

낙동강교 ILM 가설에 따른 시공 중 계측

Measurement during Construction of Nakdong Bridge

by Incremental Launching Method

김형태*

조남소**

정지만***

양성만****

Kim, Hyung-Tae

Cho, Nam-So

Jung, Ji-Man

Yang, Sung-Man

ABSTRACT

As the volume of traffic in southern part of the republic of Korea grew, expansion of transportation was required. In that purpose, the railway between Samnangjin and Gwangyang is being extended to a double-track line. This construction includes Nakdong bridge located across Nakdong river. This truss bridge is constructed in incremental launching method (ILM) and composed of two sections, straight line and curved one. Bridge construction in the method goes with the shift of roller supports which results in the change of structural system. To accomplish safe construction, the measurement during the whole launching stages. The locations of member in severe condition and the corresponding response values were estimated through the preliminary construction stage analysis. Based on the analysis, the measurement during construction was planned. Several sensors and measurement devices were installed at appropriate locations. During the whole launching stages, the measurement was performed and the corresponding data were monitored and stored in real time. The comparison of the responses from the analysis and the measurement showed no indication of yielding of the structural members. Consequently, the construction of Nakdong bridge was concluded to be relevant.

1. 서 론

현대건설이 시공중인 낙동강교는 경남 진영과 삼랑진을 연결하는 배후철도 구간에 있으며, 6가지 형식으로 구성되고 ILM 공법으로 가설되는 하로 트러스교이다. ILM 공법으로 시공함으로 인하여 상부 트러스가 압출될 때마다 지점의 변화가 생기게 되고 필연적으로 구조계가 수시로 변하게 된다. 이 때문에 시공단계별로 상부 및 하부 구조물의 취약부재를 선정하고, 해당 위치에 변형률계 등 계측기기를 설치, 모니터링하여 가설시공의 안전성을 평가하고자 하였다. ILM 가설시공에 따른 하중, 지점 이동, 온도와 바람등의 영향에 따라서 일어나는 상부 트러스 구조계의 변화를 검토하여, 상용 프로그램을 이용하여 시공단계별 정밀 구조해석을 수행하였다. 이에 따른 결과를 토대로 상부 트러스의 안전성에 있

* 현대건설 기술연구소, 토목구조팀

E-mail : imshap2@hdec.co.kr

TEL : (031)280-7220 FAX : (031)280-7070

** 현대건설 기술연구소

*** 현대건설 기술연구소

**** 현대건설 낙동강교 현장

어서 취약 시공단계와 부재를 도출하였다. 이러한 시공단계와 부재를 파악함으로써 가설 공정중의 계측 계획을 수립하고 모니터링의 주요 시점과 위치를 결정하였다. 취약위치에서 계측해야 할 응답의 종류에 따라서 계측기의 종류를 선택하여 설치하였다. 또한 앞서 실시한 시공단계별 해석의 결과를 바탕으로 해당 응답의 관리치를 설정하여 계측값이 안전측으로부터 과도하게 벗어나는지의 여부를 판단하고, 그로부터 낙동강교 전 가설공정의 신뢰성을 평가하고자 하였다.

2. 시공 중 계측 계획

낙동강교 가설시공 중 계측을 수행함에 앞서 대상 구조물의 범위를 정하였다. 우선 주 구조물인 상부 트러스 거더를 선정하였고, 이를 지지하는 하부 교각뿐 아니라, 가설부재이지만 응력변동이 상당할 것으로 예상되는 추진코의 모니터링이 필요하다고 판단하여 계측 대상에 포함하였다.

ILM의 특성상 상부 트러스 거더와 추진코는 압출이 진행됨에 따라 지점 조건이 연속적으로 변화하게 되므로, 이에 속한 각 부재의 응력은 압축과 인장의 응력이 교번하여 발생하게 된다. 이러한 다양한 조건하에서 계측을 실시할 개소는 한정되어 있기 때문에 계측을 실시할 위치를 선택적으로 제한하게 되었다. 이를 위하여 가설절차서를 참조함과 동시에 시공단계별 정밀구조해석을 수행하였다. 직선부와 곡선부 및 완화곡선 구간에 있어서 압출 단계별 구조해석을 상부 트러스 거더 및 추진코에 대하여 수행하였고 이에 따른 최대 응력 및 해당 부재단면 위치를 산출하였다.

교각은 상부 트러스 거더와는 다소 상황이 다르다. 상부 트러스는 압축과 인장의 응력이 교번하여 발생하지만 교각의 상부는 추진에 의한 마찰력으로 인하여 항상 같은 방향으로 횡방향 하중을 받게 된다. 또한 응력보다는 횡방향 변위를 계측함으로써 교각 저면에 발생하는 휨 모멘트를 역산할 수 있으며, 마찰 계수를 가정함으로써 교각이 부담하는 횡방향 하중도 추정할 수 있다.

기본적으로 상부 트러스 거더와 추진코에 대한 계측 항목을 변형률로 결정하였는데 부재가 과도한 하중을 받는지의 여부를 판단하기에 가장 적합한 기준으로 판단하였다. 교각은 전술한 바와 같이 변위를 계측하였으며, 구조계에 대한 계측 이외에 기상환경에 대한 계측도 시행하였다. 비교적 고소에 위치한 작업장의 안전에 대한 대비로써 풍향 및 풍속을 측정하였다. 또한 온도에 의한 재료의 팽창 및 수축을 보정하기 위한 외기 및 부재의 온도를 측정하였다. 도표 1에 이상의 계측 항목을 정리하고, 그에 대한 개념도를 그림 1에 도시하였다. 계측 시스템은 이미 사용 실적이 있는 신뢰성 및 안정성이 보장된 장비로 구성하였으며, 또한 ILM으로 시공함으로써 소요되는 이동성이 요구되었다. 따라서 계측기가 연결되는 데이터 로거와 계측 모니터링 스테이션 사이의 연결은 무선 통신으로 구현하여 연속적으로 이루어지는 압출공정으로부터 지장 받지 않도록 하였다.

도표 1. 계측 항목 요약

구분	계측위치	계측항목	센서종류	활용목적
구조계	상부 트러스 거더	휨응력	변형률계	휨응력 변화 양상 파악
	교각	경사도	2축 경사계	압출에 의한 변위 파악
	추진코	휨응력	변형률계	휨응력 변화 양상 파악
기상환경	관측탑	풍속	풍향풍속계	풍속에 대한 안전관리
	부재 및 외기	온도	RTD	부재에 대한 온도 영향 평가

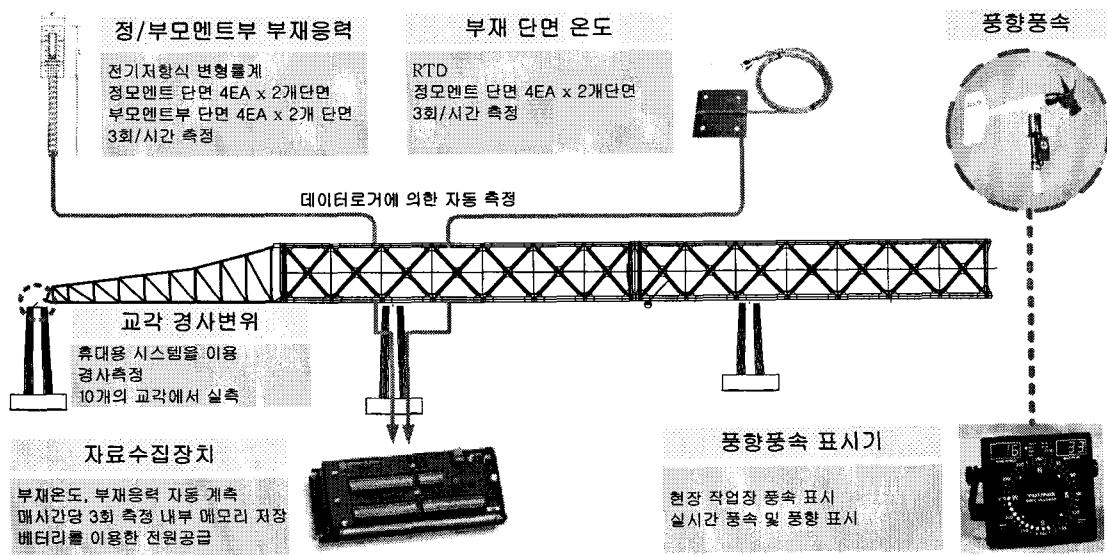


그림 1. 시공 중 계측 시스템 개념도

3. 시공단계별 해석을 통한 센서 설치 계획

압출이 진행됨에 따라 지점 조건이 달라지게 되고 이로부터 상부 트러스 거더와 추진코의 응력은 연속적으로 변화하게 된다. 가설절차서를 참고로 범용 전산해석 프로그램인 마이다스 2006으로 시공단계별 구조해석을 시행하여 응력의 크기가 과도하게 발생하는 압출단계 및 단면위치를 도출하였다.

낙동강교는 직선부와 곡선부로 구성되어 있고 그 중 직선부 시공에 대한 계측으로부터 압출 시공이 정상적인 절차에 의해 무리없이 진행되었다고 판단하였다(조남소, 2006). 여기서는 낙동강교 곡선부 계측에 한정하여 논하고자 한다.

추진코에 있어서 응력이 가장 크게 나타나는 지점 조건은 교각의 받침이 추진코와 상부 트러스 거더의 접합부 부근에 위치할 때이고, 이 때 응력이 가장 큰 단면은 구조해석 결과 접합부에 가장 가까운 격간의 상현재, 하현재, 사재로 나타났고 그림 2에 1, 2, 3번 계측기가 설치된 위치이다. 추진코에 대한 계측은 이러한 3개소에서 이루어졌다.

상부 트러스 거더에 있어서 응력이 가장 크게 나타나는 지점 조건은 추진코와 트러스의 일부가 캔틸레버 형태로 추진코가 진행방향의 교각에 지지되기 바로 직전의 위치이다. 이 때 교각의 받침은 상부 트러스 거더 3번째 격간에 위치하게 되며, 응력이 과도하게 발생하는 단면은 세 번째 격간의 하현재, 사재 그리고 두 번째 격간의 상현재로 구조해석 결과 도출되었다. 이에 대한 세부 위치는 4, 5, 6, 7번 계측기가 설치된 곳으로 그림 2에서 확인할 수 있다.

압출시 교각과 상부 트러스 사이의 마찰력으로 인해 교각에 수평력이 도입되고 이에 따라서 교각 하부에는 휨 모멘트가 유발된다. 수평력을 알면 모멘트를 계산할 수 있으나 수평력에 대한 산정이 곤란한 경우가 많기 때문에 교각 상단의 경사도를 측정함으로써 수평 변위와 하중을 역산하는 방법을 사용하였다. 계측계획에서는 추진코가 접하게 되는 모든 교각에 경사계를 설치할 예정이었으나 현장여건의 어려움으로 추진장에서 가장 인접한 교각인 P6에서만 계측이 이루어졌고, 그 위치는 그림 2에서 알 수 있듯이 2개소에서 각각 교축방향, 교축직각방향으로 이루어졌다.

이상에 대한 구조 해석치는 4장의 도표 2와 도표 3에 관리치와 함께 나열하였다.

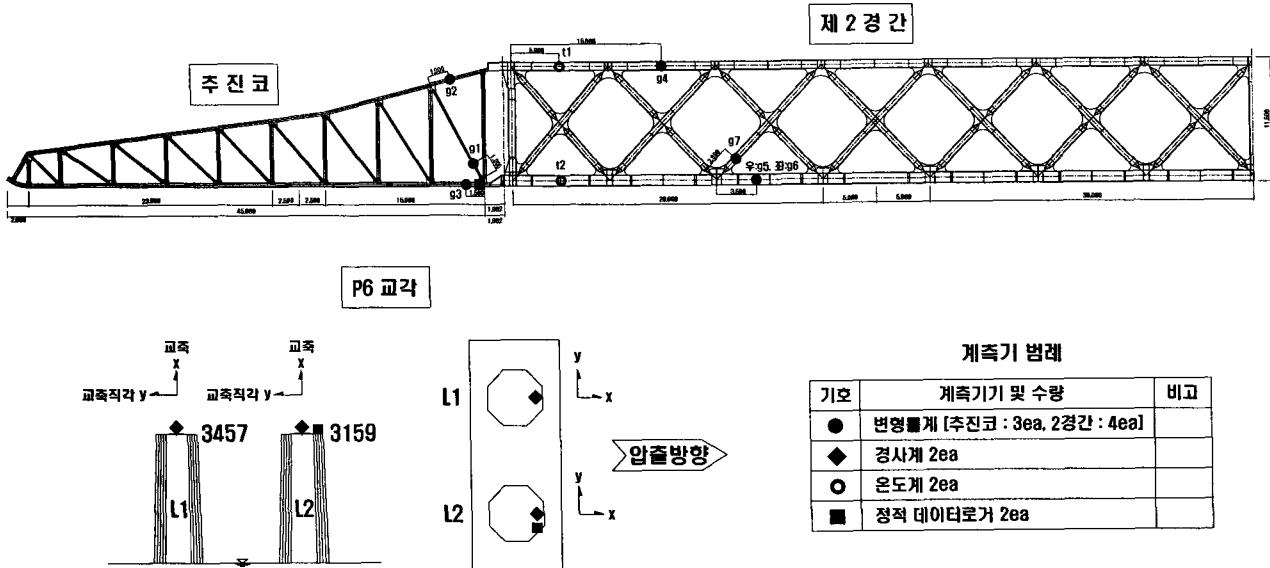


그림 2. 계측기 설치도

4. 관리치 결정

해석에 근거하여 선택된 각 측정 위치에 대한 계측 항목의 계산값에 대해 측정의 오차를 고려하고 또한 철도 설계 기준에서 제시하는 가설 시의 일시적인 허용응력의 증가를 도입하기로 하였다.

측정의 오차는 계측 부재의 제작 오차(부재 거동에 영향), 센서 부착 방법의 오차, 센서 및 계측기 자체의 해상도 등이 영향을 미치는 것으로 예상할 수 있다. 센서 및 계측기 해상도는 각 제품의 사양에 제시되어 있어 이를 반영하기는 용이하나, 계측할 부재의 설치 오차나 센서 부착 방법의 오차는 정량적으로 적용할 근거가 현실적으로 충분하지 않으며 다분히 제작자나 작업자의 경험에 의존적일 수밖에 없고 또한 이러한 오차가 지배적일 경우가 많다. 현재의 선진화된 강교 제작의 정밀도와 그간의 현장 계측 경험에 비추어 보아 10%정도의 오차 설정은 합리적인 적용이라 생각되어 전체적인 측정 오차를 10%로 결정하였다. 또한 철도 설계 기준에서도 제시하는 바와 같이, 가설 중에는 예기치 못한 일시적인 하중이 도래할 수 있기 때문에 이를 고려하여 25%의 변동을 허용할 수 있도록 하였다.

따라서 계측 항목에 대한 측정치의 관리치 선정 방법은 기본적으로 아래의 식 1과 같이 생각하여 결정하였다. 다만 이렇게 결정된 관리치라도 각 재료의 항복 한계를 넘는 경우는 발생하지 않았기 때문에 관리치의 보정은 필요하지 않았다. 도표 2에 상부트리스 및 추진코의 각 측정 위치에 대한 관리치를 제시하였다.

$$\text{관리치} = 1.1 \times 1.25 \times \text{해석치} = 1.375 \times \text{해석치} \quad (\text{관리치} \leq \text{재료의 항복치})$$

식 1

한편 교각의 경우, 추진코와 슬라이딩 패드의 마찰 계수는 철도 설계 기준(2004)에서 제시하는 값(회전마찰계수 0.05)을 적용하였고, 상부 트리스와 추진코의 처짐 형상 및 교각에서의 접지각을 고려하여 최대 수평력을 산정하였다. 수평하중은 전반적으로 60tonf 이내의 고른 분포를 나타내었으나, 추진코가 교각에 접할 때는 81tonf의 수평력이 교각에 전달되는 것으로 계산되었다. 이 때의 수평력은 균열 하중(140tonf) 대비 57.9%에 해당하고, 발생하는 수평 변위는 3.1mm이다. 따라서 교각의 수평 변위 관리치를 $1.1 \times 1.25 \times 3.1 = 4.3\text{mm}$ 로 결정하였다.

도표 2. 해석치로부터 결정된 추진코 및 상부 트러스 계측 관리치

계측기 연번	계측 대상 구조물	해석치(kgf/cm ²)	결정된 관리치(kgf/cm ²)
1	추진코	+1544	+2123
2	추진코	+573	+788
3	추진코	-1320	-1815
4	상부 트러스 거더	+655	+900
5	상부 트러스 거더	+1710	+2351
6	상부 트러스 거더	+1500	+2063
7	상부 트러스 거더	+896	+1232

도표 3. 해석치로부터 결정된 교각 변위 계측 관리치

구분	해석치(mm)	결정된 관리치(mm)	비고
교각상부 수평변위	3.1	4.3	균열하중 대비 57.9%에 의한 변위

5. 계측 결과 및 결론

아래 그림들은 압출 최종 과정에서 보인 계측 응답을 나타내고 있으며, 추진코의 경우 추진중에 관리치에 육박하거나 초과하는 경우도 발생하였다. 그러나 관리치를 초과한 경우라도 사전 시공단계별 구조해석의 결과를 어느 정도 벗어난 것을 의미하는 것이고, 재료의 손상을 의미하는 것은 아니었다. 또한 압출 과정이 끝난 후 본래의 응력으로 회귀하는 것으로 보아 압출에 있어서 추진코가 부담하는 응력이 합리적인 수준이라 판단하였다.

상부 트러스 거더에서 계측기가 설치된 위치는 S2 경간이었고, 최종 압출 과정에서의 그에 대한 변형률 양상은 그림 4에서 보는 바와 같이 나타났다. 추진코와는 달리 상부 트러스 거더의 응력은 해석치 및 관리치를 크게 하회하였다. 추진코는 가설 부재이니 만큼 어느 정도 큰 응력을 받아도 재료의 손상만 일어나지 않는다면 문제가 없겠지만, 상부 트러스 거더는 구조물의 사용 수명동안 사용될 구조부재이기 때문에 응답이 관리치를 밀도는 양호한 시공이 이루어졌다.

교각에서의 경사도를 통하여 산출한 변위를 통하여 산출한 수평력은 관리치를 초과하여 콘크리트의 균열하중을 8% 가량 초과하였다. 이를 시공 중에 파악하였으나 탄성 범위내에서 이루어지는 변형이라는 공학자적 판단하에 압출 시공을 지속하였고, 압출이 완료된 후 교각이 본래 변위 수준으로 회귀하는 것을 확인하였다.

이상의 계측 결과를 바탕으로 낙동강교 곡선부 압출에 있어서 안정적인 시공이 이루어 졌으며, 각 구조물은 정상적인 거동을 한다고 판단하였다.

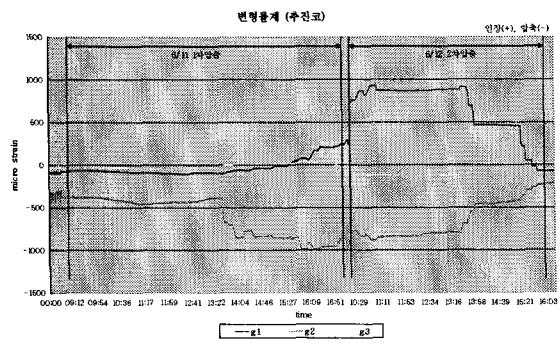


그림 3. 추진코 변형률 양상

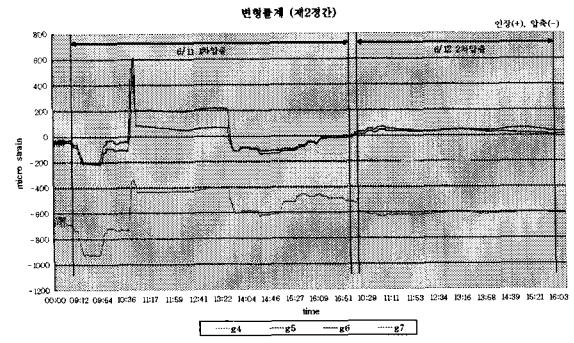


그림 4. 상부 트러스 변형률 양상

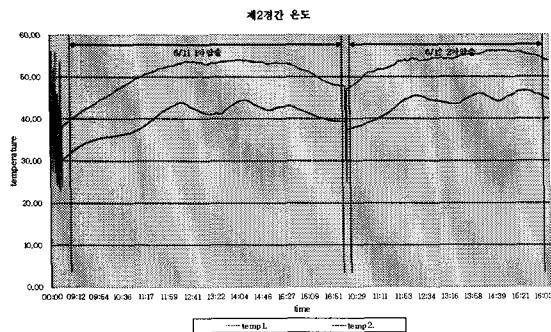


그림 5. 온도 변화 양상

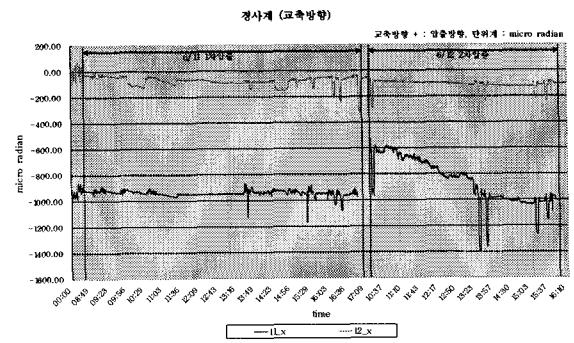


그림 6. 교축방향 경사도 변화 양상

참고문헌

- 1) 현대건설기술연구소(2005), 낙동강교 현장시공계측 및 유지관리 계측시스템 구축계획서
- 2) 철도 설계 기준(2004)
- 3) 조남소, 김규왕, 서주원, 박경호(2006), 낙동강교 상부트러스 압출가설에 대한 시공중 계측 결과 분석, 대한토목학회
- 4) 현대건설기술연구소(2002), 현대건설 성수대교 확장공사 계측시스템 구축 세부계측수행계획서