강도로교의 피로설계하중에 관한 연구

The Study on Fatigue Design Loads of Steel Highway Bridges

김 상 효[1] · 이 창 용[2]
Kim, Sang Hyo Lee, Chang Yong

요 약 : 최근 중화물 차량의 적재율 증가와 교통량의 증가 등으로 인해 강도로교에서는 반복하중에 의한 피로손상이 많이 발생하고 있으며 이러한 손상은 교량의 안전성에 심각한 영향을 미치고 있다. 따라서 사용기간 동안에 발생하는 피로손상을 합리적으로 반영할 수 있는 피로설계하중을 결정하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 먼저 미국 AASHTO의 LRFD 피로설계방법을 고찰하였으며 그 결과 교폭에 관계없이 1대의 피로설계트럭을 재하하여 설계하는 것은 일정한 안전수준을 확보하지 못하는 것으로 분석되었다. 따라서, 교폭에 따라 설계하중 재하방법을 다르게 하는 것이 보다 일관성 있는 안전수준을 가지는 것으로 나타났으며 본 연구에서는 다양한 교량구조형식과 통행특성에 따라 발생하는 피로손상을 합리적으로 반영할 수 있는 피로설계하중의 재하방법과 수준 및 형식을 제시하였다.

ABSTRACT : Recently, due to the increasing overloaded heavy vehicles and traffic volumes fatigue failures of steel highway bridges frequently occur. Therefore, it is important to decide rational fatigue design procedure which can reflect lifetime cumulative fatigue damage reasonably. In this study, cumulative fatigue damages are simulated for various bridge systems and traffic conditions. The AASHTO LRFD fatigue design procedure is reviewed and the current fatigue design loading format, in which a single representative truck is loaded regardless of bridge width, is found to yield inconsistent safety level. Improved loading format with rational design load level for fatigue design is suggested.

핵 심 용 어 : 차량하중, 피로설계, 누적피로손상, 설계하중재하방법, 강교량

KEYWORDS : traffic load, fatigue design, cumulative fatigue damage, design loading format, steel bridges

1. 서 론

최근 급격히 증가하는 교통량과 과적차량에 의해 도로교는 심각한 손상을 받고 있으며, 특히 강도로교에서 발생하는 피로손상에 의한 균열은 교량안전성에 중요한 요소로 인식되고 있다. 통행하

1) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부, 부교수
2) 정회원, 포스코개발주식회사

본 논문에 대한 토의를 1997년 9월 30일까지 학회로 보내주시면, 토의회답을 게재하겠습니다.

중에 의해 강도로교에서 발생하는 피로손상을 합리적으로 추정하여 사용기간동안 교량의 안전성을 확보하기 위해서는 기본적으로 차량하중의 통행특성과 중량특성에 대한 연구가 필요하며, 또한 차량하중에 의해 발생하는 피로손상을 합리적으로 반영할 수 있는 피로설계방법이 제시되어야 하겠다.

미국 AASHTO에서 제시한 Guide Specification For Fatigue Design of Steel Bridges(1989)[1]이나 LRFD Bridge Design Specifications(1994)[2]의 피로설계방법은 국내 도로교표준시방서[3]에서 채택하고 있는 피로설계방법보다 매우 합리적이고 개선된 설계기법이다. 그러나 이러한 설계방법의 타당성은 적용하는 설계하중의 수준이나 재하방법 등에 의해 많은 영향을 받으며, 이는 근본적으로 지역적 특성이 강한 통행차량의 중량특성이나 통행특성 등에 의해 결정된다.

따라서 본 연구에서는 다양한 형식과 지간을 가지는 강판형교를 도로교표준시방서의 현행 설계기준에 따라 설계하였으며 여기에 모의분석기법을 적용하여 통행차량에 의해 발생하는 피로손상을 분석하였다. 또한 모의분석기법으로 추정한 피로손상으로부터 등가응력범위를 구하고 여러가지 형식의 가상 설계하중재하조건에 대한 등가응력범위의 수준을 분석하였다. 그리고 다양한 교량형식과 지간장에 대하여 일관성 있는 안전수준을 확보할 수 있는 피로설계하중 재하방법을 제시하고 피로설계하중의 적절한 수준과 형식을 검토하였다.

2. 차량하중 및 통행특성모형

최근에 도로교를 통행하는 차량들은 매우 다양한 종류와 형식을 가지고 있으며 산업과 경제의 발달에 따라 하중의 크기와 통행특성이 빠른 속도로 변화하고 있다. 또한, 차량의 대형화와 중량화로 인해 과적차량도 많이 관측되고 있으며 통행량도 매년 증가하고 있다. 이러한 현상은 교량에 많은 손상을 입히고 있어 교량수명을 단축하는 원인이 되고 있다. 본 연구에서는 참고문헌 4에 제시된 차량형식 및 중량의 확률적 모형을 이용하여 차량하중의 특성을 모형화하였다. 이 모형에서는 차량의 기본형식을 5가지로 분류하였으며 각각의 차종에 대하여 1개 또는 그 이상의 분포모드를 가지도록 모형화하였다. 여기에서 각 모드는 각각의 상한치와 하한치를 가지고 있으며 이 차량중량의 확률모형에 축중분배모형과 축간거리모형을 적용하여 차량구조를 모형화하였다.

도로교에 발생하는 하중효과에 영향을 미치는 인자로는 차량총중량뿐아니라 일일교통량, 차종혼입률, 연행특성, 주행속도와 차간거리 등이 있다. 이 중 교통량에 따른 주행속도의 비율과 차간거리는 연행하는 차량행렬에 있어서 도로교에서 발생하는 하중효과에 중요한 영향을 주는 인자중의 하나이다.

본 연구에서는 주행속도별 평균차간거리를 변이계수가 0.5인 대수정규분포로 모형화하였으며 표 1에 본 연구에서 적용한 차량의 통행특성을 나타내었다.

또한 교량을 통과하는 차량의 횡방향 재하위치는 일정범위내에서 확률적인 분포를 이루며 정규분포로 모형화될 수 있다. 본 연구에서는 정규분포함수에 보정계수를 이용한 식 (1)과 같은 보정된 분포함수로 통행차량의 횡방향 재하위치를 모형화하였다.

표 1. 일일교통량 및 속도에 따른 주행특성

주 행 속 도	일일교통량(대)			평균
	10,000	15,000	20,000	차간거리
10 km/h 이하	10 %	20 %	30 %	2 m
10 - 30 km/h	20 %	25 %	30 %	5 m
30 - 50 km/h	50 %	40 %	30 %	15 m
50 km/h 이상	20 %	15 %	10 %	25 m

$$f_X(x) = C \cdot \phi_X(x) \quad \text{for } 0 \le x \le 2a \qquad (1)$$

여기에서,

$\phi_X(x)$ = 정규분포함수

$$= \frac{1}{\sigma_s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma_s}\right)^2 \right] \qquad (2)$$

$$C = \text{보정계수} = \frac{1}{P[0 < x \leq 2a]}$$

$$= \frac{1}{\Phi\left[\frac{2a-\mu}{\sigma_s}\right] - \Phi\left[\frac{0-\mu}{\sigma_s}\right]}$$

식 (1)에서 a는 각 차선 중앙으로부터 차축중심이 횡방향이동가능한 좌·우 한계폭이다. 따라서 식 (2)에서 $\mu = a$가 되며, 표준편차 σ_s는 참고문헌 자료(5)로부터 30cm로 모형화되었다.

도로교에서 발생하는 차량하중효과는 매우 무거운 단일 중차량뿐아니라 중차량의 연행가능성 등에 의해 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 연행차량행렬을 모형화하기 위하여 기존의 연구결과를 이용하였다. 즉, 연행하는 차종은 국도상에서 조사한 결과에 근거하여 선행하는 차종과 관계를 가지는 변이확률행렬로 모형화하였으며 참고문헌 6의 개선된 차량연행모형을 이용하여 차량행렬을 모의발생시켰다.

3. 피로설계하중 분석기법

3.1 피로설계기준

최근 강교량에 피로파괴가 많이 발생함에 따라 각국에서는 피로설계기준을 제시하고 있다. 우리나라의 도로교표준시방서 피로설계기준에서는 응력범위-수명 기법을 이용한 선형피로손상모형에 근거하여 피로등급별로 사용기간중에 예상되는 반복횟수에 따른 허용피로응력범위를 제시하고 있다. 여기에서 응력범위 $\Delta\sigma$는

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3)$$

이며, 허용응력범위가 반복회수 10만회, 50만회, 2백만회, 그리고 2백만회이상에 대하여 각각 설정되어 있다.

미국 AASHTO에서는 1994년 LRFD 설계기준을 제정하면서 과거 AASHTO의 Guide Specification인 강교량 피로설계기준과 유사한 새로운 피로설계기준을 채택하였다. 현재 국내 시방서가 근거하고 있는 기존 AASHTO Standard Specification의 피로설계기준에서는 예상트럭교통량을 개략적으로 분석하여 실제 트럭교통량의 변화에 따른 피로손상 정도가 제대로 반영되지 않았다. 그러나 새로운 피로설계기준에서는 가정하는 사용기간중의 예상트럭교통량을 반영하는 매우 합리적인 설계법을 채용하고 있다.

3.2 누적피로손상모형

강재의 피로손상을 모형화하는 기법은 여러 가지가 있지만 일반적인 설계목적으로는 선형피로손상모형을 이용한 응력범위-수명기법이 널리 이용되고 있다. 응력범위-수명기법은 응력범위 $\Delta\sigma$와 피로수명 N과의 관계에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\sigma^m \cdot N = C \quad (4)$$

실험결과들을 분석해 보면 계수 m은 일반적으로 상수 3을 가지고, C는 피로등급의 종류에 따라 일정한 값을 가지게 된다.

변동응력에 대한 피로손상모형은 선형피로손상모형인 Miner법칙이 널리 이용되고 있으며, 다음과 같은 피로한계상태로 나타낼 수 있다.

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (5)$$

여기에서 n_i는 특정응력범위 $\Delta\sigma_i$의 반복횟수이며, N_i는 $\Delta\sigma_i$에 대한 피로수명이다. 즉, 각 응력범위에 의한 피로손상은 그 응력범위의 피로수명에 대한 반복회수의 비율에 비례하며, 이러한 피로손상은 선형으로 누적된다고 보는 것이다. 위의 $\Delta\sigma_i$와 N_i는 응력범위-수명 피로손상모형에 의해 정리하면 다음과 같다.

$$(\Delta\sigma_i)^m \cdot N_i = C \quad (6)$$

다양한 $\Delta\sigma_i$에 대하여 등가응력범위 $\Delta\sigma_e$를 정

의하면,

$$(\Delta\sigma_e)^m \cdot N = \sum(\Delta\sigma_i)^m \cdot n_i \quad (7)$$

이고, 식 (7)에서,

$$(\Delta\sigma_i)^m \cdot n_i = C_i \quad (8)$$

라고 하면, 피로한계상태는

$$\sum C_i = C \quad (9)$$

로 표시될 수 있다. 즉, 각 변동응력범위에 의한 피로손상계수 C_i가 누적되어 대상 강재의 한계피로손상계수 C를 초과하게 되면 피로파괴가 발생하게 되는 것이다. 누적피로손상을 분석하는 자세한 과정은 참고문헌 6을 참고하면 된다.

3.3 차량통행에 의한 누적피로손상계수의 확률적인 특성

피로손상모형을 이용하여 차량 통행에 의해 발생되는 응력범위와 반복회수로 부터 통행특성에 따른 피로손상계수를 얻을 수 있으나, 이 피로손상계수는 통행특성에 따라 일정한 값을 가지지 않고 확률적인 변동특성을 가지게 된다. 피로손상계수의 확률적인 특성을 분석하기 위해서는 사용기간 동안에 통행하는 특정한 차량행렬에 의해 발생하는 변동응력의 반복횟수 n_i와 특정 차량행렬에 의해 발생하는 변동응력에 대한 등가응력범위 $\Delta\sigma_{ei}$의 확률적인 특성을 먼저 분석하여야 한다. 이 변수들의 관계를 식으로 나타내면 다음 식 (10)과 같다.

$$Q_i = n_i \cdot (\Delta\sigma_{ei})^m \quad (10)$$

여기에서 Q_i는 사용기간 동안에 i번으로 분류된 특정한 통행특성에 의한 피로손상계수, n_i와 $\Delta\sigma_{ei}$는 사용기간 동안 i번 통행특성을 가지는 차량행렬에 의해 발생하는 변동응력의 반복횟수 및 등가응력범위이다. 또한, 식 (10)의 Q_i는 매우 큰 수의 확률변수의 합이 되므로 central limit theorem 에 의해 정규분포의 특성을 가지게 된다.

3.4 피로설계하중 결정기법

강도로교의 피로안전수준은 일일평균트럭교통량(ADTT)과 깊은 관계를 가지고 있으며 이러한 특성을 반영하여 본 연구에서는 모의분석된 강도로교의 누적피로손상과 ADTT로부터 등가응력범위를 구하고, 이 등가응력범위를 다양한 가상설계하중재하조건에 의한 응력범위와 비교하여 적절한 피로설계하중의 재하방법 및 수준을 분석하였다. ADTT에 의한 등가응력범위는 다음 식 (11)과 같이 산정된다.

$$\Delta\sigma_{ea} = \left(\frac{E[C]}{ADTT}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

여기서, $E[C]$는 모의분석된 일일누적피로손상의 평균값이며 ADTT는 일일평균트럭교통량이다.

다양한 형식의 교량에서 발생하는 등가응력범위는 각각 수준이 다르며 통행특성에 따라서도 그 크기가 변화하게 된다. 따라서 다양한 교량구조형식과 통행특성에 따른 피로손상의 수준을 일관성있게 반영할 수 있는 피로설계하중을 이용하여 피로설계를 수행하여야 한다.

합리적인 피로설계하중의 수준을 결정하기 위해 다양한 교량형식과 통행특성에 대한 등가응력범위를 여러가지 형태의 가상설계하중재하에 따라 발생하는 응력범위와 비교, 분석하여 등가응력범위에 대해 일관성있는 피로손상의 수준을 나타내는 가상설계하중재하조건을 피로설계를 위한 최적설계하중재하조건으로 결정하였다. 이를 식으로 표시하면,

$$\frac{\Delta\sigma_{ea}}{\Delta\sigma} = R \quad (12)$$

이며, 여기서 $\Delta\sigma_{ea}$는 각 교량의 임의의 통행특성에 대한 모의분석된 (일일평균트럭교통량에 대한) 등가응력범위이며, $\Delta\sigma$는 각 교량에 있어 가상설

계하중재하조건에 의한 최대응력범위이다. 여기서 다양한 교량 및 교통특성에 대하여 R의 변이계수가 가장 작은 경우가 일관성 있는 피로손상분석을 위한 재하조건이라 할 수 있다. 위의 식 (12)를 다시 정리하면

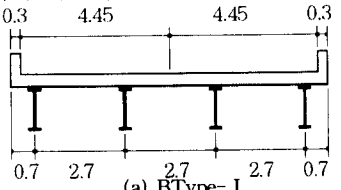
$$\Delta\sigma_{ea} = R \cdot \Delta\sigma \qquad (13)$$

이며, 따라서 피로설계하중 재하에 의한 응력범위 $\Delta\sigma$와 R값을 알면 요구되는 안전율과 예상되는 ADTT를 이용하여 피로설계를 수행할 수 있다.

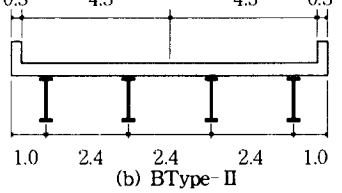
4. 피로설계하중 분석

4.1 개요 및 대상교량 선정

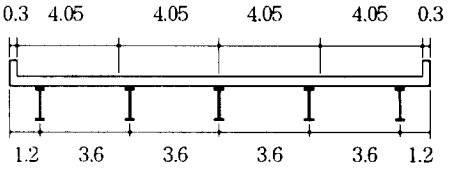
합리적인 피로설계하중 결정을 위하여 그림 1과 같이 다수의 대상교량을 선정하였으며 여기에 다양한 통행특성을 적용하여 분석하였다. 자료의 규모는 총 324개로 2차선 및 4차선의 단순교 교량 30m, 45m, 60m와 2차선 2경간연속교 30m+30m, 45m+45m, 60m+60m 및 2차선 3경간연속교 30m+30m+30m, 45m+45m+45m, 60m+60m+60m의 총 27개의 교량을 대상으로 하였다. 통행특성으로는 중차량혼입률 25%, 30%, 35%를 분석하였고 일일교통량은 2차선교량(편도 1차선)의 경우는 일방향 10,000대, 14,000대, 18,000대, 4차선교량(편도 2차선)의 경우는 일방향 20,000대, 30,000대, 40,000대로 변화시켜 가면서 분석하였다.



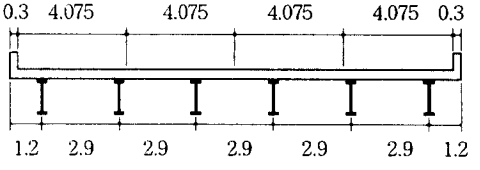
(a) BType-Ⅰ



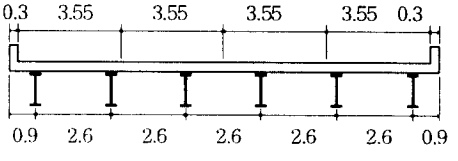
(b) BType-Ⅱ



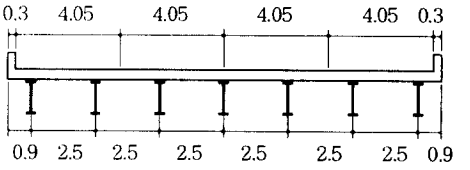
(c) BType-Ⅲ



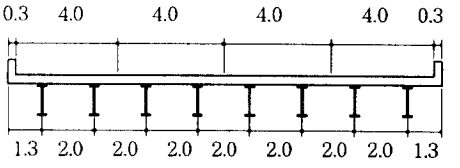
(d) BType-Ⅳ



(e) BType-Ⅴ



(f) BType-Ⅵ



(g) BType-Ⅶ (단위 : m)

그림 1. 대상교량의 단면제원

4.2 AASHTO LRFD 피로설계기준 분석

미국의 AASHTO LRFD 피로설계기준에는 예상되는 ADTT와 피로설계트럭에 의한 응력범위를 가지고 부재등급별로 허용되는 피로손상에 대하여 피로안전성 검토를 하게 되어있다. AASHTO LRFD 기준에서 규정한 기본피로검토식은 다음 식 (14)와 같다.

$$\gamma \cdot (\Delta f) \le (\Delta F)_n \qquad (14)$$

여기에서, γ = 하중계수 (= 0.75)

Δf = 피로트럭하중에 의한 응력범위

$(\Delta F)_n$ = 피로설계한계응력

이다. 여기서 피로트럭하중은 횡방향으로 1대를 재하한다.

본 연구에서는 대상교량중 단순교에 대하여 AASHTO LRFD 피로설계기준에 의한 피로설계에서 예상하는 설계피로손상과 본 연구의 모의분석결과에 의한 피로손상의 수준을 비교·분석하였다. 대표적인 교량에 대한 결과가 그림 2에 나타나 있다. 그림에서 가로축은 교량의 지간장이며 세로축은 모의분석에 의한 피로손상을 AASHTO LRFD 설계방법에서의 설계피로손상으로 표준화시킨 값(그림 2의 실선)이다. 대표적인 통행특성으로 중차량혼입률은 25%와 30%를 분석하였으며 일일교통량은 2차선 10,000대, 14,000대, 4차선 20,000대, 30,000대를 고려하였다.

그림에서 알 수 있듯이 AASHTO LRFD 피로설계 방법은 교량이 동일한 횡방향 특성을 가지는 경우에는 지간장에 따라서 비교적 일정한 안전수준을 유지하지만 차선수나 교폭의 변화에 대해서는 안전수준의 차이가 큰 것으로 나타났다. 즉, 4차선의 경우에는 AASHTO LRFD 설계기준에서 예측되는 피로손상이 모의분석에 의한 피로손상과 비슷한 수준으로 나타나지만 2차선의 경우에는 모의분석에 의한 손상이 설계시 예측되는 손상보다 훨씬 작아 4차선에서는 2차선에 비하여 안전수준이 상당히 낮은 것으로 분석되었다. 또한, 4차선인 경우에 모의분석에 의한 피로손상과 설계시 예상하는 피로손상이 비슷한 수준으로 나타난다는 것은 우리나라의 교통특성에 AASHTO LRFD 피로설계하중을 적용하기에는 안전율을 고려할 때 설계하중의 수준이 상당히 낮은 것을 의미한다. 따라서, AASHTO LRFD 설계방법과 동일하게 피로설계를 하되 하중은 현행 도로교표준시방서의 DB-24 하중(AASHTO LRFD 설계방식대로 1대 재하)을 이용한 결과를 그림 2에 함께 도시하였다(그림 2의 점선). DB-24하중은 AASHTO LRFD 피로설계하중보다 큰 값을 가지기 때문에 DB-24 하중을 이용하여 설계하면 안전율이 훨씬 상승함을 알 수 있다. 그러나 DB-24하중을 재하하는 경우도 역시 교폭에 따른 안전수준의 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한, AASHTO LRFD 설계기준에는 편도 2차선 이상의 교량에 대하여 1차선 ADTT (single-lane ADTT)를 이용하지만 이를 이용하는 것은 설계시 편도 2차선 이상의 교량의 안전수준을 낮추는 결과를 가져오므로 본 연구에서와 같이 차선수에 관계없이 일방향 일일평균트럭교통량을 이용하는 것이 보다 합리적인 것으로 분석되었다. 그림 3은 1차선 ADTT를 이용한 경우보다 일방향 전체차선의 ADTT를 이용한 경우가 교폭에 따른 안전수준의 차이가 줄어들었음을 보여주고 있다.

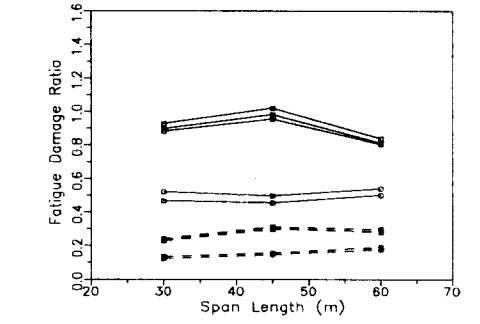


그림 2. AASHTO LRFD 피로설계방법에 의한 피로손상수준

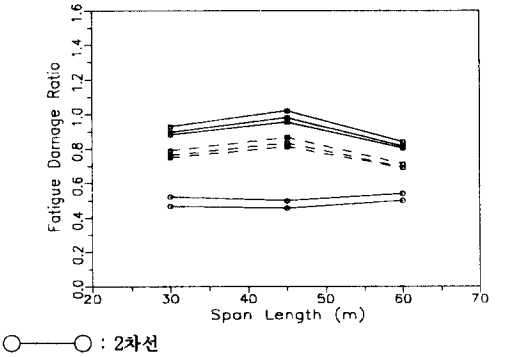


그림 3. 응력반복회수 산정방법에 따른 피로손상수준

4.3 피로설계하중 결정을 위한 하중재하모형

앞에서 설명한 것과 같이 AASHTO LRFD 피로설계기준은 차선수에 따라 안전수준의 차이를 보이고 있어 본 연구에서는 합리적인 피로설계를 위해 다양한 형식의 가상설계하중재하조건을 선정하여 피로설계하중의 형식과 수준을 분석하였다. 본 연구에서 사용한 재하조건은 표 2와 같으며 특히 재하조건 2는 현재 AASHTO LRFD 피로설계기준에서 제시한 피로설계하중 재하방법과 유사한 것으로 이는 AASHTO LRFD 피로설계기준과의 비교를 위한 것이다. 여기서 차선재하라는 것은 지간장에 따라 DB-24하중이나 DL-24하중을 차선수에 따라 재하시키는 경우를 의미하며, DB-24재하라는 것은 지간장에 관계없이 DB트럭하중을 재하하는 방법을 의미한다.

4.4 등가응력범위와 재하조건에 의한 최대응력범위

다양한 통행특성과 교량형식에 따라 교량에 누적된 피로손상과 중차량통행량을 가지고 등가응력범위의 값을 계산하였다. 이 값은 통행특성이나 교량별로 각기 다른 값을 가지게 되며 내부지점에 대한 등가응력범위를 산정하는 경우에는 AASHTO LRFD 피로설계기준과 같이 트럭당 응력반복회수를 1.5배 증가시켜 사용하였다. 표 3에 대표적으로 BType-Ⅱ와 BType-Ⅳ의 대표적 통행특성에 대한 등가응력범위의 값을 나타내었다.

표 2. 본 연구에서 사용한 재하조건

재하조건	2차선교량	4차선교량
1	현행 일반설계기준의 활하중 재하방법과 같이 재하	
2	DB-24 1대 재하	
3	1차선 재하	
4	DB-24 1대 재하	DB-24 2대 재하
5	1차선 재하	2차선 재하
6	재하조건 1과 동일. 단, 지간장에 관계없이 DB트럭하중을 재하.	
7	2차선재하	3차선재하
8	재하조건 6과 동일. 단, 하중감소계수 고려.	

표 3. 교량형식과 통행특성에 따른 등가응력범위

(단위 : kg/cm²)

중차량혼입률		25%			30%		
일일교통량(대) / 교량형식		10,000	14,000	18,000	10,000	14,000	18,000
BType-Ⅱ	30m	308.6	313.0	318.2	307.3	311.3	316.1
	45m	231.2	233.3	236.2	229.6	231.8	234.7
	60m	227.7	229.7	232.4	225.9	228.2	231.2
중차량혼입률		25%			30%		
일일교통량(대) / 교량형식		20,000	30,000	40,000	20,000	30,000	40,000
BType-Ⅳ	30m	281.2	288.9	300.1	286.2	291.2	293.4
	45m	219.0	228.6	241.2	217.6	227.9	239.1
	60m	187.8	194.8	204.8	191.8	197.3	200.1

표 4에는 대표적으로 표 2에서 제시한 재하조건에 대한 단순교 각 교량의 지간장 60m인 경우와 45m+45m 2경간 연속교인 경우의 최대응력범위가 정리되어 있다. 최대응력범위는 재하하중이 교량상을 이동하며 발생시키는 응력범위의 최대값을 의미한다.

표 4. 재하조건에 따른 최대응력범위

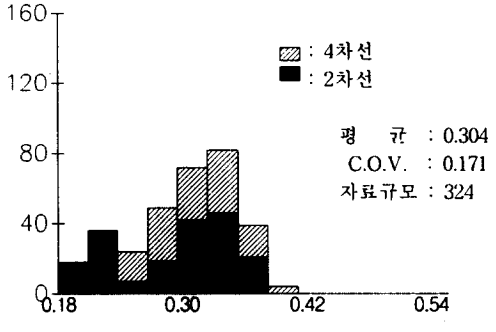
(단위 : kg/cm²)

BType \ 재하조건			1	2	3	4
2차선 단순교	Ⅰ	지간 중앙	767.0	488.2	578.6	488.2
	Ⅱ		714.9	573.4	571.3	529.6
4차선 단순교	Ⅲ		735.3	396.8	467.0	594.3
	Ⅳ		740.5	444.1	513.0	632.7
	Ⅴ		755.8	413.6	483.3	612.5
	Ⅵ		743.5	427.2	489.3	618.6
2차선 연속교	Ⅱ	지간중앙	1015.4	957.4	957.4	957.4
		내부지점	793.3	289.6	328.6	289.6

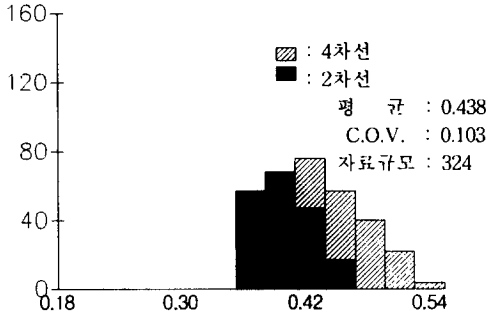
BType \ 재하조건			5	6	7	8
2차선 단순교	Ⅰ	지간 중앙	578.6	630.4	767.0	630.4
	Ⅱ		631.9	662.8	805.8	662.8
4차선 단순교	Ⅲ		722.2	663.3	817.0	596.9
	Ⅳ		764.7	675.8	822.8	608.2
	Ⅴ		745.4	679.3	839.8	611.3
	Ⅵ		742.8	678.4	826.1	610.6
2차선 연속교	Ⅱ	지간중앙	957.4	1222.1	1222.1	1222.1
		내부지점	328.6	356.5	396.7	356.5

4.5 피로설계하중 재하방법 결정

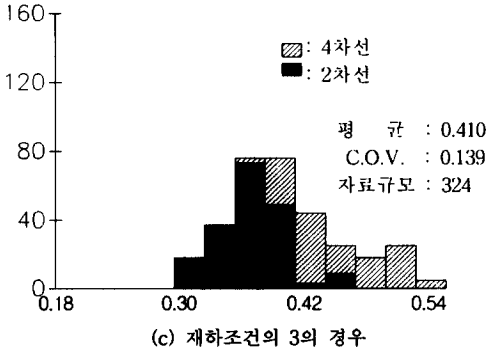
4.4에서 구한 등가응력범위와 재하조건에 대한 최대응력범위를 가지고 피로설계하중을 결정할 수 있다. 그림 4는 이의 결과를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 여기서, 가로축이 나타내는 값은 등가응력범위를 각 재하조건에 의한 최대응력범위로 표준화시킨 값이며 세로축은 자료의 빈도이다. 예를 들어, 설계활하중재하의 경우인 재하조건 1에서 표준화된 값이 0.3이라는 것은 피로손상에 의한 등가응력범위의 수준이 설계활하중에 의한 최대응력범위의 30% 수준임을 의미한다. 그림 4에서 알 수 있듯이 다양한 교량형식과 통행특성에 대하여 비교적 일정한 수준을 가지는 재하조건은 변이계수(C.O.V.)가 가장 작은 재하조건 6의 경우임을 알 수 있다. 즉, 피로설계를 하는 경우에도 교량강도설계시에 교량단면의 횡방향 영향선도에 따라 결정되는 재하차선수 만큼 DB-24하중을 재하하는 것이 가장 일관성있는 재하형태라고 할 수 있다. 한편, 하중감소계수를 고려하는 재하조건 8의 경우도 재하조건 6과 C.O.V.의 차이가 미소하므로 편의성을 고려하여 재하방법을 조절할 수 있다. 따라서, 교량설계시에는 지간장에 따라 DB하중과 DL하중을 선택하여 재하하지만 피로설계시는 지간장에 관계없이 DB하중을 재하하는 것이 일관된 안전수준을 확보할 수 있고 또한, 횡방향으로는 설계시 재하차선수만큼 재하하는 것이 교폭에 따른 응력범위의 변화를 잘 반영할 수 있는 것으로 분석되었다. 한편, 현재 AASHTO LRFD 피로설계기준과 유사하게 재하한 경우인 재하조건 2의 경우는 그림 4-(b)에서 알 수 있듯이 차선수 또는 교폭에 따라 수준이 완전히 분리되는 경향을 보이며 일정한 안전수준을 가지지 못하는 것으로 나타났다.



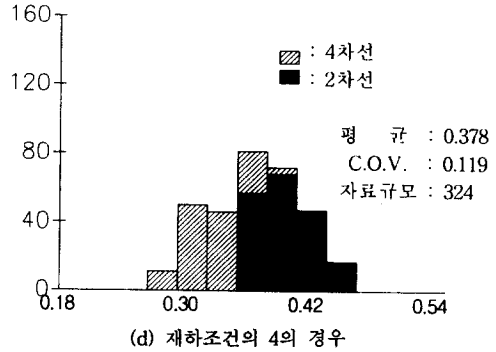
(a) 재하조건 1의 경우



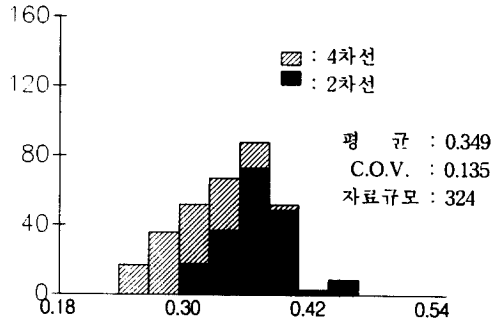
(b) 재하조건의 2의 경우



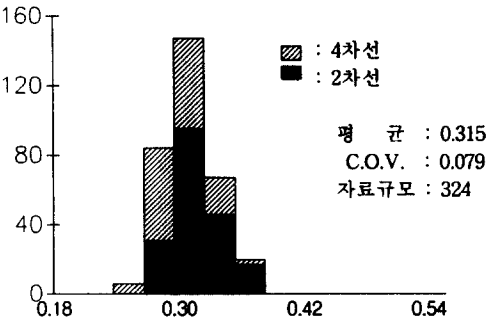
(c) 재하조건의 3의 경우



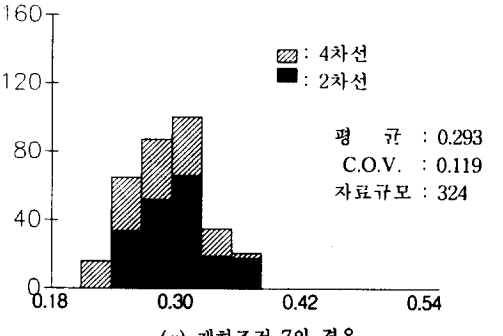
(d) 재하조건의 4의 경우



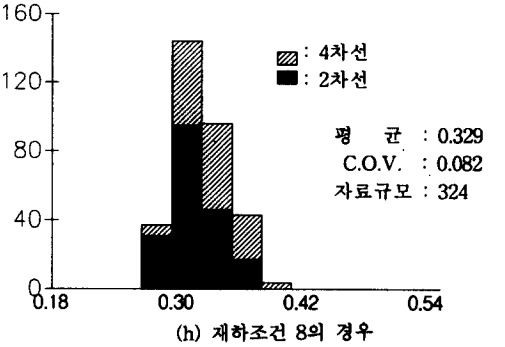
(e) 재하조건 5의 경우



(f) 재하조건 6의 경우



(g) 재하조건 7의 경우



(h) 재하조건 8의 경우

그림 4. 재하조건에 대한 등가응력범위

4.6 피로설계차량하중 형태 결정

4.5에서 제시한 피로설계하중재하방법에 사용한 트럭의 형태는 DB-24하중으로 2축과 3축 사이의 거리가 4.2m인 것이다. 따라서 본 연구에서는 보다 합리적인 피로설계하중의 형태를 결정하기 위하여 AASHTO LRFD 피로설계하중과 동일하게 2축과 3축 사이의 거리가 9.0m인 경우와 추가로 6.6m인 경우의 등가응력범위의 수준을 분석하였다. 이 분석에는 피로설계하중 재하방법으로 재하조건 6을 이용하였으며 자료의 규모는 324개이다. 이에 대한 결과가 그림 5에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 2축과 3축사이의 거리가 4.2m에서 9.0m로 증가함에 따라 C.O.V.값이 더욱 작아짐을 알 수 있다. 이는 도로교의 형식에 따른 피로설계의 안전수준이 2축과 3축사이의 거리가 9.0m인 차량형식을 이용할 때 가장 일관성있음을 나타내는 것이다.

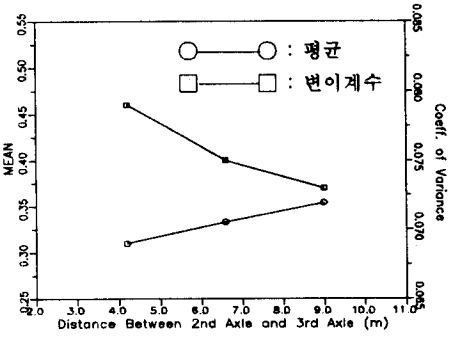


그림 5. 2축과 3축사이의 거리에 따른 평균과 변이계수의 변화

4.7 피로설계차량하중 수준 결정

본 연구에서는 합리적인 피로설계하중의 재하방법으로 일반 설계시 재하방법과 유사한 방법을 선택하였으며 피로설계하중의 형태는 2축과 3축 사이의 거리가 9.0m인 DB-24 트럭하중을 선정하

였다. 또한, 피로설계하중의 수준을 결정하기 위하여 자료분포를 정규분포로 가정하고 피로설계시 충분한 안전율을 확보하기 위하여 안전수준을 β =5 ($P_f = 0.29\times10^{-6}$)로 선정하였다. 여기서 β는 안전지수로서 정규분포인 경우 다음과 같이 결정된다.

$$\beta = \frac{R_t - \mu}{\sigma} \tag{15}$$

여기서 μ = 자료의 평균이고 σ = 자료의 표준편차이다. 따라서, β의 안전수준을 가지는 재하조건에 대한 등가응력범위의 수준은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_t = \mu + \beta \cdot \sigma \tag{16}$$

여기서 구한 R_t는 등가응력범위를 재하조건에 의한 응력으로 표준화시킨 값으로 설계시 하중계수로 이용할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 선정한 피로설계하중에 대한 등가응력범위의 수준은 평균값이 0.354이며 표준편차가 0.026이므로 β=5일 때 R_t는 0.48이 된다. 이는 교량 대상부재의 피로손상에 대한 등가응력범위가 안전율을 고려하면 현행 도로교표준시방서의 DB-24하중에 의한 응력범위의 48% 수준인 것을 의미한다. 따라서 설계시 재하차선수 만큼 DB-24하중을 재하하여 피로설계를 수행하는 경우 하중계수를 0.48로 하여 설계할 수 있다. 참고로 AASHTO LRFD의 피로설계기준에서는 피로트럭 1대 재하에 의한 응력범위에 하중계수로 0.75를 사용하고 있다. 이를 차량형식은 다소 다르나 재하방법이 동일한 재하형식 2의 분석결과에 의해 검토하면 0.75는 대략 $\mu+6.9\sigma$의 수준이다. 따라서 관련 시방서의 결정시에 필요에 따라 안전수준을 증가하는 것도 가능하다.

본 연구에서는 선정된 대상교량에 대하여 하중계수는 0.48로 하여 재하조건 6과 같이 피로설계를 수행하였다. 이에 대한 결과가 그림 6에 정리되어 있으며, 지간장과 교폭에 대해 일정한 안전수준을 가지는 것으로 분석되었다.

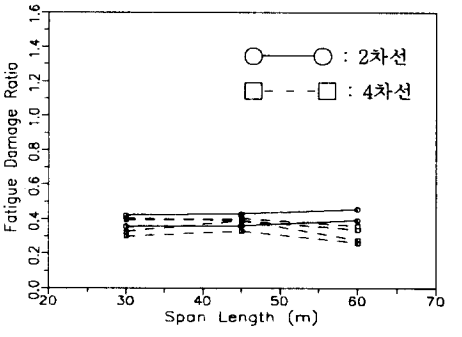


그림 6. 제안한 설계방법에 의한 피로설계결과

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 제안한 피로설계하중 재하방법과 피로설계하중은 일정한 안전수준을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

(2) 일일평균트럭교통량(ADTT)은 피로손상에 큰 영향을 미치기 때문에 AASHTO LRFD 피로설계기준과 같이 일일평균트럭교통량(ADTT)을 피로설계시 반영하면 보다 합리적인 피로설계를 할 수 있다. 그러나, 현행 AASHTO LRFD 피로설계방법은 교폭이나 차선수에 따라 일정한 수준의 안전성을 확보하지 못하는 것으로 나타났으며 하중의 수준도 국내의 피로손상을 반영하기에는 다소 작은 것으로 분석되었다.

(3) 합리적인 피로설계하중의 재하방법을 선정하기 위해 여러 대상방법을 비교검토한 결과 DB형식의 트럭하중을 지간장에 관계없이 사용하고 횡방향재하에 있어 일반설계시 재하방법과 동일하게 적용하는 것이 가장 합리적인 것으로 판단되었다. 이 방법에 의하면 교폭이나 지간장에 따라 보다 일정한 수준의 안전성을 확보할 수 있으며 피로설계용 트럭하중의 형태는 2축과 3축사이의 거리를 9.0m로 하는 것이 가장 바람직한 것으로 분

석되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 일반목적 기초연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) American Association of State Highway and Transportation Officials: 1989, Guide Specifications for Fatigue Design of Steel Bridges.

(2) American Association of State Highway and Transportation Officials: 1994, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.

(3) 건설교통부 : 1996, 도로교표준시방서.

(4) 김상효, 박홍석 : 1992. 12, 도로교 차량하중 및 통행특성에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제12권, 제4호.

(5) 阪神고속도로공단 : 1986, 阪神고속도로의 설계하중체계에 관한 조사연구, 설계하중위원회.

(6) 김상효, 이상호, 김수복 : 1996.1, 강도로교 피로손상평가기법에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제16권, 제1-1호, pp.93~104.

(접수일자 : 1997. 5. 1)