

철근콘크리트 냉각탑의 형상불완전에 의한 확률론적 거동

Statistical Behavior of RC Cooling Tower Shell due to Shape Imperfection

최 창 근*
Choi, Chang-Koon

노 혁 천**
Noh, Hyuk-Chun

요 지

철근콘크리트 냉각탑은 대형의 구조물로서 건설과정중의 오류와 콘크리트의 장기 거동에 의하여 기하학적 형상이 설계에서 목적하는 형상에서 벗어난 형상불완전을 가질 수 있다. 형상불완전의 구조거동에의 영향은 완전셀에 나타나는 응력 이외에 추가적인 응력의 발생을 들 수 있다. 본 논문에서는 몬테카를로 방법을 사용하여 냉각탑 셀의 형상불완전에 의한 확률론적 거동에 대하여 고찰하였다. 냉각탑에 형상불완전을 유발하는 기하인수로는 냉각탑의 반지름과 셀의 두께를 택하였다. 이들 기하인수는 기존에 사용되던 모델인 축대칭 모델과 불룩형상의 모델과는 달리 특정 통계특성치를 가지는 추계장으로 가정하였다. 해석 결과는 냉각탑의 반지름에 나타나는 불확실성은 셀의 두께에서의 불확실성보다 구조거동의 반응변화도에 매우 큰 영향을 미친다는 사실을 보여주었다. 기하학적 인수의 불확실성에 더하여 재료탄성계수의 공간적 불확실성에 의한 구조 반응변화도를 고찰하여 비교하였다.

핵심용어 : 냉각탑, 형상불완전, 추계장, 반응변화도, 불확실성

Abstract

For the large scale reinforced concrete cooling tower shells, the shape imperfection can be introduced due not only to mistakes in the process of construction but also to the long term behavior of concrete. The shape imperfection evokes the additional responses such as displacements and stresses in addition to the design values. In this study, the statistical behavior of the RC cooling tower shell due to the shape imperfection is investigated using the Monte Carlo simulation. The radius of cooling tower and the shell thickness are adopted as the parameters which cause the shape imperfection. The shape imperfection is modeled as a stochastic field rather than the local one of axisymmetric or bulge type of imperfection. The randomness in the radius is shown to be more affecting the structural responses than the randomness in the shell thickness. In addition to the geometrical randomness, the effect of randomness in the modulus of elasticity on the structural response is also investigated and compared with that of the geometrical ones.

Keywords : cooling tower, shape imperfection, stochastic field, response variability, randomness

1. 서 론

구조계에 대한 일반적인 해석은 설계 및 해석인

수에 대한 확정론적 가정을 전제하고 있다. 설계 및 해석인수로는 구조재료, 기하학적 형상과 작용하중 등을 들 수 있다. 확정론적 가정이라 하면, 설계 및

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 석좌교수

** 한국과학기술원 토목공학과 박사후연구원

· 이 논문에 대한 토론을 2000년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

해석인수가 구조계 내에서 특정한 값을 가진다는 가정을 말한다. 그러나 실제의 구조계에는 다양한 불확실성이 개입될 수 있다. 이들 불확실성은 구조계에 내재적으로 존재하는 것으로 생각할 수 있으며, 시간 및 공간적으로 특정분포를 나타내는 추계론적 장으로 가정할 수 있다. 즉, 실제의 구조에는 탄성계수나 포아송비 등의 재료상수와 보의 단면, 평판/셸의 두께 등의 기하학적 요소들 그리고 시간에 따라 변화하는 작용하중 등에 어느 정도의 불확실성이 존재한다는 것이다^{5),7),10)}. 이러한 가정은 실측은 물론 직관적인 관점에서도 합리적이라고 할 수 있다.

결정론적 해석에서 사용하는 확정론적 인수들은 고려중인 구조계 및 그 구성재료 등에 대한 다수의 실험과 이론적 가정에 기본하여 결정된다. 그러나, 이들 인수들에 대한 보다 합리적이고 실제적인 가정은 이들 인수들이 불확실성(또는 임의성)을 가지며 결정론적으로 결정될 수 없다는 가정일 것이다. 즉, 이들 인수들은 구조계에 걸쳐 확률론적으로 분포하는 것으로 가정할 수 있다. 이렇게 인수들에 대한 확률적 특성을 고려하고 이들 특성이 구조계의 거동에 미치는 영향을 고찰하는 해석이 추계론적(또는 확률론적)해석이다.

추계론적 해석은 통계적방법과 비통계적방법 등 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 정확하고 효율적인 난수발생기법을 필요로 하는 몬테카를로 방법(Monte Carlo simulation : MCS)은 통계적방법에 속한다. MCS방법의 적용성 향상을 위하여 Cholesky분해법을 적용하여 구조계방정식에 대한 연산시간을 감소시킨 방법인 Neumann 전개방법¹⁵⁾도 통계적방법에 속한다. 비통계적 방법에는 2차모멘트법과 이와 관련된 섭동법 등이 선형문제에 적용되고 있으며¹¹⁾, 가중적분법^{4),7)}이 수치해법으로 사용되고 있다. 가중적분법은 확정론적 함수에 곱해진 추계론적 장에 대한 요소영역내의 적분을 통하여 계산되는 변수를 확률변수로 가정하고 사용한다.

본 연구에서는 철근콘크리트 냉각탑에 나타나는 형상불완전에 의한 확률론적 거동을 몬테카를로 방법을 적용하여 고찰하고자 한다. 냉각탑은 원자력발전소 등의 대형 플랜트에 적용되는 냉각시스템의 부속 건물로 일반적인 기하형상은 쌍곡형상(hyperboloid)이다. 추계론적 해석의 대상이 되는 인수로는 철근콘크리트 재료상수의 공간적 임의성과 쌍곡형상으로

이루어진 기하형상의 공간적 임의성을 들 수 있다^{3),5)}. 냉각탑에 발생하는 형상불완전은 완전한 형상의 냉각탑에 발생하는 응력에 추가적인 응력을 발생하여 냉각탑의 극한거동³⁾, 응력장^{2),8),9)} 및 좌굴하중¹³⁾ 등에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.

냉각탑의 기하형상을 결정하는 인수로는 냉각탑의 반지름 R과 냉각탑 셸의 두께 t를 들 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 이들 두 인수를 추계장으로 가정하고 이들 인수의 임의성이 냉각탑의 구조 거동에 미치는 영향을 알아보하고자 한다. 기존의 연구들은 냉각탑에 발생하는 형상불완전을 축대칭 또는 볼록형상의 형상불완전으로 가정하여 이를 고려하고 있으나^{1),2)} 실측^{8),13)}에서 나타난 바와 같이 형상불완전은 냉각탑의 국부에 발생하는 것이 아니라 구조 전체에 분포하는 특징을 보여주고 있다. 그러므로 형상불완전을 추계론적 장으로 가정하고 이에 의한 영향을 평가하는 것은 합리적인 가정이라고 할 수 있다.

2. 추계장 생성 방법

MCS 방법에 의하여 추계론적 해석을 수행하기 위하여 필수적인 요소는 추계장의 수치생성이다. 생성되는 추계장은 해석대상 추계장의 통계적인 특성을 만족해야 한다. 이들 통계적 특성은 실험에 의하여 구하거나 해석자에 의해 가정된다. 본 연구에서는 추계장의 생성을 위하여 통계학적 전처리기법¹⁴⁾을 사용하고자 한다. 이 방법은 공분산 행렬을 사용하여 독립적인 Gaussian 확률변수를 상관관계를 가지는 확률변수로 변환 생성한다. 공분산 행렬 ϵ_{xx} 은 다음의 식(1)과 같이 정의된다.

$$\epsilon_{xx} = E\{[X - E(X)][X - E(X)]^T\} \quad (1)$$

여기에서, $E(\cdot)$ 는 확률변수의 평균을 구하기 위한 평균연산자이다.

식(1)에 정의된 공분산 행렬의 각 성분은 다음의 식과 같이 자동상관함수 $R(\xi_{ij})$ 에 의하여 구할 수 있는데, 는 구조계 내의 두 점 사이에 정의되는 상대거리 벡터이다.

$$\epsilon_{xxij} = Cov(X_i, X_j) = R_{xx}(\xi_{ij}) \quad (2)$$

추계장의 생성에 통계학적 전처리방법을 사용할 경우 추계장의 통계값을 만족시키기 위하여 필요로 하는 전체 표본의 수는 $[4 \times NF \times NEM]$ 이다. 여기에서, NF 는 추계장 생성 알고리즘에 사용되는 코사인 항의 수이며, NEM 은 구조계의 모델링에 사용된 요소의 수로서 하나의 추계론적 장을 구성하는 데이터의 수와 같다. 본 연구에서 사용한 자동상관함수는 식(3)과 같다.

$$R_{ff}(\xi) = \sigma_{ff}^2 \exp\left\{-\frac{|\xi_1| + |\xi_2| + |\xi_3|}{d}\right\} \quad (3)$$

식(3)에서, σ_{ff} 는 추계장 $f(x)$ 의 분산계수(coefficient of variation : COV)이며, d 는 추계장의 진동수 특성을 표현하는 것으로서 상관관계거리를 나타낸다. 이 값이 작을수록 진동수가 많은 추계장을 나타낸다. ξ_i 는 식(2)에 나타난 상대거리벡터의 x, y, z 방향의 성분이다.

3. 냉각탑 쉘의 형상불완전

철근콘크리트 냉각탑에 나타나는 형상불완전(shape imperfection)은 많은 연구자들에 의하여 실제로 관측되거나 이론적으로 다루어졌으며, 완전한 형상의 냉각탑 쉘에 발생하는 응력장에 추가적인 응력을 발생시키는 것으로 보고되고 있다^{1),2),3),13)}. 형상불완전에 의하여 발생하는 추가적인 응력은 설계하중에 대한 냉각탑의 구조반응이 불확실성을 내포하고 있다는 것을 의미하는 것으로서 이를 고려한 해석 및 그 영향 평가의 필요성을 제시하고 있다. 형상불완전에 대한 기존의 연구들은 코사인 형상을 가지며 냉각탑의 둘레방향으로 존재하는 축대칭 형상불완전과, 볼록한 형상의 형상불완전 등의 국부적인 형상불완전이 주로 사용되었다. 그러나 실측에 의하면 형상불완전은 구조계의 일부에서만 나타나거나 축대칭으로 분포하지 않으며, 구조계 전체에 걸쳐 분포하는 특성을 가지는 것으로 나타났다¹³⁾. 관측에 따르면 120m 높이의 냉각탑의 경우 식(4)와 같이 정의되는 반지름 변화에 따른 형상불완전의 값은 최대 1m이상의 값을 가지는 것으로 나타났다.

$$\Delta R(X) = R(X)_{Design} - R(X)_{Actual}, \quad X \in \Omega_{Str} \quad (4)$$

여기에서, 좌표 x 는 구조계 내의 한 점을 나타낸다. 그러므로 형상불완전을 축대칭이나 볼록한 형상이 아닌 구조계 내에 전체적으로 분포하는 추계론적 장으로 가정하는 것은 합리적이라고 할 수 있다.

형상불완전을 추계장으로 가정하는 장점의 하나는, 이러한 가정을 통하여 냉각탑의 각 위치에 나타나는 변위, 응력 등의 구조 반응에 대한 통계적 특성치를 얻을 수 있다는 것이다. 즉, 기존에 사용되던 국부적인 형상불완전을 사용할 경우 단순히 구조 반응의 추가적 성분만을 얻을 수 있으나, 형상불완전을 추계장으로 모델링하고 이에 대하여 추계론적 해석을 수행하면 구조계 각 위치에서의 구조 반응의 평균값과 표준편차 등을 얻을 수 있다. 이러한 결과들을 통하여 해석자는 구조의 반응변화도가 민감한 부분을 알 수 있을 뿐만 아니라 그 양을 알 수 있으며, 이를 설계에 고려할 수 있다.

일반적으로 추계장 $f(x)$ 는 균질(homogeneous)이며 해석영역 내에 정규분포하는 것으로 가정한다. 추계장 $f(x)$ 의 평균값은 영(0.0)으로 가정되며, 분산계수는 해석자에 의하여 설정되거나, 실험 또는 관측 데이터가 있을 경우 이를 사용한다. 추계성을 가지는 인수에 대한 장 함수 $S(x)$ 의 일반적인 형태는 평균값을 S_0 라고 할 경우 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S(x) = S_0[1 + f(x)], \quad x \in \Omega_{Str} \quad (5)$$

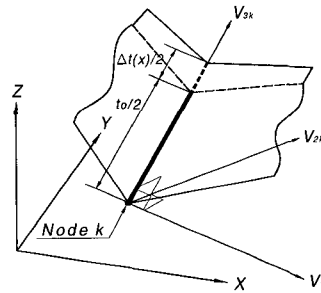


그림 1 절점 k에서의 방향여현벡터와 두께의 변화

그러므로 냉각탑에 형상불완전을 유발하는 반지름 R 과 쉘 두께 t 의 공간적 변화는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R(x) = R_0[1 + f_R(x)], \quad t(x) = t_0[1 + f_t(x)] \quad (6)$$

여기에서, $f_R(x)$ 과 $f_t(x)$ 는 각각 반지름 R 과 셀 두께 t 에 대한 추계장 함수이다. 전술된 바와 같이 이들 두 함수에 대한 이산과정(discrete process)은 통계학적 전처리방법을 사용하여 기 설정된 통계 특성치들을 만족하도록 생성된다.

냉각탑의 형상불완전의 추계장에 의한 표현을 위하여 냉각탑의 반지름 R 과 셀 두께 t 의 두 가지 기하학적 인수를 추계장으로 가정하였으므로, 추계론적 형상불완전의 생성에는 두 단계의 재형상 과정이 필요하다. 첫 단계는 냉각탑 반지름의 조절로서 추계장 발생 알고리즘을 통하여 생성된 $f_R(x)$ 의 값에 따라 반지름을 증가 또는 감소시킨다. 그 후 셀의 두께를 $f_t(x)$ 에 따라 조절하여 최종적인 추계론적 형상불완전 냉각탑 셀을 완성한다. 완전형상의 냉각탑 셀에 추가되는 반지름 및 두께의 변동량은 각각 아래와 같이 결정된다.

$$\Delta R(x) = R_0 f_R(x), \quad \Delta t(x) = t_0 f_t(x) \quad (7)$$

각 절점에서의 두께 변동량은 각 절점에서 구성되는 방향여현벡터를 통하여 계산한다. 절점 방향여현벡터의 세 성분은 그림 1에 나타나있다. 벡터 V_{3k} 는 절점 k 의 상부 및 하부의 좌표값으로부터 계산되며, V_{1k} 벡터는 V_{3k} 벡터에 수직하고 전체좌표계의 x - z 평면상에 위치하는 벡터이다. 벡터 V_{2k} 는 벡터 V_{3k} 와 V_{1k} 의 벡터곱에 의하여 결정할 수 있다.

절점 k 에서의 상부 및 하부의 전체좌표계 값은 절점 k 에서의 방향여현행렬 T_k 에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x = T_k^T \hat{x}, \quad \hat{x} = \left\langle 0 \ 0 \ \frac{1}{2} t(x) \right\rangle$$

where, $t(x) = t_0 + \Delta t(x)$ (8)

여기에서, $t(x)$ 는 절점 k 에서의 두께로서 변동부분을 포함한 셀의 두께를 나타낸다. 식(8)에서 보는 바와 같이 국부좌표 \hat{x} 가 단지 하나의 항만을 가지고 있으므로 변환과정은 단순한 곱연산으로 이루어질 수 있다. 절점 k 에서 셀의 상부와 하부의 좌표는 셀 중앙에서의 좌표를 x_{Center} 라 할 때 다음과 같이 주어진다.

$$x_{Top, Bottom} = x_{Center} \pm x \quad (9)$$

4. 냉각탑의 확률론적 거동

Port Gibson 냉각탑^{3),12)}의 변위 및 응력의 확률론적 거동을 알아보기 위하여 모두 4332개의 추계론적 형상불완전을 가지는 표본을 생성하고 해석하였다. 여기에서, 추계장의 통계적 특성치를 만족시키는데 필요한 표본의 수는 식 $[4 \times NF \times NEM]$ 으로 결정되었으며, $NF=3$ 그리고 NEM 은 냉각탑 모델링에 사용된 절점의 수인 361의 값을 사용하였다. 작용하는 바람하중의 분포와 구조 자체의 대칭성을 고려하여 그림 2에 보여진 바와 같이 반 모델을 적용하였다. 기하학적 형상불완전에 의하여 냉각탑의 구조적인 대칭성이 깨어진다고 볼 수 있으나, 해석에서 고려되는 형상불완전의 분산계수가 매우 작으므로 형상불완전에 의하여 야기되는 구조적 비대칭성은 무시할 수 있는 것으로 가정한다^{3),4),10)}.

Mississippi에 건설되어 있는 해석대상 냉각탑인 Port Gibson 냉각탑은 높이 150.5m를 가지며, 최대 반지름을 가지는 하부와 최소반지름 부분인 목(throat) 부분에서의 반지름은 각각 59.68m와 36.33m이다. 이 냉각탑의 경선(meridian)식은 두 식이 조합된 형식으로, 목 상부는 쌍곡면(hyperboloid)이며 목 하부는 타원면(ellipsoid)으로 구성되어 있다. 실제로 곡면은 식(10)과 같이 하나의 2차 곡선식으로 표현된다. 여기에서 \bar{z} 는 연직방향의 좌표로서 냉각탑의 목부분에 원점을 가지고 있다. 식(10)의 상수 $a_1 - a_6$ 는 곡면의 형상을 결정하는 상수들로 표 1에 제시하였다. 연직좌표에 따른 각 부분에서의 냉각탑 반지름은 r 로 계산된다.

$$a_1 \bar{z}^2 + a_2 r \bar{z} + a_3 r^2 + a_4 \bar{z} + a_5 r + a_6 = 0 \quad (10)$$

유한요소해석을 위하여 적용된 요소는 4절점 삼절점 셀요소⁶⁾로서 대체전단변형률장(substituted shear strain field)을 적용하여 거동을 향상시킨 요소이다. 각 요소는 10개의 콘크리트 층과 4개의 철근층으로 구성된다. 철근과 콘크리트의 재료 상수들은 표 2에 나타내었다. 여기에서, 단위 중량 γ 는 철근콘크리트의 단위중량이다. 작용하중은 풍속 40.2m/sec의 바람에

표 1 경선표현을 위한 상수

상수	쌍곡선식 (Z>120)	타원식 (Z<120)
a_1	-0.01506	-0.28035
a_2	0	0
a_3	1.0	1.0
a_4	0	0
a_5	-68.46	76.88
a_6	1167.17	-4112.73

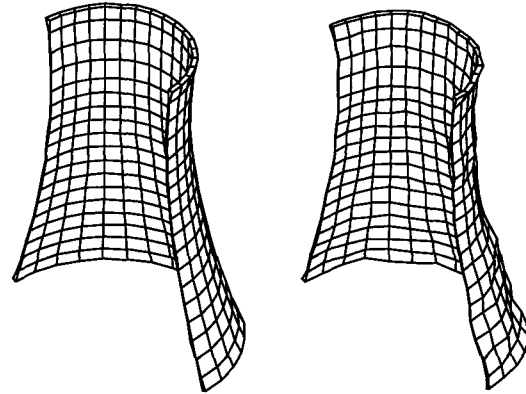
표 2 철근과 콘크리트의 재료상수

콘크리트	E_c	28268MPa
	f_c	27.6MPa
	f_t	3.0MPa
	ν	0.2
	γ	24.25kN/m ³
철근	E_s	200600MPa
	f_s	413.7MPa

의한 압력하중으로 참고문헌(Choi and Noh 1996a)과 냉각탑에 대한 표준시방서인 ACI 334 (1985)에 준하여 작용하였다.

냉각탑의 반지름과 셸의 두께는 일반적으로 경선 방향의 위치에 따라 다른 값을 가지지만, 반지름과 셸 두께의 임의성 정도를 나타내는 분산계수(COV)는 각 위치에서 모두 동일한 것으로 가정하였다.

본 논문에서는 모두 네 가지의 해석을 수행하였다. 첫번째의 해석은 냉각탑 기하인수의 하나인 반지름의 변화에 의한 형상불완전을 고려한 해석이며, 두 번째의 해석은 역시 기하변수의 하나인 셸의 두께가 공간적 임의성을 가질 경우에 대한 해석이다. 세 번째의 경우는 이들 두 기하인수가 동시에 공간적 임의성을 나타낼 경우에 대한 해석으로 상호 독립적으로 분포하는 두 인수를 동시에 고려할 경우 구조반응에 대한 영향을 알아보고자 한다. 마지막 해석은 냉각탑 재료상수의 공간적 임의성에 의한 구조반응에의 영향을 알아보기 위한 것으로 콘크리트 재료탄성계수의 공간적 임의성을 고려한 해석이다. 네 번째 해석의 목적은 구조의 기하인수와 재료인수의



(a)완전형상 (b) 추계론적 형상불완전

그림 2 냉각탑의 유한요소 모델

추계성에 의한 구조 거동에의 영향을 비교하기 위한 것이다.

그림 2는 냉각탑의 반 모델로서 완전형상과 추계론적 형상불완전을 가지는 냉각탑을 보여주고 있다. 형상불완전 셸의 경우 반지름과 셸 두께에 대하여 각각 0.5%와 1%의 분산계수를 가정하고 생성하였으며, 불완전형상을 명확하게 나타내기 위하여 변동량을 5배 확대하여 나타내었다. 그림 2b에 보여진 형상불완전은 기존에 실측을 통하여 관측된 형상불완전과 매우 유사한 형상을 보여주고 있다¹³⁾.

4.1 변위와 응력의 반응변화도

냉각탑의 형상불완전에 의한 구조반응의 통계적 특성치를 얻기 위하여 4332개의 표본에 대한 해석을 수행하여 변위와 응력에 대한 평균 및 표준편차를 다음의 표 3, 4와 같이 얻을 수 있었다. 셸의 두께 t 만이 추계성을 가진 경우와 반지름 R 이 추계성을 가지는 경우, 그리고 이들 두 인수가 모두 추계성을 가지는 경우에 대하여 각각 해석을 수행하여 제시하였다. 제시된 결과는 자동상관함수의 인수인 상관관계거리가 $d=20.0$ 인 경우이다.

표 3에서 보듯이 냉각탑의 반지름과 셸 두께의 추계성이 구조 반응에 미치는 영향은 반지름에 추계성이 나타나는 경우 더 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 셸 두께에 대한 추계장의 분산계수가 냉각탑 반지름의 경우에 비하여 두 배로 크게 설정되었다는 사실을 생각하면, 반지름의 불확실성에 의한 영향이

표 3 변위에 대한 통계치 ($d=20.0$) (변위단위 : cm)

항목	높이좌표(m)	추계장			SRSS/Mixed
		두께 t	반지름 R	t 와 R	
평균	23.95	-0.29909	-0.32431	-0.32374	1.3627
	49.14	-1.0583	-1.1404	-1.1411	1.3634
	74.33	-2.6725	-2.8911	-2.8926	1.3611
	98.81	-4.7784	-5.1616	-5.1632	1.3623
	121.9	-6.2242	-6.6740	-6.6785	1.3665
	152.7	-5.0712	-5.3089	-5.3121	1.3821
표준편차	23.95	0.00324	0.23310	0.23581	0.9886
	49.14	0.01019	0.52326	0.52239	1.0019
	74.33	0.01573	0.60440	0.59975	1.0081
	98.81	0.02146	0.55443	0.56587	0.9805
	121.9	0.02717	0.58757	0.58114	1.0121
	152.7	0.02503	0.32535	0.33075	0.9866
분산계수 (COV)	23.95	0.01084	0.71876	0.72841	0.9869
	49.14	0.00963	0.45883	0.45780	1.0025
	74.33	0.00588	0.20906	0.20734	1.0087
	98.81	0.00449	0.10741	0.10960	0.9809
	121.9	0.00436	0.08804	0.08702	1.0130
	152.7	0.00493	0.06128	0.06226	0.9874

표 4 응력에 대한 통계치 ($d=20.0$) (응력단위 : Pa)

항목	요소, 층, 성분			추계장			SRSS/Mixed
				두께 t	반지름 R	t 와 R	
평균	22	1	τ_{xz}	-0.11177E+05	-0.10584E+05	-0.10605E+05	1.4515
	31	10	τ_{yz}	0.47621E+04	0.60727E+04	0.61350E+04	1.2579
	130	10	τ_{xy}	0.56707E+06	0.54640E+06	0.54587E+06	1.4426
	193	1	σ_x	-0.15970E+06	-0.12810E+06	-0.12820E+06	1.5969
	199	10	σ_y	0.56479E+06	0.55046E+06	0.54963E+06	1.4349
	289	10	σ_y	-0.77040E+06	-0.76595E+06	-0.76522E+06	1.4197
표준편차	22	1	τ_{xz}	0.79879E+02	0.37744E+05	0.38368E+05	0.9837
	31	10	τ_{yz}	0.11530E+03	0.29419E+05	0.29634E+05	0.9928
	130	10	τ_{xy}	0.63846E+04	0.23290E+06	0.22982E+06	1.0138
	193	1	σ_x	0.73260E+04	0.45378E+06	0.44988E+06	1.0088
	199	10	σ_y	0.15377E+05	0.31398E+06	0.32161E+06	0.9774
	289	10	σ_y	0.61005E+04	0.20218E+06	0.20401E+06	0.9915
분산계수 (COV)	22	1	τ_{xz}	0.00715	3.5662	3.6178	0.9857
	31	10	τ_{yz}	0.02421	4.8444	4.8304	1.0029
	130	10	τ_{xy}	0.01126	0.4262	0.4210	1.0127
	193	1	σ_x	0.04587	3.5425	3.5091	1.0096
	199	10	σ_y	0.02723	0.5704	0.5851	0.9759
	289	10	σ_y	0.00792	0.2640	0.2666	0.9906

표 5 경선을 따르는 변위($d=20.0$) (변위단위 : cm)

높이	두께 t			반지름 R			Mixed t & R		
	평균	SD	COV	평균	SD	COV	평균	SD	COV
159.6	-4.4090	0.02453	0.00556	-4.5757	0.29271	0.06397	-4.5779	0.29648	0.06476
152.7	-5.0712	0.02503	0.00493	-5.3089	0.32535	0.06128	-5.3121	0.33075	0.06226
142.4	-5.9270	0.02655	0.00448	-6.2814	0.52080	0.08291	-6.2854	0.51303	0.08162
132.1	-6.3268	0.02799	0.00442	-6.7514	0.61728	0.09143	-6.7562	0.60363	0.08934
121.9	-6.2242	0.02717	0.00436	-6.6740	0.58757	0.08804	-6.6785	0.58114	0.08702
114.2	-5.8718	0.02554	0.00435	-6.3167	0.55657	0.08812	-6.3204	0.55691	0.08811
106.5	-5.3884	0.02354	0.00437	-5.8084	0.54604	0.09401	-5.8114	0.55161	0.09492
98.81	-4.7784	0.02146	0.00449	-5.1616	0.55443	0.10741	-5.1632	0.56587	0.10960
91.12	-4.1173	0.01945	0.00473	-4.4521	0.57132	0.12833	-4.4537	0.58223	0.13073
82.72	-3.3731	0.01751	0.00519	-3.6497	0.59048	0.16179	-3.6516	0.59138	0.16195
74.33	-2.6725	0.01573	0.00588	-2.8911	0.60440	0.20906	-2.8926	0.59975	0.20734
65.93	-2.0421	0.01400	0.00686	-2.2066	0.60290	0.27323	-2.2091	0.59392	0.26885
57.53	-1.5033	0.01220	0.00811	-1.6206	0.57173	0.35279	-1.6236	0.56782	0.34972
49.14	-1.0583	0.01019	0.00963	-1.1404	0.52326	0.45883	-1.1411	0.52239	0.45780
40.74	-0.71933	0.00797	0.01109	-0.77442	0.44698	0.57719	-0.77297	0.44573	0.57664
32.35	-0.44726	0.00565	0.01262	-0.48559	0.34818	0.71703	-0.48409	0.34841	0.71973
23.95	-0.29909	0.00324	0.01084	-0.32431	0.23310	0.71876	-0.32374	0.23581	0.72841
15.56	-0.19007	0.00121	0.00638	-0.19821	0.10629	0.53623	-0.19851	0.10902	0.54920

표 6 경선을 따르는 요소에서의 응력($d=20.0$) (경선방향응력 σ_y 단위 MPa)

높이	두께 t			반지름 R			Mixed t & R		
	평균	SD	COV	평균	SD	COV	평균	SD	COV
152.7	-0.11815	0.00249	0.02107	-0.10259	0.17136	0.16704	-0.10271	0.17017	0.16568
142.4	-0.77040	0.00610	0.00792	-0.76595	0.20218	0.26397	-0.76522	0.20401	0.26660
132.1	-0.64074	0.00791	0.01516	-0.64302	0.25231	0.40794	-0.64279	0.26514	0.41249
121.9	-0.52478	0.01206	0.02299	-0.52104	0.30388	0.58321	-0.52317	0.30647	0.58579
114.2	-0.06133	0.01364	0.22235	-0.07537	0.32498	4.3118	-0.07535	0.32561	4.3212
106.5	0.15923	0.01403	0.08811	0.15487	0.32761	2.1153	0.15265	0.32606	2.1359
98.81	0.56479	0.01538	0.02723	0.55046	0.31398	0.57040	0.54963	0.32161	0.58513
91.12	0.85043	0.01589	0.01868	0.83637	0.32203	0.38503	0.83678	0.33119	0.39579
82.72	1.14610	0.01667	0.01454	1.1251	0.32014	0.28453	1.1257	0.32681	0.29032
74.33	1.28240	0.01621	0.01264	1.2610	0.32905	0.26095	1.2602	0.32704	0.25951
65.93	1.33440	0.01570	0.01176	1.3093	0.33156	0.25323	1.3087	0.32935	0.25166
57.53	1.30570	0.01486	0.01138	1.2817	0.33808	0.26377	1.2797	0.34174	0.26704
49.14	1.19130	0.01363	0.01144	1.1662	0.33395	0.28635	1.1645	0.33643	0.28891
40.74	1.05170	0.01259	0.01198	1.0208	0.33148	0.32471	1.0237	0.33837	0.33056
32.35	0.83314	0.01127	0.01353	0.80716	0.33447	0.41438	0.80896	0.33676	0.41629
23.95	0.75003	0.01070	0.01426	0.70922	0.34105	0.48088	0.70938	0.33907	0.47798
15.56	0.36032	0.01051	0.02917	0.32326	0.35898	1.1105	0.32149	0.35775	1.1128
9.266	0.07149	0.00674	0.09427	0.05069	0.31120	6.1393	0.04914	0.31092	6.3280

두께의 불확실성에 비하여 매우 크다는 것을 알 수 있다. 변위의 분산계수는 냉각탑의 하부에서 상대적으로 크게 나타나고 있음도 알 수 있다. 표 3의 마지막 열에 나타나 있는 결과는 두개의 추계장 t 와 R 을 독립적으로 고려한 결과에 대한 SRSS(square root of sum of square)의 결과와 두 인수가 동시에 추계성을 가질 경우(Mixed)에 대한 해석의 결과를 비교한 값을 보여주고 있다. 약 1.0의 값을 보이고 있는 표준편차나 분산계수와는 달리 평균의 경우 특정한 값을 보이고 있는데, 이것은 두개의 기하학적 인수인 t 와 R 을 정규분포하는 독립적인 추계장으로 가정하고 있기 때문이다. 그러므로 3-5열에 나타나고 있는 평균값들이 상호 유사한 값을 나타내는 것을 볼 수 있으며 이에 따라 SRRS와 Mixed의 비교값이 제곱근 2의 값에 유사한 값을 보이고 있다.

표 4는 냉각탑의 임의 위치에 존재하는 요소에서 발생하는 응력에 대한 해석 결과로서 요소내의 층과 성분에 따른 결과를 보여주고 있다. 각 요소의 위치를 높이 z 와 바람방향으로부터의 각도 θ 의 좌표로 나타내면 순서대로 다음과 같다 : (15.5, 30), (15.5, 120), (65.9, 30), (91.9, 120), (98.8, 0), (142.4, 0). 이 경우 또한 변위와 마찬가지로 반지름 R 에 의한 구조반응의 변화도가 쉘 두께 t 의 경우보다 매우 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 평균값에 대한 SRSS는 변위에서와 유사하게 Mixed의 1.4배 정도로 나타나고 있다. 반지름 R 에 의한 분산계수와 쉘 두께 t 에 의한 분산계수의 비는 적게는 약 20배(돌레방향응력 σ_x), 60배(경선방향응력 σ_y)에서 크게는 수백배(전단응력의 경우) 이상의 값을 나타내어 각 응력성분에 따라 기하학적 추계성 인수의 영향이 다른 것으로 나타나고 있다.

냉각탑에서 바람하중과 직각을 이루는 경선을 따르는 절점 및 요소열에 나타난 변위와 응력에 대한 평균, 표준편차, 그리고 분산계수(COV)는 표 5, 6에 나타내었다. 표 6에서 높이 114.2m와 9.26m지점의 경우 분산계수가 다른 위치에 비하여 크게 나타나고 있는데, 이것은 그 부분에서의 평균응력 값이 영(0.0)에 가까운 값을 나타내기 때문이다. 목부분 근방(114.2m)에서의 응력이 영에 가까운 이유는 철근콘크리트의 자중에 의한 압축응력이 바람하중에 의한 인장응력에 의하여 상쇄되기 때문이며,

하부(9,266m)에서는 쉘의 두께가 상대적으로 매우 크기 때문에 적은 응력이 나타나고 있다. 그러나 응력의 표준편차는 표에서 보듯이 위치에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그러므로 다른 위치에 비하여 상대적으로 표준편차의 양이 과대평가되어 큰 값의 분산계수가 산정되었다.

표 5, 6으로부터, 최대 변위가 나타나는 위치인 132.1m지점에서의 변위와 최대인장응력이 발생하는 위치인 65.93m에서의 응력에 대하여 최대치계수(peak factor) $g=4.0$ 을 사용하여 최대 변동량 $g \cdot SD$ 를 구하고 식(11)과 같이 평균 값 \bar{R} 에 대한 비율을 계산해 보면 다음과 같다.

$$\frac{g \cdot SD}{\bar{R}} \quad (11)$$

쉘 두께 t 의 공간적 임의성에 의한 변위의 최대 변동량은 1.8%, 경선방향 응력의 최대 변동량은 4.7%, 반지름 R 의 공간적 임의성에 의한 변위의 최대 변동량은 36.6%, 경선방향 응력의 최대 변동량은 68%. 식(11)에서 SD 는 표 5, 6에 나타난 값으로 반응의 표준편차를 나타낸다. 그러므로, 쉘 두께 t 에 비하여 작은 분산계수를 가지는 반지름 R 의 공간적 임의성이 구조계의 반응변화도에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 일반적으로, 냉각탑에 나타나는 형상불완전은 건설과정 중에 개입되는 것으로 알려지고 있으나^{1),2)}, 실제로는 콘크리트의 크리프(creep)나 건조수축(shrinkage) 등의 장기 거동에 의하여 발생하는 형상불완전도 매우 큰 것으로 보고되고 있다³⁾. 이들 장기 거동에 의한 형상불완전은 주로 냉각탑의 반지름 변동을 유발한다. 그런데, 0.005(0.5%) 정도의 작은 분산계수를 가지는 반지름의 추계성이 평균응력의 70%에 가까운 추가적인 응력을 발생하므로 기하학적 형상불완전에 의한 냉각탑의 균열하중 및 극한하중 등의 감소를 예상할 수 있으며 이는 냉각탑의 내구성에도 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

그림 3~6은 냉각탑의 바람방향 경선을 따라 나타나는 변위와 응력에 대한 통계 결과로서 자동상관함수의 인수인 상관관계거리 d 의 변화에 의한 구조계의 반응변화도를 보여주고 있다. 변위의 경우(그림 3, 4) 분산계수는 냉각탑의 하부에서 크게 나타났고

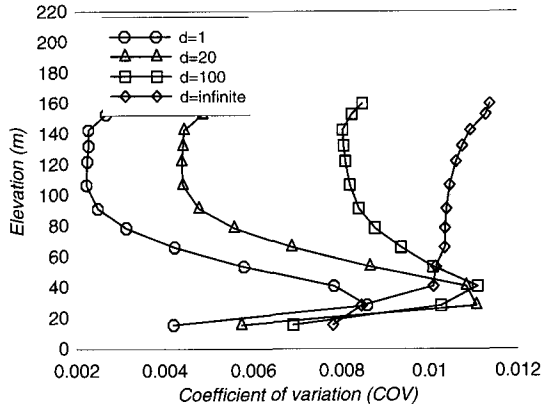


그림 3 바람방향 경선에서의 변위의 분산계수 변화 (추계장 : 셀 두께)

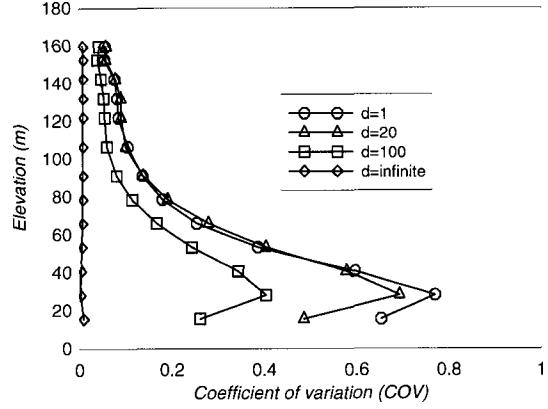


그림 4 바람방향 경선에서의 변위의 분산계수 변화 (추계장 : 반지름)

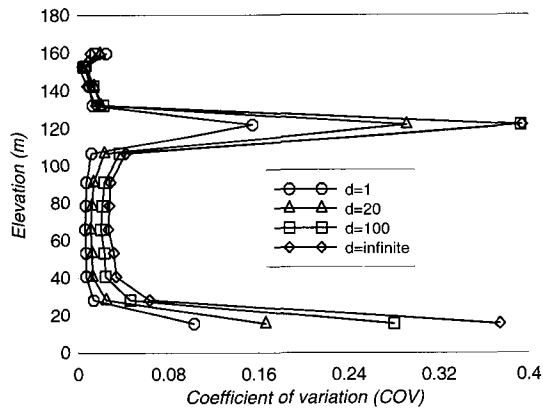


그림 5 바람방향 경선에서의 응력의 분산계수 변화 (추계장 : 셀 두께)

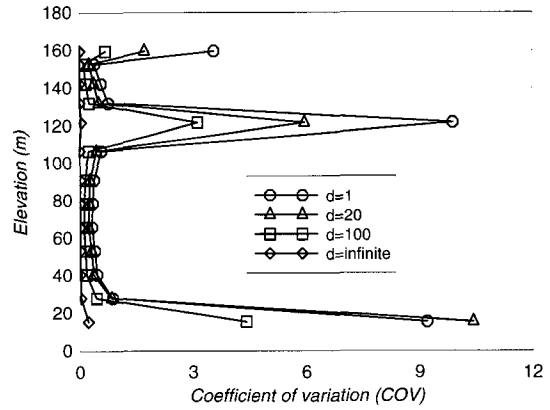


그림 6 바람방향 경선에서의 응력의 분산계수 변화 (추계장 : 반지름)

상부로 이동함에 따라 감소하는 결과를 보였다. 주목할 사항은 두께 t 의 공간적 임의성과 반지름 R 의 공간적 임의성에 의한 영향이 완전히 반대의 경향을 나타냈다는 것이다. 즉, 두께 t 의 경우 상관관계거리 d 가 증가함에 따라 분산계수가 증가하였으나 반지름 R 의 경우는 감소하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 상관관계거리 d 는 추계장의 파길이(wave length) 특성을 표현하는데, d 가 영(0.0)으로 근접할 경우 추계장은 백색잡음(white noise)의 형태를 가지며 d 가 무한대로 근접할 경우에는 구조계 내에서 일정한 값을 가지는 형태를 나타낸다. 그러므로 상관관계거리 d 가 무한에 근접할 경우 셀 두께 t 의 공간적

임의성을 고려한 해석은 두께가 다른 다수의 냉각탑 표본에 대한 해석이라고 볼 수 있으므로 분산계수는 증가한다. 그러나 반지름 R 의 공간적 임의성을 고려한 해석은 반지름이 서로 다른 냉각탑 표본들에 대한 해석의 경우와 동일하므로 변위의 표준편차는 감소할 것으로 예상할 수 있다. 이러한 양상은 응력의 경우에서도 동일하게 나타났다(그림 5, 6). 응력의 경우, 셀에 발생하는 응력이 영(0.0)에 가까운 부분인 냉각탑의 하부와 목(throat) 아래부분에서는 전술한 바와 같이 응력 표준편차에 대한 상대적 과대 평가로 인하여 분산계수가 매우 크게 나타나는 결과를 보이고 있다.

4.2 재료상수의 임의성에 의한 반응변화도

냉각탑은 철근콘크리트로 주로 건설되는 구조로서, 공간적 임의성을 가지며 존재할 수 있는 인수로 콘크리트 탄성계수 E 를 들 수 있다. 기존의 연구에 의하면 선형해석의 경우 재료탄성계수의 공간적 임의성에 의한 변위의 분산계수는 상관관계거리 d 가 커짐에 따라 추계장의 분산계수 값으로 수렴하는 결과를 보여주고 있다^(4),7),16). 그림 7은 콘크리트 탄성계수의 공간적 임의성에 의한 분산계수의 변화추이를 보여주고 있다. 탄성계수 추계장의 분산계수는 0.1로 가정하고 해석하였다. 변위는 바람방향 경선상의 높이 132m에 위치한 절점에서, 응력은 높이 99m에 위치한 요소에서 경선방향의 응력에 대하여 구하였다. 그림에서 보듯이 상관관계거리 d 가 증가함에 따라 변위의 분산계수는 추계장의 분산계수인 0.1에 근접해가는 것을 볼 수 있는데, 이는 상관관계거리 d 가 클 경우 추계장 표본들은 구조계의 전 범위에서 거의 일정한 값을 가지는 표본들로 생성되기 때문이다. 몬테카를로 시뮬레이션의 경우 표본들에 대한 해석결과는 조화(ensemble)의 개념에서 평균과 표준편차를 구하므로 변위의 분산계수는 추계장의 분산계수와 같은 값을 가지게 된다.

상관관계거리를 1.0×10^7 의 큰 값을 사용했을 경우 높이 132m의 바람방향 경선에서의 변위 분산계수의 수렴치는 냉각탑 셸의 두께 t 를 추계장으로 설정한 경우 0.01074, 냉각탑 반지름 R 을 추계장으로 설정한 경우 0.00719 그리고 재료상수인 콘크리트의 탄성계수 E 를 추계장으로 설정한 경우 0.0970의 값을 나타내었다. 셸 두께, 반지름, 재료 상수에 대하여 설정한 추계장의 분산계수는 각각 0.01, 0.005, 0.1이었다. 그러므로 셸의 두께와 재료탄성계수가 추계장으로 가정된 경우 변위의 분산계수는 상관관계거리 d 의 증가에 따라 추계장의 분산계수로 근접해가는 것을 알 수 있다. 그러나 냉각탑 반지름의 경우에는 그러한 특성을 나타내지 않고 있는데, 이는 반지름의 경우 냉각탑의 고유한 형상을 변화시키는 작용을 하기 때문인 것으로 생각된다. 반면, 셸의 두께와 재료 탄성계수는 냉각탑의 고유형상을 유지하며 공간적인 분포를 가지는 추계장이다.

이들 세 개의 인수를 추계장으로 가정한 해석 결과에서 찾을 수 있는 중요한 점은 셸의 두께 t 와 탄

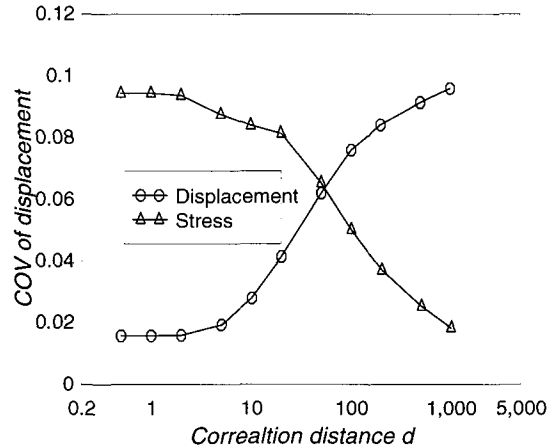


그림 7 탄성계수의 임의성에 의한 분산계수

성계수 E 의 경우 구조반응의 분산계수가 추계장의 분산계수를 상한값으로 하는 변화도를 나타내지만 (그림 3, 7), 반지름 R 의 경우에는 추계장의 분산계수를 하한값으로 하는 변화도를 나타낸다(그림 4)는 것이다. 이러한 결과는 셸의 일반적인 하중저항체계가 막작용(membrane action)에 의한다는 사실에 기인하는 것으로서 식(4)로 정의되는 형상불완전에 대한 제어의 중요성을 보여준다고 할 수 있다. 또한, 반지름 R 의 공간적 임의성에 의한 변위 분산계수의 최소값은 추계장의 분산계수보다 크게 나타나 반지름의 공간적 임의성에 의한 반응변화도를 추정하기 위한 일반적인 기준을 설정할 수는 없다.

5. 결 론

본 논문에서는 철근콘크리트 냉각탑의 형상불완전에 의한 구조 거동의 반응변화도에 대하여 논하였다. 건설과정중의 오류와 콘크리트의 장기거동에 의하여 유발되는 냉각탑의 형상불완전은 냉각탑에 추가적인 응력을 발생하여 균열하중, 극한하중 및 내구성 등을 감소시키는 작용을 한다. 냉각탑의 기하학적 형상불완전은 기존에 사용되던 모델인 코사인 형상의 축대칭 형상불완전과 블록형상의 형상불완전이 아닌 셸 두께 t 와 냉각탑 반지름 R 을 기하학적 변수로 하는 추계장으로 가정하였다. 추계장의 생성에는 통계학적 전처리기법을 사용하였으며 통계적 방법의 하나인 몬테카를로 시뮬레이션 방법을 적용하여 해석하였다.

해석결과 냉각탑의 반응변화도에 미치는 영향은 반지름의 공간적 임의성이 쉘 두께의 공간적 임의성에 비하여 매우 큰 것으로 나타났다. 반지름 R 의 추계장 분산계수는 쉘 두께 t 의 반으로 설정하였으나 쉘 두께의 공간적인 임의성이 냉각탑 응력에 5% 이내의 변화도를 유발한 반면, 반지름의 공간적 임의성은 70%에 가까운 변화도를 나타내어 냉각탑 쉘이 반지름의 임의성에 매우 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

추계장의 파길이 특성에 따른 구조 반응변화도를 알아보기 위하여 자동상관함수의 상관관계거리 d 를 변화시키면서 해석을 수행한 결과 쉘의 두께 t 와 콘크리트 재료탄성계수 E 의 공간적 임의성에 의한 결과는 상호 유사하게 추계장의 분산계수를 상한값으로 하는 수렴특성을 보인 반면, 냉각탑 반지름 R 의 공간적 임의성은 추계장 분산계수를 하한값으로 하는 수렴특성을 보였고 구조 반응의 분산계수는 추계장 분산계수보다 큰 값을 나타내었다. 그러므로 냉각탑 쉘 구조의 경우 반지름의 임의성에 의한 형상 불완전의 제어가 다른 기하학적 인수나 재료상수에 의한 임의성에 비하여 중요함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 냉각탑 쉘 구조의 하중저항 체계가 막작용이기 때문에 냉각탑 쉘 반지름의 공간적 임의성은 휨작용을 유발하여 구조 거동의 불확실성을 증가시키는 역할을 한다는 사실을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

1. Al-Dabbagh, A. and Gupta, A. K., "Meridional imperfection in cooling tower design". *Proceedings of the ASCE*, 105(ST6), 1979, pp.1089~1102
2. Alexandridis, A. and Gardner, N. J., "Tolerance limits for geometric imperfections in hyperbolic cooling towers". *J. Struct. Engng.* ASCE, 118(8), 1992, pp.2082~2100.
3. Choi, C. K. and Noh, H. C., "Nonlinear analysis of cooling tower shells with cyclic shape imperfections". *Proc., 3rd Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics (APCOM'96)*, Seoul, Korea, Vol. 2, 1996a, pp.1437~1443
4. Choi, C. K. and Noh, H. C., "Stochastic finite element analysis of plate structures by weighted integral method". *Structural Engineering and Mechanics*, 4(6), 1996b, pp.703~715
5. Choi, C. K. and Noh, H. C., "The Stochastic analysis of the Shape Imperfection of Cooling Tower Shells". *1998 SEWC (Structural Engineers World Congress)*, In CD-ROM, 1998, San Francisco, California, USA.
6. Choi, C. K. and Paik, J. G., "An effective four node degenerated shell elements for geometrically nonlinear analysis". *Thinwalled structures*, 24(3), 1996, pp.261~283
7. Deodatis, G., Wall, W. and Shinozuka, M., "Analysis of two-dimensional stochastic systems by the weighted integral method". Eds. Spanos, P. D. and Brebbia, C. A. *Computational stochastic mechanics*, 1991, pp. 395~406
8. Jullien, J. F., Aflak, W. and L'Huby, Y., "Cause of deformed shapes in cooling towers". *J. Struct. Engng.*, ASCE, Vol. 120, No. 5, May, 1994, pp.1471~1488
9. Kemp, K. O. and Croll, J. G. A., "The role of geometric imperfections in the collapse of a cooling tower". *The structural Engineer*, Vol. 54, No. 1, January, 1976, pp.33~38
10. Lawrence, M. A., "Basis random variables in finite element analysis". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, 1987, pp.1849~1863
11. Liu, K., Belytschiko, T. and Mani, A., "Probabilistic finite elements for nonlinear structural dynamics". *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 56, 1986, pp.61~81
12. Milford, R. V. and Schnobrich, W. C., "Non-linear behavior of reinforced concrete cooling towers". Civil engineering studies structural research series, No. 514, University

- of Illinois, May 1984
13. Radwanska, M. and Waszczyszyn, Z., "Buckling analysis of a cooling tower shell with measured and theoretically-modelled imperfections". *Thin-Walled Structures*, 23 (1-4), 1995, pp.107~121
 14. Yamazaki, F. and Shinozuka, M., "Simulation of stochastic fields by statistical preconditioning". *J. Engng. Mech.*, ASCE, 116(2), 1990, pp.268~287
 15. Yamazaki, F., Shinozuka, M. and Dasgupta, G., "Neumann expansion for stochastic finite element analysis". *J. Engng. Mech.*, ASCE, 114(8), 1988, pp.1335~1353
 16. Wall, F. J. and Deodatis, G., "Variability response functions of stochastic plane stress/strain problems". *J. Engng. Mech.*, ASCE, 120(9), 1994, pp.1963~1982
 17. ACI 334 (1985) "Reinforced Concrete Cooling Tower Shells Practice and Commentary". reported by ACI-ASCE Committee 334
(접수일자 : 1999. 12. 15)