

프리스트레스트 콘크리트 교량거더의 등가피로하중모델

An Equivalent Fatigue Load Model for Prestressed Concrete Bridges Girders

김지상*

Kim, Jee Sang

요 약

본 논문은 실제 교량위를 통과하는 차량에 의하여 프리스트레스트 콘크리트 합성거더 교량에 발생하는 피로하중을 합리적으로 표현할 수 있는 등가피로하중모델을 도출하는데 그 목적을 두고 있다. 교량에 작용하는 피로하중은 그 크기와 지속시간이 불규칙한 것이므로 이를 고려하여 크기 및 작용주기가 일정하면서 불규칙피로하중과 같은 피로손상을 줄 수 있는 등가의 피로하중 모델을 제안하여 피로해석 및 설계를 간편하고 합리적으로 수행할 수 있도록 하였다. 또, 이 모델의 적용성을 검토하기 위하여 국내의 교통량조사 자료를 이용하여 교량을 통과하는 차량의 확률모델을 도출하고, 이 모델로부터 작용모멘트의 확률특성을 결정하여 피로해석을 수행하였다.

Abstract

The goal of this study is to develop an equivalent fatigue load model for prestressed concrete composite girder bridges in Korea. To meet this goal, the probabilistic characteristics of traffics which cause fatigue damage in bridges are properly modeled. An equivalent fatigue load model for prestressed concrete composite girder bridges with constant amplitude and frequency is established. The model proposed in this paper is very simple to use and gives fairly good results.

keywords : equivalent fatigue load model, prestressed concrete, fatigue, prestressed concrete composite girder bridge, traffic load

1. 서 론

최근 들어 산업화의 급속한 진행에 따른 교통량의 증가는 교량을 통과하는 차량하중형태의 변화를 가져왔으며, 구조공학 기술의 향상에 의한 고강도 재료의 사용이 늘어나면서 구조 부재 단면의 경박화가 이루어져왔다. 또, 구조부재의 피로거동 및 해석에 대한 연구가 지속되면서 교량을 통과하는 차

량에 의한 피로파괴가 일어나지 않더라도, 균열의 발생 또는 처짐의 증가에 의한 사용성의 감소가 일어날 수 있다는 사실이 밝혀지게 되었다⁽¹⁾. 따라서, 프리스트레스트 콘크리트 교량을 포함한 다양한 형태의 교량 설계 및 해석에 있어서 피로를 별도로 고려할 필요가 대두되게 되었다. 그러나, 지금까지 국내외에서 이루어진 대부분의 연구는 프리스트레스트 콘크리트 부재를 구성하고 있는 재료

* 정회원, 한국통신 선로기술연구소 토목기술개발부 토목2연구실장

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 1994년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

인 콘크리트, 철근 및 PS 강재의 피로특성에 관한 내용 또는 부재의 피로거동 및 피로해석에 관한 연구등에 치중되어 있는 실정이다. 교량 등 구조물의 해석 및 설계에 있어 구조물의 거동 또는 저항특성에 대한 지식과 더불어 작용하는 하중에 대한 정확한 모델링이 요구되는 점을 고려하면, 하중의 특성을 규정하는 것은 매우 중요한 일이다. 특히 피로하중과 같이 하중의 크기 뿐만 아니라 하중의 지속시간 및 하중작용시간 간격이 변화하는 것이 중요한 요소인 경우에는 하중의 모델링이 더욱 큰 영향을 미친다 할 수 있다.

본 논문에서는 하중의 크기 및 작용주기가 불규칙하게 변화하는 피로하중을 일정진폭 및 주기를 갖는 등가의 피로하중으로 변환하여 표현할 수 있는 방법을 도출하는데 그 목적을 두고 있다. 이 때 등가피로하중은 대상구조물에 실제의 불규칙한 피로하중과 같은 정도의 피로손상을 일으키도록 정의되어야 한다. 즉, 시간의 진행에 따르는 재료의 특성변화를 고려할 수 있는 프리스트레스트 콘크리트 합성거더 교량의 피로해석기법⁽²⁾을 이용하여 도출한 대상구조물의 S-N 곡선으로부터 각 하중단계별 피로수명 또는 피로손상을 규정하여 동일한 피로손상을 유발시키는 등가피로하중 모델을 제안하였다.

이 모델의 적용성을 검증하기 위하여 국내 실존 교량을 대상으로 조사한 교통량자료를 이용하여 시간이력을 이용한 피로해석을 수행하였다. 우선, 국내의 교통량조사 자료로부터 실제 교량에 피로손상을 일으킬 수 있는 범위의 차량을 추정하여 대상차량의 중량에 대한 확률특성을 히스토그램형태로 도출하였다. 그리고, 동적 유한요소해석법⁽³⁾을 적용하여 차량중량의 히스토그램을 교량에 작용하는 휨모멘트의 히스토그램 형태로 변환하였다. 이 히스토그램을 바탕으로 simulation을 하여 교량에 발생하는 모멘트의 시간이력(time history)을 도출하고 전 시간 구간에 걸친 피로해석을 하여 본 논문에서 제안한 등가피로하중모델을 적용한 결과와 비교하였다.

2. 등가 피로 하중 모델

2.1 개요

구조물에 피로손상을 일으키는 피로하중은 시간에 따라 그 크기가 변화하는 동적하중의 하나로서, 일반적인 동적하중의 경우와 같이 시간의 진행에 따르는 하중의 변화를 표현하여야 한다. 그런데, 피로하중은 반복적으로 작용하여 구조물에 점진적으로 구조적인 손상을 일으키거나 사용성의 손실을 유발시키는 하중으로 상대적으로 장기간에 걸쳐서 일어나게 되므로 이를 하나의 하중시간이력(load time history)으로 나타내기에 많은 어려움이 있다. 또한 피로하중은 그 크기 및 작용주기가 매우 불규칙한 특성을 갖고 있다. 따라서 일반적인 구조물의 동적해석의 경우처럼 시간영역에서 전체 하중이력에 대한 구조해석을 수행함으로써 변위 또는 응력으로서 구조물의 응답이력(response history)을 도출하는 것은 현실적으로 불가능하다. 즉, 하중이력의 모델링 및 구조물의 해석 측면 모두에서 문제점이 발생하게 된다.

강구조물의 피로에 대한 경우는 등가피로응력(equivalent fatigue stress)으로 알려진 모델이 개발되어 사용되고 있다⁽⁴⁾. 이 모델은 실제의 피로하중에 의하여 유발된 피로손상과 동일한 정도의 피로 손상을 일으킬 수 있도록 결정되었으며, 이 때 피로손상의 누적은 Miner의 선형누적손상이론을 적용하였다. 그러나, 이 모델은 유도과정에서 강재의 피로특성을 이용하였으므로 콘크리트 구조물의 피로해석 또는 설계에 직접 이용할 수 없다. 본 절에서는 강재의 피로특성을 바탕으로 결정된 등가피로응력모델⁽⁵⁾에 대하여 서술하고, 이를 적용하여 프리스트레스트 콘크리트 합성거더 교량에 적합한 등가피로하중모델을 도출하였다.

2.2 등가피로응력모델

등가피로응력 모델의 도출은 실제로 크기 및 재하주기가 불규칙하게 변화하는 피로하중을 크기 및 재하주기가 일정한 피로하중의 형태로 변환하여 피로설계 및 해석을 효율적으로 수행하고자하

는데 그 목적이 있다. 이 모델은 전술한 바와 같이 강재로 구성된 부재 또는 구조물에 적용될 수 있는 것으로 Miner의 법칙으로 알려진 선형피로손상누적이론(linear fatigue damage accumulation theory)이 성립된다는 가정에서 출발하였다. 강재의 피로특성을 기술하는 S-N 곡선은 다음의 형태로 정의되는 것이 일반적이다.

$$n\sigma^B = k \quad (1)$$

여기서, n = 하중의 반복횟수, σ = 응력의 크기, B, k = 실험으로 결정되는 상수이다. 따라서, 응력스펙트럼을 응력의 크기 및 주기의 특성에 따라 일련의 α_i 로 나타낼 수 있다면 반복횟수 n_i 만큼 작용하는 피로응력 σ_i 에 의한 피로손상, D_i 을 다음과 같이 응력의 항으로 쓸 수 있다.

$$D_i = \frac{k/\sigma_i^B}{\sum n_i} \quad (2)$$

강재의 피로특성이 포함된 식(2)를 이용하여 등가피로응력을 구할 수 있는데, 일정시간 또는 일정횟수만큼 불규칙하게 변화하며 작용하는 피로하중에 의하여 유발된 손상의 총합이 실제피로하중과 같은 시간 또는 횟수만큼 작용하는 등가피로응력으로 유발되는 손상과 일치한다는 사실로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$n_{te}\sigma_e^B = \sum_i n_i \sigma_i^B \quad (3)$$

여기서, n_{te} = 등가피로응력의 반복횟수 = $\sum_i n_i$, σ_e = 등가피로응력이다. 따라서, 식(3)을 변환하여 등가피로응력을 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_e = [\sum_i \alpha_i \sigma_i^B]^{1/B} \quad (4)$$

여기서, α_i = 전체하중반복횟수에서 n_i 가 차지하는 비율이다. 강재의 피로특성을 바탕으로 유도한 등가피로응력 모델의 결정절차를 이용하고 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 S-N특성을 고려하면 그에 적합한 등가피로하중모델을 결정할 수 있다.

2.3 프리스트레스트 콘크리트 합성거더 교량의 등가피로하중 모델

강재에 적용한 피로해석절차를 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 피로해석에 직접 적용하는 데는 몇 가지 문제점이 있다. 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 경우 콘크리트, 철근 및 PS 강재의 서로 다른 재료로 구성된 부재이므로 강재부재와 달리 피로파괴가 일어나는 손상 또는 손상누적의 정도를 하나의 변수로 정의하기가 어렵다. 또, 강재의 경우 부재에 작용하는 하중과 이로 인하여 단면에 발생하는 응력 사이에 선형관계가 있다는 가정하에 설계 및 해석이 이루어지지만, 프리스트레스트 콘크리트 부재는 부재단면의 균열, 시간의 진행에 따른 재료의 특성 변화, 재료의 이질성 등 여러 가지 이유에 의하여 하중-응력 사이의 비선형 관계에 근거한 해석이 수행되므로 피로하중을 곧 재료에 나타나는 응력으로 표현하는데 어려움이 있다. 그리고, 프리스트레스트 콘크리트 부재의 피로파괴 양상 및 파괴한계에 대한 명확한 정의가 이루어지지 않은 점도 강재와는 다른 점이다.

전술한 바와 같이 등가피로하중은 실제 하중 조건하에서 받는 손상과 같은 정도의 손상을 받도록 결정되어야하므로, 피로파괴가 일어나는 상황 또는 형태를 정확히 정의할 수 있는 지수(index)가 필요하다. 그런데, 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 경우 부재를 구성하는 재료 중 어떤 한 재료의 피로파괴를 구분하여 정의하기 어려울 뿐더러 그것이 곧 부재 전체의 파괴를 의미한다고 판단하기 어렵기 때문에, 강재 부재와는 달리 구성재료의 응력이 아닌 부재 전체의 피로특성을 나타낼 수 있는 별도의 지수를 정의하는 것이 타당할 것이다. 본 논문에서는 프리스트레스트 콘크리트 합성거더가 주로 휨에 저항하도록 설계되는 부재임을 고려하여 부재에 작용하는 최대휨모멘트 (M_{max})와 그 하중에서의 피로수명(N)의 관계를 규정하고, 이를 이용하여 등가피로하중모델을 결정하였다. 이 때 부재에 작용하는 최소휨모멘트 (M_{min})는 부재자중에 의한 사하중모멘트로 생각하였으며, 최대휨모멘트를 부재의 극한휨강도

(M_{ult}) 값으로 나누어 정규화(normalize)시키고 이를 최대모멘트수준(maximum moment level)으로 정의하였다. Fig. 1은 최대모멘트 수준과 그에 대응하는 피로수명을 도시한 것으로 대상부재는 대한민국 건설부에서 제정한 표준 I단면의 프리스트레스트 콘크리트 합성거더이며, 이 곡선은 하중의 재하속도를 다양하게 변화시키면서 피로 해석을 수행한 후에 이를 회귀분석한 결과이다⁽²⁾. 이 곡선은 강재부재에서 등가피로응력 모델의 결정에 적용한 S-N 곡선과 같은 개념으로 본 논문에서 이용될 것이다.

피로하중스펙트럼을 몇 개의 하중구간(load range)으로 구분하여 나타낼 수 있으면 전체 피로손상의 누적량, D_t ,은 Miner의 법칙으로부터 각 하중구간별 피로손상, i ,의 총합으로 정의되며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} D_t &= \sum D_i \\ &= \sum \frac{n_i}{N_i} \\ &= \sum \frac{n_i}{10^{(m_i-a)/b}} \\ &= 10^{a/b} \sum n_i 10^{-m_i/b} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, m_i = i 번째 하중구간의 최대모멘트 수준, n_i = i 번째 하중구간의 반복횟수이며, 식(7)의 총합이 전체하중구간에 대하여 계산되면 전체 피로손상량을 구할 수 있다. 등가피로하중은 실제로 작용하는 피로하중과 동일한 손상을 일으키도록 정의되어야 하며, 이 때 등가피로하중의 반복횟수, n_e ,는 실제로 작용하는 피로하중 반복횟수의 총합과 일치되어야 한다. 따라서, 피로손상의 전체누적량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D_t &= \frac{n_e}{N_e} \\ &= \sum \frac{n_i}{10^{(m_i-a)/b}} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, N_e = 등가피로하중, m_e ,에 대하여 S-N 곡선으로부터 구한 피로수명이다. 식(7)과 식(8)을 이용하여 등가피로하중 또는 등가모멘트 수준, m_e ,을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_e &= -\text{blog}_{10}(S_m) \\ S_m &= \sum \alpha_i 10^{-m_i/b} \\ \alpha_i &= \frac{n_i}{\sum n_i} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 α_i = 전체하중반복횟수에 대한 i 번째 하중구간의 반복횟수의 비이고, S_m 은 식(9)에 보인

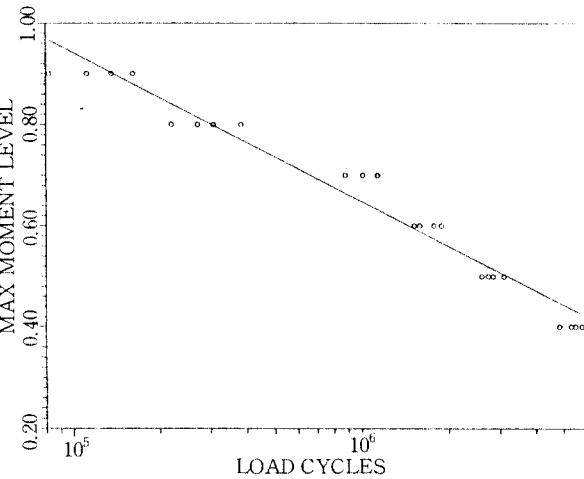


Fig. 1 S-N curve of KS prestressed composite girder bridge⁽²⁾

본 논문에서 고려한 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 최대모멘트수준과 피로수명의 관계는 다음 형태의 식으로 표현될 수 있다.

$$m = a + \text{blog}N \quad (5)$$

여기서, $m = M_{max}/M_{ult}$ = 최대모멘트 수준, a = 일정진폭하중하의 피로해석에서 얻어진 상수, 그리고, N = 최대모멘트수준 m 의 피로하중이 작용할 때 피로파괴가 일어나는 하중반복횟수이다. 또, Miner의 선형누적손상이론을 적용하기 용이하도록 식(5)를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$N = 10^{(m-a)/b} \quad (6)$$

바와 같다. 실제하중의 크기가 불규칙하게 변화하면서 프리스트레스트 콘크리트 합성거더에 작용하는 피로하중의 특성을 알 수 있고, 부재의 피로 특성을 식(5)와 같은 형태의 S-N곡선으로 나타낼 수 있으면 식(9)에 보인 결과를 이용하여 등가피로하중을 산정할 수 있다. 또, 식(9)는 식(5)와 같은 형태로 피로특성이 정의되는 임의의 재료에 대한 등가피로하중을 구하는 방법이 될 수 있다. 예를 들어 Tepfer 등⁽⁶⁾이 제안한 부근콘크리트의 S-N곡선이나, Harajli와 Naaman⁽⁷⁾이 제안한 PS 스트랜드에 대한 S-N 곡선은 이 범주에 든다.

3. 교량에 작용하는 피로하중 모델

3.1 개요

차량하중 또는 교통하중(traffic load)에 의한 교량의 피로파괴는 극한조건(extreme condition)이 아닌 일반적인 사용조건(service condition)에서 점진적으로 일어나는 현상이므로 피로하중의 결정 또한 피로를 유발시킬 것으로 판단되는 모든 경우의 차량을 고려대상으로 삼아야 한다. 그런데, 대부분의 시방서에 규정되어 있는 차량하중, 표준트럭하중 또는 차선하중은 정적해석을 수행하기 위한 하중으로서 교량에 작용할 수 있는 극한 조건을 상정하여 결정되는 것이 일반적이므로, 피로해석에 직접 적용하기는 곤란하다. 또한, 피로해석 및 설계에 필요한 하중에 대한 정보는 하중의 크기 이외에 하중의 작용횟수에 대한 내용도 포함하여야하므로 별도의 하중모델을 이용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 본 절은 교량에 작용하는 피로하중모델을 도출하기 위하여 우선 교량을 통과하는 차량의 확률특성을 국내의 교통량자료를 이용하여 모델링하였으며 도출된 차량의 확률특성을 바탕으로 전절에서 기술한 등가피로하중모델을 적용할 수 있도록 교량에 작용하는 피로하중 모멘트의 확률특성을 작성하였다.

3.2 교량을 통과하는 차량의 특성 및 피로설계 트럭

교량의 설계수명 동안 피로파괴를 일으키거나, 피로손상에 의한 사용성의 상실을 가져오는 피로하중은 교량을 통과하는 중차량에 의하여 생기게 된다. 승용차와 같은 소형차량은 대부분의 경우 강재의 피로한계(fatigue limit)보다 작은 정도의 응력을 유발시켜 강교량의 피로해석에는 적용되지 않는 것이 일반적이다⁽⁸⁾. 따라서, 본 논문에서 차량의 확률특성을 도출하기 위하여 사용된 자료 또한 통과차량 중 트럭에 대한 조사 결과⁽⁹⁾만을 토대로 하여 정리된 것이다. 외국 규정에는 다양한 형태의 트럭에 대하여 하중스펙트럼을 정의하여 놓은 경우가 있으며⁽¹⁰⁾, 교량의 피로해석 및 설계를 수행할 때 적용할 수 있는 표준트럭을 제안한 연구⁽¹¹⁾도 있으나, 국내의 연구는 매우 미흡한 실정이다.

교량을 설계하는데 기본이 되는 국내외의 시방서는 차량하중을 산정하는데 기준이 되는 규정을 제안하고 있는데, 예를 들면 국내의 경우 DB트럭하중과 DL차선하중이 사용되고 있고⁽¹²⁾, 미국의 경우 H 및 HS트럭하중과 차선하중이 AASHTO 시방서⁽¹³⁾에 규정되어 있으나, 이를 직접 피로하중의 모델로 적용하는데는 문제점이 있다. 이 중 차선하중은 도심지 혹은 교통밀집 지역에 있는 장기간 교량에 발생하는 정체현상에 의한 피로하중을 모사하는 것으로 생각할 수도 있겠으나 실제 이와 같은 상황의 발생빈도는 매우 낮으므로 피로하중의 형태로 고려하지 않는 것이 일반적이다⁽¹⁴⁾. 또, 평상시 교량을 통과하는 차량의 중량은 시방서에 규정되어 있는 설계트럭 또는 표준트럭의 중량보다 작는데 이는 설계트럭이 최악의 상황(worst condition)을 상정하여 결정되기 때문이며, 이들 사이에는 차이가 있게 마련이다. 따라서, 피로해석 및 설계를 합리적으로 수행할 수 있는 별도의 피로설계 트럭(fatigue design truck)을 정의하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 일반적으로 캔틸레버 교량과 같은 특수한 경우를 제외하고 피로하중의 1회 재하는 중차량 한대의 1회 통과와 같다고 간주한다. 이 때 차량 통과 후에 교량의 진동에 의

하여 발생하는 응력이나 차량 간격이 좁아서 생기는 상호작용 등에 의하여 발생하는 응력의 반복횟수를 고려하지 않아도 그로 인한 오차는 무시할 정도로 작다는 것이 알려져 있다⁽¹⁵⁾. 따라서 본 절에서는 일평균트럭통행량의 값을 직접 하중의 반복횟수로 간주하기로 하고 피로설계 트럭의 총중량 등 트럭 자체의 특성에 대한 내용만을 서술하였다.

피로설계 트럭은 기존의 시방서에 규정되어 있는 표준트럭과 같은 형태로 정의되는 것이 일반적이며, 그 총 중량의 결정은 피로설계트럭이 실제 통과차량의 댓수만큼 통과하였을 때 실제 피로손상량과 같은 정도의 피로손상을 일으키도록 결정된다. 이 때 피로손상의 누적은 등가피로하중모델을 결정할 때와 같이 Miner의 선형누적손상이론을 적용하는데, 식(10)은 강교량에 대하여 결정된 피로설계트럭의 총 중량, W_F , 을 나타내는 식이다.

$$W_F = \left(\sum_i \alpha_i W_i^3 \right)^{1/3} \quad (10)$$

여기서, $\alpha_i =$ 트럭중량이 W_i 인 트럭 집단이 전체 트럭 수에서 차지하는 비율이며, 이 식을 이용하면 전체트럭의 중량확률분포 또는 중량 히스토그램을 알 경우 피로설계트럭을 쉽게 정의할 수 있다. 그러나, 식(10)에 쓰인 상수인 3과 1/3은 구성재료의 특성에 의하여 결정되는 값으로 강재의 S-N곡선의 기울기로 일반적으로 인정되는 값이며^(11,16,17) 식(4)에 보인 것처럼 등가피로응력의 개념과 같이 정리된 것으로서 프리스트레스트 콘크리트 부재 또는 구조물에 직접 적용하기는 곤란하다.

본 논문에서는 수집된 트럭통행량에 대한 교통량 자료를 single truck과 semi-trailer의 2가지 형태로 나누었는데, 이는 국내에서 이용되고 있는 모든 트럭의 형태를 고려하여 결정된 것이다⁽⁹⁾. 이 트럭의 형태가 피로해석을 위하여 정의된 것은 아니지만 국내 연구 중 실제 상황에 대한 자료를 이용한 설계트럭이 발표된 것이 전무하여 본 논문에서 적용하였는데, Fig. 2는 두 가지 형태의 트럭에 대하여 차축간격과 축간의 하중비를 도시한 것이다.

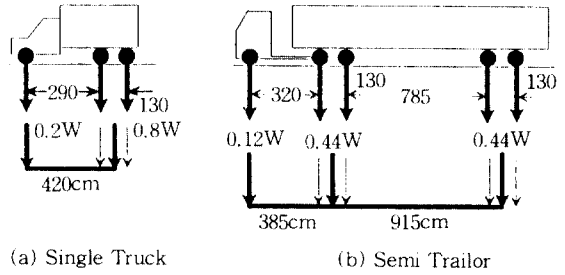


Fig. 2 Types of standard trucks⁽⁹⁾

이 설계트럭 중 single truck은 2축 또는 3축을 가진 트럭을 대표하고, semi-trailer는 4축이상의 트럭을 대표하도록 정의되었다. 이 트럭들은 단위 하중(unit weight)을 갖는 가상의 차량으로서 임의의 트럭 중량을 곱하면 실제 그 트럭의 하중 효과를 나타낼 수 있는 것이다.

3.3 차량하중의 확률모델

외국의 몇몇 연구자는 차량하중의 확률특성을 정규분포 또는 대수정규분포와 같이 이미 알려진 확률분포함수를 이용하여 표현하려는 시도를 하였다^(5,16,18). 그런데, 해석적인 분포함수의 형태로 확률특성을 표현하려면 교통량 및 차량의 특성에 대한 조사가 광범위하게 이루어지고 그에 따라 많은 양의 통계자료가 축적되어야하나 국내의 연구 수준은 아직 미흡한 실정이다.

본 논문에서 적용한 교통량 자료는 경인고속도로 부평 톨게이트 지역에서 24시간 동안 측정된 것으로서 Table 1에 정리되어 있는데 실제 측정자

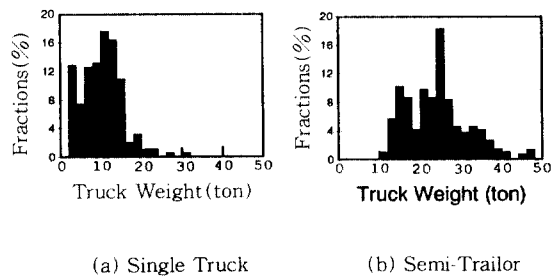


Fig. 3 Truck weight histograms

Table 1 Truck weight distribution at Bupyeong T.G.⁽⁹⁾

Gross Weight(ton)	Single Trucks(%)	Semi-Trailers(%)
0-2	0	0
2-4	12.9	0
4-6	7.5	0
6-8	12.6	0
8-10	13.2	0
10-12	17.6	1.1
12-14	16.4	5.7
14-16	10.9	10.3
16-18	2.1	8.7
18-20	3.2	4.2
20-22	1.2	9.9
22-24	1.2	8.7
24-26	0	18.3
26-28	0.6	8.4
28-30	0	4.6
30-32	0.6	3.8
32-34	0	4.6
34-36	0	4.2
36-38	0	2.7
38-40	0	1.5
40-42	0	1.1
42-44	0	0
44-46	0	0.8
46-48	0	1.4
48-50	0	0
Total	100.0	100.0

료를 Fig. 2에 보인 표준트럭의 형태로 환산하여 중량비율을 정리하여 놓은 것이다. 또, Fig.3은 Table 1의 내용을 바탕으로 single truck과 semi-trailer에 대하여 각각 중량 히스토그램을 도시한 것이다.

Table 1에 정리되어 있는 자료는 트럭 17,405대에 대한 것으로 이 중 single truck과 semi-trailer의 수효는 각각 16,385대(90.5%) 및 1,020대(9.5%)이다. 따라서, 각 하중구간 별 트럭의 중량분포는 Table 1에 정리되어 있는 single truck 및 semi-trailer의 비율값에 각각 0.905 및 0.095를 곱하여 구할 수 있다.

3.4 피로하중의 확률모델

교량을 통과하는 차량하중의 확률특성이 정의되면, 이를 이용하여 교량의 지지조건 및 형태에

따라 교량을 구성하는 각 부재에 대하여 단면력의 확률특성을 산정할 수 있다. 본 절에서는 트럭중량의 확률자료를 동적영향선(dynamic influence line)의 개념을 이용하여 피로하중모멘트에 대한 자료로 변환하였는데, 이 영향선은 횡방향의 하중 분배 및 교량상의 트럭위치를 고려하여 결정한 것이다. 동적영향선은 Fig. 2에 보인 설계트럭이 교량상의 임의점을 통과할 때 중앙점의 동적휨모멘트를 그 점 위에 표시한 것으로서 동적유한요소해석 프로그램⁽³⁾에 의하여 작성하였다. 이 프로그램은 하나의 집중질량을 갖는 이동하중에 대한 동적 해석을 목적으로 개발되었는데, 본 연구에서는 설계트럭의 차축간 중량의 분포를 적절하게 고려할 수 있도록 수정되었다.

교량의 설계 및 해석에 있어서 교량을 통과하는 차량하중의 동적효과 및 교량 구조물의 동적영향을 고려하는 방법은 일반적으로 충격계수의 개념을 이용하는 것이다⁽¹²⁾. 그러나, 본 논문에서는 직접분법(time step integration method)을 이용하여 동적해석을 수행하였으므로 별도로 동적효과를 고려하지 않았으며, Fig. 4는 교량 중앙점에 대한 정적 영향선과 동적영향선을 비교하여 도시한 것이다. 사용한 교량의 단면은 건설부에서 제정한 표준 I형 단면의 프리스트레스트 콘크리트 거더로 이루어져있고 35m 지간의 단순지지 교량이다.

교량상의 차선이 둘 이상인 경우 교량에 피로하중을 일으키는 트럭의 통과는 시간 및 공간상의

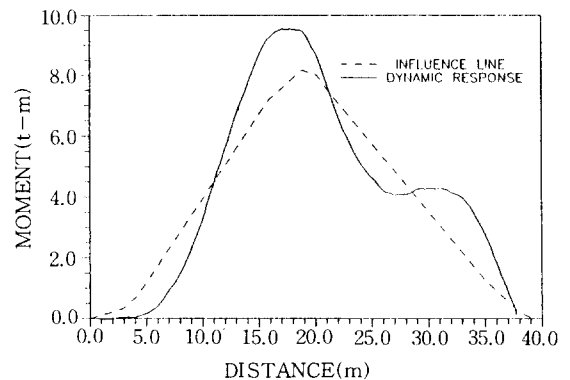


Fig. 4 Comparison of dynamic and static influence lines

불규칙성(randomness)을 가지고 일어나게 된다. 한 차선에 동시에 2대 이상의 트럭이 통과하거나 인접한 차선에 나란히 지나가는 일이 임의로 일어날 수 있으며, 차량의 교량통과라는 사상(event)이 시간상의 불규칙성을 띠어 차량의 통과간격 또한 예측할 수 없으므로 이러한 영향들을 총괄적으로 차간거리계수(headway factor)로 나타내었다. 이 계수는 교통량, 교통량 중 소형차와 트럭의 상대적 비율, 그리고 교통량의 형태(traffic pattern) 및 운전자의 주행습관 등과 관련이 있으며, 이 중 교통량의 형태는 기상조건, 도로의 노면상태 및 도로선형 등의 영향을 받는다. 차량 및 교량의 동적효과와 차간거리계수 이외에 거더에 작용하는 모멘트의 크기에 영향을 줄 수 있는 요소로는 거더의 하중분배계수가 있다. 하중분배 계수는 차량이 여러 개의 거더로 구성된 교량을 통과하는 경우 개개의 거더가 부담하는 전체차량하중에 대한 비율을 의미하는 것으로 본 논문의 경우 도로교시방서⁽¹²⁾에 제시되어 있는 값을 적용하였다.

전술한 여러 요소를 고려하여 프리스트레스트 콘크리트 I형 단면 거더에 대한 동적영향선을 작성하였는데 트럭하중은 전체중량을 1로 하고 축간하중분배는 Fig. 2에 보인 비율을 따랐으며, 차량의 속도는 40km/h에서 120km/h까지 변화시켜 적용하였다. Table 2는 차량속도에 따라 거더의 중앙점에 발생하는 동적모멘트를 설계트럭형태별로 정리한 것이다.

Table 2 Dynamic moments for each design truck (ton-m)

Speed(km/h)	Single Truck	Semi-Trailer
40.0	8.768	6.820
60.0	7.471	7.165
80.0	9.483	6.615
100.0	11.008	7.517
120.0	11.431	8.384

Table 2에 정리된 값을 이용하면 Table 1에 보인 트럭중량 히스토그램을 모멘트 히스토그램의 형태로 변환할 수 있으며, Table 3은 그 내용을 정리한 것이다. Table 3의 4번째 칸에 보인 총계값은 모든 형태의 트럭에 의하여 발생하는 피로모멘

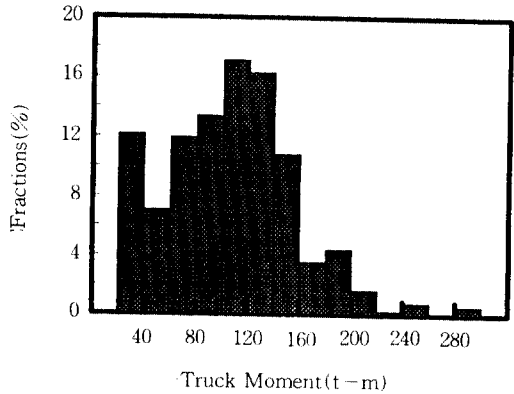


Fig. 5 Histogram of moments

Table 3 Moment distribution for Bupyeong T.G. with speed of 80km/h

Moment (ton m)	Single Truck	Semi-Trailer	Total
0-20	0.0	0.0	0.0
20-40	12.144	0.0	12.144
40-60	7.061	0.0	7.061
60-80	11.862	0.064	11.927
80-100	12.426	0.938	13.365
100-120	16.569	0.510	17.079
120-140	15.439	0.826	16.266
140-160	10.261	0.510	10.772
160-180	1.977	1.565	3.542
180-200	4.142	0.270	4.412
200-220	1.130	0.492	1.622
220-240	0.0	0.246	0.246
240-260	0.560	0.246	0.806
260-280	0.0	0.064	0.064
280-300	0.560	0.047	0.607
300-320	0.0	0.082	0.082
Total	94.140	5.860	100.0

트의 비율로서 이 값들을 히스토그램의 형태로 도시한 것이 Fig. 5이다.

4. 등가피로하중 모델의 적용

4.1 개요

본 논문에서 제시한 등가피로하중 모델의 적용성을 검토하기 위하여 건설부에서 제정한 표준 I

형 단면 프리스트레스트 콘크리트 합성거더에 대한 S-N 곡선과 실제 교통량 조사 자료를 이용하였다. 즉, 실제 교통량 자료로부터 얻은 피로하중(휨 모멘트)의 확률분포를 바탕으로 등가피로하중을 결정하였고, S-N 곡선으로부터 등가피로하중에 따르는 피로수명, 하중의 반복횟수,를 구하였다. 또, 피로하중의 확률분포를 이용하여 실제통과 차량에 의한 하중의 시간이력을 작성한 후 시간 단계별로 피로해석을 수행하여 피로파괴가 일어나는 하중의 반복횟수를 구하였다.

4.2 등가피로하중 모델에 의한 피로수명

등가피로하중 모델을 이용하여 피로해석 또는 설계를 수행하기 위하여는 대상 부재에 대하여 일정진폭하중(constant amplitude load)을 받는 경우의 피로특성을 실험적 또는 해석적인 방법으로 결정하는 일이 먼저 이루어져야한다. 식(5)에 보인 것과 같은 형태의 S-N 곡선을 이용하여 부재의 피로특성을 정의하여야하는데 본 논문에서는 Fig. 1에 보인 곡선을 이용하였다. 부재의 피로특성을 도출하면 실제 피로하중의 확률분포로부터 식(9)를 이용하여 등가피로하중을 결정할 수 있는데, 본 논문에서는 피로하중의 확률분포로 Fig. 5에 보인 모멘트의 히스토그램을 적용하였다. 이렇게 구한 등가피로하중의 값은 부재극한강도의 6.34%이며, Fig. 1에 보인 S-N곡선에서 이 하중 수준에 대한 피로수명을 구한 값은 4.264×10^7 이다.

4.3 시간단계해석법에 의한 피로수명

교량에 작용하는 피로하중은 교량의 사용수명 동안 계속해서 작용하므로 시간의 진행에 따른 하중 크기의 변화를 고려하여 직접 동적해석을 수행하는 것이 피로해석 및 설계에 적용할 수 있는 가장 정확한 방법이라 할 수 있다. 그러나, 하중의 실제 시간이력에 관한 기록을 얻는 것은 매우 어려운 일이며 현실적으로 교량의 사용 수명 동안의 하중기록을 얻는 것은 불가능하다. 또, 하중의 기록만큼 동적해석을 하기 위하여 소요되는 노력이

나 비용을 고려하면 비합리적인 일이 된다. 따라서 본 논문에서는 등가피로하중을 결정하기 위하여 도출한 모멘트 히스토그램의 확률특성을 이용하여 Monte Carlo simulation 기법으로 하중의 시간이력을 생성하였다. 이 때 simulation은 Rejection 방법에 기초한 알고리즘⁽¹⁹⁾을 적용하였으며, 이 시간이력은 불규칙성(randomness)을 포함하고 있으므로 하중의 재하순서를 별도로 고려할 필요가 없다. 또, 차량하중의 동적효과 역시 Fig. 5에 보인 모멘트 히스토그램의 산정시 동적영향선의 개념을 적용하였으므로 별도로 고려하지 않았고, 시간의 진행에 따르는 부재의 재료특성 변화만을 고려한 피로해석방법⁽²⁾을 적용하였다. Table 4는 일평균트럭통행량(ADTT)의 값을 1,000에서부터 20,000 대까지 변화시켜가면서 피로수명을 계산한 결과를 정리한 것이다.

Table 4 Fatigue lives by time step analysis

ADTT value Data No.	1,000	3,000	5,000	10,000	20,000
1	1.47×10^7	2.34×10^7	3.75×10^7	1.40×10^7	3.75×10^7
2	2.28×10^7	3.84×10^7	2.65×10^7	4.20×10^7	2.65×10^7
3	1.47×10^7	7.50×10^7	3.70×10^7	1.00×10^7	3.70×10^7
4	4.90×10^6	1.47×10^7	4.15×10^7	4.40×10^7	4.15×10^7
5	9.20×10^6	1.98×10^7	2.25×10^7	4.80×10^7	2.25×10^7
6	1.69×10^7	2.79×10^7	2.30×10^7	5.80×10^7	2.30×10^7
7	1.50×10^7	2.52×10^7	3.95×10^7	6.30×10^7	3.95×10^7
8	1.03×10^7	3.42×10^7	5.15×10^7	4.20×10^7	5.15×10^7
9	1.41×10^7	2.97×10^7	2.30×10^7	2.00×10^7	2.30×10^7
10	1.54×10^7	2.31×10^7	3.70×10^7	6.60×10^7	3.70×10^7
Mean Value	1.38×10^7	2.44×10^7	3.39×10^7	4.07×10^7	6.69×10^7

Table 4에서 보인 것과 같이 ADTT 값이 증가함에 따라 피로파괴가 일어날 때까지의 하중반복 횟수는 증가하므로 하중재하속도가 빠를수록 강도가 증가하는 정적하중의 경우와 유사한 결과를 주는 것을 알 수 있다. 그러나, 실제 피로파괴가 일어나기까지의 시간은 짧아지는 것을 알 수 있으며, 이 하중반복횟수의 평균은 3.59×10^7 이 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 프리스트레스트 콘크리트 합성

참 고 문 헌

거더 교량의 피로해석 및 설계에 적용할 수 있는 등가피로하중 모델을 제안하고 시간의 진행 및 피로하중의 작용에 따른 재료의 특성변화를 고려한 피로해석기법을 이용하여 그 적용성을 보였으며, 그 내용으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 현재까지 제안된 교량의 등가피로응력 모델은 강재의 피로특성을 기초로 하여 도출된 것으로 콘크리트 구조물의 피로해석에는 적용할 수 없으므로 별도의 등가피로하중 모델의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

2. 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 피로해석 및 설계를 할 때에 부재의 피로손상 정도 또는 피로파괴 여부의 정의는 개개 구성재료인 콘크리트, 철근 및 PS강재 각각의 피로강도나 허용피로응력의 향으로 이루어져왔으나, 부재 전체의 피로강도를 나타낼 수 있는 하나의 지수(index)를 정의하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 본 논문에서 제시한 부재의 휨모멘트에 대한 S-N곡선이 그 한가지 방법으로 적용될 수 있을 것이다.

3. 본 논문에서는 일정진폭의 피로하중을 받을 때의 피로특성을 식(5)와 같은 형태로 표현할 수 있는 부재 및 재료가 변동진폭의 피로하중을 받는 경우의 피로해석에 적용할 수 있는 등가피로하중 모델을 제안하였다.

4. 본 논문에서 제안한 등가피로하중 모델을 이용하여 산정한 피로수명과 시간단계 해석법을 적용하여 구한 피로수명을 보면 약간의 차이가 있으나, 이는 등가피로하중을 결정할 때에 사용된 S-N곡선이 다양한 하중재하 속도의 영향을 고려하여 구한데서 비롯된 것으로 판단되며, 모델의 간편성을 고려할 때에 비교적 합리적인 결과를 주는 것으로 사료된다.

5. 제안된 등가피로하중 모델을 적용한 피로해석 및 설계는 차량하중의 확률특성에 대하여 보다 많은 연구가 수행되어 자료가 축적되고, 부재의 피로특성을 표현하는 S-N곡선의 정확도가 높아진다면 그 신뢰성이 증가할 것으로 판단된다.

1. ACI Committee 215, "Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading," ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, 1988.
2. 김 지상, 오 병환, "시간에 따른 영향을 고려한 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 피로해석," 한국콘크리트학회 1992년도 부학술발표회 논문개요집, 1992.
3. 장 승필, 임 성순, 조 서경, "불규칙한 노면을 주행하는 이동하중에 의한 연속교의 동적거동에 관한 이론 및 실험적 연구," 대한토목학회 논문집, 제9권, 제3호, 1989년 9월.
4. Moses, Fred, Schilling, C.G., and Raju, K.S., Fatigue Evaluation Procedure for Steel Bridges, NCHRP Report 2989.
5. Moses, Fred and Gosen, Michel, A Comprehensive Study of Bridge Loads and Reliability, Final Report, Report, Report No. FHWA/OH-851005, Department of Civil Engineering, Case Western University, Cleveland, Ohio.
6. Tepfers, Ralejs and Kutti, Thomas, "Fatigue Strength of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete," ACI Journal, Nov., 1965.
7. Harajli, M.H. and Naaman, A.E., "Static and Fatigue Test on Partially Prestressed Beams," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.7, July, 1985.
8. Schilling, Charles G., and Klippstein, Karl H., "New Method for Fatigue Design of Bridges," Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol. 104, No. ST3, March, 1978.
9. 오 병환, 김 지상 외, 확률신뢰성 해석이론에 의한 구조물의 합리적 해석기법과 신뢰성 설계기준 개발, 최종보고서, 과학기술처, 1991년 8월
10. BRITISH STANDARD INSTITUTION, Steel, Concrete, and Composite Bridges, British Standard BS5400 : Part 10 : code of practice for fatigue, 1980.
11. Kusmez, Kadir M. and Tung, Chi C., "Fatigue Provisions of AASHTO Specifications," Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol. 102, No. ST9, Sep., 1976.
12. 건설부, 도로교 표준시방서, 1985.

13. AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, 12th, 1977.
14. Schilling, Charles G., and Klippstein, Karl H., "Fatigue of Steel Beams by Simulated Bridge Traffic," Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol. 103, No. ST8, Aug., 1978.
15. Schilling, Charles, G., "Stress Cycles of Fatigue Design of Steel Bridges," Journal of Structural Engineering, Vol. 110, No. 6, June, 1984.
16. Moses, Fred, " Bridge Load Models for Fatigue," IABSE Workshop on Remaining Fatigue Life of Steel Structures, Lausanne, 1982.
17. Nyman, William E., and Moses, Fred, "Calibration of Bridge Fatigue Design Model," Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 6, June, 1985.
18. Stephenson, Hensen K., "Highway Bridge Live Load Based on Laws of Chance," Journal fo the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol. 83, No. ST4, July, 1957.
19. Siddal, James N., Probabilistic Engineering Design, Principles, and Applications, Marcel Dekker, Inc., 1983.

(접수일자 : 1994. 1. 27)