

선형 전산해석을 이용한 자연 습식 냉각탑의 기하형상에 대한 평가

Evaluation of Shell Geometry of the Natural Draught Cooling Tower using Linear Numerical Analysis

노 삼 영* 이 상 윤** 허 동 현***
Noh, Sam-Young Lee, Sang-Yun Heo, Dong-Hyun

요 약

하이퍼볼릭 셸로 구성된 냉각탑에서 셸의 형상은 풍하중에 대하여 냉각탑 전체의 동적 거동에 민감하게 응답한다. 이에 따라 냉각탑 설계 시 기하형상의 결정은 매우 중요하며 일반적으로 고유진동수를 기반으로 하여 산정한다. 본 연구의 목적은 냉각탑 셸의 구조적 거동에서 형상변수가 미치는 영향을 파악하고자 한다. 기존의 냉각탑 형상변수를 변화시켜 32개의 모델을 선정하였고 이를 1차 고유진동수를 기반으로 하여 분석한 후, 3개의 대표적인 형상을 선택하여 선형 해석을 수행하였다. 그 결과, 전체적으로 작은 반지름을 가지는 기하형상이 높은 1차 고유진동수를 나타내고 풍하중에 대하여 덜 민감한 시스템이 되는 것을 알 수 있었다.

Abstract

In the design procedure of the cooling tower the form-finding of the shell is the most important process, because the shape of the shell determines the sensitivity of dynamic behaviour of the whole tower against wind excitation. In engineering practice, geometric parameters of the shell are generally determined based on natural frequency analysis. 32 cooling tower shell geometries were selected through variation of the geometric parameters of an existing cooling tower shell. They were evaluated based on the first natural frequency. From the result three representative cooling towers are selected for the analysis of the structural behaviour by means of linear FE-method. As a result, a hyperbolic rotational shell with the small radius overall will yield the shell geometry with a higher first natural frequency and thus a wind-insensitive structure.

키워드 : 냉각탑, 하이퍼볼릭 셸, 경선방정식, 고유진동수

Keywords : Cooling tower, Hyperbolic shell, Generator, Natural frequency

1. 서 론

최근 원자력 발전소 건설사업 해외수주로 인해 국내 원자력 발전기술이 국제적으로 관심을 받고 있다. 원자력 발전소의 구성은 원자로를 중심으로 한 1차 계통으로서의 핵 증기 공급계통과 증기를 공급받아 발전하는 터빈-발전기 및 복수기를 포함한 2차 계통 그리고 냉각시스템 및 기타 부속설비로 구분된다. 이때 냉각시스템은 2차 계통에서 사용된 증기의 냉각과정에

서 더워진 냉각수를 다시 냉각시키는 시스템으로 냉각탑을 이용한 냉각-Circuit-System을 형성하는 방법과 해수와 같은 자연수를 이용하는 방법이 사용된다. 그 중 국내 원전에 사용되는 냉각방식은 자연수를 이용한 방법으로, 사용한 자연수는 수온이 약 $7^{\circ}C$ 정도 상승된 온배수로 바다에 배출되어 인근 연안 생태계에 큰 영향을 미치고 있다. 반면 해외 선진 국가에서는 자연수를 이용한 냉각방식을 지양하고 냉각탑을 이용한 냉각시스템을 사용하고 있다.

원자력 발전을 친환경적 저탄소 녹색성장의 에너지원으로 이끌기 위해서는 생태계 보호 및 에너지 소비 최소화, 냉각 효율이 높은 장점을 가진 습식냉각탑의 도입이 필요하다. 이러한 냉각탑은 발전소의 규모가 커짐에 따

* 정회원, 한양대학교 건축학부 부교수, 공학박사

** 학생회원, 한양대학교 건축환경공학과 박사과정

Tel:070-7526-5182 Fax:031-419-6182

E-mail : yongsha@naver.com

*** 학생회원, 한양대학교 건축환경공학과 석사과정

라 냉각탑이 대형화가 되고, 이에 따라 풍하중이 크게 작용하여 특수 구조물인 냉각탑의 구조설계 및 유지보수에 대한 연구 및 기술개발이 한층 더 요구된다.

국내연구로는 최창근, 노혁천¹⁾이 냉각탑의 반지름과 셸 두께를 추계장으로 가정하여 두 인수의 임의성이 구조거동에 미치는 영향에 대해서 연구하였고, 반지름에서의 불확실성이 셸 두께에서의 불확실성보다 구조거동의 반응변화도에 매우 큰 영향을 미치는 것을 강조하였다. 또한 민창식, 김생빈²⁾은 탄성과 비탄성해석으로 유한요소 망의 수렴관계(mesh convergence)를 연구하였으며, 유한요소의 크기가 냉각탑의 극한거동을 예측하는데 매우 중요한 역할을 하는 것으로 보고하였다

냉각탑의 기하형상에 대한 연구로는 주로 해외에서 이루어졌고 Busch et al. (1997)³⁾ 및 Harte et al. (1999)⁴⁾ 등이 있으며 이들은 냉각탑 셸의 형상 최적화를 위한 중요한 변수로서 목높이와 하단부 경사각을 제시하였다. 냉각탑의 높이가 상승함에 따라 고유진동수가 감소하여 풍 스펙트럼의 활동영역에 가까워져 냉각탑의 거동에 민감하게 반응한다. 이에 대하여 Harte et al. (1999)⁴⁾은 냉각탑의 높이에 따라 수직 곡률이 연속적으로 증가하고 큰 변화가 없는 셸 형상이 풍하중에 대하여 가장 좋은 거동을 보이는 것으로 보고하였다. 또한 점진적으로 손상을 받는 구조물에 있어서 비선형적 거동에 대한 분석이 요구됨을 강조하였다.

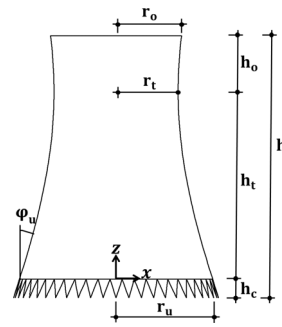
냉각탑 셸의 형상은 열역학적 측면에서 결정되는 4개의 기하변수와 구조적 측면에서 결정되는 3개의 구조변수로 선택되어지며 이들에 의해 냉각탑의 구조성능이 결정된다. 위의 3개의 변수를 결정함에 있어 1차적으로 고려되는 응답변수는 냉각탑의 고유진동수이다. 낮은 고유진동수를 갖는 냉각탑은 풍하중에 의한 동적증폭계수를 낮춤으로 풍하중에 대하여 상대적으로 덜 민감한 구조시스템을 나타낸다. 구조설계 실무에 있어서 냉각탑은 최종적으로 철근량에 의한 설계의 경제성에 의해 평가되어 진다. 선형해석을 기반으로 하는 실무에서 3개의 셸 기하형상 구조변수들의 결정은 비교적 경험에 의존하고 있으며, 이에 대한 체계적인 분석에 관한 연구는 아직 발표된바 없다.

본 연구에서는 냉각탑 셸의 구조적 거동에서 형상변수가 미치는 영향을 파악하고자 한다. 먼저 기존의 냉각탑을 대상으로 형상변수를 변화시켜 32개의 셸형상 모델을 선정하여 3개의 구조변수와 고유진동수

와의 관계의 경향을 추정하였다. 이때 최대 고유진동수를 나타내는 형상과 최소 고유진동수가 나타나는 형상을 최종 선정하여 자중, 온도 및 풍하중에 대한 선형해석을 수행한 후, 그 결과를 바탕으로 비교 및 분석을 수행하였다.

2. 냉각탑 기하형상

냉각탑 셸의 형상은 목표로 하는 냉각효율을 달성하기 위하여 열역학적 측면에서 <표 1>과 <그림 1>의 4개의 기하 변수가 결정되며, 나머지 3개의 구조변수로 하단부 경사각(Angle of base lintel, φ_u), 목높이(Hight of throat, h_t), 상단부 반지름(Radius of top lintel, r_o)은 구조적 측면에서 구조 설계자에 의해 선택되어지며, 이들에 의해 셸의 구조성능이 결정된다.



<그림 1> 냉각탑 하이퍼볼릭 셸의 형상

<표 1> 냉각탑 하이퍼볼릭 셸의 형상변수

Thermodynamics (fixed)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 전체높이 (h) ▪ 기둥높이 (h_c) ▪ 하부 셸 반지름 (r_u) ▪ 목부분 반지름 (r_t)
Structural mechanics (free)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 하단부 경사각 (φ_u) ▪ 목높이 (h_t) ▪ 상부 셸 반지름 (r_o)

2.1 냉각탑의 경선방정식

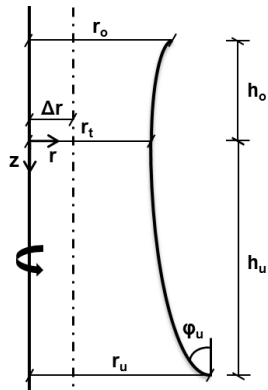
셸의 기하변수의 영향에 대한 체계적인 분석을 위해서는 냉각탑 셸의 회전축과 이에 수직한 평면좌표계에서 생성된 곡선방정식, 즉 경선방정식(Generator Equation)으로 사용되는 식 (1)의 하이퍼볼릭 방정식에 대한 분석에서 출발할 수 있다.

$$r = \Delta r + A \sqrt{1 + \left(\frac{z}{B}\right)^2} \quad (1)$$

이때, 셸의 목높이는 $z = 0$ 에 위치하며 r 은 회전축 z 의 높이에 대한 셸의 반지름, Δr 은 셸 회전축 거리, A 는 목부분에서의 회전 반지름, B 는 냉각탑 경선의 곡률을 결정하는 상수이다.

2.2 상부 및 하부 셸의 경계조건

<그림 2>와 같이 z 는 냉각탑 목높이를 원점으로 하는 경선방향의 좌표축으로 $z = h_u$ 일 때 $r = r_u$ 으로 나타낼 수 있으며, 이는 하부 셸의 반지름으로 표현된다. 같은 방법으로 상부 셸의 반지름은 $z = h_o$ 일 때 $r = r_o$ 로 나타낼 수 있다.



<그림 2> 셸의 기하형상

이때, 상부 및 하부 셸의 전이조건을 만족하기 위해 목 높이 $z = 0$ 에서 접선의 기울기가 0이 되며($\tan\varphi_t = 0$) 다음과 같은 경계조건으로 정리할 수 있다.

<표 2> 상부 및 하부 셸의 경계조건

하부 셸	$\Delta r_u = r_t - A_u$
	$A_u = \frac{r_u - r_t}{\left(\sqrt{\frac{1 + h_u^2}{B_u^2 - 1}}\right)}$
	$B_u = \sqrt{\frac{-k_u^2}{(2k_u - h_u^2)}}$
	이때, $k_u = -\frac{h_u(r_u - r_t)}{r_u'} + h_u^2$
상부 셸	$\Delta r_o = r_t - A_o$
	$A_o = \frac{(r_o - r_t)^2}{h_o^2 \square r_t'' - 2(r_o - r_t)}$
	$B_o = \sqrt{\frac{A_o}{r_t'}}$

2.3 냉각탑 셸의 구조변수에 대한 경계조건

냉각탑 셸의 구조변수는 하단부의 경사각, 목부분의 위치 및 상부 반지름이 있으며 이들에 의해 구조성능이 결정되어 진다. <표 3>은 셸 형상을 결정하기 위한 구조변수의 경계조건으로써 이들은 구조적, 경제적 및 디자인적 측면을 체계적으로 고려하여야 한다.

<표 3> 셸의 구조변수 경계조건

목높이(h_t)	$\frac{r_u - r_t}{\tan\varphi_u} < h_u < h$
하단부 경사각(φ_u)	$\arctan\left(\frac{r_u - r_t}{h_u}\right) < \varphi_u < \arctan\left(2\frac{r_u - r_t}{h_u}\right)$
상부 반지름(r_o)	$r_t \leq r_o \leq r_t + \frac{1}{2}\left(h_o^2 \square \frac{A_u}{B_u^2}\right)$

3. 냉각탑 기하형상 선정

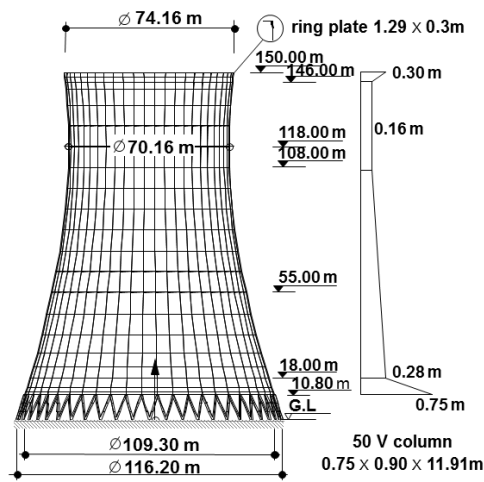
냉각탑의 셸 기하형상 구조변수들의 결정은 서론에서 언급하였듯이 비교적 경험에 의존하고 있으며 각 변수들에 대한 체계적인 연구가 요구된다. 본 연구에서는 곡률의 급격한 변화가 발생하는 두 개의 쌍곡선 곡률을 배제하고 하나의 쌍곡선 곡률을 나타내는 기하형상을 선정하였으며, 우선적으로 유한요소 프로그램을 이용하여 고유진동수에 대한 평가를 수행하였다.

3.1 프로토타입 모델

프로토타입 모델은 Noh et al. (2004)⁵⁾이 해석 예로 선택한 1979년 스위스에 건설된 G 원자력 발전소의 냉각탑을 대상으로 구조변수의 영향을 분석하였다. 냉각탑의 개요는 <표 4> 및 <그림 3>와 같으며 최상부($h = 150m$)는 내부로 1.29m의 보강링으로 구성되어 있다.

<표 4> 재료특성 및 지반조건

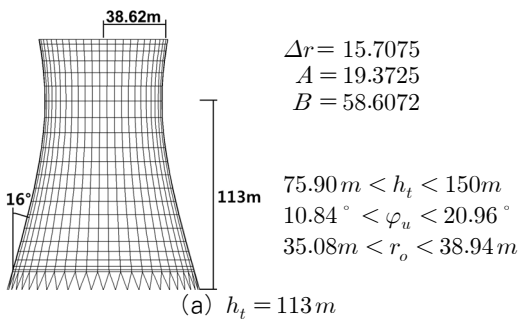
셸 기둥	HD500	E_c	25 MN/m ²
			35 MN/m ²
독립기초	$E/D/B$		4.0m/5.0m/1.5m
	$C_x = C_y = C_z$		240 MN/m
	C_{mx}		320 MN/m
	C_{my}		500 MN/m
	C_{mz}		656 MN/m
지반	K		12 MN/m ²



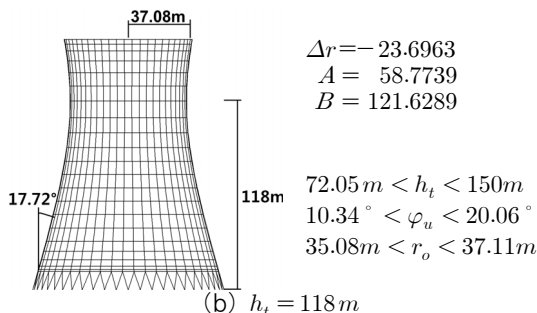
〈그림 3〉 프로토타입 냉각탑의 개요

3.2 구조변수를 고려한 형상의 선정 및 평가

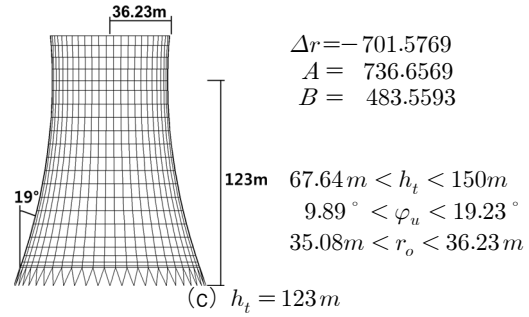
기하형상은 목높이, 하단부 경사각 및 상부 반지름의 영향을 고려하여 선정하였다. 프로토타입 냉각탑의 목높이 $h_t = 118m$ 을 기준으로 상·하부로 각각 5m, 10m를 변화시킨 형상 $h_t = (128m, 123m, 118m, 113m, 108m)$ 과 이에 따라 하단부 경사각을 1° 씩 변화시킨 형상($\varphi_u = 15^\circ, 16^\circ, 17^\circ, 17.72^\circ, 18^\circ, 19^\circ, 20^\circ$)에 대하여 32개의 기하형상을 선정하였으며 대표적인 형상을 <그림 4>와 같이 나타내었다. 이때 기하형상의 경계조건은 <표 2>와 <표 3>을 적용하여 $\Delta r, A, B$ 를 결정하였다.



(a) $h_t = 113m$

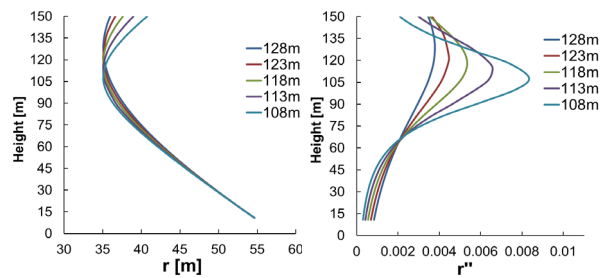


(b) $h_t = 118m$

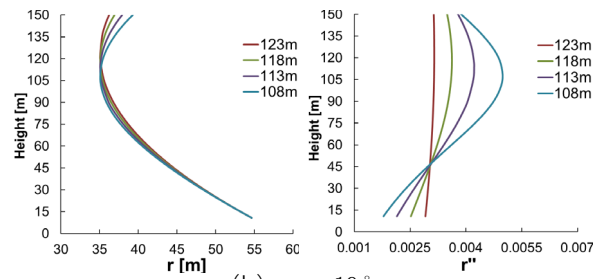


〈그림 4〉 해석모델의 구조변수 및 경계조건

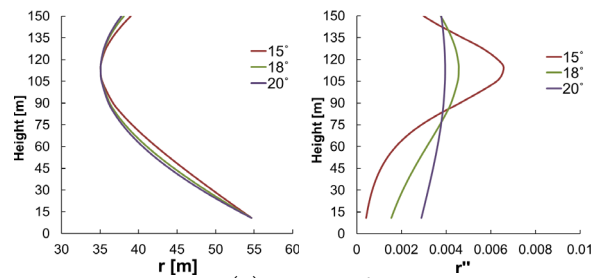
기하형상의 1차적 평가는 고유진동수를 이용하였으며 이를 산출하기 위하여 본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램 FEMAS 2000⁶⁾을 사용하였으며 사용된 요소는 기둥에 233절점 6자유도 BEAM요소를, 셸과 상부 보강링에 624절점 48자유도 SHELL요소를 적용하였다. 해석모델은 축방향에 대하여 대칭을 이루고 있으며 전체 구조물의 1/2에 해당하는 부분을 원주방향에 대하여 25개, 경선방향에 대하여 21개의 요소로 나누어 모델링하여 해석을 수행하였다.



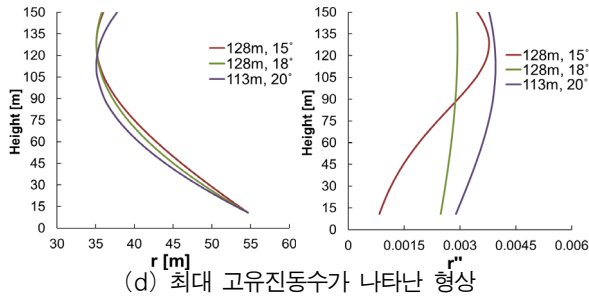
(a) $\varphi_u = 15^\circ$



(b) $\varphi_u = 19^\circ$



(c) $h_t = 113^\circ$



(d) 최대 고유진동수가 나타난 형상
 <그림 5> 32개의 형상에 대한 r, r''

32개의 기하형상에 대하여 높이에 대한 경선 (Generator)의 분석을 수행하기 위하여 <그림 5>와 같이 식 (1)을 이용하여 높이에 대한 r, r'' 를 나타내었다.

하단부 경사각이 커질 때 하부 셀의 반지름이 감소하였고 목높이가 높아질수록 상부 셀의 반지름이 감소하여 상부 셀 반지름의 증가율이 하부 셀 반지름의 감소율보다 더 크게 나타난 것을 알 수 있다. 또한 셀의 높이에 대한 곡률은 목높이와 하단부 경사각이 증가할수록 일정하게 나타났다.

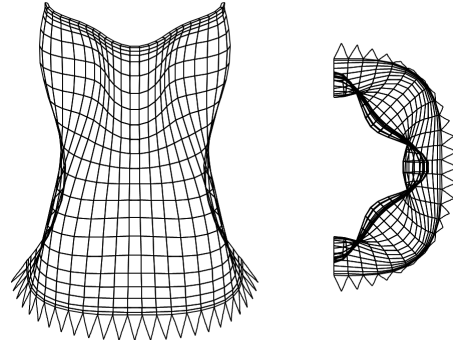
<표 5> 32개의 기하형상에 대한 1차 고유진동수

		108m	113m	118m	123m	128m
f_1 [Hz]	15°	0.5868	0.5942	0.6078	0.6288	0.6528
	16°	0.6215	0.6217	0.6302	0.6468	0.6676
	17°	0.6499	0.6546	0.6571	0.6686	0.6848
	17.72°	0.6650	0.6792	0.6774	0.6848	0.6973
	18°	0.6719	0.6899	0.6865	0.6920	0.7030
	19°	0.6965	0.7261	0.7166	0.7162	-
	20°	0.7215	0.7520	0.7462	-	-

<표 5>는 32개의 형상에 대한 고유진동수를 나타낸 것으로 목높이 $h_t = 113m$ 와 하단부 경사각 $\varphi_u = 20^\circ$ 에서 고유진동수가 최대 11.01%가 증가하였으며 $h_t = 108m$ 와 $\varphi_u = 15^\circ$ 에서 최대 13.38% 감소하였다. 1차 고유진동수는 각각의 목높이에 대하여 하단부 경사각이 커질수록 증가하는 경향이 나타났다. 또한 하단부 경사각이 18° 보다 작을 경우 목높이가 높아질수록 1차 고유진동수가 증가하였으며 경계조건을 만족하는 최대 목높이에서 최대 고유진동수가 나타났다. 하지만 하단부 경사각이 18° 를 넘는 경우 최대 1차 고유진동수는 $h_t = 113m$ 에서 나타났다.

<그림 6>은 냉각탑의 1차 고유모드 형상으로 최상부에서 가장 큰 변형이 나타난다. 이러한 셀의 변형은 반지름이 원주방향 강성에 직접적인 영향을 미치며 상부 셀에서 감소된 반지름이 셀을 더 효과적으로 강성을

증가시켜 1차 고유진동수를 증가시킨 것을 알 수 있고 이는 목높이와 하단부 경사각이 증가할 때 나타났다.



<그림 6> 냉각탑의 1차 고유모드 형상

32개의 형상에 대한 구조변수의 분석은 풍하중에 대하여 민감하게 응답하는 셀에 대한 1차 고유진동수와 하단부 경사각의 관계를 명확히 보여주고 있으나 목높이에 대한 영향을 파악하기 어렵다. 하지만 이 분석 결과를 이용하여 풍하중의 동적 응답 관점에서 프로토타입 냉각탑의 셀 기하형상을 합리적으로 결정할 수 있다.

4. 선정된 기하형상의 선형해석

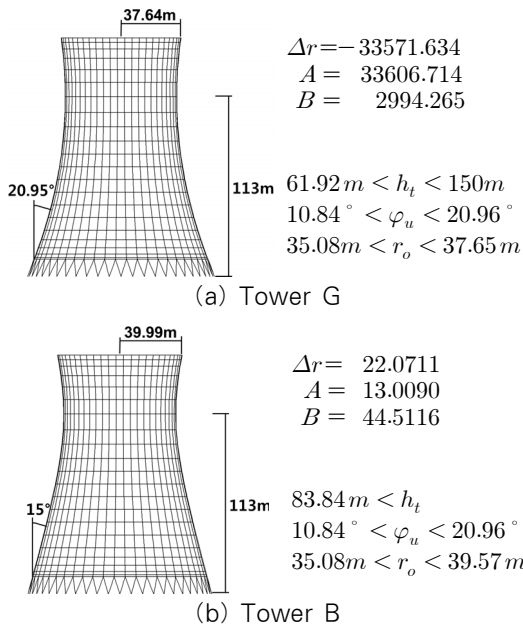
4.1 대표 모델의 선정

3.2장에서 같은 목높이인 경우 하단부 경사각이 커질수록 반지름 r 및 곡률 r'' 이 감소하고 고유진동수가 증가하는 것을 알 수 있었다. 본 장에서는 이 경향을 적용하여 대표 모델을 선정하고자 한다.

3.1장에서 <그림 3>과 같이 나타난 프로토타입 모델($h_t = 118m, \varphi_u = 17.72^\circ$)을 Tower P, 3.2장에서 최대 고유진동수가 나타나는 목높이인 $h_t = 113m$ 에서 하단부 경사각이 최대가 되는 형상($\varphi_u = 20.95^\circ$)을 Tower G(good) 및 최소 고유진동수가 나타나는 형상($\varphi_u = 15^\circ$)을 Tower B(bad)로 선정하여 이에 대한 1차 고유진동수, 콘크리트 부피 및 개요를 각각 <표 6>, <그림 7>과 같이 나타내었다.

<표 6> 대표 모델의 1차 고유진동수 [Hz]와 콘크리트 부피[m³]

	Tower B	Tower P	Tower G
f_1 [Hz]	0.5942	0.6774	0.7671
V_c [m ³]	8379	8295	8171



〈그림 7〉 선정된 기하형상의 구조변수 및 경계조건

4.2 작용 하중

본 장에서는 3.3장에서 선정한 3개의 기하형상을 대상으로 선형해석을 수행하고자 한다. 먼저 좌굴해석을 수행하여 안정성을 평가하였고, 최종적으로 경제성 평가를 위하여 철근 배근량을 산정하여 비교 및 분석을 하였다.

냉각탑에 작용하는 주된 하중은 건설재료로 사용되는 철근콘크리트의 자중과 풍하중, 그리고 온도하중 등이 있으며 지진 지대에 설치된 냉각탑의 경우 지진 하중에 의한 검토를 필요로 하므로 이 경우 지진하중 등의 동적하중이 주된 하중으로 추가된다. 본 연구에서는 독일의 VGB-BTR (1997)⁷⁾에 제시되어 있는 자중 (G), 풍하중 (W) 및 온도하중 (T)을 적용하여 선형해석을 수행하였다.

4.2.1 자중

자중은 주된 건설재료인 철근콘크리트에 의해서 작용되며, 냉각탑의 목부분을 기준으로 하부에는 경선 및 원주방향으로 압축응력을 발생시키며 상부에는 원주방향으로 인장응력을 발생시킨다. 이때 상부의 인장응력은 하부에 발생하는 압축응력에 비하여 매우 작은 값을 가진다. 자중에 의하여 발생하는 경선방향 압축응력은 풍하중에 의하여 발생하는 인장응력을 감소시키는 작용을 하여 냉각탑 구조에 안정성에 기여한다.

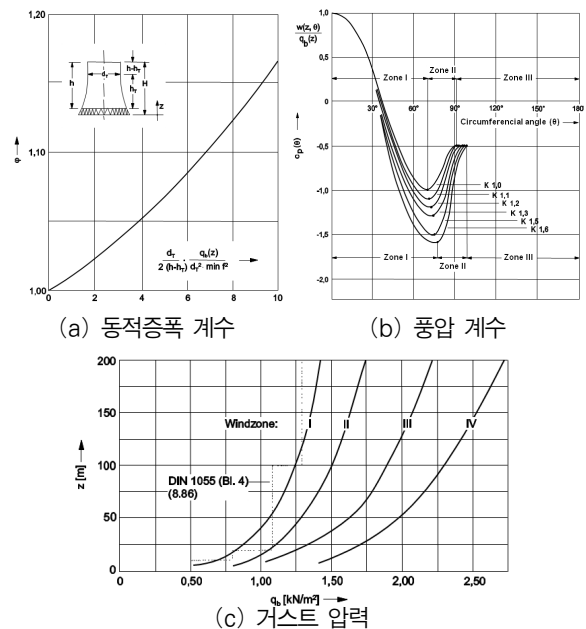
콘크리트의 단위 중량은 DIN 1055에 25 kN/m^3 로

명시되어 있으나 본 연구에서는 셸 표면조도의 영향을 고려하여 25.2 kN/m^3 으로 가정하여 적용하였다.

4.2.2 풍하중

대형 하이퍼볼릭 셸은 바람의 영향에 민감하게 반응한다. 원주방향의 풍압계수 및 경선방향의 거스트 압력 및 동적증폭계수로 구성되며 풍동 실험을 기반으로 정의된다. 식 (2)는 설계 풍하중식으로 〈그림 8〉에서 나타낸 VGB-VTR (1997)을 적용하였다.

$$W_a(z, \theta) = C_{pa}(\theta) \cdot \varphi \cdot F_l \cdot q_b(z) \quad (2)$$



〈그림 8〉 냉각탑 설계풍하중 [VGB-VTR(1997)]

풍압 계수 $C_{pa}(\theta)$ 는 셸 표면의 조도(Rib)의 크기 및 거리에 따라 $K1.0 \sim 1.4$ 까지 변화된 분포를 가지는 것으로 표현되며, 거스트 압력 $q_b(z)$ 은 지역과 셸의 높이에 따라 결정된다. 간섭계수 F_l 은 주변상황에 따라 $1.0 \sim 1.3$ 의 값을 고려하며, 동적증폭계수 φ 는 실험적인 결과에 바탕을 두어 고유진동수 및 하이퍼볼릭 셸의 기하형상에 따른다.

〈표 7〉 선정된 냉각탑의 설계 풍하중 조건

설계속도압 (N/m^2)	$q_b(z) = 0.75 \square \left(\frac{z}{10} \right)^{0.22}$	
간섭계수 F_l	1.0 (단일 냉각탑일 경우)	
풍압계수 $C_{pa}(\theta)$	K1.0	
동적증폭계수 φ	Tower B	0.9393 (+3.99%)
	Tower P	0.9033 (-)
	Tower G	0.8844 (-2.09%)

스위스에 건설된 G 냉각탑은 Zone I에 해당하며 선정된 각 냉각탑에 대한 설계 풍하중은 <표 7>과 같다.

4.2.3 온도하중

온도하중은 냉각탑 내외부의 온도차에 의한 휨효과 및 일정한 온도변화에 의한 인장 및 수축효과를 유발한다. 동절기 가동 중에 있는 냉각탑에는 외부의 찬공기와 내부의 더운 공기에 따른 온도차이로 휨 변형이 크게 발생한다. 이때 철근콘크리트 셸에 휨변형을 작용시키며 냉각탑의 벽 두께의 영향으로 원주방향으로 휨변형은 일정하지만 수직방향으로 벽 두께에 따라 변화한다. 또한 계절적인 요인과 함께 낮 동안에 국부적으로 작용하는 태양광에 의한 온도효과도 발생한다.

해석에서는 냉각탑 내부와 외부의 온도차에 의해서 작용되는 온도하중을 고려하고자 한다. 겨울에 가동 중인 냉각탑으로 가정하여 냉각탑 전체에 온도구배하중 ΔT_{45K} 을 적용하였다. 구조의 안정성에 기여하는 자중과는 달리 온도하중은 셸의 내외부에 초기균열을 유발하여 구조물에 초기손상을 주는 하중으로 작용된다.

4.2 좌굴해석

선정된 기하형상의 안정성 검토를 위하여 VGB-VTR (1997)의 해석조건이 적용되며 이는 $G+W$ 의 하중조건에서 좌굴계수가 5 이상($\gamma_b \geq 5$)을 만족하는 조건으로 명시되어 있다.

<표 8>은 선정된 기하형상에 대하여 좌굴해석을 수행한 결과이며 모두 기준을 상회하는 값을 나타내고 있으며 Tower P에 대하여 Tower G의 좌굴계수는 4.78%가 증가하는 결과가 나타났다. 이는 가정된 벽 두께를 감소하여 경제적 설계가 가능함을 나타낸다.

<표 8> 선정된 기하형상의 좌굴계수

	Tower B	Tower P	Tower G
γ_b	6.1157	6.9542	7.2868

4.3 철근량 산정

식 (3)은 VGB-VTR (1997)에서 명시한 철근량 산정을 위한 하중조합으로 이를 적용하여 각 요소마다 요구되는 철근량을 산정하였다.

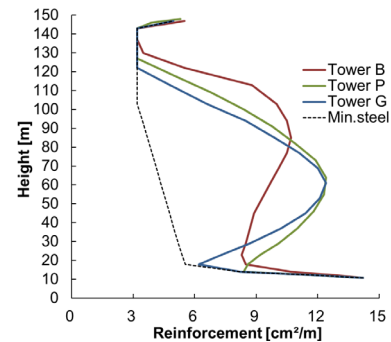
$$\begin{aligned} G+W+T \\ G+1.75W \end{aligned} \quad (3)$$

냉각탑의 철근량은 풍하중의 압력분포가 일정치 않아 하중의 작용하는 면(Luv)에 발생하는 경선방향 인장력(n_{22})에 의해 전체 셸의 배근량이 지배된다.

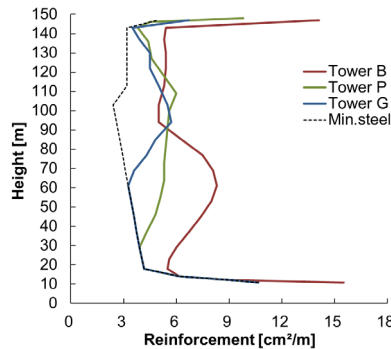
본 연구에서는 수치적으로 계산된 철근량은 요소마다 다르므로, 철근배치는 원주방향 또는 경선방향에 따라 가장 큰 철근량으로 결정하였으며 경선방향으로 벽두께의 0.4%, 원주방향으로 벽두께의 0.3%(상부 셸)와 0.4%(하부 셸)를 최소 철근량으로 적용하였다.

<표 9> 선정된 기하형상의 총철근량 및 개선율

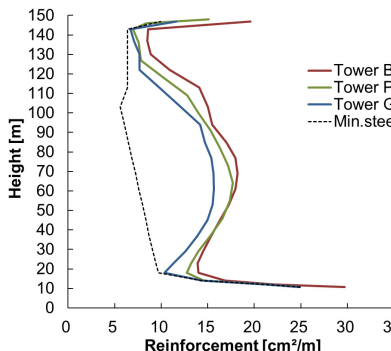
	총 철근량 [ton]	개선율 [%]
Tower B	862.27	-8.90
Tower P	791.83	-
Tower G	707.87	10.60



(a) 경선방향 철근량



(b) 원주방향 철근량



(c) 총 철근량

<그림 9> 선정된 기하형상의 철근량

<표 9>는 선정된 기하형상에 대하여 총철근량과 개선율을 나타내며 Tower P에 대하여 Tower B는 8.90%가 증가하였고, Tower G는 10.60%의 철근량이 감소한 것으로 나타났다. <그림 9>는 기하형상의 높이에 대하여 요소마다 배치되는 경선, 원주방향 및 총철근량을 나타내었다. 모든 기하형상에 대한 총 철근량의 전체적 배치는 유사하게 나타났으나, 경선 및 원주방향 철근량의 배치는 Tower B만 전체적으로 다르게 배치되었다. 이는 Tower B가 다른 형상과 비교하여 상당히 다른 응력 재분배 거동을 한다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 경선방정식의 미분함수의 특성을 이용하여 하이퍼볼릭 셸로 구성된 냉각탑의 3가지 구조 변수들의 경향을 추정하여 개선된 기하형상을 제시하였고, 이에 대한 선형해석을 통하여 경제성 평가를 수행하였다.

하단부 경사각이 커질 때 하부 셸의 반지름이 감소하였고 목높이가 높아질수록 상부 셸의 반지름이 감소하여 상부 셸 반지름의 증가율이 하부 셸 반지름의 감소율보다 더 크게 나타난 것을 알 수 있었다. 또한 1차 고유진동수는 각각의 목높이에 대하여 하단부 경사각이 커질수록 증가하는 경향이 나타났으며, $h_t = 113m$ 일 때 최대가 나타났다. 이를 반영하여 선정된 대표 모델의 좌굴 및 철근량의 평가에서 하단부 경사각이 최대인 기하형상이 우수한 결과를 나타내었다.

전체적으로 작은 반지름을 가지는 하이퍼볼릭 셸이 높은 1차 고유진동수가 나타나고 풍하중에 대하여 덜 민감한 시스템이 되는 것을 알 수 있었다. 이는 두 개의 쌍곡선 식을 이용하여 나타낼 수 있으며 하부 셸의 반지름은 하단부 경사각과 목높이를 증가시켜 최소화하고, 전체 상부 셸의 반지름은 경계조건을 만족하는 범위에서 최소 반지름이 되어 거의 원통형태가 되는 기하형상으로 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 단지 하나의 쌍곡선 곡률을 나타내는 기하형상에 대하여 분석하였으며 두 개의 쌍곡선 곡률을 나타내는 기하형상에 대하여 추가적인 연구가 요구된다. 또한 합리적인 냉각탑 설계를 위한 구조변수의 경향을 나타내는 추정식의 산정이 요구되며 이는 더 많은 변수를 고려한 추가적인 분석이 이루어져야

할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2012-0008010)

참고문헌

1. 최창근, 노혁천. 철근콘크리트 냉각탑의 형상불완전에 의한 확률론적 거동. 한국전산구조공학회 논문집, Vol 13, No. 1, 2000, pp. 147-158.
2. 민창식, 김생빈. R/C 쌍곡 냉각탑의 극한 거동. 대한토목학회 논문집, Vol 12, No. 4, 1992, pp. 59-70.
3. D. Busch., R. Harte. and H.-J. Niemann. Study of a proposed 200m high natural draught cooling tower at power plant Frimmersdorf/ Germany. Engng. Struct. Vol. 19, 1997.
4. R. Harte. and W.B. Krätzig. Nonlinear Analyses of reinforced concrete shells as a preventive measure against damages, 40th University Congress of IASS, Madrid, 1999.
5. S.Y. Noh, Harte, R., W.B. Krätzig and K. Meskouris. New design concept and damage assessment of large-scale cooling towers, Structural Engineering & Mechanics Vol 15, No. 1, 2003, pp. 53-70.
6. H. Beem., C. Koenke., U. Montag., W. Zahlten. Femas 2000 - Finite Element Moduls for General Structures Institute for Statics and Dynamics, Ruhr- University Bochum. User-Handbook Release 3.0., 1996.
7. VGB - Guideline: Structural Design of Cooling Towers, VGB-Technical Committee, "Civil Engineering Problems of Cooling Towers", Essen, 1997.

(접 수 일 자 : 2012년 07월 18일)

(심사완료일자 : 2012년 09월 12일)

(게재확정일자 : 2012년 09월 15일)