

碩士學位論文

신뢰성 해석을 이용한 강거더교의
피로해석



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

許 城 豪

2006年 6月

신뢰성 해석을 이용한 강거더교의 피로해석

指導教授 金 相 璣

許 城 豪

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2006年 6月



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

許 城 豪의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____(印)

委 員 _____(印)

委 員 _____(印)

濟州大學校 大學院

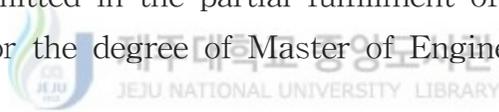
2006年 6月

Fatigue Reliability Analysis of Bridges

Seong-Ho Heo

(Supervised by Professor Sang-Jin Kim)

A thesis submitted in the partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Engineering



2006. 6.

This thesis has been examined and approved.

Department of Civil & Ocean Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목 차	i
LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iii
SUMMARY	v
I. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 내용 및 방법	2
II. 신뢰성이론	3
2.1 개요	3
2.2 한계상태함수	3
2.3 신뢰성해석방법	5
2.3.1 신뢰성지수	5
2.3.2 평균 1계 2차 모멘트신뢰성지수방법	8
2.3.3 Hasofer-Lind 신뢰성지수방법	9
2.3.4 Rackwitz-Fiessler 신뢰성지수방법	10
III. 피로파괴 및 평가이론	15
3.1 개요	15
3.2 S-N 곡선식	16
3.3 Miner's 누적손상이론	18
IV. 피로하중 및 피로저항 교량 선정	19
4.1 피로하중	19
4.2 피로저항 교량 선정	23

V. 피로신뢰성해석.....	28
5.1 확률특성.....	28
5.2 피로신뢰성지수 산정 절차.....	31
5.3 신뢰성해석 및 결과 고찰.....	39
VI. 결론.....	47
참고문헌.....	49



LIST OF TABLES

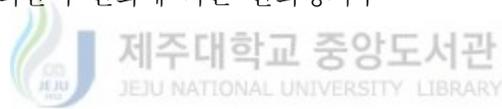
Table 2.1 신뢰성 지수별 파괴확률	6
Table 4.1 교량형식과 제원	27
Table 5.1 확률변수의 통계 값	31
Table 5.2 조사차량 모멘트/ 설계차량 모멘트	40
Table 5.3 조사차량과 설계차량의 응력범위 비	44
Table 5.3 신뢰성지수	46

LIST OF FIGURES



Fig 2.1 피로검토 상세부재	2
Fig 2.1 하중과 저항 및 한계상태 함수의 PDF	4
Fig 2.3 축약변수 좌표공간의 신뢰성 지수	7
Fig 2.4 Hasofer-Lind 신뢰성 지수법	9
Fig 2.5 Rackwitz-Fiessler 방법의 도식	14
Fig 3.1 응력이력곡선	16
Fig 3.2 S-N 곡선	17
Fig 3.3 Miner Rule 이론의 개요	18
Fig 4.1 Schilling의 피로설계트럭	20
Fig 4.2 Raju의 피로설계트럭	22
Fig 4.3. 플레이트 거더교 종단면도	24
Fig 4.4 플레이트 거더교 횡단면도	24

Fig 4.5 I단면 상세	25
Fig 4.6 HL-93 트럭하중	25
Fig 4.7 HL-93 차선하중	26
Fig 4.8 HL-93 탠덤하중	26
Fig 4.9 운하중 재하상태	27
Fig 5.1 지간 9m인 경우 거더간격에 따른 모멘트 변화	41
Fig 5.2 지간 18m인 경우 거더간격에 따른 모멘트 변화	41
Fig 5.3 지간 27m인 경우 거더간격에 따른 모멘트 변화	42
Fig 5.4 지간 36m인 경우 거더간격에 따른 모멘트 변화	42
Fig 5.5 지간 및 거더간격 변화에 따른 모멘트비 변화	43
Fig 5.6 설계차량의 지간 및 거더간격 변화에 따른 응력범위 비	45
Fig 5.7 조사차량의 지간 및 거더간격 변화에 따른 응력범위 비	45
Fig 5.8 지간변화에 따른 응력범위 비	46
Fig 5.9 지간 및 거더간격 변화에 따른 신뢰성지수	47



SUMMARY

The weight of vehicles and traffic volume were increased as the economy advances greatly. As a result, the structures are becoming those with high strength and long span. In addition, sudden fatigue failures are being reported from all over the world. Therefore, the quantitative reliability analysis should be performed for the bridge elements.

In this study, Rackwitz-Fiessler procedure were used for reliability analysis of plate-girder bridges. The analyses were performed for the spans of 9m, 18m, 27m, and 36m, and for the girder spacings of 1.2m, 1.8m, 2.4m, and 3.0m. For each combination, the reliability indices were calculated and examined.



The conclusions in this study are as follows. Fatigue stresses for the various span lengths and girder spacings exceed the fatigue limit stress. It was found that all combinations of analysis cases affect fatigue accumulation.

From the examination of the variations of reliability indices, it was found that the reliability indices are decreased as the span lengths are increased but they are increased as the girder spacings are increased. The reliability indices for the fatigue limit state were greater than those for flexural limit state. Therefore, the fatigue has more safety reserve than flexural moment strength.

I. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

우리나라를 비롯한 세계 여러 나라들이 눈부신 경제발전과 고도성장 시기에 들어섰다. 이러한 추세에 맞춰 세계 여러 나라 간의 물류 교환은 물론이거니와 국내에서도 물류 이동량이 급속도로 증가했다. 이러한 증가는 차량의 중량화 및 통행량의 증가에 기여했으며, 또한 구조물 사용 재료 측면에서는 고강도화, 장대화 등의 추세에 있게 되었다. 일단 구조물이 완성되어 사용에 들어가면 구조물은 끊임없이 크고 작은 사용하중 하에 놓이게 된다. 그러나 이러한 끊임없이 반복되는 사용하중 하에서도 갑작스런 취성 파괴가 보고되고 있는 실정이다. 이러한 점으로 미뤄 볼 때 피로에 대한 정량화 되고 신뢰성 있는 설계 및 검토 방법이 필요하게 되며, 유지관리 면에서도 체계적이고 경제적인 관리가 가능하며 적절한 계획 수립 또한 가능하게 되리라 생각된다. 구조물을 건설하는 과정을 들여다보면 설계 시 내제되어 있는 재료의 불확실량 그리고 시공 시 발생하는 시공 상의 불확실량에 이르기까지 다양하고 많은 경우의 불확실량을 내포해 있다. 특히 피로파괴에 대해서는 크기가 작은 반복적인 사용하중 하에서 예기치 못한 취성파괴가 보고되고 있는 실정이다. 이렇듯 불확실량의 제어를 정량화 되지 않은 안전율 개념에 의한 제어만으로는 많은 부족함을 느끼게 된다. 이러한 주를 이루는 설계의 경우에는 확률로 따졌을 때 몇 십년, 몇 백년에 발생할지도 모르는 경우를 반영한 설계가 될 수 있음을 볼 때 너무나도 비효율적이며 비경제적인 설계가 될 수도 있다. 따라서 선진국의 여러 나라들이 이러한 비효율성을 해결하고 정량화된 신뢰성을 확보할 수 있는 구조물건설에 눈을 돌려 주장되고 있는 것이 신뢰성해석이다. 이러한 주장과 맞물려 피로에 대한 정량적인 신뢰성 확보를 하고 더불어 구조물의 대형화와 장대화 추세를 미뤄 볼 때 신뢰성해석에 의한 피로 검토가 필요하다.

1.2 연구내용 및 방법

본 연구는 적절한 값을 갖는 플레이트거더교를 선정 한 후 AASHTO-LRFD 활하중을 재하한 후 구조검토를 수행하였다. 피로신뢰성해석에 필요한 각종데이터 값의 확실적인 값은 국내외 문헌에 제시된 값들 중 적정하다고 판단되는 값을 취했으며, 특히 피로해석에 사용될 활하중 값들은 Nowak(1993)값을 사용하였다. 또한 피로 신뢰성해석 방법에 있어서는 피로 분포 특성인 비선형분포 해석에 용이한 Rackwitz -Fiessler 신뢰성지수방법(Rackwitz & Fiessler, 1978)을 사용하였다. 그리고 피로신뢰성해석을 위한 교량 모델은 플레이트 거더교를 채택한 후 각종자료 등에 의해 피로에 제일 취약한 것으로 제시되는 용접부 상세부재(Fig 2.1)를 피로에 대한 신뢰성 해석 대상으로 선정하였다. 또한 신뢰성해석의 변수는 시간과 거더 간격, 모멘트 비, 거더분배계수 비, 중량계수 비를 고려하여 실시했다. 본 논문을 보면 아래와 같이 6개의 구성으로 되어있다.

I 장에서는 본 연구에 대한 배경 및 목적에 대해 서술하였으며 II장에서는 신뢰성이론에 대한 부분이 언급 됐으며 III장에서는 피로에 대한 이론과 파괴개념 그리고 피로평가 개념, 그리고 IV장에서는 피로신뢰성 해석에 필요한 피로하중의 도입과 피로에 저항하는 플레이트거더교를 제안했으며 V장에서는 피로해석 한계상태에 포함되는 각종 변수들의 확률특성과 이를 이용하여 신뢰성지수를 산정 했으며 마지막으로 VI장에서는 본 연구에서 얻어진 결과를 종합하여 결론을 도출하였다.

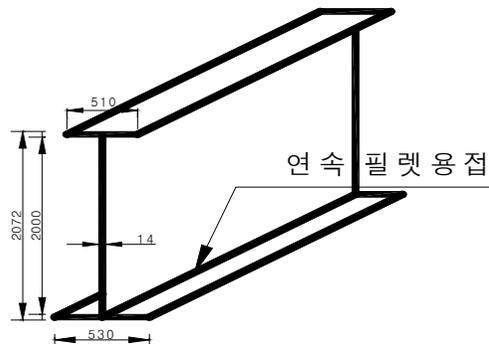


Fig 2.1 피로검토 상세부재

II. 신뢰성이론

2.1 개요

설계자가 구조물 설계에 있어서 예상하여 반영하는 설계하중과 실제 하중의 차이 또는 예상한 저항치와 실제 저항치의 차이 그리고 예상하는 시공성과 실제 시공상의 차이 등의 불확실량 등을 정량화 된 값으로 제어 한다는 것은 비효율적이며 동일한 안전성을 확보하기에도 무리가 따른다. 따라서 제기되고 있는 이론이 신뢰성해석 이론이다. 신뢰성 해석 이론이란 하중과 저항의 매개변수에 내재하는 이러한 불확실량을 고려한 확률론적 설계이론으로 불확실량 값과 실제 값과의 오차를 줄여서 보다 정확한 결과를 예측하여 합리적인 근거를 제시하는데 있다고 할 수 있다.



2.2 한계상태함수

구조물에 작용하는 하중과 저항을 각각 Q 와 R 이라 할 때 안전여유(Safety Margin)를 $g=R-Q$ 로 표현 가능하며 이때 g 를 한계상태 함수라 하며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} g = R - Q > 0 & : \text{안전영역} \\ & = 0 : \text{한계상태} \\ & < 0 : \text{파괴영역} \end{aligned} \quad (2.1)$$

한계상태함수 g 는 일반적으로 식 (2.1)과 같은 수학적 모델로 나타낼 수 있다.

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (2.2)$$

여기서 X_i 는 확률변수들으로써 하중효과, 저항효과, 영향계수, 재료의 성질, 기하학적 형상 등이 포함된다.

기본 확률변수들에 의한 벡터공간은 한계상태함수에 의해 식 (2.1)과 같이 안전영역과 파괴영역, 안전영역과 파괴영역의 경계가 되는 한계상태로 구분된다. 따라서 구조부재의 파괴확률 P_f 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_f &= P [g(R, S) \leq 0] \\ &= P(R \leq S) \\ &= P(R - S \leq 0) \end{aligned} \quad (2.3)$$

저항 R 의 확률밀도함수(probability density function, PDF)를 $f_R(R)$ 이라 하고 하중 Q 의 확률밀도함수를 $f_Q(Q)$ 라고 하면 한계상태 함수도 확률변수의 함수가 되어 g 의 분포를 그림 2.1 과 같이 나타낼 수 있다.

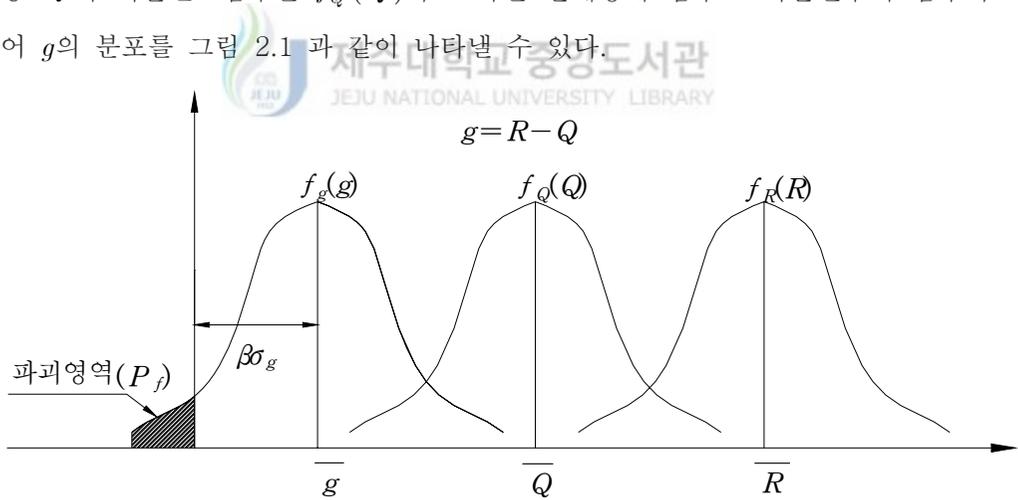


Fig 2.1 하중과 저항 및 한계상태 함수의 PDF

파괴확률은 초과 확률과 같이 생각할 수 있으므로 P_f 를 한계상태확률(Limit State Probability)이라고 말한다. 여기서 말하는 한계상태란 안전과 파괴의 경계

점으로 하중효과가 저항효과를 초과하였을 때 설계된 구조물이 본래의 기능을 상실하는 상태를 의미하며, 안전성, 사용성, 경제성 등의 초점에 따라 극한 한계상태, 사용성 한계상태, 피로 한계상태의 세 가지로 분류 될 수 있다. 여기서 먼저 극한 한계상태는 하중 수행 능력의 상실과 관련 되어있다. 하중이 한계 값을 초과 할 때 구조부재는 더 이상 하중을 지탱 할 수 없는 상태를 말한다. 그리고 사용성 한계상태는 그 기능이 본래의 사용 능력 발휘와 관련 되어 있다 사용성의 한계 값이 초과 될 때 구조물은 그 본래의 기능을 수행 할 수 없으며 그 수행 능력이 제한된다. 사용성 한계 상태는 구조물의 일체성 또는 내하력과 반드시 관련되어 있는 것은 아니다. 마지막으로 본 논문에서 다루진 피로한계상태를 보면 피로 한계상태는 손상의 누적과 관련되어 있으며 크고 작은 반복적인 하중하에서 궁극적으로 파괴된다. 피로한계상태에서 재하 되는 하중은 극한하중보다 작지만 계속 반복되면서 구조물의 부재가 파괴된다.

2.3 신뢰성해석방법



2.3.1 신뢰성지수

신뢰성은 구조물의 파괴확률인 P_F 에 의해 수치적으로 평가를 한다. 하지만 실제적인 응용을 위해 구조물의 안전도를 측정해야 하는데 파괴확률과 관련된 안전지수 또는 신뢰성 지수라 불리는 β 를 사용한다.

신뢰성 지수 β 와 파괴확률 P_F 의 관계는 식 (2.5)와 같이 정립될 수 있는데 여기서 Φ 는 표준 정규분포확률함수이다.

$$P_F = \Phi(-\beta) \text{ 또는 } \beta = -\Phi^{-1}(P_F) \quad (2.5)$$

신뢰성 지수와 파괴 확률과의 관계는 Table 2.1과 같고 임의의 구조물에 대한 신뢰도 P_s 는 식 (2.6)과 같다.

$$P_s = 1 - P_f \quad (2.6)$$

Table 2.1 신뢰성 지수별 파괴확률

신뢰성 지수, β	신뢰성, $P_s = 1 - P_f$	파괴확률, P_f
0.0	0.500	0.5
0.5	0.691	0.309
1.0	0.841	0.159
2.0	0.9772	0.0228
2.5	0.99379	0.00621
3.0	0.99865	0.00135
3.5	0.999767	0.000233
4.0	0.9999683	0.0000317
5.0	0.999999713	0.000000287
6.0	0.99999999013	0.00000000987

정규분포를 가지는 기본확률변수인 저항 R 과 하중 Q 로부터 각각에 대한 표준 변량을 정식화하면 식 (2.7)과 같다.

$$r = \frac{R - \bar{R}}{\sigma_R}, \quad q = \frac{Q - \bar{Q}}{\sigma_Q} \quad (2.7)$$

여기서, r, q = 축약변수, $\bar{R}, \bar{Q}, \sigma_R, \sigma_Q$ = R 과 Q 의 평균과 표준편차

저항 R 과 하중 Q 를 축약변수 r 과 q 로 나타내면 식 (2.8)과 같다.

$$R = \bar{R} + r \sigma_R, \quad Q = \bar{Q} + q \sigma_Q \quad (2.8)$$

식 (2.8)을 한계상태함수 $g = R - Q$ 에 대입하면 식 (2.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$g = \bar{R} + r\sigma_R - \bar{Q} - q\sigma_Q = 0 \quad (2.9)$$

식 (2.9)를 축약변수 r 과 q 의 좌표공간상에 도시하면 Fig 2.3과 같이 직선으로 나타난다.

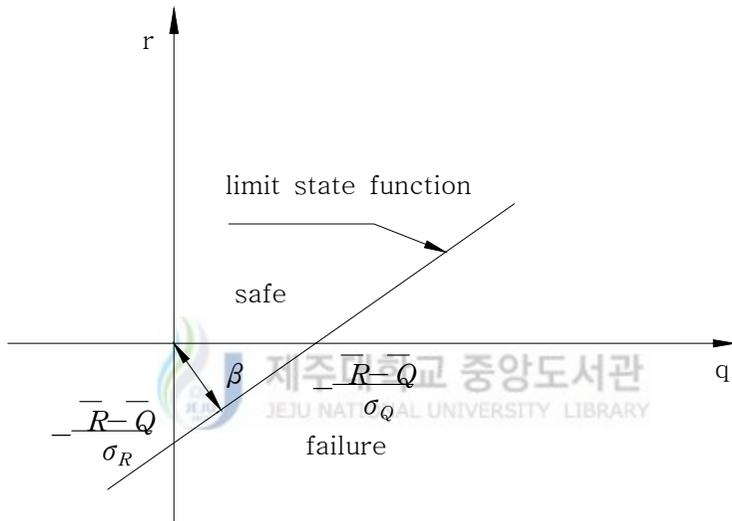


Fig 2.3 축약변수 좌표공간의 신뢰성 지수

신뢰성 지수는 Fig. 2.3에서처럼 원점으로부터 직선까지의 가장 짧은 거리로 정의된다. 이러한 정의는 Hasofer-Lind 신뢰성지수 즉, H-L β 라고 한다.

Hasofer-Lind 신뢰성 지수는 식 (2.10)과 같은 공식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (2.10)$$

2.3.2 평균 1계 2차 모멘트법(MFOSM)

평균 1계2차모멘트법(Mean First Order Second Moment Method, Cornell, 1970)신뢰성지수 방법은 정규분포로 이루어진 확률변수들의 비선형 항으로 표현된 한계상태방정식 $M=g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ 을 확률변수의 평균치에 대하여 Taylor 급수전개의 1차 항을 고려하여 2차 모멘트인 평균과 표준편차만으로 신뢰성지수 β 를 구할 수 있는 방법이다. 한계상태방정식은 신뢰성해석을 수행하기 위해 Taylor급수 전개를 통한 선형화가 되어야 하며 한계상태선형점 $M=g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ 를 선형화 하여 2차 항 이상을 무시하면 다음과 같다.

$$M = g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) + \sum (X_i - X_i^*) \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{X_i^*} \quad (2.11)$$

여기서 X_i^* 를 평균치와 같다고 하면 평균, 표준편차, 신뢰성지수, 파괴확률을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_M = g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) \quad (2.12)$$

$$\sigma_M = \left[\sum \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (2.14)$$

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2.15)$$

위처럼 반복계산 과정이 필요치 않고 파괴확률을 구할 수 있는 장점이 있지만 모든 확률변수가 정규분포이어야 하며 한계상태방정식의 확률변수가 모두 정규분포이거나 모두 대수정규분포인 경우를 제외하면 신뢰성지수는 근사 값이다. 또한 동일한 파괴에 대한 한계상태방정식일지라도 형태가 어떠한가에 따라 서로 다른 확률이 계산되는 문제점이 있다.

2.3.3 Hasofer-Lind 신뢰성 지수 방법

MFOSM 신뢰성 지수법은 한계상태함수에서 확률변수의 평균점에서 선형화시켰으며 서로 다른 파괴확률이 도출되는 중대결점을 안고 있었으나 Hasofer-Lind(Ha-sofer and Lind,1974)의 신뢰성 해석 방법에서는 이를 보완하기 위해 기본변수를 표준화 변수로 변환시켜 β 를 계산하는 방법을 제시 했다. 위에서 제시한 한계상태방정식과 그 변수를 이용하여 R과 S를 변수 X_i 로 놓으면 아래와 같이 전개된다. 변수 X_i 를 평균이 0이고 표준편차가 1을 갖는 표준화 변량으로 변환한다.

$$Z_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\sigma_{X_i}} \quad (2.16)$$

새로 변환된 변수에 대한 한계상태는 다음과 같다.

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = g(Z_1, Z_2, \dots, Z_n) = 0 \quad (2.17)$$

이때 $g \leq 0$ 인 경우에 발생한다. 이 내용은 Fig 2.4와 같다.

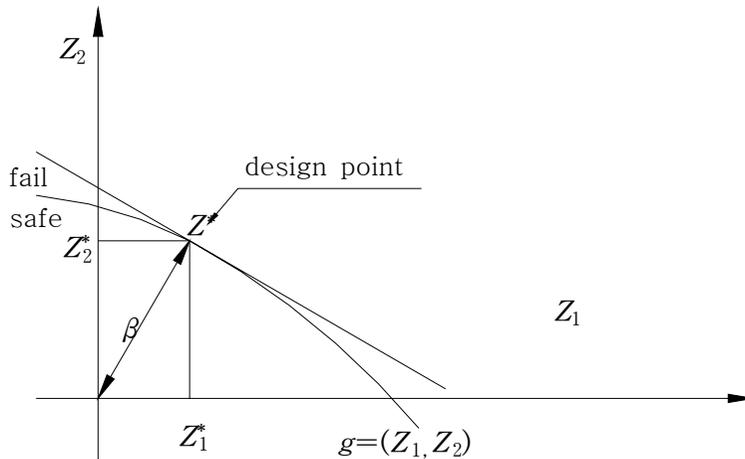


Fig 2.4 Hasofer-Lind 신뢰성 지수법

따라서 신뢰성 지수 β 는 $g=0$ 인 파괴 면과 원점간의 최단 거리로 정의 할 수 있으며 이에 대응하는 파괴면 $g(\cdot)=0$ 상의 임의 점 $(X_1^*, X_2^*, X_3^*, \dots, X_n^*)$ 을 설계 점으로 하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha_i = \frac{-\left. \frac{\partial g}{\partial Z_i} \right|_{z^*}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial Z_k} \right|_{z^*} \right)^2}}$$

$$Z_i^* = \beta \alpha_i \tag{2.21}$$

$$g(z_1^*, \dots, z_n^*) = 0 \tag{2.22}$$

2.3.4 Rackwitz-Fiessler 신뢰성 지수 방법

변수 X_i 가 정규분포이고, 한계상태함수 $g(\cdot)$ 가 선형인 경우에만 정확한 값을 얻을 수 있으므로 이러한 문제의 해결책이 Rackwitz-Fiessler(Rackwitz and Fiessler, 1978) 신뢰성 지수 방법이라 할 수 있다. 변수 X_i 의 분포를 알고 있거나 가정할 수 있는 경우에는 비정규분포 X_i 를 정규분포로 변환시켜 표준화 공간에서 수렴할 때 까지 반복 시행시켜 값을 얻을 수 있다. 이 방법은 비정규 분포를 정규분포로 함에 있어 파괴 면에 임의 점에 대응되는 설계점 x_i^* 에서 변수 x_i 의 정규 분포로 근사화 하여 얻을 수 있다. 변수 x_i^* 에서 등가 정규변수의 평균과 분산은 실제 변수의 확률밀도나 누적 확률 밀도함수와 근사정규변수가 같으므로 아래와 같은 과정으로 진행시킬 수 있다.

1. 한계상태함수 $g = R - Q$ 에 대해 경계상의 임의의 설계점 하나를 선정해 (R^*, Q^*) 로 정의한다. R^* 와 Q^* 를 정의할 때 R 과 Q 의 평균의 중간 값으로 가정하는 게 수월하다.

$$g = R - Q \quad (2.23)$$

$$R^* = Q^* = \frac{\bar{R} + \bar{Q}}{2} \quad (2.24)$$

2. 비정규 분포인 F_R, F_Q 를 설계 점에서 등가의 정규분포인 F'_R, F'_Q 로 근사 화 시킨다.

$$f'_R(R^*) = f_R(R^*) \quad (2.25)$$

$$F'_R(R^*) = F_R(R^*) \quad (2.26)$$

$$f'_Q(Q^*) = f_Q(Q^*) \quad (2.27)$$

$$F'_Q(Q^*) = F_Q(Q^*) \quad (2.28)$$

여기서, $F_R(R^*)$: 실제 저항변수의 누적분포함수

$F_Q(Q^*)$: 실제 하중변수의 누적분포함수

$F'_R(R^*)$: 정규분포로 선형화된 저항변수의 누적분포함수

$F'_Q(Q^*)$: 정규분포로 선형화된 하중변수의 누적분포함수

\bar{R}' , σ'_R 를 근사정규분포 F'_R 의 평균 및 표준편차이고, \bar{Q}' , σ'_Q 를 근사정규분포 F'_Q 의 평균 및 표준편차라 하면, 실제 분포와 등가 정규분포와의 관계는 식 (2.29)에서 식 (2.32)와 같다.

$$f'_R(R^*) = \frac{\phi\left(\frac{R^* - \bar{R}'}{\sigma'_R}\right)}{\sigma'_R} = f_R(R^*) \quad (2.29)$$

$$F'_R(R^*) = \Phi\left(\frac{R^* - \bar{R}'}{\sigma'_R}\right) = F_R(R^*) \quad (2.30)$$

$$f'_Q(Q) = \frac{\phi\left(\frac{Q^* - \bar{Q}'}{\sigma'_Q}\right)}{\sigma'_Q} = f_Q(Q^*) \quad (2.31)$$

$$F'_Q(Q^*) = \Phi\left(\frac{Q^* - \bar{Q}'}{\sigma'_Q}\right) = F_Q(Q^*) \quad (2.32)$$

식 (2.29)로부터 식 (2.33)으로 정리할 수 있고, 식 (2.30)으로부터 식 (2.34)로 정리할 수 있다.

$$\sigma'_R = \frac{\phi\left(\frac{R^* - R'}{\sigma'_R}\right)}{f_R(R^*)} \quad (2.33)$$

$$\frac{R^* - R'}{\sigma'_R} = \Phi^{-1}[F_R(R^*)] \quad (2.34)$$

식 (2.34)를 식 (2.33)에 대입하면 식 (2.35)로 나타낼 수 있고 식 (2.34)는 변형하면 식 (2.36)과 같다.

$$\sigma'_R = \frac{\phi(\Phi^{-1}[F_R(R^*)])}{f_R(R^*)} \quad (2.35)$$

$$\bar{R}' = R^* - \sigma'_R \Phi^{-1}[F_R(R^*)] \quad (2.36)$$

위의 과정을 하중에 대해서도 같은 방법으로 적용하면 식(2.37)과 식(2.38)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma'_Q = \frac{\phi(\Phi^{-1}[F_Q(Q^*)])}{f_Q(Q^*)} \quad (2.37)$$

$$\bar{Q}' = Q^* - \sigma'_Q \Phi^{-1}[F_Q(Q^*)] \quad (2.38)$$

3. 위 과정을 거친 후, 식 (2.39)를 이용하여 신뢰성 지수 β 를 계산할 수 있다.

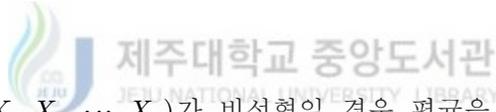
$$\beta = \frac{\overline{R}' - \overline{Q}'}{\sqrt{\sigma_R'^2 + \sigma_Q'^2}} \quad (2.39)$$

4. β 를 계산한 후에 식 (2.40)과 식 (2.41)을 이용하여 새로운 설계점 R^* 과 Q^* 을 계산한다.

$$R^* = \overline{R}' - \frac{\beta \sigma_R'^2}{\sqrt{\sigma_R'^2 + \sigma_Q'^2}} \quad (2.40)$$

$$Q^* = \overline{Q}' + \frac{\beta \sigma_Q'^2}{\sqrt{\sigma_R'^2 + \sigma_Q'^2}} \quad (2.41)$$

5. 위의 2,3,4 과정을 $R_{old}^* = R_{new}^*$ 와 $Q_{old}^* = Q_{new}^*$ 가 될 때까지 반복하여 계산한다.



한계상태함수 $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 가 비선형일 경우 평균을 초기 설계점으로 가정한 후($X_i^* = \overline{X}_i$), Taylor 급수를 사용하여 비선형 한계상태함수를 설계점에 대해 선형화 하면 식 (2.42)와 같이 나타낼 수 있고 신뢰성 지수 β 는 식 (2.43)과 같다.

$$g(\overline{X}_1, \overline{X}_2, \dots, \overline{X}_n) \cong g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) + \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{X_i^*} (\overline{X}_i - X_i^*) \quad (2.42)$$

$$\beta = \frac{g(\overline{X}_1', \overline{X}_2', \dots, \overline{X}_3')}{\sigma_g'} \quad (2.43)$$

식 (2.43)에서 σ_g' 는 식 (2.44)와 같이 나타낼 수 있고 새로운 설계 점은 식

(2.45)와 같다.

$$\sigma'_g = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \sigma_i \right)^2} \quad (2.44)$$

$$X_i^* = \bar{X}_i - \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \beta \sigma_i'^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \sigma_i \right)^2}} \quad (2.45)$$

위의 과정을 $X_{old}^* = X_{new}^*$ 가 될 때까지 반복하여 계산한다.

Fig 2.5는 Rackwitz-Fiessler 방법의 도해법을 설명한 것으로서 이 도해법에서 등가정규분포는 누적확률 분포도의 설계점에서 접선을 그어 결정한다.

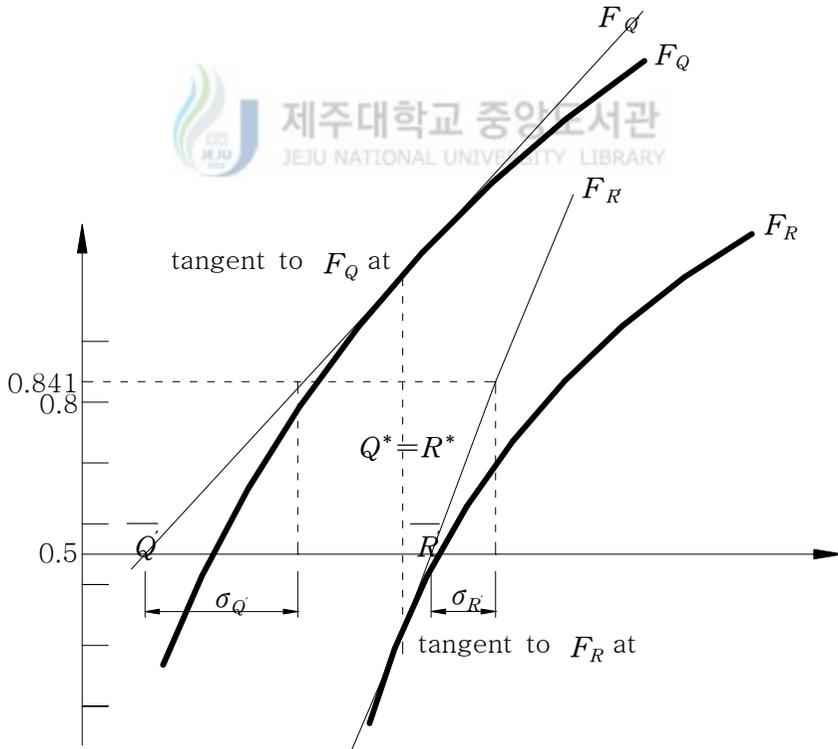


Fig 2.5 Rackwitz-Fiessler 방법의 도식

III. 피로파괴 및 평가이론

3.1 개요

구조물이 완성 후 사용 상태에 들어가면 구조물에서는 파괴하중보다 크기가 작지만 반복되는 변동하중으로 인하여 피로 손상이 발생하기 시작한다. 이러한 반복적인 하중은 지금 당장의 파괴를 야기시키지는 않지만 시간의 함수 속에서 어느 순간에 파괴될지 모르는 위험성을 내제시킨다. 보통 탄성응력 변동을 받는 구조부재에 대한 피로손상은 국부 응력이 구조재료의 항복응력을 초과하는 부분에서 발생한다. 일정한 반복회수의 하중변동 후에 누적 잔류된 손상은 손상된 부분에 균열발생 및 성장시킨다. 이처럼 피로손상 과정은 구조부재의 파괴원인이 되며, 응력집중이 심할수록 피로균열 발생시기가 앞 당겨진다. 피로에 의한 구조부재가 파괴에 이를시 이때까지의 누적된 응력의 반복회수를 피로수명(fatigue life)이라 한다. 구조물의 피로평가는 피로하중이 정하여졌을 경우 그 하중에 대한 응력이력 곡선을 관심 있는 구조부재에 대하여 구하게 된다. 구하여진 응력이력 곡선은 응력빈도 해석으로써 일반적으로 쓰이는 Rainflow Counting Method(일본강구조물의 피로설계지침 1989)를 이용하여 응력빈도를 계산하게 된다. 구하여진 응력빈도는 등가응력으로 바꾸어 S-N 곡선(Fig 3.1)에 적용시켜 피로수명을 평가하거나, 응력빈도 자체를 Miner의 누적손상이론에 근거하여 피로수명을 평가할 수 있다.

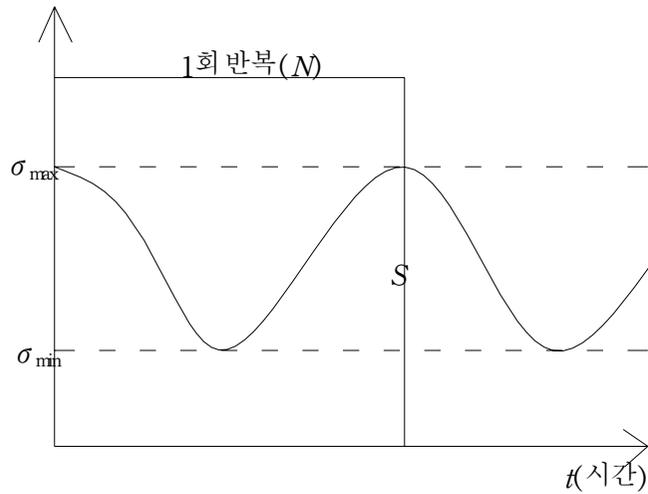


Fig 3.1 응력이력곡선

3.2 S-N 곡선식

강재의 파괴는 극한강도를 초과하는 하중에 의해서 일어날 뿐만 아니라 극한강도 또는 항복강도 이하인 하중의 반복 작용에 의해서도 파괴된다.. 지속적인 동하중을 받을 경우 정하중 조건에서 받을 수 있는 하중보다 훨씬 더 작은 하중에서 예상 외로 파괴되며 이러한 현상을 피로파괴(Fatigue Fractures)라 한다. 강재의 종류 또는 형상이 일정하면 어느 일정수준에 대하여 거의 일정한 반복횟수에서 피로파괴가 발생한다고 판단하는 것으로 알려져 있다. Wöhler 가 실시한 피로시험 결과 강구조물의 피로는 반복횟수(N)와 응력의 상한($\max \sigma$)과 하한($\min \sigma$)의 응력 범위($\Delta\sigma = \max \sigma - \min \sigma$)에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이를 도식화한 곡선을 S-N 곡선(Fig 3.2)이라 한다.

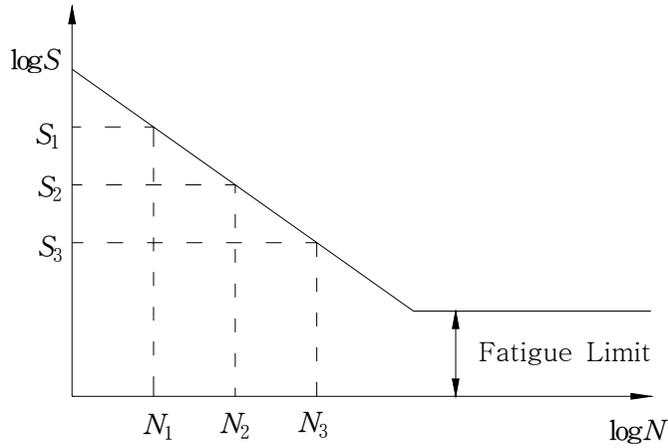


Fig 3.2 S-N 곡선

즉 응력범위 S 가 크면 파괴에 이르는 횟수 N 은 작다. 그러나 응력범위 S 가 작으면 파괴에 이르는 횟수 N 은 커진다. 여기서 말하는 응력범위란 등가응력범위를 말하며 변동응력이력과 같은 피로수명을 갖는 일정응력범위를 말하며, 다음과 같이 유도할 수 있다.



S-N선도의 관계식에서

$$N \cdot S^m = C \tag{3.1}$$

위의 식 (2.1.11)은 임의의 응력범위에 대해서 Miner의 선형피로손상법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum (n_i S_i^m) = C \tag{3.2}$$

여기서,

S_i : 공용기간 중에 받는 임의의 응력범위

n_i : S_i 에 대응하는 응력 반복회수

3.3 Miner 의 누적손상이론

S-N 곡선식에 따르면 Fig 3.2에서와 같이 S_1 의 응력이 N_1 횟수만큼 반복이 되었을 경우 그 강재는 피로파괴에 이르게 된다. 하지만 Miner Rule 에 의하면 S_1 의 응력이 n_1 횟수만큼 반복되었을 경우에는 그 강재는 피로파괴에 이르지 않지만, n_1 횟수만큼의 피로손상이 그 강재에 남아있게 된다. Miner Rule 은 앞의 설명과 같이 S_1, S_2, S_3 의 응력범위가 각각 n_1, n_2, n_3 횟수만큼 반복되었을 경우 각각의 경우에 피로손상이 선형으로 누적된다는 가정에 근거한 이론이 된다. 예를 통하여 살펴보면 다음과 같다.

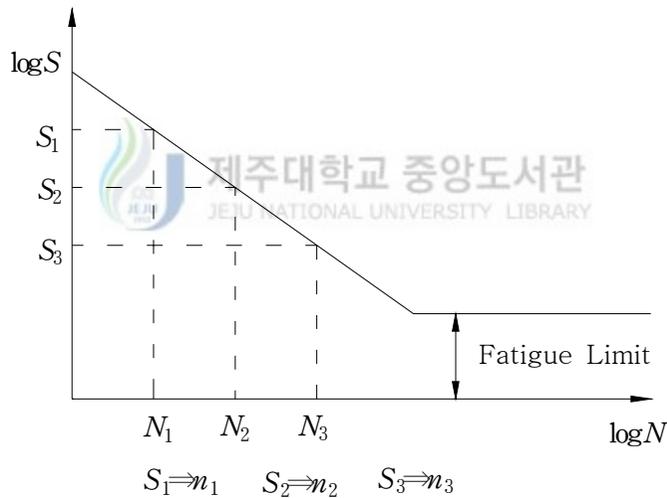


Fig 3.3 Miner Rule 이론의 개요

여기에서 S_1, S_2, S_3 의 응력범위에 대한 각각의 피로수명과 피로손상은 N_1, N_2, N_3 와 n_1, n_2, n_3 라고 하면 그 피로손상의 누적은 식 (3.3)으로 표현될 수 있다.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1.0 \quad (3.3)$$

위의 식 (3.3)을 일반화 하면 다음과 같다.

$$D_f = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1.0 \quad (3.4)$$

위의 식 (3.4)에서 보는 바와 같이 응력범위 분포에 대한 손상비(damage ratio) D_f 가 1이 될 때 비로소 구조부재가 파괴된다.

IV. 피로하중 및 피로저항 교량 선정

4.1 피로하중

4.1.1 Schilling의 피로하중모델

Schilling(1982)의 하중모델은 실제 통행트럭 분포와 등가의 축 중량을 갖는 단일 피로트럭을 제시했으며 등가 총중량 W_{eq} 는 다음 식에 의해 계산하였다.

$$W_{eq} = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i W_i^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.1)$$

여기서, α_i 총중량 W_i 인 차량의 통행비율

W_i 차량 총중량의 범위

Schilling은 위의 식에 의하여 계산된 총중량을 갖는 피로설계트럭을 아래와 같이(Fig 4.1) 제안하였고 축 중량은 AASHTO HS15 트럭을 기준으로 하였다.

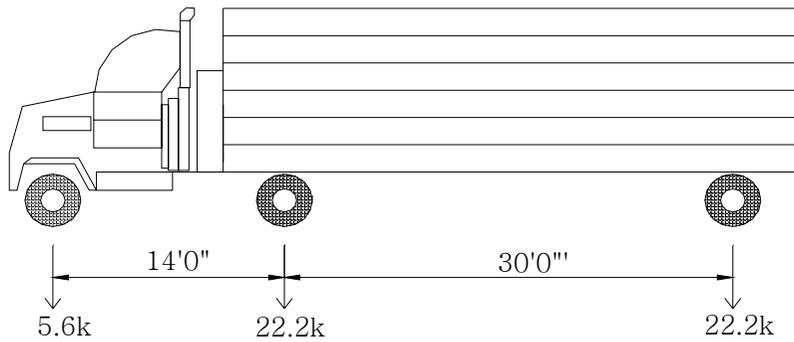


Fig 4.1 Schilling의 피로설계트럭

또한 등가 응력 반복회수 N_e 를 다음과 같이 표현했다.

$$N_e = 1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{ri}}{S_{rp}} \right)^B \quad (4.2)$$

여기서

N_e : 하나의 트럭에 의해 발생된 최대응력범위에 대응되는 등가응력 반복 회수

n : Rainflow 분석에 따른 반복회수

S_{ri} : i 번째 응력범위의 크기

S_{rp} : 최대응력범위의 크기

B : S-N선도의 경사(대부분 교량상세에 대해 $B=3$)

4.1.2 Raju Moses 와 Schilling의 피로하중모델

이 모델은 Nyman과 Moses가 한계상태함수 $g = D_f - D_{(t)}$ 라는 신뢰성 이론에

근거하여 제안한 모델을 근거로 하여 개발되었다. 여기서 $D(t)$ 는 시간 t 까지 누적 손상이고, D_f 는 파괴를 일으키는 손상이다. Nyman과 Moses의 모델은 식(4.3)과 같다.

$$D(t) = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^{V_t} S_i^3 \quad (4.3)$$

여기서 C S-N선도의 절편

V_t : 1일 트럭 통행량 또는 ADTT

t 경과시간(day)

S_i : i 번째 트럭으로 인한 응력범위

$$S_i = \frac{\text{Girder Moment } i}{\text{Girder Section Modulus}} = \frac{M_i W_i G_i I_i H_i}{S_x} \quad (4.4)$$

여기서 M_i 지간형식, 축 간격, 차량 총중량의 분배효과

W_i : i 번째 트럭의 차량 총중량

G_i 거더 분배 계수

I_i : i 번째 트럭의 충격계수

H_i 차두 간격 계수

따라서 파괴함수는 다음과 같다.

$$g = D_f - \frac{V_t}{N_D} \frac{M^3 G^3 I^3 H^3}{S^3} L_0 \quad (4.5)$$

M : 설계트럭과 실제 통행트럭의 축 간격 계수 비

G, I, H, S 설계 값에 대한 평균값의 비

N_D : 부재설계를 위한 설계 응력반복회수

이러한 모델을 개선하여 Nyman과 Moses(1985)에 의해 다음식이 제안 되었다.

$$Z = \frac{XN_T}{365(ADTT)C} \left(\frac{\gamma Z_x S}{W G I M H} \right)^3 - Y_s \quad (4.6)$$

여기서 γ : 안전계수

C : 트럭 요소당 응력주기

Z_x : 무작위 변수

W : 트럭 중량 계수

X : Miner`s Rule의 불확실성

N_T : 교량수명(반복회수)

Y_s : 기대수명(year)

제안된 피로 설계트럭은 Fig 4.2와 같다.

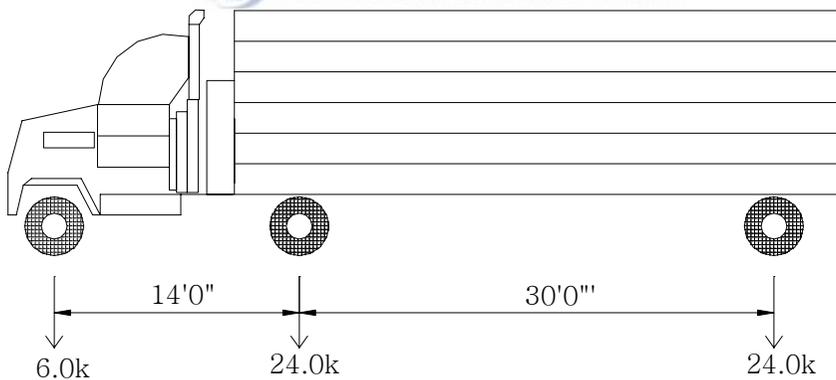


Fig 4.2 Raju의 피로설계트럭

4.2 피로저항 교량 선정

이번 장에서는 피로해석 대상인 플레이트 거더교를 선정 한 후 구조 안정성 검토를 실시했다. 플레이트 거더교는 주거더와 수직 브레이싱(sway bracing)이 격자로 연결된 격자구조 형식이며, 또한 플레이트 거더교의 단면력 계산을 위한 구조 해석 방법에는 격자구조해석, 들보이론, 유한요소법 등을 여러 가지가 있지만, 본 장에서는 하중 분배계수 개념으로 주거더의 단면력을 산출하였다. 구조형식이 I형 단면 플레이트 거더교이며 설계하중은 AASHTO LRFD HL-93, 교량지간이 9~36m이고 폭원이 7.0m, 총폭은 7.8m이다 선정한 플레이트 거더교의 단면도는 Fig 4.3과 같다. 교량의 제원은 세 개의 I형 플레이트 거더(Fig 4.4)를 갖는 구조이며 콘크리트 단위중량은 $2,500 \text{ kg/m}^3$, 지복 및 난간하중은 330 kg/m 철근의 항복강도는 $3,000 \text{ kg/cm}^2$ 콘크리트 압축강도 240 kg/cm^2 240, 콘크리트 탄성계수 $270,000 \text{ kg/cm}^2$, 플레이트 거더 강종은 SM400, 충격계수 0.15, 윗하중 분포 폭 1.392m, 바닥판의 최소 두께는 22cm로 했다. 이상 언급한 재료의 제원은 Table 4.1과 같다. 플레이트 거더의 단면설계에 있어서 내측 거더와 외측 거더의 휨모멘트 및 전단력 크기를 비교하면 거의 비슷하고, 내측 거더의 응력이 다소 크므로 내측 거더에 대하여 단면을 설계하고 외측 거더에도 동일하게 적용했다. 주 거더의 높이는 치짐을 제한하는 높이 2.0m로 했다. 복부판의 두께는 SM400 강종 비합성 플레이트 거더일 경우를 참고하여 $t=14 \text{ mm}$ 를 적용했다. 활하중모델은 LRFD 설계기준 규정에 의해 HL-93 설계트럭하중과 설계차선하중 및 설계탠덤하중과 설계차선하중을 재하하여 그중 큰 값을 설계 활하중 모델트로 취하여 적용했다. 플레이트 거더의 상세는 Fig 4.5와 같다.

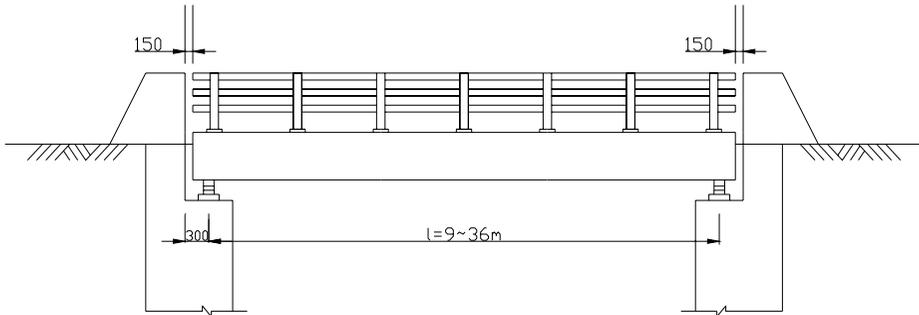


Fig 4.3. 플레이트 거더교 종단면도

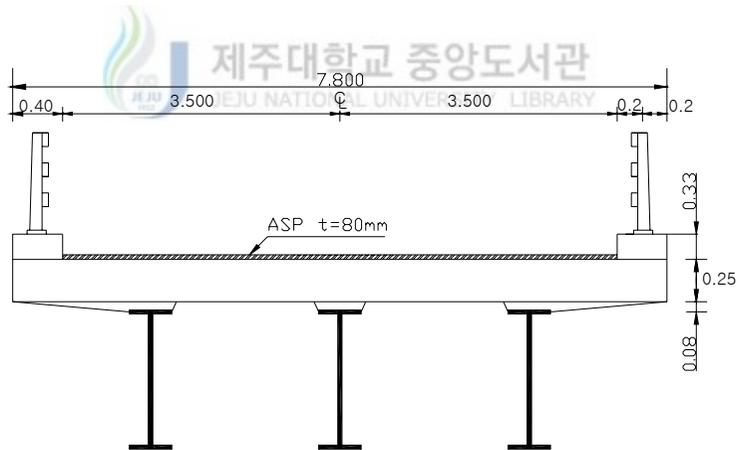


Fig 4.4 플레이트 거더교 횡단면도

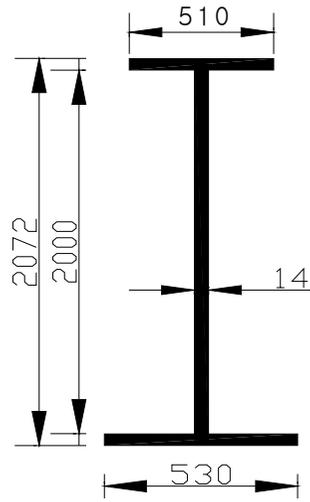


Fig 4.5 I단면 상세

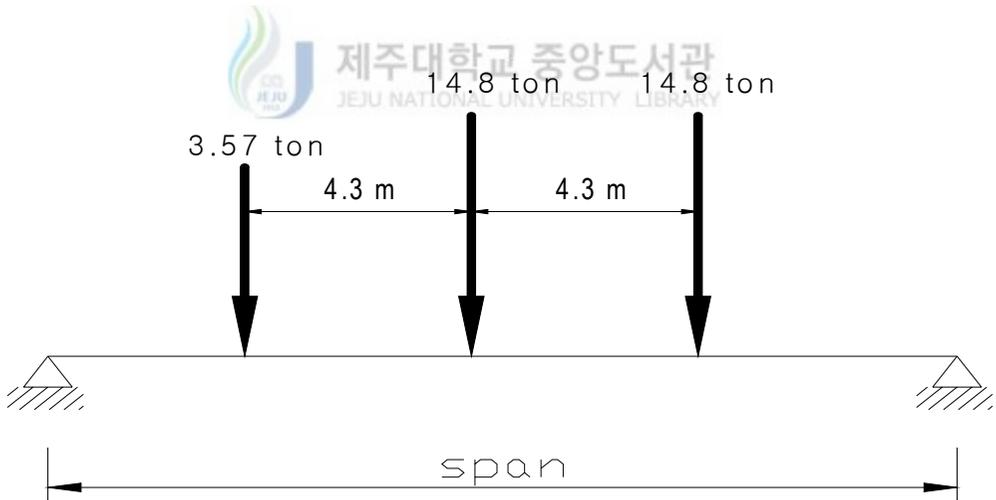


Fig 4.6 HL-93 트럭하중

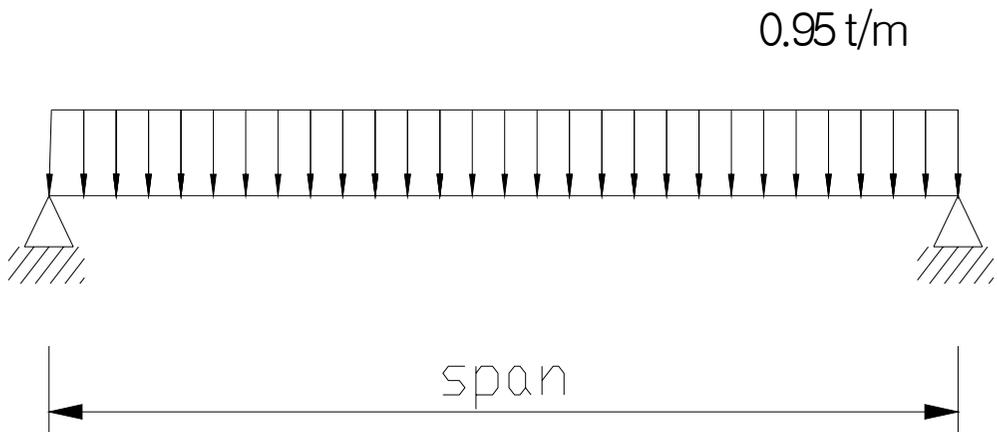


Fig 4.7 HL-93 차선하중



Fig 4.8 HL-93 탠덤하중

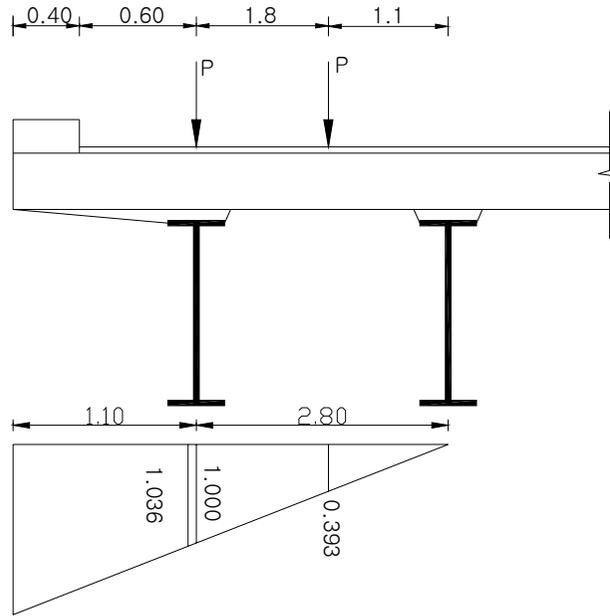


Fig 4.9 윤희중 재하상태
 제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 4.1 교량형식과 제원

교량 형식	플레이트 거더교	플레이트 거더 수	3
교량폭(B)	7.8 m	지간(L)	9~36m
단위중량 $w_{con/c}$	$2,500 \text{ kg/m}^3$	단위중량 w_{asp}	$2,300 \text{ kg/m}^3$
지복 및 난간하중	330 kg/m	압축강도 f_{ck}	240 kg/cm^2
철근 항복강도 f_y	$3,000 \text{ kg/cm}^2$	탄성계수 E_c	$270,000 \text{ kg/cm}^2$
충격계수	0.15	거더 강종	SM400
윤희중 분포폭	1.392m	바닥판 두께	22cm

V. 피로 신뢰성해석

5.1 확률특성

피로 신뢰성을 결정하기 위하여 구조부재의 피로저항 능력을 산정해야한다. 그러므로 본 연구에서는 플레이트거더교의 용접부 피로에 대하여 고려하였고, 구조 계산방법은 ASHTO-LRFD(1998)의 규정에 의해 계산을 하였다. 교량을 단순지간으로 하여 내측 거더에만 적용하였다. 교량은 플레이트거더교 형식이며 지간을 9m에서 36m까지 9m간격으로 증가시켜 적용시켰다. 거더 간격은 1.2m부터 1.8m까지 0.20m간격으로 3가지를 고려하였다.

교량 주형이 피로에 저항하는 기본적인 성능함수는 다음 식과 같다. 이것은 시간 t 까지의 누적손상을 나타낸 것이며, 성능함수를 하중모델로 바꾸기 위해 응력범위와 파괴를 일으키는 반복 횟수에 나타낸 식 ($S-N$ curve식)을 대입하는데 강제용접연결부의 경우는 식(5.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = D_f - D(t) \quad (5.1)$$

$$g = D_f - \sum_j^{V_j} \frac{1}{N_j} \quad (5.2)$$

여기서 D_j : failure damage

$$N_j = \frac{c}{S_j^b} \quad (5.3)$$

여기서 b, c 는 상수 (보통 $b=3.0$)

식 (5.3)을 식(5.2)에 대입하면 식 (5.4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 g &= D_f - \frac{1}{c} \sum S_j^b \\
 &= D_f - \frac{1}{c} \sum S_j^{3,0}
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

V : 일 트럭통행량 ($ADTT$)

t : 사용기간

여기에 하중모델을 조합하여 표시하면, 차량에 의한 활하중 효과로부터 피로손상에 대한 신뢰성함수를 식5.5와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{M}{Z_X} \tag{5.5}$$

S : 응력범위

M : 모멘트

Z_X : 단면계수



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$S = \frac{m_j g_j h_j w_j}{Z_X} \tag{5.6}$$

m_j : 차량축간격계수

g_j : 주형분배계수

i_j : 충격계수

h_j : 차량간격계수

w_j : 차량중량

$$g = D_f - \frac{1}{c} \sum \left(\frac{m_D g_D i_D h_D w_D}{Z_X} \right)^3 \quad (5.7)$$

(5.7)에서 단면계수 Z_X 는 설계차량에 의해 설계된 값으로서, 다음 식 (5.8)에 의해서 설계차량에 의한 하중효과 식에 대입함으로써 소거 될 수 있다.

$$S_D = \frac{m_D w_D g_D i_D h_D}{Z_X} \quad (5.8)$$

S_D : 설계차량에 의한 응력범위

m_D : 설계차량의 차량 축 간격계수

g_D : 설계 주형분배계수

i_D : 설계 충격계수

h_D : 설계 차량간격계수

w_D : 설계 차량중량

상수 c 는 설계반복횟수 (N_D)와 이에 해당되는 응력범위 (S)에 의해서 식(5.9)와 같이 산정 할 수 있다.

$$c = N_D S^3 \quad (5.9)$$

결국 성능 함수는 (5.10) ~ (5.12)와 같이 표현된다.

$$g = D_f - \frac{1}{N_D} \sum \left| \frac{\left(\frac{m_j}{m_D} \right) \left(\frac{w_j}{w_D} \right) \left(\frac{g_j}{g_D} \right) \left(\frac{i_j}{i_D} \right) \left(\frac{h_j}{h_D} \right)}{\frac{S_n}{S_D}} \right|^3 \quad (5.10)$$

$$g = D_f - \frac{Vt}{N_D} \left| \left(\frac{MGIH}{S} \right)^3 \frac{1}{Vt} \sum_j \left(\frac{w_j}{w_D} \right)^3 \right| \quad (5.11)$$

$$g = D_f - \frac{Vt}{N_D} \left(\frac{MGIH}{S} \right)^3 L_0 \quad (5.12)$$

여기서

$$L_0 = \frac{1}{Vt} \sum_j \left(\frac{W_j}{W_D} \right)^3 \quad (5.13)$$

M : 임의 통행트럭과 설계차량의 차량 축 간격계수 비

G : 임의 통행트럭과 설계차량의 주형 분배계수 비

I : 임의 통행트럭과 설계시의 충격계수 비

H : 임의 통행트럭과 설계시의 차량간격계수 비

S : 설계반복횟수의 응력범위와 설계응력범위 비

Vt : 1일 통행 트럭 량

t : 사용기간

N_D : 설계응력반복횟수

5.2 피로신뢰성지수 산정절차

본 절에서는 플레이트거더교의 피로에 대한 신뢰성 지수를 산정하였다.

본 연구에 사용된 각 변수들의 통계치는 한승환(1991), Nowak(1993)의 연구 문헌의 통계 자료를 활용 하였다. Table 5.1은 각 변수의 통계자료를 정리한 것이다.

Table 5.1 확률변수의 통계 값

	확률분포	평균	변동계수
D_f (파괴손상)	normal	1.000	0.150
M (차량축간격계수비)	lognormal	1.122	0.027
L_0 (중량계수비)	lognormal	0.396	0.227
f (충격계수비)	lognormal	1.110	0.110
G (거더분배계수비)	lognormal	0.216	0.018
H (차량간격계수비)	lognormal	1.551	0.044
S (응력범위비)	lognormal	0.707	0.061

피로에 대한 한계상태식으로는 앞 절에 소개된 한계상태식을 사용했다.

$$g(x) = D_f - \frac{Vt}{N_D} \left(\frac{MGIH}{S} \right)^3 L_0 \quad (5.14)$$

식 (5.14)는 비선형 함수이므로 Taylor 급수법을 사용하여 설계점에 대해 선형화 시키면 식 (4.3)과 같다.

$$\begin{aligned} g(x) = & D_f^* - \frac{V^* t^*}{N_D^*} \left(\frac{M^* G^* I^* H^*}{S^*} \right)^3 L_0^* + \frac{\partial g}{\partial D_f} \Big|_* (D_f - D_f^*) + \frac{\partial g}{\partial V} \Big|_* (V - V^*) \\ & + \frac{\partial g}{\partial t} \Big|_* (t - t^*) + \frac{\partial g}{\partial N_D} \Big|_* (N_D - N_D^*) + \frac{\partial g}{\partial M} \Big|_* (M - M^*) + \frac{\partial g}{\partial G} \Big|_* (G - G^*) \\ & + \frac{\partial g}{\partial I} \Big|_* (I - I^*) + \frac{\partial g}{\partial H} \Big|_* (H - H^*) + \frac{\partial g}{\partial S} \Big|_* (S - S^*) + \frac{\partial g}{\partial L_0} \Big|_* (L_0 - L_0^*) \end{aligned} \quad (5.15)$$

식 (5.15)에서 (*)는 설계점을 나타내며

$$\left. \frac{\partial g}{\partial D_f} \right|_*, \left. \frac{\partial g}{\partial V} \right|_*, \left. \frac{\partial g}{\partial t} \right|_*, \left. \frac{\partial g}{\partial N_D} \right|_*, \left. \frac{\partial g}{\partial M} \right|_*, \left. \frac{\partial g}{\partial G} \right|_*, \left. \frac{\partial g}{\partial I} \right|_*, \left. \frac{\partial g}{\partial H} \right|_*, \left. \frac{\partial g}{\partial S} \right|_*, \left. \frac{\partial g}{\partial L_0} \right|_*$$

는 식 (5.16)과 같이 풀이된다.

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial g}{\partial D_f} \right|_* &= 1, & \left. \frac{\partial g}{\partial V} \right|_* &= -\frac{t^*}{N_D^*} \left(\frac{M^* G^* I^* H^*}{S^*} \right)^3 L_0^*, & \left. \frac{\partial g}{\partial N_D} \right|_* &= V^* t^* \left(\frac{M^* G^* I^* H^*}{S^*} \right)^3 L_0^* \\ \left. \frac{\partial g}{\partial t} \right|_* &= -\frac{V^*}{N_D^*} \left(\frac{M^* G^* I^* H^*}{S^*} \right)^3 L_0^*, & \left. \frac{\partial g}{\partial G} \right|_* &= -3(G^*)^2 \frac{V^* t^*}{N_D^*} \left(\frac{M^* I^* H^*}{S^*} \right)^3 L_0^* \\ \left. \frac{\partial g}{\partial M} \right|_* &= -3(M^*)^2 \frac{V^* t^*}{N_D^*} \left(\frac{G^* I^* H^*}{S^*} \right)^3 L_0^*, & \left. \frac{\partial g}{\partial H} \right|_* &= -3(H^*)^2 \frac{V^* t^*}{N_D^*} \left(\frac{M^* G^* I^*}{S^*} \right)^3 L_0^* \\ \left. \frac{\partial g}{\partial I} \right|_* &= -3(I^*)^2 \frac{V^* t^*}{N_D^*} \left(\frac{M^* G^* H^*}{S^*} \right)^3 L_0^*, & \left. \frac{\partial g}{\partial L_0} \right|_* &= -\frac{V^* t^*}{N_D^*} \left(\frac{M^* G^* I^* H^*}{S^*} \right)^3 \\ \left. \frac{\partial g}{\partial S} \right|_* &= -\frac{1}{3(S^*)^*} \frac{V^* t^*}{N_D^*} (M^* G^* I^* H^*)^3 L_0^* \end{aligned} \quad (5.16)$$

식 (4.5)의 선형화 된 한계상태방정식에서 각 변수를 설계점에 대해 근사 정규 분포화 시킨 후 각 변수의 평균 $\overline{X'_i}$ 와 표준편차 σ'_{X_i} 를 계산하면 식 (4.7)과 같다.

$$\overline{D'_f} = \overline{D_f}, \quad \sigma'_{D_f} = V_{D_f}(\overline{D_f}) \quad (5.17a)$$

$$\overline{M'} = M^*(1 - \ln M^* + \overline{\ln M}), \quad \sigma'_M = M^*(\sigma_{\ln M}) \quad (5.17b)$$

$$\overline{G'} = G^*(1 - \ln G^* + \overline{\ln G}), \quad \sigma'_G = G^*(\sigma_{\ln G}) \quad (5.17c)$$

$$\overline{I'} = I^*(1 - \ln I^* + \overline{\ln I}), \quad \sigma'_I = I^*(\sigma_{\ln I}) \quad (5.17d)$$

$$\overline{H'} = H^*(1 - \ln H^* + \overline{\ln H}) , \quad \sigma'_{H'} = H^*(\sigma_{\ln H}) \quad (5.17e)$$

$$\overline{L_0^3} = L_0^{3*}(1 - \ln L_0^{3*} + \overline{\ln L_0^3}) , \quad \sigma'_{L_0^3} = H^*(\sigma_{\ln L_0^3}) \quad (5.17f)$$

여기서 V_{X_i} 는 변수의 변동계수이고 첨자(')는 확률분포를 근사 정규분포화 시킨 변수이다. 즉 선형화 시킨 값이다. 변수 M, G, I, H 는 대수 정규분포를 갖고 있는 값들이며 각각 일체차량의 하중에 대한 모멘트 값과 설계차량의 하중에 대한 축간격계수비, 주형분배계수비, 충격계수비, 차간거리계수비이다. 각각의 평균과 표준편차 계산과정은 식(5.18)과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{M'} &= M^* - \sigma'_M \Phi^{-1}[F_M(M^*)] \\ &= M^* - M^* \sigma_{\ln M} \Phi^{-1}\left[\Phi\left(\frac{\ln M^* - \overline{\ln M}}{\sigma_{\ln M}}\right)\right] \\ &= M^*(1 - \ln M^* + \overline{\ln M}) \end{aligned} \quad (5.18a)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_M &= \frac{\phi[\Phi^{-1}\{F_M(M^*)\}] f_M(M^*)}{f_M(M^*)} \\ &= \frac{\phi\left[\Phi^{-1}\left\{\Phi\left(\frac{\ln M^* - \overline{\ln M}}{\sigma_{\ln M}}\right)\right\}\right]}{\phi\left(\frac{\ln M^* - \overline{\ln M}}{\sigma_{\ln M}}\right) M^* \sigma_{\ln M}} \\ &= M^*(\sigma_{\ln M}) \end{aligned} \quad (5.18b)$$

$$\begin{aligned}
\overline{G}' &= G^* - \sigma_G' \Phi^{-1}[F_G(G^*)] \\
&= G^* - G^* \sigma_{\ln G} \Phi^{-1}\left[\Phi\left(\frac{\ln G^* - \overline{\ln G}}{\sigma_{\ln G}}\right)\right] \\
&= G^*(1 - \ln G^* + \overline{\ln G})
\end{aligned} \tag{5.18c}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_G' &= \frac{\phi[\Phi^{-1}\{F_G(G^*)\}] f_G(G^*)}{f_G(G^*)} \\
&= \frac{\phi\left[\Phi^{-1}\left\{\Phi\left(\frac{\ln G^* - \overline{\ln G}}{\sigma_{\ln G}}\right)\right\}\right]}{\phi\left(\frac{\ln G^* - \overline{\ln G}}{\sigma_{\ln G}}\right) G^* \sigma_{\ln G}} \\
&= G^*(\sigma_{\ln G})
\end{aligned} \tag{5.18d}$$

$$\begin{aligned}
\overline{I}' &= I^* - \sigma_I' \Phi^{-1}[F_I(I^*)] \\
&= I^* - I^* \sigma_{\ln I} \Phi^{-1}\left[\Phi\left(\frac{\ln I^* - \overline{\ln I}}{\sigma_{\ln I}}\right)\right] \\
&= I^*(1 - \ln I^* + \overline{\ln I})
\end{aligned} \tag{5.18e}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_I' &= \frac{\phi[\Phi^{-1}\{F_I(I^*)\}] f_I(I^*)}{f_I(I^*)} \\
&= \frac{\phi\left[\Phi^{-1}\left\{\Phi\left(\frac{\ln I^* - \overline{\ln I}}{\sigma_{\ln I}}\right)\right\}\right]}{\phi\left(\frac{\ln I^* - \overline{\ln I}}{\sigma_{\ln I}}\right) I^* \sigma_{\ln I}} \\
&= I^*(\sigma_{\ln I})
\end{aligned} \tag{5.18f}$$

$$\begin{aligned}
\overline{H}' &= H^* - \sigma'_H \Phi^{-1}[F_H(H^*)] \\
&= H^* - H^* \sigma_{\ln H} \Phi^{-1}\left[\Phi\left(\frac{\ln H^* - \ln H}{\sigma_{\ln H}}\right)\right] \\
&= H^*(1 - \ln H^* + \ln H)
\end{aligned} \tag{5.18g}$$

$$\begin{aligned}
\sigma'_H &= \frac{\phi\left[\Phi^{-1}\{F_H(H^*)\}\right] f_H(H^*)}{f_H(H^*)} \\
&= \frac{\phi\left[\Phi^{-1}\left\{\Phi\left(\frac{\ln H^* - \ln H}{\sigma_{\ln H}}\right)\right\}\right]}{\phi\left(\frac{\ln H^* - \ln H}{\sigma_{\ln H}}\right) H^* \sigma_{\ln H}} \\
&= H^* (\sigma_{\ln H})
\end{aligned} \tag{5.18h}$$

$$\begin{aligned}
\overline{L_0^3}' &= L_0^{3*} - \sigma'_{L_0^3} \Phi^{-1}[F_{L_0^3}(L_0^{3*})] \\
&= L_0^{3*} - L_0^{3*} \sigma_{\ln L_0^3} \Phi^{-1}\left[\Phi\left(\frac{\ln L_0^{3*} - \ln L_0^3}{\sigma_{\ln L_0^3}}\right)\right] \\
&= L_0^{3*}(1 - \ln L_0^{3*} + \ln L_0^3)
\end{aligned} \tag{5.18i}$$

$$\begin{aligned}
\sigma'_{L_0^3} &= \frac{\phi\left[\Phi^{-1}\{F_{L_0^3}(L_0^{3*})\}\right] f_{L_0^3}(L_0^{3*})}{f_{L_0^3}(L_0^{3*})} \\
&= \frac{\phi\left[\Phi^{-1}\left\{\Phi\left(\frac{\ln L_0^{3*} - \ln L_0^3}{\sigma_{\ln L_0^3}}\right)\right\}\right]}{\phi\left(\frac{\ln L_0^{3*} - \ln L_0^3}{\sigma_{\ln L_0^3}}\right) L_0^{3*} \sigma_{\ln L_0^3}} \\
&= L_0^{3*} (\sigma_{\ln L_0^3})
\end{aligned} \tag{5.18j}$$

여기서 $F_{X_i}(X_i)$ 는 변수 X_i 의 누적 확률분포함수(CDF)이고 $f_{X_i}(X_i)$ 는 변수 X_i 의 확률밀도함수(PDF), Φ 는 표준 정규분포의 누적 확률분포함수, ϕ 는 표준 정규분포의 확률밀도를 의미한다.

한편 식 (4.3)은 선형함수이므로 이 함수의 근사 정규분포 변수에 대한 평균 $g(\bar{X}')$ 와 표준편차 σ'_g 는 각각 식 (5.19)과 식 (5.20)과 같다.

$$\begin{aligned}
 g(\bar{x}') = & D_f^* - \frac{V^* t^*}{N_D^*} \left(\frac{M^* G^* I^* H^*}{S^*} \right) L_0^* + \left. \frac{\partial g}{\partial D_f} \right|_* (D_f' - D_f^*) + \left. \frac{\partial g}{\partial V} \right|_* (V' - V^*) + \left. \frac{\partial g}{\partial t} \right|_* (t' - t^*) \\
 & + \left. \frac{\partial g}{\partial N_D} \right|_* (N_D' - N_D^*) + \left. \frac{\partial g}{\partial M} \right|_* (M' - M^*) + \left. \frac{\partial g}{\partial G} \right|_* (G' - G^*) + \left. \frac{\partial g}{\partial I} \right|_* (I' - I^*) \\
 & + \left. \frac{\partial g}{\partial H} \right|_* (H' - H^*) + \left. \frac{\partial g}{\partial S} \right|_* (S' - S^*) + \left. \frac{\partial g}{\partial L_0} \right|_* (L_0' - L_0^*)
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma'_g = & \left[\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_* \sigma_{X_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\
 = & \left(\left. \frac{\partial g}{\partial D_f} \right|_* \sigma_{D_f} \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial g}{\partial M} \right|_* \sigma_M \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial g}{\partial I} \right|_* \sigma_I \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial g}{\partial G} \right|_* \sigma_G \right)^2 \\
 & + \left(\left. \frac{\partial g}{\partial H} \right|_* \sigma_H \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial g}{\partial V} \right|_* \sigma_V \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial g}{\partial t} \right|_* \sigma_t \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial g}{\partial N_D} \right|_* \sigma_{N_D} \right)^2 \\
 & + \left(\left. \frac{\partial g}{\partial S} \right|_* \sigma_S \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial g}{\partial L_0} \right|_* \sigma_{L_0} \right)^2
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

식 (5.19)와 식 (5.20)을 이용하여 신뢰성 지수 β 를 계산하면 식 (5.21)과 같다.

$$\beta = \frac{g(\bar{X}')}{\sigma'_g} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{X^*} (\bar{X}' - X_i^*) \right) + g(X_1^*, \dots, X_n^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{X^*} \sigma_{X_i} \right)^2}} \tag{5.21}$$

식 (5.21)에서 구한 β 를 이용하여 식 (4.12)와 같이 새로운 설계점을 계산한다.

$$X_i^* = \overline{X}_i - \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \beta \sigma_i^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \sigma_{X_i} \right)^2}} \quad (5.22)$$

식 (5.22)를 이용하여 각 변수들의 새로운 설계점을 정립하면 식 (5.23)과 같다.

$$D_f^* = \overline{D}_f - \left(\frac{\partial g}{\partial D_f} \Big|_{D_f^*} \right) \beta \sigma_{D_f}^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial D_f} \Big|_{D_f^*} \sigma_{D_i} \right)^2}}$$

$$V^* = \overline{V} - \left(\frac{\partial g}{\partial V} \Big|_{V^*} \right) \beta \sigma_V^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial V} \Big|_{V^*} \sigma_V \right)^2}}$$

$$t^* = \overline{t} - \left(\frac{\partial g}{\partial t} \Big|_{t^*} \right) \beta \sigma_t^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial t} \Big|_{t^*} \sigma_t \right)^2}}$$

$$N_D^* = \overline{N}_D - \left(\frac{\partial g}{\partial N_D} \Big|_{N_D^*} \right) \beta \sigma_{N_D}^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial N_D} \Big|_{N_D^*} \sigma_{N_i} \right)^2}}$$

$$M^* = \overline{M} - \left(\frac{\partial g}{\partial M} \Big|_{M^*} \right) \beta \sigma_M^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial M} \Big|_{M^*} \sigma_M \right)^2}}$$

$$G^* = \overline{G} - \left(\frac{\partial g}{\partial G} \Big|_{G^*} \right) \beta \sigma_G^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial G} \Big|_{G^*} \sigma_G \right)^2}}$$

$$I^* = \overline{I} - \left(\frac{\partial g}{\partial I} \Big|_{I^*} \right) \beta \sigma_I^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial I} \Big|_{I^*} \sigma_I \right)^2}}$$

$$\begin{aligned}
H^* &= \overline{H} - \left(\frac{\partial g}{\partial H} \Big|_{H^*} \right) \beta \sigma_H^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial H} \Big|_{H^*} \sigma_{H_i} \right)^2}} \\
S^* &= \overline{S} - \left(\frac{\partial g}{\partial S} \Big|_{S^*} \right) \beta \sigma_S^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial S} \Big|_{S^*} \sigma_{S_i} \right)^2}} \\
L_0^{3*} &= \overline{L_0^3} - \left(\frac{\partial g}{\partial L_0^3} \Big|_{L_0^{3*}} \right) \beta \sigma_{L_0^3}^2 \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial L_0^3} \Big|_{L_0^{3*}} \sigma_{L_0^3_i} \right)^2}}
\end{aligned} \tag{5.23}$$

식 (5.23)의 새로운 설계점을 이용하여 다시 계산하면 신뢰성지수 β 가 수렴하게 되는데, 계산을 반복하여 나온 값이 한계상태함수의 신뢰성지수 β 가 된다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

5.3 신뢰성해석 및 결과 고찰

Rackwitz-Fiessler 신뢰성 지수방법(Rackwitz와 Fiessler, 1978)을 이용하여 플레이트 거더교에 대하여 신뢰성 해석을 실시했다. AASHTO HL-93 설계트럭 활하중에 의한 모멘트와 Nowak(1993)에 의해 조사된 자료를 이용하여 지간 9m ~ 36m를 9m간격으로 4가지 경우와 거더 간격을 1.2m ~ 3.0m까지 0.6m 간격으로 4가지 경우를 조합해 총 16개의 경우에 대하여 조합했다. Table 5.2은 이 16개의 조합에 따른 모멘트 값을 나타낸다. Table 5.2를 살펴보면 지간이 길어짐에 따라 점차 모멘트비의 값은 감소하다 지간길이 27m 부터는 다시 증가추세를 보이고 있다. 하지만 거더 간격이 증가함에 따라서는 지간길이에 상관없이 모두 감소하고 있다(Fig 5.1~Fig 5.5). Table 5.3 조사차량과 설계차량의 응력범위비에 있어서는 지간길이 9m일때 가장 큰 값을 나타내며 지간 길이 18m일 때 감소했다가 다시 증가하고 있다. 여기서도 거더 간격이 증가 할수록 응력범위비는 감소하고 있다(Fig 5.6~Fig 5.8).

신뢰성해석 결과(Table 5.3) 지간이 9m, 거더간격 1.2m 일때 신뢰성 지수는 4.391 값을 나타냈으며 거더 간격이 1.8m, 2.4m, 3.0m로 점차 증가 할수록 신뢰성지수는 점점 증가 하여 거더 간격 3.0m일때 가장 큰 값인 5.002를 나타냈다. 지간 길이 18m일 때는 신뢰성지수가 4.724부터 점차 증가하여 5.173까지 나타났으며, 지간 길이 27m일때는 4.605에서부터 5.047까지 나타났으며, 지간 길이 36m일 때는 4.515부터 4.934까지 나타났다.

Table 5.2 조사차량 모멘트/ 설계차량 모멘트

지간길이 (m)	거더간격 (m)	조사차량모멘트 (t-m)	설계차량모멘트 (t-m)	조사차량모멘트 /설계차량모멘트
9	1.2	43.66	53.72	0.81
	1.8	58.21	78.61	0.74
	2.4	71.54	102.82	0.70
	3.0	85.54	128.52	0.67
18	1.2	124.58	169.05	0.74
	1.8	166.87	246.57	0.68
	2.4	207.40	323.82	0.64
	3.0	250.10	405.14	0.62
27	1.2	261.12	341.22	0.77
	1.8	340.82	479.26	0.71
	2.4	414.26	612.68	0.68
	3.0	494.90	757.38	0.65
36	1.2	429.35	546.58	0.79
	1.8	564.13	765.00	0.74
	2.4	683.54	969.14	0.71
	3.0	813.69	1189.73	0.68

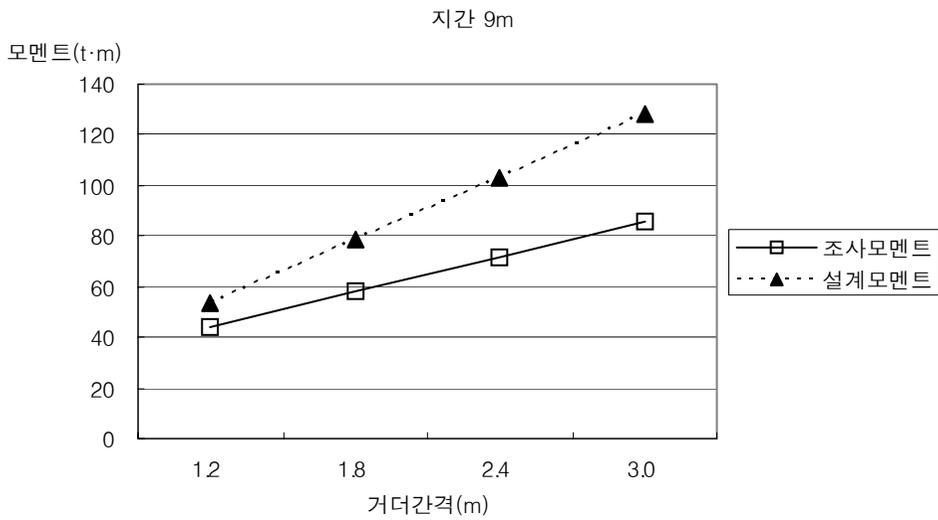


Fig 5.1 지간 9m인 경우 거더 간격에 따른 모멘트 변화

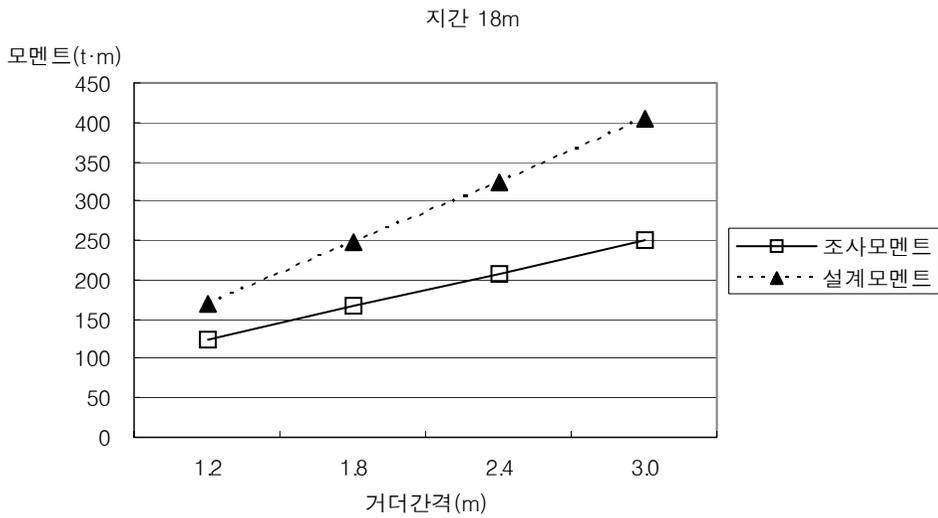


Fig 5.2 지간 18m인 경우 거더 간격에 따른 모멘트 변화

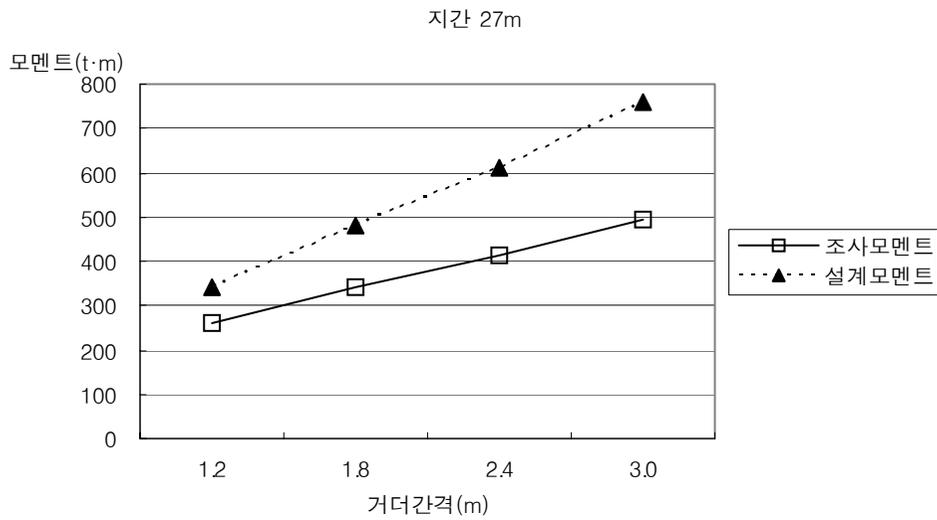


Fig 5.3 지간 27m인 경우 거더 간격에 따른 모멘트 변화

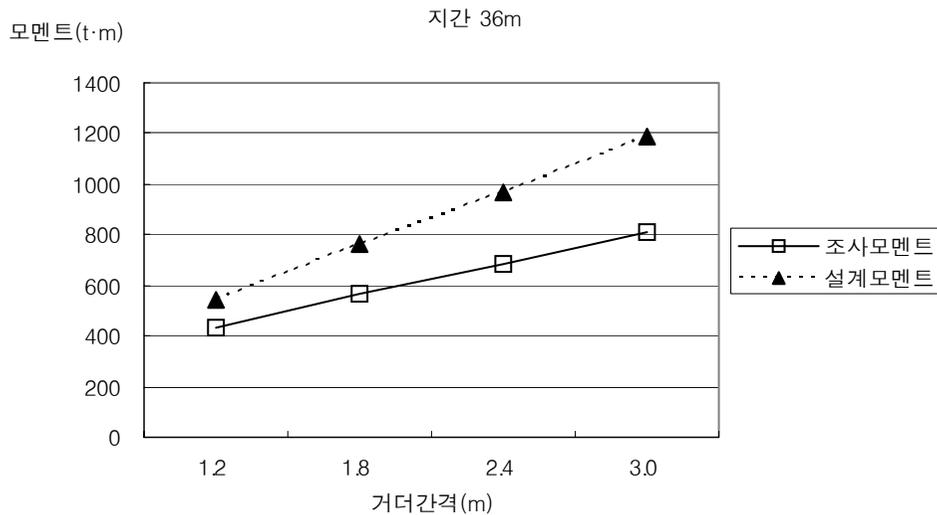


Fig 5.4 지간 36m인 경우 거더 간격에 따른 모멘트 변화

조사차량 모멘트
/설계차량 모멘트

시간별 모멘트 비

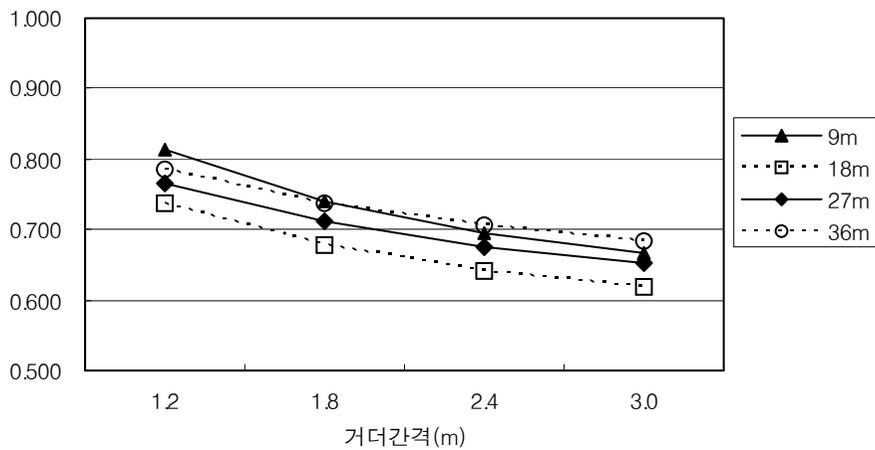


Fig 5.5 시간 및 거더간격 변화에 따른 모멘트비 변화



Table 5.3 조사차량과 설계차량의 응력범위 비

지간	거더간격	조사차량응력범위 (t/m ²)	설계차량응력범위 (t/m ²)	조사차량응력범위/ 설계차량응력범위
9m	1.2m	929.642	1143.952	0.813
	1.8m	1239.523	1673.935	0.740
	2.4m	1523.339	2189.438	0.696
	3.0m	1821.635	2736.797	0.666
18m	1.2m	2652.811	3599.830	0.737
	1.8m	3553.492	5250.596	0.677
	2.4m	4416.525	6895.571	0.640
	3.0m	5325.894	8627.428	0.617
27m	1.2m	5560.477	7266.269	0.765
	1.8m	7257.581	10205.792	0.711
	2.4m	8821.465	13046.848	0.676
	3.0m	10538.842	16128.279	0.653
36m	1.2m	9142.930	11639.353	0.786
	1.8m	12012.947	16290.460	0.737
	2.4m	14555.707	20637.479	0.705
	3.0m	17327.257	25334.923	0.684

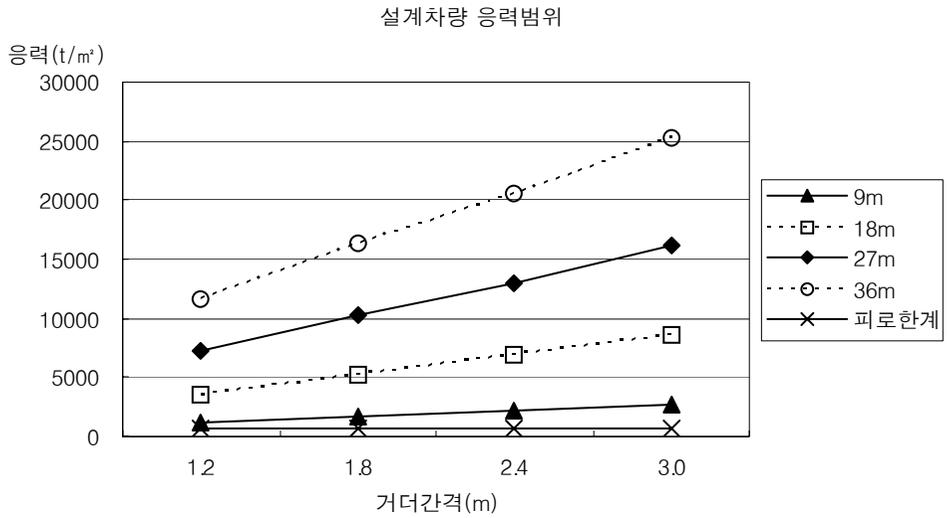


Fig 5.6 설계차량의 지간 및 거더간격 변화에 따른 응력범위 비

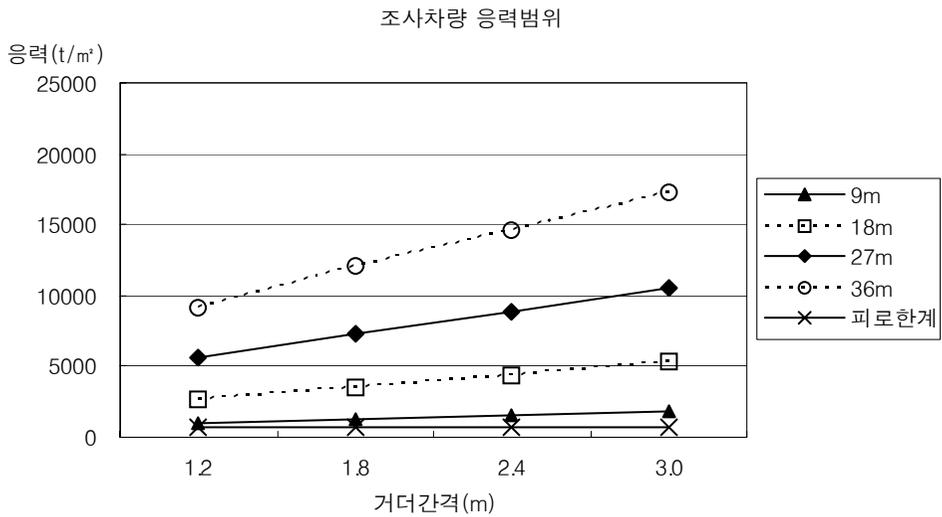


Fig 5.7 조사차량의 지간 및 거더간격 변화에 따른 응력범위 비

조사차량응력범위
/설계차량응력범위

시간별 응력범위 비

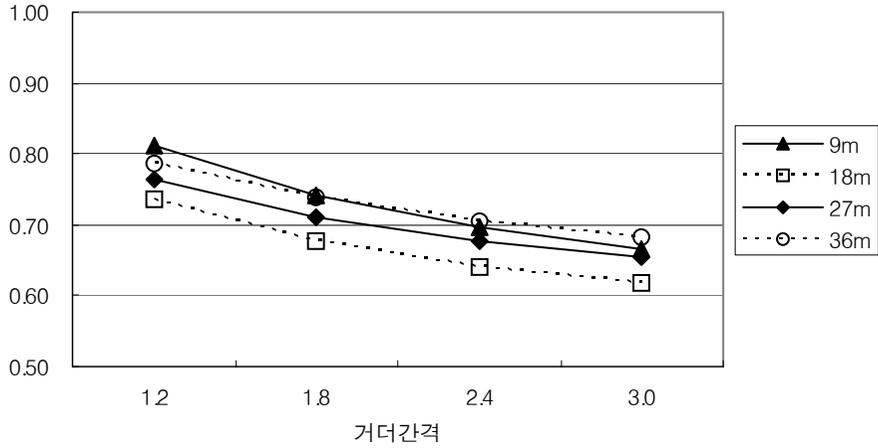


Fig 5.8 시간변화에 따른 응력범위 비



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 5.3 신뢰성지수

시간길이	거더간격	신뢰성지수	시간길이	거더간격	신뢰성지수
9m	1.2m	4.391	27m	1.2m	4.605
	1.8m	4.709		1.8m	4.828
	2.4m	4.889		2.4m	4.963
	3.0m	5.002		3.0m	5.047
18m	1.2m	4.724	36m	1.2m	4.515
	1.8m	4.961		1.8m	4.722
	2.4m	5.093		2.4m	4.851
	3.0m	5.173		3.0m	4.934

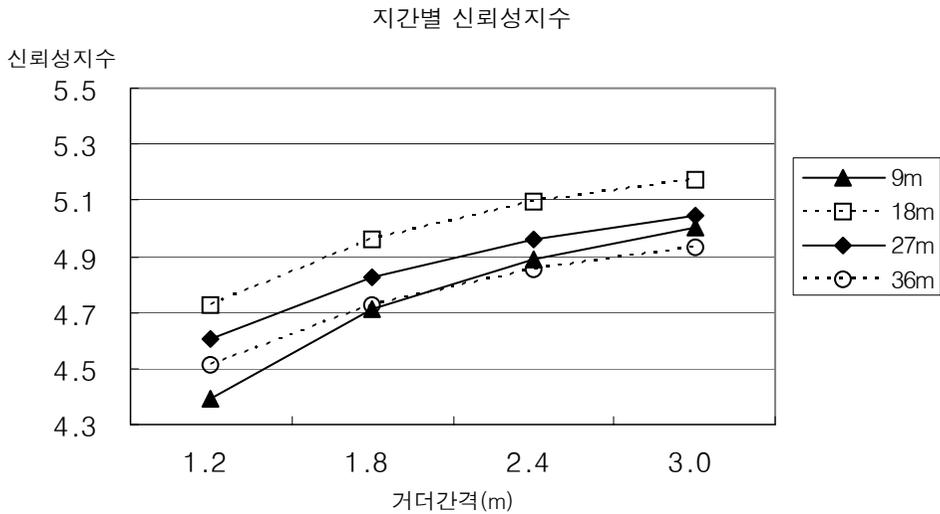


Fig 5.9 시간 및 거더간격 변화에 따른 신뢰성지수



VI. 결 론

본 연구에서는 Rackwitz-Fiessler(1978)의 신뢰성 지수 이론을 이용하여 플레이트 거더교 피로해석을 실시하였다. AASHTO LRFD HL-93 활하중을 적용한 후 플레이트 거더교의 안정성 검토를 실시했으며 시간을 9m간격으로 9m~36m 까지 변화시키고, 거더 간격은 1.2m~3.0m까지 0.6m씩 변화시켜 총 16가지를 조합시켜 각각에 대해 신뢰성해석을 실시했다. 피로신뢰성 해석에 필요한 활하중 자료는 Nowak(1993)의 자료를 이용했다.

본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 시간별 거더 간격이 증가 할수록 조사차량 모멘트와 설계차량 모멘트의 비는 감소하는 것으로 나타났으며 증가분도 점차 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 시간길이가 증가할 경우엔 감소하다 다시 증가하게 되는데, 시간 9m인 경우에는 차량길이에 비해 시간이 짧은 이유인 것으로 판단된다.
- 2) 시간길이 변화와 거더 간격 변화 조합에 의해 발생하는 피로응력 값이 피로 한계 응력 값을 상회하여, 본 연구에서 검토해본 모든 조합이 피로파괴 누적에 영향을 주고 있음을 알 수 있다
- 3) 신뢰성해석 결과 시간별 신뢰성 지수가 4.3에서 5.1사이의 안전한 값을 나타냈다. 이것은 힘 해석 시 보통 목표신뢰성지수 3.5보다 훨씬 큰 값을 나타내며 이것으로 플레이트거더교의 피로파괴에 대한 안전성은 힘보다 더 안전추임을 알 수 있다.
- 4) 피로에 대하여 정량화된 신뢰성을 확보 할 수 있도록 하기 위해서는 국내에서도 체계적인 제도 하에 지역별 BWIM(Bridge Weight In Motion) 시간별로 데이터베이스화 하여 설계 시 활용할 경우 교량에 대한 건설 및 유지비용 절감에도 높은 효과가 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 도로교표준시방서(하중-저항계수 설계편), 1996, 대한토목학회
- 도로교설계기준·해설, 2003, 대한토목학회
- 김세영 역, 2000, 강구조물의 피로설계지침·동해설, 과학기술
- 조효남, 임종권, 최현호, 신뢰성방법에 기초한 강교량의 잔존피로 수명 및 피로 위험도 평가, 한양대학교 공학기술논문집 Vol. 8 No. 1 1999.8, pp309~317
- 김두환, 안세희, P.S 콘크리트 구조물의 신뢰성 해석, 서울산업대학교 논문집 제 49집 pp139~146
- 김상훈, 2003, 신뢰성을 고려한 강합성교 최적설계, 군산대 석사학위논문
- 양중서, 1992, 손상허용 설계를 위한 피로신뢰성 해석, 서울대학교 석사학위논문
- 유한신, 2003, 강섬유 보강 철근콘크리트보의 신뢰성해석, 원광대학교 석사학위 논문
- 한승환, 1991, 신뢰성이론에 의한 교량의 휨 피로해석연구, 서울대학교 석사학위 논문
- 이표영, 2003, 상관관계를 고려한 Ramen 교량의 신뢰성해석, 충남대학교 석사 학위 논문
- 박현수, 2004, 신뢰성 해석에 의한 지역특성 활하중계수, 제주대학교 석사학위 논문
- 양준열, 1998, BWIM 시스템을 이용한 도로교 피로하중모형에 관한 연구, 명지 대학교 석사학위 논문
- Cho Kyu Nam, Lee Uk Jae, 2002, A Syudy on the Fatigue Analysis Of Offshore Structure by S-N curve and Fracture mechanics Approach, 산업기술 논문 12집
- Peter J. Massarelli, Thomas T. Baber, August 2001, FAYIGUE RELIABILITY OF STEEL HIGHWAY BRIDGE DETAILS, PP 3~17
- H.Y.Chung, L.Manual, and K.H.Frank, Opimal inspection scheduling with alternative fatigue reliability formulation for steel bridges pp 2~10

John D. SORENSEN, Svend Ole HANSEN, Torben A. NIELSEN, Calibration of Partial Safety Factors and Target Reliability Level in Danish Structural Codes. pp1001~1006

Ibrahim A. Assakkaf, Bilal M. Ayyub, RELIABILITY-BASED DESIGN FOR FATIGUE OF MARINE STRUCTURES. 2001

JCSS PROBABILISTIC MODEL CODE, PART 3:RESISTANCE MODELS, April 2004



감사의 글

이 작은 결실이 맺기까지 많은 가르침과 격려를 아끼지 않으신 김상진 지도교수님께 이 글을 빌어서나마 머리 숙여 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 논문심사를 흔쾌히 허락해 주시고 검토해 주신 김남형 교수님, 남정만 교수님, 2년이라는 대학원 생활동안 항상 지켜봐 주시고 지도해주신 양성기 교수님, 이병걸 교수님, 박상렬 교수님, 대학원 진학에 대한 많은 조언을 해주신 홍종현 교수님께도 감사드립니다.

대학원 생활동안 많은 도움을 준 현수 형, 영범 형, 창훈 형, 재철, 경숙, 태우 형, 건 형, 영웅 형, 지훈 형, 영택 형, 용철 형, 성욱, 철영, 영임, 순보, 민수, 경보, 태혁, 승범, 현, 혁춘에게도 감사를 드립니다.

힘들 때 항상 큰 힘이 되어준 친구 동현, 용훈, 재진, 승용에게도 감사의 마음을 전합니다.

바쁜 업무 속에서도 많은 시간을 배려해주신 (주)성광종합기술개발 강일형 대표이사님, 이순호 이사님, 양두호 차장님, 유종신 과장님, 강충훈 과장님, 김기범 과장님, 그리고 모든 성광 가족 여러분께도 감사의 마음을 전합니다.

그리고 오랜 시간 동안 불평 없이 내조해준 사랑하는 아내 진아, 항상 아빠를 이해해주는 큰 딸 서윤, 애교가 넘치는 둘째 딸 서원, 이제 백일이 갓 넘은 막내아들 윤제에게도 사랑한단 말 전합니다.

공부할 수 있도록 배려해주시고 용기를 주신 어머니, 살아계셨으면 기뻐하셨을 아버지, 두 분께 이 영광을 돌립니다.

아울러 항상 지켜봐 주시고 도움을 주신 모든 분들께도 감사드립니다.

2006년 6월 허성호 올림