

# 텐셔닝 에어빔 시스템(TABS)의 힘실험 및 수치해석

## Experimental and Numerical Study for Tensioning Air Beam System

백기열\* · 정미루\*\* · 김종수\*\*\*

Baek, Ki-Youl · Jung, Mi-Roo · Kim, Jong-Su

### 요약

본 논문에서는 텐셔닝 에어빔 시스템(Tensioning Air Beam System: 이하 TABS)의 힘실험 및 수치해석을 통하여 TABS의 성능을 고찰하고자 한다. TABS는 스위스의 엠파(EMPA)에서 Tensairity라는 이름으로 처음 제안되어져, 다수의 연구결과가 발표되었으나 설계에 있어 중요한 변수인 압력, 케이블 장력과 시스템 구조성능의 상관관계가 명확치 않으므로 실제 구조물의 적용에는 정성적, 정량적인 자료가 불충분하다고 할 수 있다. 따라서 텐셔닝 에어빔의 구조성능 파악을 목적으로, 다양한 압력조건과 케이블의 초기장력에 대한 구조실험을 실시하였고, 유한요소법을 이용한 해석결과와 실험값을 비교하여 제안모델의 유효성을 검토하였다.

**keywords** : 텐셔닝 에어빔 시스템, 공기막 압력, 케이블 장력, 유한요소해석

## 1. 서론

TABS는 공기막, 케이블 및 프레임으로 구성된 하이브리드 시스템으로서 공기막 구조와 텐셔닝 구조를 결합한 시스템으로 경량인 동시에 공기막 구조의 재하성능을 크게 개선할 수 있는 시스템이다. TABS는 스위스의 엠파(EMPA)에서 Tensairity라는 이름으로 처음 제안되어져, 설계식 및 구조성능에 관한 다수의 연구결과가 발표되었으나 설계에 있어 중요한 변수인 압력 및 케이블 장력과 시스템 구조성능의 상관관계가 명확치 않으므로 실제 구조물의 적용에는 정성적, 정량적인 자료가 불충분하다고 할 수 있다. 이 논문에서는 TABS 구조성능 파악을 목적으로, 다양한 압력조건과 케이블의 초기장력을 변수로 하여 TABS의 구조실험을 실시하였다. 실험은 공기막 자체의 압력실험과 TABS의 구조성능실험으로 나누어서 실시하였다. 또한 이 연구에서는 유한요소법(FEM)을 이용해 해석결과와 실험값을 비교하여 제안모델의 유효성을 검토하였다.

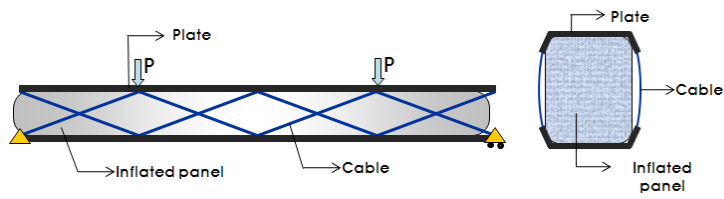
## 2. TABS의 기본개념 및 이론

TABS는 그림 1에 나타난 것과 같이 공기막과 압축재로 표현된 각형강관 부재, 공기막을 감싸는 케이블로 구성된다. 케이블은 각형강관과 공기막을 결합시키기 위한 요소로서, 각형강관의 양 끝단 및 중앙부에 연결된다. TABS는 보에 하중이 작용함으로써 공기막 보에 모멘트 발생하고 그 작용된 모멘트로 인한 케이블의 인장력인 접합부에 전달되는 메커니즘이다.

\* 정회원 · (주)CS구조엔지니어링 연구실장 cutty9@csse.kr

\*\* 정회원 · (주)CS구조엔지니어링 연구원 merooda@csse.kr

\*\*\* (주)CS구조엔지니어링 대표이사 jskim@csse.kr



(a) TABS 기본개념



(b) 막 구조 재료

그림 1 TABS의 구성

TABS는 그림 1(a)에 나타난 것과 같이 각형강관 부재를 압축부, 인장부에 적용하였고 경계조건을 핀-핀 지지에서 핀-롤러 단순지지로 변경하였으며 막 구조의 재료 또한 그림 1(b)처럼 막 내부 가로방향에 섬유(yarn)로 보강하여 공기막 구조의 가로방향 강성을 확보하였다.

### 3. 공기막 보 압력 실험

공기압은 TABS 구조성능을 결정하는 중요한 요소이다. 특히 공기막 보의 기밀성유지는 TABS의 성능을 확보하기 위한 최소한의 조건이므로 구조성능실험에 앞서 공기막 보의 압력실험을 실시하였다. 압력실험은 그림 2의 실험체를 대상으로 100mbar의 압력을 주었을 때 변형률을 0이라 가정하고 200~500mbar의 압력에 대해 실시하였다. 단면의 형상이 직사각형에 가까우며 가로방향으로 섬유(yarn)로 보강되어 있어 공기막 보에 공기압에 가해지면 공기막의 변형은 길이 방향과 직경의 가로방향, 세로방향 모두 변형이 생기게 된다. 따라서 이 실험에서는 공기막 보의 체적변화를 파악하기 위해 그림 2에 나타난 것과 같은 위치에서 길이방향과 전체 원주방향에 대한 길이변화를 측정하였고 이론값에 대한 값과 비교한 그래프가 그림 3에 나타나 있다. 그림 3(a)의 단면원주방향의 변형률은 이론값과 거의 일치하는 결과를 보이지만, 그림 3(b)의 길이방향의 변형률과는 약간의 차이가 있음을 확인할 수 있다.

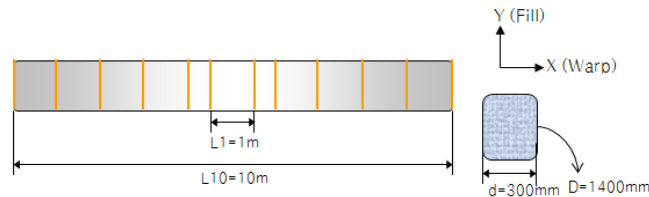
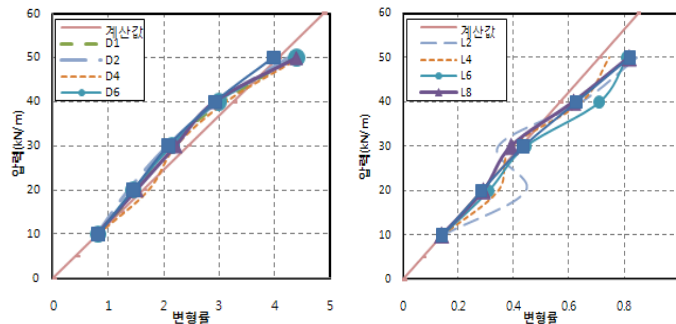


그림 2 변위측정위치



(a) 단면 원주방향 변형률

(b) 길이방향 변형률

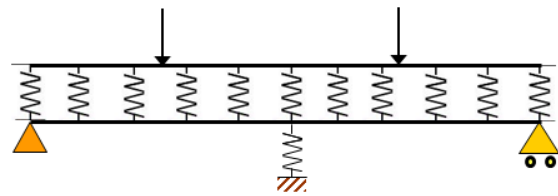
그림 3 공기막 보 압력 실험

#### 4. TABS 구조실험 및 해석

TABS의 구조성능파악을 위해, 10m 스패에 대한 구조실험과 해석을 실시하였다. 실험변수는 공기막 보의 압력과 케이블의 초기장력으로서, 200, 400mbar의 압력, 케이블 초기절단 강도의 10%, 20%의 초기장력에 대해 실험을 실시하였다. 표 1에 TABS에 사용된 케이블 및 각형강관의 제원을 나타내었다. 가력은 그림 4(a)와 같이 양단부로부터 2.5m지점에 2점 가력을 하여 중앙부의 모멘트가 등분포 하중의 경우와 동일하도록 하였으며 케이블은 4개의 케이블을 교차하여 사용하였다. 가력방법은 반복가력으로서 소성 변위까지 고려하여 3차까지 가력하였으며, 가력장치는 실린더형 오일잭을 사용하였다. 또한 실험체의 단부경계조건은 전술한 바와 같이 핀-롤러 단순지점으로 설계하였다. 해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였으며 공기막과 케이블은 그림 4(b)와 같이 스프링으로 치환하였다.



(a) TABS 실험체 전경



(b) TABS 해석모델

그림 4 TABS 구조실험 및 해석

표 1 재료 특성

케이블 $\varnothing 8(1 \times 19)$				각 관 $150 \times 75 \times 4.0$ (SS400)			
지름(mm)	단면적(mm <sup>2</sup> )	절단하중(ton)	단위중량(kg/m)	E(GPa)	$\nu$	F <sub>y</sub> (MPa)	F <sub>u</sub> (MPa)
10	31.6	4.31	0.275	210	0.3	240	410

표 2는 각형강관, 공기막 보, 케이블 등 개개요소의 구조성능을 단순히 선형결합 시킨 이론값과 실험을 통해 얻은 최대하중을 비교한 것이다. 여기서 최대하중의 70%의 하중까지 선형구간임을 예측할 수 있다.

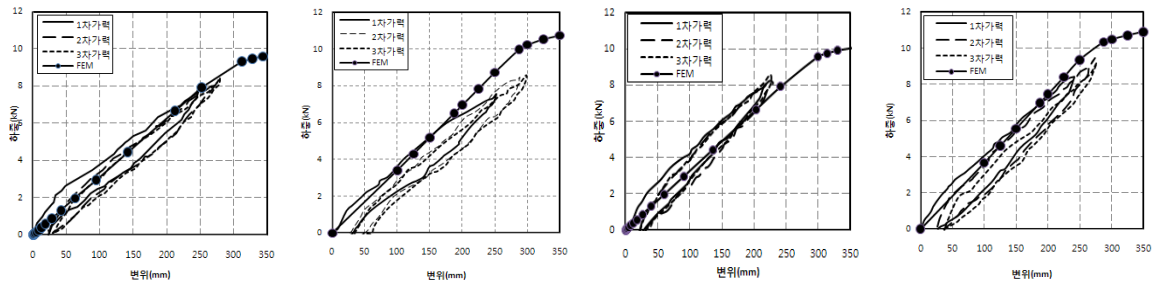
표 2 각형강관, 막 및 케이블 장력의 구조성능(하중)

압력(mbar)	초기장력(%)	P <sub>u1</sub> (kN)	P <sub>u2</sub> (kN)	P <sub>u3</sub> (kN)	P <sub>total</sub> (kN)	P <sub>max-expl</sub> (kN)	P <sub>total</sub> /P <sub>exp</sub> (kN)
200	10(4.2kN)	5.06	0.28	0.42	5.76	8.5	0.67
	20(8.4kN)	5.06	0.28	0.84	6.18	8.6	0.72
400	10(4.2kN)	5.06	0.56	0.42	6.04	8.6	0.70
	20(8.4kN)	5.06	0.56	0.84	6.46	9.4	0.69

표 3은 해석 결과의 강성값을 실험값과 비교한 것이다. 강성값은 비탄성 및 비선형을 고려한 결과로 초기장력이 케이블 최소 절단 강도의 10%일 때에는 공기막의 압력이 200mbar, 400mbar의 결과와는 근소한 차이를 보이며 상회하지만 20%일 때에는 200mbar, 400mbar 모두 큰 차이를 보이며 상회한다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 장력이 클수록 공기막 자체의 강성이 증가하여 케이블과 공기막의 일체화가 떨어지기 때문인 것으로 사료된다. 그림 5는 실험값과 해석값을 비교한 하중-변위 관계로 거동이 유사하게 나타났다.

표 3 TABS구조실험 및 해석결과

압력 (mbar)	초기장력 (%)	평균강성(실험값) (kN/m)	강성(해석값)(kN/m)
200	10(4.2kN)	26.5	31.3
	20(8.4kN)	26.3	34.9
400	10(4.2kN)	31.0	32.6
	20(8.4kN)	27.4	37.5



(a) 단면 원주방향 변형률 (b) 길이방향 변형률  
그림 3 공기막 보 압력 실험

## 5. 결론

TABS의 휨실험 및 구조해석을 통한 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 에어빔 단면의 가로방향을 섬유(Yarn)로 보강한 공기막 보의 압력실험을 통하여 실험에 사용된 막 재료의 압력에 대한 체적변화 및 기밀성을 확인하였다. 이에 따라 공기막 보의 설계에는 이러한 체적변화를 고려해야 할 것으로 사료된다. 또한 모든 실험체의 기밀성은 양호한 것으로 나타났다.
- 2) TABS의 구조성능 실험 결과압력증가에 비례해 구조성능은 향상하였으나, 케이블의 초기장력의 증가에 따라서는 구조성능이 감소하였다. 이는 장력이 클수록 공기막 자체의 강성이 증가하여 케이블과 공기막의 일체화가 떨어지기 때문인 것으로 사료된다.
- 3) 실험결과 및 이론식으로부터 이론상 선형 구간은 실험 최대하중의 평균 70%인 것으로 확인되었다.
- 4) 실험결과와 해석결과의 강성 및 최대하중을 비교해 보았을 때 케이블의 초기장력에 따른 차이는 약간 있지만 대부분 유사한 결과를 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 연구개발사업의 연구비 지원(과제번호# 06 건설핵심B03)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Main, A., Peterson, S.W.&Strauss, A.M. (1994) Load-deflection behaviour of space-based inflatable fabric beams. **Journal of Aerospace Engineering**, 7(2), pp.225~238.
- 백기열, 김종수. (2009) 텐서닝 에어빔의 구조성능에 관한 연구, **Proceeding of KASS Symposiym**, 6(1),