

동조질량감쇠기를 장착한 강합성형 고속철도교의 피로신뢰성 평가

Fatigue Reliability Evaluation of Steel-Composite High-Speed Railway Bridge with Tuned Mass Damper

강수창* 서정관** 고현무*** 박관순****
Kang, Soo-Chang Seo, Jeong-Kwan Koh, Hyun-Moo Park, Kwan-Soon

국문요약

본 연구에서는 고속철도 강합성형 교량의 동적해석에 기반한 피로신뢰성평가 기법을 제시하고 동조질량감쇠기의 효과를 피로수명연장 측면에서 검토하였다. 피로신뢰성 평가를 수행하기 위하여 S-N 곡선 및 선형누적손상이론을 이용하여 한계상태식을 설정하였다. 열차 속도와 교량 감쇠비의 불확실성을 고려하여 교량에 대한 반복적인 동적해석을 수행하고, 이 결과로부터 전체 교량수명동안에 교량이 받는 피로 손상도와 연관된 확률변수의 특성을 통계적으로 추정하였다. 최종적으로 결정된 확률변수와 한계상태식에 개선된 일계이차모멘트법(AFOSM)을 적용하여 피로 신뢰도 지수를 산정하였다. 40m 지간 강합성교량의 수치모사로부터 동조질량감쇠기 장착여부에 따라 피로 신뢰도 지수를 평가하고 그 결과를 제시하였다.

주요어 : 동조질량감쇠기, 고속철도 강합성형 교량, 피로 신뢰성평가, 동적해석

ABSTRACT

This study proposes a fatigue reliability evaluation procedure for steel-composite high-speed railway bridge based on dynamic analysis and investigates the effectiveness of Tuned Mass Damper(TMD) in terms of the extension of fatigue life of the bridge. For the fatigue reliability evaluation, the limit state is determined using S-N curve and linear fatigue-damage accumulation. Dynamic analyses are performed repeatedly to consider the uncertainties of train-velocity and damping ratio of the bridge. The distribution of random variables related to fatigue damage for the intended service life is then statistically estimated from analytical results. Finally, the fatigue reliability indices are obtained by means of the Advanced First-Order Second-Moment (AFOSM) method. Through numerical simulation of a steel-composite bridge of 40m span, the effectiveness of TMD on fatigue life of the bridge is examined and the results are presented.

Key words : tuned mass damper, steel-composite high-Speed railway bridge, fatigue reliability evaluation, dynamic analysis

1. 서 론

1992년부터 건설되기 시작하여 현재 계속적인 건설과 연구개발이 이루어지고 있는 국내 고속철도 교량은 대부분이 PSC 박스거더교 형식이고 일부 구간에만 강합성교가 적용되었지만, 프랑스에서는 90년대 초부터 TGV 북부선 등에 강합성교가 도입되기 시작하여 지금은 이 교량 형식이 고속철도 교량의 큰 비중을 차지하고 있다⁽¹⁾. 강합성교는 PSC 박스거더교에 비해 경제성, 시공성 및 미적인 면에서 장점을 가진 반면에 저감쇠 특성으로 진동에 취약한 단점이 있다. 특히 고속철도 교량의 경우 빠르게 통행하는 열차의 주기적인 하중과 교량의 고유주파수가 일치할 경우 큰 공진현상이 발생하여 교량의 동적안정성에 영향을 미친다. 따라서 이러한 동적하중에 대한 안전성 및 사용성을 증대시키기 위해 질량동조감쇠기(Tuned mass damper, TMD)를 고속철도 교량에 장착하고자 하는 연구가 여러 연구자들에 의해 수행된 바 있고, 이를 통해 TMD가 고속철도 교량에 발생하는 공진을 제어하여

처짐이나 가속도와 같은 사용성을 개선할 수 있음이 확인된 바 있다⁽²⁾⁻⁽⁴⁾.

그러나 이러한 연구들은 주로 일시적인 변위나 가속도 등의 응답의 평가에만 국한되어 있고, 전체 교량 수명에 대한 TMD의 영향은 보고된 바가 없다. 따라서 이 연구에서는 수치해석을 통해 TMD가 교량의 피로수명에 미치는 영향을 정량적으로 평가해보고자 한다.

이를 위하여 먼저 고속철도 교량이 겪는 이력을 묘사하는 동적해석을 기반으로 한 피로평가방법이 필요하다. 기존 고속철도 교량설계에서 수행되는 피로 평가 방법⁽⁵⁾은 정해석으로부터 얻은 응력을 기반으로 하고 있어 동적응답제어장치인 TMD가 피로평가에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 없기 때문이다. 한편, 교량의 동적응답은 교량의 강성 및 감쇠비, 열차의 제원 및 교량통과속도 등에 큰 영향을 받는데, 특히 감쇠비 산정과 매회 통과하는 고속열차의 속도 분포에 따라 교량의 피로는 그 변동성이 매우 크다.

따라서 이 연구에서는 교량의 감쇠비와 고속열차의 통과속도를 확률변수로 가정하고 각각의 변수에 대해서 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 얻은 자료로부터 통계적 추정을 통해 피로수명에 영향을 미치는 응력의 확률분포를 결정한 다음, S-N 곡선으로부터 정의되는 피로

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학석사

*** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

**** 정회원 · 동국대학교 건축공학부 조교수(대표저자 : kpark@dongguk.edu)

본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2005. 3. 10 / 심사종료일 : 2005. 9. 2)

파괴 한계상태식에 대하여 신뢰도 지수를 구하였다. 수치 모사를 통하여 최적화된 TMD의 장착 여부에 따라 사용 기간에 따른 피로신뢰도지수를 정량적으로 비교하였고, 각 변수의 변화에 따른 신뢰도 지수의 변화 추이를 분석하였다.

2. 동적해석을 이용한 피로 신뢰성 평가

이 연구에서는 고속철도 교량의 피로신뢰성평가를 위하여 S-N 곡선과 Miner의 피로손상누적법칙⁽⁶⁾을 사용하여 한계 상태를 정의하고, 이를 구성하는 각 확률변수는 Wirshing⁽⁷⁾⁽⁸⁾에 의해 제안된 분포특성 및 고속전철의 동적 시뮬레이션을 이용하여 그 특성을 정의하였다. 한계상태식과 확률변수가 결정되면 개선된 일계이차모멘트법(Advanced first-order second-moment method, AFOSM)⁽⁹⁾을 사용하여 피로파괴에 대한 신뢰도 지수를 산출한다. 여기에서는 교량의 감쇠비와 고속열차의 통과속도의 변동성을 고려한 피로신뢰성 평가방법을 제시한다.

2.1 S-N 곡선 및 누적손상이론을 이용한 한계상태식 결정

부재에 응력범위가 수차례 반복하여 작용하면 피로파괴가 일어나게 되며, 이러한 피로파괴는 구조물 설계 시 검토가 필요하다. 이때 피로설계검토의 기준으로는 주로 S-N곡선을 이용한 방법이 사용된다. S-N곡선은 구조 시험체에 대한 실험을 통해 반복되는 응력범위(S)와 피로파괴에 이르기까지 응력범위의 반복횟수(N)사이의 관계를 나타낸 곡선으로 응력범위, 반복횟수의 개념과 함께 그림 1에 나타내었다.

S-N 곡선 그림으로부터 응력범위가 작을수록 피로파괴까지의 반복횟수가 많아지고, 응력범위가 피로한계 이하로 작아지면 피로수명은 무한대가 된다. 피로한계보다 큰 응력범위에서의 곡선식은 식 (1)과 같다.

$$N \cdot S^m = A \quad (1)$$

여기서 m 은 대수-대수축 그래프에서 기울기를 나타내고 A 는 피로강도계수로 구조 특징에 따라 그 크기가 결정되며

크기가 작을수록 같은 응력범위에 대해 파괴까지의 반복횟수가 적으므로 피로에 취약한 것을 의미한다. Wirshing⁽⁸⁾에 의해서 m 은 3.0으로 상수이고 A 는 대수정규분포를 따르는 확률변수로 제시되었고, 본 연구에서는 이 결과를 이용하였다.

피로강도계수 A 값을 대수정규분포로 가정하였으므로, 이에 대한 평균 및 변동계수를 구해야 한다. 본 연구에서는 AASHTO 설계기준⁽¹⁰⁾에서 제시된 세목별 피로설계곡선을 이용하여 피로강도계수 A 값의 평균값을 결정하였다. AASHTO 설계기준에서 제시된 곡선은 실제 실험결과 얻어진 평균값에서 표준편차(σ)의 두 배(2σ)만큼 아래로 평행 이동하여 설정해 실제 실험결과가 이 곡선의 밑에 위치할 확률이 약 2.5% 정도가 된다. 따라서, A 가 대수정규분포 확률변수임을 고려하면 식 (2)가 성립하고 이로부터 설계값 A_d 와 중앙값 A_m 사이에 식 (3)과 같은 관계식을 얻을 수 있다⁽¹¹⁾.

$$\mu_{\ln A} = \ln A_m \quad (2)$$

$$\ln A_m = \ln A_d + 2\sigma_{\ln A} \quad (3)$$

여기서 $\mu_{\ln A} : \ln A$ 의 평균

$$\sigma_{\ln A} = \sqrt{\ln(1 + \delta_A^2)} : \ln A \text{의 표준편차}$$

$$\delta_A : A \text{의 변동계수}$$

위 두 식인 (2)와 (3)으로부터 AASHTO 설계기준에서 제시한 각 세목에 대한 피로강도계수의 중앙값 및 평균을 계산하면 다음 식 (4), (5)로 나타낼 수 있다.

$$A_m = A_d \exp[2\sqrt{\ln(1 + \delta_A^2)}] \quad (4)$$

$$\mu_A = A_m \sqrt{(1 + \delta_A^2)} \quad (5)$$

Wirshing⁽⁸⁾에 따르면 피로강도계수의 변동계수 δ_A 는 0.45로 응력범주에 관계없이 일정하므로 식 (4), (5)로 계산한 AASHTO 설계기준의 설계세목별 피로강도계수의 중앙값과 평균 및 피로한계는 표 1에 나타낸 바와 같다.

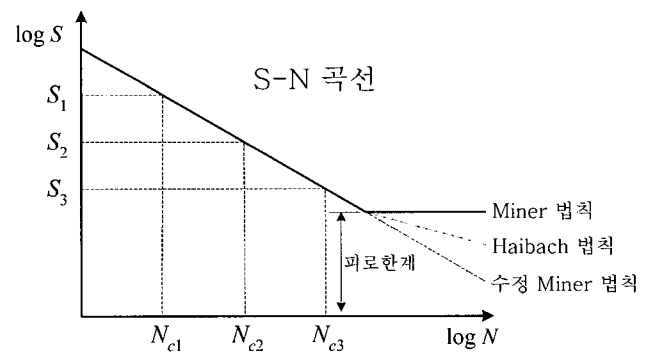
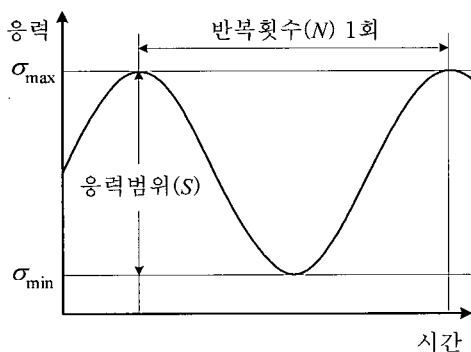


그림 1 응력범위와 반복횟수 및 S-N 곡선

표 1 AASHTO Specification의 응력범주별 피로설계곡선 특성값

응력범주	$A(\text{MPa}^3)$	$A(\text{MPa}^3)$	$\mu_A(\text{MPa}^3)$	피로한계 (MPa)
A	8.20×10^{12}	1.94×10^{13}	2.12×10^{13}	165.0
B	3.93×10^{12}	9.28×10^{12}	1.02×10^{13}	110.0
B'	2.00×10^{12}	4.72×10^{12}	5.18×10^{12}	82.7
C	1.44×10^{12}	3.40×10^{12}	3.73×10^{12}	69.0
C'	1.44×10^{12}	3.40×10^{12}	3.73×10^{12}	82.7
D	7.21×10^{11}	1.70×10^{12}	1.87×10^{12}	48.3
E	3.61×10^{11}	8.52×10^{11}	9.34×10^{11}	31.0
E'	1.28×10^{11}	3.02×10^{11}	3.31×10^{11}	17.9

S-N곡선은 일정한 응력범위에 대한 피로파괴에 대한 반복횟수의 관계를 나타낸 곡선이다. 하지만, 고속열차교량을 지나갈 경우 교량에 일정한 응력범위가 작용하지 않고, 그 응력이력에 따라 불규칙하고 다양한 응력이 구조물에 발생해 피로 파괴에 이르게 되어 S-N곡선을 직접적으로 적용하여 피로파괴상태를 결정할 수 없다. 한편, Miner⁽⁶⁾는 다양한 응력범위에 의한 효과를 반영하기 위하여, 피로가 선형적으로 누적된다는 가정을 통해 피로누적손상이론을 제안하였으며, 이 연구에서는 Miner가 제안한 누적손상이론을 적용하였다. 이론상 임의의 응력범위 S_i 에 의한 누적손상 N_i/N_{ci} 을 모두 더했을 때 1보다 커져 식 (6)이 성립하면 피로파괴에 이른다고 볼 수 있다.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_{ci}} \geq 1 \quad (6)$$

Miner의 법칙은 피로 한계 특성을 가지고 있는 S-N곡선을 그대로 이용하지만 실제 변동진폭응력 하에서 피로손상도가 크게 되면 피로 한계 이하의 응력범위도 피로손상의 진행에 기여한다. 이러한 작은 응력범위의 영향을 고려하는 방법으로 피로한계 이하 영역에 대해 S-N 곡선을 연장하는 수정 Miner 법칙과, 곡선의 기울기를 완만하게 하는 Haibach 법칙이 있다⁽¹²⁾. 이 연구에서는 수정 Miner 법칙을 적용하였다.

손상이 선형적으로 누적되어 파괴된다는 가정에는 불확실성이 내포되어 있으며 실제로 식 (6)에서 나타난 파괴시 D 값은 0.5에서 2.0까지 값⁽¹³⁾을 갖는 것으로 확인된 바 있다. 이러한 불확실성을 반영하기 위해 Wirsching⁽⁸⁾은 Miner의해 제시된 자료를 참고하여 파괴시의 누적손상도(Δ)를 확률변수로 보고 평균이 1.0, 변동계수가 0.3인 대수정규분포를 따른다고 하였다. 이 연구에서도 이 분포특성을 사용하기로 한다. 확률변수 Δ 를 도입하고 식 (1)을 식 (6)에 적용하면 식 (7)을 구할 수 있고, 최종적으로 피로파괴에 대한 한계상태식인 식 (8)을 유도할 수 있다.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_{ci}} = \sum_{i=1}^k \frac{S_i^m N_i}{A} = \Delta \quad (7)$$

$$g = \Delta - \sum_{i=1}^k \frac{S_i^m N_i}{A} = 0 \quad (8)$$

피로파괴의 한계상태식인 식 (8)에서 분모에 있는 변수 A 는 응력범주가 결정되면 응력범위에 관계없이 일정하므로 식 (9)와 같은 새로운 변수 Q 를 도입하여 식 (10)과 같이 한계상태식을 나타낼 수 있다.

$$Q = \sum_{i=1}^k S_i^m N_i \quad (9)$$

$$g = \Delta - \frac{Q}{A} = 0 \quad (10)$$

식 (10)을 이루는 변수 중 A 와 Δ 는 각각 피로강도계수 및 누적손상도를 나타내는 확률변수들이고, Q 는 교량수명동안 교량이 겪는 응력범위 및 반복횟수를 나타내는 확률변수이다. 확률변수 Q 의 결정에 있어서는 시뮬레이션에 기초한 통계적 추정 방법을 사용하였다.

2.2 동적해석을 이용한 피로 신뢰성 평가 절차

앞에서 구한 식 (10)의 한계상태식의 신뢰도 지수를 구하기 위해서는 확률변수 Q 를 결정해야 한다. Q 는 고속열차하중을 받는 교량의 동적해석으로 얻은 응력이력으로부터 통계적 과정을 거쳐 결정된 값으로 전 사용기간 동안의 모든 응력범위와 반복횟수의 곱을 합한 일종의 피로손상도로 볼 수 있다. 이 값은 고속철도 교량의 응력범위에 영향을 미치는 불확실성을 고려하면, 확정적인 값이 아닌 분포를 갖는 확률변수가 될 것으로 보이지만 그 분포 특성은 명확하지 않다. 따라서 적절한 통계적 절차를 통해서 신뢰성 해석을 위해 필요한 확률변수 Q 의 분포특성을 결정지어야 한다. 이때 고속철도 교량은 고속열차의 속도와 관련된 하중의 주기적 특성으로 인해 공진 현상이 발생 가능하므로 교량이 겪는 응력에는 속도의 변동성을 고려할 필요가 있다. 또한 교량의 동적 응답은 그 감쇠 능력에 따라 값이 크게 변하지만 교량의 감쇠비는 확정론적으로 결정하기 어렵기 때문에 감쇠비 역시 기존의 연구나 실험 등을 바탕으로 하여 불확실성을 갖는 확률변수로 취급하여야 한다. 이 밖에 구조물의 강성이나 열차의 하중, 기하 형상, 도상, 궤도의 불규칙성 등 많은 변수들에 불확실성이 있을 수 있지만 이 연구에서는 교량의 동적 응답에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 생각되는 열차속도(v)와 교량의 감쇠비(ξ), 두 개의 변수를 해석관련 불확실성 변수로 취급하기로 한다.

Q 의 통계적 추정을 위해 우선 주어진 감쇠비 ξ 의 확률분포에 따라 감쇠비를 n 개 임의로 추출한 다음, 추출된 각 감쇠비에 대해서 주어진 고속열차의 속도 v 의 확률분포에 따라 속도를 l 개 임의의 추출한다(그림 2).

여기서 n 과 l 은 각각 감쇠비 표본과 속도 표본의 추출개수로 감쇠비와 속도의 추출값들이 확률분포 특성을 대표할 수 있도록 충분히 큰 수를 사용한다. 다음으로 추출된 감쇠비들 중 j 번째 ($j=1,2,\dots,n$)의 감쇠비 ξ_j 에 대해 추출된 1개의 속도별로 구조 동해석을 수행한다. 이 때 k 번째 ($k=1,2,\dots,l$) 속도 v_k 에 대한 동적 해석 결과인 응력 이력으로부터 레인플로우 카운팅(Rainflow counting)⁽¹⁴⁾을 사용하여 응력범위 S_i 와 반복횟수 N_i 를 추출하고 이 들로부터 $\sum S_i^m N_i$ 를 계산한다. 이 값은 열차의 1회 통행에 대한 피로 손상도 개념의 변수로 식 (11)과 같이 x_{jk} 로 설정한다.

$$x_{jk} = \sum_{1pass} S_i^m N_i \quad (11)$$

만약 피로수명까지 이 과정을 반복해 모든 열차 통행 횟수(N)만큼 x_{jk} 를 더한다면 식 (12)와 같이 감쇠비 ξ_j 에 대응되는 사용기간동안의 피로 손상도 q_j 값이 될 것이다.

$$q_j = \sum_{k=1}^N x_{jk} \quad (12)$$

그러나 실제 사용기간에서의 열차의 수는 무수히 많고 이 수만큼 교량모델에 대해 구조 동해석을 실시하는 것은

사실상 불가능하다. 따라서 앞서 결정한 크기 l 인 표본 A를 통계적으로 처리하는 방법을 사용한다(그림 2).

먼저 각 감쇠비에 대해 x 값으로 구성된 표본 A를 이용하여 히스토그램을 작성한다. 히스토그램은 구간 수에 따라 그 특성이 크게 달라질 수 있어, 표본의 크기에 따라 구간 수를 결정하는 식 (13)을 사용한다⁽¹⁵⁾.

$$k = 1 + 3.3 \log_{10} n \quad (13)$$

이 히스토그램은 교량응답이 속도에 대해 불규칙하므로 널리 알려져 있는 일반적인 확률밀도함수를 따른다고 할 수 없다. 따라서 이 히스토그램을 1회 열차운행으로 발생하는 피로 손상도 x 의 확률밀도함수로 설정하고 적분을 통해 확률분포함수를 얻는다. 히스토그램을 밀도함수로 가정했기 때문에 각 구간에 해당되는 부분이 분포함수에서 직선이 된다. 이 과정은 그림 3과 같다.

완성된 확률분포함수는 x 를 임의발생 시키는데 사용된다. 0에서 1까지의 수를 임의로 추출한 뒤 확률분포함수에 역으로 대입하면 주어진 확률밀도함수를 따르는 변수를 추출할 수 있다. 이 과정이 동적 해석 과정을 대신하게 된다. 즉 표본이 변수 x 의 통계적 특성을 대표할 수 있도록 추출횟수를 적당히 설정하고 이 추출횟수를 크기로 하는 표본으로부터 얻은 히스토그램과 분포함수를 그린 후 이것을 이용해 수명동안 모든 열차통행에 대해 x

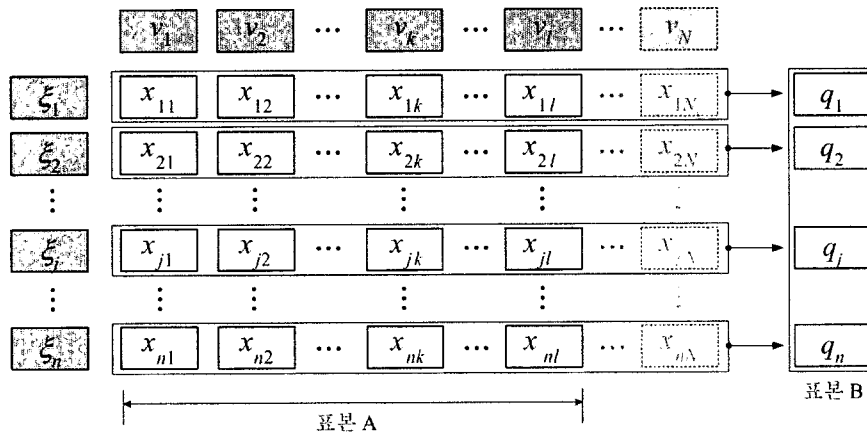


그림 2 변수 x 와 q 의 결정

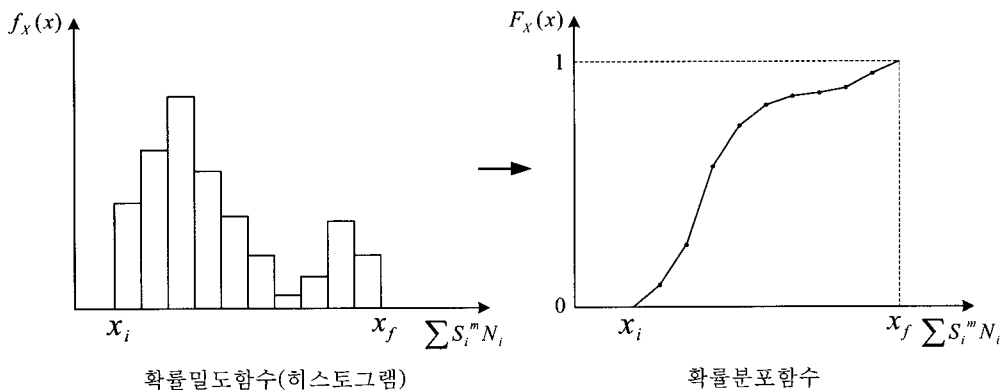


그림 3 히스토그램과 확률분포함수

값을 임의 추출해 모두 더하는 값이 식 (10)의 확률변수 Q의 표본(그림 2의 표본 B)을 이루는 하나의 q값이 된다. 감쇠비를 n개의 추출하였으므로 각 감쇠비에 대해서 q값을 계산하면 모두 n개의 q값으로 이루어진 집합을 얻을 수 있고, 확률변수 Q의 분포종류는 크기 n의 표본으로부터 구하고, Chi-Square Test⁽¹⁵⁾를 통하여 검증한다.

이상의 과정을 통해 피로파괴를 정의하는 한계상태 식 (10)의 확률변수 A, Δ Q의 분포를 구하였고, 이 한계상태식에 대한 신뢰성 해석을 수행할 수 있다. 이 연구에서는 개선된 일계이차모멘트법(AFOSM)⁽⁹⁾을 이용해 신뢰도 지수를 산정하였다. AFOSM은 최적화의 과정을 통해 표준화된 변수 공간에서 평균점으로부터 설계점까지의 최단 거리를 구함으로써 신뢰도 지수 β를 구하는 과정으로, 비교적 간단한 방법으로 정확한 결과를 얻을 수 있으며 널리 이용되고 있는 방법이다. 이 연구에서 제안된 동적해석을 이용한 피로신뢰성 평가절차를 요약하여 나타내면 그림 4와 같다.

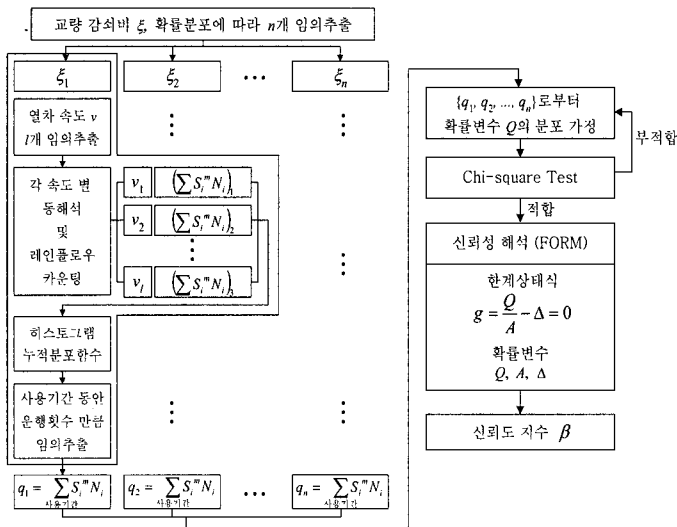


그림 4 피로 신뢰성 평가 절차

3. 고속철도 교량의 동적해석과 TMD 설계

3.1 고속열차 하중을 받는 교량의 해석모델

앞서 제시한 피로 신뢰성 평가법은 해석에 관련된 변수

의 불확실성을 고려하여 직접 동적해석을 수행한다. 동적 해석 횟수는 곧 모집단 Q의 확률분포를 추정하기 위한 표본 집합의 원소 개수가 되므로 많은 수의 해석이 필요하다. 이를 위해서 단순화된 교량모델을 설정하여 해석시간을 줄이는 것이 필수적이며, 따라서 이 연구에서는 콘크리트 바닥판 및 주형, 가로보의 휨강성과 비틀림강성을 근사한 보요소로 이루어진 평면격자모형(Grillage model)⁽¹⁶⁾을 이용하였다. 바닥판과 주형은 완전합성으로 거동한다는 가정으로 모델링하였다. 해석대상 교량은 40m 지간의 단순 지지 강합성교로 1차 고유진동수는 4.3Hz이다. 대상교량의 단면 및 해석 모델은 그림 5와 같으며 강재 단면 특성은 표 2에 나타내었다.

표 2 교량에 사용된 강재의 단면특성

물성	거더	가로보
단면적 (m ²)	0.161	0.091
I _y (m ⁴)	0.373	0.142
I _z (10 ⁻³ m ⁴)	4.7	0.181
J (10 ⁻⁵ m ⁴)	9.85	1.34

고속열차로는 우리나라에서 운행 중인 KTX를 이동집중하중으로 모델링하였으며 이 하중은 그림 6과 같이 두 개의 동력차와 두 개의 동력객차 그리고 열여섯 개의 객차와 각 차량사이의 축하중으로 구성되어 있다.

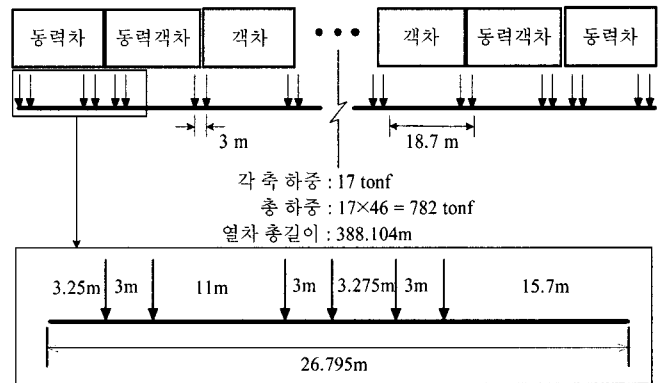


그림 6 KTX 하중 모델링

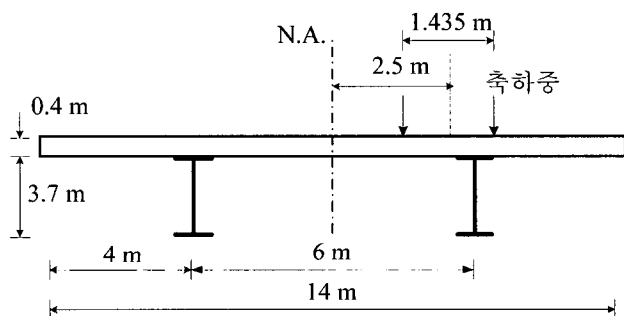
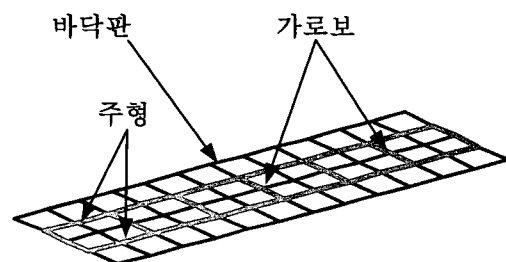


그림 5 대상 교량의 단면과 모델링



3.2 고속철도 교량의 공진

고속철도 교량에서의 공진은 교량의 고유주기와 고속열차의 규칙적인 축간격으로 인한 작용하중의 주기가 비슷할 때 발생한다. 이때 고속열차의 작용하중의 주기는 열차의 통행하는 속도와 연관되어 있고 어떤 특정한 속도에 도달하면 교량에 공진이 발생하게 되어 교량의 사용성 및 피로에 큰 영향을 미치게 된다.

보(beam) 구조의 교량에 대해 고유치 해석을 하게 되면 1차 진동 모드 형상은 수직하중에 의해 생기는 처짐과 동일한 휨 형상이 된다. 열차하중에 의해 생기는 공진이 1차 모드 진동과 관계되므로 교량 해석 모델에 대한 고유치 해석을 통해 1차 모드에 대한 고유진동수를 구한다. 이 값을 $f_1(\text{Hz})$ 이라고 하고 통행 열차의 유효 축간격을 $d_{eff}(\text{m})$ 라 하면 교량에 공진을 일으키는 열차의 공진속도는 식 (14)와 같다.

$$v_{cr} = f_1 \times d_{eff} \quad (14)$$

만약 열차가 식 (14)의 값 근처의 속도로 운행한다면 교량의 가속도 및 변위 응답이 크게 나올 것이고, 이로 인해 그 피로에도 큰 영향을 미칠 것이다.

3.3 동조질량감쇠기(Tuned mass damper)의 설계

전술한 바와 같이 고속철도 교량은 진동이 중요한 구조물이며 특히 교량의 고유주기와 열차 바퀴 축의 간격에 의해 발생하는 하중 주기가 일치하는 공진현상이 일어날 경우 과도 진동이 발생할 수 있다. 이러한 공진에 대한 해결방법으로 대표적인 것이 동조질량감쇠장치(Tuned Mass Damper, TMD)의 적용이다. TMD는 주 시스템의 고유 진동에 TMD의 진동수를 동조시킴으로써 주 시스템의 진동을 흡수, 소산시키기 위한 장치이다. TMD는 수동형 제어 장치의 일종으로 유지비용이 적고 관리가 쉬워 주로 구조물의 안전성 및 사용성을 개선하기 위해 바람과 지진에 의

한 건물의 진동이나 보행 하중에 의한 보도교의 진동 제어에 많이 쓰이고 있다(그림 7).

고속철도 교량에도 역시 열차 하중에 의한 공진 발생 가능성 등 진동문제가 중요하며 이에 따라 TMD 장착에 관한 연구가 수행되었다. Kwon⁽²⁾등과 Wang⁽³⁾등은 고속철도 교량에 대한 TMD의 제어성능을 평가하여 TMD가 공진현상을 효과적으로 억제할 수 있음을 보여주었고, Yau⁽⁴⁾등은 고속철도 사장교에 발생하는 다양한 진동모드에 대한 제어 장치로 Hybrid TMD를 제안하였다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 사용성을 개선하기 위한 것이고, 장기적 수명 측면에서 TMD가 교량에 미치는 영향에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 이 연구에서는 교량에 TMD를 장착해 얻을 수 있는 피로 수명 또는 피로 신뢰성 향상 효과를 정량적으로 평가하려 한다.

본 연구에서는 공진현상을 억제하기 위하여 그림 7의 오른쪽 그림과 같이 고속철도 교량의 1차 진동모드의 진폭이 가장 큰 교량의 중앙에 TMD를 장착하기로 한다. 교량의 진동을 TMD로 효과적으로 제어하기 위해서는 장착할 TMD의 강성 및 감쇠 계수와 같은 물성치의 최적값을 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 Den Hartog의 식⁽¹⁷⁾을 이용하여 TMD의 최적강성과 감쇠비를 구하였다. Den Hartog식은 이상적인 2자유도 시스템, 즉 비감쇠의 주구조와 TMD로 이루어진 시스템에 대해서 주구조의 응답을 최소로 하는 TMD의 최적 진동수비와 최적 감쇠비를 구하는 식이다. 주구조의 질량(m_p)에 대한 TMD의 질량(m_t) 비를 μ 라고 했을 때, 주구조의 고유진동수에 대한 TMD의 최적 고유진동수비와 TMD의 최적감쇠비는 각각 식 (15), (16)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (15)$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (16)$$

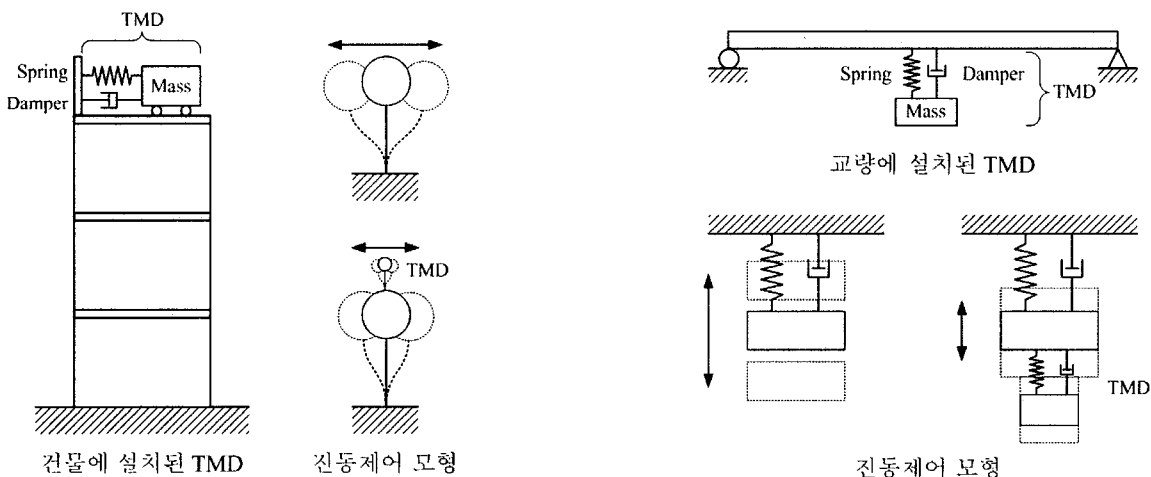


그림 7 TMD의 진동제어 모형

여기서 주구조의 질량에 대한 TMD의 질량비 μ 를 결정하기 위해서 고속철도 교량의 동적해석을 위한 운동방정식을 나타내면 다음 식 (17)과 같다.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p(t) \quad (17)$$

대상 교량은 1차 고유진동수가 4.3Hz 로 KTX의 최대 속도이내에서 공진이 발생 가능하고 더 큰 교차모드에서는 발생하지 않는다. 따라서 TMD는 1차모드에 대하여 진동을 제어하는 방식으로 설계되어야 한다. 1차 모드에 대한 방정식을 세우면 다음 식 (18)과 같다.

$$M_1\ddot{q}_1(t) + C_1\dot{q}_1(t) + K_1q_1(t) = 0 \quad (18)$$

여기서 ϕ_1 를 1차 모드에 대한 고유치 벡터라고 하면 $M_1 = \phi_1^T m \phi_1$, $K_1 = \phi_1^T k \phi_1$ 으로 각각 1차 모드에 대해 일반화된 질량, 일반화된 강성이다. 설계된 TMD가 그림 7과 같이 지간 중앙에 설치되어 제어 역할을 수행하므로 ϕ_1 은 지간 중앙의 수직 처짐이 1이 되도록 정규화 시켜야 한다. 계산된 M_1 과 K_1 이 Den Hartog 식에 사용되는 주구조물의 질량 및 강성이 되므로 주어진 교량에 대한 TMD의 최적 강성과 최적 감쇠비를 얻을 수 있다. TMD의 질량 m_t 는 그 값이 클 수록 더 큰 제어효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있으나 실제 장착시에는 구조물의 일반화된 질량의 약 0.5~1%의 크기로 설정한다. TMD를 교량에 장착하는 것을 모델링하기 위해서 교량 해석 모델의 중앙절점에 TMD의 강성 k_t 와 TMD의 감쇠계수 c_t 를 연직 방향 축방향 요소를 추가하고 요소 끝에 질량이 $0.01M_1$ 인 절점을 추가한다.

3.4 동조질량감쇠기에 의한 진동제어 효과

TMD에 의한 제어 효과를 확인하기 위하여 TMD를 장착했을 때와 장착하지 않았을 때의 응답을 비교해 보았다. TMD의 질량은 교량의 1차 모드의 일반화된 질량의 1%로 설정하였고, Den Hartog 식으로부터 구한 TMD의

강성(k_t)과 감쇠계수(c_t)는 각각 2631.5kN/m와 11.863kN·s/m이다. 우선 교량에 공진이 일어나도록 열차 속도를 공진속도 ($v_{cr}=290$ km/h)로 설정하고 이때 거더의 교량 중앙부 변위와 가속도 응답이력을 그림 8에 나타내었다. 그림 8에 의하면 TMD가 공진에 의한 응답을 변위는 약 40%, 가속도는 약 30%가량 감소시켜주는 것을 알 수 있고 이로부터 TMD가 공진제어에 효과가 있음을 확인할 수 있다. 특히 변위는 부재의 응력과 직접적으로 관련된 물리량이고, 이로부터 응력범위가 작아질 것을 예상할 수 있다. 응력범위가 작아지면 피로 수명이 길어진다는 것은 자명한 사실로 공진속도로 열차가 지나가는 교량에 대한 피로 수명에 TMD가 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

공진속도뿐만 아니라 다른 속도에서의 TMD의 효과를 알아보기 위해 열차 속도의 변화에 대한 교량 중앙부의 최대처짐을 그림 9에 나타내었다. 이 그림으로부터 TMD가 공진영역에서 응답제어에 큰 효과가 있다는 것을 확인할 수 있다. 공진영역 좌우로 TMD장착 교량의 응답이 조금 더 큰 곳이 있지만, 공진 시 제어 효과에 비하면 미비하므로 열차의 속도가 확정적이지 않고 분포를 갖는다 해도 그 영역이 공진속도 근처일 경우 TMD를 통해 피로 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

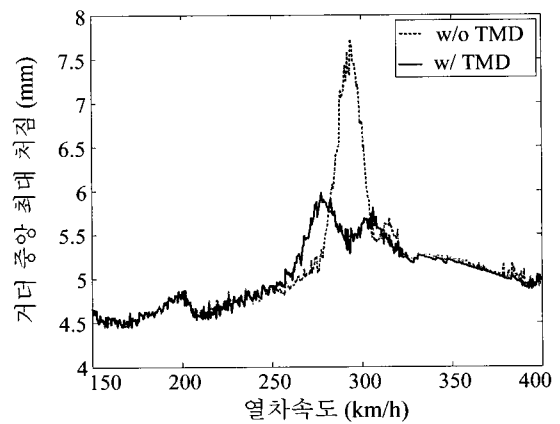


그림 9 TMD유무에 따른 열차속도에 대한 교량 중앙의 최대 변위

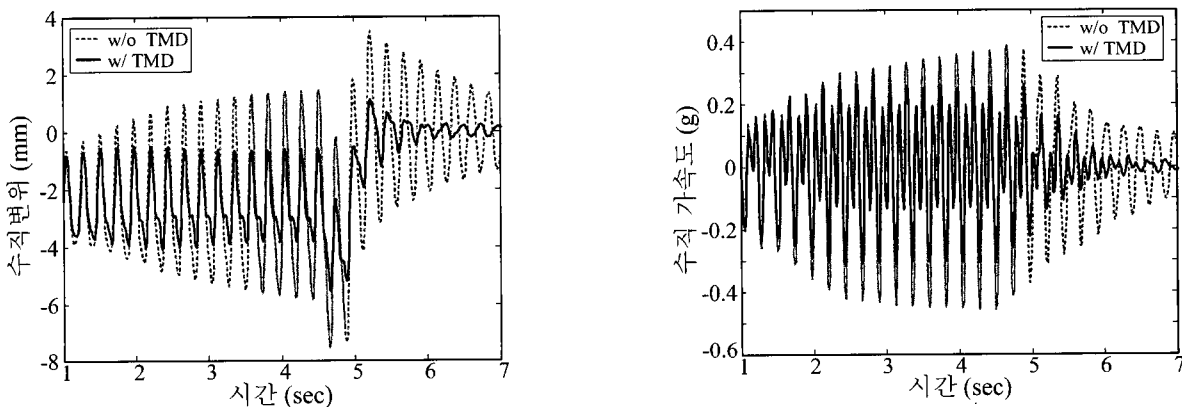


그림 8 공진속도로 통행하는 열차에 의한 교량 중앙의 변위와 가속도

4. TMD가 장착된 강합성교량의 피로신뢰성평가

4.1 확률변수의 결정

신뢰성 해석을 시작하기에 앞서 우선 각 확률변수의 평균과 표준편차 또는 변동계수 그리고 분포 종류를 결정할 필요가 있다. 우선 피로강도와 관련된 확률변수는 앞에서 언급한 바와 같이 Wirshing에 의해 제안된 값을 쓰고 AASHTO 설계기준에서 제안한 변수 특성을 사용한다. 평가부위는 주 거더의 복부판과 플랜지가 만나는 부분으로 설정하고 응력범주 C를 선택하였다.

해석에 관련된 변수 중 열차 속도 v 는 KTX의 최대 주행 속도가 300km/h가 임을 감안하여 설정하였다. 고속 열차는 제동거리가 길기 때문에 역으로부터 거리에 따라 평균속도의 차이가 발생한다. 따라서 교량의 위치에 따라 교량을 통행하는 열차의 평균 속도가 다르기 때문에 총 세 값의 열차 평균 속도를 가정하였다. 또 열차 속도의 변동성을 고려하여 표준편차를 10km/h(변동계수 0.0333)로 가정하였다. 해석 예제인 강합성 교량의 감쇠비는 기존 외국의 조사자료⁽¹⁸⁾로부터 0.5%에서 2.0%의 범위임을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서는 세 값의 감쇠비 평균을 정하였으며 이들의 불확실성을 고려하여 표준편차 0.2% (변동계수 0.133)로 설정하였다. 그리고 이 두 변수는 대수정규분포를 따른다고 가정하였다. 이상의 확률변수는 표 3에 정리하였다.

표 3 확률변수 특성

확률변수	평균	변동계수	분포형태
v	250, 275, 300 km/h	0.0333	대수정규분포
ξ	0.005, 0.010, 0.015	0.133	대수정규분포
A	9.34×10^{11}	0.450	대수정규분포
Δ	1	0.300	대수정규분포

4.2 확률변수 Q의 분포

확률변수 Q의 확률분포는 가정한 분포를 시뮬레이션 과정을 거쳐 Chi-Square Test로 검증함으로써 확정하게 된다. 우선 그림 4에서 샘플 크기인 n 과 l 은 모두 200개로 결정하고 Q의 확률분포를 대수정규분포로 가정하였다. 대략적인 분포여부 확인을 위해 그림 10에 사용기간이 50년이고 평균속도가 300 km/h, 감쇠비가 1.5%일 때, Q의 히스토그램과 가정한 확률밀도함수를 같이 나타내었고, Chi-Square Test 결과 Q는 1% 유의 수준에서 대수정규분포를 따른다고 할 수 있다. 이 결과로부터 Q를 대수정규분포 확률변수라고 결정하고 식 (10)의 한계상태식에 AFOSM방법을 적용하여 피로 신뢰도 지수를 구하였다.

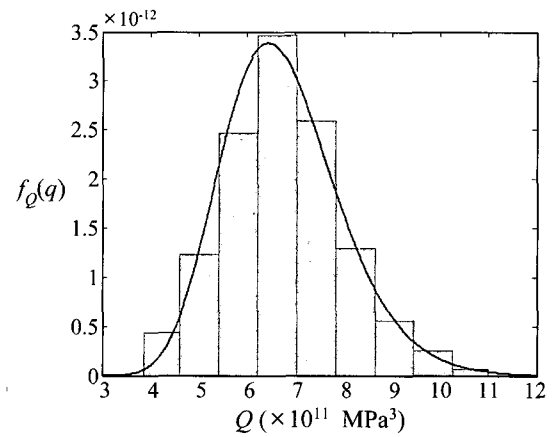


그림 10 Q의 히스토그램과 대수정규분포 확률밀도함수 비교

4.3 평가결과

제안된 방법을 통하여 TMD의 장착 여부에 따라 사용기간에 따른 피로신뢰도지수를 평가하고, 신뢰성지수에 영향을 미치는 열차의 속도분포와 감쇠비분포의 각각 3가지 평균에 대한 결과를 나타내었다. 그림 11은 세 가지 열차 속도 평균에 대한 감쇠비 평균별 신뢰도 지수이다.

그림 11로부터 열차속도와 감쇠비 값에 따라 큰 차이를

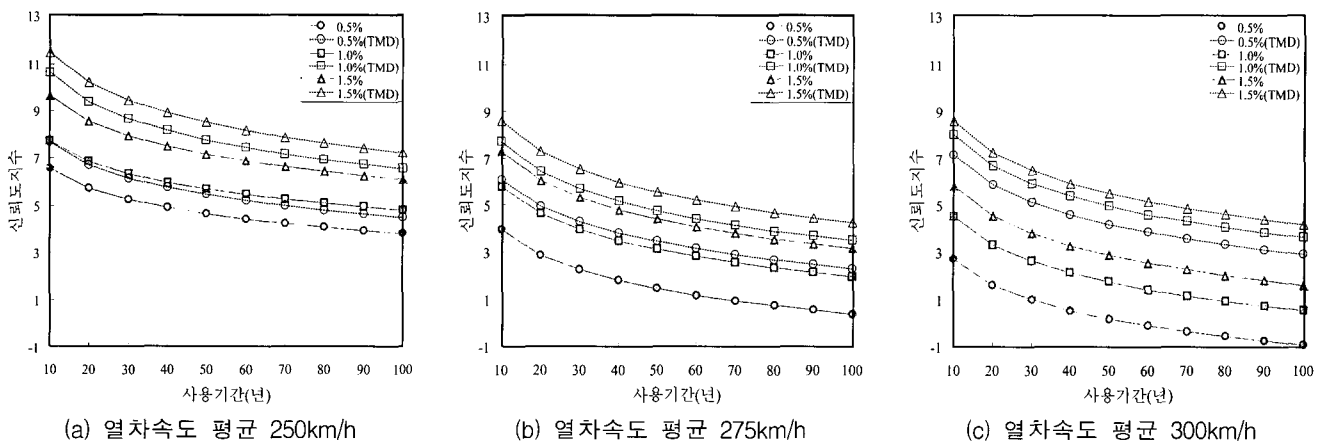


그림 11 세 가지 열차 속도 평균에 대한 교량 감쇠비 평균별 신뢰도 지수

보이는 신뢰도 지수를 확인할 수 있었으며 이로부터 동적 피로 신뢰성 평가법에 열차 속도와 교량 감쇠비의 변동성에 대하여 고려해야 함을 알 수 있다. TMD를 장착하지 않았을 경우 (a), (b), (c) 순으로 대체적으로 낮은 신뢰도 지수를 보이며 이것은 열차 속도의 평균이 공진속도인 290 km/h에 가까워지기 때문에 나타나는 현상이다. 여기서 각각의 경우 TMD를 장착한 교량의 신뢰도 지수가 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그림 11 (a)와 (b)에서는 TMD에 의한 신뢰도 지수 상승폭이 그리 크지 않지만, 열차 속도의 평균이 공진속도에 근접한 (c)의 경우 TMD에 의한 공진 제어 효과에 의해 신뢰도 지수가 크게 향상되는 것을 볼 수 있다. 만약 구조물의 피로 파괴에 대한 목표 신뢰도 지수를 2라고 가정하면 열차 속도의 평균이 공진 속도와 많은 차이가 나는 (a)에서는 TMD를 장착하지 않아도 100년 이상의 피로 수명을 확보할 수 있다. 그러나 (b)에서는 감쇠비 평균이 0.5%일 때 TMD를 장착하지 않았을 때 수명이 35년이 되며 (c)의 경우 피로 수명은 감쇠비 평균이 0.5%일 때 약 15년, 1.0%일 때 약 45년, 1.5%일 때 약 80년이 된다. 여기서 열차 속도의 평균이 공진 속도에 가까울수록, 저감쇠일수록 피로 신뢰성이 낮아지거나 피로 수명이 짧아지는 것을 알 수 있다. 이때 TMD를 장착한 교량은 모든 경우에 대해서 100년 이상의 피로 수명을 확보하고 있을 것으로 보여진다.

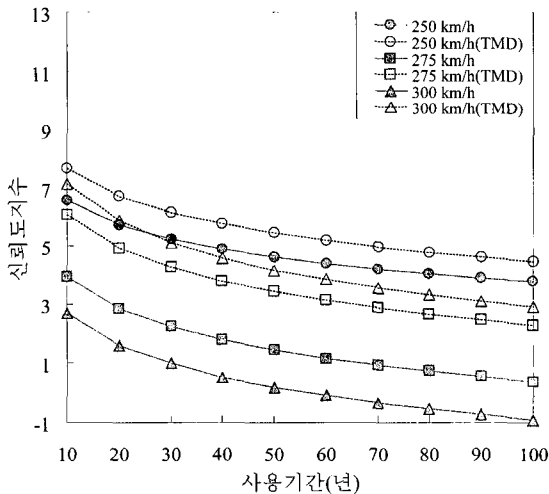


그림 12 감쇠비 평균(0.5%)에 대한 열차 속도 평균별 신뢰도 지수

그림 12는 감쇠비 평균(0.5%)에 대한 열차 속도 평균별 신뢰도 지수를 나타낸 것으로 역시 열차 속도의 평균이 공진 속도에 가까울수록 신뢰도 지수가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 TMD를 장착한 경우에는 장착하지 않았을 때와 달리 열차 속도 평균이 275km/h일 때 300 km/h일 때보다 신뢰도 지수가 더 작은 것을 볼 수 있으며 이것은 그림 9에서 확인할 수 있는 TMD 장착 교량의 응답 특성에 의한 것이라 할 수 있다. 즉 TMD는 공진영역에서의 응답을 크게 줄여주는 대신 영역의 양쪽에서 더

큰 응답을 유발하는데 이 효과가 피로 수명에 그대로 나타난 것이다. 그러나 이러한 효과는 전체적으로 TMD가 가지는 피로 신뢰성 향상 효과에 대해서는 경미한 것으로 무시할 만하다.

전체적인 피로 신뢰성 해석 결과에 의하면 TMD는 열차의 속도가 공진 속도에 가까울수록, 또 감쇠비가 작을수록 더 큰 피로 수명 연장 또는 피로 신뢰성 향상 효과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

TMD가 장착된 교량의 피로수명 효과를 정량적으로 파악하기 위하여 동적 해석을 이용한 피로 신뢰성 평가방법을 제시하였다. 피로 파괴에 대한 한계상태식을 S-N 곡선과 선형누적손상법칙을 이용해 유도하였고, 특히 변수의 불확실성을 고려해 합리적인 피로 파괴 확률을 산출하였다. 이 과정에서 시뮬레이션으로부터 형성된 표본으로부터 모집단 확률변수의 분포특성을 통계적으로 유추하는 방법을 적용하였다. 40m 지간의 강합성교에 대하여 TMD 장착 유무에 따른 피로 신뢰성을 평가한 결과, TMD를 장착한 교량의 피로파괴에 대한 신뢰도 지수는 TMD 비장착시보다 매우 높은 것으로 나왔으며, 목표 신뢰도 지수를 기준으로 한 피로수명도 현저하게 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

동조질량감쇠기는 고속철도 교량의 동적응답을 줄여 사용성을 개선할 수 있다는 사실이 기존 연구에 의해 밝혀진 바 있지만, 이 연구를 통하여 TMD가 고속철도 교량의 피로수명에 미치는 영향을 검토함으로써 장기적 측면에서 피로수명에 미치는 영향을 정량적으로 고려할 수 있는 방법을 제시했다는 점에서 의의가 있다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Brozzetti, J., "Design Development of Steel-Concrete Composite Bridges in France," *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 55, 2000, pp. 229-243.
2. Kwon, H.-C., Kim, M.-C. and Lee, I.-W., "Vibration control of bridges under moving loads," *Computers & Structures*, Vol. 66, No. 4, 1998, pp. 473-480.
3. Wang, J.F., Lin, C.C. and Chen, B.L., "Vibration suppression for high-speed railway bridges

- using tuned mass dampers," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, 2003, pp. 465-491.
4. Yau, J.D. and Yang, Y.B., "Vibration reduction for cable-stayed bridges traveled by high-speed trains," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, 2004, pp. 341-359.
 5. 포항산업과학연구원 철강엔지니어링센터, "고속철도 합성형교량 설계요령", 1998, pp. 33-36.
 6. Miner, M.A., "Cumulative damage in fatigue," *Journal of Applied Mechanics*, Vol.12, No.3, 1945, pp. A-159-A-164.
 7. Wirsching, P.H., "Fatigue reliability for offshore structures," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 10, 1984, pp. 2340-2356.
 8. Wirsching, P.H., "Probabilistic fatigue analysis," *Probabilistic structural mechanics handbook [chapter 7]*, NewYork: Chapman & Hall Ltd., 1995, pp.146-155.
 9. 양영순, 서용석, 이재욱, "구조 신뢰성 공학", 서울대학교 출판부, 서울대학교, 1999.
 10. AASHTO *LRFD Bridge design specification*, AASHTO, 2004
 11. Cheung, M.S. and Li, W.C., "Probabilistic fatigue and fracture analyses of steel bridges", *Structural Safety*, Vol. 23, 2003, pp. 245-562.
 12. 장동일, "구조공학에서의 파괴와 피로", 동명사, 1999.
 13. Sobczyk, K. and Spencer Jr., B.F., *Random fatigue: from data to theory*, Academic Press, Inc., San Diego, Calif, 1992.
 14. Fryba, L., *Dynamics of Railway Bridges 2nd ed*, Tomas Telford, London, 1996.
 15. Haldar, A. and Mahadevan, S., *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc. New York, 2000.
 16. Hambly, E.C., *Bridge Deck Behavior*, Chapman and Hall, 1976.
 17. Den Hartog, J.P., *Mechanical Vibrations, 4th Ed.*, McGraw Hill, Inc., New York, 1985.
 18. Ian Bucknall, *New Eurocode requirement for the design of high-speed railway bridge*, IABSE Symposium 2003, Antwerp, Belgium, August 27-29, 2003.