ISSN 1598-4095 (Print)
ISSN 2287-7401 (Online)
http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2016.16.2.089

Journal of Korean Association for Spatial Structures
Vol. 16, No. 2 (통권 64호), pp.89~96, June, 2016

케이블 트러스 지붕 시스템의 역학적 특성

Mechanical Characteristics of Cable Truss Roof Systems

박 강 근*
Park, Kang-Geun

이 동 우**
Lee, Dong-Woo

Abstract

Cable structures are lightweight structures of flexible type, cable members have only axial stiffness related to tension, they can carry neither bending nor compression. This study is the analysis of cable truss systems are composed of upper and low cables by connecting bracing cables, the structural principle is based on a tensegrity system by using bracing tension members, discontinuous compression members and continuous tension members. A hanging roof of cable truss system is too flexible against vertical loads, most cable members are stabilized by connecting the prestressed upper and lower cable by bracing cables. A cable truss roof system is formed by adding a set of cables with reverse curvature to the suspension cables. With the sets of cables having opposite curvature to each other, cable truss is able to carry vertical load in both upward and downward direction with equal effectiveness, and then a cable truss acts as load bearing elements by the assemble of ridge cables, valley cables and bracing cables. This paper will be shown the geometric non-linear analysis result of cable truss systems with various sag ratio for deflections and tensile forces, the analytical results are compared with the results of other researchers.

Keywords : Cable truss roof system, Tensegrity system, Geometric non-linear analysis

1. 서론

케이블 트러스 지붕 시스템은 축구경기장, 테니스 경기장, 공연장, 전시장 등과 같은 대공간 경량지붕에 주로 사용되는 시스템이다. 케이블 트러스 시스템은 상부 케이블과 하부 케이블이 브레이싱 케이블로 연결되어 지붕의 하중을 지지 할 수 있는 강성을 확보한다. 케이블 스포크 휠 시스템은 외부 압축링, 중앙부 허브, 연속적인 방사형 트러스 케이블로 구성되어 있고, 프리스트레스가 도입된 상부 릿지 케이블과 하부 밸리 케이블이 브레이싱 케이블로 서로 연결하여 구조적 안정성과 강성을 확보한다. 이러한 케이블 시스템은 지붕 스팬이 클수록 다른 지붕 시스템에 비해서 지붕의 중량을 획기적으로 줄일 수 있고, 구조형태의 변화가 자유롭다. 케이블 트러스는 브레이싱 케이블에 의해서 상부 릿지 케이블과 하부 벨리 케이블이 역방향의 곡률과 프리스트레싱에 의해서 강성확보 및 외력에 효과적으로 저항하고 안정된 형태를 유지한다. 트러스 케이블 시스템에서 다양한 케이블 재료는 인장에 강한 역학적 성질과 경량성은 100~300m의 대공간 경량지붕의 실현을 가능하게 해 준다. 본 논문에서는 케이블 트러스 지붕 시스템의 역학적 특성을 파악하기 위해서 정착부가 설치된 케이블의 인장실험을 수행하고, 기하학적 비선형해석을 하여 역학적 거동을 분석한다. 케이블의 강성을 확보하기 위해서 다양한 프리텐션 하중과 지붕의 새그 비에 대한 비선형해석을 수행하여 지붕의 처짐, 케이블의 인장력 등을 분석한다. 기존에 연구된 논문의 해석결과와의 비교를 통하여 비선형 해석방법과 모델링 조건들에 대한 적합성을 분석하고자 한다.

* 교신저자, 정회원, 한국공간구조공학회, 공학박사
Korean Association for Spatial Structures
Tel: 02-2036-1131 Fax: 02-2057-8878
E-mail: pkg6952@naver.com
** 정회원, (주)아이스트 기술연구소, 공학박사
I'ST Co.,Ltd.

2. 강재 케이블의 역학적 특성

2.1 케이블의 기계적 성질

케이블의 일반적인 역학적 특성은 인장강도는 매우 높지만, 휨 강성은 매우 낮다. 케이블은 안정된 강성을 얻기 위해서는 프리스트레스가 필요하다. 케이블은 압축력, 전단력 및 휨에 저항할 수 없고, 대변형을 유발한다. 그러므로 케이블 구조물의 해석 및 설계 시에는 다양한 조건을 고려한 기하학적인 비선형해석이 수행되어야 한다. 케이블의 단부는 인장력을 정착부에 전달하기 위해서 정착철물을 통해서 지지구조에 정착시켜야만 한다. 케이블의 역학적 특성은 축방향의 인장력만으로 힘이 전달되고 강도가 높고 경량이며 유연성이 풍부하다. 케이블의 종류는 구조용 스트랜드 로프, 구조용 스파이럴 로프, 구조용 록코일 로프, 구조용 평행선 스트랜드, 피복 평행선 스트랜드, PC 강연선 등이 있다. 케이블은 소선에 아연도금을 하고 피복이 없는 로프를 사용할 경우에는 부식방지법을 검토해야 한다. PC 강연선은 아연도금을 하지 않고 방청재 및 플라스틱으로 피복하여 방식하는 것을 기본으로 한다. PC 강선을 다시 합쳐 여러 겹으로 꼬아서 만들며 7가닥이나 19가닥 꼬임이 있다. 로프는 여러 개의 강선을 꼬아서 구성한 구조체로 저하중역에서 소선들이 충분히 접촉되어 있지 못하고 개별 코일 스프링의 집합체로 거동하고 있기 때문에 초기신장이 생긴다. 따라서 소선의 수가 많고 로프의 구성이 복잡할수록 초기신장은 커진다. 즉, 스파이럴 로프 및 록 코일 로프에 비해 스트랜드 로프의 초기신장이 크다. 프리스트레칭은 강선의 밀착도를 높이는 효과가 있으므로 초기신장은 프리스트레칭으로 감소시킬 수 있다. 프리스트레칭 하중은 와이어 로프의 파단하중의 40~50%가 적당하다[12].

케이블의 파단강도는 소선 사이에 공극 및 꼬임에 대한 효율을 고려해야 한다. 케이블 재료의 파단하중은 $F_b = A_s \times (1-\alpha) \times \beta \times \sigma_b$에 의해서 구한다. 여기서 A_s는 케이블 재료와 동일한 단면을 갖는 도형의 면적이고 α는 공극계수, β는 꼬임 효율, σ_b는 강선의 공칭 인장강도이다. 케이블 재료의 장기 허용 인장력은 파단하중의 1/3을 표준으로 하고, 단기 허용인장력은 장기 허용인장력에 1.35를 곱한 값으로 한다[12].

〈Table 1〉 Mechanical properties of steel cable[12]

Cable types	Elastic modulus (Gpa)	Creep (%)	Initial elongation (%)
Structural strand rope	140	0.025	0.1-0.2
Structural spiral rope	160	0.015	0.05-0.1
Locked coil rope	160	0.015	0.05-0.1
Parallel strand	200	0.007	0
Prestressing strand	190	0.007	0

〈Table 2〉 Fiber reinforced plastics[13]

	SS	CFRP	GFRP	AFRP
Elastic modulus (Gpa)	190	131	51	53
Tensile strength (Mpa)	1860	2400	1670	1290
Density (t/m3)	7.85	1.56	2.10	1.25
Fatigue resistance	week	strong	middle	strong
Corrosion resistance	week	strong	weak	strong
Damage tolerance	strong	weak	middle	strong

SS: Steel Strand
CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics
GFRP: Glass Fiber Reinforced Plastics
AFRP: Aramid Fiber Reinforced Plastics

케이블 구조에서 각 케이블의 초기장력은 구조물에 필요한 강성을 확보하여 케이블의 장력손실에 따른 불안정 현상이 발생하지 않도록 설정한다. 케이블 구조에서는 필요에 따라 시공방법과 시공순서

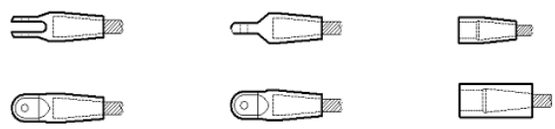
를 고려한 설계를 하여야 한다. 케이블의 정착부는 소켓정착, 압축정착 및 아이 압축정착을 사용하며 케이블 장력을 접합된 케이블에 원활하고 확실히 전달될 수 있도록 하여야 한다. 케이블의 소선은 열처리와 신선가공으로 고강도를 얻기 때문에 파단시의 신장은 구조용 강재에 비해 케이블의 연성은 1/5 정도이다. 또한 다수 소선의 집속체인 케이블은 소선의 결점을 분산하는 효과를 갖고 있고, 각 소선의 변형도가 서로 거의 독립적이므로 파단 크랙의 진전이 자동적으로 저지되는 장점이 있다. 케이블의 종류에 따라서 공극계수(α), 꼬임효율(β), 공칭인장강도는 <Table 3>과 같다. 케이블의 파단강도 계산에서는 케이블 단면의 공극계수, 꼬임 효율에 대한 영향을 고려하여 계산하여야 한다[12].

〈Table 3〉 Nominal tensile strength[12]

Cable types	α	β	Nominal strength σ_b(Mpa)
Strand rope	0.39	0.87	1,670
CFRC strand	0.34	0.83	1,670
Spiral rope	0.24	0.88	1,670
Locked coil rope	0.18	0.90	1,470
Parallel strand	0.10	1.00	1,770
Nongrout parallel	0.19	1.00	1,570
PC strand (7)	0.23	1.00	1,860
PC strand (19)	0.16	1.00	1,810

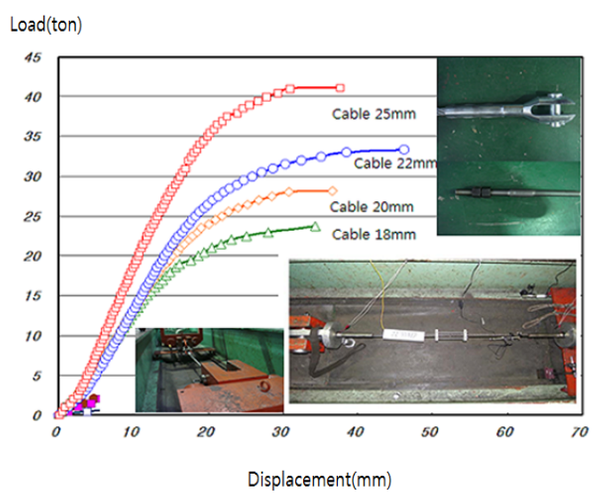
2.2 강재 케이블의 인장시험

케이블의 단부는 케이블이 축력만을 전달하는 특성을 고려하여 구조물에 정착시킬 필요가 있다. 단부의 정착물에는 다양한 종류가 있지만 케이블의 파단하중을 보증하는 마찰형 정착, 압착형 정착, 쐐기형 정착으로 구분할 수 있다. 정착철물은 케이블 파단하중의 95~100% 정도가 보장 되어야 한다. 마찰형 정착단부는 정착철물의 내부에 케이블의 소선을 벌려, 아연-동 등의 합금을 녹여 넣어 면압과 마찰력에 의해 힘이 전달된다. <Fig. 2>는 케이블의 한쪽에는 마찰형 소켓접합, 다른 한쪽은 압착형 웨지접합을 하여 인장시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. <Fig. 3>은 다양한 재료에 대한 응력-변형도 곡선을 비교한 것이다.

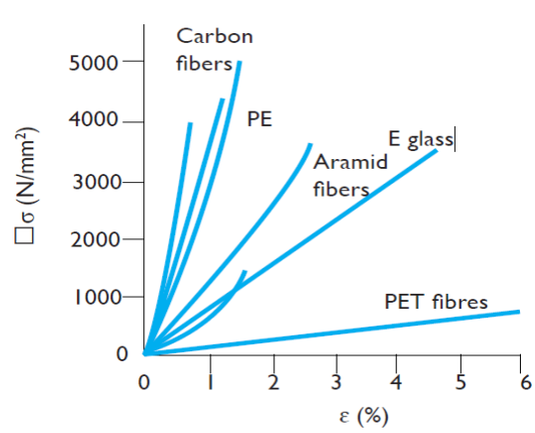


(a) Open (b) Closed (c) Bearing

〈Fig. 1〉 Socket types[12]



〈Fig. 2〉 Load-deflection curve of cables

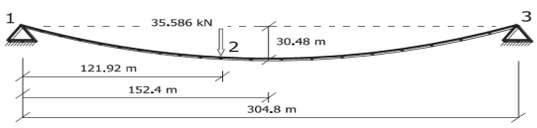


〈Fig. 3〉 Comparison of stress-strain relationships for various material[13]

3. 케이블 트러스의 역학적 특성

3.1 케이블의 비선형해석

<Fig. 4>는 304.8m의 케이블에 집중하중이 작용하는 해석모델로 자중에 의해서 생기는 세그는 중앙부에서 30.48m이다. 기존의 연구결과와 비교하였고, 프리텐션의 크기, 새그 비에 따른 케이블의 역학적 거동특성을 분석하였다.



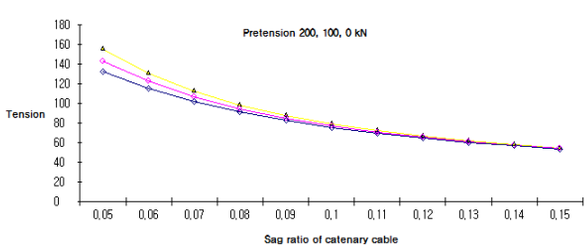
〈Fig. 4〉 Isolated cables under concentrated load[7)]

〈Table 4〉 Initial properties of isolated cable

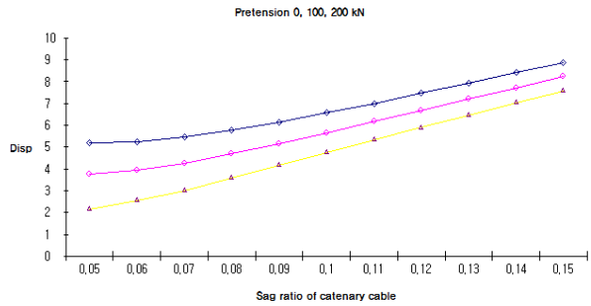
Item	Data
Section area	548.4 mm^2
Elastic modulus	131000.0 Mpa
Center sag	30.48m
Cable span	304.8m
Nodal load	35.586kN

〈Table 5〉 Comparison of deflection[7)]

Researcher	Types	Deflection(m)
O'Brien[1]	catenary	-5.627
Jayaraman[2]	straight	-5.471
Jayaraman[2]	catenary	-5.626
Tibert[3]	catenary	-5.626
Andreu[4]	catenary	-5.626
Y.B.Yang[5]	catenary	-5.625
Thai[6]	catenary	-5.626
M.Salehi[7]	catenary	-5.626
Present	catenary	-5.655



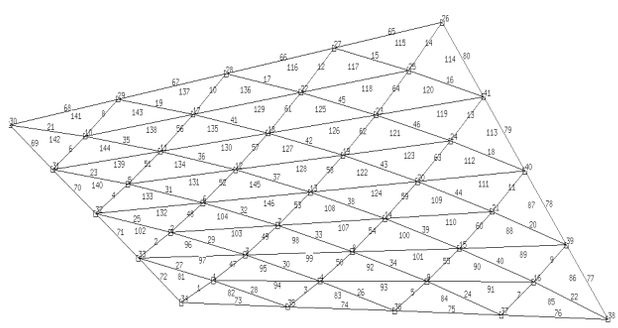
〈Fig. 5〉 Tension(kN) by pretension 200, 100, 0kN



〈Fig. 6〉 Displacements(m) by pretension 0, 100, 200kN

3.2 케이블 네트구조의 비선형해석

<Fig. 7>의 HP 케이블 네트 구조물에 대한 기하학적 비선형 해석에서는 기존의 Energy method 연구결과와 비교하였다. 그리고 케이블 네트의 비선형해석의 결과와 유리섬유 막재와 케이블을 동시에 모델링한 비선형해석 결과를 비교한다. HP 지붕의 유한요소 메쉬는 80개의 케이블 요소와 41개의 절점으로 모델링 되었다[8-10)].



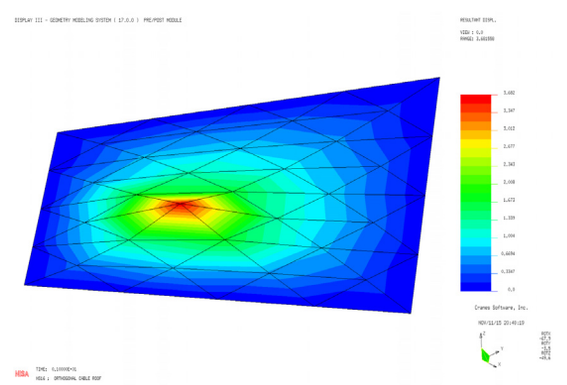
〈Fig. 7〉 An orthogonal cable net with a hyperbolic parabolic shape and subjected to point loads

〈Table 6〉 Initial properties of HP cable roof

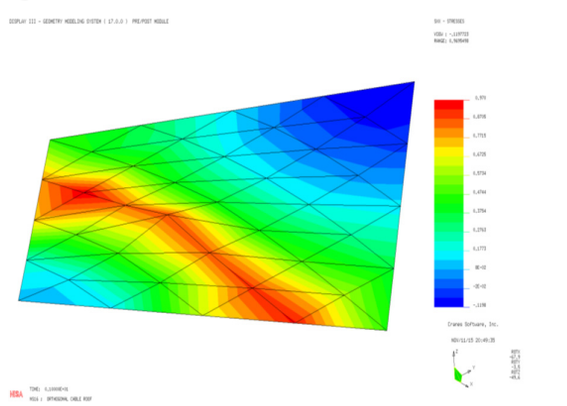
Item		Data
Cable area		0.0006452 m^2
Elastic modulus		165.54 GN/m^2
Span		97.52m x 97.52m
Height		6.096m
HP equation		$Z = 0.00011906 (X^2 - Y^2) + 3.048$
Nodal load(kN)	7	Fy=44.5, Fz=66.75
	1~6	Fz=4.45
	8~25	Fz=4.45

〈Table 7〉 Comparison of HP cable roof[8),9)]

Node number	Vertical deflections(m)		
	Present	Energy method	Cable+ membrane
34	0.000	0.000	0.000
1	0.133	0.134	0.126
3	0.145	0.418	0.407
7	1.138	1.144	1.114
13	0.506	0.509	0.497
19	0.291	0.293	0.286
23	0.169	0.171	0.167
25	0.067	0.068	0.067



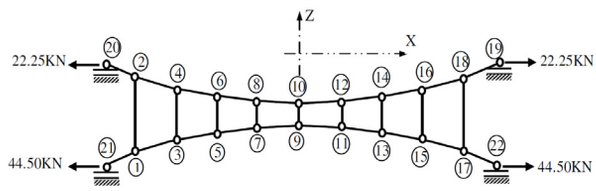
〈Fig. 8〉 Deformation contour of HP cable roof



〈Fig. 9〉 Stress contour of HP cable roof

3.3 케이블 트러스의 기하학적 비선형해석

프리텐션을 받는 대표적인 케이블 트러스 구조에 대한 기하학적 비선형해석을 수행하여 기존의 연구와 비교하였다. <Fig. 10>의 하중은 지점에 수평으로 작용하고, 상부 베어링 케이블에는 22.25 kN, 하부 다운 케이블에는 44.50kN의 프리스트레스 하중을 적용시켰다. 지점에서의 프리텐션 하중이 작용할 때 각 케이블에 작용하는 내력을 분석하였다[9)].



〈Fig. 10〉 Nonlinear analysis model of cable truss to prestress loading application

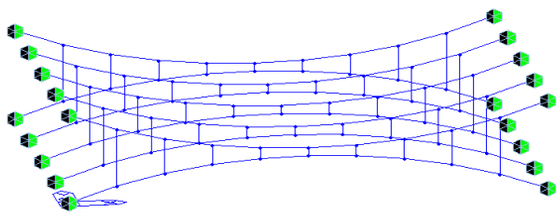
〈Table 8〉 Properties of cable truss

Item	Data
Area of load bearing cable	0.00129 m^2
Area of down valley cable	0.000645 m^2
Area of hanger cable	0.0000645 m^2
Elastic modulus	165.54 GN/m^2

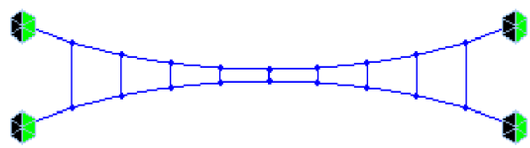
〈Table 9〉 Comparison of axial forces

Element	Axial forces(kN)	
	Nuhoglu[9]	Present
20-2	23.6	25.1
2-4	23.1	22.6
4-6	22.6	22.6
6-8	22.4	22.5
8-10	22.2	22.4
21-1	45.2	46.0
1-3	45.9	44.5
3-5	44.7	44.5
5-7	44.5	44.5
7-9	44.5	44.4

<Figs. 11-15>의 케이블 트러스는 상부 릿지 케이블과 하부 벨리 케이블이 수직 브레이싱 케이블로 연결되어 있다. 이러한 케이블 보는 새그 비에 따라서 케이블 내력 및 처짐의 차이가 크다. 새그 비가 0.5, 0.75, 1.0인 경우에 대한 케이블 트러스 보의 처짐, 인장력의 크기 등을 분석하였다. 하중은 하부 벨리 케이블의 절점에 25kN의 하중을 적용하였다. 하부 벨리 케이블에 연직하중이 작용하는 경우에는 브레이싱 케이블을 통하여 상부 릿지 케이블에 인장력이 생기게 하고 역방향 곡률과 프리텐션력에 의해서 필요한 강성을 확보하여 구조물의 안정성을 확보한다.



〈Fig. 11〉 Cable truss beam roof (span=50m)

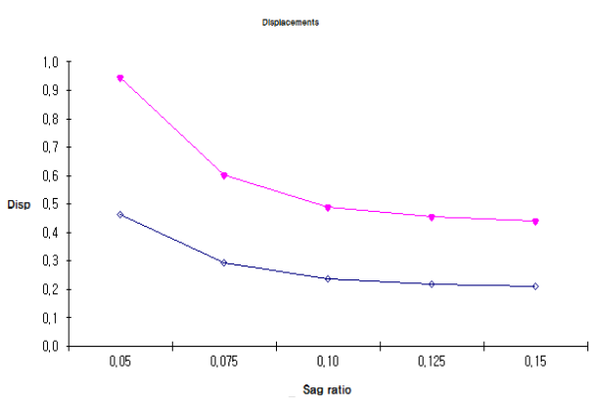


〈Fig. 12〉 Isolated cable truss beam(span=50m)

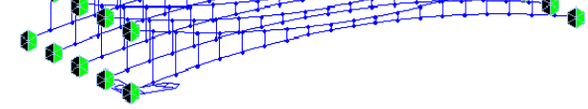
〈Table 10〉 Nonlinear results of cable beam subjected point load at valley cable

Sag ratio	Deflection(m)	Tension(kN)
0.150	0.209	251
0.125	0.219	275
0.100	0.237	321
0.075	0.294	403
0.050	0.462	540

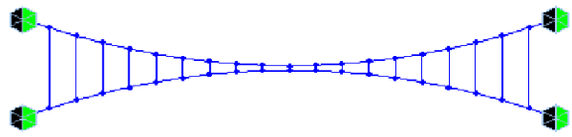
Cable beam span: 50m
Ridge cable: 36mm(pretension 100kN)
Valley cable: 25mm(pretension 70kN)
Bracing cable: 12mm(pretension 0kN)
Point loads: 25kN(only valley cable)
Elastic modulus: 190 Gpa



〈Fig. 13〉 Displacement(m) of isolated cable beam (span=50, 100m)



〈Fig. 14〉 Cable truss beam roof with tensile hangers (span=100m)

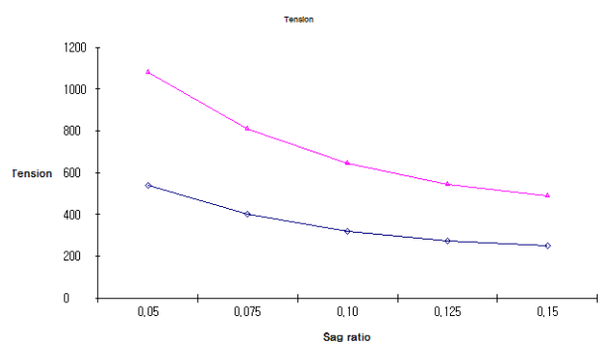


〈Fig. 15〉 Isolated cable truss beam (span=100m)

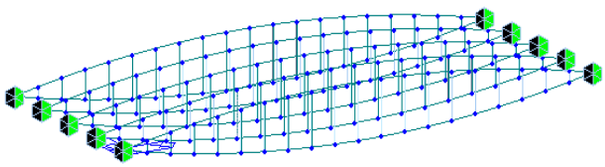
〈Table 11〉 Nonlinear results of cable beam subjected point load at valley cable

Sag ratio	Deflection(m)	Tension(kN)
0.150	0.442	487
0.125	0.454	546
0.100	0.488	646
0.075	0.602	810
0.050	0.944	1079

Cable beam span: 100m
Ridge cable: 50mm(pretension 200kN)
Valley cable: 42mm(pretension 100kN)
Bracing cable: 16mm(pretension 0kN)
Point loads: 25kN(only valley cable)
Elastic modulus: 190 Gpa



〈Fig. 16〉 Tensile forces(kN) of isolated cable beam (span=50, 100m)

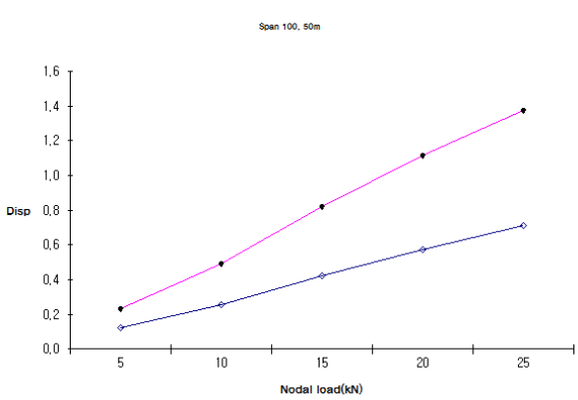


〈Fig. 17〉 Cable truss beam roof with compression pipe hangers (sag ratio=0.1, span=100m)

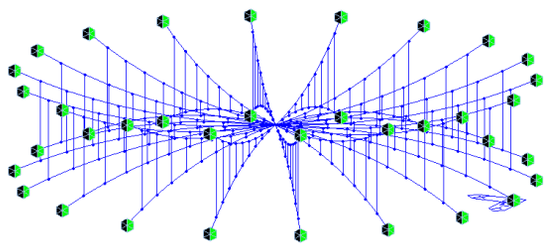
〈Table 12〉 Nonlinear analysis results of cable truss beam with compressive hanger

Span (m)	Load (kN)	Deflection (m)	Tension (kN)
50	5	0.120	161
	10	0.256	233
	15	0.420	327
	20	0.575	416
	25	0.709	499
100	5	0.230	323
	10	0.494	468
	15	0.823	660
	20	1.114	839
	25	1.375	1445

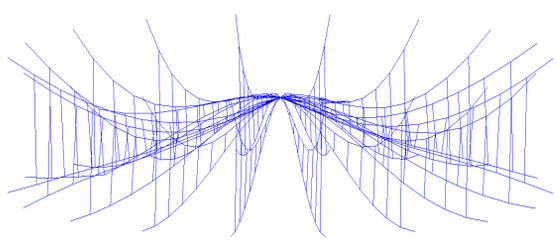
Cable beam span: 50m, 100m
Sag ratio=0.1(max. height:10m, 20m)
Ridge cable: 25mm(50m), 36mm(100m)
Valley cable: 25mm(50m), 36mm(100m)
Bracing member: pipes
Pretension: 50m(100kN), 100m(200kN)
Point loads: all nodes at ridge cable
Elastic modulus: 190 Gpa



〈Fig. 18〉 Displacement(m) of cable truss roof



〈Fig. 19〉 A cable spoke wheel system (radius=25m, w=1.0kN/m2, sag ratio=0.1)

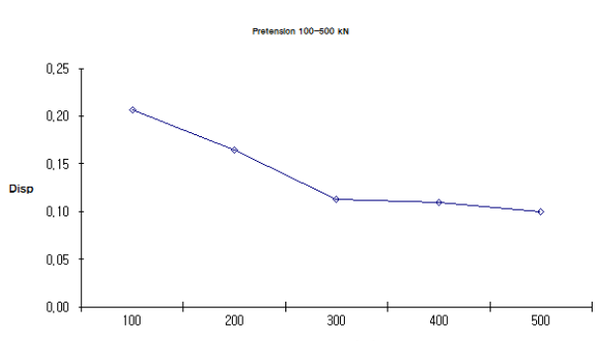


〈Fig. 20〉 Deformation of a spoke wheel system

〈Table 13〉 Nonlinear analysis results of a spoke wheel system

Radius (m)	Pretension (kN)	Deflection (m)	Tension (kN)
25	100	0.207	367
	200	0.165	425
	300	0.113	500
	400	0.110	587
	500	0.100	680

Ridge cable: 36mm
Valley cable: 36mm
Bracing cable: 12mm
Elastic modulus: 190 Gpa



〈Fig. 21〉 Displacement(m) of spoke wheel system

4. 결론

본 연구에서는 케이블 트러스의 역학적 거동특성을 파악하기 위해서 케이블의 인장시험 및 케이블 트러스 구조물의 기하학적 비선형해석을 수행하여 기존의 연구결과와 비교하였다.

1. 케이블 구조물은 케이블의 하중을 지지 구조물에 전달하기 위해서는 케이블 단부에 정착소켓을 설치하여야 한다. 케이블이 파단하기 전에 소켓이 먼저 파단하는 경우도 발생하므로 소켓을 설치한 상태에서의 인장시험이 매우 중요하다고 판단된다.

2. 304.8m의 단일 케이블의 비선형해석에서 기존의 연구결과와 Midas Gen의 처짐 비교에서 Midas Gen이 약 1.0% 정도 크게 나타났다. 그리고 새그비에 의한 케이블의 처짐과 인장력을 분석하였고, 그 결과 새그 비가 0.1보다 큰 경우에는 프리텐션력이 인장력에 미치는 영향이 비교적 작았다.

3. HP 케이블 네트의 비선형해석 결과에서는 케이블만으로 비선형해석 했을 경우와 유리섬유 막재를 같이 모델링했을 경우에 대한 비선형해석의 결과와 비교하였다. Energy method와 NISA 프로그램과의 비선형해석 결과는 매우 유사하게 나타났고, 유리섬유 막재에 대한 재료를 같이 모델링한 경우는 처짐의 결과가 5.5% 정도 작게 나타났다.

4. 케이블 트러스 보의 비선형해석에 새그 비가 0.05인 경우에 0.1보다는 약 2.15~2.21배의 인장력이 증가하였다. 처짐은 새그 비가 0.05인 경우 0.1인 경우보다 2.13~2.21배 증가하였다. 새그 비가 0.1이상이 되면 처짐에 미치는 영향이 작았다. 압축재를 갖는 케이블 보의 해석에서는 처짐과 인장력이 하중의 크기에 비례하여 증가하였다. 스포크 휠 시스템에서 프리텐션력이 300kN 이상일 경우에 처짐의 감소가 작았다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비 지원(15AUDP-B100343-01)에 의해서 수행되었습니다.

References

1. W.T. O'Brien, A.J. Francis, "Cable movements under two-dimensional loads," Journal of Structural Division ASCE 90, pp.89-124, 1964
2. H.B. Jayaraman, W.C. Knudson, "A curved element for the analysis of cable structures," Computer Structures 14, pp.325-333, 1981
3. G. Tibert, "Numerical Analyses of Cable Roof Structures," KTH, 1999
4. A. Andreu, L. Gil, P. Roca, "A new deformable catenary element for the analysis of cable net structures," Computer Structure 84, pp.1882-1890, 2006
5. Y.B Yang, J.Y. Tsay, "Geometric nonlinear analysis of cable structures with a two-node cable element by generalized displacement control method," International Journal of Structural Stability and Dynamics 7, pp.571-588,2007
6. H.T. Thai, S.E. Kim, "Nonlinear static and dynamics analysis of cable structures," Finite Element in Analysis and Design 47, pp.237-246, 2011
7. M. Salehi Ahmad Abad, A. Shooshtari, V. Esmaeili, A. Naghavi Riabi, "Nonlinear analysis of cable structures under general loadings," Finite Element in Analysis and Design 73, pp.11-19, 2013
8. G.R.Monforton, N.M.El-Hakim, "Analysis of Truss-cable Structures," Computer & Structures 11, 327-335, 1980
9. Ayhan Nuhoglu, "Nonlinear analysis of cable systems with point based iterative procedure," Scientific Research and Essays Vol 6, pp.1186-1199, 2011
10. NISA Program, Crane Software, 2015
11. Midas Gen Program, 2015
12. Design Standard of Cable Structures, Korea Association for Spatial Structures, 2009
13. J. Yerbury,"Carbon Fiber Reinforced Polymer truss, cable and plates," Delf University Technology, 2015

- Received : March 23, 2016
- Revised : April 26, 2016
- Accepted : April 26, 2016