

다양한 재료의 마찰계수를 고려한 중소규모 연성 개폐식 트롤리의 수직하중에 대한 적용성 평가

Trolley Adaptability of Membrane Retractable Roof Under Vertical Load Considering Friction of Various Materials

김 윤 진*
Kim, Yun-Jin

이 승 재**
Lee, Seung-Jae

이 유 한***
Lee, Yu-Han

황 경 주****
Hwang, Kyung-Ju

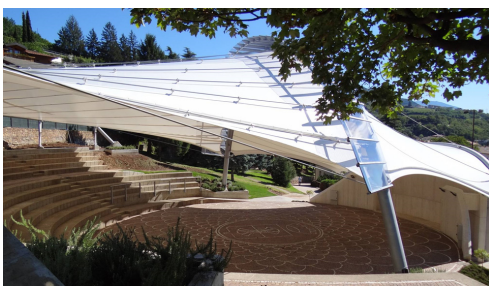
Abstract

Middle size of membrane retractable roof is under 25m span which consists of various moving systems. Trolley is the system that leads the membrane to parking place, transferring the load from the membrane to structural cable. When membrane closes roof completely, thus, structural behavior of trolley, which may contain various material with different friction coefficients, should be investigated by vertical load. Numerical simulation of trolley prototypes, in this research, was performed by incrementation of vertical load. Consequently, this paper studied proper friction characteristics and provided the effective inner materials of trolley.

Keywords : Middle size of membrane retractable roof, Driving device, Trolley, Friction coefficient

1. 서론

중소규모의 연성 개폐식 지붕구조물은 재료의 경량화로 적은 구동력으로도 개폐를 운행할 수 있는 장점을 가지고 있어 많이 적용되고 있다.



〈Fig. 1〉 Retractable roof in Lavis, Italy

여러 가지 구동장치 가운데 트롤리는 막이 열리는 과정에서 구조케이블을 관통하여 이동하면서 막을 주차지점까지 전달하는 역할을 하며, 막이 완전히 닫혔을 경우 막에 가해지는 다양한 하중을 구조케이블에 전달한다. 구조케이블과 트롤리는 특정한 마찰력을 통해 하중의 전달 뿐만 아니라 구조물을 구동하는 역할을 동시에 한다. 따라서 구조적인 측면에서 마찰력을 통한 트롤리 자체의 구조적인 거동을 파악하는 것은 중요한 의미를 가진다. 또한 과다 혹은 과소하지 않은 적절한 마찰력의 확보를 파악하는 것은 추후 연구에 이루어질 구동성능의 파악에 매우 큰 영향을 미친다.

본 논문에서는 우선 연성 개폐지붕이 완전히 닫혀있는 상태를 가정하여 수직하중을 증분함으로써 트롤리의 구조적인 거동을 파악하였다. 무엇보다 다양한 마찰계수¹⁾ 및 재료적인 물성치를 고려하기 위하여 본 논문에서 제시한 트롤리 프로토타입에 스틸 케이블과 접하는 내부재료로써 Glass Fiber Reinforced Plastic(GFRP, E-glass/Epoxy)³⁾, Titanium alloy(Ti-6Al-4V), Aluminum alloy(6061-T6) 그리고

* 주저자, 한국기술교육대학교 건축공학부 연구원, 공학석사
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education
** 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education
*** 서울시립대학교 건축학부, 석사과정
School of Arch. University of Seoul
**** 교신저자, 정회원, 서울시립대학교 건축학부 부교수, 공학박사
School of Arch. University of Seoul
Tel: 02-6490-2785 Fax: 02-6490-2749
E-mail: kj.hwang@uos.ac.kr

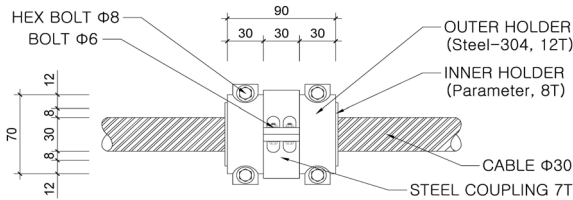
Steel(stainless austenitic 304)의 실제적인 재료를 선택하였다. 정확한 3차원 구조 시뮬레이션을 위해 상용프로그램인 ANSYS를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

2. 트롤리 프로토타입의 디테일

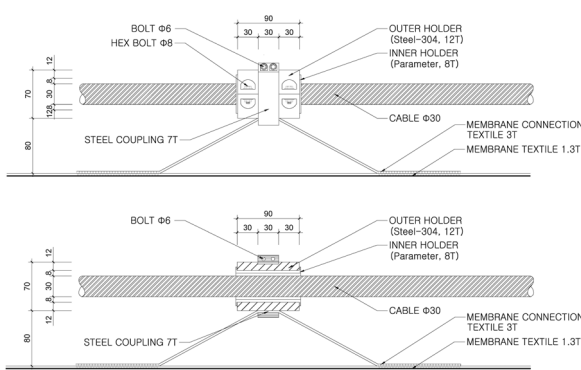


〈Fig. 2〉 Trolley device in the retractable roof Amphitheatre Lavis

2012년 독일의 Kugel + Rein, Architect and engineer사에서 설계한 이탈리아 라비스 노천극장의 중소규모 연성개폐식 지붕을 사례로 분석하였다. 개폐식 지붕의 길이는 21m이며 7개의 원통형 트롤리 장치가 사용되었다.



〈Fig. 3〉 Top view of the trolley plan

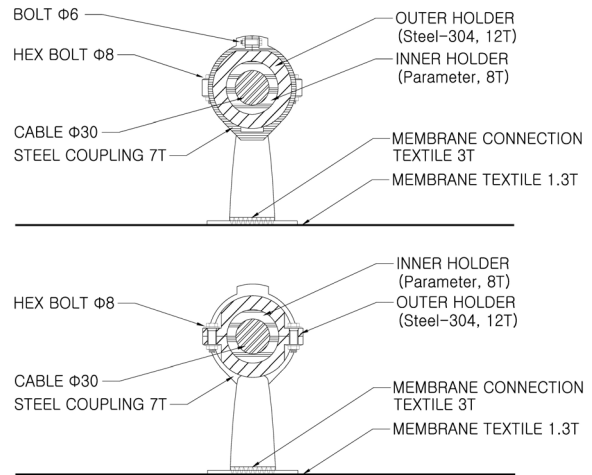


〈Fig. 4〉 Longitudinal elevation and section view of the trolley plan

사례분석을 통하여 트롤리 장치를 재해석해서 설계한 케이블 - Inner holder - Outer holder의 체결 및 조립을 계획한 도면은 <Fig. 3>, <Fig. 4>이다.

볼트로 각 부재들이 체결되며 케이블과 Outer holder의 재료는 일반 강재로 계획하였고, 그 사이에서 완충재 역할을 하는 Inner holder의 재료를 독립변수로 계획하였다.

각 부재의 두께는 케이블 30mm, Inner holder 8mm, Outer holder 12mm로 계획되었다. Steel coupling은 7mm의 두께로 막과 트롤리가 일체화되도록 체결해주는 부재이다. <Fig. 5>에서 보여주고 있다.



〈Fig. 5〉 Cross section view of the trolley connection plan

3. 수치해석 개요

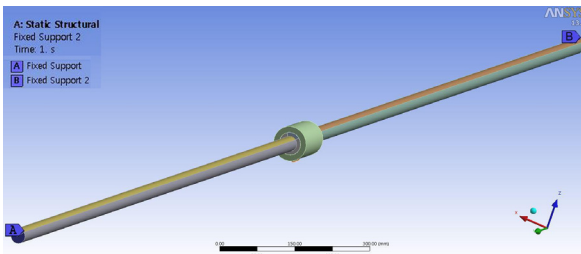
트롤리 장치 설계도면을 기반으로 3차원 구조 시뮬레이션을 위해 상용프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 수치해석을 수행하기 위해 독립변수인 Inner holder에 적용되는 재료적 물성치를 정리한 자료는 <Table 1>로 정리되었다.

전단탄성계수는 ANSYS에서 탄성계수와 프와송비를 입력할 경우 자동으로 산출되는 수치를 사용하였다. 본 실험은 막이 단혔을 경우를 가정하여 진행하였기 때문에 마찰계수는 정지마찰계수^{2,4)}를 적용하였다.

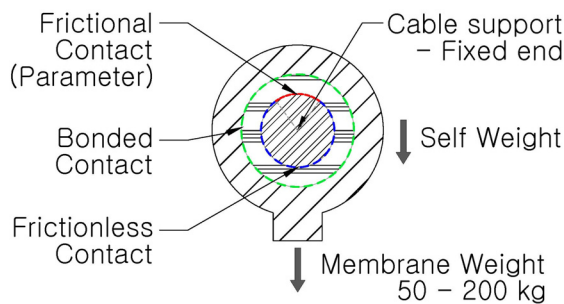
<Table 1> Inner holder mechanical property I

Material	Elastic modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Friction coefficient	Poisson (ν)
GFRP (E-glass/Epoxy)	39	15.2	1080	0.25	0.28
Titanium alloy (Ti-6Al-4V)	100	36.8	910	0.36	0.36
Aluminum alloy (6061-T6)	69	25.9	370	0.47	0.33
Steel (stainless austenitic 304)	210	82	240	0.76	0.28

ANSYS에서 가정한 각 부재들의 접촉조건 및 경계조건을 도식화한 자료는 <Fig. 6>, <Fig. 7>과 같다.



<Fig. 6> Modeling process in ANSYS



<Fig. 7> Schematization plan and contact plan in ANSYS program

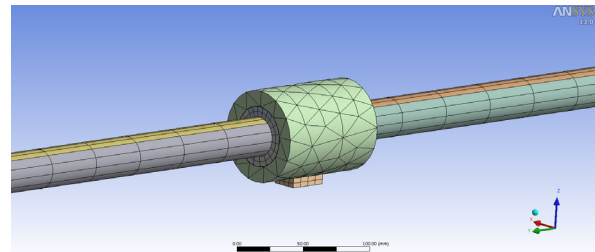
케이블의 길이는 3m이며 Prestress 상태로 가정하여 양 끝단을 고정 상태로 설정했다. 하중은 막의 자중, 지붕활하중, 풍하중, 적설하중을 고려하여 0.5kN(50kg), 1.0kN(100kg), 1.5kN(150kg), 2.0kN(200kg)을 작용하중으로 가정하였다. 또한 각 부재

들의 실질적 크기를 고려한 자중을 적용했다. 재료별 자중은 <Table 2>에서 보여지는 비중량을 적용하여 프로그램에서 고려할 수 있게 하였다.

<Table 2> Inner holder mechanical property II

Material	GFRP	Titanium alloy	Aluminum alloy	Steel
Specific weight (kg/m ³)	2100	4500	2700	7800

케이블과 Inner holder의 마찰면적은 케이블 둘레의 1/5로 가정하였고 <Fig. 7>의 빨간색 점선 부분과 같다. 마찰면적 부분은 마찰계수를 적용한 Frictional contact와 마찰력의 영향을 비교분석하기 위해 Bonded 접촉조건을 고려하였다. 나머지 케이블 둘레의 4/5에 해당하는 부분은 케이블과 Inner holder가 마찰계수가 0이 되도록 Frictionless 접촉조건을 적용하였고, Inner holder와 Outer holder는 일체화되어 거동하도록 Bonded 접촉조건을 적용하였다. <Fig. 8>은 해석을 위한 유한요소로 분할된 상태를 보여주고 있다.



<Fig. 8> Mesh process in ANSYS

4. 수치해석 결과

4.1 다양한 구조적 물성치를 고려한 결과

초기 실험가정은 연성 개폐지붕이 완전히 닫혀있는 상태에서 케이블과 Inner holder들의 접촉 면적이 같고 주어지는 하중이 같을 경우에 $\sigma = P/A$ 식에 대입하면 서로 다른 재료를 적용하더라도 수직압축 응력(Compressive stress)값은 비슷한 양상으로 나올 것으로 예상하였지만 실험결과 Inner holder의 탄성계수에 비례하는 형태로 나타났다.

Bonded(용접)상태에서 하중 50kg이 작용한 경우를 분석한 결과, GFRP(탄성계수 39GPa, 수직압축응력 35.28MPa), Titanium alloy(탄성계수 100GPa, 수직압축응력 47.39MPa), Aluminum alloy(탄성계수 69GPa, 수직압축응력 43.01MPa), Steel(탄성계수 210GPa, 수직압축응력 54.67MPa)로 탄성계수가 증가할수록 수직압축응력 값이 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 $\sigma = E \times \varepsilon$ 식과 연관이 있는 것으로 분석되며, ε 의 경우 처짐이 모든 Inner holder에서 일정하기 때문에 σ 값이 탄성계수의 영향을 받았음을 확인할 수 있었다. 처짐에 대한 값은 일정한 것으로 분석되어 본 실험 결과에서 처짐 값은 제외하였다.

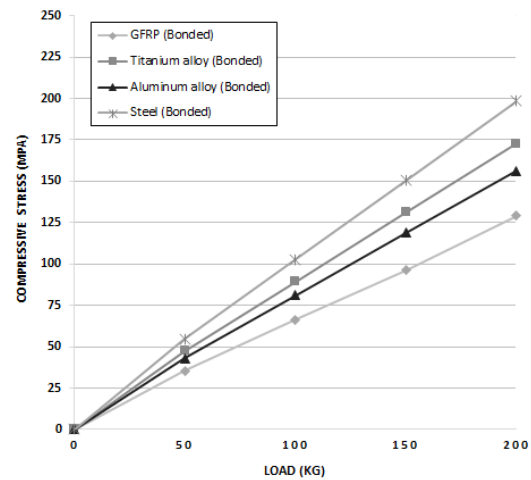
<Table 3> Inner holder experimental value according to different material and load in bonded contact condition

Material	Contact condition	Elastic modulus (GPa)	Load (Kg)	Compressive stress (MPa)	Shear stress (MPa)
GFRP (E-glass/Epoxy)	Bonded	39	50	35.28	15.20
			100	66.37	28.56
			150	96.15	42.41
			200	129.08	56.27
Titanium alloy (Ti-6Al-4V)	Bonded	100	50	47.39	21.70
			100	89.21	40.58
			150	131.03	59.48
Aluminum alloy (6061-T6)	Bonded	69	50	43.01	19.02
			100	81.02	35.68
			150	119.00	52.39
Steel (stainless austenitic 304)	Bonded	210	50	54.67	27.68
			100	102.58	51.81
			150	150.52	75.91
			200	198.46	100.00

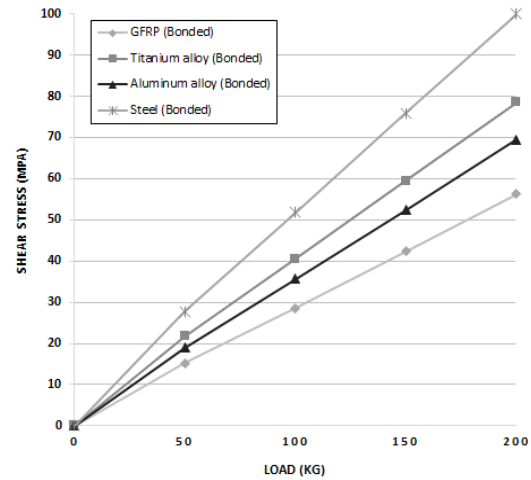
위와 같은 조건에서 전단응력의 경우를 분석하면 전단탄성계수의 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. GFRP(전단탄성계수 15.2GPa, 프와송비 0.28, 전단응력 15.2MPa), Titanium alloy(전단탄성계수 36.8GPa, 프와송비 0.36, 전단응력 21.70MPa), Aluminum alloy(전단탄성계수 25.9GPa, 프와송비 0.33, 전단응력 19.02MPa), Steel(전단탄성계수 82GPa, 프와송비 0.28, 전단응력 27.58MPa)로써 전단탄성계수가 증가할수록 전단응력 값이 증가함을

확인할 수 있었다. 이는 전단응력을 계산할 경우 $\tau = V/A$ 경우가 아닌 변형률과 관계된 $\tau = G \times \gamma$ 과 $G = E/2(1+\nu)$ 을 연계하여 전단응력의 경우 전단탄성계수와 프와송비의 영향을 받고 있음을 확인할 수 있었다.

<Table 3>은 위의 분석들을 기반으로 Inner holder에 작용하는 수직하중을 증분함으로써 트롤리의 구조적인 거동을 파악하고자 하였다.



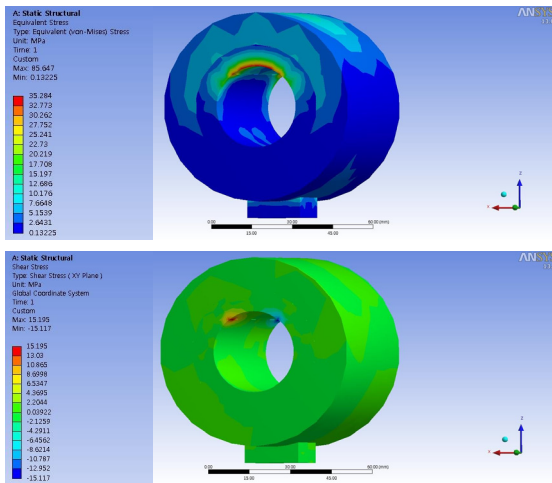
<Fig. 9> Compressive stress-load curves with various inner holder (Bonded)



<Fig. 10> Shear stress-load curves with various inner holder (Bonded)

<Fig. 9>과 <Fig. 10>을 분석해본 결과 작용하중에 따른 수직압축응력(Compressive stress)과 전단응력(Shear stress) 그래프는 하중의 증가비와 비례하는 양상을 보이고 있었다.

탄성계수가 210GPa인 Steel의 경우에는 하중 200Kg에서 응력 198.46MPa으로 분석되었는데, 만약 하중이 더욱 증가할 경우 Steel의 항복강도 240MPa을 초과할 수 있는 것으로 분석되었다. 이는 항복강도 및 인장강도가 주요 고려해야 할 재료적 특성인 것을 나타낸다고 볼 수 있다.



(Fig. 11) Compressive stress and shear stress interpretation result in bonded, inner holder(GFRP) - Load(50Kg)

4.2 다양한 재료적 마찰계수를 고려한 해석 결과

위의 실험들은 케이블과 Inner holder가 마찰되는 접촉면을 Inner holder의 다양한 재료들이 완전히 고정된 상태로 있다고 가정하고 해석한 결과 값이었다. 실질적인 트롤리의 구조적인 거동을 분석하자면 ANSYS에서 마찰 면은 Bonded contact가 아닌 Inner holder에 적용될 재료마다 지니고 있는 고유의 마찰계수를 적용해야 하며 Frictional contact로 가정해야 한다.

케이블과 Inner holder의 접촉조건이 BOND(용접) 접촉상태와 마찰계수가 적용된 Frictional 접촉상태를 비교한 결과, 수직압축응력(Compressive stress) 및 전단응력(Shear stress)이 감소되는 것으로 분석되었다. 하중 50Kg이 작용한 경우에서 <Table 3>과 <Table 4>를 비교해보면 마찰계수가 작을수록 전단응력이 줄어드는 폭이 커졌음을 확인할 수 있었다.

마찰계수가 0.25인 GFRP의 경우 Bonded 접촉상

태에서 15.20MPa, Frictional 접촉상태에서 3.97MPa로 0.261배 줄어들었으며 마찰계수가 0.36인 Titanium alloy의 경우 Bonded 접촉상태에서 21.7MPa, Frictional 접촉상태에서 7.7MPa로 0.355배 줄어들었다. 또한 마찰계수가 0.47인 Aluminum alloy의 경우 Bonded 접촉상태에서 19.02MPa, Frictional 접촉상태에서 9.24MPa 0.486배 줄어들었다. 4가지 재료 중 마찰계수가 0.76으로 가장 큰 Steel의 경우 Bonded 접촉상태에서 27.68MPa, Frictional 접촉상태에서 21.56MPa로 0.779배로 전단응력 감소폭이 가장 작았다. 이는 ' $\tau = G \times \gamma$ '에서 γ 과의 관계로 분석된다. 마찰계수가 커질수록 마찰력이 증가하게 되어 케이블과 접촉된 Inner holder의 변형률이 늘어나게 되며, 이는 전단응력의 증가로 나타나게 된 것으로 분석된다.

(Table 4) Inner holder experimental value according to different material and load in frictional contact condition

Material	Friction coefficient	Elastic modulus (GPa)	Load (Kg)	Compressive stress (MPa)	Shear stress (MPa)
GFRP (E-glass/Epoxy)	0.25	39	50	32.23	3.97
			100	60.01	7.37
			150	84.64	9.50
			200	109.28	11.58
Titanium alloy (Ti-6Al-4V)	0.36	100	50	44.77	7.70
			100	84.63	15.22
			150	120.26	22.59
			200	156.29	27.93
Aluminum alloy (6061-T6)	0.47	69	50	42.17	9.24
			100	77.87	18.34
			150	113.15	26.71
			200	146.64	31.80
Steel (stainless austenitic 304)	0.76	210	50	66.57	21.56
			100	124.07	39.77
			150	181.62	57.96
			200	238.41	75.53

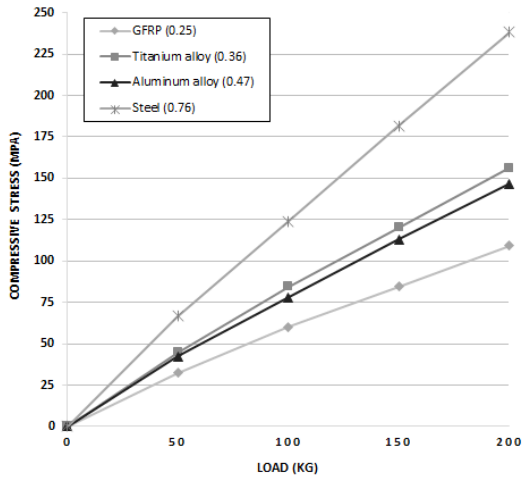
수직압축응력의 경우를 분석한 결과 마찰계수가 0.5 이하인 재료들에 미치는 영향이 미미한 것으로 보인다. 하지만 마찰계수가 0.76인 Steel의 경우에는 응력이 오히려 증가한 것으로 분석되었다.

<Fig. 12>를 분석해 본 결과 작용하중에 따른 수직압축응력 그래프는 하중의 증가비와 비례하는 양

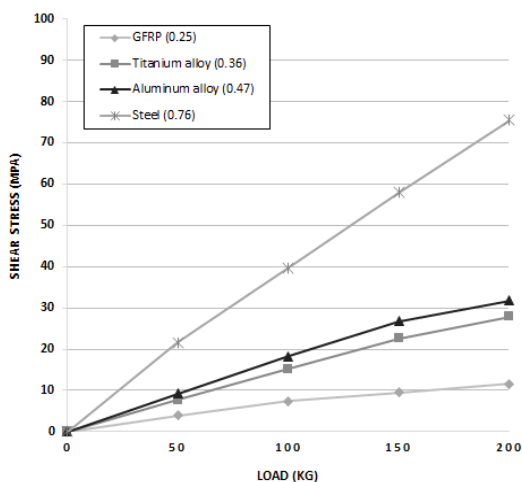
상을 보이지만 Steel의 경우에는 다른 재료들보다도 증가 폭이 큰 것을 알 수 있었다.

<Fig. 13>은 전단응력 그래프로 이번에 분석된 재료의 해석 중에서 가장 크게 구별되는 양상을 보였다. GFRP의 경우 200Kg까지 하중을 가하여도 전단응력은 12MPa이하로 Titanium alloy, Aluminum alloy에 100Kg, Steel에 50kg의 하중을 가한 결과 값보다 낮게 산출되었다.

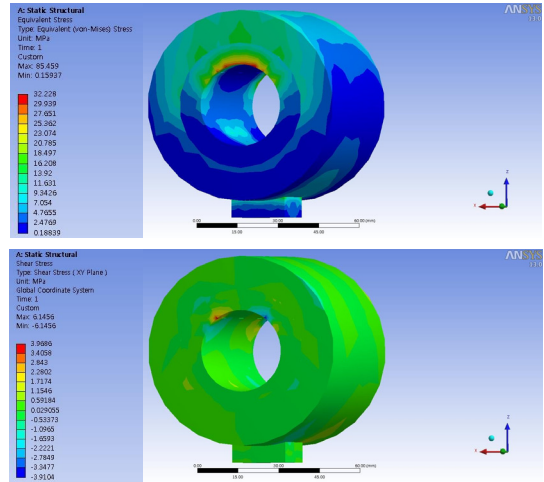
<Fig. 11>과 <Fig. 14>를 비교하면 Bonded 상태에서 집중적으로 걸리던 응력들이 Frictional 상태에서는 분산되는 형태를 보이고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 수직압축응력과 전단응력의 집중현상을 감소시키는 양상으로 나타났다.



<Fig. 12> Compressive stress-load curves with various inner holder (Frictional contact)



<Fig. 13> Shear stress-load curves with various inner holder (Frictional contact)



<Fig. 14> Compressive stress and shear stress interpretation result in frictional contact, inner holder (GFRP) - Load (50Kg)

5. 결론

1) 막이 단혔을 경우 다양한 재료의 마찰계수를 고려한 수치해석을 수행한 결과, Steel이 다른 재료에 비해 수직압축응력이 크면서 항복강도에 빠르게 도달함을 예측할 수 있다.

2) Inner holder의 마찰계수 0.5이하를 유지한다면 Inner holder가 부담하게 되는 전단응력은 절반 이하로 줄어들게 되어 구동성능향상에 기여할 것으로 판단되므로 향후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(16AUDP-B100343-02)에 의해 수행되었습니다.

This research was supported by a grant(16AUDP-B100343-02) from Architecture & Urban Development Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

References

1. ASM handbook committee(1992), Friction, L-lubrication, and Wear Technology, ASM

handbook V.18, pp.112-122.

2. Peter J. Blau, friction science and technology from concepts to applications(2008), CRC Press, pp.143-145.
3. Fédération internationale du béton(2007), FR-P Reinforcement in RC Structures: Technical Report, fib, pp.25-37.
4. H. J. Joo, D. M. Choi, I. S. Oh and M. H. Hong, Friction and Wear Properties of Fiber Reinforced Composite, Korean journal of materials research, V.4 N.7, 1994, pp.733-740.

- Received : November 22, 2016
- Revised : November 30, 2016
- Accepted : December 01, 2016