

철근콘크리트 쌍곡냉각탑의 설계 및 해석

Design and Analysis of Reinforced Concrete Hyperbolic Cooling Tower

장현옥*
Jang, Hyun-ock

민창식**
Min, Chang-shik

Abstract

An iterative numerical computational algorithm is presented to design a plate or shell element subjected to membrane and flexural forces. Based on equilibrium consideration, equations for capacities of top and bottom reinforcements in two orthogonal directions have been derived. The amount of reinforcement is determined locally, i. e., for each sampling point, from the equilibrium between applied and internal forces. Based on nonlinear analyses performed in a hyperbolic cooling tower, the analytically calculated ultimate load exceeded the design ultimate load from 50% to 55% for an analysis with relatively low to high tension stiffening, cases $\gamma=10$ and 15. For these cases, the design method gives a lower bound on the ultimate load with respect to Lower bound theorem. This shows the adequacy of the current practice at least for this cooling tower shell case studied. To generalize the conclusion more designs - analyses should be performed with different shell configurations.

Key words : reinforcement design in plate and shell, cooling tower, nonlinear behavior, finite element analysis

1. 서론

철근콘크리트 구조물의 설계에서 콘크리트의 단면은 과거의 경험과 철근의 피복두께를 고려하여 결정하고, 보강철근의 설계는 평형방정식 또는 유한 요소 탄성해석에 의해 단면력을 구하여 설계하는 것이 일반적인 설계방법이다.

셀들이 비록 막력으로 대부분 외력에 저항하지만 여전히 무시하지 못할 휨모멘트가 발생하고 있으므로 막력과 휨모멘트를 동시에 고려하여 설계하는 방법이 제시되고 있다. 민창식과 Gupta(3)는 Lin-Scordelis 안장 셀에 막력해석을 적용하여 설계를 유도하였고 수치해석 모델로 비탄성해석을 시도하여 안장 셀이 극한상태에서 외력에 대해 대부분 막저동에 의해서 저항하고 있음을 보여주었다. Gupta(4)에 의해 판과 셀요소의 막력과 휨모멘트를 동시에 고려한 설계방정식이 제시되었고, Lourenco와 Figueiras(5)에 의해서도 셀요소에 휨모멘트를 고려한 설계가 제시되었다. 민창식(6)은 Mahmoud와 Gupta가 개발한 프로그램에 막력과 휨모멘트를 동시에 고려한 설계방정식을 적용하여 Lin-Scordelis 안

* 청석엔지니어링

** 동국대학교 토목환경공학과 교수

장 셀에 콘크리트의 피복두께를 고려한 2층으로 배치된 보강철근의 설계를 유도하였고, 설계된 셀에 인장강성을 고려하여 비탄성해석을 시도하였다. 설계된 보강철근을 이용하여 극한거동 해석을 수행한 결과, 계산된 극한하중이 설계하중의 110%~130%까지 증가하여 소성론의 하계경리가 만족하였음을 보여주었다.

본 연구에서는 Mahmoud와 Gupta가 개발한 반복적 수치해석 알고리즘에 따른 유한 요소 프로그램에 막력과 휨모멘트를 동시에 고려한 설계방정식을 적용하여 그림 1 (d)의 철근콘크리트 쌍곡냉각탑(Grand Gulf Nuclear Power Station, Port Gibson, Mississippi, U.S.A.)의 보강철근 설계를 시도해 보고자 한다. 또한, 이 설계자료를 이용하여 쌍곡냉각탑의 비선형 극한거동 해석을 수행함으로써 설계와 극한거동간의 관계를 설정하여 소성이론의 하계경리가 철근콘크리트 셀에 적용될 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

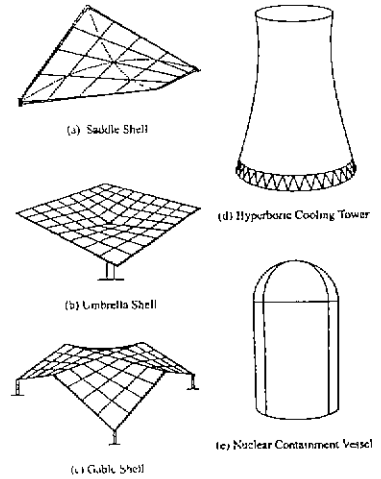


그림 1 철근콘크리트 셀의 종류

2. 막력과 휨모멘트를 고려한 설계방정식

막력과 휨모멘트를 받는 극한상태의 균열 요소는 철근의 인장력과 콘크리트의 압축력이 발생한다. 이 힘들 즉, 외력과 단면력(철근과 콘크리트의 저항력)은 한계균열상태에서 평형을 이룬다. 평형상태에서 탄성해석의 수행으로 요소의 콘크리트와 철근력을 계산한다. 보강철근은 위층과 아래층 모두 필요한 경우, 아래층만 보강철근이 필요한 경우, 위층만 보강철근이 필요한 경우 그리고 보강철근이 필요하지 않는 경우 등 네 가지로 나눌 수 있다. 보강철근력에 대한 유도는 참고문헌(7)에 제시되어 있다.

3 설계 및 해석의 수행 과정

3.1 모델 형상

쌍곡냉각탑은 그림 2에서 보는 것과 같이 높이 120m에서의 반지름 $R = 36.3m$ 를 기준으로 두 개의 쌍곡선이 높이 방향으로 구성되어 있다. 실제 구조물은 지면으로부터 10m위에 위치하고 있다. 구조물의 지점조건을 고려하기 위해서 바닥으로부터 10m까지에 대한 실제거동을 유한 요소 프로그램에 적용해야 한다. Min은 이 부분에 대해서 강성기초 위에 힌지로 지지되어있는 상태의 구조물로 설계 및 해석을 수행하여 만족할 만한 결과를 얻었으므로 본 연구에서는 위와 같이 적용하기로 하였다. 구조물은 축방향에 대해 대칭을 이루고 있으며 풍하중은 바람방향에 대해 대칭을 이룬다. 그러므로 구조물의 모델은 그림 3과 같이 전체 구조물의 1/2에 해당하는 부분을 원주방향에 대하여 24, 자오선방향에 대하여 18개의 요소로 나누어 모델링하였다.

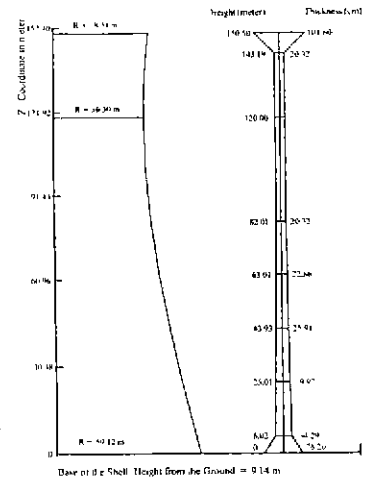


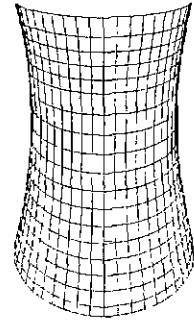
그림 2 냉각탑의 단면 및 두께

3.2 재료 특성

구조물에 사용된 콘크리트 및 철근의 재료 특성은 ACI-ASCE에서 제시한 것과 같이 균질하며, 등방성의 성질을 갖는다고 가정하였다. 철근의 응력변형을 곡선은 탄성-완전소성의 응력변형을 곡선으로 가정하여 설계와 극한거동을 살펴보았다. 설계에서의 하중은 ACI에 제시되어 있는 하중조건에 따라 $(0.9D + 1.3W)/0.9$ 를 적용하였다. 여기서 D 는 고정하중을 의미하며, W 는 풍하중을 의미한다.

표 1 콘크리트 및 철근의 재료적 성질

	콘크리트	철근
탄성계수	$E_c = 28.0 \text{ MPa} (=4,074 \text{ ksi})$	$E_s = 206.9 \text{ GPa} (=30,000 \text{ ksi})$
압축응력	$f_c = 34.48 \text{ MPa} (=5 \text{ ksi})$	$f_y = 413.7 \text{ MPa} (=60 \text{ ksi})$



3.3 고정하중

고정하중은 콘크리트 단위중량과 요소의 두께 및 면적의 곱으로 계산한다.

$$DL = -\gamma_c \cdot A \cdot T \quad (1)$$

여기서, DL : 작용하중 (lb),

γ_c : 콘크리트의 단위중량 (lb/ft^3)

그림 3 요소로 나누어진 구조물 (24×18)

A : 단면적 (폭×높이, ft^2), T : 요소두께 (ft)

3.4 풍하중

지면으로부터 Z 높이에서의 풍하중은 ACI-ASCE에 따른다. 풍하중은 유효속도압력과 압력을 받는 면적의 곱으로 계산되는데, 유효 속도압력은 다음과 같이 계산한다.

$$q_{z0} = K_z \cdot G \cdot q_{30} \cdot H_g \quad (2)$$

여기서, q_{z0} : 유효속도압력 (lb/ft^2),

K_z : 속도압력계수, $K_z = 2.64 \left(\frac{Z}{300}\right)^{2.1}$

G : 돌발응답계수,

q_{30} : 속도압력 ($V_{f30} = 90 \text{ mph} (=144.81 \text{ km/h})$)

H_g : 풍하중의 원주방향 분포계수(표 2, 내부흡입 = 0.5)

표 2 풍하중 계수 H_g [ACI-ASCE Committee의 table 4.4.1(b)]

θ	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
H_g	1.5	1.3	0.7	0.0	-0.7	-0.8	-0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

풍하중은 그림 4에서 보는 바와 같이 요소 평면에 직각 방향, 그리고 Z 축을 중심으로 방사상의 형태로 작용한다. 풍하중은 임의의 방향으로 작용하기 때문에 본 연구에서는 풍하중 계수가 가장 큰 값의 작용절을 $\theta = 0$ 으로 하였다.

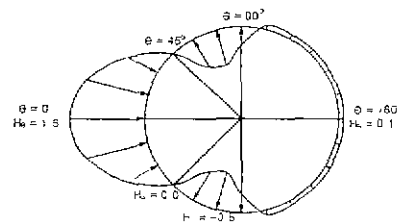


그림 4 원주방향 풍압력 분포도

4. 설계 및 해석 결과

쌍곡냉각탑의 보강철근 설계와 설계된 보강철근을 배치하여 극한거동을 수행한 프로그램은 Mahmoud

와 Gupta에 의해 개발된 유한 요소 프로그램과 민창식에 의해 추가로 개발된 유한 요소 프로그램을 대전의 한국전기통신연구원의 슈퍼컴퓨터센터 Cray Y-MP C90을 이용하였다.

4.1 설계 수행 결과

설계는 원주방향으로 나누어진 요소에서 중립축을 기준으로 단면의 상·하부를 포함한 원주방향과 자오선방향의 최대철근력을 냉각탑의 높이에 따라 구분하였다. 그림 5에서 자오선방향 철근력의 최대값은 높이 약 40m일 때 420 kN/m를 나타내며, 원주방향 철근력의 최대값은 높이 약 150m일 때 380 kN/m를 나타낸다.

그림 6은 1970년대 Zum Ind.에서 설계한 Grand Gulf 냉각탑의 실제 배치된 철근을 단위길이당 철근력으로 환산하여 높이에 따라 나타낸 것이다. 그림 5와의 비교를 위해 높이에 따라 배치된 철근의 최대철근력을 도식화하였다. 자오선방향 철근력의 최대값은 높이 약 68m일 때 1,080 kN/m를 나타내며, 원주방향 철근력의 최대값은 높이 약 150m일 때 940 kN/m를 나타낸다.

각 방향의 최대철근력을 비교하면, 본 연구의 결과는 Zum Ind.에서 실제 설계하여 배치한 철근량의 최대철근력에 비해 자오선방향과 원주방향으로 약 40% 가량의 철근량이 요구되고 있다.

본 연구의 결과에서 실제 배치된 철근량에 비해 약 40%의 철근량이 계산된 것은 먼저 설계의 방법에 차이가 있었음을 지적할 수 있다. 1970년대 Zum Ind.에서는 허용응력법으로 설계를 한데 반하여, 본 연구에서는 하중증가계수에 의한 하중조합과 강도감소계수를 고려한 재료의 극한상태에서의 저항력이 평형을 이룬다는 개념의 설계 즉, 강도설계법으로 수행하였으므로 그 결과에 상당한 차이가 있는 것이다. 두 번째로 지적할 수 있는 것은 하중조합이다. Gupta와 Schnobrich(9)에 따르면, 고정하중+풍하중의 하중조합과 고정하중+지진하중의 하중조합을 구조물에 재하시키고 이에 대한 결과를 비교하여 최대철근량을 산출하는 방법을 제시하고 있다. 본 연구에서는 지진하중의 영향이 풍하중에 대한 영향에 비해 작다고 보아 재하하중으로 고정하중+풍하중의 하중조합만을 적용하였다.

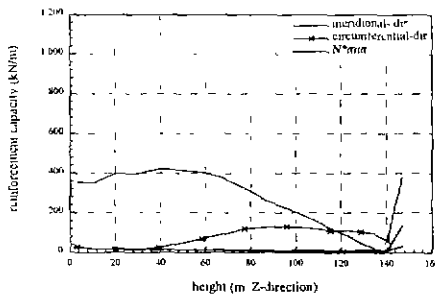


그림 5 본 연구에 의해 계산된 각 방향 최대철근력 및 N_{mm}^* 의 분포도

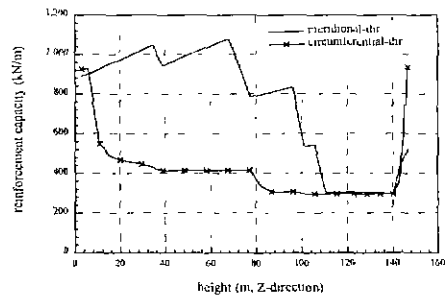


그림 6 Zum Ind.에서 실제 시공에 사용한 철근력

본 연구에서는 N_{mm}^* 값을 계산하기 위해 ACI에서 제시하는 최소철근비($\rho=0.35\%$)의 약 1/10에 해당하는 최소철근비 ($\rho=0.025\%$)를 사용하여 최소철근비가 설계에 미치는 영향을 최소화시켰다.

4.2 해석 수행 결과

본 연구에서는 쌍곡냉각탑의 극한거동을 정확하게 살펴보기 위해 4.1절에서의 결과를 그대로 적용하였다. 그림 7은 구조물에서 최대 변형이 일어나는 높이 약 120m에 위치한 요소의 변형에 따른 재하된 하

중의 변화를 인장강성 계수의 변화($\gamma = 10, 15$)에 따라 나타내었다. 하중의 변화는 하중계수(Load Factor)로 알 수 있는데 설계하중의 100%를 1로 보고 해석을 수행하였다.

$\gamma = 10$ 일 때 11 cm의 변형에서 설계하중의 1.11배를 받았고, 구조물은 13 cm에 이르러서 설계하중의 1.15배를 받았다. 이 때부터 콘크리트의 균열은 심화되지만 변형이 14 cm까지 도달한 후, 콘크리트는 인장강성의 영향으로 재하되고 있는 하중을 균열이 발생하지 않는 부분으로 충분히 분배하여 지속적으로 외력에 저항하기 시작하였다. 하중-처짐곡선은 증가 추세를 보이며 변형 26 cm에서 설계하중의 1.51배 증가에 이르러 구조물은 수렴에 이르지 못하였다. $\gamma = 15$ 일 때는 위 경우와 마찬가지로 변형이 11 cm에서 설계하중의 1.11배를 받았으며, 변형의 증가와 더불어 꾸준한 하중의 증가를 보였다. 변형이 17 cm에서 설계하중의 1.37배를 받았으며 18 cm까지 재료의 균열이 심화되는 것을 알 수 있었다. 앞에서의 설명과 마찬가지로 콘크리트의 인장강성 영향으로 재하하중을 지속적으로 받을 수 있었으며, 구조물은 변형 25 cm에서 설계하중의 1.53배를 받았다. 큰 변형에 따른 콘크리트의 파괴가 발생하였기 때문에 프로그램이 수렴에 이르지 못하였으며 본 연구에서는 이 때를 구조물에 극한하중이 재하되었다고 보았다.

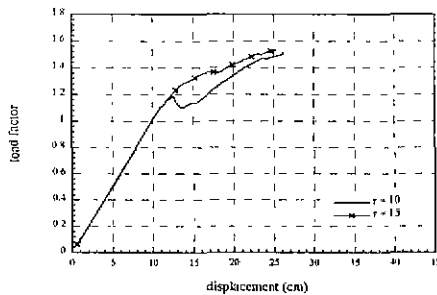


그림 7 하중-처짐 곡선

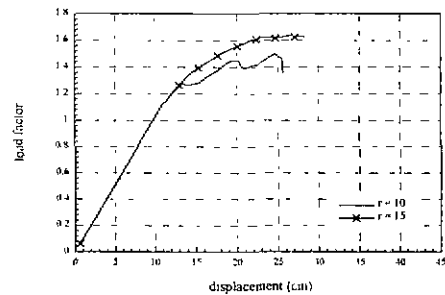


그림 8 하중-처짐 곡선 (실제 배치된 철근 사용)

유한 요소 프로그램에 의한 냉각탑의 해석 수행과 마찬가지로 Zurn Ind.에서 설계하여 배치한 철근량으로 구조물의 해석을 수행하여 보았다. $\gamma = 10$ 일 때 냉각탑은 11 cm의 변형에서 설계하중의 1.13배를 받았고, 13 cm의 변형에서 설계하중의 1.25배를 받았다. 변형이 진행되면서 14 cm까지는 하중계수의 증가를 보이지 않지만 인장강성의 영향으로 재하되고 있는 하중을 균열이 발생하지 않는 부분으로 충분히 분배하여, 구조물은 20 cm에서 설계하중의 1.45배를 받았다. 21 cm까지 변형이 진행되는 동안 하중계수의 감소가 보이지만, 구조물은 다시 하중을 받기 시작해 25 cm의 변형에서 설계하중의 1.5배를 받았고, 이후 하중계수의 감소를 보이며 프로그램은 정지하였다. $\gamma = 15$ 일 때 냉각탑은 변형이 11 cm에서 설계하중의 1.13배를 받았다. 변형의 증가와 더불어 꾸준한 하중의 증가를 보였고, 변형이 17 cm에서는 설계하중의 1.46배를 받았다. 구조물의 변형이 24 cm 진행되었을 때 설계하중의 1.62배를 받았으며 28 cm의 변형에서 설계하중의 1.63배를 받고 프로그램은 정지하였다. 마찬가지로 대 변형에 따른 콘크리트의 파괴로 인해서 프로그램은 수렴하지 못하였으며 본 연구에서는 이 때를 구조물에 극한하중이 재하되었다고 보았다.

그림 7과 그림 8은 모두 설계하중이 사용하중의 100%를 넘으므로 안전성이 확보되었다고 볼 수 있지만, 앞에서 설명한 것과 같이 본 연구의 계산된 철근량은 Zurn Ind.에서 설계하여 배치한 철근량의 약 40%에 해당하므로 그림 7은 그림 8과 비교하였을 때 전체적으로 하중계수가 작은 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 ACI-ASCE Committee 334를 근거로 막력과 휨모멘트를 동시에 고려한 설계방정식을 적용하여 쌍곡냉각탑(Grand Gulf Nuclear Power Station, Port Gibson, Mississippi, U.S.A)을 설계하였고, 설계된 냉각탑의 극한거동해석을 수행하여 설계된 셸이 안전한지를 연구하였다

설계하중을 $(0.9D + 1.3W)/0.9$ 로 재하하고 최소철근비를 0.025%로 제한하여 설계를 수행한 결과, 기존의 Zurn Ind.에서 설계하여 배치한 철근량의 약 40%에 해당하는 철근량이 계산되었다. 계산된 철근량과 콘크리트의 인장강성을 고려한 구조물의 극한거동은 인장강성계수 $\gamma=10, 15$ 에 따라 설계하중의 1.51, 1.53배를 받았다. 따라서 구조물이 받는 하중은 설계하중을 초과하므로 ACI 318-99와 콘크리트 구조설계기준(1999)에 의해 구조물의 안전성은 확보되었다고 볼 수 있다.

본 연구에서 제시한 설계방정식은 콘크리트에 균열이 발생하고 철근이 항복에 도달한 한계상태에서의 평형방정식으로 유도되었다. 소성론의 하계정리에 따르면 평형해를 이용하여 설계를 하였을 때 설계강도는 극한강도의 하계에 있다. 본 연구결과, 막력과 휨모멘트를 고려한 설계방정식이 민창식의 쌍곡안장셸과 본 연구의 쌍곡냉각탑 설계에서 타당성이 입증되었다. 본 연구를 보다 일반화하기 위해서는 여러 철근콘크리트 셸 구조물에의 적용을 수행해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. ACI 318-99, Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48333, 1995.
2. ACI-ASCE Committee 334, "Reinforced Concrete Cooling Tower Shells-Practice and Commentary", (ACI 334.2R-91), American Concrete Institute
3. 민창식-Gupta (1994) "철근콘크리트 쌍곡 '안장' 셸의 설계 예와 극한거동", 대한토목학회 논문집, 제 14권, 제 4호, pp. 807-814
4. Gupta, A. K. (1986) "Combined membrane and flexural reinforcement in plates and shells". *Journal of the Structural Division*, ASCE, 112(3), pp. 550-557
5. Lourenco, Paulo B and Figueiras, Joaquim A. (1995) "Solution for the design of reinforcement concrete plates and shells", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 121(5), pp. 815-823.
6. 민창식 (1999) "막력과 휨모멘트를 받는 철근콘크리트 판과 셸의 설계", 대한토목학회 논문집, 제 19권, 제 1-2호, pp. 171-182
7. 민창식 (1997) "RC 쌍곡 '안장' 셸의 설계와 비선형 거동", 대한토목학회 논문집, 제 17권, 제1-6호, pp 935-945
8. Milford, R. V. and Schnobrich, W C (1986) "The effect of cracking on the ultimate strength of reinforced concrete cooling towers", *Engineering Structures*, Vol. 8, pp. 46-54.
9. Gupta, A. K. and Schnobrich, W C, (1976) "Seismic Analysis and Design of Hyperbolic Cooling Towers". *Nuclear Engineering and Design(Lausanne)*, V. 36, pp 251-260
10. Kazuya Hayashi and Phillip L G (1983) "Cracking Load for a Wind-Loaded Reinforced Concrete Cooling Tower". *ACI Journal*, Vol 80, no 4, pp 318-325