mm)

5.2. Beta分析의 母數 q, r의 決定

4절에서 언급한 알고리즘을 이용한 프로그램 (PARAME)을 이용하여 획득한 Histogram의 Beta 分析의 두 母數 q와 r을 결정하였다. 이때 표3의 Histogram들에 대하여 주간과 야간 또 그들의 합의 應力分布의 특징을 비교하기 위하여 9개 모두 解析을 행하였다. Beta分布는 식(13)에서



(그림 5) 측정된 Strain파

(표 2) 측정시간별 應력의 도수분포표

a. 야간(1987. 11. 19, 20 : 00 - 24 : 00) - 총발생도수 : 1304회

Beam No. Histogram No.	應력 (kg/cm <sup>2</sup> )							
	25	50	75	100	125	150	175	200
1 - 1	610	242	245	150	35	17	2	3
2 - 2	159	422	374	261	43	25	19	1
3 - 3	106	532	408	149	45	57	7	0

b. 주간(1987. 11. 20, 12 : 00 - 14 : 00) - 총발생도수 : 932회

Beam No. Histogram No.	應력 (kg/cm <sup>2</sup> )							
	25	50	75	100	125	150	175	200
1 - 1	560	57	139	155	19	2	0	0
2 - 2	259	244	183	211	32	2	1	0
3 - 3	92	399	231	113	43	45	9	0

c. 주, 야간합계 - 총발생도수 : 2236회

Beam No. Histogram No.	應력 (kg/cm <sup>2</sup> )							
	25	50	75	100	125	150	175	200
1 - 1	1170	299	384	305	54	19	2	3
2 - 2	418	666	557	472	75	27	20	1
3 - 3	198	931	639	262	88	102	16	0

알 수 있듯이 最大應力範圍 S<sub>rmax</sub>의 函數로 나

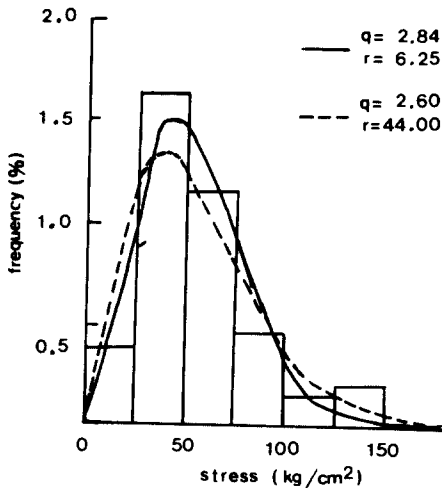
(표 3) Beta分布의 母數

Srmax	주·야	Histogram No	발생도수	q	r	D <sub>max</sub>
관측된 최대응력 범위	야 간	1	1,304	1.00	4.25	0.0531
		2	1,304	2.60	6.50	0.0178
		3	1,304	2.84	6.25	0.0411
	주 간	4	932	1.00	3.75	0.1201
		5	932	1.64	4.25	0.0512
		6	932	2.52	5.75	0.0492
	주야간	7	2,236	1.00	4.50	0.0709
		8	2,236	2.28	6.00	0.0301
		9	2,236	2.28	6.25	0.0447
설계응력 범위	야 간	1	1,304	1.00	26.50	0.0427
		2	1,304	2.52	44.25	0.0490
		3	1,304	2.60	44.25	0.0742
	주 간	4	932	1.00	31.75	0.0970
		5	932	2.20	43.25	0.0549
		6	932	2.60	44.00	0.0554
	주야간	7	2,236	1.00	28.00	0.0612
		8	2,236	2.44	45.00	0.0460
		9	2,236	2.60	44.00	0.0654

표 3에 이들 두 경우에 대한 數值解析結果를 정리하였으며, 각 경우에 있어서 母數 r의 차이가 상당히 큼을 알 수 있다.

또한, 주간과 야간 및 이들의 합의 應力範圍分布 역시 각기의 특징을 가지며 이는 應力範圍分布圖를 획득하는데 있어서, 자료가 對象橋梁 고유의 應力分布圖로서의 信賴度를 높이기 위해서는 측정시간대를 달리하면서 가능한 한 오랜 시간 동안 측정되어야 할 것임을 나타내는 것이라 할 수 있다. 표 3의 마지막 란에서는 관측된 應力範圍頻度그래프의 CDF와 구해진 q, r을 母數로 가지는 Beta 分布의 CDF와 最大偏差인 |D<sub>max</sub>|를 수록하였다.

그리고, 그림6은 Beam No.3에 대한 주·야간 합계의 應力範圍頻度그래프(표2c의 3-9)의 두가지 경우에 대한 Beta分布의 Fitting 結果를 보인 것으로 실선은 Srmax를 觀測最大應力範圍로 했을 경우, 점선은 Srmax를 設計應力範圍로 했을 경우를 각각 나타낸다.



(그림 6) Histogram No. 9

타내는데, 관측된 應力範圍의 최대값은 측정일시와 측정시간의 길이에 따라 달라질 수 있을 것이며, 또한 관측된 應力範圍의 최대값을 剖材의 設計應力範圍를 넘을 수는 없기 때문에, 본 논문에서는 Beta 分析의 상한치 Srmax를 剖材의 設計應力範圍와 觀測最大應力範圍로 취하는 두 경우간의 비교를 행하였다.

### 5.3. 交通量 調査와 交通量 變化模型

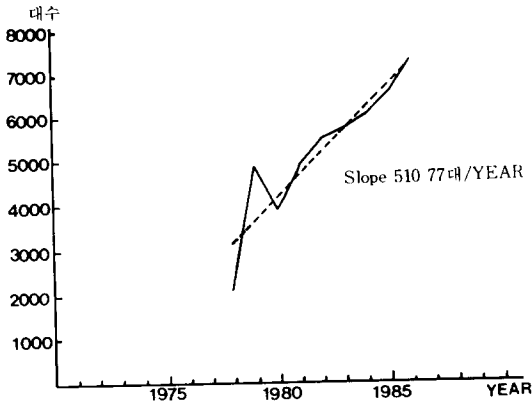
다음 표4와 그림7은 속창고 상행선에 대한 1978년부터 1986년 사이의 한국도로공사에서 행한 8 ton 이상의 트럭 및 고속버스, 군용차량의 交通量調査<sup>9)</sup>의 結果이다.

여기에서, 일일 交通量은 비록 1979년에 급격한 변화를 나타내고 있기는 하지만, 전반적으로 거의 일정한 추세를 가짐을 알 수 있으며, 1970년에서 1977년 사이의 일일 交通量은 근사적으로 1000대에서 부터 1977년의 2142대까지 선형적 증가추세를 가진다고 가정하면, 1986년까지 속창고 상행선이 받은 反復回數는  $n_p = 21491930$  회임을 알 수 있다.

또한, 交通量의 變化模型은 2.2절에서 논술한 바와 같이 그 증가비율이 점차 작아지는 것으로 가정하여, 그림7에서 점선으로 표시한 일차회귀 직선식의 증가비율이 1987년 이후 매 10년간 작아지는 것으로 하여, 다음 5.4절에서 시도될 疲勞解析에 적용코저 한다.

(표 4) 交通量調査

년 도	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
대 수	2142	4894	3897	4869	5498	5707	6057	6542	7278



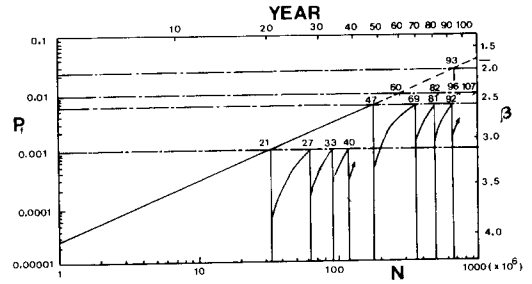
(그림 7) 교통량 변화의 추세

5.4.  $\beta_0$ ,  $P_{r0}$ 의 變化에 따른 殘存壽命의 變化

속장교는 AASHTO 疲勞規準의 連結種類 A에 해당하는 5개의 중앙부와 B에 해당하는 5개의 고장력 보울트 연결로 이루어져 총 10개의 상세요소로 되어있다. 그런데, 관측된 자료는 Beam No.1, 2, 3의 중앙부 세곳에서 행해진 것이므로, 나머지 7개의 詳細要素는  $S_{rmax}$ 를 設計應力範圍로 한 표 2의 Histogram No.7, 8, 9이 母數  $q$ ,  $r$ 의 평균치인  $q=2.01$ ,  $r=39$ 를 사용하여 解析하였다.

그림8은 目標信賴性指數  $\beta_0$ , 또는 特定許容危險度  $P_{r0}$ 의 變化에 따른 殘存壽命의 變化를 나타낸 것이다. 이 그림에서  $\beta_0$ , 또는  $P_{r0}$ 의 變化에 따른 殘存壽命의 期待値는 상당한 차이를 Program FATIGUE에 의해 계산된 결과로 나타냄을 알 수 있으며, 따라서  $\beta_0$  또는  $P_{r0}$ 의 판단이 既設橋梁의 疲勞耐荷力 또는 殘存壽命의 산정에 매우 커다란 영향을 미침을 알 수 있다.

표5는 이를 표로서 정리한 것이며, 이때의 殘存壽命은 198년 이후의 값을 나타낸다.

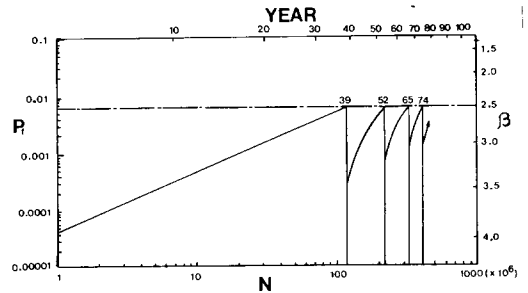


(그림 8) 피로수명의 변화

$S_{rmax}$  : 설계應力범위  
 $\beta_0, P_{r0}$  : 變化

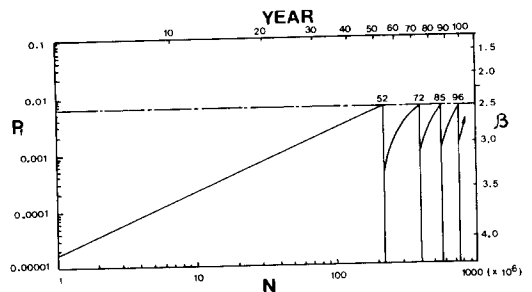
(표 5)  $\beta_0, P_{r0}$ 의 變化에 따른 殘存壽命의 變化

$\beta_0$	$P_{r0}$	피로수명 (Year)	잔존수명
3.09	0.001	21, 27, 33, 40	4, 10, 116, 23
2.5	0.00621	47, 69, 81, 92	30, 52, 79, 90
2.33	0.01	60, 82, 96, 107	44, 65, 79, 903
2	0.025	93, 113, 126, 134	76, 96, 109, 117



(그림 9) 피로수명의 변화

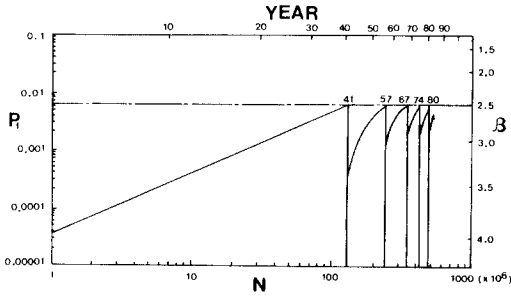
$S_{rmax}$  : 설계應力범위  
 재하이력 : 變化



(그림 10) 피로수명의 변화

$S_{rmax}$  : 관측최대應力범위  
 재하이력 變化무





(그림11) 피로수명의 변화

Srmax : 관측최대응력범위  
재하이력 : 변화

5-5. 載荷履歷의 變化와 交通量 變化模型의 差異에 따른 殘存壽命의 變化

그림9은 Srmax를 設計應力範圍로 하고, 交通量 變化模型은 앞서 제안된 5.3절의 變化模型을 사용하였을 때의 載荷履歷의 變化에 따른 殘存壽命의 變化를 나타낸다. 또 그림10과 11은 Srmax를 觀測最大應力範圍로 하였을 때의 結果를 나타낸다. 표 7에는 이들의 結果와 함께 交通量 變化模型을 Shaaban-Albrecht와 같이 그 증가비율이 매년 일정한 경우에 대한 殘存壽命의 變化를 수록하였다.

이의 결과로부터 Shaaban-Albrecht의 交通量 變化模型은 橋梁의 殘存壽命을 낮게 산정하는 結果를 가져오며, 載荷履歷의 變化 역시 橋梁의 殘存壽命의 期待置를 감소시키는 요인으로 작용하고 있음을 확인할 수 있다.

또한 Srmax를 設計應力範圍로 취하는 경우에는 觀測最大應力範圍의 경우보다 殘存壽命의 期待值가 조금씩 감소된다. 그러나, 본 對象橋梁에서와 같이 觀測最大應力範圍가 設計應力範圍보다 상당히 작은 경우(Beam No.3의 경우; 觀測最大範圍 / 設計應力範圍=0.166)에도, 즉, 각 경우에 대해 계산된 q와 r의 차이가 매우 크다 하더라도 이것이 鋼橋梁의 殘存壽命의 추정에 영향을 미치는 일차적 인자는 아니라고 판단된다. 따라서, Srmax를 設計應力範圍로 하는 것이 이를 觀測最大應力範圍로 하는 것보다 약간의 안전측

의 해를 주기는 하지만, 실제로 Srmax가 設計應力範圍에 도달하지는 않는 것이므로, 이의 선택에 있어 공학자의 합리적 판단을 필요로 한다.

(표 7) 속창교 상행선의 載荷履歷의 變化와 交通量 變化模型의 差異에 따른 殘存壽命의 變化

교통량 변화 모델	재하이력	Srmax = 설계응력 범위		Srmax = 관측최대응력범위	
		피로수명	잔존수명	피로수명	잔존수명
증가비율인경 (Shaaban-A Albrecht)	변화부	45, 65, 74, 79	28, 48, 57, 62	49, 67, 76, 83	32, 50, 59, 66
증가비율감소 (분봉문)	변화부	47, 69, 81, 92	30, 52, 64, 75	52, 72, 85, 96	35, 55, 68, 79
	반복횟수 1-10 :				
	10%증가 반복횟수 10-15 x 10 : 20 %증가	39, 52, 65, 74	22, 35, 48, 57	41, 57, 67, 74	24, 40, 50, 57

6. 結 論

1. 疲勞解析에 있어 각종 不確實量을 解析에 포함시키는 疲勞信賴性 理論의 도입이 바람직하다.

2. 應力範圍 柱狀圖는 가능한 한 오랜시간에 걸쳐 시간대를 달리하여 획득하여야 할 것이 요망된다.

3. 交通量의 變化, 載荷履歷의 變化등에 橋梁의 殘存壽命이 민감하게 반응함을 알 수 있다.

4. Beta 分布의 상한치인 Srmax의 선택에 따라 殘存壽命의 期待值는 약간씩 변화함을 알 수 있다.

5. 본 研究에서 제안된 疲勞信賴性 解析模型과 이를 이용하여 개발된 프로그램은 橋梁이 維持, 調査, 管理 등을 계획, 실시하는데 있어서 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

6. 우리나라도 빠른 시일내에 疲勞設計規準및 耐荷力 判定規準의 도입을 위한 본격적 연구에

박차를 가해야 할 것이다.

### 謝 意

본 연구는 1986년도 문교부 자유과제 학술연구 조성비에 의하여 수행되었으며, 이에 대하여 감사를 드립니다.

### 7. 참고문헌

1. AASHITO(American Association of State Highway and Transportation Officials), "Standard Specification for Highway Bridges," AASHTO, D.C., 1983.
2. Ang, A. H-S. and Muse, W.H., "Practical Reliability Basis for Structural Fatigue," Meeting Preprint 2492, ASCE National Structural Engineering Convention, ASCE, April, 1975.
3. Elms, D,G,, "Use of Fuzzy Sets in Developing Code Risk Factors," Meeting Preprint 81-509, ASCE Convention, St. Louis, Missouri, October, 1981.
4. Nolan, C. and Albrecht, P., "Load and Resistance Factor Design of Steel Structures for Fatigue," Civil Engineering Report, Univ. of Maryland, College Park, Maryland, June, 1983.
5. Shaaban, H. and Albrecht, P., "Fatigue Rating of Highway Bridges," Civil Engineering Report, Univ. of Maryland, College Park Maryland, May, 1985.
6. 장동일, 조효남, 신재철, "강도로교의 피로신뢰성 해석모형" 86 학술진흥재단 연구보고서, 1987. 11.
7. 조효남, 장동일, 신재철, "확률이론에 기초한 철근콘크리트 강도설계규준", 대한토목학회 논문집, 제6권 제4호, 1986.12, pp.53-63.
8. 조효남, 구분성, "체계신뢰성 방법에 기초한 R.C 도로교 상부구조의 근사적 신뢰성 해석 모형연구", 대한토목 학회논문집, 제7권 제 2호 1987.6, pp.79-88.
9. 한국도로공사, "고속도로교통량조사", 1978-1986.

(1988년 6월 12일 접수)