

# 부등침하를 받는 회전 쉘의 최대응답 추정에 관한 연구

## A Study on Maximum Responses of Rotational Shells Subjected to Uneven Settlements by Stochastic Method

정 명 채\*  
Cheong, Myung-Chae

### 요 약

본 논문의 목적은 부등침하를 받는 회전 쉘의 최대 응답과 표준편차와의 관계를 규명하는 것이다. 이를 위해 표준편차에 대한 최대응답의 비( $\eta$ ) 및 그 개략값( $\eta_{apr}$ )을 통계적 수법으로 조사하였다. 또한 탁월차수(predominant harmonic number)의 함수로 표현되는  $\eta_{apr}$ 을 구하기 위한 식을 제안 하였다. 한편 침하는 Fourier급수로 표시하였다. 이때 각 항은 2개의 계수를 포함하게 되는데 하나는 진폭 스펙트럼이고 다른 하나는 위상각이다. 여기서는 위상각은 확률변수로, 진폭은 확정값으로 가정하였다. 해석에서는  $\eta$ ,  $\eta_{apr}$ 의 특성을 조사하기 위해 2 가지 type의 진폭 스펙트럼을 실험데이터를 근거로 설정한 후, 각 type에대해 100 sample씩의 위상각을 가정하여 사용하였다.  $\eta$ ,  $\eta_{apr}$ 은 응답의 종류, 쉘의 위치 그리고 진폭 스펙트럼의 type에 상관없이 거의 일정한 값으로 분포하며 그 값은 2.0 에서 2.5 사이의 값이 된다. 또한  $\eta_{apr}$ 의 값은  $\eta$ 의 값과 거의 비슷하지만 약간 큰 값으로 나타났다. 결론으로 부등침하를 받는 회전 쉘의 최대 응답은 표준편차의  $\eta_{apr}$ (약 2.5)배 임을 밝히고 있다.

### Abstract

The objective of this paper is to study a relationship between maximum response and its standard deviation of rotational shells that are subjected to uneven settlements. For this, the ratio,  $\eta$ , of the maximum response to standard deviation and it's approximate,  $\eta_{apr}$ , are investigated by stochastic methods. Also, an equation for  $\eta_{apr}$ , that is a function of predominant harmonic number is suggested. The settlements are represented by the Fourier series. Each term in the series contains two coefficients; the amplitude and the phase angle. It is assumed that phase angles are random variables and amplitudes are deterministic. To investigate the characteristics of  $\eta$  and  $\eta_{apr}$ , 100 phase angles for two types of artificial amplitudes spectra are used in the analysis.  $\eta$  and  $\eta_{apr}$  are almost constant regardless of amplitude type, position of a shell or type of responses; they fall into from 2.0 to 2.5.  $\eta_{apr}$  is always close to  $\eta$ , but tends to be somewhat greater. It may be concluded that a maximum responses of rotational shells subjected to uneven settlements are  $\eta_{apr}$  (about 2.5) times of its standard deviation. It is considered that this result is used when we design rotational shell structures subjected to differential settlements.

**Keywords** : cooling tower, fourier series, deterministic value, random value, extreme value, maximum value, uniform distribution, random number, Monte-Carlo method, uneven settlement, spectrum, standard deviation

\* 정희원·삼성중공업(주) 건설기술연구소, 선임연구원

• 이 논문에 대한 토론회를 1997년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1998년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

原子力에 의한 발전량의 증가와 함께 최근 건설되고 있는 cooling tower는 대형화되고 있다. 예를들면 France의 Golfetch와 Chooz에서는 1986년에 높이 170m를 넘는 대형의 cooling tower가 건설되었고 중국에서도 높이 150m, 하부 ring의 직경이 118m인 대형의 cooling tower가 건설되었다. 이러한 대형 cooling tower의 설계에는 기초의 부등침하가 중요한 문제로 대두되고 있다.<sup>2, 3, 4)</sup>

그러나 이에 대한 연구는 충분하다고 할 수 없다. 예를들면, ASCE-ACI<sup>1)</sup>, 독일의 VGB-guidelines<sup>2)</sup>등에서도 그 중요성에 관하여는 지적하고 있지만 구체적이고 定量的인 규정은 없다. 최근에 부등침하를 받는 cooling tower에 관한 몇 편의 연구가 발표되었다. Roman Ciesielski 등<sup>3)</sup>은 實測 데이터를 이용하여 부등침하를 받는 cooling tower의 응력추정 결과를, 그리고 Lu Wenda 등<sup>4)</sup>은 부등침하가 cooling tower의 응력에 미치는 영향을 각각 발표하였다. 이들 연구에서는 부등침하를 식(1)과 같은 Fourier series로 표현하고 진폭 스펙트럼  $U_i$  와 위상각  $\theta_i$  를 확정값으로하여 응력을 구하였다.

$$U = U_0 + \sum_{i=1}^n U_i \cos(i\theta - \theta_i) \quad (1)$$

식(1)의  $U_0$ 는 剛體沈下로 이 항은 응력을 발생하게 하지 않음에 주목하면 부등침하를 받는 회전셀의 응력해석을 위해서는 진폭 스펙트럼  $U_i$  및 위상각  $\theta_i$  를 결정하여야 함을 알 수 있다. 실제의 침하 데이터를 구하기가 매우 어렵지만 침하의 표준편차는 기존 정보를 활용하여 계산할 수 있음을 고려하여 Kato-Cheong은 식(1)의 위상각과 진폭 스펙트럼을 確率量으로 취급하고, 위상각이  $[0, 2\pi]$  사이에 균등분포(uniform distribution)하는 確率變數로 가정할 때의 진폭 스펙트럼을 엔트로피(entropy) 최대원리를 이용하여 구하고 응력의 표준편차를 추정하는 방법을 제안하였다<sup>5)</sup>. 그런데 실측 데이터가 어느 정도 존재

할 경우에는 침하의 진폭 스펙트럼을 確定量으로 얻을 수 있는데 이때의 응력추정에 관한 연구는 매우 중요한 과제로 생각된다.

Kato 등<sup>6)</sup>은 불규칙한 침하를 받는 cooling tower의 응력 추정식을 제안하고 설계시 문제로 되는 최대응답에 주목하여 최대응답과 표준편차와의 사이에는 정비례 관계가 성립할 것이라고 언급하고 있다. 예를들면 침하의 진폭 스펙트럼 중 1항만의 값을 가지고 나머지 항은 0인 경우에는 최대치가 표준편차의  $\sqrt{2}$  배(즉, 비례상수가  $\sqrt{2}$ )라고 기술하고 있다. 그들의 연구<sup>6)</sup>에서는 특별한 경우를 취급하고 있는데 보다 일반적인 경우에 관해 그 특성을 검토하는 일은 부등침하를 받는 회전 셀의 역학상 그리고 실용상 매우 중요하다고 생각된다.

본 논문의 목적은 부등침하를 식(1)과 같은 Fourier series로 표현할 때 부등침하를 받는 회전셀의 최대응답과 표준편차와의 비례상수의 일반적인 분포특성을 검토하는 것이다. 본 논문에서는 위상각을  $[0, 2\pi]$  사이에 균등분포하는 상호 독립인 確率變數로 가정하고 진폭 스펙트럼은 確定量으로 취급하였다.

## 2. 최대응답과 표준편차와의 관계

본 절에서는 부등침하가 식(1)로 주어졌을 때의 셀의 응답치를 구하고 각 응답의 평균치와 표준편차를 구하는 식을 유도한다. 그후 최대응답과 표준편차를 연관시키는 비례상수를 구하는 방법에 관하여 기술한다. 부등침하가 식(1)로 주어지는 경우, 회전 셀의 변위는 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} u(z, \theta) &= \sum_{i=1}^n u_i \cos(i\theta - \theta_i) U_i \\ v(z, \theta) &= \sum_{i=1}^n v_i \sin(i\theta - \theta_i) U_i \\ w(z, \theta) &= \sum_{i=1}^n w_i \cos(i\theta - \theta_i) U_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $u(z, \theta)$ ,  $v(z, \theta)$ ,  $w(z, \theta)$ 는 經線방향, 圓周방향 및 半徑방향의 변위이고  $u_i, v_i, w_i$ 는 單位量的 강제침하(강제변위)  $U_i = 1\text{cm}$ 를 주었을 때의  $i$ 차 모우드의 3방향 변위성분이다[Fig. 1]. 또  $z$ 는 쉘의 높이방향의 위치를 나타내며,  $\theta$ 는 원주방향의 위치를 나타내고 있다. 선형 탄성 범위에서는 겹침의 원리에 의해 응력이 다음 식으로 표시된다.

$$N_s(z, \theta) = \sum_{i=1}^n N_{s_i} \cos(i\theta - \theta_i) U_i$$

$$N_\theta(z, \theta) = \sum_{i=1}^n N_{\theta_i} \cos(i\theta - \theta_i) U_i \quad (3-1)$$

$$N_{s\theta}(z, \theta) = \sum_{i=1}^n N_{s_{\theta i}} \cos(i\theta - \theta_i) U_i$$

$$M_s(z, \theta) = \sum_{i=1}^n M_{s_i} \cos(i\theta - \theta_i) U_i$$

$$M_\theta(z, \theta) = \sum_{i=1}^n M_{\theta_i} \cos(i\theta - \theta_i) U_i \quad (3-2)$$

$$M_{s\theta}(z, \theta) = \sum_{i=1}^n M_{s_{\theta i}} \sin(i\theta - \theta_i) U_i$$

여기서  $N_s(z, \theta)$ ,  $N_\theta(z, \theta)$ ,  $N_{s\theta}(z, \theta)$ 는 각각 經線, 圓周 및 半徑방향의 合應力을 나타내고,  $M_s(z, \theta)$ ,  $M_\theta(z, \theta)$ ,  $M_{s\theta}(z, \theta)$ 는 각각 經선, 원주 및 반경방향의 合 모멘트를 나타내고 있다. 또  $N_{s_i}$ ,  $N_{\theta_i}$ ,  $N_{s_{\theta i}}$  및  $M_{s_i}$ ,  $M_{\theta_i}$ ,  $M_{s_{\theta i}}$ 는 각각  $U_i = 1\text{cm}$ 일 때의  $i$ 차 모우드의 면내 응력성분 및 힘 모멘트 성분이다[Fig. 1].

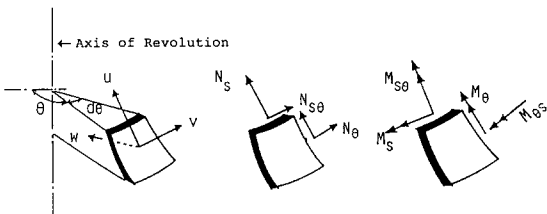


Fig. 1 Definition of displacements and stresses

다음에는 각 응답값의 평균 및 표준편차를 구하는 식을 기술하였다<sup>5)</sup>. 위상각  $\theta_i$ 가  $[0, 2\pi]$  사이에 분포하는 서로 독립한 確率變數라는 가정으로부터 다음 식이 성립한다.

$$E[\cos \theta, \cos \theta_i] = 0.5 \delta_{ij}$$

$$E[\sin \theta, \sin \theta_i] = 0.5 \delta_{ij} \quad (4)$$

$$E[\cos \theta, \sin \theta_i] = 0.0$$

여기서  $E[x]$ 는  $x$ 의 집합평균이며  $\delta_{ij}$ 는 kronecker delta이다. 식(2),(3),(4)를 사용하여 변위 및 응력의 평균과 표준편차를 구할 수 있다. 예를들면 경선 방향의 합응력의 경우는

$$E[N_s(z, \theta)] = E[\sum_{i=1}^n N_{s_i} \cos(i\theta - \theta_i) U_i] = 0.0 \quad (5-1)$$

$$\sigma[N_s(z, \theta)] = \sqrt{0.5 \sum_{i=1}^n (N_{s_i} U_i)^2} \quad (5-2)$$

여기서  $\sigma[x]$ 는  $x$ 의 표준편차이다. 식(5-2)에서 알 수 있는 것처럼 어느 높이에서의 응답량의 표준편차는 침하 및 각 응답치의 진폭 스펙트럼이 주어지면 추정할 수 있다.

다음으로 최대응답과 표준편차와의 관계에 관해서 생각해보자. 일반적으로 정규분포하는 임의의 확률변수  $x$ 는  $E[x]=0.0$ 의 경우  $x$ 의 극대, 극소값과 표준편차와의 사이에는 다음관계가 성립한다<sup>6)</sup>.

$$Max(x) = +\eta\sigma(x) \quad (6-1)$$

$$Min(x) = -\eta\sigma(x) \quad (6-2)$$

여기서  $Max(x)$ ,  $Min(x)$ 는 각각  $x$ 의 최대값, 최소값이다. 식(6)에서 알 수 있는 것처럼 확률변수  $x$ 의 극대, 극소값과 표준편차와의 사이에는 정비례 관계가 있으며, 이 식에서  $\eta$ 는 비례상수이다. 이 비례상수의 정확한 값은 부등침하의 진폭 스펙트럼  $U_i$  값 및 위상각  $\theta_i$ 에 달려있지만 그 개략값  $\eta_{opt}$ 는 卓越次數(predominant harmo-

nic number)를 이용하여 식(7)로 구할 수 있음을 A.G. Davenport<sup>8)</sup>가 증명하였다.

$$\eta_{apr} = \sqrt{21n(2\beta T)} + \gamma / \sqrt{21n(2\beta T)} \quad (7)$$

여기서  $\gamma$ 는 Euler정수이며, T는 함수  $x$ 의 영역, 또  $\beta$ 는 단위 구간당  $x$ 의 값이負에서正으로 변하는 回數이다. 이 식은 주기 T와  $\beta$ 의 값을 알면

식(6-1), (6-2)에서 정의하고 있는 비례상수의 개략값을 구할 수 있음을 나타내고 있다. 회전 쉘의 경우에는  $T=2\pi$ 이고  $\beta=m/2\pi$ 이므로 개략값은 식(8)로 구할 수 있다.

$$\eta_{apr} = \sqrt{21n(2m)} + \gamma / \sqrt{21n(2m)} \quad (8)$$

여기서  $m$ 은 卓越次數이다. 식(8)로부터 卓越次數  $m$ 을 알면 비례상수의 개략값  $\eta_{apr}$ 을 구할 수 있음을 알 수 있다. Table 1에는 몇 개의  $\eta_{apr}$  값을 표시하였다. 여기에 표시된 값들은 식(8)의  $m$ 대신에 1, 2, ...를 대입한 값으로  $m$  값을 알면  $\eta_{apr}$  값을 구할 수 있음을 나타내고 있다.

Table 1 Values of  $\eta_{apr}$

m	1	2	3	4	5	6
$\eta_{apr}$	1.67	2.02	2.19	2.32	2.42	2.49

최대응답과 표준편차간의 비례상수의 분포특성을 검토하기 위해 본 논문에서는  $\eta$ 와  $\eta_{apr}$  값을 각각 구하였다. 이를 위해 우선 서로 다른 두 가지 type의 침하 스펙트럼을 결정하고 위상 각으로는 後述하는 것처럼 각 type에 대하여 100 sample씩의 위상각을 이용하여 총 200 sample에 대한 응력을 구하였다. 마지막으로  $\eta$  및  $\eta_{apr}$ 을 구하였다. 예를들면 경선 방향 합응력  $N_s(z, \theta)$ 의 비례상수  $\eta(N_s(z)^{(i)})$ 의 경우,  $m=100$  sample의 Monte-Carlo법에 의해 구한 합응력의 최대치와 표준편차를 이용하여 식(9)로 구하였다.  $m=100$  sample을 취하는 것은 더욱 많은 수를 취하면 취할수록 더 일반적인 경우의  $\eta_{apr}$  값의 분포를 추

정할 수 있으나 그렇게되면 계산시간 등의 문제도 있고 참고논문<sup>5)</sup>의 연구에서 100 sample을 취하여 일반적인 경향을 추정하는 것을 참고로 하여 여기서도 100sample을 취하여 추정하기로 하였다.

$$\eta(N_s(z)^{(i)}) = \frac{\text{Max}(|N_s(z)^{(i)}|)}{\sigma[N_s(z)]} \quad (9)$$

식(9)에서  $i$ 는 sample번호로 1, 2, ...,  $m$ 의 값으로 하였다. 이때 평균값과 표준편차는 다음 식으로 구하였다.

$$E[\eta(N_s(z))] = (1/m) \sum_{i=1}^m \eta(N_s(z)^{(i)}) \quad (10-1)$$

$$\sigma[\eta(N_s(z))] = \sqrt{(1/m) \sum_{i=1}^m [\eta(N_s(z)^{(i)}) - E[\eta(N_s(z))]]^2} \quad (10-2)$$

한편  $\eta_{apr}(N_s(z)^{(i)})$ 는 식(3)에서 구한  $N_s(z, \theta)^{(i)}$ 의  $\theta$  방향의 분포로부터  $\beta^{(i)}$ 를 계산하여  $m^{(i)} = 2\pi\beta^{(i)}$ 로부터

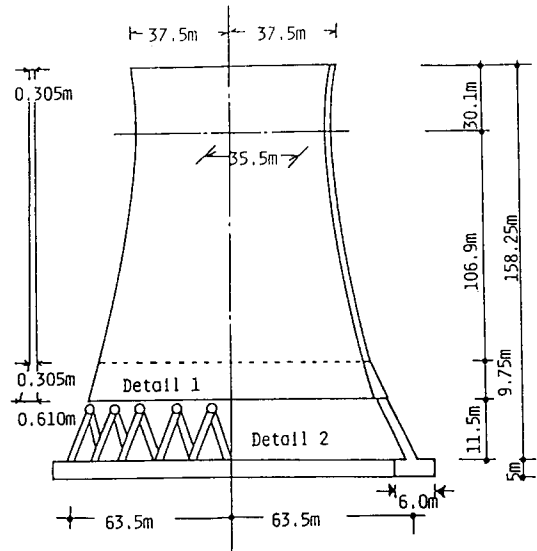


Fig. 2 Geometry of analysed shell

$$\eta_{apr}(N_s(z)^{(i)}) = \sqrt{21n(2m^{\theta})} + \gamma / \sqrt{21n(2m^{\theta})} \quad (11)$$

구하였다. 또 평균값, 표준편차는 음식으로 구하였다.

$$E[\eta_{apr}(N_s(z))] = (1/m) \sum_{i=1}^m \eta_{apr}(N_s(z)^{(i)}) \quad (10-1)$$

$$\sigma[\eta(N_s(z))] = \sqrt{(1/m) \sum_{i=1}^m (\eta_{apr}(N_s(z)^{(i)}) - E[\eta_{apr}(N_s(z))])^2} \quad (12-2)$$

이상의 방법으로 각 응답치에 대한  $\eta$  및  $\eta_{apr}$ 을 회전 쉘의 높이 방향의 각 위치  $z$ 에서 구하였다.

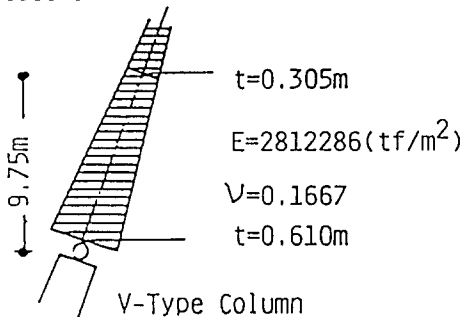
다음 절에서는 본 논문에서 가정한 확정값으로서의 침하의 진폭 스펙트럼과 確率量으로서의 위

상각의 설정방법 및 수치해석 결과에 관하여 기술한다.

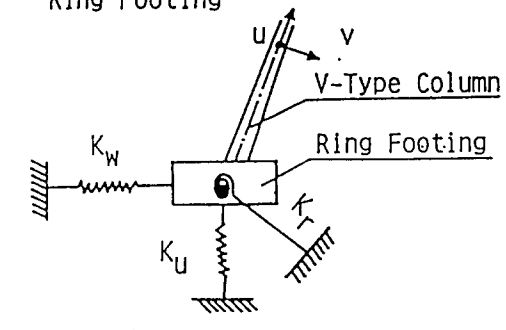
### 3. 수치해석 결과 및 고찰

확률량으로서의 침하 진폭 스펙트럼을 추정하는 일은 간단하지 않지만 본 논문에서는 침하의 실측 데이터에 기초한 2가지 type의 진폭 스펙트럼을 설정하여 해석에 이용하였다. Fig. 4(a)는 R. Ciesielski등<sup>1)</sup>의 cooling tower 4기에 대한 실측 데이터를 이용하여 침하를 Fourier 전개하여 얻은 4 case의 진폭 스펙트럼 분포이다. 이들을 참고하여 본 논문에서는 Fig. 5와 같은 진폭 스펙트럼을 설정하여 해석에 이용하였다[Type - I]. 또 무수한 패턴 중에서 보다 큰 응력을 발생시킬 것이라 생각

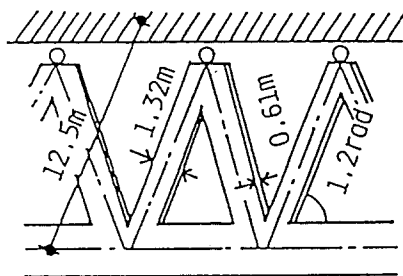
Detail 1



Ring Footing



Detail 2



$$E_s = 771683.82 \text{ (tf/m}^2\text{)}$$

$$E_{\theta} = 10847.43 \text{ (tf/m}^2\text{)}$$

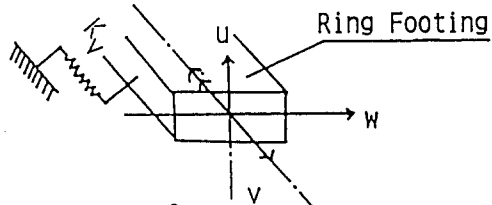
$$E_{s\theta} = 91491.99 \text{ (tf/m}^2\text{)}$$

$$V_{s\theta} = 8.434$$

$$V_{\theta} = 0.118$$

s; meridional,

$\theta$ ; circumferential



$$K_U = 40000. \text{ (tf/m}^2\text{)}$$

$$K_V = 20000. \text{ (tf/m}^2\text{)}$$

$$K_W = 20000. \text{ (tf/m}^2\text{)}$$

$$K_T = 0.0 \text{ (tf/m rad)}$$

Fig. 3 Geometry of ring footings and boundary conditions

되는 type으로서 Type-II를 설정하여 비교용으로 이용하였다[Fig. 6]. 그림에서 알 수 있는 것처럼 Type-I은 Fourier차수가 증가함에 따라 스펙트럼의 값이 감소하는 경우이고 Type-II는 Fourier차수의 증감에 관계없이 일정한 값을 가지는 경우이다. 이때 Fourier전개 차수를 얼마로 하느냐가 또 하나의 문제로 되는데, 본 논문에서는 참고문헌<sup>3)</sup>에서  $n=5$ 로 취한 것을 참고로하여 수렴성을 검토한 결과  $n=5$ 의 경우도 수렴한다고 할 수 있을 정도의 결과를 얻었으나 수렴성을 좀 더 확실하게 보장하기 위하여 그리고 본 논문에서의 계산이 선형탄성 범위를 감안하면 한 차수를 증가 시켜도 계산 시간에는 큰 차이가 없

음을 고려하여  $n=6$ 으로 가정 하였다. 또 어느 Type에서도  $U_i = 1cm$ 의 단위량의 값을 가정 하였는데 이것은 편의상 최대 진폭 스펙트럼의 값

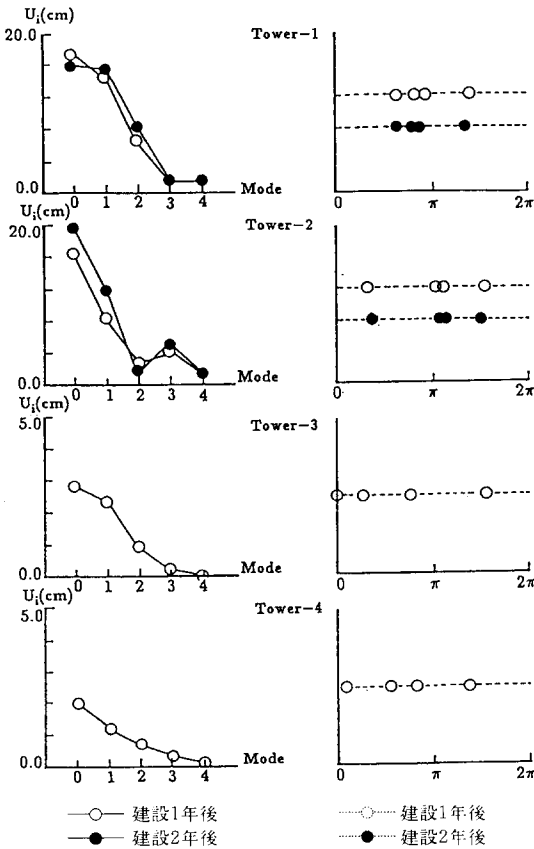


Fig. 4 Fourier amplitudes and phase angles based on observed datum by R. Ciesielski[1]

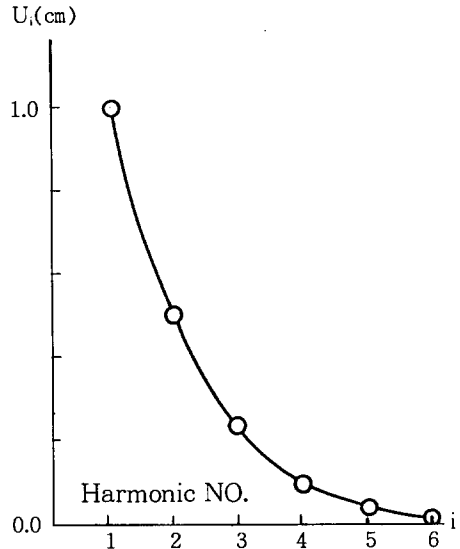


Fig. 5 Type-I spectrum

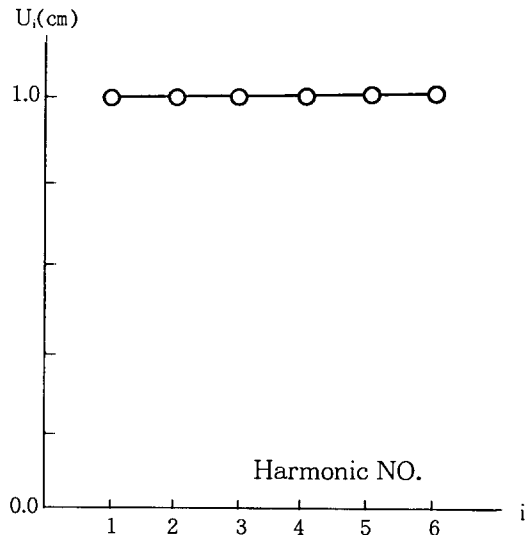
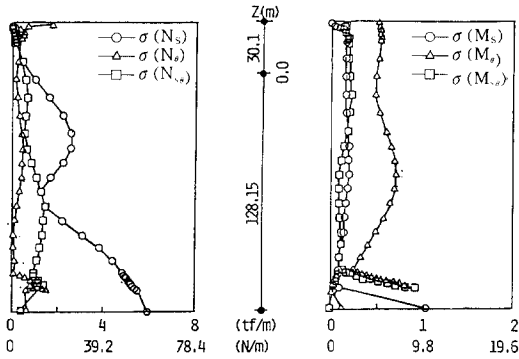


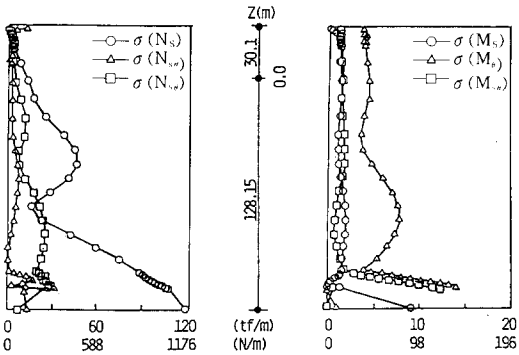
Fig. 6 Type-II spectrum

을 단위량의 값으로 가정한 것에 지나지 않는다.

Fig. 4(b)는 참고문헌 1)의 실측 데이터를 원주방향으로 Fourier전개하여 얻은 Tower 4기의



(a) Spectrum of Type - I



(b) Spectrum of Type - II

Fig. 7 Standard deviations of stresses

대한 위상각의 분포이다. 네 가지의 경우 모두 위상각이 균등분포하고 있다고 할 수는 없지만 데이터가 적은 것을 생각하여 본 논문에서는 위상각  $\theta$  를 구간  $[0, 2\pi]$  사이 균등분포하는 확률 변수로 가정하여 Monte-Carlo방법으로 100 sample을 발생시켜 해석에 사용하였다. 한편 계산은 회전 셀 요소를 사용하는 유한요소 해석 program을 작성하여 수행 하였다.

모델로서는 Fig. 2와 같은 철근콘크리트제 자연통풍식 cooling tower를 모델화 하였다. 이 모델은 P.L.Gould 교수<sup>1)</sup>가 제안한 "Larger model"로, 그림에서 보는 것처럼 tower는 단면적  $1.32 \times 0.61 m^2$ 의 44개의 V-type column으로 지지되고 있다. 또 지반 spring 은 상하, 원주 및 반경 방향의 이동과 ring기초의 회전에 대해서 각각  $K_u, K_v, K_w$ 와  $K_r$ 로 가정 하였다[Fig. 3]. 각 방향의 스프링 상수는 상하방향의 지반 반력계수  $ku$ 와 ring기초의 폭을 이용하여 계산하였다<sup>7)</sup>.

본 논문에서는 지반 반력계수  $ku = 6.67(kg/cm^3)$ 으로 가정하였다. D. D. Barkan<sup>7)</sup>의 분류에 의하면 이 지반은 silty clay에 상당하는 비교적 견고한 지반이다. 이때 상하방향의 스프링 정수는  $K_u = 6.67(kg/cm^3) \times 600(cm) = 400(kg/cm^2) = 40000(t/m^2)$ 로되며 원주방향과 반경방향의 스프링 정수는 상하방향 스프링 정수의 0.5배로 가정하였다. 또 ring기초에 대한 외력 모멘트는 발생하지 않는다고 가정하여  $K_r = 0(t/mrad)$ 으로 하였다. 해석에서는 Fig. 3과 같이 V-type column을 이방성 셀요소로 치환하고 column과 셀의 경계 접에서는 변위는 연속, 응력은 불연속으로 가정하였다.

Fig. 7은 가정한 2 type 의 침하 스펙트럼에 대한 각응답의 표준편차의 높이방향 분포이다. Type-I에대한 응답보다 Type-II의 응답이 분명히 크다. 이것은 Type-II의 진폭 스펙트럼 값이 Type-I의 값보다 크게 설정되었기 때문이다. Fig. 8. 은 Type-I의 스펙트럼에 대한 100case의 응답 가운데 1 case의 경선 방향 합응력의 높이 방향 및 원주방향의 분포를 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 경선 방향 합응력은 셀 최하단부에

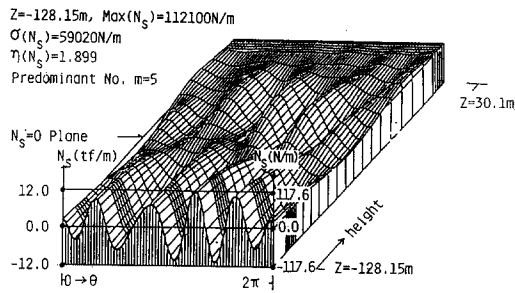


Fig. 8 Meridional stress resultants for one sample of Type- I spectrum

서 최대치  $11.44(t/m)$ , 표준편차는  $6.023(t/m)$ 이므로  $\eta = 11.44/6.023 = 1.899$ 임을 알 수 있다. 한편 개략치  $\eta_{apr}$ 는 탁월차수  $m=5$  이므로 식(8)로부터  $\eta_{apr} = 2.42$ 이다. 이 사실로부터  $\eta_{apr}$ 은  $\eta$ 보다 다소 큰 값을 가지는 경향이 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 특정한 높이에서의 Type-II의 스펙트럼 럽에 대한  $\sigma[N_s]$ 의 원주방향의 분포이다. 각 높

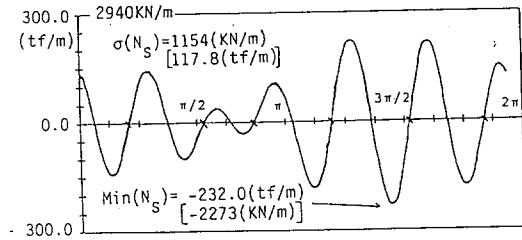


Fig. 9 Meridional stress resultant at  $Z=128.18m$  for one sample of Type-II spectrum

이에서의 각 응력값에대한 원주방향의 분포를 구하면 탁월차수의 계산이 가능하며 이 값들을 사용하면 식(8)로부터  $\eta_{apr}$ 의 값을 계산할 수 있다. 본 논문에서는 100 case의 응답치에 대하여 최대응답과 표준편차와의 비례상수  $\eta$  (식 (9)) 및 비례상수의 개략값  $\eta_{apr}$ (식 (11))을 쉘의 높이방향의 각 위치  $z$ 에서 계산하고 이들의 평균 및 표준편차를 구하여 분포특성을 검토 하였다.

각 응력에대한  $\eta$  및  $\eta_{apr}$ 의 분포를 Fig. 10, 11에 나타내었다. 이들 그림으로부터  $\eta$ 의 값은  $\eta_{apr}$ 의 값보다 다소 적은 것이 확인되고  $\eta_{apr}$ 의 값은 응답의 종류와 진폭 스펙트럼의 Type 및 쉘의 위치에 관계없이 거의 일정한 값을 가지며 그 값은 2.0 에서 2.5 사이에 분포하고 있음을 알 수 있다. 또  $\eta$ 의 분산보다  $\eta_{apr}$ 의 분산이 적은 것을 알 수 있다.

Fig. 12(a),(b)는 각각 Type-I의 진폭 스펙트럼에 대하여 구한 100case의 높이방향의 위치

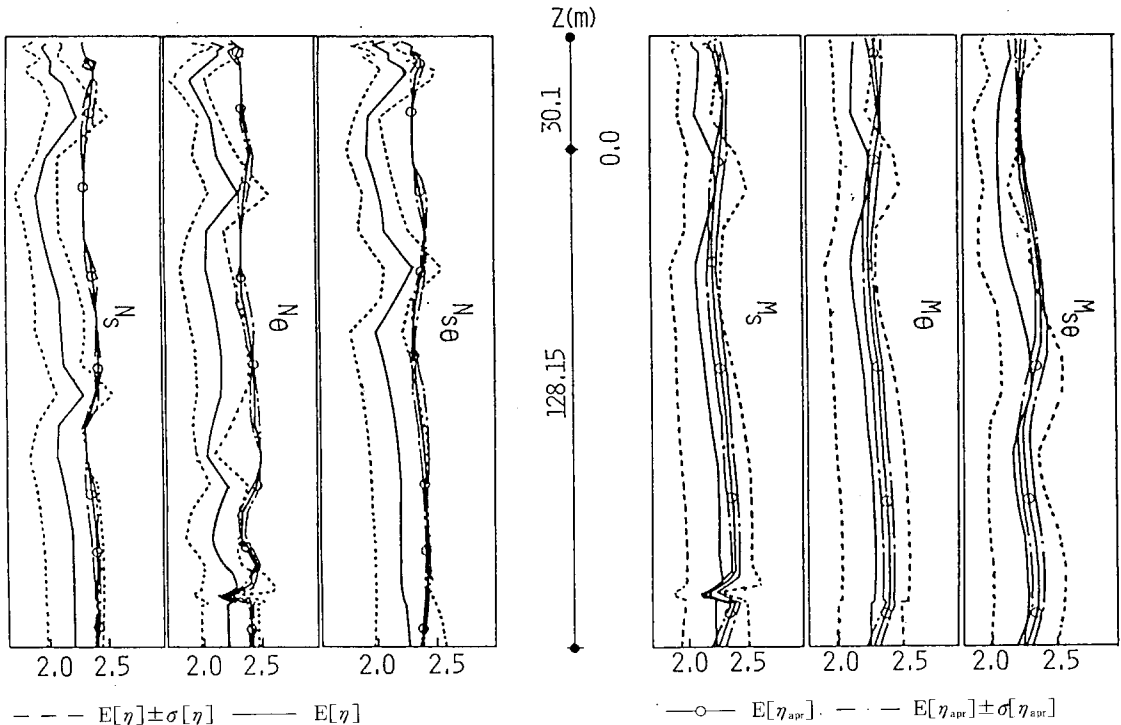


Fig. 10 Distribution of  $\eta$  and  $\eta_{apr}$  in the height direction for Type-I spectrum



$z = -128.15m$ 에서 구한  $\eta(N_s)$  및  $z = -116.65m$ 에서 구한  $\eta(M_\theta)$ 의 빈도분포이다.

논문[6]에서는 특정한 경우에 대하여 비례상수

$\eta$ 의 특성에 대하여 기술하고  $\eta = \text{일정}$ 임을 보이고 있지만 본 논문의 결과에 의하면 이것은 일반적인 경우에도 성립함을 알 수 있다. 따라서 침

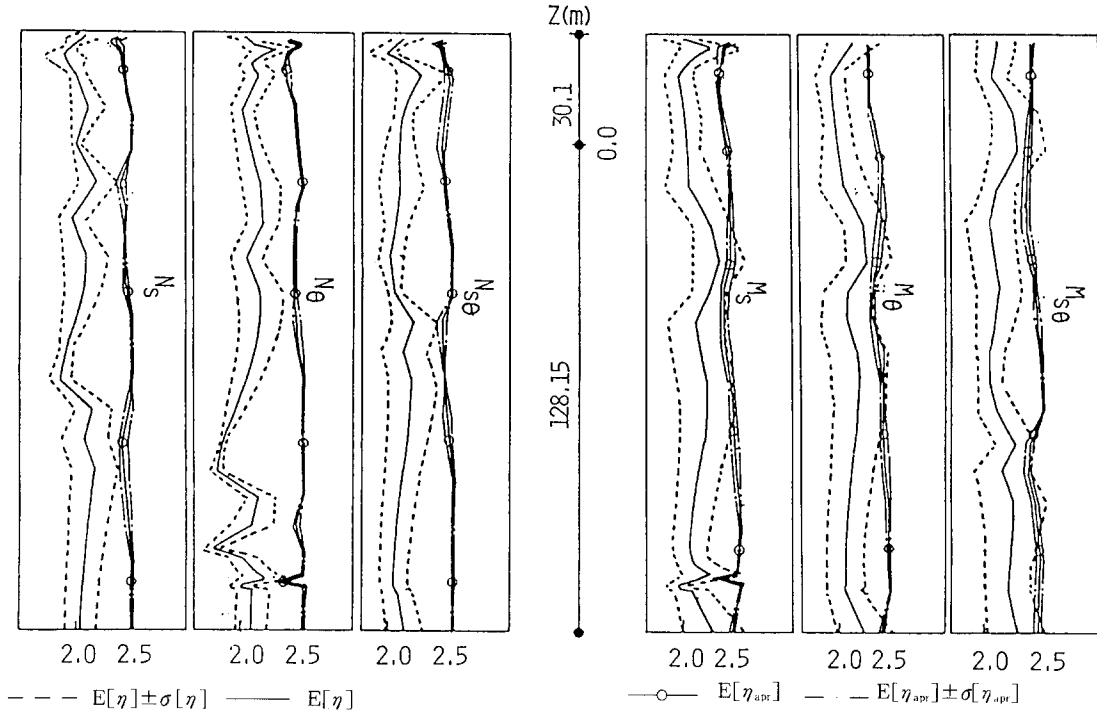


Fig. 11 Distribution of  $\eta$  and  $\eta_{apr}$  in the height direction for Type-II spectrum

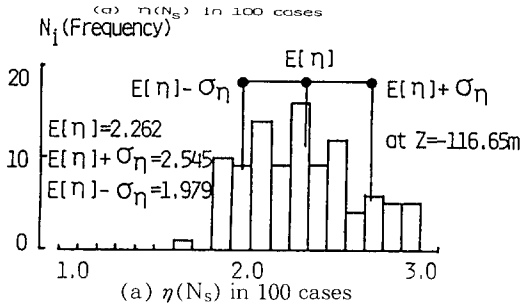
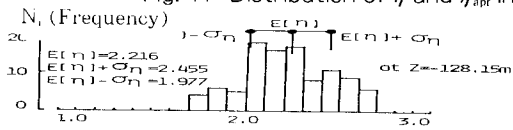


Fig. 12 Frequency distribution of  $\eta(N_s)$  and  $\eta(M_\theta)$  for Type-I spectrum

하의 진폭 스펙트럼이 확정량으로 주어지면 식 (3),(5-2)으로부터 응답의 표준편차를 구할 수 있고 또 최대 응답치는 표준편차의 약 2.0배 에서 2.5배 정도의 값을 알 수 있다. 즉, 설계시 문제로 되는 최대응력은 표준편차의 약 2.5배로 추정할 수 있고, 표준편차는 식(5-2)로 구할 수 있다.

#### 4. 결 론

셸 기초의 침하를 식(1)의 Fourier series로 가정하고 침하의 진폭 스펙트럼은 실측 데이터에 기초한 2 가지 type을 설정한 후, 위상각은  $[0, 2\pi]$  사이에 분포하는 균등 분포하는 확률변수 100case를 구하여 해석에 사용하였다. 또 부등침하를 받는 회전 쉘의 최대응답과 표준편차를 연관시키는 비례상수의 분포특성을 통계적 수법으로 검토 하였다.

다음으로 확률변수의 극대값과 표준편차와의 사이에는 거의 정비례관계가 성립함을 기술하고 그 비례상수의 개략값을 구하는 식을 유도하여 비례상수의 개략값은 탁월 차수로부터 추정할 수 있음을 증명하였다.

계산한 각 응답으로부터 각 응답의 최대값, 표준편차 및 탁월 차수를 구하였다. 또 구한 탁월 차수를 사용하여 비례상수의 개략값을 구하고 쉘의 각위치 및 각 응답에 대한 비례상수의 분포특성을 검토하였다. 부등침하의 Fourier 진폭스펙트럼이 확정값으로 주어지는 경우, 각 응답의 표준편차는 식(5-2)로 구할 수 있다. 또 각응답의 최대값과 표준편차와의 비례상수의 개략값은 회전 쉘의 위치,부등침하의 Fourier진폭 스펙트럼의 분포성상 및 응답의 종류에 관계없이 거의 일정하며 그 값은 2.0 에서 2.5사이에 분포한다. 따라서 최대값은 표준편차의 약 2.5배로 추정할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. David P. Billington, P. L. Gould and W. C. Schnobrich, "Reinforced Concrete Cooling

Tower Shell Practice and Commendary," ACI Journal, pp. 22-31, Jan., 1977

2. Bautechnik bei *Kühltürmen* Teil 2 : "Bautechnik Richtlinien(BTR) VGB Kraftwerkstechnik GmbH, Essen", 1980

3. Roman Ciesielski, Andrezej Guminski and Miroslaw Zak, "Large Settlement of Hyperboloidal Cooling Towers," Proceedings of the Conference of Large Ground Movements and Structures, The University of Wales Institute of Science and technology, Cardiff, July, 1977

4. Lu Wenda, Lin Baoqing and Renyi, "The Effect of Unequal Settlement of Foundation on the Stress Resultants of Hyperbolic Cooling Towers and Unequal Settlement Tolerance Limit," Proceedings of the 2nd International Symposium of Natural Draught Cooling Towers, Ruhr-Universitat, Bochum, Germany, september 5-7, 1984

5. 加藤史郎, 鄭明埰, "不同沈下を受ける回轉殻の應力推定に關する研究 -クーリングタワーへの適用-, " 日本建築學會構造系論文報告集, No. 425, 1991. 7

6. Kato, Shiro and Chiba, Yoshinao, "Stochastic Stress Analysis of Cooling Tower Shells Due to Differential Settlement," Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Osaka, Japan, Sept. 15-19, 1988

7. 土質工學會: "土と構造物の動的相互作用," 土質基礎工學ライブラリ-No. 9, pp. 50-60, 1979

8. Davenport, A.G., "Notes on the Distribution of the Largest Values of Random Function with Application to Gust Loading," Proc. of the Institution of Civil Engineers, Vol.28, pp. 187-196, 1964

(접수일자 : 1997. 3. 25)