

FBG 센서를 이용한 철근 콘크리트 역셀구조물의 시공 중 건전성 관리를 위한 지붕철골트러스 변형률 계측

Strain Measurement of Steel Roof Truss Using FBG Sensor during Construction of Reverse Shell Shaped Reinforced Concrete Structure

이근우*, 임홍철**†, 서태석**

Kun Woo Lee*, Hong Chul Rhim**† and Tae Seok Seo**

초 록 FBG (Fiber Bragg Grating) 변형률 센서를 이용하여 철골트러스 지붕의 변형률 계측하였다. 이는 특수한 형태인 콘크리트 역셀 구조물의 시공 중 안정성을 평가하기 위함이었다. 구조해석을 통하여 FBG 센서의 설치위치를 결정하였으며, 센서를 통한 변형률 값을 구조해석 값과 비교하였다. 이를 통하여 특수 구조물의 시공 중 계측을 위한 사전계측 계획의 필요성을 확인 할 수 있었고, 측정된 변형률 값이 구조해석 값을 통한 허용범위 내에 있어, 대상 구조물은 안전한 것으로 판단되었다.

주요용어: 변형률, 트러스, FBG 센서, 역셀, 시공, 모니터링

Abstract Application of FBG (Fiber Bragg Grating) sensors to measure strain of steel roof trusses has been performed. This is to check and confirm the structural integrity of an unusually shaped, reverse shell structure made of reinforced concrete. The issue was to place sensors at proper location and compare the measured values to the results from structural analysis. It has been learned that a deliberate measurement scheme is needed in order to monitor a complex structure during construction. In this study, the measured values were within allowable range of strain, thus confirming the safety of the structure during measurement and construction.

Keywords: Strain, Truss, FBG Sensor, Reverse Shell, Construction, Monitoring

1. 연구 배경과 필요성

최근 신축되는 기념관이나 전시장 같은 건축물들은 사회의 경향을 반영하여 그 구조가 단순하지 않고 복잡한 형태를 가지며 장스팬 구조로 이루어지는 경우가 많다. 장스팬 구조물의 시공 중에는 일반구조물 보다 더욱 많은 안전에 대한 관심이 필요하게 된다. 이러한 건축물에 대한 시공 중 안전성 확보를 위하여 필요한 것이 시공 중 계측이며, 이는 시공의 정확성 파악과 시공 안전

성 확보 등, 향후 유지관리에 유용한 정보제공을 통한 총체적인 안전관리를 가능하게 한다[1,2].

시공 중 계측은 건축분야 보다 토목분야에서 활발하게 이루어지고 있지만, 근래에는 초고층 건축물과 특수한 형태의 대형 구조물의 설계와 시공이 많이 이루어지고 있어, 건축분야에서도 시공 중 계측에 대한 연구와 관심이 증가되고 있다[3].

구조물의 변형 계측을 위하여 전자기장의 간섭으로부터 자유롭고, 장거리 전송에서도 신호의 왜곡이나 손실이 적으며, 불연속적으로 계측을

수행하더라도 계측의 관리가 용이한 FBG (fiber Bragg grating) 센서를 이용한 연구들이 진행되어 구조물의 안정성을 평가하였다[4-9]. 그러나, 건축 구조물의 시공 중 계측에 응용한 연구 사례는 적은 편이다.

본 연구에서는 역셀 구조로 이루어진 철근콘크리트 건축물의 시공 중 구조 건전성 관리를 위하여, 구조해석을 통하여 가장 취약요소로 예상된 철팔트러스 지붕부재의 변형률을 FBG 센서를 이용하여 계측하였고, 시공 중 변화하는 부재변형을 구조해석값과 비교하여 구조물의 안전함을 판별하였다. 또한, 시공 중 계측관리에 필요한 사항을 향후 현장적용에 도움이 될 수 있도록 제시하였다.

2. 계측대상 구조물과 구조 해석

2.1. 구조물 개요

계측대상 건축물은 인천경제자유구역 송도지구 센트럴파크 내 위치한 인천세계도시축전 기념관인 ‘트라이볼’이다. 세 개를 뜻하는 트리플(triple)과 그릇을 뜻하는 볼(bowl)의 합성어인 ‘트라이볼 (Tri-Bowl)’은 이름 그대로 3개의 사발모양을 한 지하 1층, 지상 3층, 연면적 2,800 m² 규모의 복합문화공간으로, 이벤트 홀과 다목적홀, 디지털라이브

러리 등으로 꾸며져 있다. 수변공간의 한가운데 위치하고 있어 마치 물위에 세 개의 그릇이 떠있는 것 같은 형태를 이루고 있는데, 트라이볼이 특히 주목 받는 것은 콘크리트 역셀(reverse shell)구조로 지어진 건축물이라는 점이다(Fig. 1, Table 1).

2.2. 시공 중 계측의 필요성

역셀 구조는 아래서 위로 올라갈수록 넓어지는 고깔모양이 뒤집어진 구조로, 위로 갈수록 구조가 커지기 때문에, 난이도 높은 구조 설계와 이를 뒷받침 하는 정확한 시공 기술이 필요하다. 이같은 역셀구조를 구현하기 위해 벽체들이 서로 맞물려

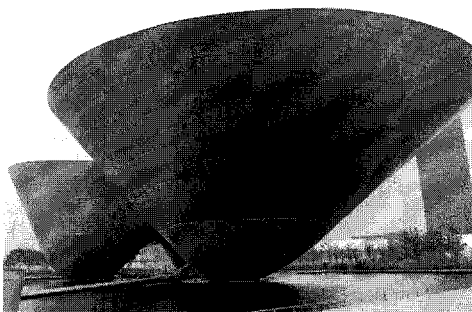


Fig. 1 External view of structure

Table 1 Building outline

Items	Contents
대지면적	12,300 m ²
연면적	2,863 m ²
용도	문화 및 집회시설
층수	지하 1층, 지상 3층 (18.8 m)
구조형식	철근콘크리트, 철팔트러스조

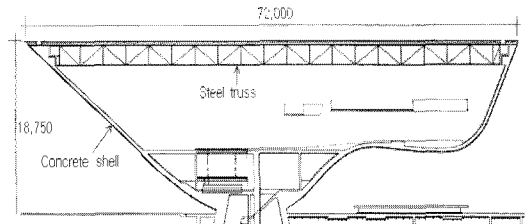
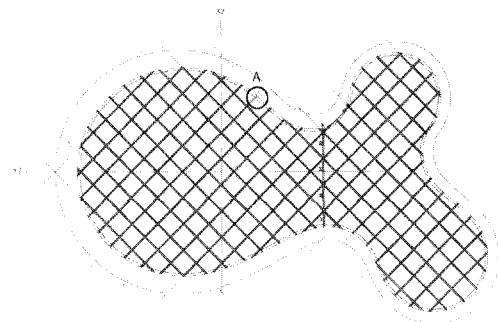
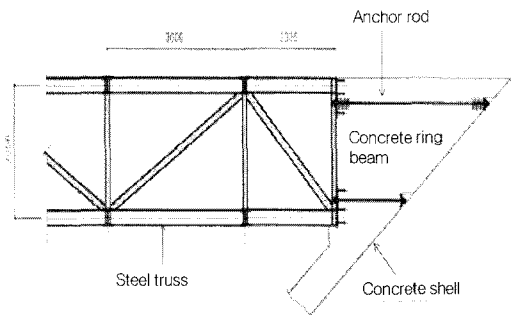


Fig. 2 Section of structure (unit: mm)



(a) Floor plan of steel roof truss



(b) Detailed drawing section A

Fig. 3 Floor plan and detail of roof truss

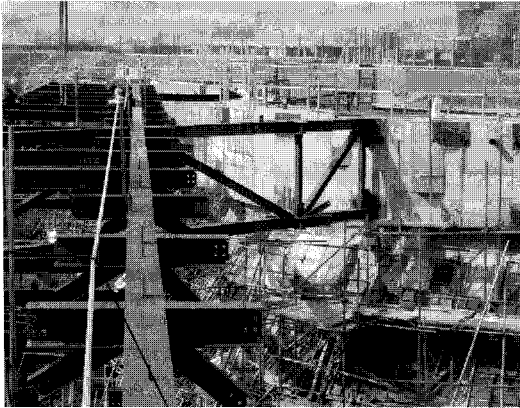


Fig. 4 Roof truss installation

지탱하는 철근트러스월 공법과 기둥 없이 건물이 스스로 지탱할 수 있도록 벽안에 철선을 심어 넣는 포스트텐션(post-tension) 공법이 사용되었다.

본 구조물은 콘크리트 셸 구조를 상부의 철골 트러스가 지지하고 있는 형태로 구성되어 있으며 (Fig. 2), 지붕트러스와 ring beam의 접합부는 구조적 형태와 시공상에서 중요한 역할을 하는 부분으로, 총 69개소 지점에 항복강도 460 MPa의 앵커로드와 스테드볼트로 접합하였다(Fig. 3, 4). 본 구조물은 독특한 형상 때문에 시공의 정확성 및 안전성 파악이 중요한 문제이며, 구조적인 건전성 관리를 위하여 시공 중 계측이 더욱 필요하였다.

2.3. 계측대상 구조물의 구조 해석

건축물의 안전성 확보를 위한 계측을 위해서는 건축물의 취약지점, 즉, 응력이 집중되는 곳이나 변위가 최대가 되는 곳을 선정하여 계측을 실시할 필요가 있다. 구조해석 범용 프로그램인 MIDAS GEN을 이용하여 대상 건축물에서 응력 및 변형이 최대가 되는 곳을 검토하여, 건물의 응력 및 변형 분포를 통해서 콘크리트 셸을 지지하고 있는 지붕철골트러스 부재에서 최대의 응력과 변형이 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 5, 6).

3. FBG센서의 설치와 계측

3.1. 콘크리트 셸 구조물의 계측 방법 선정

본 건축물 계측에서 가장 중요한 부분은 콘크리트 셸이 시공 중 얼마나 안전한가이다. 따라서,

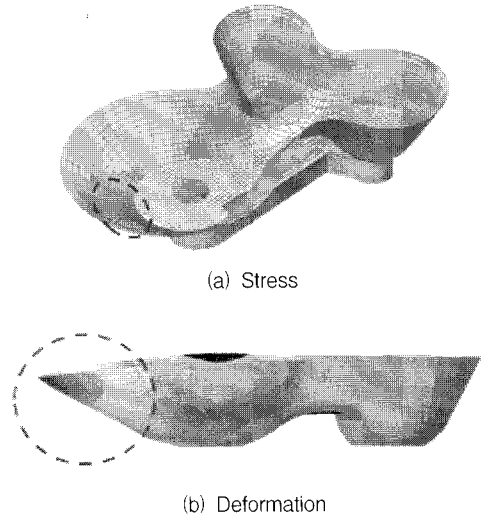


Fig. 5 Max. stress and deformation of concrete shell

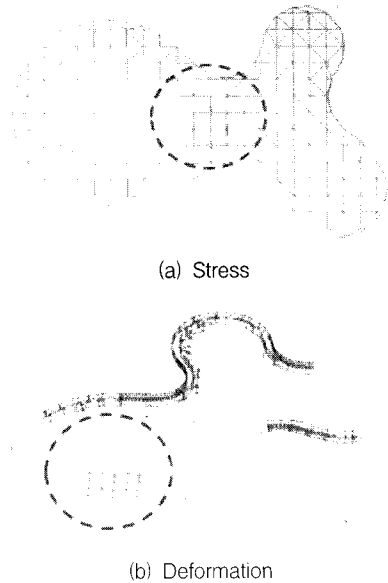


Fig. 6 Max. stress and deformation of steel truss

구조물의 안전성을 평가하기 위한 계측 방법으로 콘크리트 셸을 직접 계측하는 방법이 있지만, 콘크리트의 응력을 측정하기 위해 부착형 센서를 사용하게 되면 외부 마감공사시 패널을 설치하기 위해서는 센서를 제거하고 시공을 해야 하기 때문에, 연속적인 계측이 어렵다는 문제점이 있다.

콘크리트 셸의 변위를 계측할 경우, 다이얼 게이지와 같은 계측기를 콘크리트 외벽에 설치하는 방법과 외부에서 레이저를 이용한 변위계측 방법 등이 있다. 그러나 콘크리트 셸이 무수히 많은 동

바로로 지지되고 있는 상태(Fig. 7)에서 계측이 어려운 점과 지붕철골트러스를 긴결한 직후에 안전성을 확인하기 위해서는 계측위치의 공정을 중단해야 정확한 계측이 가능하다는 문제점이 있다.

대안으로서, 지붕철골트러스에 대한 계측을 실시하여 본 건축물의 지붕철골트러스의 안전성을 평가하는 방법을 고려했다. 구조해석 결과에 따르면, 지붕철골트러스 부재에서 최대의 응력과 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 대상 건물의 지붕 철골 트러스는 상현재, 하현재, 그리고, 중간 사재로 구성되어 있는데(Fig. 8), 콘크리트 쉘의 중력방향 자중을 상부 철골 트러스가 인장력으로 지지하는 형태를 하고 있고, 지붕 마감재의 하중 역시 철골트러스가 받도록 되어 있다. 따라서, 철골트러스 부재의 변형을 통하여 콘크리트 쉘의 시공 중 건전성을 판별할 수 있는 것으로 판단하였다.

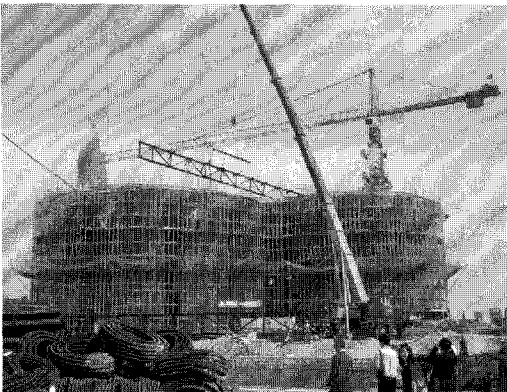


Fig. 7 Installation of shore



Fig. 8 Roof truss upper and lower chords

지붕철골트러스의 안전성을 평가하기 위하여 변형률계를 이용한 계측방법이 가장 적합하다고 판단되었다. 본 연구에 적용된 변형률계로는 저자기장의 간섭으로부터 자유롭고, 장거리 전송에서도 신호의 왜곡이나 손실이 극히 적으며, 불연속적인 계측에서도 측정결과에 신뢰성이 좋아 구조물의 계측에 많이 적용되고 있는 FBG 변형률계 센서를 이용하였다.

지붕 철골트러스에 FBG 변형률계 센서를 부착한 뒤, 광케이블을 연결하고, 이 케이블을 인식할 수 있는 데이터로거로 연결하여, 데이터로거로부터 노트북을 통해 계측 데이터를 획득하였다.

3.2. 연구에 적용된 FBG 센서

FBG 센서는 Fig. 9와 같이 광섬유에 특정 파장 값(λ_B)만을 반사해 내는 회절격자를 새겨 넣어 센서의 길이 변화에 따라 반사되어 돌아오는 빛의 파장 값이 달라지는 원리를 이용한 것이며, 기본식은 (1), (2)와 같다[10,11].

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon_{ax} + (\alpha_s + \xi_s)\Delta T \quad (2)$$

n : 광섬유 코어의 유효 굴절률

Λ : 회절격자 간격(mm)

P_e : 광 탄성계수(0.22),

ϵ_{ax} : 시편의 축 방향 변형률

α_s : 광섬유의 열팽창계수($0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$),

ξ_s : 광섬유의 열광학계수($8.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)

ΔT : 온도변화

철골트러스의 변형을 측정하기 위한 계측센서로는 부착형 FBG 센서(Fig. 10a)와, 온도보정을 위한 온도센서(Fig. 10b)를 선정하였으며, 데이터로거(Fig. 10c)를 이용하여 데이터를 획득하였다. FBG 센서와 온도센서의 사양을 Table 2, 3에 나타내었다.

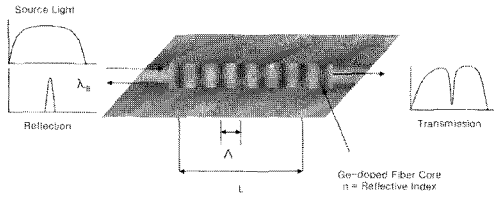
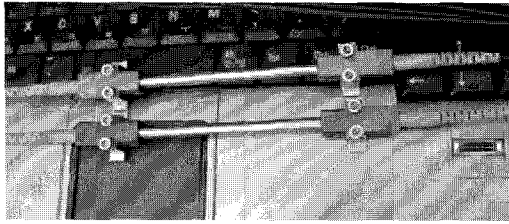
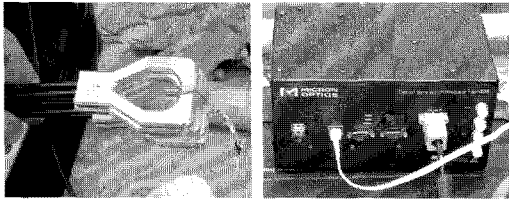


Fig. 9 Principle of FBG sensor



(a) FBG sensor



(b) Temperature sensor (c) Data logger

Fig. 10 Sensors and data logger used

Table 2 Specification of FBG sensor

Measurement Range	-2000 ~ 4000 $\mu\epsilon$
FBG Reflectivity	$\geq 80\%$
Grating Wavelength	1511 ~ 1584 nm
Operating Temperature	-40 $^{\circ}\text{C}$ ~ 80 $^{\circ}\text{C}$
Bandwidth	< 0.1 nm
Resolution	1 $\mu\epsilon$

Table 3 Specification of temperature sensor

Measurement Range	-40 $^{\circ}\text{C}$ ~ 80 $^{\circ}\text{C}$
Resolution	0.1 $^{\circ}\text{C}$
FBG Reflectivity	$\geq 80\%$
Dimension	66 × 32 × 5 mm
Grating Wavelength	1511 ~ 1584 nm
Bandwidth	< 0.1 nm
Weight	30g

3.3. FBG 센서 위치 선정 및 설치

본 계측에서는 건축물에 대한 구조해석을 선행하여, 구조적으로 취약한 지점을 찾아내어, 현장 시공조건 등을 고려하여 센서 부착위치를 결정하였다. 구조물은 세 개의 구역으로 이루어져 있으며, A구역은 셸구조물중 가장 큰 구조물 부분이고, B구역은 두 번째로 큰 구조물이며, C구역은 가장 작은 부분이다. M 부분은 구조해석결과 가장 스트레스를 많이 받는 부분이다.

구조해석결과와 현장조건 등을 고려하여 Fig. 11 과 같이 5개소에 FBG 센서를 설치하였으며, 상현재와 하현재에 각각 1개씩 총 10개의 센서를 설치하였다(Table 4). FBG의 센서의 길이는 100 mm로 하여 철골트러스 중앙부에 설치하였으며, 온도에 의한 FBG 센서의 영향을 보정하기 위하여 변형률계 센서를 설치한 곳 주변 100 mm 위치에 각각 1개씩 온도센서를 설치하였다. 온도 센서에서 측정된 값을 바탕으로 FBG 센서가 온도에 의해서 받는 영향을 보정하였다. Fig. 12에 센서 설치 및 측정 장면을 나타내었다.

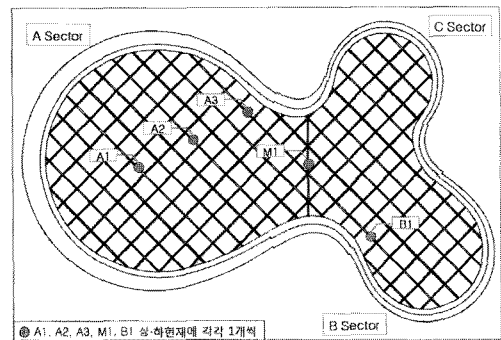
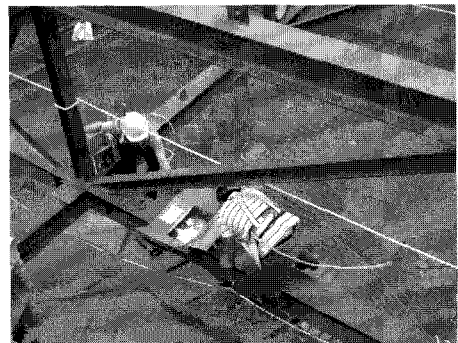


Fig. 11 Location of FBG sensors



(a) FBG sensor setting



(b) FBG sensor monitoring

Fig. 12 FBG sensor setting and measurement

Table 4 Sensor setting location

Member (Length)	Setting Location	Remarks
A1 (3.6 m)	Upper	Area A Center
	Lower	
A2 (3.6 m)	Upper	Area A
	Lower	Middle
A3 (3.6 m)	Upper	Area A Corner
	Lower	
M1 (5.1 m)	Upper	Max. Stress
	Lower	
B1 (3.6 m)	Upper	Area B
	Lower	Corner

4. 측정 결과 및 분석

4.1. 트러스부재의 FBG 변형률 측정

측정은 6월 18일부터 8월 10일까지 총 8회 실시하였으며, 6월에는 4회, 7월에는 3회, 8월에는 1회로 공정 진행과 함께 측정 횟수를 점진적으로 줄였다(Table 5).

Table 5 Measurement schedule

	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.
Concrete work	Supporting post				
Steel work		Steel assembling	Steel finishing work		
Number of measurements		••••	••••	••••	
Construction condition	*Completion of truss work *Removal of support		*Completion of panel work *Completion of deck plate		

4.2. 트러스부재의 FBG 측정 결과

1차 계측에 의해서 측정값을 기준이 되는 데이터로 설정하여 0점을 잡고 트러스 긴결 이전 예비 측정을 통해서 계측 성능을 테스트 하였다. 그리고, 6월 28일 상부 철골 트러스의 긴결 작업이 완료됨에 따라 6월 29일 (4차 계측)에 발생한 측정값부터 유효한 data로 간주하였다. 또한, 각 변형률 값은 온도센서에 의해서 계측된 값으로부터 보정된 값이다.

구조물의 안전성을 검토하기 위해서는 부재가 받는 응력과 변위로 검토할 수 있다. 본 연구에서는 변위를 대상으로 하여 분석하였으며, Fig. 13과 Table 6에 변형률 측정을 통해서 구해진 트러스 부재의 변위를 나타내었다. 트러스부재는 일정한 축력을 받기 때문에 부재 내에서의 변형률이 같다고 가정할 수 있으므로, 측정된 변형률 값에 부재 길이를 곱해서 부재의 변위를 예측할 수 있다.

Table 6 Displacement of truss member

Member	Setting location	Measuring Date (unit: mm)				
		6/29	7/6	7/16	7/24	8/10
A1 (3.6 m)	Upper	0	0.226	0.168	0.059	0.227
	Lower	0	0.219	0.261	0.299	0.427
A2 (3.6 m)	Upper	0	-	0.201	0.024	0.238
	Lower	0	-	0.269	0.180	0.315
M1 (5.1 m)	Upper	0	0.584	1.064	0.500	1.293
	Lower	0	0.578	1.040	0.724	1.384
B1 (3.6 m)	Upper	0	0.162	0.190	0.101	0.312
	Lower	0	0.139	0.122	-	-

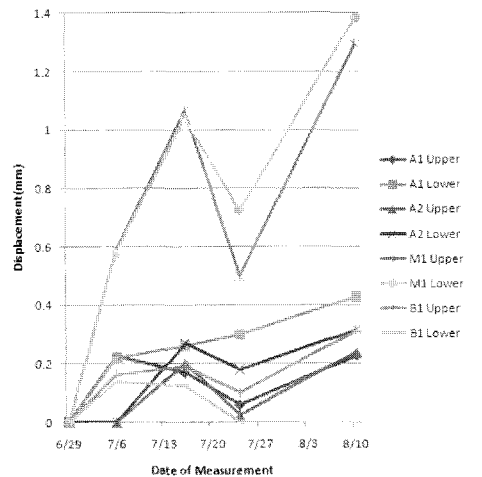


Fig. 13 Change of displacement of truss

전반적으로, 공정의 진행과 함께 변위가 증가하였다. 특히, 8월 10일 계측값 (8차계측)이 가장 컸는데, 이는 데크플레이트 설치 작업으로 인하여 지붕 트러스에 자재를 일시 적재하는 과정 중에 추가적인 하중이 발생한 것을 반영한 것으로 생각된다. A3구역부재의 경우에는 측정값이 일부 손실되어 본 연구에서는 분석을 생략하였다. 또한, A2영역에서는 5차 측정에서, A3영역에서는 6, 8차 측정에서, B1영역에서는 7, 8차 측정에서 단선이 일어나는 등, 단선사고가 빈번히 쉽게 일어나는 문제가 발생하였다. 따라서, 현장계측을 위해서 단선에 대한 대책방안이 필요할 것으로 예상된다.

4.3. 구조해석값과의 비교

취약지점에서의 응력이나 변위값을 계측하고, 이 값을 구조해석값과 비교하여 해석값보다 같거나 작을 때, 그 구조물은 안전하다고 판단할 수 있다. 해당 부재의 측정 변위값과 해석에 의한 예상변위값을 비교한 결과(Table 7), 계측값이 해석값을 약간 초과하는 경우도 보인다. 하지만, 본 실험에 사용된 FBG센서의 오차범위는 $\pm 30 \mu\epsilon$ 이며, 이를 변위로 환산하면, 부재길이 3.6 m에서는 약 $\pm 0.1 \text{ mm}$, 부재길이 5.1 m에서는 약 $\pm 0.15 \text{ mm}$ 정도의 오차를 가지기 때문에 오차범위를 고려한다면 전반적으로 계측값은 해석값과 양호한 상관성을 보여, 계측범위 내에서 대상 트러스부재는 안전한 것으로 판단된다.

M1 부재에서 최대의 변위를 보인 것은 구조해석값에서 최대 스트레스를 받은 지역으로서, 예상된 것과 동일한 결과를 보인 것이며 현장에

서 보여 준 거동들과 일치되는 결과라고 할 수 있다.

5. 결론

교량이나 댐과 같은 토목구조물에서는 시공 중 계측이 많이 이루어지고 있으나 건축구조물에서는 많이 진행되고 있지 않다. 그러나, 최근에 지어지는 전시장이나 기념관등과 같은 그 구조가 단순하지 않고 대경간을 가지며 특수한 형태를 가지는 경우에는 시공 중 계측의 필요성이 커지게 된다. 본 연구에서는 대경간 구조물의 시공 중 계측을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시공 중인 장스팬 역셀 구조물을 대상으로 FBG (Fiber Bragg Grating) 변형률 센서를 이용하여 철골트러스 부재의 변위를 계측하였다. FBG는 계측 중 외부의 간섭이 적어서 시공 중 계측기기로서의 우수성을 보이고 있는데 본 연구에서도 그 유효성이 입증 되었다.
- 2) 최적화된 계측 위치 선정을 위하여 구조 해석 결과를 이용하여 최적의 계측위치를 설정하여 계측을 실시하였으며, 이를 통하여 최소의 계측기 설치를 통하여도 전체 구조물의 안정성을 가늠할 수 있었다.
- 3) 시공의 진행과 함께 트러스 부재의 변위가 증가하였으며 이때 현장상황에 따른 변위의 차이를 보인다. 계측된 값은 해석값과 상관성을 나타내어, 계측 범위 내에서 대상 건축물의 지붕트러스는 안전한 것으로 판단되었다.
- 4) 복잡한 건축구조물에서 시공 중 건전성 관리를 위하여 그 시공 계획에서 계측계획을 동시에 세우는 것이 필요하며, 계측기의 망실에 대하여서도 대책을 같이 고려하여 할 것이다. 또한, 토목 현장과는 다른 차이점을 인식하고 계측기의 설치, 회수 및 유지 운영에 대하여도 연구가 필요할 것이다.

Table 7 Displacement of steel truss

Member	Setting Location	Analysis (mm)	Measurement (mm)	Diff. (mm)
A1 (3.6 m)	Upper	0.18	0.23	0.05
	Lower	0.53	0.43	0.10
A2 (3.6 m)	Upper	0.16	0.24	0.08
	Lower	0.45	0.32	0.13
M1 (5.1 m)	Upper	1.54	1.30	0.24
	Lower	1.88	1.38	0.50
B1 (3.6 m)	Upper	0.13	0.31	0.18
	Lower	0.05	0.14	0.09

감사의 글

본 연구에 도움을 주신 포스코건설(POSCO E&C)과 연세대학교 건축공학과 첨단구조연구실 인치훈, 박영석, 이민주 연구원에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김기수, 이호준, 김종우, "광섬유센서를 이용한 유지관리 모니터링 기술", *콘크리트학회지*, 제12권 제3호, pp. 16-27 (2000)
- [2] 허광희, 이우상, 김만구, "스마트 센서 기술을 이용한 구조물 건전도 모니터링시스템", *한국구조물진단학회*, 제11권 제2호, pp. 134-144 (2007)
- [3] 원일우, 나동수, "한강 플로팅아일랜드 조성공사", *한국건축시공학회지*, 제10권, 제5호, pp. 15-20 (2010)
- [4] 박계환, 황해성, 장화섭, 김우종, 김희욱, "PDA와 광섬유센서를 이용한 교량의 무선 계측 시스템 개발", *한국구조물진단학회지*, 제13권 제1호, pp. 88-96 (2009)
- [5] 신수봉, 윤병구, 김재천, "FBG센서를 이용한 교량의 동적변위 추정", *한국구조물진단학회지*, 제13권 제3호, pp. 101-109 (2009)
- [6] 조남소, 김남식, "FBG 변형률센서를 이용한 현수교의 정적 처짐형상추정", *대한토목학회 논문집*, 제28권 5A호, pp. 699-707 (2008)
- [7] A. Kerrouch, W. J. O. Boyle, T. Sun and K. T. V. Grattan, "Design and in-the-field performance evaluation of compact FBG sensors system for structural health monitoring applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 151, No. 2, pp. 107-112 (2009)
- [8] S. I. Cho, S. J. Yoo, E. H. Kim, I. Kwon, I. Lee and D. J. Yoon, "Strain transmission characteristics of packaged Bragg grating sensors for structural health monitoring," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 3, pp. 236-243 (2010)
- [9] 노병철, 김종우, 강석화, "광섬유 FBG 센서를 이용한 원추형 구조물의 2차원 상대변위 모니터링", *한국구조물진단학회*, 제10권 제4호, pp. 160-166 (2006)
- [10] M. A. Davis, D. G. Bellemore and A. D. Kersey, "Distributed fiber bragg grating strain sensing in reinforced concrete structural components," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, pp. 45-57 (1997)
- [11] W. Chung and D. Kang, "Full scale test of a concrete box girder using FBG sensing system," *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 3, pp. 643-652 (2008)