

연성구조물의 시공과정 해석프로그램 개발

On Development of an Analytic Program for Erection Process of Soft Structures



김 승 덕*

*세명대학교 건축공학과 교수

1. 시공해석이란

연성 구조물인 Cable 구조는 구조물의 강성을 확보하기 위해서 각 Cable의 장력도입이 필수적이다. 또 그림 1에서와 같이 시공의 용이성을 도모하기 위해 Cable 구조 시스템을 많이 사용하고 있으며, 시공현장에서 목표형상을 성공적으로 만들기 위해서는 각 Cable의 장력도입순서 및 장력량을 결정하여야 한다.

그러나 연성구조물은 유연성이 크므로 어느 한 부재의

장력을 변화시키면 나머지 구조부재의 장력 및 위치좌표가 함께 변하게 된다. 그러므로 설계도면상의 구조 형태에 접근시키기 위해서는 시공과정에서 반복적으로 부재를 제어하여야 한다. 이러한 반복 작업은 Cable수가 증가함에 따라 작업량은 기하급수적으로 늘어나게 되며, 따라서 비경제적인 작업이 된다. 그러므로 컴퓨터상의 시뮬레이션을 통해 오차를 최소화 할 수 있는 작업시나리오를 미리 만들고, 이를 토대로 현장작업에 임하는 것이 경제적이며 안전한 작업을 할 수 있다. 이를 위해 시공해석이 필수적이다.

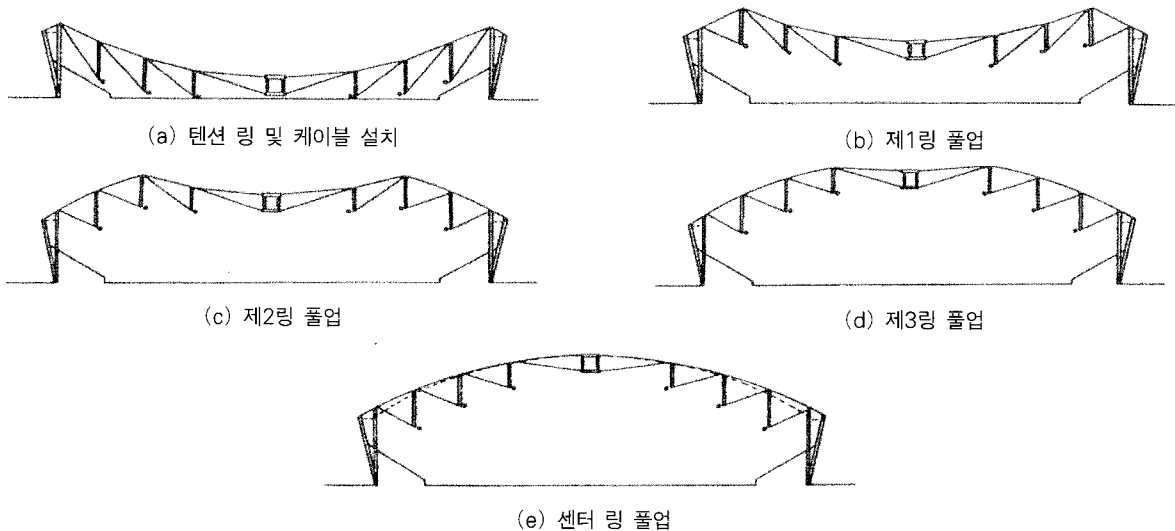


그림 1 케이블 돔 구조물의 시공 과정

시공과정에서 또 다른 문제점으로, 실제 현장에서의 작업 환경은 컴퓨터상의 작업환경과는 다를 수밖에 없다. 이로 인해 발생하는 시공오차는 강성구조물에서는 큰 영향을 끼치지 않으나, 연성구조물에서는 매우 심각한 영향을 미치게 되며 목표하는 작업수행이 불가능해 질 수도 있다. 그러므로 실제작업을 수행하며 변화되는 환경을 체크하여 그때마다 보정작업을 반드시 해 주어야 한다. 이때 기본적인 시공해석 데이터가 없으면 보정작업은 불가능해 지고, 현장작업에 대응할 수 없게 된다.

따라서 연성구조물을 효율적이며 정확한 시공을 하기 위해서는 크게 2가지 작업이 필요하다. 첫째는 최종 목표하는 형태를 완성하기 위한 작업 시나리오를 작성하는 것이고, 둘째는 실제작업 중에 야기되는 시공오차를 보정하는 작업이다. 이러한 일련의 작업을 시공해석이라 한다. 이때 연성구조물의 초기장력에 의한 민감도를 반영하기 위해서는 기하학적 비선형성을 고려하여야 하므로, 결국 시공해석은 비선형 문제에 귀착하게 된다.

시공해석에 의한 장력조정 계획을 도식화하면 그림 2와 같은 흐름도로 나타낼 수 있으며, 단위순차제어→반복순차제어→시공해석의 일련의 단계를 통해 보다 효율적인 현장시공이 가능하게 된다.

여기서, 시공해석에 사용되는 용어에 대하여 간단히 설

명한다. 구조물의 부재를 한 번씩 돌아가며 순차적으로 제어하는 것을 단위순차제어라 하고, 이 과정을 반복적으로 수행하는 경우를 반복순차제어라 정한다. 이때 목표장력과의 허용오차를 0.01%이내로 하여 반복제어하며, 반복횟수는 스텝(Step)수로 나타낸다. 이러한 일련의 반복계산을 통해 오차를 최소화할 수 있는 누적 장력량을 구하고, 이를 제어장력으로 사용하여 단 한차례 순차제어 하는 것을 시공해석이라 한다.

이와 같은 일련의 시공해석을 수행함으로써 연성구조물을 효율적이며 정확한 시공이 가능하게 된다. 또 작업환경에 따라 민감하게 반응하는 현장작업을 적시에 보정할 수 있게 된다.

2. Cable Net 구조의 시공해석

2.1 정형모델의 시공해석

2.1.1 해석모델

연성 구조물이 기하학적 비선형성에 의해 얼마나 민감하게 반응하며, 또 이를 제어하기 위해 시공해석의 효과가 어느 정도인지를 시험해 보기 위해 그림 3과 같은 간단한 사각형 케이블 네트 모델을 채택한다. 해석모델의 물성치로는, 단면적 $A=1\text{cm}^2$, 탄성계수 $E=1.0 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 을 사용한다. 해석모델의 절점번호 및 요소번호를 그림 3에 나타낸다. 경계조건은 1, 2, 3, 4번 절점들을 고정시키고 나머지 절점은 자유로 한다. 채택된 사각형 케이블 네트 구조물의 절점좌표 및 부재장력값은 표 1, 표 2에 각각 나타낸다.

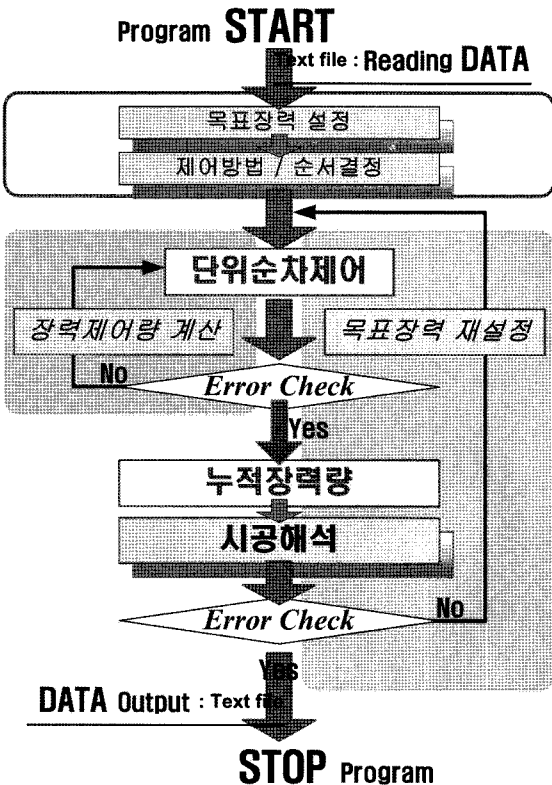


그림 2 케이블 돔 구조물의 시공해석 흐름도

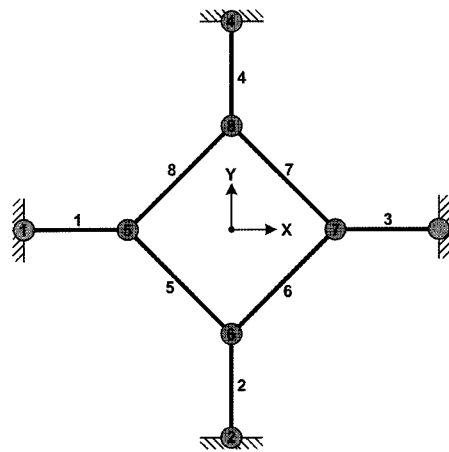


그림 3 케이블 네트 모델

표 1 해석모델의 절점좌표 (단위:cm)

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

표 2 해석모델의 부재장력 (단위:kgf)

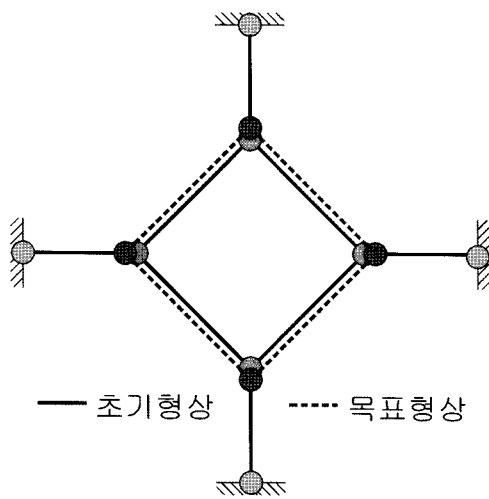
부재 번호	1	2	3	4	5	6	7	8
부재 장력	1000	1000	1000	1000	707.11	707.11	707.11	707.11

표 3 목표형상의 절점좌표 (단위:cm)

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

표 4 목표형상의 부재장력 (단위:kgf)

부재 번호	1	2	3	4	5	6	7	8
부재 장력	895.74	895.74	895.74	895.74	803.34	803.34	803.34	803.34



목표형상은 각 절점을 동시 가력하여 가운데 링을 외측으로 10cm 만큼 강제변위 시킨 모델로 설정하며, 그림 4와 같다. 이때의 절점좌표 및 부재장력값을 표 3, 표 4에 각각 나타낸다. 시공해석의 진행과정은 단위순차제어→반복순차제어→시공해석의 단계로 이루어진다.

절점 제어순서는 반시계방향으로 순차제어하는 경우와 대칭제어하는 경우 2가지로 설정하여 해석하였으며, 제어 순서에 따른 목표형상과의 오차를 파악한다.

2.1.2 하중제어법

해석모델을 대상으로 하중제어방식을 적용하여 비선형 시공해석을 수행한다.

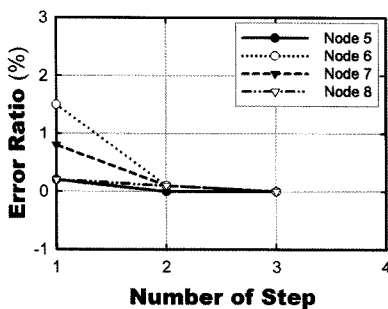
목표 형상은 해석모델을 각 절점에서 동시 가력하여 가운데 링을 외측으로 10cm 만큼 강제 변위시킨 모델을 채택한다. 이때 강제변위 10cm에 대응하는 각 절점의 가력 하중은 441.76kgf이다. Case-1의 제어순서는 절점번호 #5→#6→#7→#8 순으로 순차제어한다. 순차제어 결과를 표 5에 나타내며, 절점변위 오차율은 0.2~1.5%의 오차분포로 나타남을 알 수 있다.

1회의 순차제어 값은 만족할 수 없으므로 이를 다시 반복수행한다. 반복수행시 오차의 수렴상황을 그림 5에 나타낸다. 이때, 절점변위 오차는 목표변위 10cm에 대한 오차율로 나타내었다. 3회의 반복제어 결과, 절점변위는 목표형상과 비교하여 0%의 오차분포를 보이고 있다.

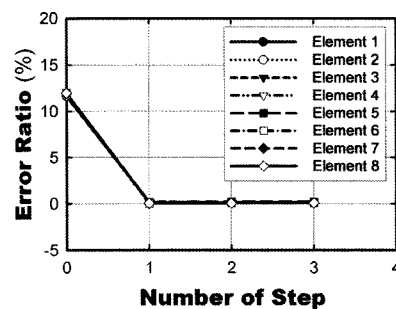
반복제어시 사용된 가력량의 누적값을 이용하여 시공해석을 수행한다. 이때의 하중제어량은 그림 6과 같다. 시공해석 결과, 절점변위 오차율은 0~0.1%정도로 나타나고, 부재장력 오차율은 0.07~0.22%의 오차분포로 나타난다. 절점변위오차 및 부재장력오차를 그림 7, 그림 8에 각각

표 5 순차제어후의 절점변위 (단위:cm)

절점 번호	목표변위		순차제어 결과			
	X-변위	Y-변위	X-변위	오차율 (%)	Y-변위	오차율 (%)
5	-10	0	-10.02	0.2	0.07	-
6	0	-10	-0.4	-	-10.15	1.5
7	10	0	9.92	0.8	-0.41	-
8	0	10	0.08	-	10.02	0.2



(a) 절점변위 오차율



(b) 부재장력 오차율

그림 5 반복순차제어시 오차 수렴 과정

나타낸다. 그림에서 원 안의 번호는 절점번호 및 부재번호를 의미하며, 상부에 이동변위 및 부재장력값을 하부에 목표형상과의 오차율을 나타낸다.

Case-2의 제어순서는 절점번호 #5→#7→#6→#8 순으로 대칭제어한다.

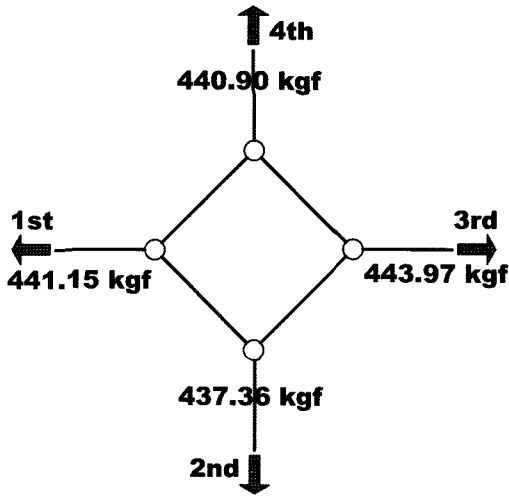


그림 6 하중제어량

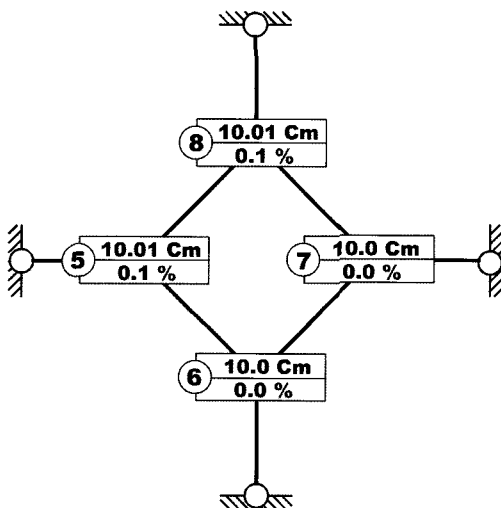


그림 7 시공해석후의 절점변위

목표 형상은 해석모델을 각 절점에서 동시 가력하여 가운데 링을 외측으로 10cm 만큼 강제변위 시킨 모델을 채택한다. 이때 강제변위 10cm에 대응하는 각 절점의 가력 하중은 441.76kgf이다. 순차제어 결과를 표 6에 나타내며, 절점변위 오차율은 0.7~1.4%의 오차분포로 나타남을 알 수 있다.

1회의 순차제어 값은 만족할 수 없으므로 이를 다시 반복수행한다. 반복수행시 오차의 수렴상황을 그림 9에 나타낸다. 이때, 절점변위 오차는 목표변위 10cm에 대한 오차율로 나타내었다. 3회의 반복제어 결과, 절점변위는 목표형상과 비교하여 0%의 오차분포를 보이고 있다.

반복제어시 사용된 가력량의 누적값을 이용하여 시공해

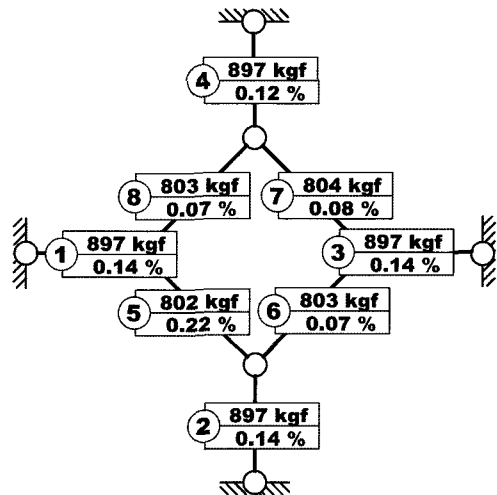
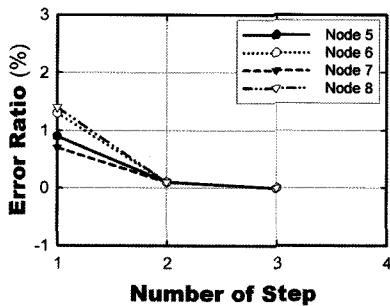


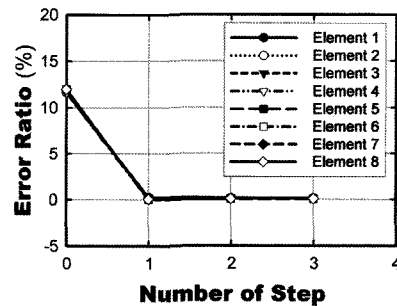
그림 8 시공해석후의 부재장력

표 6 순차제어후의 절점변위 (단위:cm)

절점번호	목표변위		순차제어 결과			
	X-변위	Y-변위	X-변위	오차율 (%)	Y-변위	오차율 (%)
5	-10	0	-9.91	0.9	0.03	-
6	0	-10	0.03	-	-10.13	1.3
7	10	0	9.93	0.7	0.03	-
8	0	10	0.03	-	10.14	1.4



(a) 절점변위 오차



(b) 부재장력 오차

그림 9 반복순차제어시 오차 수렴 과정

석을 수행한다. 이때의 하중제어량은 그림 10과 같다. 시공해석 결과, 절점변위 오차율은 0~0.1% 정도로 나타나고, 부재장력 오차율은 0.04~0.15%의 오차분포로 나타난다. 절점변위오차 및 부재장력 오차를 그림 11, 그림 12에 각각 나타낸다. 그림에서 원 안의 번호는 절점번호 및 부재번호를 의미하며, 상부에 이동변위 및 부재장력값을 하부에 목표형상과의 오차율을 나타낸다.

2.1.3 변위제어법

해석모델을 대상으로 변위제어방식을 적용하여 비선형

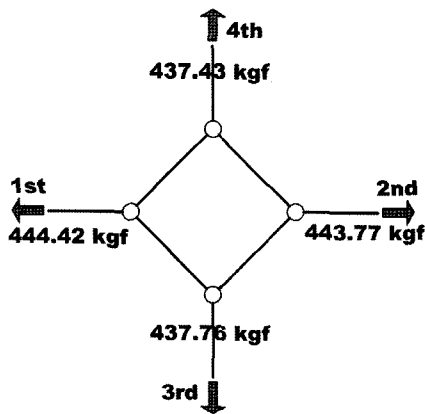


그림 10 하중제어량

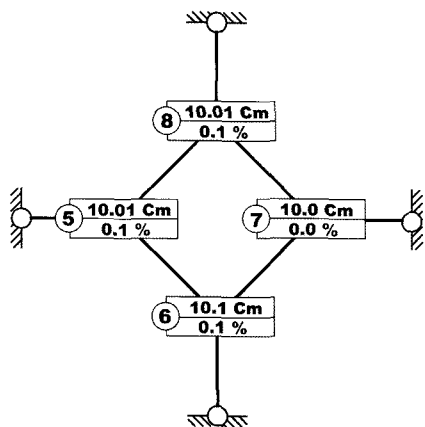


그림 11 시공해석후의 절점변위

시공해석을 수행한다.

목표 형상은 해석모델을 각 절점에서 동시 가력하여 가운데 링을 외측으로 10cm 만큼 강제변위 시킨 모델을 채택한다. Case-1의 제어순서는 절점번호 #5→#6→#7→#8 순으로 순차제어한다. 순차제어 결과를 표 7에 나타내며, 절점변위 오차율은 29.6~31.6% 정도로 크게 나타남을 알 수 있다.

1회의 순차제어 값은 만족할 수 없으므로 이를 다시 반복수행한다. 반복수행시 오차의 수렴상황을 그림 13에 나타낸다. 이때, 절점변위 오차는 목표변위 10cm에 대한 오차율로 나타내었다. 5회의 반복제어 결과, 목표형상과 비교하여 절점변위 0.3%의 오차분포를 보이고 있다.

반복제어시 사용된 변위량의 누적값을 이용하여 시공해

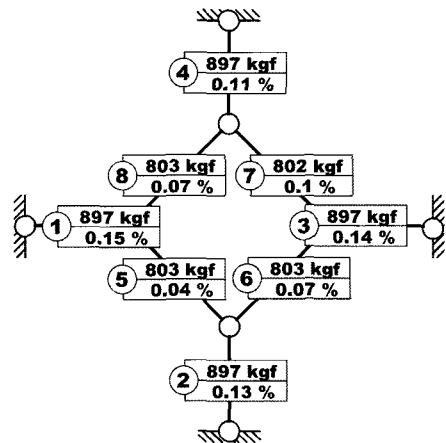
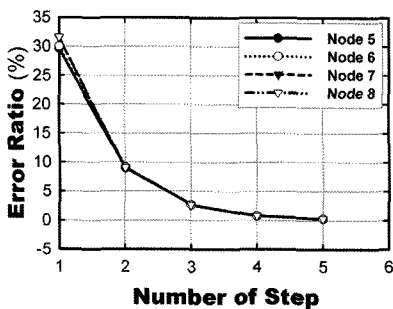


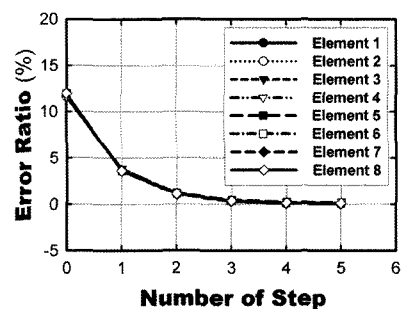
그림 12 시공해석후의 부재장력

표 7 순차제어후의 절점변위 (단위:cm)

절점번호	목표변위		순차제어 결과			
	X-변위	Y-변위	X-변위	오차율 (%)	Y-변위	오차율 (%)
5	-10	0	-7.04	29.6	0.003	-
6	0	-10	-0.24	-	-7.0	30.0
7	10	0	6.85	31.5	-0.23	-
8	0	10	-0.004	-	6.84	31.6



(a) 절점변위 오차율



(b) 부재장력 오차율

그림 13 반복순차제어시 오차 수렴 과정

석을 수행한다. 이때의 누적변위량은 그림 14와 같다. 즉, 각 절점을 10cm 이동시키기 위해서는 절점을 14.21~14.42cm 정도 제어하여야 목표형상에 접근할 수 있다는 것을 의미한다. 시공해석 결과, 절점변위 오차율은 0~1.3% 정도로 나타나며, 부재장력 오차율은 0.01~0.26% 정도로 나타난다. 절점변위오차 및 부재장력 오차를 그림 15, 그림 16에 각각 나타낸다.

그림에서 원 안의 번호는 절점번호 및 부재번호를 의미

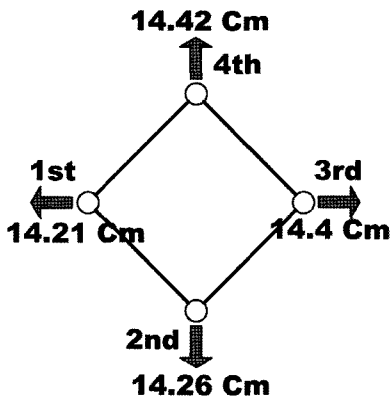


그림 14 누적변위량

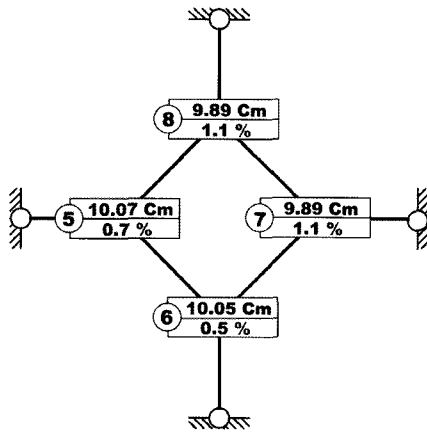


그림 15 시공해석후의 절점변위

하며, 상부에 이동변위 및 부재장력값을 하부에 목표형상과의 오차율을 나타낸다.

Case-2의 제어순서는 절점번호 #5→#7→#6→#8 순으로 대칭제어한다.

목표 형상은 해석모델을 각 절점에서 동시 가력하여 가운데 링을 외측으로 10cm 만큼 강제변위시킨 모델을 채택한다. 순차제어 결과를 표 8에 나타내며, 절점변위 오차율은 30.3~30.9% 정도로 크게 나타남을 알 수 있다.

1회의 순차제어 값은 만족할 수 없으므로 이를 다시 반복 수행한다. 반복수행시 오차의 수렴상황을 그림 17에 나타낸다. 이때, 절점변위 오차는 목표변위 10cm에 대한 오차율로 나타내었다. 5회의 반복제어 결과, 목표형상과 비교하여 절점변위 0.3%의 오차분포를 보이고 있다.

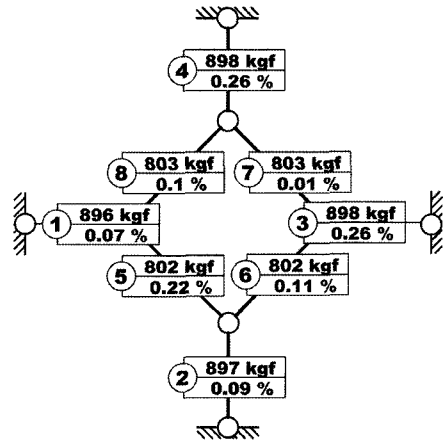
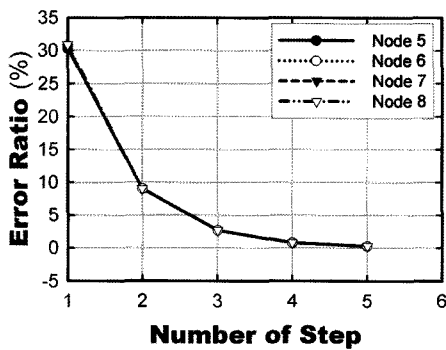


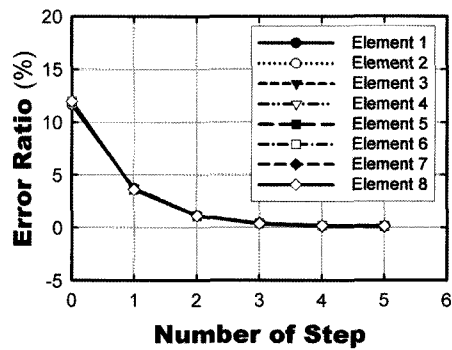
그림 16 시공해석후의 부재장력

표 8 순차제어후의 절점변위 (단위:cm)

절점번호	목표변위		순차제어 결과			오차율 (%)
	X-변위	Y-변위	X-변위	오차율 (%)	Y-변위	
5	-10	0	-6.97	30.3	0.007	-
6	0	-10	0.007	-	-6.93	30.7
7	10	0	6.95	30.5	0.007	-
8	0	10	0.007	-	6.91	30.9



(a) 절점변위 오차율



(b) 부재장력 오차율

그림 17 반복순차제어시 오차 수렴 과정

반복제어시 사용된 변위량의 누적값을 이용하여 시공해석을 수행한다. 이때의 누적변위량은 그림 18과 같다. 즉, 각 절점을 10cm 이동시키기 위해서는 절점을 14.28~14.34cm 정도 제어하여야 목표형상에 접근할 수 있다는 것을 의미한다. 시공해석 결과, 절점변위 오차율은 0.1~0.6% 정도로 나타나며, 부재장력 오차율은 0.07~0.2% 정도로 나타난다. 절점변위오차 및 부재장력 오차를 그림 19, 그림 20에 각각 나타낸다. 그림에서 원 안의 번호는 절점번호 및 부재번호를 의미하며, 상부에 이동변위 및 부재장력값을 하부에 목표형상과의 오차율을 나타낸다.

2.2 비정형모델의 시공해석

2.2.1 해석모델

시공해석에 의해 목표형상으로의 접근 가능성을 시험해 보기 위해 그림 21과 같은 간단한 사각형 케이블 넷트 모델을 채택한다. 해석 모델의 물성치로는, 단면적 $A=1\text{cm}^2$, 탄성계수 $E=1.0 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 을 사용한다. 해석 모델의 절점번호 및 요소번호를 그림 21에 나타낸다. 경계조건은 1,

2, 3, 4번 절점들을 고정시키고 나머지 절점은 자유로 한다. 채택된 사각형 케이블 넷트 구조물의 목표형상에 대한 절점좌표 및 부재 장력값은 표 9, 표 10에 각각 나타낸다. 즉 이때의 상태를 목표형상으로 설정하며 그림 21에서 점선으로 나타낸다. 시간이 지나면서 장력이완에 의해 연성 구조물의 절점 좌표 및 부재 장력값은 변하게 된다. 이때의 상태를 가정해 가상모델을 채택하며 그림 21에서 실선

표 9 해석모델의 절점좌표 (단위:cm)

절점번호	1	2	3	4	5	6	7	8	
목표형상	X 좌표	-200	0	200	0	-100	0	100	0
	Y 좌표	0	-200	0	200	0	-100	0	100
가상모델	X 좌표	-200	0	200	0	-78.073	7.8214	104.46	7.1953
	Y 좌표	0	-200	0	200	4.341	-89.604	3.7161	103.08
오차율	-	-	-	-	21.9%	10.4%	4.46%	3.08%	

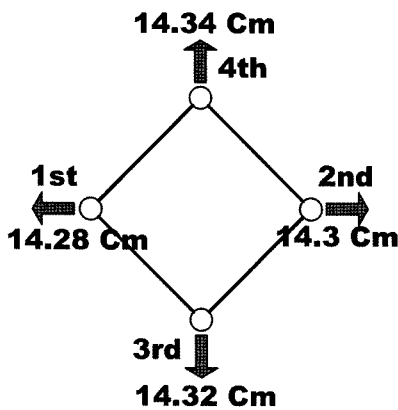


그림 18 누적변위량

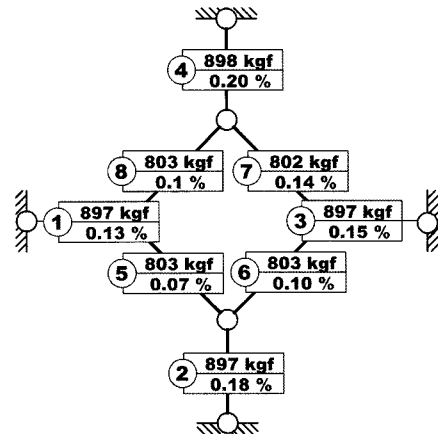


그림 20 시공해석후의 부재장력

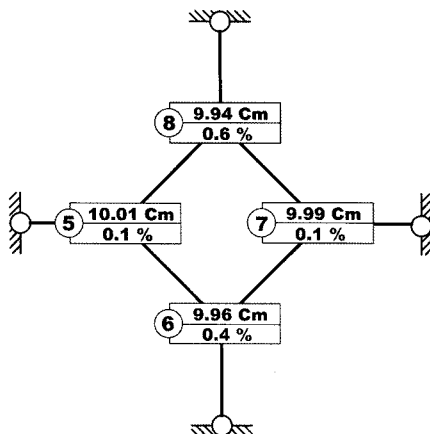


그림 19 시공해석후의 절점변위

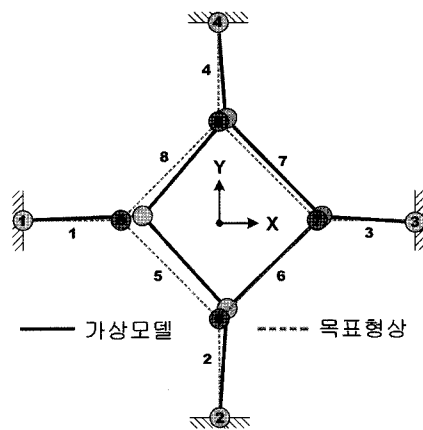
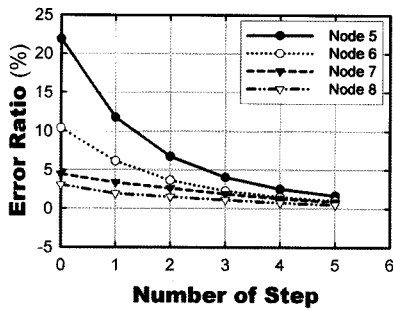
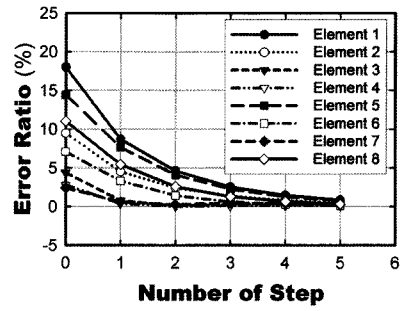


그림 21 해석 모델



(a) 절점변위 오차율



(b) 부재장력 오차율

그림 22 반복순차제어시 오차 수렴 과정

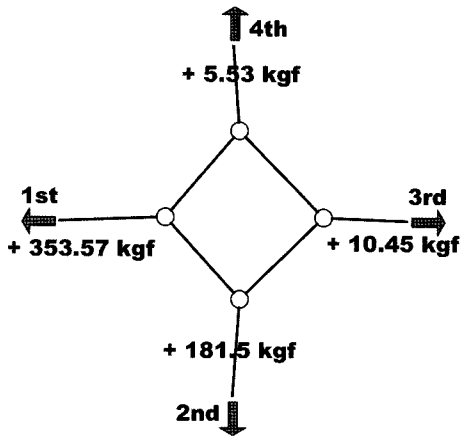


그림 23 누적장력량

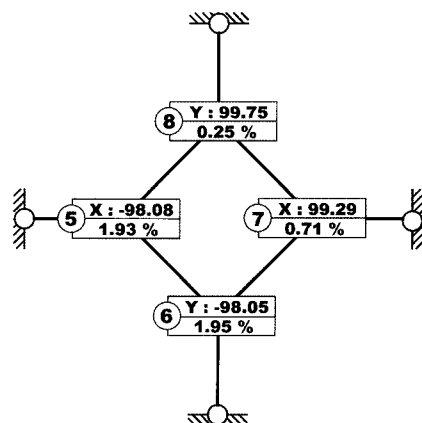


그림 24 시공해석후의 절점변위

표 10 해석모델의 부재장력 (단위:kgf)

부재 번호	1	2	3	4	5	6	7	8
목표 형상 부재 장력	1000	1000	1000	1000	707.11	707.11	707.11	707.11
가상 모델 부재 장력	820	905	956	972	605	657	690	629
오차율	18%	9.5%	4.4%	2.8%	14.4%	7.1%	2.42%	11%

으로 나타낸다. 즉 기본형태의 사각형 케이블 넷 구조물에 약간의 인위적 변형을 주어 가상모델을 만든다. 이때의 절점좌표 및 부재장력을 표 9, 표 10에 각각 나타낸다.

시공해석의 진행과정은 단위순차제어→반복순차제어→시공해석의 단계로 이루어진다. 제어순서는 반시계방향으로 순차제어하는 경우와 대칭제어하는 경우 2가지 경우로 설정하여 해석하였으며, 제어순서에 따른 목표형상과의 오차를 파악한다.

2.2.2 응력제어법

기본형태의 사각형 케이블 넷 구조물에 인위적 변형을 주어 가상모델을 채택하고 이를 시공해석에 의해 원래의 상태, 즉 목표형상으로 이행시킨다.

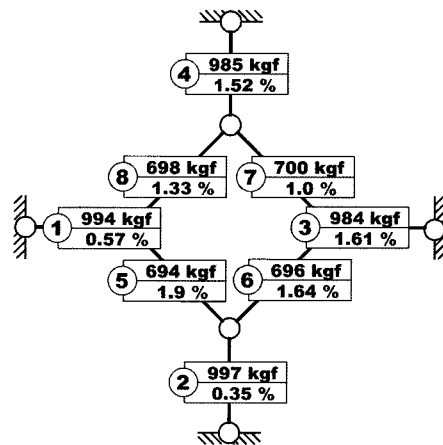
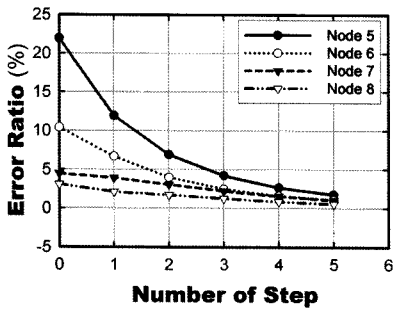


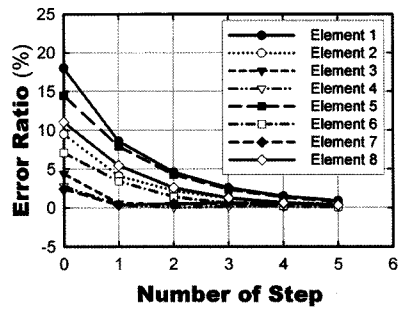
그림 25 시공해석후의 부재장력

시공해석의 진행과정은 단위순차제어→반복순차제어→시공해석의 단계로 이루어진다. 제어방식은 응력제어방식을 사용하며, 비선형 시공해석을 수행한다.

먼저, Case-1의 제어순서는 #1→#2→#3→#4 순으로 부재를 하나씩 순차제어 하며, 이때 제어장력은 목표장력값을 기준으로 하여 미달되는 장력량 만큼을 부여한다. 단위순차제어의 결과, 목표 형상과의 오차는 변위 1.93~11.78%, 장력 0.39~8.71%의 분포를 보인다. 이는 만족할 수 없으



(a) 절점변위 오차율



(b) 부재장력 오차율

그림 26 반복순차제어시 오차 수렴 과정

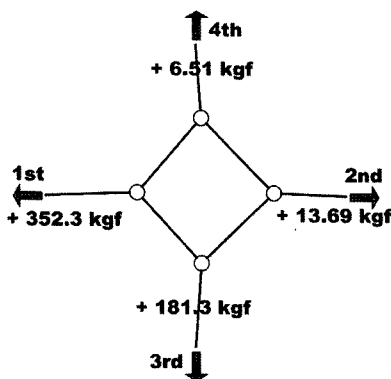


그림 27 누적장력량

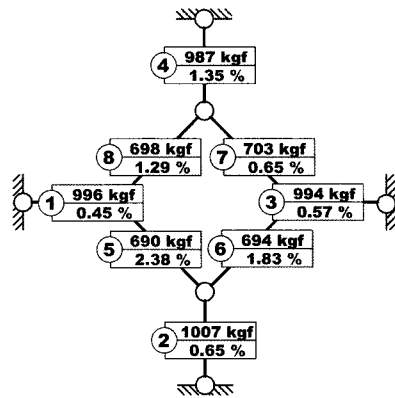


그림 29 시공해석후의 부재장력

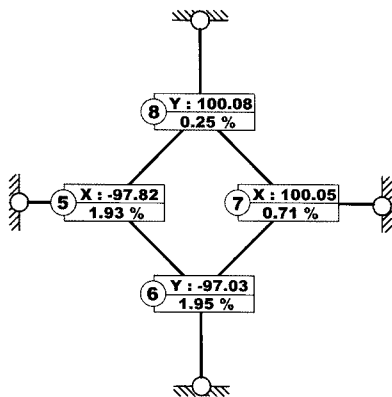


그림 28 시공해석후의 절점변위

므로 장력값이 허용오차 이내가 되도록 반복제어한다. 반복순차제어시 부재 제어순서 및 제어장력은 단위순차제어와 동일하게 이루어지며 이를 효율적으로 수행하기 위해 해석프로그램을 개발하였다. 5회 반복순차제어후의 결과는 목표 형상과 변위 0.49~1.68%, 장력 0.12~0.86%의 오차 분포로 나타난다. 반복순차제어 절점변위 및 부재장력 오차의 수렴과정을 그림 22에 나타낸다.

다음으로 시공해석을 수행한다. 부재 제어순서는 #1→#2→#3→#4 순으로 이루어지며, 제어방법은 반복순차제어시 사용된 장력의 누적값을 제어량으로 하여 단 한차례 순차제어한다. 이때 사용된 누적장력량을 그림 2.25에 나타낸다.

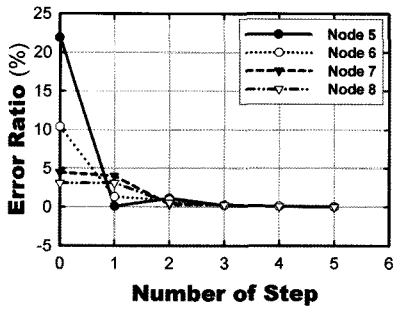
차제어한다. 이때 사용된 누적장력량을 그림 23에 나타낸다.

시공해석 후 결과값은, 목표 형상과 비교하여 변위 0.25~1.95%, 장력 0.35~1.9%의 오차 분포를 보이며, 절점변위오차 및 부재장력오차율을 그림 24, 그림 25에 각각 나타낸다.

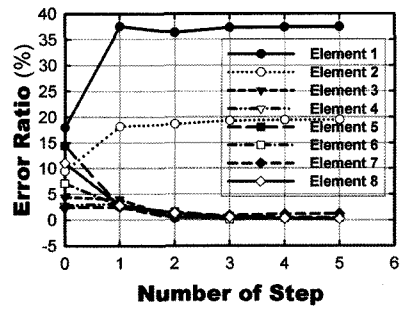
Case-2의 부재 제어순서는 #1→#3→#2→#4 순으로 부재를 하나씩 대칭제어 하며, 이때 제어장력은 목표장력값을 기준으로 하여 미달되는 장력량 만큼을 부여한다.

단위순차제어의 결과, 목표 형상과의 오차율은 변위 2.1~11.92%, 장력 0.34~8.58%의 분포를 보인다. 이는 만족할 수 없으므로 장력값이 허용오차 이내가 되도록 반복제어한다. 반복순차제어시 부재 제어순서 및 제어장력은 단위순차제어와 동일하게 이루어지며 이를 효율적으로 수행하기 위해 해석프로그램을 개발하였다. 5회 반복순차제어 후의 결과는 목표 형상과 변위 0.56~1.78%, 장력 0.09~0.89%의 오차 분포로 나타난다. 반복순차제어 절점변위 및 부재장력 오차의 수렴과정을 그림 26에 나타낸다.

다음으로 시공해석을 수행한다. 부재 제어순서는 #1→#3→#2→#4 순으로 이루어지며, 제어방법은 반복순차제어시 사용된 장력의 누적값을 제어량으로 하여 단 한차례 순차제어한다. 이때 사용된 누적장력량을 그림 2.25에 나타낸다.



(a) 절점변위 오차율



(b) 부재장력 오차율

그림 30 반복순차제어시 오차 수렴 과정

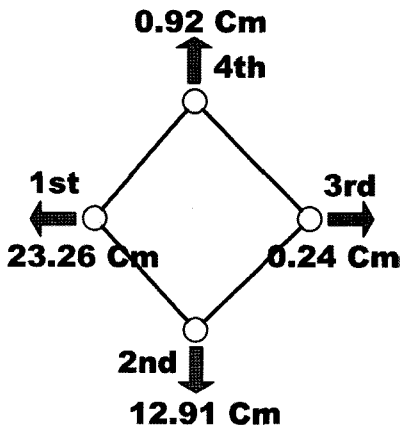


그림 31 누적변위량

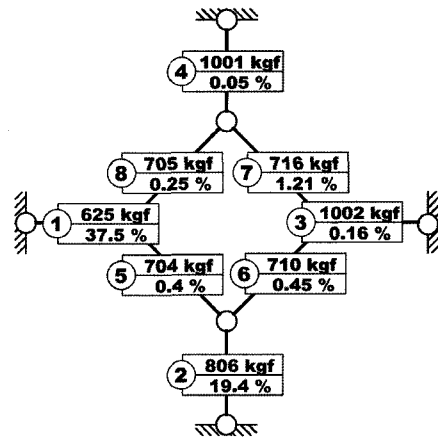


그림 33 시공해석후의 부재장력

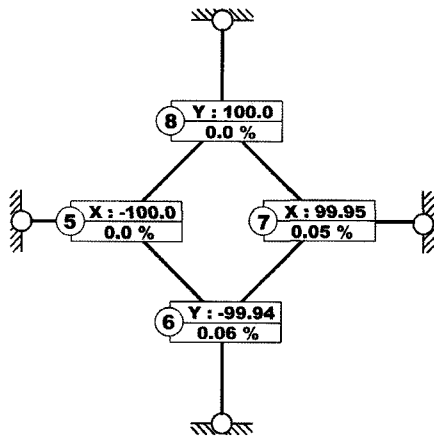


그림 32 시공해석후의 절점변위

시공해석 후 결과값은, 목표 형상과 비교하여 변위 0.05~2.97%, 장력 0.45%~2.38%의 오차 분포를 보이며, 절점 변위오차 및 부재장력 오차율을 그림 28, 그림 29에 각각 나타낸다.

2.2.3 변위제어법

기본형태의 사각형 케이블 넷 구조물에 인위적 변형을 주어 가상모델을 채택하고 이를 시공해석에 의해 원래의 상태, 즉 목표형상으로 이행시킨다.

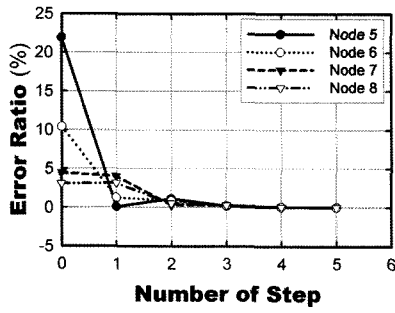
시공해석의 진행과정은 단위순차제어→반복순차제어→시공해석의 단계로 이루어진다. 제어방식은 변위제어방식을 사용하며, 비선형 시공해석을 수행한다.

먼저, Case-1의 제어순서는 절점번호 #5→#6→#7→#8 순으로 순차제어하며, 이때 변위제어량은 목표변위를 기준으로 미달되는 변위량 만큼을 부여한다.

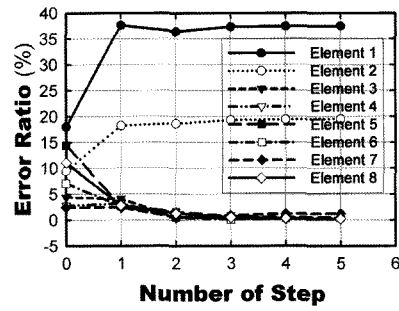
단위순차제어의 결과, 목표 형상과의 오차율은 변위 0.08~4.0%, 장력 2.49~37.59%의 분포를 보인다. 이는 만족할 수 없으므로 장력값이 허용오차 이내가 되도록 반복제어한다.

반복순차제어시 부재 제어순서 및 제어장력은 단위순차제어와 동일하게 이루어지며 이를 효율적으로 수행하기 위해 해석프로그램을 개발하였다. 5회 반복순차제어후의 결과는 목표 형상과 변위 0.002~0.065%, 장력 0.13~37.49%의 오차 분포로 나타난다. 반복순차제어시 절점 변위 및 부재장력 오차의 수렴과정을 그림 30에 나타낸다.

다음으로 시공해석을 수행한다. 제어순서는 #5→#6→#7→#8 순으로 이루어지며, 제어방법은 반복순차제어시 사용된 장력의 누적값을 제어량으로 하여 단 한차례 순차제어한다. 이때 사용된 누적변위량을 그림 31에 나타낸다.



(a) 절점변위 오차율



(b) 부재장력 오차율

그림 34 반복순차제어시 오차 수렴 과정

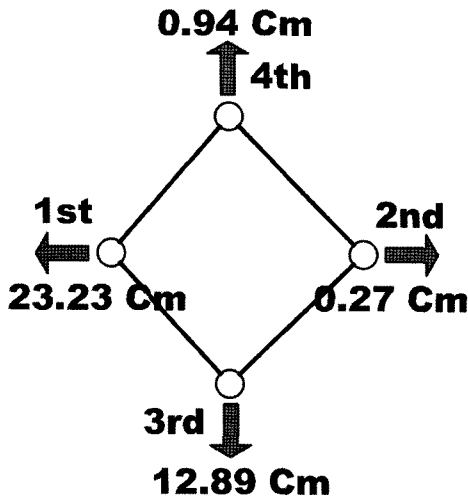


그림 35 누적변위량

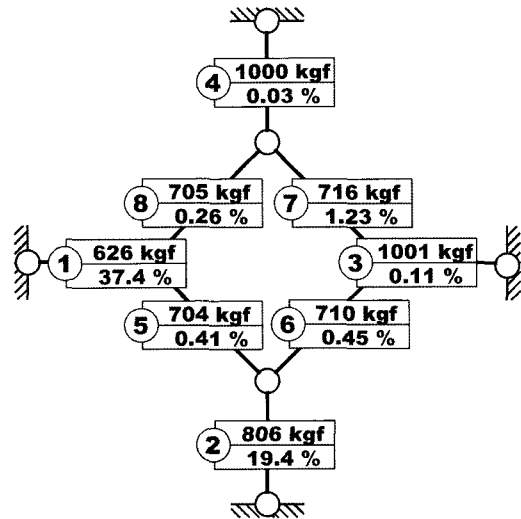


그림 37 시공해석후의 부재장력

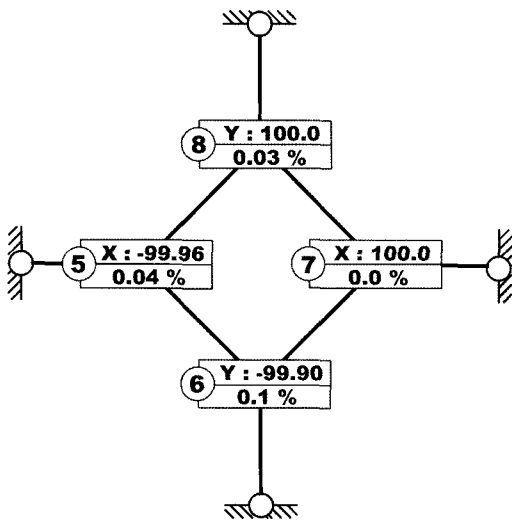


그림 36 시공해석후의 절점변위

시공해석 후 결과값은, 목표 형상과 비교하여 변위 0.002~0.065%, 장력 0.05%~37.45%의 오차 분포를 보이며, 절점변위오차 및 부재장력 오차율을 그림 32, 그림 33에 각각 나타낸다.

Case-2의 제어순서는 절점번호 #5→#7→#6→#8 순으로 대칭제어하며, 이때 변위제어량은 목표변위를 기준으로 미달되는 변위량 만큼을 부여한다.

단위순차제어의 결과, 목표 형상과의 오차율은 변위 0.12~4.04%, 장력 2.46~37.68%의 분포를 보인다. 이는 만족할 수 없으므로 장력값이 허용오차 이내가 되도록 반복제어한다.

반복순차제어시 부재 제어순서 및 제어장력은 단위순차제어와 동일하게 이루어지며 이를 효율적으로 수행하기 위해 해석프로그램을 개발하였다. 5회 반복순차제어 후의 결과는 목표 형상과 변위 0.03%, 장력 0.12~37.48%의 오차 분포로 나타난다. 반복순차제어시 절점변위 및 부재장력 오차의 수렴과정을 그림 34에 나타낸다.

다음으로 시공해석을 수행한다. 제어순서는 #5→#7→#6→#8 순으로 이루어지며, 제어방법은 반복순차제어시 사용된 장력의 누적값을 제어량으로 하여 단 한차례 순차제어한다. 이때 사용된 누적변위량을 그림 35에 나타낸다.

시공해석 후 결과값은, 목표형상과 비교하여 변위 0~

0.1%, 장력 0.03%~37.41%의 오차 분포를 보이며, 절점 변위오차 및 부재장력 오차율을 그림 36, 그림 37에 각각 나타낸다.

3. 결 언

본 원고에서는 간단한 케이블-네트 구조물을 해석모델로 채택하여 시공해석을 수행, 목표형상으로의 접근 가능성을 시험해보았다. 먼저, 정형 모델의 경우에는 하중제어 방식과 변위제어 방식을 적용하였으며, 비정형 모델의 경우에는 응력제어 방식과 변위제어 방식을 적용하여 연성구조물이 기하학적 비선형성에 의해 얼마나 민감하게 반응하는지를 알아보았다. 그리고 이를 제어하기 위해 시공해석의 효과가 어느 정도인지를 시험해 보았다.

이를 통해 연성구조물의 시공과정에서 작업 방법 및 순서 결정은 매우 중요함을 알 수 있고, 이로부터 다음의 결과를 얻을 수 있다.

- 1) 현장에서 전 케이블을 동시에 자동제어 장치에 의해 조정하면 목표하는 형상에 간단히 접근할 수 있으나, 이는 자유도수가 늘어나면 불가능하다. 그러므로 순차적 조정을 할 수 밖에 없고, 이때 시공해석을 통해 작업의 효율성을 극대화할 수 있다.
- 2) 같은 제어방법을 이용하더라도 작업 순서를 달리하면 연성구조물의 비선형성의 증폭으로 인해 그 결과는 전혀 다른 값을 나타낸다. 그러므로 작업장의 환경을 고려하여 작업 순서를 정해야 하며, 이에 따른 제어방법 및 크기를 결정하여야 한다. 