

가변정보판이 설치된 지주구조물에 대한 피로 시험 및 AASHTO설계기준 적용성 평가

Fatigue Field Test of Variable Message Sign Structure and Evaluation of AASHTO Specifications

박 종 섭^{1)†}
Park, Jong Sup

요 약 : 가변정보판이 설치된 지주 구조물은 차량 운전자들에게 안개, 사고 등에 의한 교통혼잡 및 유지 보수를 위한 차선 통제 등 발생 가능한 위험 사항을 경고해 줌으로써 안전사고예방에 큰 역할을 수행하고 있다. 이러한 지주구조물은 자연풍과 트럭이 하부를 통과하면서 생기는 바람으로 인하여 반복피로하중을 받게 된다. 본 연구에서는 가변정보판이 설치된 지주구조물에 대한 피로성능을 평가하기 위하여, 유한요소해석 프로그램인 GTSTRUDL(2003)을 이용한 구조해석 및 현장시험이 실시되었다. 구조해석 및 현장시험결과를 토대로 본 대상구조물의 안전성 및 피로수명을 검토하였다. 피로성능평가 분석결과 본 대상 구조물은 AASHTO(2001) 교통신호 지주구조물을 위한 설계기준이 제시하고 있는 무한피로 수명을 확보하고 있지 못함을 알 수 있었다. 또한, 본 연구결과를 토대로 AASHTO(2001) 설계기준이 안전측으로 트러스형 지주구조물에 적용 가능함을 확인할 수 있었다. 본 대상 구조물보다 상대적으로 작은 경간장을 가지는 국내 교통신호 지주구조물을 위한 설계 및 유지보수기준 마련에 본 연구가 매우 유용하게 활용될 것이다.

ABSTRACT : Variable Message Signs (VMS) structures offer an increase in traffic safety through their ability to relay messages to motorists for warnings of hazards ahead, such as fog, traffic congestion, accidents, and lane closings. The geometry of these signs sometimes results in the significant cyclic loading of the support structure due to wind gusts, which can result from passing trucks or from natural wind. This study presents the results of analytical and experimental investigations of VMS structures. The commercially available software GTSTRUDL (2003) was used to perform space-frame structural analyses of these welded tubular structures. Fatigue evaluations were performed using stress ranges from field measurements and from structural analyses. Based on the results of the structural analyses that were conducted, where fatigue design loadings that had been derived from AASHTO Specifications for Structural Supports for Highway Signs, Luminaries, and Traffic Signals (2001) were used, the structures that had been studied were found not to have infinite fatigue life. According to the limited measurements that were made in this study, the fatigue design loadings derived from AASHTO Specifications (2001) appear to be conservative, but they are not overly conservative. The results of this study should be used to make a reasonable design of VMS structures, and to maintain their standards.

핵심용어 : 가변정보판 지주구조물, 피로수명, 피로한계, 피로현장시험, 풍하중

KEYWORDS : VMS structures, fatigue life, fatigue limit, fatigue field test, wind load

1. 서론

차량 운전자들에게 교통상황을 실시간으로 제공하기 위해 교통신호 지주구조물에 가변정보판(Variable Message

Sign, VMS)을 설치하는 것이 고속도로 및 일반도로의 새로운 경향으로 나타나고 있다. 이러한 문자정보 제공시설물은 차량 운전자 들에게 안개, 사고 등에 의한 교통혼잡 및 유지 보수를 위한 차선 통제 등 발생 가능한 위험 사항을 경고해

1) 교신저자. 정회원, 상명대학교 토목환경공학부 교수, 공학박사
(Tel :041-550-5314, Fax :041-550-5313, E-mail :jonpark@smu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

중으로서 안전사고예방에 큰 역할을 수행하고 있다. 또한, 차량의 속도 및 진행 흐름에 대해 운전자에게 정보를 제공하여 원활한 교통 흐름을 유도한다(박상명 등, 2002). 현재 국·내외에서 교통신호 지주구조물은 고속도로, 일반국도 및 혼잡한 시내도로 차선 위에 설치되어 있으며, 가변정보판은 일반 교통신호판 보다 단면이 커 풍하중의 영향이 크고, 상대적으로 무거우므로 교통신호판 지주구조물 보다 큰 동적 거동을 유발한다. 자연 기후에 의한 바람(자연풍, Natural Wind Gust)과 지주구조물을 통과하는 대형 차량으로 발생하는 바람(트럭통과 풍하중, Truck Induced Wind Gust)은 많은 반복회수의 동적 거동을 유발하여 지주구조물에 피로 균열을 유발한다.

미국 AASHTO는 1994년 교통신호 지주구조물에 대한 설계 기준을 제시하였다(AASHTO, 1994). 이 설계 기준은 교통신호 지주구조물 형식에 따른 설계 개념 및 방법에 대해 자세히 기술하고 있으나, 피로설계와 관련하여 미흡한 정보를 제공하고 있다. 따라서, AASHTO (1994) 설계기준을 따른 일부 교통신호 지주구조물의 경우 풍하중으로 인하여 큰 변위와 과도한 피로균열이 발생 하였다 (Dexter and Ricker, 2002). 1993년 미국 버지니아주에서는 운행중인 차량에 가변정보판이 추락 하는 사고가 발생하였으며, 1995년 미국 캘리포니아주에서는 가변정보판과 지주 구조물의 연결부가 설치 후 18개월 만에 파괴되는 등 교통신호 지주구조물의 안전성에 대한 문제가 미국의 여러 주에서 제기되었다.

현재 국내에서는 가변정보판이 설치된 교통신호 지주구조물에 대해 정립된 설계 및 유지보수기준이 없는 실정이다. 한국 도로공사는 전문시방서(2004) 중 교통안전 시설 공사편에 도로표지에 대한 일반사항, 사용재료, 간단한 시공기준을 제시하고 있으며, 일반적으로 교통신호 지주구조물 설치업체가 자체적으로 안전성 검토를 수행 하고 있는 실정이다.

미국 AASHTO는 2001년 피로설계와 관련하여 보다 엄격한 기준을 담은 교통신호 지주 구조물 설계에 대한 새로운 개정판을 제시하였다(AASHTO, 2001). 본 기준서는 동역학적 거동을 유발하는 풍하중을 등가정적 풍하중으로 치환하여 시설물의 안전성을 검토하며, 볼트 또는 용접 등 연결부 상세를 고려하여 피로설계를 수행 하도록 하고 있다. 일반적으로 교통신호 지주구조물은 정확한 작용하중 설계스펙트럼 및 구조물 설치부터 현재까지의 하중작용이력을 파악하기 어려워 기 설치된 지주구조물의 잔존 수명을 예측하기란 매우 어려운 실정이다. 그러므로 AASHTO(2001) 설계기준은 피로 설계와 관련하여 무한피로수명설계를 적용하고 있으며, 강교량의 피로 설계방법과 기 조사된 외팔보형 교통신호 지주구조물의 거동을 토대로 개발, 제안되었다.

본 연구는 현재 미국 고속도로 상에 설치된 트러스 박스 단면을 가지며 가변정보판이 설치된 지주구조물 (그림 1)의 심한 진동 원인을 분석하고자 시작되었다. 1994년 AASHTO 기준을 토대로 적용된 본 대상 구조물은 육안조사결과 심한 진동의 원인은 박스의 긴 시간장과 트러스 연결부재의 피로 균열 발생으로 추정 되었다. 피로균열 발생의 정량적 분석과 현재 사용되고 있는 AASHTO(2001) 개정판의 적정성을 파악하고자 구조해석 및 현장시험이 실시되었다. 현장시험 전어 수행된 정적·동적 구조해석은 사전 구조물 특성 파악 및 거리지 부착위치 결정에 사용되었으며, 게이지가 부착된 각 부재에서는 자연풍과 트럭 통과 풍하중의 영향으로 발생하는 응력이 일정기간 동안 측정되었다. 각 부재에서 측정된 응력은 균열발생 가능여부를 판단하는 기초자료가 되며, 계측결과로부터 계산된 반복하중회수와 유효응력은 구조물 잔존수명 평가에 사용되었다. 본 논문은 장시간을 가지는 미국 고속도로상의 지주구조물의 현장시험결과를 토대로 AASHTO (2001) 설계 기준의 적정성 평가를 수행하였고, 본 논문에서 수록된 현장시험 접근법 및 피로성능평가 방법은 국내 교통신호 지주구조물의 설계 및 유지관리기준 작성의 토대를 이룰 것이다.

본 논문의 구성을 살펴보면, 가변정보판이 설치된 트러스 지주 구조물의 설계기준(AASHTO, 2001)에 대해 다음 장에 기술하였고, 범용 유한요소해석 프로그램인 GTSTRUDL (2003)을 이용한 구조해석, 현장계측을 위한 준비 및 정적·동적 구조해석 및 계측결과 비교, 또한, 계측 결과로부터 유효응력값 산정결과를 나타내고 있다. 또한, 본 대상 구조물의 피로 잔존수명을 추정하여 무한피로수명과 비교, 검토하였으며, 최종적으로 본 논문의 결론을 기술하고 있다.



그림 1. 가변정보판이 설치된 트러스 형식의 지주구조물

2. 교통신호 지주구조물의 피로설계(AASHTO, 2001)

교통신호 지주구조물의 진동과 피로설계에 큰 영향을 미치는 풍하중 종류는 갈로핑(Galloping), 볼텍 세딩(Vortex

Shedding), 자연풍(Natural Wind Gust)과 트럭통과로 발생하는 바람(Truck Induced Wind Gust)으로 구분된다. 외팔보형 지주구조물의 경우, 갤로핑, 자연풍, 트럭통과 풍하중이 중요한 설계 하중이며, 트러스형식의 지주구조물은 비틀림 강성이 크므로 자연풍과 트럭통과 풍하중만이 설계하중이다. NCHRP Project 10-38 (Kaczinski 등, 1998)의 연구 결과를 토대로 제안된 AASHTO(2001) 설계 기준의 제11장은 풍하중으로 인한 복잡한 동적 거동을 간략히 표현된 등가정적 풍하중으로 적용하고 있다. 외팔보 형식의 지주구조물을 대상으로 조사, 개발된 본 설계기준은 현재 트러스형식의 지주구조물에도 널리 적용되고 있다.

2.1 자연풍

자연풍은 풍속과 풍향이 매우 가변적이다. 이러한 자연풍은 일반적으로 평균풍속과 와류성분으로 구분 되어 정의된다. 자연풍의 대표 특성 중에 하나인 와류 성분은 구조부재에 심한 불규칙 진동을 유발하게 되며, 이러한 불규칙 진동으로 인하여 각 부재의 연결부에서는 많은 반복하중이 작용되고, 피로 균열이 발생하기도 한다. AASHTO(2001) 설계 기준은 풍압이 교통신호판과 지주구조물에 수평방향으로 투영된 전 면적에 작용하도록 정의하고 있으며, 등가정적 풍압은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$P_{NW} = 250 C_d I_F^F \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (1)$$

여기서 C_d = 항력계수(drag coefficient), I^F = 중요도 계수(Important factor)이다. 식(1)은 일년에 평균풍속이 5m/s를 초과할 확률이 0.01%를 기준으로 작성되었으며, 본 기준은 미국내 대부분 지역의 연평균 풍속값 중 상한 값을 기준으로 결정되었다.

2.2 트럭통과로 인한 풍하중

교통신호 지주구조물 하부를 통과하는 트럭으로 인하여 발생하는 풍하중은 가변정보판과 구조물에 차량 진행방향과 수직방향으로 돌풍을 일으킨다. 기 조사된 바에 따르면, 수평방향(차량진행방향)으로 작용하는 풍하중은 자연풍에 비해 아주 작은 값이며, 피로설계와 관련하여 트럭에 의해 발생하는 수평방향 풍하중은 높이 차가 큰 경우 큰 영향을 미치지 못한다 (Dexter and Johns, 1998). AASHTO(2001) 설계 기준은 트럭 풍하중을 지주구조물의 수직방향 (상향력)으로만 적용하도록 정의하고 있으며, 정적 등가 풍압을 계산할 때

사용되는 식은 다음과 같다.

$$P_{TG} = 900 C_d I_F \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (2)$$

여기서 C_d 와 I_F 는 식(1)에 정의된 바와 같다. 가변 정보판이 설치된 지주구조물의 경우, 정보판의 넓은 바닥면적 때문에 상대적으로 큰 수직풍하중이 구조물에 작용된다. 이러한 트럭 풍하중은 구조물 하부를 통과하는 차량의 속도와 차량 상부에서 지주구조물 하부까지의 거리에 영향을 받는다. 식(2)는 100km/hr의 속도를 가지는 트럭이 통과하는 경우를 기준으로 작성되었으며, 그보다 낮은 속도에서는 비례적으로 감소시킨 값을 사용한다 (Fouad 등, 1998). 또한, 작용되는 수직풍압은 가변정보판 및 지주구조물의 하부 3.7m 폭에만 작용되며, 트럭지붕에서 지주구조물 하부까지의 거리가 10m 이상인 경우, 트럭 풍하중은 고려되지 않는다(Dexter and Ricker, 2002).

2.3 연결부 피로 상세

AASHTO(2001) 설계기준은 AASHTO 교량설계 기준(Standard Specifications for Highway Bridge, 1996)의 무한피로수명 설계개념을 적용하고 있다. 또한, AASHTO(1996) 교량설계기준과 AWS 용접 기준(Structural Welding Code-Steel)의 S-N 피로 곡선을 인용하여 각 상세 연결형식에 따라 피로설계 강도를 정의하고 있다. 따라서, 교통신호 지주구조물을 위한 AASHTO (2001) 설계기준은 AASHTO(1996) 교량설계기준의 A에서 E'의 상세분류와 AWS 용접 기준의 ET 상세분류를 적용하고 있다.

S-N 피로곡선은 파괴도달 반복하중회수와 작용된 응력범위를 선형관계로 표현하며 다음의 식과 같이 나타낸다.

$$N = AS^m \text{ 또는 } \log(N) = \log(A) + m \log(S) \quad (3)$$

여기서, N = 붕괴도달 반복하중 회수, A = 연결상세 상수, S = 작용응력범위, m = S-N 곡선의 역 기울기이다. Peronto(2003)는 지주 구조물 연결상세 E'와 ET의 A 값이 AWS 용접기준과 AASHTO (2001) 교통신호 지주구조물 설계기준이 매우 유사한 값을 가짐을 실내실험을 통하여 검증하였다. 본 대상 구조물의 연결상세에 해당하는 E'와 ET의 A 값은 각각 8.1×10^7 과 3.9×10^8 , m 값은 3이 적용된다.

2.4 무한피로수명

Fisher 등(1993)은 피로수명을 규명하기 위해 오랜 기간 동안 실제구조형식의 모델실험을 수행하였다. 그 연구 결과를 토대로 CAFL(Constant Amplitude Fatigue Limit)값 이상의 응력범위가 발생할 확률이 0.05%를 초과하는 경우 피로파괴가 발생할 가능성이 있으며, CAFL 값을 초과하는 응력범위가 발생할 확률이 0.01%(1/10,000) 이하인 경우 무한피로수명을 가짐을 제시하고 있다. 또한, 이 보고서는 0.01% 초과 하중발생 경우에만 무한피로수명 설계조건(Infinite life variable amplitude fatigue design)을 검토하도록 제안하고 있다. Fisher 등(1993)의 연구결과를 토대로, 교통신호지주 구조물 설계에 등가정적 풍하중을 고려하여 피로한계상태(Fatigue Limit State)를 정의하고 있다(Kaczinski 등, 1998). 피로한계상태를 이용하여 응력범위를 계산할 때 10,000 하중주기에 1회 이상 발생최고응력값(CAFL값 적용)이 관측되지 않으면 대상 부재는 무한피로수명을 가지게 된다. 또한, 교통신호 지주구조물을 위한 AASHTO(2001) 설계기준은 유효응력범위가 CAFL 값보다 작으면 무한피로수명으로 간주하고 있다.

AASHTO LRFD(2004) 교량설계기준은 피로설계검토가 무한피로수명을 기준으로 수행되도록 정의하고 있으며, 작용하중에 의해 계산된 유효응력이 CAFL의 1/2값보다 작은 경우 피로수명은 무한대로 정의하고 있다. 이론적으로 본 연구 대상구조물의 수명을 정확히 분석하기 위해서는 초기 구조물 설치에서부터 현재까지의 하중작용이력을 알아야 되나, 현실적으로 불가능하므로 본 연구에서는 공용기간이 얼마 되지 않은 지주구조물에 일정기간 동안 현장 계측을 실시하여, 그 결과분석을 토대로 본 지주 구조물의 피로수명을 결정하였다.

계측결과는 다음 식을 이용하여 각 게이지 위치별 유효응력 범위가 산정되어 피로수명 예측에 적용된다.

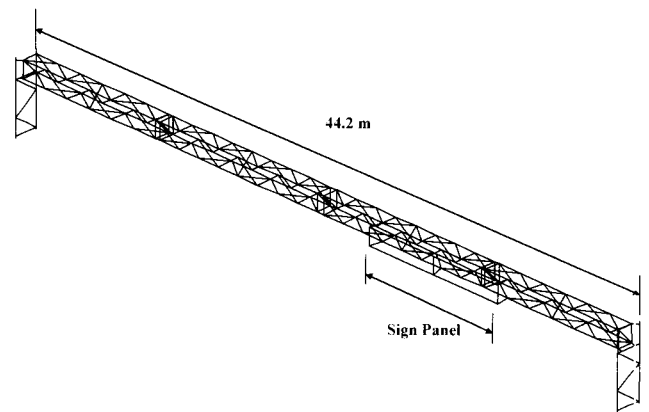
$$S_{re} = [\sum \gamma_i S_{Ri}^3]^{1/3} \tag{4}$$

여기서, S_{Ri} = i단계의 응력범위 값, γ_i = i단계의 반복하중회수와 전체반복하중 회수비이다. 본 연구에서는 계측을 통해 얻어진 결과와 AASHTO(2001)의 등가정적 풍하중을 작용시켜 계산된 유효응력범위 값이 계측 위치별로 비교, 분석되어 AASHTO(2001) 설계 기준의 적용성 검토에 활용되었다.

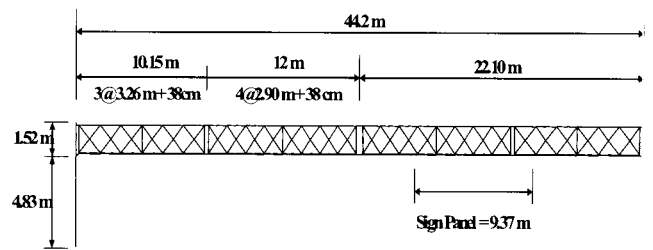
3. 구조 해석

유한요소해석 프로그램(GTSTRUDL, 2003)을 이용하여 가변정보판이 설치된 지주구조물에 대한 정적·동적 해석을 실시하였다. AASHTO(2001)의 등가 정적 풍하중을 이용한 정적해석결과를 토대로 큰 응력이 예측되는 부재를 선별하여 계측지점으로 결정하였고, 동적해석 결과를 토대로 구조물의 고유진동수와 동적 진동모드를 사전 예측하였다. 그림 2는 본 해석에 사용된 해석모델을 보여주고 있다. 해석에 사용된 구조요소는 보(Beam)요소이며, 양단 수직 지주구조물 하부는 콘크리트 Block에 앵커볼트로 연결되어있어 고정지점으로 경계조건을 적용하였다. 표 1은 본 지주 구조물에 사용된 원형 단면 파이프 부재의 재원을 나타내고 있다.

해석결과의 정확성을 피로실험 전에 검토하고자 대상 구조물에 그림 3과 같은 수직정적하중을 작용하여 구조해석 결과와 현장실험 결과(응력, 수직 처짐)를 비교, 검토하였다.



(a) 3차원도



(b) 정면도

그림 2. 가변정보판 지주구조물 해석 모델

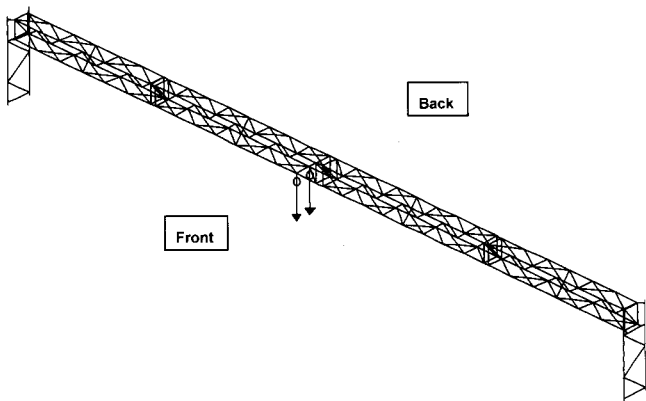


그림 3. 정적 수직 재하시험 시 하중작용 방법

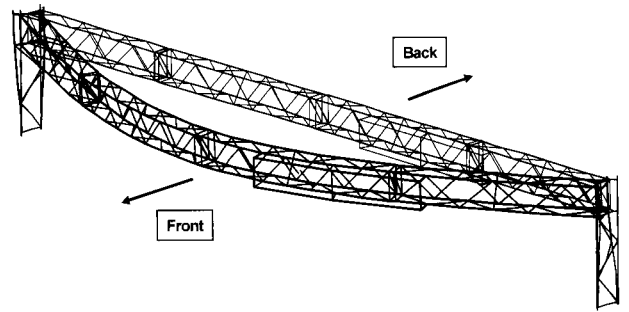


그림 4. 첫 번째 고유진동 모드

표 1. 사용된 부재 제원

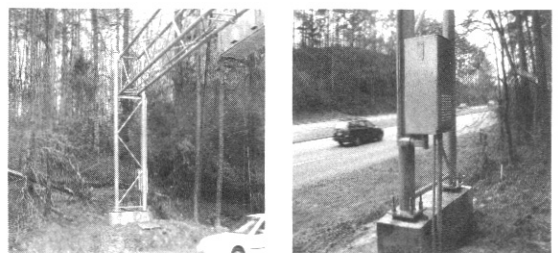
부재 종류		바깥 지름 (OD,mm)	두께 (t _p ,mm)	길이 (L,mm)	
트러스 부재	주부재 (Main Pipe: FT, FB, BT, BB)	141.3	5.6	44200	
	스트럿 부재	수직면	42.2	3.6	1524
		수평면	42.2	3.6	991
	대각선 부재	수직면	60.3	3.9	2235
		수평면	48.3	3.7	1905
트러스 축 수직방향		33.4	3.4	1830	
지지점 부재	수직지지 부재	왼쪽	220.0	6.4	6553
		오른쪽	220.0	6.4	6655
	대각선 부재	48.3	3.7	2083	

AASHTO(2001)에 따라 자연풍에 의한 등가정적 하중을 계산하기 위하여 식(1)의 $C_d=1.7$ 값이 적용되며, 중요도 계수 $I_F = 1.0$, 연간 평균풍속은 본 구조물이 존재하는 지역에서 5m/s로 추정되어 식(1)이 보정 없이 사용되었다. 본 지주구조물을 통과하는 트럭의 최대속도가 70km/hr 속도로 제한되고 있어, 식(2)는 감소된 속도를 고려하여 보정되어 사용되며, $C_d=1.7$, $I_F=1.0$ 이 적용된다. 등가정적 풍하중을 고려한 구조해석 시 가변정보판에 발생되는 축력과 모멘트를 인접 트러스 부재에 균등 분할하여 계산하였으며, 동적해석 시 가변정보판을 여러 개의 질량으로 트러스 부재에 배분시켜 동적해석을 실시하였다. 동적해석결과 그림 4와 같이 앞뒤로 움직이는 거동이 첫 번째 모드임을 확인할 수 있었으며, 고유진동수는 1.35Hz이다. 두 번째 모드는 상하 거동 이었다.

4. 게이지 설치 및 계측 시스템

그림 5(a)와 5(b)는 트러스와 수직지지부재의 연결부와 수직지지부재와 하부지지점부의 연결상태를 보여주고 있다. 본 가변정보판 지주구조물은 트러스 박스단면을 가지고 있으며, 각각의 파이프는 필렛 용접으로 연결되어 있다. 도로표면과 지주구조물 하부까지의 높이는 6m이다. 본 지주구조물은 중앙을 중심으로 대칭을 이루고 있으며, 구조해석결과 가변정보판이 설치된 곳에 보다 큰 응력이 발생되어, 정보판 설치부위 주변과 중앙 주요부재를 중심으로 26개의 변형률 게이지를 10개의 부재에 부착하였다. 그림 6은 게이지의 위치 및 각 게이지별 명칭을 나타내고 있다. 주 파이프 부재 4개 중 3개의 파이프(FT, BT, BB)에 각각 변형률 게이지 4개씩 (상, 하, 좌, 우) 총 12개의 게이지를 부착하였다. 대각선 부재와 스트럿 부재 총 5개 부재에 상하 또는 좌우로 두 개씩의 게이지를 부착하였으며, 지지부 T형 단면과 수직 지주구조물 대각선 부재에 각각 2개의 변형률 게이지를 부착하였다.

그림 7과 8은 상세 게이지 부착위치와 게이지 표기법을 나타내고 있다. 현장 게이지 부착 작업의 어려움과 단면 변화로 인한 응력집중현상으로 지나치게 보수적이고, 불안정한 값의 계측결과를 사전 예방하고, 또한, 정적 수직 재하시험과 해석 결과의 비교, AASHTO(2001) 기준을 따른 등가정적 풍하중을 작용하여 얻어진 구조해석결과와 현장계측결과와의 비교의 일관성을 위하여 각 파이프 부재의 외경에 2배 떨어진 위치에 게이지를 부착하였다.



(a) 트러스와 수직 연결부 (b) 수직 부재와 지점 연결부

그림 5. 계측 대상 가변정보판 지주구조물

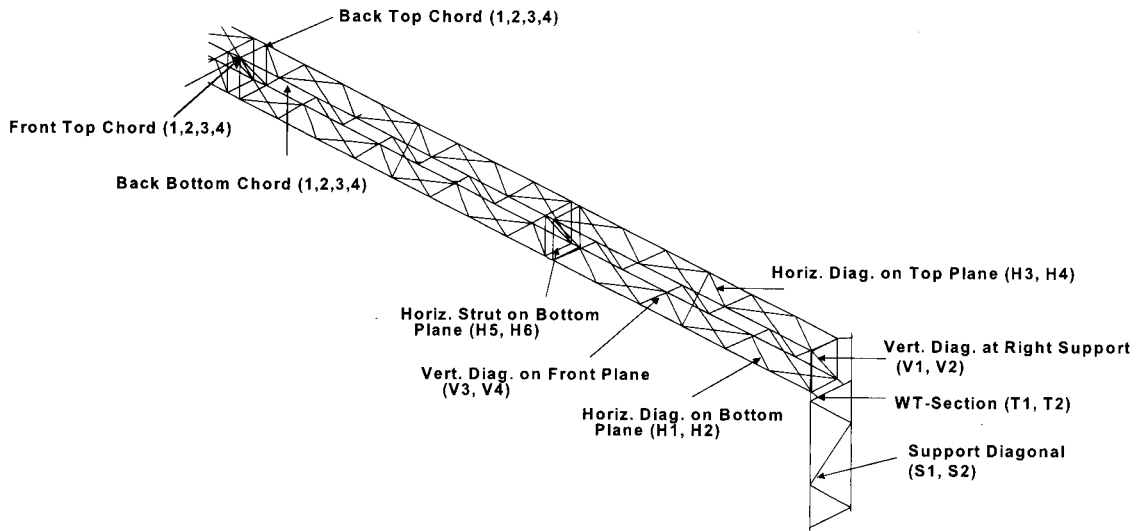


그림 6. 변형률 게이지 부착 위치 및 명칭

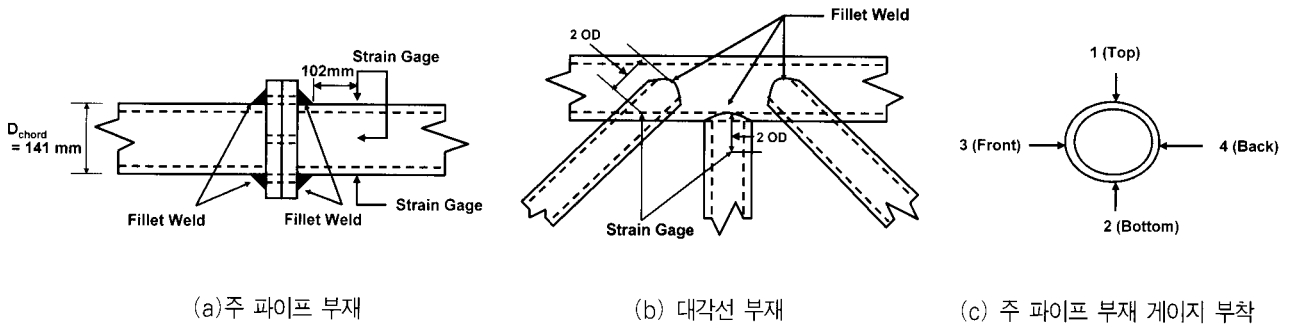


그림 7. 게이지 부착 상세도

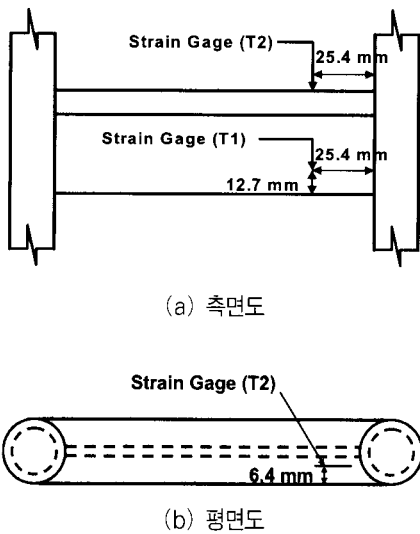


그림 8. WT 단면의 게이지 부착 상세도

풍속과 풍향을 측정하기 위하여 풍력계를 지주 구조물 중앙 경간에 설치하였다. 풍력계는 자료수집 장치와 연결되어 실시

간으로 풍하중 정보가 기록되며, 풍속은 3초 평균풍속을 기준으로 기록되었다. Campbell Scientific사에서 제작한 CR9000 자료 수집장치가 사용되었으며, 컴퓨터와 연결되어 각 게이지의 측정값이 영구 저장되었다. 중앙 수직재하 정적 실험과 트럭통과 풍하중에 의한 응력값을 측정할 때는 순간 시간이력 데이터를 사용하였고, 피로수명을 추정하기 위한 일정기간 동안의 데이터 기록시 15분 간격으로 레인플로우 반복회수 누적 알고리즘 (Rain flow Cycle Counting Algorithm)을 수행하여 8 마이크로미터(μm) 변형률 단위로 반복회수와 이력을 기록하였다.

5. 정적 수직 재하 시험(Pull Down Test)

정적 수직 재하시험은 GTSTRUDL를 이용한 구조 해석모델의 정확성을 평가하고자 수행되었다. 하중은 케이블과 가력기 및 실험실에서 제작된 로드 셀을 이용하여 작용시켰다. 작용하중은 단계별로 최대 13.4kN까지 가력하였으며, 총 5회에 걸쳐 수행되었다. 처짐은 처짐계를 이용하여 각 단계별 처

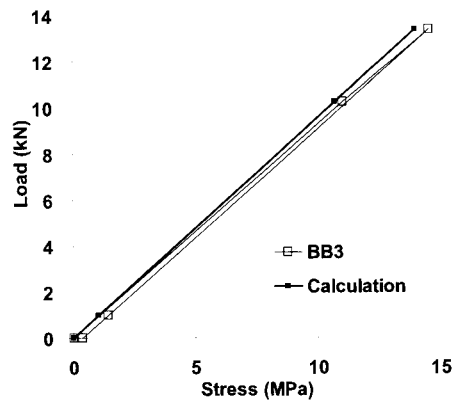
짐을 기록하였으며, 최종적으로 최대 처짐을 얻을 수 있었다. 구조해석 결과로 예상된 바와 같이, 트러스 주 부재(Main Pipe)에 발생하는 응력이 가장 컸으며, 구조해석결과와 매우 유사함을 표 2와 그림 9를 통해 확인할 수 있다. 본 시험 결과로부터, 계측된 부재들 중 최대응력값은 부재 항복응력의 8%, 허용응력의 13%정도 발생하였다. 표 3과 그림 10은 가장 큰 하중이 작용할 때, 발생한 처짐의 값을 비교하고 있으며, 매우 유사함을 알 수 있다. 일부 대각선 파이프 부재와 스테럿 부재의 경우 계측결과가 해석결과에 정확히 일치하지는 않았다(그림 9(c), (d)). 그 이유로는 발생하는 응력값이 1.4MPa이하 작은 값으로 게이지 오차 범위 안에 놓여 있기 때문으로 판단된다. V1, H3, H5의 변형률 게이지의 경우 구조해석결과와 반대의 값이 나왔으나, 이 값들 또한 정확성을 검토하기에는 매우 작은 값이었다. 그림 9(발생 응력비교)와 그림 10(처짐비교)의 주부재 결과 비교로부터 구조해석결과와 현장계측결과 값이 매우 유사함을 확인할 수 있었다.

표 2. 정적실험 시 주부재의 응력 비교 (MPa)

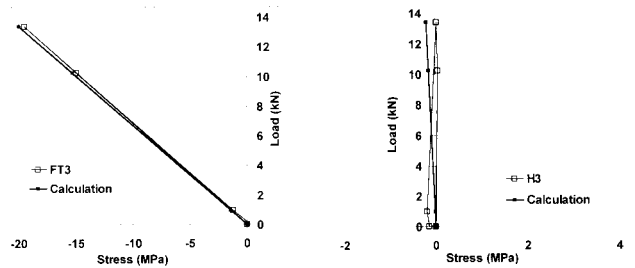
부재 종류	게이지 번호	Test 1			Test 2		
		최대작용하중: 12.0 kN	구조 해석	계측 결과	계측값/구조해석	최대작용하중: 13.4 kN	구조 해석
주부재 (Front Top, FT)	1	14.6	11.6	0.80	16.3	10.8	0.66
	2	16.8	12.1	0.72	18.8	16.1	0.86
	3	17.7	17.7	1.00	19.8	19.4	0.98
	4	13.7	11.6	0.85	15.3	16.1	1.05
주부재 (Back Top, BT)	1	14.5	15.3	1.06	16.2	14.3	0.88
	2	17.7	12.2	0.69	19.9	15.6	0.78
	3	15.9	15.8	1.00	17.8	17.1	0.96
	4	16.3	12.5	0.77	18.3	16.7	0.91
주부재 (Back Bottom, BB)	1	24.9	18.0	0.72	27.9	22.2	0.80
	3	12.5	12.1	0.97	14.0	14.6	1.04
	4	18.4	18.8	1.02	20.6	19.9	0.97

표 3. 정적실험 시 최대 처짐 비교 (mm)

부재 종류	Test 2		
	최대 작용 하중: 13.4 kN		
	구조해석	계측값	구조해석/계측값
FB Main Pipe	20.8	19.3	0.93
BB Main Pipe	20.8	19.8	0.95

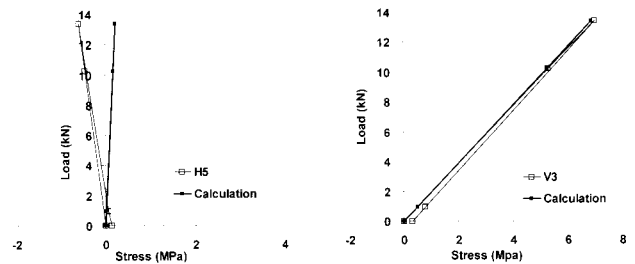


(a) 주 부재(BB3, Test 2)



(b) 주부재(FT3, Test 2)

(c) 수평대각선 부재(H3, Test 2)



(d) 수평스텝 부재(H5, Test 2)

(e) 대각선부재(V3, Test 2)

그림 9. 정적 수직재하시험 해석결과와 측정값 비교(응력)

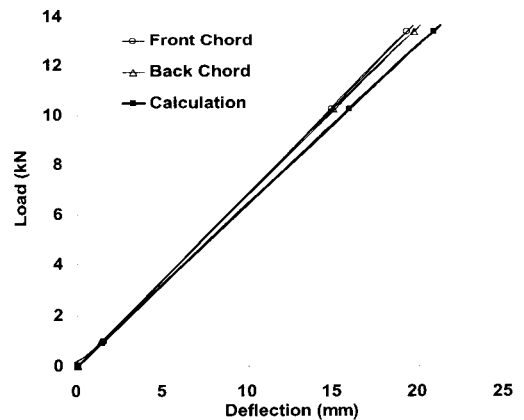


그림 10. 정적 수직재하시험 해석결과와 측정값 비교(처짐)

6. 현장 피로시험과 피로평가

현장피로시험은 자연풍과 트럭통과 풍하중에 의해 각 부재별 피로균열의 발생 가능성 여부를 판단하고자 수행되었으며, 부재별 피로수명을 검토하기 위해 부재별 발생응력범위를 측정하였다.

6.1 트럭통과로 발생하는 풍하중

대형 트럭 통과시의 지주 구조물의 발생 응력을 자연바람이 없는 날을 선정하여 실시하였다. 트럭통과 실험은 편도 3차선 도로에서 차선별 1회씩 총 3차에 걸쳐, 트럭이 70km/hr의 속도로 통과시 계측을 하였다. 트럭 통과 후 육안으로도 지주 구조물의 진동을 관찰할 수 있었으나, 계측된 발생 최대 응력은 주부재의 경우 5.7MPa(CAFL의 32%), 대각선 부재의 경우 5.0MPa (CAFL의 60%)이다.

표 4. 트럭통과 시 측정결과와 구조해석결과의 비교

부재 종류	게이지 번호	S _r (MPa)	
		구조해석	계측결과
대각선 및 스트럿 부재	S1	0.1	5.6
	S2	0.2	2.9
	V1	0.9	3.4
	V2	2.9	4.3
	H1	4.4	4.1
	H3	4.6	3.9
	H4	5.0	3.9
	H5	2.3	1.0
	H6	1.8	1.1
	V3	9.4	1.4
주 부재 (FT)	1	5.1	4.3
	2	8.5	4.4
	3	5.9	5.7
	4	7.8	3.9
주 부재 (BT)	1	7.0	4.7
	2	5.7	3.9
	3	5.9	4.4
주 부재 (BB)	4	6.9	5.4
	1	5.1	4.0
	3	4.6	3.8
WT 단면	4	7.4	5.3
	T1	8.4	4.3
	T2	7.8	3.4

표 4는 계측된 결과와 식(2)에 따른 등가정적 풍하중을 적용하여 계산된 구조해석 결과를 비교하고 있다. 계측결과는

게이지 위치별 가장 큰 값이 발생하였을 때를 나타내고 있다. 지점부 수직부재의 경우, 시험차량이 지점부 가까운 차선들을 통과할 때 가장 큰 값을 나타내었으며, 수직 지지부재에 직접적으로 차량 풍하중이 작용되었으리라 추정된다. 그러나, 그 범위와 기준을 본 실험만으로 결정하기 어려웠다. 따라서, 구조해석결과는 등가정적 풍하중을 각 차선 위 트러스 및 정교판 하부 폭 3.7m에 수직하중 작용시 얻어진 최대값을 나타내고 있다.

표 4를 살펴보면, 주 부재에서 계측된 값은 구조해석으로 얻어진 값보다 작다. 그러나, 대각선 또는 스트럿 부재의 경우, 계측된 값이 구조해석 값보다 큰 경우도 있다. AASHTO(2001)는 트럭 통과로 인하여 발생하는 풍하중을 상하방향(수직방향) 만을 고려하고 있다. 본 대상구조물의 경우, 동적 해석결과에서 살펴본 바와 같이, 첫 번째 고유진동 모드는 수평(앞뒤) 거동이므로 실질적으로 수직하중에 대해 수평 방향으로 동적 반응이 존재하게 된다. 그러나, 본 실험결과를 통해 알 수 있는 바와 같이, 트럭통과로 발생하는 응력값은 CAFL값보다 상대적으로 작은 값이다. 그러므로, 트럭통과로 발생하는 수평방향 성분의 하중은 자연풍이 유발하는 수평방향 하중보다 영향이 매우 작으므로 트럭통과 풍하중에 대해 수직 하중만을 고려하도록 한 AASHTO(2001) 설계개념은 합리적이라 할 수 있다.

6.2 피로성능평가를 위한 장기간 계측결과

각 부재별 유효응력범위를 계산하기 위해서는 일정 기간 동안의 계측 자료가 필요하다. CR9000 계측기를 이용하여 계측기간 동안 발생하는 중요 발생응력 범위값을 레인플로우 반복회수 누적 알고리즘을 이용하여 자료 축적을 실시하였다. 기록된 자료는 트럭통과로 발생하는 풍하중과 자연풍에 의한 영향 모두를 포함하고 있으나, 트럭통과로 발생하는 풍하중 영향으로 각 부재에 발생하는 응력값은 6.1절에서 살펴본 바와 같이 CAFL보다 작은 값으로, 큰 응력을 유발하는 풍하중은 풍력계 자료 검토 결과 자연풍에 의해 발생됨을 알 수 있었다. 계측은 31일간 지속 되었으며, 일부 부재에서 CAFL값을 넘는 응력범위가 기록되었다.

표 5. 계측된 반복 응력회수

부재 종류	게이지 번호	CAFL (MPa)	전체회수 (CAFL의 20%이상)	CAFL 이상 값 회수비율	1/10,000 발생가능 S_r (MPa)
대각선 및 스트럿 부재	S1	8.3	2350992	0.056	10.4
	S2	8.3	1086293	0.002	7.2
	V1	8.3	1370275	0.006	7.2
	V2	8.3	1740686	0.011	8.8
	H1	8.3	1798189	0.012	8.8
	H3	8.3	1692191	0.009	7.2
	H4	8.3	1703093	0.008	7.2
	H5	8.3	583	0.000	-
	H6	8.3	69957	0.021	8.8
	V3	8.3	379952	0.004	7.2
	V4	8.3	429514	0.001	8.8
	FT	1	17.9	15725	0.000
2		17.9	21802	0.000	16.8
3		17.9	142776	0.006	15.2
4		17.9	9802	0.000	-
BT	1	17.9	52155	0.008	15.2
	2	17.9	4517	0.000	-
	3	17.9	27099	0.004	16.8
	4	17.9	129374	0.007	16.8
BB	1	17.9	15854	0.006	16.8
	3	17.9	8876	0.000	-
	4	17.9	101420	0.007	16.8
WT 단면	T1	8.3	1777433	0.010	8.8
	T2	8.3	1339216	0.008	7.2

표 5는 각 변형률 게이지에서 CAFL 값의 20%이상인 경우의 회수(전체회수)와 CAFL 값 이상인 회수가 전체 회수 대비 발생비율을 나타내고 있다. 또한, 표 5는 한계상태 응력 범위(Limit State Stress Range, S_r)값을 보여주고 있으며, 이 값이 CAFL 값보다 작은 경우 무한피로수명을 가지게 된다. AASHTO(2001)는 무한피로수명 설계를 제안하고 있으므로, 장기간의 계측결과로부터 발생된 가장 큰 응력범위(여기선 CAFL)의 주기가 1/10,000 기준 주기보다 작게 발생된다면 그 부재는 피로균열이 발생되지 않으며, 무한피로수명을 가지게 된다.

표 6. 구조해석과 계측결과의 한계상태응력범위 비교

부재 종류	게이지 번호	S_r (MPa) (1/10,000 Cycles)		구조해석결과 / 계측결과
		구조해석	계측결과	
대각선 및 스트럿 부재	S1	29.5	10.4	2.83
	S2	23.3	7.2	3.25
	V1	15.7	7.2	2.18
	V2	17.9	8.8	2.02
	H1	16.4	8.8	1.86
	H3	15.5	7.2	2.16
	H4	17.9	7.2	2.50
	H5	5.6	-	-
	H6	4.6	8.8	0.52
	V3	9.4	7.2	1.31
	V4	7.7	8.8	0.87
	FT	1	16.3	15.2
2		20.5	16.8	1.22
3		21.9	15.2	1.44
4		15.0	-	-
BT	1	20.4	15.2	1.35
	2	16.4	-	-
	3	14.8	16.8	0.88
	4	22.1	16.8	1.32
BB	1	18.5	16.8	1.10
	3	15.0	-	-
	4	22.1	16.8	1.31
WT 단면	T1	23.4	8.8	2.66
	T2	23.2	7.2	3.24

표 6은 각 부재에서 측정된 한계상태 응력범위(S_r) 값과 AASHTO(2001)의 등가정적 풍하중을 적용하여 계산된 값을 비교하고 있다. 표 6으로부터 AASHTO (2001)에 따라 계산된 값이 계측된 값보다 대부분의 경우 크다는 것을 알 수 있다. 가장 큰 차이를 보이는 경우는 스트럿 부재(S2)로 계산된 값은 계측된 값의 3.25배이다. 네 개의 부재(H5, FT3, BT2, BB3)의 경우 계측기간 동안 발생된 응력값이 10,000 하중 주기가상으로 자료 축적이 되지 않아, 10,000 하중에 1회 발생할 확률을 정확하게 결정할 수가 없었다.

6.3 유효응력범위(S_{re})

응력범위이력은 각 부재의 유효응력범위를 계산하기 위해 필요하다. Fisher(1984)는 계측된 값들 중 CAFL값의 25% 또는 30%이상의 값들이 피로균열 진전에 영향을 주는 것으로 보고하고 있다.

표 7. 유효응력범위(계측값)과 한계상태 응력범위와의 비교

부재 종류	게이지 번호	S_{re} (Mpa)	S_r (MPa) (1/10,000 Cycles)	S_r/S_{re}	$S_{r,max}$ (MPa)	$S_{r,max}/S_r$
대각선 및 스트럿 부재	S1	3.2	10.4	3.2	24.8	2.4
	S2	2.5	7.2	2.9	12.0	1.7
	V1	2.6	7.2	2.7	20.0	2.8
	V2	2.8	8.8	3.1	20.0	2.3
	H1	2.8	8.8	3.2	20.0	2.3
	H3	2.7	7.2	2.7	20.0	2.8
	H4	2.7	7.2	2.7	18.4	2.6
	H5	3.4	-	-	23.2	-
	H6	2.5	8.8	3.6	21.6	2.4
	V3	2.4	7.2	3.0	10.4	1.5
V4	2.5	8.8	3.6	26.4	3.0	
FT	1	5.8	15.2	2.6	15.2	1.0
	2	5.8	16.8	2.9	16.8	1.0
	3	5.9	15.2	2.6	21.6	1.4
	4	5.8	-	-	15.2	-
BT	1	5.8	15.2	2.6	18.4	1.2
	2	5.8	-	-	13.6	-
	3	5.8	16.8	2.9	18.4	1.1
	4	5.9	16.8	2.9	23.2	1.4
BB	1	5.8	16.8	2.9	18.4	1.1
	3	5.8	-	-	15.2	-
	4	5.9	16.8	2.9	21.6	1.3
WT 단면	T1	2.8	8.8	3.1	18.4	2.1
	T2	2.6	7.2	2.7	15.2	2.1

AASHTO 교량설계기준과 AWS 규정에 근간을 두고 있는 AASHTO(2001) 교통신호 지주 구조물의 피로설계기준에 따라 연결상세분류 E'와 ET의 CAFL 값은 표 5에 나타낸 바와 같이 각각 17.9MPa와 8.3MPa이다. 본 연구에서는 연결상세 분류 E'(주 파이프 부재)의 CAFL값의 22.3% (4MPa), 연결상세 분류 ET의 CAFL값의 20%(1.66MPa) 이하의 값들은 유효응력범위 산정 계산에 포함되지 않았다.

표 7은 각 부재별 계측된 유효응력범위(S_{re})를 나타내고 있다. 표 7의 유효응력 범위는 계측 후 하루 단위로 계산된 값으로 표현해 보면 일정한 상수 값으로 표현됨을 알 수 있다. 그림 11은 주 부재(FT)에 부착된 네 개의 게이지 계측 값으로부터 계산된 1일 단위 유효응력범위 산정값을 보여주고 있다.

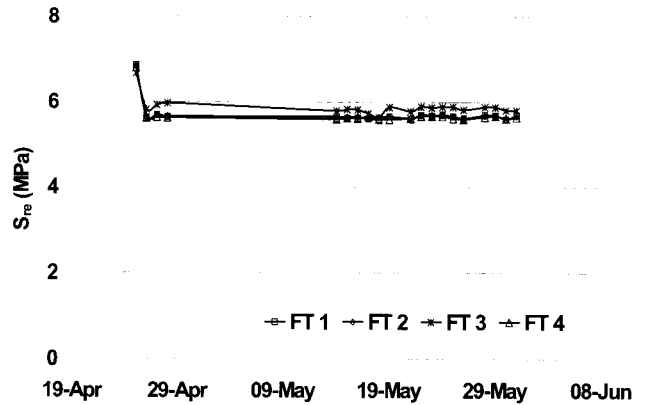


그림 11. 일 단위 유효응력범위(FT1,2,3,4)

그림 11은 4월25일부터 5월31일까지의 FT1,2,3,4 부재의 계측값만을 이용하여 계산된 유효응력범위이다. 본 구조물에 설치된 풍력계의 풍향 및 풍속 계측결과로부터 4월25일경 본 대상구조물 지역에 큰 바람이 관측되었다. 그로 인해, 그림 11의 4월25일 유효응력범위가 순간적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나, 계측이 계속 진행되면서 갑작스러운 변화는 존재하지 않으며 일정한 크기의 유효응력범위를 가짐을 그림 11을 통해 알 수 있다. 다른 부재들 또한 값의 차이는 있으나 일정한 유효응력범위를 나타내고 있다.

그림 11에 나타낸 바와 같이, 각 게이지 값들은 일정한 상수 값으로 계측기간 내 일정하다. 따라서, 일정기간 계측된 결과로 얻어진 본 유효응력범위 값은 풍하중 작용으로 인한 본 지주 구조물의 거동특성을 적절히 표현하는 대표값이라 할 수 있다. 표 7은 S_r/S_{re} 와 $S_{r,max}/S_r$ 의 비교값도 포함하고 있다. 측정된 한계상태 응력범위와 유효응력값의 비교 (S_r/S_{re})는 모든 계측결과에서 3배수 정도의 차이를 보임을 알 수 있다. 또한, 최대응력범위와 한계상태 응력범위 비교값($S_{r,max}/S_r$)은 대략 1~3배 범위에서 차이를 보임을 알 수 있다. 이 값들 또한 본 구조물과 비슷한 형식의 교통신호 지주구조물의 특성치라 할 수 있다.

표 8. 계측지점별 피로수명평가

부재 종류	게이지 번호	$S_{re, meas}$ (MPa)	Cycles/Year (≥ 0.2 CAFL)	피로수명 (년)
대각선 및 스트럿 부재	S1	3.2	27671176	28
	S2	2.5	12785669	137
	V1	2.6	16128137	93
	V2	2.8	20487874	59
	H1	2.8	21164685	58
	H3	2.7	19917088	68
	H4	2.7	20045405	67
	H5	3.4	6862	102184
	H6	2.5	823394	2085
	V3	2.4	4472035	417
V4	2.5	5055380	350	
FT	1	5.8	185083	3578
	2	5.8	256610	2603
	3	5.9	1680474	372
	4	5.8	115370	5724
BT	1	5.8	613864	1074
	2	5.8	53165	12185
	3	5.8	318955	2088
	4	5.9	1522732	410
BB	1	5.8	186602	3467
	3	5.8	104471	6305
	4	5.9	1193713	533
WT 단면	T1	2.8	20920386	56
	T2	2.6	15762572	94

6.4 무한피로수명 검토

무한피로수명은 각부재의 CAFL값이 10,000하중 주기에 1회 이상 발생될 응력범위를 비교하는 것으로 시작되었다. 표 5에서 나타낸 바와 같이, 대각선과 스트럿 부재 중 5개 부재(S1, V2, H1, H6, V4)와 WT의 T1 부재의 한계상태응력범위(S_r)가 CAFL값 보다 크다. 따라서, 이 부재들은 피로 균열이 발생할 가능성이 있으며, 유한 피로수명을 가지게 된다. 이러한 피로수명은 각 게이지별로 계측된 유효응력범위를 2.3절에 언급한 상수값과 관계식을 이용하여 각 게이지별로 피로수명(반복회수)을 얻을 수 있다. 또한, 31일간 계측된 결과를 토대로 한달 평균 발생회수를 구하고, 12개월(1년) 발생 가능한 회수로 산술적으로 증가시켰다. 따라서, 각 부재별 피로수명(반복회수)를 1년 동안 작용하는 회수로 추정된 값으로 나누어 각 부재의 년 단위 피로수명을 표 8에 나타내었다.

앞에서 언급한 바와 같이 6개의 부재가 유한피로수명을 가 지나 표 8은 전체 계측부재의 피로수명을 나타내고 있다. 본 지주구조물은 2001년에 설치된 것으로 설치 년 수가 얼마 되지 않아, 표 8의 피로수명은 본 지주구조물의 잔존수명이 라 할 수 있다. 피로수명 검토 결과로부터 S1 부재의 경우, 잔존수명은 28년으로 무한 피로수명에 비해 작은 수명을 가지고 있음을 알 수 있다. 세 개의 게이지 (V2, H1, T1)의 경우, 지주 구조물의 설계수명이라 할 수 있는 50년과 근접한 결과(50~60년)를 나타내고 있다.

7. 결론

가변정보판(VMS)이 설치된 지주구조물의 피로수명 계산 및 AASHTO(2001) 교통신호 지주구조물 설계 기준의 적용성을 평가하고자 현재 미국 고속도로에 설치되어 있는 지주 구조물에 대한 현장계측 및 구조 해석이 실시되었다. 구조해석 프로그램 GTSTRUDL(2003)을 이용한 해석결과를 토대로 가장 큰 응력이 발생하는 곳을 찾아 변형률 게이지를 설치하였으며, 트러스 형식의 지주구조물의 거동을 분석하고자 자연바람과 트럭통과 풍하중 영향으로 발생하는 변형률을 측정하여 각각의 응력 범위를 산정하였다. 본 연구에서 수행한 정적·동적 해석 및 현장 시험 결과분석을 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 계측대상 구조물의 진동은 육안으로 관측 가능하였으며, 계측결과로부터 모든 부재가 무한 피로수명을 가지지 않음을 알 수 있었다. 부재 S1은 28년의 유한 피로수명을 나타내었고, 다른 몇 개의 부재는 피로균열이 발생 가능하였다. 따라서, 본 가변정보판이 설치된 지주구조물의 경우 향후 유지보수를 위한 시스템을 구축할 필요가 있다.
- (2) GTSTRUDL(2003)을 사용한 구조해석의 정확성을 검토하고자 수직재하 정적실험이 실시되었다. 발생응력이 상대적으로 큰 주 부재(FT, BT, BB)에서 계측된 결과는 계산된 결과와 매우 유사한 값을 나타내었다. 상대적으로 작은 응력이 발생된 대각선 또는 스트럿 부재의 경우 부호가 반대인 경우도 있었으나, 게이지 오차 범위 내로 신뢰할 정도의 값으로 보기 어려웠다. 해석결과와 계측으로 얻어진 처짐값 비교의 경우 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.
- (3) 구조해석결과와 수직재하 정적실험 결과분석을 통하여, GTSTRUDL(2003)을 이용한 구조 해석 결과를 이용하여 본 구조물의 정적·동적해석의 신뢰성을 검증할

수 있었으며, 피로성능 검토를 위한 해석에도 충분한 정확도를 가질 수 있음을 확인할 수 있었다.

- (4) 구조해석을 통하여 AASHTO(2001) 설계 기준의 등가정적 풍하중을 트리스형식의 본 대상 지주구조물에 적용시켜 피로설계기준 만족여부를 검토하였다. 검토 결과 본 지주구조물은 모든 부재가 무한피로수명을 가지고 있지 않으며 일부 부재가 AASHTO(2001) 기준에 제시된 CAFL 값보다 큰 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 구조물은 계측결과와 같이 유한한 피로수명을 가지고 있다.
- (5) 본 논문의 계측결과와 해석결과를 토대로 AASHTO(2001)의 적용성에 대해 정확도를 정의하기는 쉽지 않으나, 현 단계에서 AASHTO(2001)의 적용은 합리적이라 판단된다. 계측 및 계산된 한계상태 응력범위 결과비교를 토대로 AASHTO(2001) 기준에 따라 계산되어 얻어진 값이 계측된 값보다 크다는 것을 알 수 있다. 가장 큰 측정값을 보인 주 부재(Main Pipe)의 경우 계산된 한계상태응력 범위가 계측된 값보다 44% 큰 정도였다. 이 값은 지나친 안전측은 아니며, 적용 가능한 범위라 할 수 있다.
- (7) 국내 교통신호 지주구조물의 안전성 및 유지보수를 위한 기준이 정립되어 있지 않은 현 단계에서 본 논문의 현장 계측 및 결과 분석 방법의 적용과 AASHTO(2001) 교통신호 지주구조물 설계기준의 적용 가능성을 확인할 수 있었으며, 본 연구는 체계적인 국내 교통신호 지주구조물 설계 및 유지보수 방안 마련의 토대가 될 것이다.
- (8) 가변정보판이 설치된 교통신호 지주구조물의 상세연결 형식과 응력 범위를 고려한 피로평가 민감도분석을 위하여, 연결상세를 재현한 시험체를 제작하여 추가적인 피로실험이 수행될 필요가 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

박상명, 이병주, 김명수, 낭궁문(2002). "유고정보 제공시 교통류 변화에 의한 가변정보판의 유효성 검증." 2002년 학술 발표회 논문, 대한토목학회, pp125-128.
 한국도로공사(2004). 고속도로공사 전문시방서. 성남시, 경기도.
 American Association of State Highway and Transportation

Officials (1994). *Standard Specifications for Structural Supports for Highway Signs, Luminaires, and Traffic Signals*. Washington, D.C., USA.
 American Association of State Highway and Transportation Officials (2001). *Standard Specifications for Structural Supports for Highway Signs, Luminaires, and Traffic Signals*. Washington, D.C., USA.
 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2004). *LRFD Bridge Design Specifications*, Third Edition, Washington, D.C. USA.
 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1996). *Standard Specifications for Highway Bridges*, Sixteenth, Washington, D.C. USA.
 Dexter, R. J., and K. W. Johns, (1998). *Fatigue Related Wind Loads on Highway Support Structures*, Final Report to New Jersey Department of Transportation, ATLSS Report No. 98-03, Lehigh University, Pennsylvania, USA.
 Dexter, R. J., and M. J. Ricker, (2002). *Fatigue Resistant Design of Cantilevered Signal, Sign, and Light Supports*, NCHRP Report 469, National Cooperative Highway Research Program, USA.
 Fisher, J.W. (1984). *Fatigue and Fracture in Steel Bridges: Case Studies*. John Wiley and Sons, New York.
 Fisher, J.W, Nussbaumer, A., Keating, P.B. and Yen, B.T.(1993). *Resistance of Welded Details under Variable Amplitude Loading*, NCHRP Report 354, National Cooperative Highway Research Program, USA.
 Froud, H.F., Calvert, E.A., and Nunez E. (1998). *Structural Supports for Highway Signs, Luminaires, and Traffic Signals*, NCHRP Report 411, National Cooperative Highway Research Program, USA.
 GTSTRUDL (2003). *User Guide*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA.
 Kaczinski, M. R., R. J. Dexter, and J. P. Van Dien, (1998). *Fatigue Resistant Design of Cantilevered Signal, Sign, and Light Supports*, NCHRP Report 412, National Cooperative Highway Research Program, USA.
 Peronto, J.L. (2003). *High-Cycle Constant Amplitude Fatigue Life Variability of Welded Round HSS Y-Joints*, Master's Thesis, Marquette University, Wisconsin, USA.

(접수일자 : 2005. 9. 13 / 심사일 2005. 10. 5 /
 심사완료일 2005. 12. 29)