

하중법을 이용한 케이블 구조물의 변위제어기법에 관한 연구

Displacement Control Technique of Pre-stressable Cable Structures by Force Method

손 수 덕*
Shon, Su-Deok

Alan SK Kwan**

이 승 재***
Lee, Seung-Jae

요 약

케이블 구조물은 비교적 가볍고 넓은 공간의 형성이 쉬우나 유연한 특징으로 인해 형상의 제어가 매우 민감하다. 이런 구조물은 여러 이유에서 형상의 보정이 필요하며, 특히 부재 제어량과 어떠한 부재를 제어해야 하는가는 많은 연구자들이 고심하고 있는 문제이다. 따라서 본 논문의 목적은 하중법(Force Method)을 이용해서 형상조절을 위한 변위 제어 기법을 연구하는 것이다. 논문은 2장에서는 제어 방정식을 설명하고, 3장에서는 단순 케이블 넷 모델을 이용하여 동시 및 순차제어를 고려해 해석을 수행하고 결과를 고찰한다. 4장에서는 보다 더 복잡한 케이블 돔 구조물에 적용하여 가장 유용한 부재에 대해서 논의 하고, 5장에서 결과를 요약한다.

Abstract

A cable structures have the advantage that cover a large space without column but it is very sensitive to deal with shape control because of its flexibility. Especially, location of control member and needed elongation of member are important things. Therefore, the purpose of this paper is studied on displacement control technique for pre-stressed cable structures by force method considering order of control. The layout of this paper is as follows. Firstly, in section 2, the control technique by force method for cable structures is given. Secondly, section 3 briefly introduces simple cable net in order to apply control technique considering ordering of actuator. Finally, more complex example for effective member and the conclusion are in section 4 and 5, respectively.

키워드 : 형상조정, 변위제어, 하중법, 케이블 구조물, 의사역행렬, 순차제어

Keywords : Shape adjustment, Displacement control, Force method, Cable structures, Pseudo inverse matrix, Step-by-step control

1. 서 론

제어 공학의 한 지류라 표현할 수 있는 형상 제어 분야는 우주 안테나와 같은 정밀한 형상을 요구하는 구조물이나 다양한 내 외적 조건에 적응하고 반응할 수 있는 스마트 구조물 또는 케이블 넷과 같은 연성 대공간 구조물의 설계에 있어서 매우 중요한 역할을

한다. 특히, 절점의 위치를 통해서 정의되는 형상은 매우 정교해진 제작과정을 거친다 하더라도 재료의 초기 불완전성 즉, 제작 오차, 열 변형, 예상치 못한 하중이나 프리스트레스 등으로 인해 원하지 않는 왜곡된 형상의 결과물을 낳게 되며, 기하학적 정밀도를 유지해야 하는 구조물에 대해서는 형상 제어를 통한 절점의 위치 보정이 필수적인 과정이다.

우주 안테나나 대공간 연성 케이블 등의 구조물은, 절점의 위치 보정 즉, 형상의 교정은 일반적으로 부재의 길이 조정을 통해서 제어한다는 동일한 특성을 가지고 있다. 비교적 쉬운 제어라 할지라도 제어

* 한국기술교육대학교, 연구교수

** School of Engineering, Cardiff Univ., Lecturer

*** 교신저자, 한국기술교육대학교, 건축공학부 교수

Tel: 041-560-1334 Fax: 041-560-1224

E-mail : leeseung@kut.ac.kr

순서나 규모 그리고 정밀도에 따라서 필요로 하는 제어의 조건은 매우 까다롭다. 특히 케이블 넷이나 돔 구조물과 같은 구조물은 시공 중이나 시공 후에도 장력의 이완으로 인한 형상의 보정은 매우 중요하며, 형상을 유지하기 위한 케이블의 조정 방법을 고안하는 것은 구조물의 완성도나 유지보수차원에서 필수적인 사항이다.

대공간 구조물의 형상 제어에 대한 초기 연구는 Haftka & Adelman¹⁾²⁾에 의해서 시작되었다. 이들은 원래 형상에 대한 준정상(quasi-steady) 상태의 변형에서 온도를 이용한 부재 조정의 해석적 과정의 연구와 조정기의 위치에 대해서 경험적 접근방법을 이용한 연구를 수행 하였으며, Irschik³⁾는 이 논문을 인용하여 형상제어의 목적을 적절한 조절 장치를 이용해서 어떤 외부 교란으로 인한 구조물의 변형의 영향을 무효화 하는데 있다고 정의하였다. 이후 Burdisso & Haftka⁴⁾는 준정적(quasi-static) 형상 제어에 관한 효과적인 해석방법에 관해 연구를 하였으며, Furuya & Haftka⁵⁾⁶⁾는 유전자 알고리즘(Genetic algorithms)을 이용하여 부재 제어기기의 최적 위치를 구하고자 하였으며, 제어센서와 제어기의 수에 대해서도 고려하였다. 이와 같은 간접적인 접근방법은 Subramanian & Mohan⁷⁾의 경험적 해법을 이용한 연속 수정 알고리즘에서도 검토되었고, Shea 등⁸⁾도 확률론적 탐색 방법을 이용해 지능형 텐서그리티 구조(intelligent tensegrity)를 개발하는 논문을 발표하였다.

다른 한편으로, You⁹⁾는 트러스/케이블 구조물의 변위를 최소의 프리스트레스 레벨을 유지하며 제어할 수 있는 직접적인 방법에 대한 연구를 하였으며, 하중법(force method)을 바탕으로 부재의 길이 제어와 변위 사이의 관계식을 유도하였다. Kwan & Pellegrino¹⁰⁾는 비록 형상이나 변위에 대한 제어가 목적은 아니었지만 프리스트레스 상태에서 필요로 하는 내력 패턴을 생성하기 위한 제어기의 설치 위치 및 길이 조절 량을 계산하는 보다 일반적인 방법

을 그의 논문에서 제시하였다.

Irschik 등¹¹⁾은 골조 구조를 대상으로 원래의 설계 형상을 유지하기 위해서 예상되는 하중에 의한 변형이 무효화 또는 적어도 최소화하기 위한 고유변형 분포를 구하는 직접적인 해석 방법을 제시하였으며, 무응력(stress-free)상태의 고유변형(eigen strain)에 대한 개념을 적용하여 외력에 의해 변형을 일으키는 물체의 정적 형상제어(static shape control) 문제를 일반화 시키려고 노력하였다.¹²⁾ Ziegler¹³⁾는 여러 분야에 대한 접근에 관련해서 준정적 형상제어(quasi-static shape control)의 직접적인 해를 구하는 방법에 대해 연구하였고, 얇은 회전셀, 불연속 구조체 등에 적용하여 범위를 확장하였으며, 이 외에도 Nyashin 등¹⁴⁾에 의해서 절점변위와 무응력 고유변형(impotent eigenstrain)과의 명시적 형태의 관계식을 산출하여 형상 제어를 하는 연구가 수행되었다.

국내 연구사례로는 유한요소법에 기반을 둔 케이블 돔 구조물의 시공해석¹⁵⁾¹⁶⁾이 연구되었으나 형상 제어에 대한 연구가 매우 부족한 실정이다. 특히 부재의 제어량과 어떠한 부재를 제어해야 하는가는 문제를 직접적으로 접근하는 방법은 현재에도 많은 연구자들이 고심하고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 특성의 구조물에 대한 형상조절을 위해 하중법을 이용해서 변위를 제어하는 기법을 연구한다. 다른 해석방법에 비해 비교적 직관적인 하중법을 이용하므로 변위법에 비해 쉽게 부재의 신장량을 조절할 수 있다. 본 논문의 구성은 2장에서는 하중법과 부재 조절량을 직접 제어할 수 있는 방정식을 설명하고, 3장에서는 단순 케이블 넷 모델의 정형 및 비정형모델에 대한 제어를 순차적(Step-by-Step)으로 고려하여 해석을 수행한다. 4장에서는 보다 더 복잡한 케이블 돔 구조물에 적용하여 제어에 가장 유용한 부재에 대해서 논의 하고, 5장에서 연구에 대한 결과를 요약한다.

2. 하중법을 이용한 형상제어방정식

하중법은 변위법과는 달리 변위와 내력벡터와의 관계가 비교적 덜 복잡하므로 쉽게 접근이 가능할뿐 더러 구조물을 직관적으로 이해할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 절에서는 하중법을 이용한 구조물의 해석방법에 대해서 설명하고, 형상제어를 위한 변위제어방정식을 의사역행렬(Pseudo-inverse matrix)을 이용하여 유도한다.

외력벡터를 p , 부재의 내력벡터를 t 라 할 때 구조물의 평형방정식은 식(1)과 같고, 이는 외력과 내력의 평형을 의미한다.¹⁷⁾

$$At = p \quad (1)$$

변위벡터 d 와 부재의 변형벡터 e 와의 적합관계는 식(2)과 같다. 여기서 행렬 B 는 A 의 전치행렬이며, 두 행렬은 구조물의 상태에 대해서 구조체의 불안정 및 부정정을 판단할 근거 등 많은 정보를 제공해 준다.¹⁷⁾

$$Bd = e \quad (2)$$

세 번째 관계식으로 식(1)의 평형과 식(2)의 적합조건을 만족하는 구조물은 또한 부재의 내력과 변형의 관계인 식(3)을 만족해야 하며, 여기서 행렬 F 는 일반적으로 유연도 행렬이라 정의다.

$$Ft = e \quad (3)$$

평형방정식을 만족하는 일반해는 비제차방정식을 만족하는 특수해(t_A)와 재차방정식의 일반해로 구성된다. 따라서 비제차방정식을 만족하는 특수해 중 하나는 식(4)과 같고, A^+ 는 의사역행렬이다.

$$t_A = A^+ p \quad (4)$$

여기서 행렬 A 의 영공간을 S 라 하면, 제차방정식의 일반해는 조합계수 α 로 구성되며, 따라서 평형

방정식을 만족하는 일반해는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$t = t_A + S\alpha \quad (5)$$

초기변형을 e_0 라 정의하고 식(5)를 식(3)에 대입하면, 다음과 같은 관계식을 구할 수 있으며, 여기서 α 를 정의하여 구함으로서 구조물을 해석할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} e &= e_0 + Ft \\ &= e_0 + F\{t_A + S\alpha\} \end{aligned} \quad (6)$$

자기평형상태를 나타내는 행렬 S 는 행렬 A 가 행렬 B 의 전치와 같을 때, 좌-영공간(left-nullspace)과 실질적으로 같고, 적합조건을 만족하는 부재의 변형벡터 조합과는 직교한다. 따라서 적합조건은 식(7)과 같이 정의할 수 있다.

$$S^T e = 0 \quad (7)$$

위 식에 식(6)을 대입하고 정리하면 식(8)과 같이 α 를 나타낼 수 있으며, 식(5)에 대입함으로써 구조물의 부재내력을 구할 수 있다.

$$\alpha = - (S^T F S)^{-1} [S^T e_0 + S^T F t_A] \quad (8)$$

여기서 식(8)은 e_0 항과 t_A 항의 합으로 구성되며, 전자는 초기변형에 대한 영향을 의미하고, 후자는 외력의 영향으로 발생하는 변위이다.

변위제어를 위한 방정식을 구성하기 위해서 식(8)을 식(2)에 대입하여 e_0 항에 대해서 정리하고 나머지 항을 d_p 라 하면 식(9)과 같다. 여기서 e_0 항은 제어벡터 e_{adj} 와 초기변형 e_{ini} 으로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} d &= B^+ e = Y e_0 + d_p \\ &= Y\{e_{ini} + e_{adj}\} + d_p \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)의 변위는 구조물의 외력에 대한 항과 부재 변형에 대한 항이며, 위 식의 벡터 d 가 형상을 제어

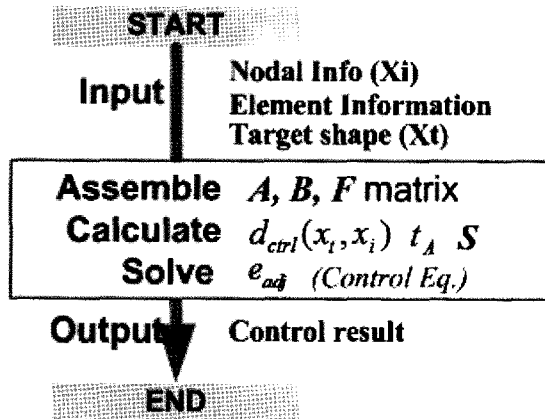
하기 위한 변위이다. 따라서 의사역행렬 이용하여 해를 구하면 다음과 같다.

$$e_{adj} = Y^+ \{d_{ctrl} - Y e_{ini} - d_p\} \quad (10)$$

케이블 구조물의 경우 장력의 도입으로 구조물이 안정 상태에 이르며, 이 과정에서 구조물의 형태에 대한 왜곡의 보정은 위 식의 제어벡터를 구함으로써 형상을 조절할 수 있다. 이때 장력도입에 대한 평형 상태 형상제어의 경우는 d_p 항이 0이 된다.

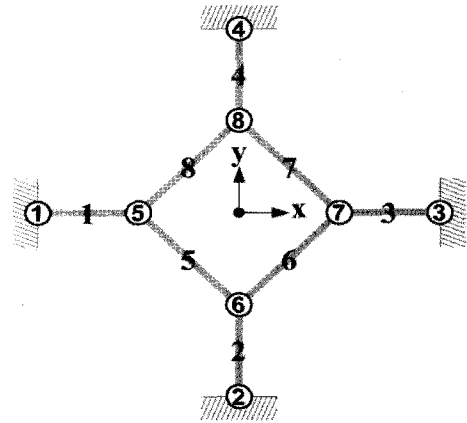
3. 단순 케이블 구조의 형상제어

케이블 구조물의 형상제어란 곧 절점의 변위를 제어하는 것이다. 이것은 안테나나 트러스와 같은 편-절점 구조물이 정의된 위상에서 절점 좌표가 형상을 정의하는 것과 같은 이유이며,¹⁸⁾¹⁹⁾ 앞 장에서 유도된 형상제어방정식 식(10)의 e_{adj} 를 구하여 제어함으로써 원하는 형상을 유지할 수 있게 되며, 해석방법의 흐름도는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 형상제어해석 프로그램 흐름도

본 절에서는 문헌 15에 나오는 간단한 케이블 모델을 이용하여 제어의 방법과 과정을 설명하고 결과를 고찰한다. 문헌은 케이블 구조물의 시공해석에 관한 연구로서 유한요소법을 이용하여 목표장력을 얻는 것을 목적으로 하고 있다.



<그림 2> 단순케이블네트 모델의 형상

제어할 모델의 기본형상은 그림 2와 같은 부재와 절점을 가지는 간단한 사각형 케이블 네트이며, 물 성치는 단면적 1.0cm^2 , 탄성계수 $1.0 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 이다. 각 절점의 좌표는 <표 1>과 같고 부재의 평형을 이루고 있는 초기장력값은 내부 사각링 707.11 kgf, 외부 경계 케이블 1000 kgf 로 채택한다. 그리고 해석대상모델의 형상제어를 위한 제어부재의 집합을 <표 2>과 같이 세 가지 경우로 고려하며, 모든 부재를 제어할 경우(A), 외각부재(B) 또는 내부링 부재만(C)을 제어할 경우로 각각 정의 한다.

<표 1> 단순케이블네트 모델의 절점좌표 (cm)

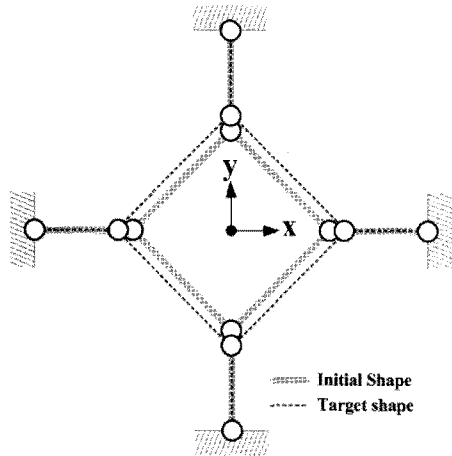
절점	1	2	3	4	5	6	7	8
X	-200	0	200	0	-100	0	100	0
Y	0	-200	0	200	0	-100	0	100

<표 2> 제어부재별 모델케이스

Model	Case A	Case B	Case C
요소	All member	1 2 3 4	5 6 7 8

3.1 정형모델의 변위제어

대상 모델의 목표형상은 기본모델의 형상을 기준으로 사각 링 절점이 외측으로 10cm 만큼 이동한 형태로 <그림 3>과 같고, 최종형상의 절점 좌표는 표 3과 같다. 목표형상이 대칭으로 정형화 되어있기 때문에 해석결과에 대해 쉽게 검증할 수 있다. <그림 3>에서 실선은 초기형상이며, 점선은 목표형상이다.



〈그림 3〉 정형모델의 Target shape

〈표 3〉 목표형상의 절점좌표 (cm)

절점	1	2	3	4	5	6	7	8
X	-200	0	200	0	-110	0	110	0
Y	0	-200	0	200	0	-110	0	110

해석결과에 대한 비교를 위해서 문헌 20의 비선형 해석방법²¹⁾을 이용하여 제어결과를 재해석 하여 검토하였다. 정형모델의 해석결과에 대해서 〈표 4〉에 나타난 e_{adj} 값을 이용하여 재해석을 수행하면, 〈표 5〉와 같이 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있다.

정형모델에서 Case B와 C의 경우에 대해 부재가 순차적(Step-by-step)으로 제어될 경우를 살펴본다. 여기서 각 단계의 해석은 검토할 때와 마찬가지로 문헌 18을 이용하여 해석을 수행하였으며, 해석결과를 〈표 6과 7〉에 나타내었다.

해석방법은 식(10)의 제어방정식을 이용하여 구한 e_{adj} 의 성분 중 가장 큰 부재를 먼저 제어하여 평형점을 찾은 후, 두 번째 부재를 제어하는 순서로 순차적으로 모든 제어대상 부재를 제어하였다.

순차적인 제어는 이를 고려하지 않았을 때의 결과와 비교해 볼 때, 목표형상으로 구조물의 단계별 변위가 진행되며, 평형을 이루기 위한 장력도 비교적 유사한 값으로 진행한다. 그렇지만 제어과정에서 발생하는 오차들은 최종적인 제어가 끝난 후의 결과와 비교해 볼 때 오차가 발생한다.

〈표 4〉 정형모델 해석결과- e_{adj} (kgf, cm)

Case	Initial	e_{adj}	제어 후	문헌 18
A	1234	1000.0	-12.071068	1020.710678
	5678	707.11	12.071068	721.251442
B	1234	1000.0	-24.142136	1141.421356
	5678	707.11	-	807.11
C	1234	1000.0	-	900.0
	5678	707.11	-24.142136	636.396103

〈표 5〉 정형모델의 재해석결과-문헌18 (cm)

절점	Target	Case A	Case B	Case C
5	Dx	-10.0	-10.0	-9.999812
	Dy	0.0	0.0	0.0
6	Dx	0.0	0.0	0.0
	Dy	-10.0	-10.0	-9.999812
7	Dx	10.0	10.0	9.999812
	Dy	0.0	0.0	0.0
8	Dx	0.0	0.0	0.0
	Dy	10.0	10.0	9.999812

〈표 6〉 정형모델의 순차제어결과-장력 (kgf)

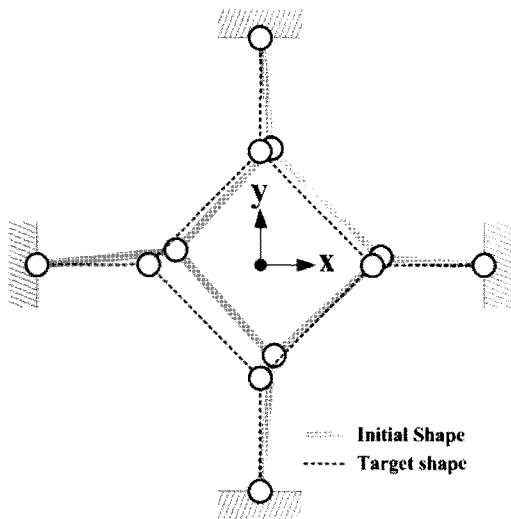
요소	Initial	Case B	Case C
1	1000.0	1141.309717	898.137654
2	1000.0	1140.512682	897.703765
3	1000.0	1138.698007	898.221718
4	1000.0	1138.293460	898.653724
5	707.11	806.884166	634.454755
6	707.11	805.811289	634.533846
7	707.11	804.902548	635.789680
8	707.11	805.969130	635.656241

〈표 7〉 정형모델의 순차제어결과-좌표 (cm)

절점	Target	Case B	Case C
5	X	-110.0	-110.421659
	Y	0.0	-0.087283
6	X	0.0	-0.102860
	Y	-110.0	-110.331588
7	X	110.0	110.003209
	Y	0.0	-0.087504
8	X	0.0	-0.103081
	Y	110.0	109.977085

3.2 비정형모델의 변위제어

문헌 15에 나타난 비정형 모델(그림 4)에 대해서 순차적 형상제어를 다루도록 한다. 정형모델에서 부재의 순차적인 제어의 진행은 단계별 오차가 누적되며, 순조롭게 제어된다 하더라도 단계별 형상의 기하학적인 변화는 오차는 발생시킨다. 다루게 될 모델은 정형모델과 재원이 동일하지만 초기의 모델에서 장력의 유실로 인한 이완된 형상에서 그림 2의 초기형상으로 순차적으로 복원되기 위한 문제를 다루게 되며, 초기장력과 절점좌표는 <표 8, 9>와 같다. 순차제어에서 제어하는 단계마다 기하학적 형상의 변화로 인해 오차가 발생하므로 매 단계형상마다 e_{adj} 의 보정 제어 크기를 구하여 초기 제어량에 누적시켜 해석을 수행하도록 하며, 단계별 보정을 고려하지 않은 결과와 비교해 본다.



<그림 4> 비정형모델의 Target shape

<표 8> 비정형모델의 절점좌표 (cm)

절점	5	6	7	8
X	-78.073	7.8214	104.46	7.1953
Y	4.341	-89.604	3.7161	103.08

<표 9> 비정형모델의 초기장력 (kgf)

요소	1	2	3	4	5	6	7	8
초기장력	820	905	956	972	605	657	690	629

제어해석을 수행한 결과를 <표 10>에 제어량의 순서와 함께 나타내었다. 여기서 e_{adj} 는 초기 비정형 형상을 기반으로 제어방정식의 해를 구한 결과이고, $e_{adj}^{correct}$ 는 각 단계별 평형해석에서 구한 추가 제어량을 누적시킨 결과이다. 이 값을 이용해서 표의 순서(Order 항)에 따라 제어량을 주어 단계별로 평형 해석을 수행하면, <표 11과 12>의 제어형상 결과를 얻는다. e_{adj} 결과에서 볼 때 제어된 형상의 오차는 정형모델에 비해 상당히 크다. 그러나 $e_{adj}^{correct}$ 의 결과는 비교적 e_{adj} 의 값을 이용해 제어할 때보다 목표형상에 더 근사하였고, 순차적 제어과정에서 각 단계별 변형된 형상으로 인해 발생한 제어오차는 제어방정식의 단계별 재해석을 수행하여 누적시킴으로서 제어량을 보정할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 부재의 순차제어는 제어방정식의 단계별 보정을 통해 오차 해소가 가능하며, 각 단계별 변형형상을 고려함으로써 케이블의 형상을 보다 정확하게 제어할 수 있다. 또한 위의 결과에서 제어를 위한 상위 4개의 부재(1, 2, 5, 8)는 효율적인 제어 부재임을 쉽게 판단할 수 있다.

<표 10> 비정형모델의 해석결과- e_{adj} (cm)

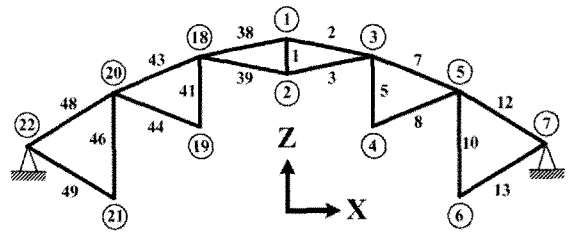
요소	Order	e_{adj}	$e_{adj}^{correct}$
1	1	-22.067572	-41.245541
2	2	-10.922756	-19.538231
3	7	4.312199	0.882150
4	6	2.538837	0.940215
5	3	13.986856	2.317438
6	5	7.058201	1.125734
7	8	2.367958	0.465150
8	4	10.582909	1.664462

<표 11> 비정형모델의 순차제어결과-장력 (kgf)

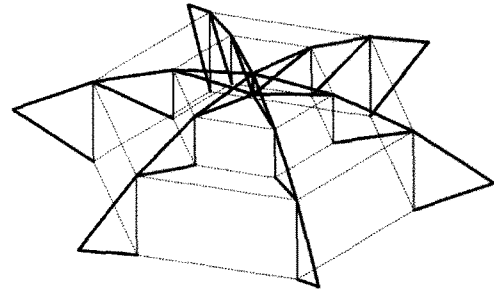
요소	e_{adj} 결과	$e_{adj}^{correct}$ 결과
1	861.781379	982.990436
2	909.216120	986.573135
3	935.435610	990.823979
4	944.588742	990.589743
5	606.962133	694.433480
6	657.305525	699.388489
7	686.132780	702.437484
8	630.281867	697.490801

〈표 12〉 비정형모델의 순제어결과-좌표 (cm)

절점	Target	e_{adj} 결과	$e_{correct}$ 결과
5	X	-100.0	-94.360687
	Y	0.0	1.921831
6	X	0.0	3.853310
	Y	-100.0	-99.538628
7	X	100.0	102.120376
	Y	0.0	2.048218
8	X	0.0	3.981309
	Y	100.0	103.015503



(b) 단면도



(c) 입체도

〈그림 5〉 케이블 돔 모델의 형상

4. 형상제어를 위한 부재선정

형상을 제어하기 위한 효율적인 부재의 선택은 부재 조절량의 결정과 마찬가지로 매우 중요하다. 본 절에서는 케이블 돔 구조물을 이용하여 제어할 때 각 부재의 제어량 크기와 제어방정식의 행렬 Y 의 Rref(Reduced Row Ecolom Form)를 구하여 독립성분의 부재를 함께 살펴봄으로서 효과적인 제어부재에 대해 살펴본다.

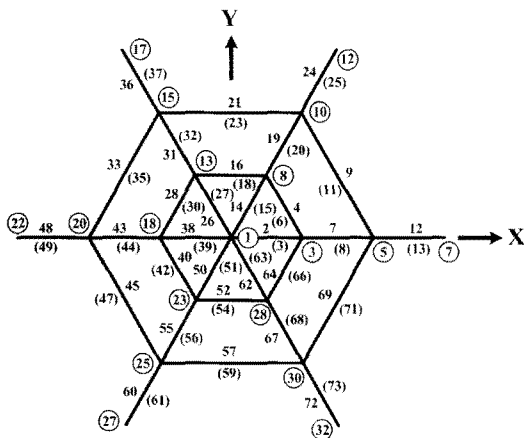
예제 모델은 Geiger 모델로서 문헌 15에 소개되어 있다. 모델의 형상은 〈그림 5〉와 같고, 부재 단면적 및 절점좌표는 〈표13, 14〉와 같다. 여기서 탄성계수 E 는 $1.6 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 이며, 그림에서 하현재는 괄호를 사용하여 부재번호 및 절점번호를 나타내었고, 외곽의 절점 즉, 절점번호 7, 12, 17, 22, 27, 32는 회전단이다.

〈표 13〉 케이블 돔 모델의 부재 단면적 (cm^2)

요소	1	2	3	4	5	6	7
단면적	1.00	0.01	0.01	0.01	1.00	0.02	0.02
요소	8	9	10	11	12	13	
단면적	0.02	0.01	1.00	0.04	0.04	0.04	

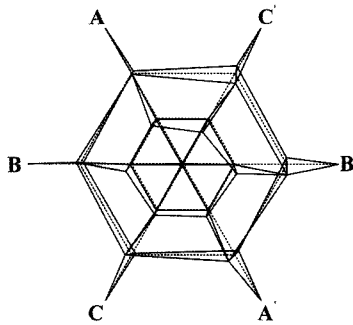
〈표 14〉 케이블 돔 모델의 절점좌표 (cm)

절점	1	2	3	4	5	6	7
X	0.0	0.0	20.0	20.0	40.0	40.0	60.0
Z	21.0	15.0	18.5	4.5	11.5	-11.5	0.0



(a) 평면도

단순케이블 예제의 비정형모델에서와 마찬가지로 장력의 이완으로 인해 발생하는 왜곡된 형상은 〈그림 6〉과 같고, 왜곡된 가상모델의 절점좌표는 〈표 15〉와 같다. 또한 〈그림 6〉에서 점선으로 나타낸 형상은 왜곡되기 전 형상으로 목표형상이다. 그러나 돔 모델의 경우 제어하기 위한 절점은 주로 상부 절점이며 구조물의 중요한 형상이 이에 의해서 결정되어 진다. 따라서 상부절점을 제어하도록 하며, 제어 절점과 제어량은 〈표 17〉과 같다.



실선 : Initial shape 점선 : Target shape
 <그림 6> 케이블 돔의 초기형상과 Target shape

<표 15> 가상모델의 초기절점좌표 (cm)

절점	x	y	z	절점	x	y	z
1	1.13e-4	-8.63e-5	2.09e+1	17	-3.00e+1	5.19e+1	0.00e+0
2	2.25e-4	-1.16e-4	1.49e+1	18	-2.00e+1	-9.27e-5	1.84e+1
3	2.00e+1	-1.04e-4	1.84e+1	19	-1.99e+1	-5.48e-5	4.48e+0
4	1.99e+1	-4.05e-4	4.49e+0	20	-3.99e+1	-5.52e-4	1.14e+1
5	3.99e+1	2.23e-4	1.14e+1	21	-4.00e+1	1.72e-4	-1.15e+1
6	3.99e+1	7.56e-4	-1.15e+1	22	-6.00e+1	0.00e+0	0.00e+0
7	6.00e+1	0.00e+0	0.00e+0	23	-9.99e+0	-1.73e+1	1.84e+1
8	9.99e+0	1.73e+1	1.84e+1	24	-9.99e+0	-1.73e+1	4.48e+0
9	9.99e+0	1.73e+1	4.49e+0	25	-1.99e+1	-3.46e+1	1.14e+1
10	1.99e+1	3.46e+1	1.14e+1	26	-2.00e+1	-3.46e+1	-1.15e+1
11	1.99e+1	3.46e+1	-1.15e+1	27	-3.00e+1	-5.19e+1	0.00e+0
12	3.00e+1	5.19e+1	0.00e+0	28	9.99e+0	-1.73e+1	1.84e+1
13	-9.99e+0	1.73e+1	1.84e+1	29	9.99e+0	-1.73e+1	4.49e+0
14	-9.99e+0	1.73e+1	4.48e+0	31	1.99e+1	-3.46e+1	1.14e+1
15	-1.99e+1	3.46e+1	1.14e+1	31	1.99e+1	-3.46e+1	-1.15e+1
16	-2.00e+1	3.46e+1	-1.15e+1	32	3.00e+1	-5.19e+1	0.00e+0

<표 16> 가상모델의 초기평형장력 (kgf)

요소	장력	요소	장력	요소	장력	요소	장력
1	-1.41e+1	20	4.94e+1	39	1.37e+1	58	-6.15e+1
2	1.91e+1	21	1.37e+1	40	1.41e+1	59	1.06e+2
3	1.37e+1	22	-6.14e+1	41	-1.63e+1	60	1.23e+2
4	1.41e+1	23	1.06e+2	42	4.66e+1	61	1.23e+2
5	-1.63e+1	24	1.23e+2	43	4.93e+1	62	1.90e+1
6	4.66e+1	25	1.23e+2	44	4.94e+1	63	1.37e+1
7	4.94e+1	26	1.91e+1	45	1.38e+1	64	1.41e+1
8	4.94e+1	27	1.37e+1	46	-6.15e+1	65	-1.63e+1
9	1.37e+1	28	1.41e+1	47	1.06e+2	66	4.66e+1
10	-6.14e+1	29	-1.63e+1	48	1.23e+2	67	4.93e+1
11	1.06e+2	30	4.66e+1	49	1.23e+2	68	4.94e+1
12	1.23e+2	31	4.94e+1	50	1.90e+1	69	1.37e+1
13	1.23e+2	32	4.94e+1	51	1.37e+1	70	-6.14e+1
14	1.90e+1	33	1.38e+1	52	1.41e+1	71	1.06e+2
15	1.37e+1	34	-6.15e+1	53	-1.63e+1	72	1.23e+2
16	1.41e+1	35	1.06e+2	54	4.66e+1	73	1.23e+2
17	-1.63e+1	36	1.23e+2	55	4.94e+1		
18	4.66e+1	37	1.23e+2	56	4.94e+1		
19	4.93e+1	38	1.90e+1	57	1.37e+1		

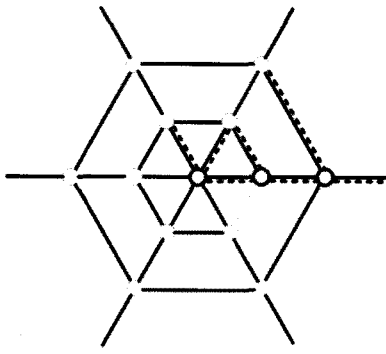
<표 17> 목표형상의 변위제어량 ($\times 10^{-2} cm$)

절점	1	3	5	8	10	13	16
Dx	-0.0113	0.0000	0.4000	0.0400	0.1000	-0.0600	-0.2000
Dy	0.0086	0.0104	-0.0223	0.0510	0.3020	0.0510	0.3020
Dz	1.2000	1.0000	1.1000	1.0000	1.2000	1.0000	1.1000
절점	18	20	23	25	28	30	
Dx	0.0000	-0.3000	-0.0700	-0.2000	0.0300	0.1000	
Dy	0.0093	0.0552	-0.0510	-0.3020	-0.0510	-0.3020	
Dz	0.9000	1.2000	1.0000	1.1000	1.0000	1.2000	

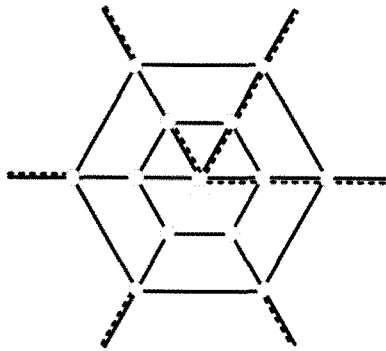
변위 제어에 대한 부재 영향력을 살펴보기 위해서 Rref(Y)를 구하여 독립요소를 구한 결과 총 39개의 부재가 <그림 7>(a)과 같이 채택되었다. 여기서 행렬 Y는 구조물의 모델링에 따라 독립성분의 집합은 달라지지만 공통인자도 또한 존재한다. 따라서 모델링이 행렬 Y의 독립성분을 정의하는데 영향을 주므로 외각 부재들이 먼저 모델링 되도록 재구성하였으며, 결과를 <그림 7>(b)에 나타내었다. 여기서, 실선은 상현재, 점선은 하현재에, 그리고 원은 수직부재에 각각 해당한다. 두 결과에 대해서 공통된 부재를 <그림 7>(c)에 나타내어 비교한 결과, 모두 32개의 부재가 중복되었으며, 그림에서 상부 링과 외각 케이블 들은 대부분 중복되었다.

제어된 절점은 <표 18>에서 보는 바와 같이, 목표 제어량의 약 0.2%~9.5% 오차범위를 보였지만, 전체 구조물의 높이에 대한 절점의 위치오차는 0.0001%~ 0.0046%으로 나타났으므로 형상의 왜곡이 많이 보정되었음을 알 수 있다.

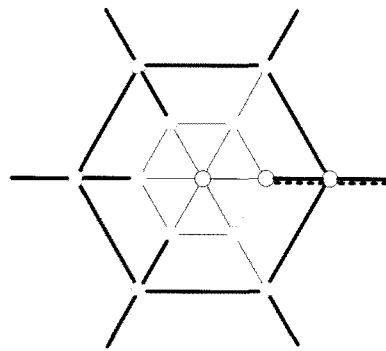
<표 18>에 나타난 변위제어해석결과에서 제어량의 순서에서 가장 큰 값은 9번 부재로 나타났으며, 내림차순으로 독립성분의 수와 동일한 39개의 부재를 선정하여 그림 8에 나타내었다. <그림 7>에서 선정된 부재와 비교하면 상부 외각 링 및 상부 외각의 상현재가 가장 큰 영향을 미치는 결과를 얻을 수 있다. 구조물의 상부절점의 형상제어와 <그림 6>의 왜곡된 형상을 고려해 볼 때, <그림 8>의 공통요소들에 대한 제어 효율성은 당연한 결과로 사료된다.



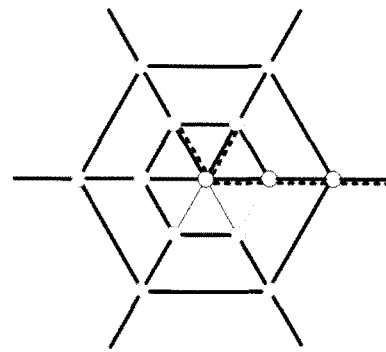
(a) 그림 4에 따른 부재번호 모델링



(b) 외각부재 순서로 부재번호 모델링



(c) a와 b의 결과에 대한 공동 요소
〈그림 7〉 행렬 Y 에 의한 독립성분 부재



〈그림 8〉 표18의 e_{adj} 의 크기에 따른 최대제거부재

〈표 18〉 변위제거 해석결과 e_{adj} ($\times 10^{-3} cm$)

요소	order	e_{adj}	요소	order	e_{adj}	요소	order	e_{adj}
1	72	-0,071	26	55	0,854	51	61	0,386
2	63	0,361	27	64	0,358	52	51	0,999
3	66	-0,305	28	73	0,060	53	56	-0,846
4	71	0,151	29	57	-0,742	54	37	1,780
5	67	-0,280	30	35	1,823	55	26	2,335
6	40	1,733	31	23	2,382	56	29	1,935
7	4	3,445	32	30	1,930	57	8	3,000
8	36	1,790	33	16	2,637	58	47	1,344
9	1	4,308	34	46	1,404	59	20	-2,472
10	43	1,545	35	21	-2,454	60	25	2,343
11	17	-2,531	36	24	2,343	61	14	-2,799
12	27	2,010	37	13	-2,847	62	52	0,966
13	10	-2,960	38	68	0,260	63	69	0,242
14	54	0,867	39	58	-0,582	64	62	0,381
15	65	0,312	40	70	0,171	65	59	-0,503
16	50	0,999	41	53	-0,965	66	39	1,735
17	60	-0,399	42	34	1,825	67	41	1,721
18	38	1,777	43	31	1,840	68	32	1,839
19	42	1,674	44	28	1,930	69	2	3,922
20	33	1,834	45	3	3,593	70	45	1,457
21	9	3,000	46	48	1,316	71	18	-2,517
22	44	1,517	47	22	-2,440	72	7	3,275
23	19	-2,499	48	5	3,375	73	12	-2,889
24	6	3,275	49	15	-2,776			
25	11	-2,937	50	49	1,052			

〈표 19〉 목표형상에 대한 제어결과 ($\times 10^{-2} cm$)

절점	$ x_i - x_i^* $	$ x_i - x_i^* $	목표제어오차 (%)	형상 높이에 대한 오차 (%)
1	1,2001	0,0176	1,462985	0,0008
3	1,0001	0,0918	9,180734	0,0044
5	1,1707	0,0102	0,871203	0,0005
8	1,0021	0,0700	6,986547	0,0033
10	1,2415	0,0095	0,766250	0,0005
13	1,0031	0,0960	9,565745	0,0046
15	1,1581	0,0086	0,739978	0,0004
18	0,9000	0,0732	8,128314	0,0035
20	1,2382	0,0105	0,851217	0,0005
23	1,0037	0,0184	1,836248	0,0009
25	1,1581	0,0066	0,568128	0,0003
28	1,0017	0,0876	8,745714	0,0042
30	1,2415	0,0031	0,246833	0,0001

5. 결 론

케이블과 같은 연성구조물은 비교적 가볍고 최소 곡면원리를 이용하여 보다 더 넓은 공간을 내부 기동 없이 형성 가능하다. 그러나 유연한 특성으로 인해 형상 제어가 비교적 어렵고, 특히 시공 중이나 후에도 형상 보정은 항상 필요하다.

본 논문에서는 이와 같은 특성의 구조물에 대한 형상조절을 목적으로 하중법을 바탕으로 한 형상제어방정식을 유도하고, 단계별 해석에 따른 오차와 제어에 효율적인 부재에 대해서 연구하였다. 하중법을 이용한 제어방정식은 조절을 위한 부재의 제어량을 직접 얻을 수 있는 방법으로 비교적 쉬우면서도 효율적인 결과를 제공한다. 또한 효율적인 제어 부재를 행렬 Y 와 부재 조정량을 통해서 쉽게 결정할 수 있다. 순차적으로 제어할 경우에도 단계별 형상을 고려함으로써 오차를 보정할 수 있으며, 본 논문에서 살펴본 비정형 모델의 결과로 볼 때 해석결과는 목표형상에 거의 일치한다. 더불어서 하중법을 바탕으로 한 형상제어는 안테나와 같은 정밀도를 요구하는 구조물 뿐 아니라 텐서그리터와 같은 구조물의 제어에서도 유용하다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0023674).

또한 이 논문은 한국기술교육대학교 연구연간제 연구지원 프로그램의 일부 지원에 의하여 수행되었음.

- 참고문헌 -

1. Haftka, R.T. and Adelman, H.M., "An analytical investigation of the static shape control of large space structures by applied temperatures," AIAA Journal, Vol 23(3), 1985, pp.450-457.
2. Haftka, R.T. and Adelman, H.M., "Selection of actuator locations for static shape control of large space structures by heuristic integer programming," Computers and Structures, Vol 20(1-3), 1985, pp.575-582.
3. Irschik, H., "A review on static and dynamic shape control of structures by piezoelectric actuation," Engineering Structures, Vol 24(1), 2002, pp.5-11.
4. Burdisso, R.A. and Haftka, R.T., "Statistical analysis of static shape control in space structures," AIAA Journal, Vol 28(8), 1990, pp.1504-1508.
5. Furuya, H. and Haftka, R.T., "Placing actuators on space structures by genetic algorithms and effectiveness indexes", Structural Optimization, Vol 9(2), 1995, pp.69-75.
6. Furuya, H. and Haftka, R.T., "Static shape control of space trusses with partial measurements," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol 32(5), 1995, pp.856-865.
7. Subramanian, G. and Mohan, P. "A fast algorithm for the static shape control of flexible structures," Computers and Structures, Vol 59(3), 1996, pp.485-488.
8. Shea, K., Fest, E. and Smith, I.F.C., "Developing intelligent tensegrity structures with stochastic search," Advanced Engineering Informatics Vol 16(1), 2002, pp.21-40.
9. You, Z., "Displacement control of prestressed structures," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol 144(1-2), 1997, pp.51-59.
10. Kwan, A.S.K. and Pellegrino, S., "Prestressing a space structures," AIAA Journal, Vol 31(10), 1993, pp.1961-1963.
11. Irschik, H., Heuer, R. and Ziegler, F., "Static shape control by applied strains

- without stress," Proceeding European Conference on Spacecraft Structures, 1999, pp.227-231. (접 수 일 자 : 2010년 12월 28일)
12. Irschik, H. and Ziegler, F., "Eigenstrain without stress and static shape control of structures," AIAA Journal, Vol 39(10), 2001, pp.1985-1990. (심사 완료일자 : 2011년 5월 26일)
13. Ziegler, F., "Computational aspects of structural shape control," Computers and Structures, Vol 83, 2005, pp.1191-1204. (게재 확정일자 : 2011년 5월 27일)
14. Nyashin, Y., Lokhov, V. and Ziegler, F., "Stress-free displacement control of structures," Acta Mechanica, Vol 175, 2005, pp.45-56.
15. 김승덕, 정을석, "케이블 돔 구조물의 비선형 시공해석에 관한 연구," 대한건축학회 논문집(구조계), v.20 n.9, 2004, pp.3-12.
16. 정을석, 손수덕, 김승덕, "기하학적 비선형을 고려한 Zetlin형 케이블 돔 구조물의 장력제어 기법에 관한 연구," 한국셀공간구조학회 학술발표회 논문집, v.2 n.1, 2005, pp.116-124.
17. Pellegrino, S., "Structural computations with the SVD of the equilibrium matrix," International Journal of Solids Structures, Vol 30(21), 1993, pp.3025-3035.
18. 손수덕, 김승덕, 강문명, "Flow Truss Dome 구조물의 비대칭 하중모드에 따른 불안정 현상에 관한 연구," 한국공간구조학회 논문집, v.2 n.4, 2002, pp.61-76.
19. 손수덕, 김승덕, 황경주, 강문명, "절점 강성을 고려한 공간 구조물의 비선형 불안정 거동에 관한 연구," 한국공간구조학회 논문집, v.3 n.1, 2003, pp.87-97.
20. Kwan, A.S.K., "A new approach to geometric nonlinearity of cable structures," Computers and Structures, Vol 67, 1998, pp.243-252.
21. 손수덕, 김승덕, 정을석, 전진형, "비선형 형상 탐색 기법에 따른 막구조물의 오차와 수렴성 평가에 관한 연구," 한국공간구조학회 논문집, v.7 n.3, 2007, pp.57-66.