

안정화 이행과정 해석을 통한 불안정구조물의 설계



한 상 을*



김 중 범**

1. 서 론

케이블 돔이나 공기막 구조물 같은 불안정 구조물이 초기 응력의 도입에 의해 안정한 상태를 찾아가는 과정을 안정화 이행과정이라 하며, 구조물은 이러한 과정을 통해 불안정 구조물의 부재강성이 결정되어, 외부하중에 저항할 수 있는 안정구조물의 상태를 확보하게 된다. 이러한 안정화 이행과정 해석 알고리즘을 이용하여 케이블 돔과 Stressed-Arch system의 예를 들어 불안정한 구조물의 거동을 파악하고자 한다.

2. 수치해석 알고리즘

동적이완법은 Day가 제안한 수치해석기법으로 유한 요소법과 유한차분법의 성질이 고려된 비선형 해석기법이며, 동적 평형방정식으로부터 최소 포텐셜에너지 상태인 정적 평형상태를 구조물의 점성감쇠 또는 동적 감쇠 작용에 의해 찾게된다. 수치해석 과정 중 강성행렬을 만들지 않으며, 다만 질량 행렬만 초기 상태에 만들어 이 행렬에 의해 수렴과정이 조절 되어진다. 따라서 해석 과정 중 케이블 돔의 주요 구성 요소인 케이블에 압축력이 발생하는 불안정 현상에 의해 강성행렬의 행렬식이 영이 되는 특이 현상에 대한 문제를 극복할 수 있게된다.

2.1 점성감쇠에 의한 동적이완법의 정식화

구조물의 전체 포텐셜에너지 Φ 는 변형도에너지(strain energy) U 와 외부하중에 의한 일 W 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = U + W \quad (1)$$

위 식을 m 요소의 변형에너지 U_m , 하중벡터 \mathbf{p} , 변위 벡터 \mathbf{d} 로 다시 표현하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \sum_{m=1}^n U_m - \mathbf{p}^T \cdot \mathbf{d} \quad (2)$$

위 식을 모든 절점변위 d_i^j 에 대해 미분하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며, i 는 절점, j 는 각각 x, y, z 방향을 나타내고, n 는 구조물의 모든 부재수이다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial d_i^j} = \sum_{m=1}^n \frac{\partial U_m}{\partial d_i^j} - p_i^j \quad (3)$$

구조물의 내력과 외력의 차인 불평형력은 식(3)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

* 정희원 · 인하대학교 건축공학과 교수 공학박사

** 인하대학교 건축공학과 대학원 박사과정

$$r_i^j = -\frac{\partial \Phi}{\partial d_i^j} \quad (4)$$

구조물의 전체 포텐셜에너지가 최소인 상태를 정적 하중 상태에서의 정적 평형상태(static equilibrium state)로 보기 때문에, 정적평형상태를 위한 조건 식은 식(3)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial d_i^j} = 0 \quad (5)$$

일반적으로 수치해석 과정에서는 식(5)의 값이 정확히 영(zero)이 되지 않기 때문에, 식(4)의 불평형력이 영에 충분히 접근하여 수렴한계를 만족시킬 때 이 상태를 정적평형상태로 간주한다. Day³³⁾에 의해 제안된 동적이완법은 구조물의 전체 포텐셜 에너지를 최소화시키는 수치해석과정을 통해 구조물의 정적 평형상태를 찾는 반복적 비선형 해석기법이다. 시간중분 Δt 마다 구조물의 운동상태를 추적해 나가면서 구조물의 감쇠작용에 의해, 구조물이 정적 평형상태에 도달한다는 원리에서 출발한다. 구조물의 동적 평형방정식은 식(6)과 같다. 식(6)에서 동적하중 p_i^j 를 정적하중 p_i 로 적용하고, 식을 고쳐 다시 표현하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_i - K_i \cdot d^t = M_i \cdot a_i^t + C_i \cdot v_i^t \quad (6)$$

위 식의 왼쪽 항을 t -시간스텝에서 i 절점의 식(4)에 의한 불평형력으로 보고 다시 정리하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i^t = M_i \cdot a_i^t + C_i \cdot v_i^t \quad (7)$$

위 식에서 M_i , C_i 는 각각 i 절점의 가상 질량(fictitious mass)과 점성 감쇠(viscous damping)이고, a_i^t , v_i^t 는 t -시간스텝에서 i 절점의 가속도, 속도이다. 동적이완법에서는 각 시간 증분 단계마다 연속적인 절점 속도 벡터의 계산을 통해 최대 운동에너지(kinetic energy peak)점 일 때의 상태를 새로운 기준상태로 설정하여 모든 절점속도를 영으로 재 설정한 후 불평형력이 영에 가까이 수렴할 때까지 반복계산을 수행한다. 이때 모든 구조적 거동은 절점 속도벡터의 계산을 통해 이루어지기 때문에 점선강성행렬의 계산 없이 저용량의 컴퓨터 기억용량으로 수치해석을 수행할 수 있는 장점

이 있다. 절점속도가 시간중분 Δt 에 대해 선형으로 변화한다는 유한차분적 기법을 도입하면 절점속도는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_i^t = \frac{v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} + v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}}}{2} \quad (8)$$

따라서, 가속도벡터는 속도벡터를 시간중분 Δt 에 대해 선형보간하여 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_i^t = \frac{v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} - v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} \quad (9)$$

속도와 가속도에 관한 위식을 식(7)에 대입하면 각 절점의 불평형력은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i^t = M_i \cdot \left(\frac{v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} - v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta t} \right) + C_i \cdot \left(\frac{v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} + v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}}}{2} \right) \quad (10)$$

따라서 식(10)을 $t+\Delta t/2$ 와 $t-\Delta t/2$ 의 속도로 다시 정리하면 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} \cdot \left(\frac{\frac{M_i}{\Delta t} - \frac{C_i}{2}}{\frac{M_i}{\Delta t} + \frac{C_i}{2}} \right) + \left(\frac{r_i^t}{\frac{M_i}{\Delta t} + \frac{C_i}{2}} \right) \quad (11)$$

구조물의 점성감쇠가 질량에만 비례한다고 생각하고 점성감쇠를 질량에 대해 다시 표현하면 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i = c' \cdot \frac{M_i}{\Delta t} \quad (12)$$

위 식에서 c' 은 단위질량에 대한 점성감쇠 상수(damping coefficient per unit mass)이고, 전체 구조물에 대해 일정한 값을 갖는 것으로 지정한다. 식(12)를 식(11)에 대입하고 정리하면 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = A \cdot v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + B_i \cdot r^t \quad (13)$$

위 식에서 상수 A, B_i 는 아래와 같다.

$$A = \frac{(1 - \frac{c'}{2})}{(1 + \frac{c'}{2})}, \quad B_i = \frac{\Delta t}{2M_i}(1 + A) \quad (14)$$

구조물의 i 절점에서의 $t+\Delta t$ 에서의 증분변위는 식(13)의 속도에 관한 식에 시간증분 Δt 를 선형보간하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta d_i^{t+\Delta t} = \Delta t \cdot v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} \quad (15)$$

따라서, 구조물의 새로운 좌표계는 식(15)를 이용해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_i^{t+\Delta t} = X_i^t + \Delta t \cdot v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} \quad (16)$$

2.2 동적감쇠에 의한 수치해석과정의 재설정

점성감쇠를 고려하여 해석을 수행하는 위의 방법 외에 점성감쇠를 생략한 동적 감쇠에 의한 동적이완법을 생각할 수 있다. 동적 감쇠의 장점은 해석을 위한 계수의 수를 줄임으로서 해석과정이 더 간단해 진다는 것이다. 즉, 점성 감쇠항을 제거함으로써 시간증분 Δt 와 절점 질량항만으로 동적이완법에 의한 수치해석 과정이 조절되며, 대변위를 일으키는 문제에서 효과적으로 적용될 수 있다. 점성감쇠를 제거함으로써 구조물의 거동은 이론적으로는 조화 자유진동을 하게 되며, 초기 구조물상태부터 각 시간증분단계마다 운동에너지를 추적하는 과정 중 국부적 최대 운동에너지 상태의 절점 속도를 모두 영으로 하여 구조물의 거동을 재 설정하게 된다. 이러한 계산과정을 초기에 설정한 수렴한계에 도달할 때까지 반복적으로 수행한다.

동적 감쇠(kinetic damping)만으로 해석을 수행하면, $t+\Delta t/2$ 에서의 절점 속도는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \frac{\Delta t \cdot r_i^t}{M_i} \quad (17)$$

따라서, $t+\Delta t/2$ 에서의 절점 속도는 시간증분 Δt 와 대각절점질량에 의해 표현되며, Barnes²⁾가 제안한 시간증분 Δt 에 관한 식(24)의 관계식으로부터 식(17)과 같은 $t+\Delta t/2$ 의 절점 속도를 아래와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \frac{2 r_i^t}{\Delta t \cdot K_i} \quad (18)$$

따라서 위 식에서와 같이 구조물의 거동은 구조물의 질량과 독립하게 되고, 질량은 다만 수렴성에만 관계하게 된다. $t+\Delta t/2$ 시간증분구간에서의 운동에너지는 속도에 대해 $\sum_{i=1}^{N_i} \frac{1}{2} M_i (v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}})^2$ 이며, 현재의 운동에너지가 전 시간증분구간 $t-\Delta t/2$ 보다 작게되면 최대 운동에너지(kinetic energy peaks)에 도달하였다고 보고, 그 후 모든 절점의 절점 속도를 영으로 놓게 된다. 만약 $t+\Delta t/2$ 시간 증분구간에서 최대운동에너지에 도달하였다면, 구조물의 현재 좌표계인 $X^{t+\Delta t}$ 는 최대 운동에너지가 발생한 정확한 좌표계 상태를 표현하지 않게 된다. 그 이유는 최대운동에너지가 $t+\Delta t/2$ 와 $t-\Delta t/2$ 사이의 구간에서 발생하였기 때문이다. 따라서 이러한 오차를 극복하기 위해서 최대운동에너지가 발생한 상태의 좌표계를 계산하여 이 좌표계에서 새로운 반복계산을 수행해야만 한다. 동적이완법에서는 식(34)와 같이 속도에 대해 선형의 관계식을 통하여 절점증분변위를 계산하기 때문에, 실제적으로 최대 운동에너지가 발생한 시간스텝 t^* 에서의 좌표계 X^{t^*} 는 이전 시간스텝 $t-\Delta t/2$ 에서의 좌표계 X^t 와 Δt^* 의 시간증분차이가 생기게 되며 X^{t^*} 와 Δt^* 는 아래의 과정을 통해 계산된다.

$$\Delta t^* = \Delta t \frac{\Delta E_k^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\Delta E_k^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \Delta E_k^{t-\frac{\Delta t}{2}}} = \Delta t \cdot q \quad (19)$$

식(19)에서 $\Delta E_k^{t+\frac{\Delta t}{2}}$, $\Delta E_k^{t-\frac{\Delta t}{2}}$ 는 현재의 시간스텝과 이전 시간스텝에서의 운동에너지의 차이로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta E_k^{t+\frac{\Delta t}{2}} &= E_k^{t+\frac{\Delta t}{2}} - E_k^{t-\frac{\Delta t}{2}} \\ \Delta E_k^{t-\frac{\Delta t}{2}} &= E_k^{t-\frac{\Delta t}{2}} - E_k^{t-\frac{3\Delta t}{2}} \end{aligned} \quad (20)$$

$$X_i^{t*} = X_i^{t+\Delta t} - \Delta t \cdot v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \Delta t^2 \cdot a_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} \quad (21)$$

식(21)에 식(18)과 식(19)를 대입하여 정리하면 실제 최대 운동에너지가 발생된 시간스텝에서의 좌표계 X^{t*} 는 현재상태의 좌표계, 속도, 불평형력에 의해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_i^{t*} = X_i^{t+\Delta t} - \Delta t(1+q) \cdot v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \frac{\Delta t^2 \cdot q r_i^t}{M_i} \quad (22)$$

식(22)의 간략화된 표현으로 최대운동에너지가 $t-\Delta t/2$ 에서 가상적으로 발생한 것으로 가정하고, Δt^* 에 관한 식(19)에 $q = \frac{1}{2}$ 을 대입하고, 식(22)를 고려하면 X^{t*} 는 식(23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X^{t*} = X^{t+\Delta t} - \frac{3\Delta t \cdot v^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{2} + \frac{\Delta t^2 \cdot r_i^t}{2M_i} \quad (23)$$

따라서, 식(22)와 식(23)에 의해 실제로 최대 운동에너지가 발생한 시간스텝 t^* 에서의 좌표계 X^{t*} 를 구하여 이 상태에서 구조물의 상태를 재 설정하고 반복적 수치해석을 수행한다.

2.3 수치해석의 안정성 및 최적수렴

동적이완법은 시간 증분단계에서 수치해석상 수렴의 안정성(stability)을 위해서 Barnes가 제안한 다음의 시간증분 Δt 의 관계식으로부터 임의의 질량항을 설정한다.

$$\Delta t \leq \sqrt{2 \frac{[M]}{[K]}} \quad (24)$$

위의 과정에 의해 결정된 질량항은 동적이완법에서 최적의 수치해석을 수행하는 가장 중요한 결정요소로 작용한다.

$$[M_i] = \lambda \frac{\Delta t^2}{2} [K_i] \quad (25)$$

식(25)에서 $[M_i]$ 는 i 절점에서의 3×3 질량행렬이고, $[K_i]$ 는 주방향 강성값에 의한 대각행렬이며, λ 는 전체 구조물에 일정한 값을 갖는 수렴계수로서 이 연구에서는 λ 값을 조절함으로써 수렴성을 위한 최적의 질량행렬

을 계산하였고 편의를 위해서 집중질량(lumped masses) 행렬에 의한 대각 질량행렬을 사용한다. 막구조나 케이블구조에서는 구조물 형상의 변화가 크기 때문에 각 절점의 3방향 강성항 중 가장 큰 값을 선택하여 i 절점에서의 3방향 질량값으로 사용한다.

$$M_{xi} = M_{yi} = M_{zi} = \lambda \frac{\Delta t^2}{2} \cdot S_{i \max} \quad (26)$$

케이블요소의 경우 i 절점에서 만나는 m 개의 요소에 대해 $S_{i \max}$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{i \max}^c = \sum \left(\frac{EA}{L_0} + \frac{T}{L_c} \right)_m \quad (27)$$

위식에서 $\frac{EA}{L_0}$ 와 $\frac{T}{L_c}$ 는 각각 m 부재의 탄성축강성(axial elastic stiffness)과 기하강성(geometric stiffness) 값이다. 막요소(CST)의 경우 i 절점에서 만나는 m 개의 요소에 대해 $S_{i \max}$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

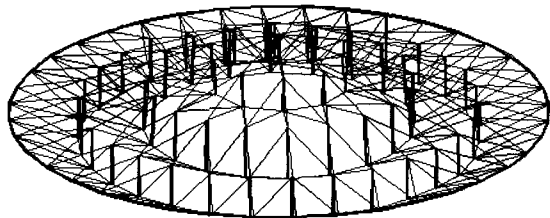
$$S_{i \max} = \sum \left(\frac{t}{4s_0} \frac{E}{1-\nu^2} + \frac{t}{4s_0} (\sigma_x + \sigma_y + \tau_{xy}) \right)_m \quad (28)$$

3. 케이블 돔의 안정화 이행과정해석

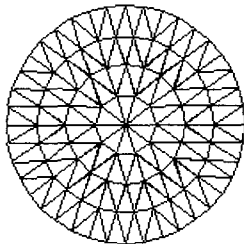
케이블 돔은 케이블, 스트럿, 막요소에 의해 이루어지며, 초기에는 불안정하지만 케이블에 장력을 도입함에 따라 전체 구조시스템이 불안정에서 안정화되어 구조적 특성을 발휘하는 복합구조 시스템(hybrid structural system)이다. 케이블 돔은 안정화 이행과정 해석을 통하여 모든 케이블 부재에 적절한 초기 장력상태를 결정해줌으로써, 외부하중에 의해 케이블과 막요소에 압축응력이 발생하는 불안정현상을 극복해야만 하는 안정화 해석과정이 필요하다. 케이블요소와 막요소는 기하학적 비선형성을 나타내며, 휨강성이 없기 때문에 구조물의 강성확보를 위해서 초기장력을 증가시켜 주어야 하지만, 과도한 초기장력은 압축부재에 과도한 압축력을 발생시키며, 케이블요소의 단면적의 증가를 가져오기 때문에 비경제적일 수 있다.

그림 1은 케이블돔이 완성되었을 때의 최종형상 및 부재이름을 나타내고 있다. 여기서 1-8은 절점번호를 a-h는 부재번호를 의미한다. 그림 1과 같은 케이블 돔의 최종형상 및 각 케이블의 장력발생을 위해 그림 3의

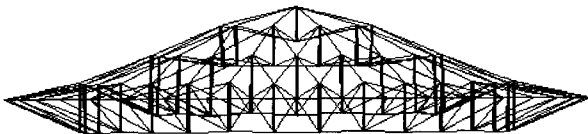
하단의 그림(iter.=0)과 같은 초기형상을 만들고 대각케이블 a, b, c, d에 각각 30ton, 40ton, 50ton, 23ton의 초기장력을 도입하였다. 스트럿, 리지케이블, 후프케이블의



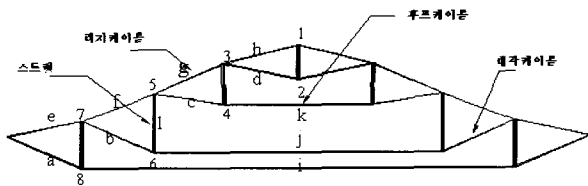
(a) 투시도



(b) 평면도



(c) 입면도



(d) 부재이름 및 절점번호

그림 1 케이블돔의 형상

표 1 안정화 이행과정을 통해 결정된 부재내력(ton)
() : 대각케이블에 도입된 초기장력

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	
대각 케이블	a	18.8(20)	28.9(30)	39.1(40)	49.1(50)
	b	40.1(40)	40.3(40)	40.4(40)	40.2(40)
	c	51.0(50)	51.4(50)	51.3(50)	51.4(50)
	d	30.5(30)	30.9(30)	31.0(30)	31.2(30)
리지 케이블	e	89.303	89.465	90.004	91.693
	f	56.020	55.711	55.342	55.756
	g	47.563	52.003	54.007	59.280
후프 케이블	i	176.608	276.032	377.466	477.888
	j	274.211	274.025	273.180	271.777
	k	214.974	215.981	215.682	n215.352

초기길이 및 제원에 따라 케이블 돔의 최종형상이 결정되고, 대각케이블에 도입되는 초기장력의 크기에 따라 전체 구조물에 발생하는 내력의 크기가 결정된다.

표 1은 안정화 이행과정을 통해 결정된 부재내력을, 표 2는 해석을 통한 구조물의 변위를 나타내고 있다. 그림 2~4는 케이블 돔이 안정화 이행과정을 통해 각각의 부재 내력이 결정되는 과정과 불평형력이 제거되는 과정을 나타낸 것이다. 그림 5는 그림 4의 수렴과정을 통해 케이블 돔의 형상이 결정되는 과정 및 안정화 이행과정을 몇 단계에 걸쳐 나타내고 있다.

표 2 각 모델에 대한 정적, 동적 최대 절점변위 비교() : 절점번호, Δt = 0.02, T: 고유주기, v_m: 평균속도(m/s)

		Case 1 (T : 12.70)		Case 4 (T : 13.11)		
		v _m =20.	v _m =30.	v _m =20.	v _m =30.	
동적 해석	x	5.02(7)	7.05(7)	-18.25(8)	-18.04(8)	
	y	-5.78(7)	-8.06(7)	-28.99(8)	-29.06(8)	
	z	29.34(3)	41.36(3)	67.09(3)	92.67(3)	
정적 해석	바람	x	1.138(8)		-0.948(4)	
		y	0.717(8)		0.585(8)	
		z	-2.437(7)		2.514(4)	
	눈	x	-4.995(8)		-3.496(8)	
		y	4.062(8)		3.318(8)	
		z	-17.218(4)		-18.089(2)	
바람, 눈	x	5.259(8)		3.760(8)		
	y	-3.379(8)		-2.279(8)		
	z	-15.240(4)		-15.533(4)		

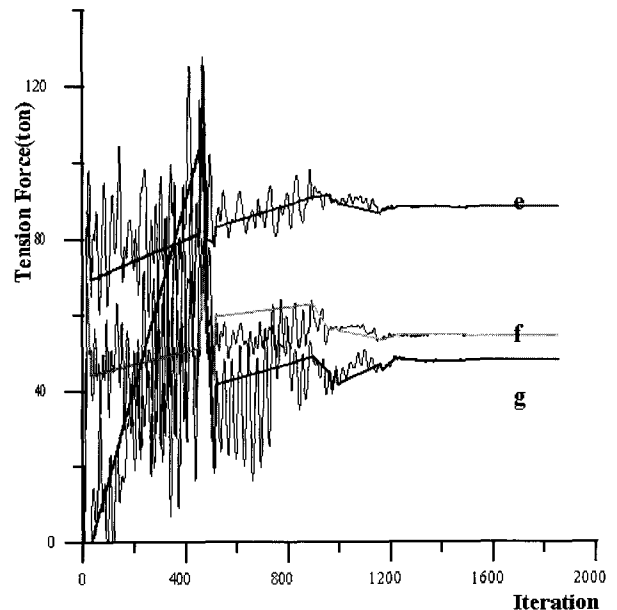


그림 2 리지 케이블 내력의 안정화이행에 따른 수렴과정

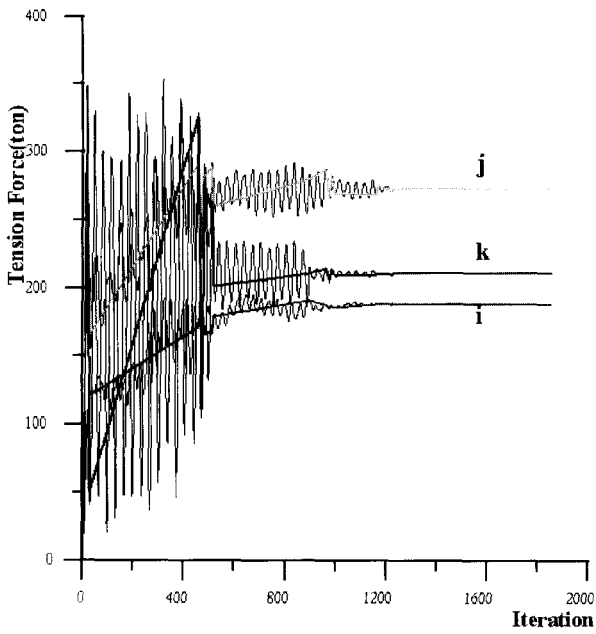


그림 3 후프 케이블 내력의 안정화이행에 따른 수렴과정

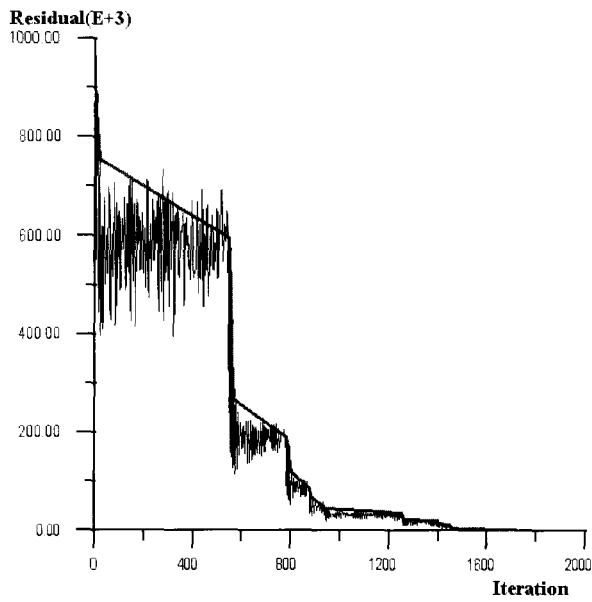


그림 4 케이블 돔의 안정화이행에 따른 수렴과정

4. 케이블 돔의 일부 부재 파단시 안정화 이행 과정해석

4.1 해석 모델

부산 월드컵 경기장을 예로 들어 해석을 수행하였다. 부산 월드컵 경기장(그림 6)은 상부 구조가 228m의 직경에 장변 방향(North-South), 단변 방향(East West)으로 각각 180m와 152m의 타원형의 개구부를 갖는다. 케이블 트러스의 높이는 단변 방향에서 21.6m, 장변 방

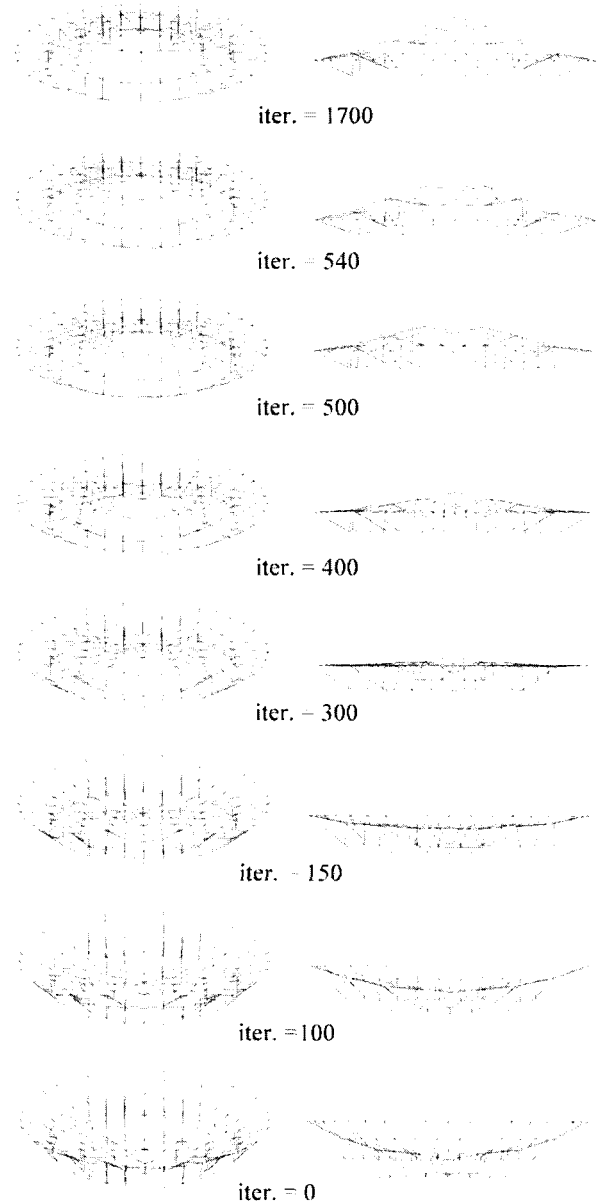


그림 5 케이블 돔의 안정화 이행과정

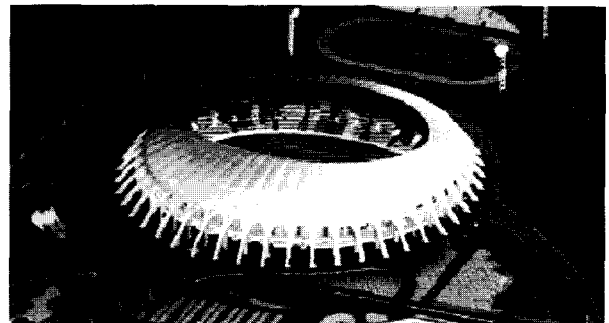


그림 6 해석 모델의 전경

향에서 13.6m 로 연속 되며, 48개의 RC 기둥의 상단을 연결하는 강재 압축링(steel compression ring) 위에 케이블 돔이 놓이게 된다.

파단되었을 경우의 케이블 돔의 변형 형상이며, 그림 12는 그 수렴 과정을 나타내고 있다.

4.2.3 하부 링 케이블 파단의 경우

그림 13은 장변 방향의 하부 링 케이블의 한 요소가 파단 되었을 경우의 안정화 이행과정에 따른 케이블 돔의 변형 형상이며, 그림 14는 그 수렴 과정을 나타내고 있다. 표 3은 부재 파단 전과 후의 부재 내력의 차

이를 나타내고 있다. 표 4의 결과에 의하면 링 케이블의 파단 시 모든 부재의 부재 내력이 감소하고, 파단된 부재의 주변부재는 거의 힘을 받지 못하고 있음을 알 수 있다. 이는 부재의 파단으로 인해 케이블 돔의 형상이 바뀌어서 초기에 형상을 유지하는데 필요했던 부재 내력을 잃게 됨을 의미한다. 파단 후의 변형 형상을 보면 상, 하부의 어느 한쪽의 링 케이블이 힘을 받지 못하게 되어 반대쪽 방사 케이블이 이루는 각이 완만해지고 있다. 따라서 부재는 원래의 형상에서 보다 더 작은 부재 내력이 필요하게 되는 것이다. 하부 링 케이블의 경우를 보면 수직 케이블만이 부재 내력이 배 가까이 증가한다. 이것은 하부의 부재들이 제 형상을 잃으면서 상부 부재에 수직 케이블과 포스트가 매달리는 것과 같이 되어 하부 부재의 자중의 어느 정도를 수직 케이블과 포스트가 부담하는 결과이다. 방사 케이블의 파단의 경우 방사 케이블만이 조금 호트러짐을 보였을 뿐 형상의 큰 변화는 가져오지 않았으므로 부재 내력의 변화도 그만큼 작음을 알 수 있다.

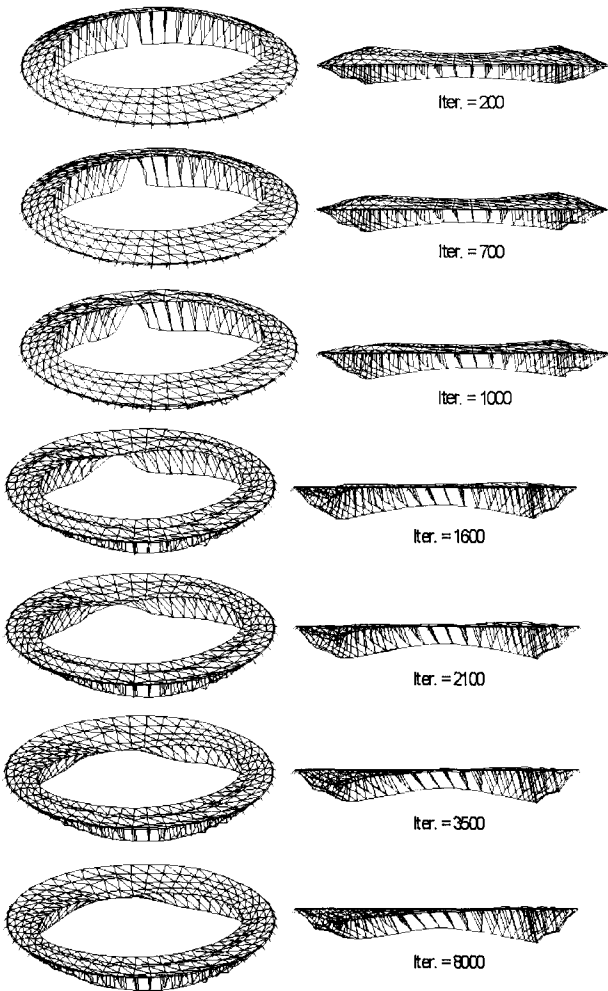


그림 13 하부 링 케이블의 파단

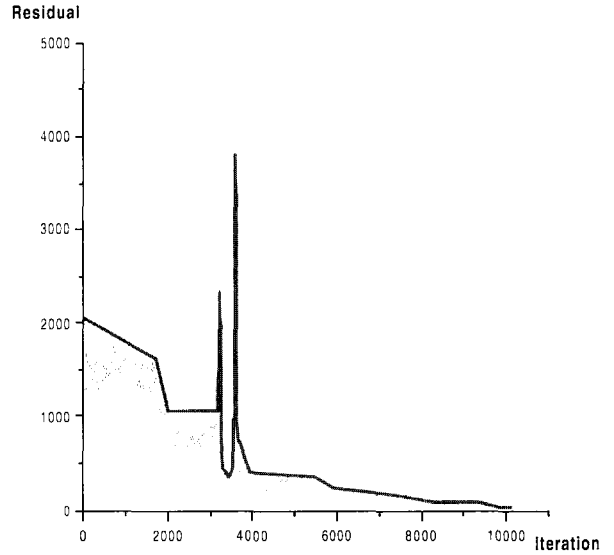


그림 14 하부 링 케이블 시의 수렴 과정

표 3 부재 파단후 부재 내력의 변화(ton)

		부재 파단 전 부재 내력	상부 링 케이블 파단 후		하부 링 케이블 파단 후		하부 방사 케이블 파단 후	
			부재내력	증감	부재내력	증감	부재내력	증감
상부 방사 케이블	장변 방향	61.406	18.356	70.1%	20.302	-66.9%	47.145	23.2%
	단변 방향	91.093	21.639	76.2%	32.720	64.1%	77.764	14.6%
하부 방사 케이블	장변 방향	100.350	61.889	38.3%	14.753	85.2%	99.362	0.9%
	단변 방향	152.015	95.964	36.9%	25.004	83.6%	151.710	0.2%
상부 링 케이블		477.158	29.634	93.8%	160.227	66.4%	481.642	0.9%
하부 링 케이블		819.4	516.022	37.0%	129.828	84.2%	820.442	0.1%
수직 케이블		3.079	1.467	53.3%	6.102	98.2%	3.135	0.1%

5. Stressed-Arch System의 안정화 이행과정

최근 새로운 대공간 구조 시스템으로 도입된 Stressed-Arch 시스템은 프레임을 지면에서 조립한 후, 하현재에 포함되어 있는 스트랜드에 프리스트레스를 도입시킴으로써 아치 형태를 갖게 하는 특수한 설치 과정이 포함된 공법을 채택하고 있다. 그리고 강재 트러스, 아치 및 스트랜드의 장점을 살려 재료의 효율적인 이용과 구조적인 안정성을 동시에 얻을 수 있는 복합 구조 시스템이다. 이 시스템은 구조계의 조립, 길이 방향의 설비 덕트나 조명시설, 각종 배관과 지붕 마감 등을 기둥 높이에서 설치한 후, 유압적으로 트러스 하현재 내의 스트랜드에 인장력을 도입하여 최대 300m 정도의 무주 대공간 구조물을 세울 수 있으며, 인천국제공항의 Asiana Hangar의 지붕구조에 적용되었다.

5.1 Stressed-Arch 시스템

5.1.1 Stressed-Arch 시스템의 개요

Stressed-Arch 시스템은 상현재, 웨브재, 스트랜드를 포함하는 하현재로 구성되어 있으며, 이 프레임들은 전체 구조 부재, 또는 중도리와 철재 지붕으로 구성된 지붕과 벽에 의해 연결되어 있다. 하현재의 긴장 결과 구조물은 아치 또는 볼트 형상을 갖게 되며 양단은 케이블 정착공법에 의해 마감된다. 그림 15는 이 시스템의 일반적인 프레임 배열을 보여주고 있으며, 용도에 따라 여러 가지 형태로 응용할 수 있다.

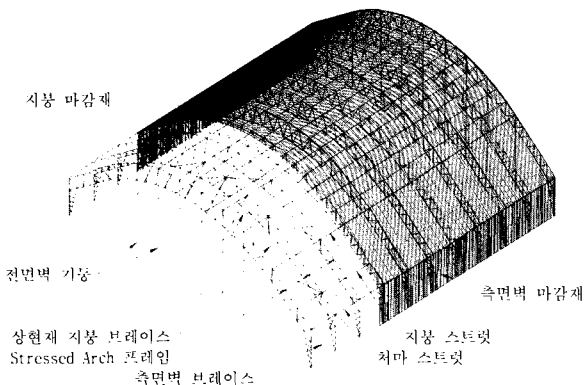


그림 15 Stressed-Arch 시스템

5.1.2 Stressed-Arch 시스템의 형태

Stressed-Arch 시스템은 라이즈-스팬 비에 따라 그림 16과 같이 분류할 수 있으며 다양한 요구 조건에

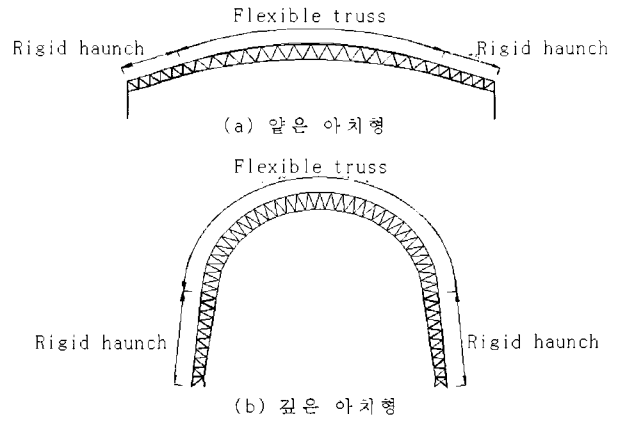


그림 16 Stressed-Arch 시스템의 형태

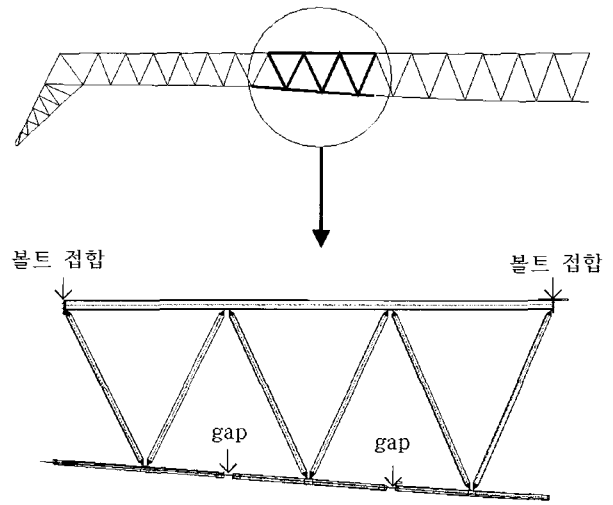


그림 17 Stressed-Arch 시스템의 부재구성

따라 지붕높이, 처마 높이 및 스패인이 결정된다.

Stressed-Arch 시스템의 구조는 안정화 이행과정 도중이나 이후에 연성부분(flexible truss)과 강성부분(rigid haunch)으로 나뉘어 지며, 트러스 하현재의 접합부는 특수 sliding joint(그림 17에서 보이는 갭)를 갖는다. 하현재가 안정화 이행과정 중에 갭(gap)이 닫히면서 트러스의 연성부분을 휘게 하여 최종 형태를 이루며, 정확한 형태는 갭의 크기와 분배에 따라 결정된다.

시스템의 상현재는 대부분 각형 강관, 하현재 및 웨브재는 원형 강관으로 구성된다. 그림 17은 시스템의 전형적인 프레임을 나타내고 있으며, sliding joint는 트러스의 연성부분 하현재에 위치한다.

5.2 Stressed-Arch 시스템의 안정화 이행과정 해석

Stressed-Arch 시스템은 크게 최종적인 형상을 갖추는 안정화 이행과정과 그 이후의 단계로 구분할 수 있다. 여기에서는 전체 시스템의 실물 크기 시험체를 모

델팅하여 동적이완법을 적용한 비선형 해석 프로그램으로 안정화 이행과정에 대한 수치해석을 수행하고, 이에 따른 구조체의 거동을 예측한다.

5.2.1 수치해석 결과 및 고찰

해석모델은 인천국제공항의 Asiana Hangar로 모두 12개의 Stressed-Arch 프레임으로 구성되어 있으며, 그 중 양 측면이 보강되지 않은 일반적인 프레임과 상현재의 양 측면이 보강된 프레임을 선택하여 시공과정에 대한 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 모델은 그림 18과 같다. 구조해석을 통해 하현재 내에 포함된 스트랜드의 긴장력을 20 톤씩 단계별로 증가시키면서 상·하현재 및 웨브재의 부재력을 산정하고 최종형상을 얻을 때까지의 수렴성을 검토하였으며, 안정화 이행과정에 대한 해석결과는 그림 19~20에 나타난 바와 같다.

전체 프레임에 대한 안정화 이행과정 해석 결과, 하현재의 갭이 모두 닫히고 목적형상에서의 하현재 긴장력은 일반적인 프레임에서는 120 톤, 보강된 프레임에

서는 130 톤 정도로 조사되었다. 또한 안정화 이행과정에서 상현재가 단기적으로 부담해야 할 내력은 일반 프레임에서 최대 132.2 톤이며, 목적형상에 도달한 이후에는 83.9 톤 정도의 압축력이 작용하게 될 것으로 해석되었다. 상현재 측면이 보강된 프레임에서는 상현재가 단기적으로 부담해야 할 내력은 최대 143.6 톤이며, 형상이 갖춰진 이후에는 108 톤 정도의 하중이 작용하게 될 것으로 나타났다.

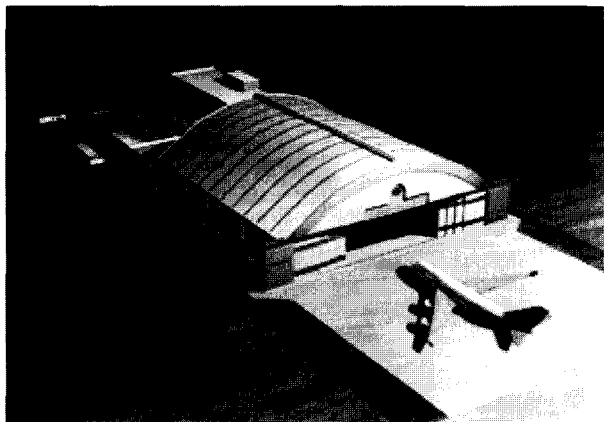


그림 18 해석 모델의 전경

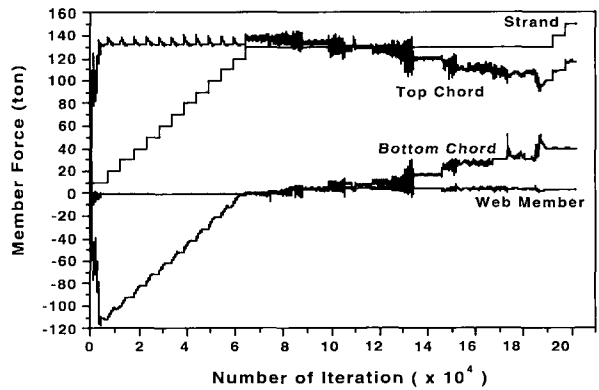


그림 20 하현재 긴장에 따른 각 부재의 응력 변화 (보강 프레임 - rise/span=0.368)

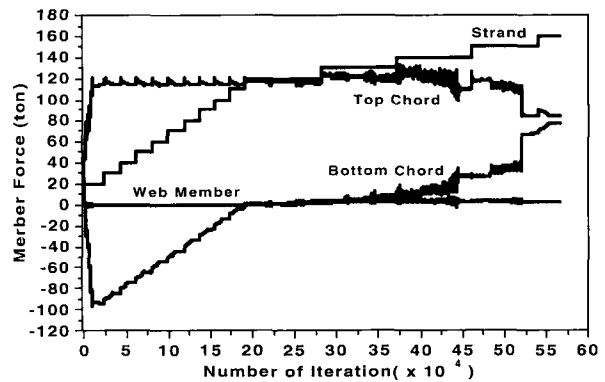


그림 21 하현재 긴장에 따른 각 부재의 응력 변화 (일반 프레임 - rise/span=0.312)

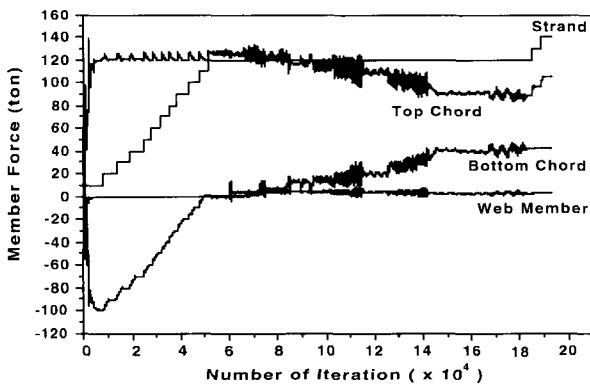


그림 19 하현재 긴장에 따른 각 부재의 응력 변화 (일반 프레임 - rise/span=0.368)

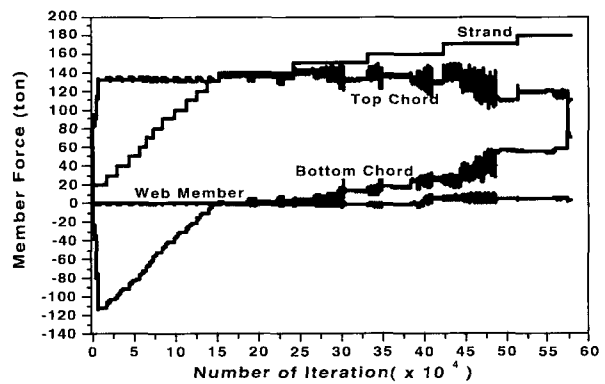


그림 22 하현재 긴장에 따른 각 부재의 응력 변화 (일반 프레임 - rise/span=0.483)

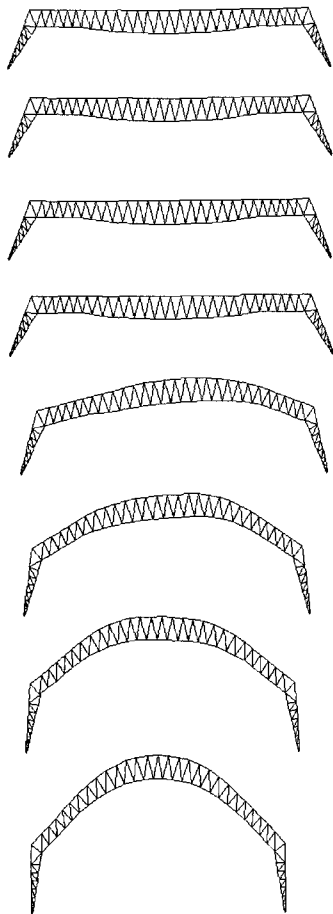


그림 23 하현재의 긴장에 따른 안정화 이행과정



그림 24 Asiana Hangar의 실제 시공 과정

안정화 이행과정 해석에서 시험체가 목적형상에 수렴하기까지의 반복계산 회수(iteration)는 일반 프레임은 193,012회, 보강된 프레임은 201,596회로 나타났다.

그림 21과 그림 22는 Stressed-Arch 시스템의 rise-span 비가 변화에 따른 각 부재의 내력을 보여주고 있다.

6. 맺음말

최근 국내에서는 스포츠·문화 활동의 활성화와 함께 스포츠 시설 및 문화센터의 구조시스템으로 대공간구조가 많이 활용되고 있다. 또한, 2002 한일 월드컵 축구경기, 인천 신공항 건설 등 국가적 이벤트를 수행하기 위한 건축물의 구조시스템으로 래티스 돔, 케이블 + 막 구조 등 다양한 공간구조 시스템이 활용되기 시작하였으며 산업화에 따른 물류시설의 수요가 증가하면서 철골부재를 이용한 다양한 형태의 구조시스템이 제안되고 있다. 이들 구조시스템 중 케이블, 케이블 + 막 또는 케이블 + 트러스로 이루어진 복합 구조물은 장력의 도입에 따라 불안정 상태에서 안정상태로 변환되며 이 과정의 해석은 구조물의 안정상태를 규명하는데 매우 중요한 프로세스가 된다. 반대로 안정한 구조물의 일부 부재 파단 시 구조물의 붕괴과정 규명도 매우 필요한 과정으로 사료되며, 본고에서는 동적이완법을 이용하여 케이블 돔 및 Stressed-Arch 시스템을 대상으로 구조적 특성을 규명하였다. 여기에서 제시된 시공과정 해석 기법이 대공간 구조물의 거동특성 규명에 많이 활용될 수 있기를 기대한다.

참고 문헌

1. Argyris, J. H., and Scharpf, D. W., "Large deflection analysis of prestressed network", *J. Struct Div. ASCE*, V.48, 1972, pp.633~654
2. Barnes, M., "Non-linear numerical solution methods for static and dynamic relaxation", IL Publication, No. 15, 1982, pp.150~166
3. Day, A. S., "An Introduction to Dynamic Relaxation", *The Engineer, London*, Vol. 219, 1965, pp.18~221
4. Hangai, Y. and Kawaguchi, K., "Analysis of Shape-Finding Process of Unstable Link Structures", *Bulletin of IASS*, Vol. 30, No. 2, 1989, pp.116~128
5. Hancock, G. J., Clarke, M., Key, P. and Olsen, C., "Structural Tests on the Top Chord of Strarch Frames", University of Sydney
6. Hancock, G. J. and Key, P., "An Experimental Investigation of the Column Behaviour of Cold-Formed Square Hollow Sections," Research Report No. R493, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, June 1985
7. Hancock, G. J., Key, P. and Hasan, S. W., "Column

- Behaviour of Cold-Formed Hollow Sections," *Journal of the Structural Division, ASCE*, 1988, pp.390~407
8. Hancock, G. J. and Clarke, M., "Design of Top Chord of Stressed-Arch Frames," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vo. 121, No. 2, 1995, pp.187~200
11. 한상을, 윤중현, "케이블 돔의 안정화 이행 및 붕괴 과정 해석", 대한건축학회 논문집, 2001. 9
12. 한상을, 김종범, "stressed-arch 시스템의 구조성능에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 2001. 12 