김일성종합대학학보 주체108(2019)년
수 학 제65권 제3호

4차모멘트믿음성지표를 리용한 철탑의 치수최량화

조명덕, 김일진

우리는 4차모멘트방법을 리용하여 철탑구조물의 치수최량화를 진행하기 위한 연구를 진행하였다. 최대바람분포는 일반적으로 비정규분포[1]에 따르는데 이로부터 믿음도해석에 우연바람짐을 고려하는 경우 2차믿음성지표를 리용하면 정확도가 떨어지게 된다.

론문에서는 철탑의 치수최량화에 4차믿음성지표에 기초한 파손확률을 적용하기 위한 한가지 방법을 제기하였으며 해석시간을 줄이기 위하여 몇개의 특징적인 치수들만을 가지고 철탑구조형태를 결정하고 해석결과를 자동처리하는 전처리 및 후처리기능을 가진 Abaqus의 Python언어에 의한 2차프로그람개발을 진행하였다.

1. 4차모멘트방법을 리용한 철탑구조물의 치수최량화문제설정

구조물의 믿음도해석의 목적은 구조의 파손확률을 평가하는것이며 파손확률 P_f 는 다음과 같이 표시된다.

$$P_f = P[z = G(\boldsymbol{X}) \le 0] \tag{1}$$

여기서 $\boldsymbol{X}$ 는 불확정량을 표현하는 우연변수들로 이루어진 벡토르, $G(\boldsymbol{X})$ 는 제한조건을 표시하는 함수이다. z 가 정규우연분포에 따른다면 2차믿음성지표 β_{2M} 에 대한 파손확률은

$$P_f = \Phi(-\beta_{2M}) \tag{2}$$

으로 표시된다. 여기서 함수 Φ 는 표준정규우연변수의 분포함수이고 $\beta_{2M} = \mu_G / \sigma_G$ 이며 μ_G, σ_G 는 각각 z 의 기대값과 표준편차이다.

선행연구[2]에서는 비정규우연분포특성을 가지는 짐을 받는 구조물의 믿음도평가를 위하여 4차모멘트믿음성지표에 의한 파손확률평가방법을 제안하였는데 그것은 다음과 같은 식으로 쓸수 있다.

$$P_f = \Phi(-\beta_{4M}) \tag{3}$$

선행연구[3]에서는 이미 제안된 4차모멘트에 의한 믿음도평가방법의 복잡성을 극복하여 계산을 단순화하기 위한 한가지 방법을 제기하고 여러가지 경우에 대한 해석을 통하여 그 적용범위를 확정하였다. 이때 4차모멘트믿음성지표 β_{4M} 는 다음과 같이 계산된다.

$$\beta_{4M} = \frac{\sqrt[3]{2p}}{\sqrt[3]{-q+\Delta}} - \frac{\sqrt[3]{-q+\Delta}}{\sqrt[3]{2}} - \frac{h_3}{3h_4}$$

$$\Delta = \sqrt{q^2 + 4p^3}\,,\quad p = \frac{3h_4(1-3h_4) - h_3^2}{9h_4^2}\,,\quad q = \frac{(2h_3^3 - 9h_3h_4)}{27h_4^3}$$

$$h_3 = \frac{\alpha_{3G}}{4 + 2\sqrt{1 + 1.5(\alpha_4 - 3)}}\,,\quad h_4 = \frac{\sqrt{1 + 1.5(\alpha_{4G} - 3)} - 1}{18}$$

우의 식에서 α_{3G} 와 α_{4G} 는 $G(\boldsymbol{X})$ 의 비대칭도와 뾰족도로서

$$\alpha_{3G}=M_{3G}/\sigma_G^3,\ \alpha_{4G}=M_{4G}/\sigma_G^4$$

로 표시된다. 이때 4차모멘트믿음성지표 β_{4M} 의 적용범위는 $1\le\beta_{2M}\le5$ 이다.

철탑설계에서 바람짐은 매우 중요한 짐으로 되는데 우리 나라의 여러 지역에서 최대평균바람속도 V 의 확률분포함수는 다음과 같이 표시된다.[1]

$$F(V)=\exp\{-\exp[-A(V-B)]\} \tag{4}$$

결수 A, B 는 지방별에 따라 달라지는 상수들이다. 보는바와 같이 바람짐은 비정규분포에 따르며 따라서 식 (1)의 z 는 비정규분포에 따르며 믿음도해석에 4차모멘트믿음성지표를 리용해야 한다.

우연바람짐을 받는 철탑구조물의 믿음도에 기초한 최량화문제를 다음과 같이 설정할수 있다.

$$\begin{cases} P_f\le P_{fL} \\ \boldsymbol{L}_{\min}\le\boldsymbol{L}\le\boldsymbol{L}_{\max} \\ mass\to\min \end{cases} \tag{5}$$

여기서 P_f 는 철탑의 부재의 최대파손확률, P_{fL} 는 제한파손확률, $\boldsymbol{L}$ 은 최량화하기 위한 철탑의 치수들과 자름면치수들을 성분으로 가지는 벡토르, $\boldsymbol{L}_{\min}$ 과 $\boldsymbol{L}_{\max}$ 은 각각 치수의 아래와 웃한계를 나타내는 벡토르이며 $mass$ 는 철탑의 질량이다.

2. 4차모멘트지표를 리용한 파손확률을 계산하기 위한 한가지 방법

철탑의 믿음도해석을 위하여 식 (1)의 함수 $G(\boldsymbol{X})$ 를 $G(\boldsymbol{X})=Y-S$ 로 정한다. 여기서 Y 는 류동한계로서 정규분포에 따르는 우연량이며 S 는 매 부재에서의 응력이다. 일반적으로 S 는 철탑구조물과 전기줄무게, 얼음무게에 의한 응력 S_G 와 바람짐에 의한 응력 S_W 의 합으로 표시된다.

$$S=S_W+S_G \tag{6}$$

부재의 자름면적을 A 라고 하고 속힘을 N_T 라고 하면 $S=N_T/A$ 이다. 이때 $N_T=N_W+N_G$ 로 표시할수 있는데 바람짐을 F_W 라고 하면 $N_W=kF_W$ 로 된다. k 는 바람짐 F_W 가 부재에 주는 영향결수이다. 즉 $S=kF_W/A+S_G$ 로 표시되며

$$k=\frac{S_W A}{F_W} \tag{7}$$

로 된다. 이 식에서 F_W 는 다음과 같이 표시된다.

$$F_W=\mu_s\left(\frac{1}{2}\rho_a V^{*2}\right)A_p \tag{8}$$

여기서 μ_s 는 철탑의 형태와 관련되는 결수이며 A_p 는 바람방향으로의 부재의 사영면적이다. 높이에 따르는 바람속도는 $V=V_{10}(H/10)^\alpha$ (여기서 α 는 지면의 거치름과 관련된 상수)으로 표시되는데 비가 올 때 등가바람속도를 V_{10}^* 로 표시하면 높이에 따르는 등가바람속도는 $V^*=V_{10}^*(H/10)^\alpha$ 으로, 강수량의 세기(mm/h)를 R 라고 하면 V_{10}^* 은 다음과 같이 표시된다.[4]

$$V_{10}^{*}=V_{10}+0.009\,376R^{0.708\,7}(\exp(0.006\,462V_{10})-1.248\,6\exp(-0.276\,9V_{10})) \qquad (9)$$

k를 결정하면 바람짐의 우연특성량들로부터 부재에 작용하는 응력의 우연특성량을 결정할수 있으며 이로부터 $G(\boldsymbol{X})$의 우연특성량을 결정하여 파손확률 P_f를 결정할수 있다.

치수최량화를 진행하는 방법은 다음과 같다.

① 초기치수 $\boldsymbol{L}$로 설정된 철탑구조물에 바람짐을 작용시키지 않고 해석을 진행하여 S_G를 결정한다.

② 새로운 $\boldsymbol{L}$에 대한 A_p를 계산하여 식 (8)로부터 바람짐을 결정한다. 이때 V^*은 식 (9)를 리용하여 결정한다. 바람짐을 고려하여 해석을 진행하면 S를 얻고 식 (6), (7)로부터 k를 결정한다.

③ 매 부재들에 대한 P_f를 계산하여 제한조건에 맞는가를 판정한다.

④ 질량을 평가한다. 정지조건이면 해석을 끝내고 아니면 ⑤로 간다.

여기서 정지조건은 여러가지 방법으로 줄수 있는데 최대세대수, 시간한계, 적응도함수한계, 무효세대수, 무효시간제한 등을 줄수 있다.

⑤ $\boldsymbol{L}$을 갱신하고 ①로 간다.

제안된 알고리듬에 따르는 해석을 유한요소프로그람 Abaqus와 그것의 2차개발언어인 Python, 전용해석프로그람 Matlab의 유전알고리듬해석모듈인 GA모듈을 리용하여 수행하였는데 그 해석흐름도를 그림 1에 보여주었다.

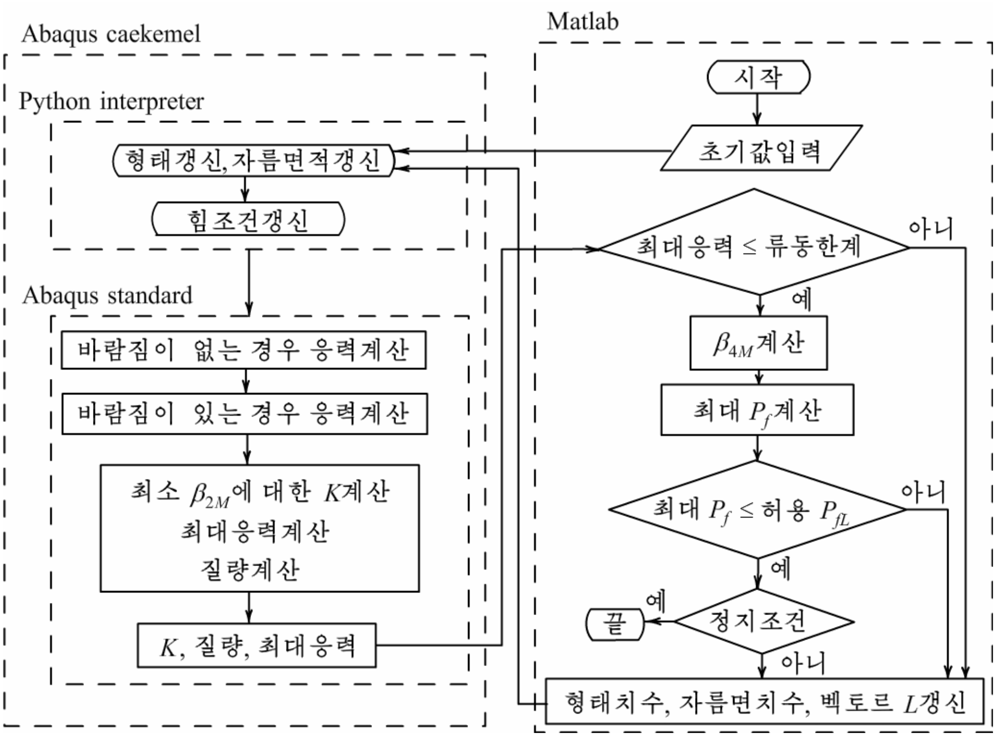

그림 1. 해석흐름도

해석시간을 단축하기 위하여 Abaqus cae의 핵심부만을 기동시켜 Matlab와 련결시켰다.

그림 1에서 보는바와 같이 Abaqus cae의 핵심부는 Matlab로부터 받은 치수들을 받아

Python언어로 작성된 전처리부에 의하여 철탑모형을 갱신하며 입력화일을 풀이기에 보낸다. Python언어로 작성된 후처리기능에 의하여 최대응력이 탐색되고 최대파손확률을 가지는 요소에 대한 바람짐의 영향결수 k가 계산되며 이 값들과 철탑의 전체 질량이 Matlab에로 넘어간다.

3. 계 산 실 례

3회선의 550kV송전탑에 우의 최량방법을 적용하여 계산을 진행하였다. Python프로그람을 리용하여 H1~H8, W1~W4, Ang1, Ang2와 같은 14개의 형태최량변수들이 주어지면 철탑의 형태가 완전히 결정되도록 하였다.(그림 2)

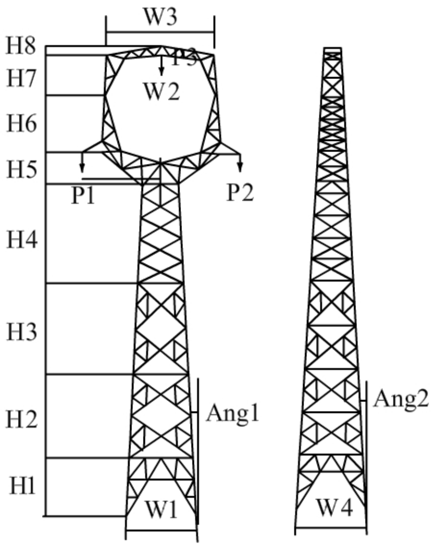

그림 2. 송전탑의 형태최량변수

철탑의 전체 높이와 지면으로부터 전기줄까지의 높이는 일정한 치수를 유지해야 하므로 상수라고 볼수 있으며 따라서 최량화를 위한 독립인 형태치수는 12개이며 이 치수들은 련속최량변수들로 된다. 이 치수들외에 H1~H8까지의 매 구간에서 주재와 사재의 자름면형태에 대한 설계변수들을 설정하였다. 형강의 자름면형태는 국규에 따라 표준화되여있으므로 련속적으로 변할수 없고 따라서 16개 변수들은 리산최량변수들로 된다. 최량화하여야 할 총변수의 개수는 28개이다.

해석에서는 비바람에 의한 짐과 철탑의 자체질량, 전기줄의 질량, 얼음짐을 고려하였는데 바람짐특성은 《ㅊ》지방으로 설정하였다. 이때 한상의 전기줄질량은 약 7.5t이며 부착되는 얼음의 질량은 약 1.67t으로서 9.17t에 해당한 짐이 작용한다. 이외에 외자를 비롯한 부분에 의한 짐까지 고려하여 약 9.5t에 해당한 짐이 작용한다고 보았다.

제한조건으로서 철탑의 파손확률을 0.001%로 설정하였다.

정지조건은 최대세대수를 100으로, 무효세대수를 50으로 주었다.

계산은 정상상태와 사고상태(1개의 전기줄이 끊어진 경우)에 진행하여 보다 위험한 상태의 풀이를 최종치수로 선정하였다. 사고상태에서는 전기줄에 의한 편심짐이 고려되였는데 그 짐은 1.5t이라고 가정하였으며 철탑의 한팔에서 전기줄이 끊어졌다고 보았다.

정상상태에서의 해석결과에 의하면 철탑의 질량은 11.17t이다. 이때의 파손확률을 보면 5.6×10^{-4}이다.

사고상태에서의 결과를 보면 자름면치수에서는 변화가 없고 형태치수에서의 변화가 있었으며 파손확률은 6.9×10^{-4}이고 질량은 11.35t으로서 조금 증가하였다.

사고상태에서 얻은 형태치수를 가진 철탑에 대하여 안전결수를 리용한 규준에 따라 자름면치수를 결정하면 이때 질량은 15.02t이다.

보는바와 같이 믿음도에 기초하여 철탑을 설계하면 안전결수를 리용하여 철탑을 설계할 때보다 질량을 3.67t 절약할수 있다.

맺 는 말

론문에서는 첫째로, 믿음도해석의 정확도를 높이기 위하여 비정규분포특성을 가진 우연짐을 받는 철탑의 치수최량화에 4차믿음성지표에 기초한 파손확률을 적용하고 그것을 계산하기 위한 한가지 방법을 제기하였다. 둘째로, 최량화해석시간을 줄이기 위하여 Abaqus에서의 Python언어로 몇개의 특징적인 치수들만을 가지고 철탑구조형태를 결정하고 해석결과를 자동처리하는 전처리 및 후처리기능을 가진 2차프로그람개발을 진행하였다.

계산실례에서 보여주는바와 같이 믿음도에 기초하여 철탑을 설계하는 경우 많은 강재를 절약할수 있다.

참 고 문 헌

[1] 김일룡 등; 건축과 건설, 2, 10, 주체103(2014).

[2] Y. G. Zhao et al.; Structural Safety, 23, 1, 47, 2001.

[3] Y. G. Zhao et al.; Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 5, 151, 2007.

[4] F. Xing et al.; Structural Safety, 58, 1, 2016.

주체108(2019)년 3월 15일 원고접수

Sizing Optimization of Transmission Tower using 4M-Reliability Index

Jo Myong Dok, Kim Il Jin

In this paper, we proposed an approach for applying failure probability based on 4M-reliability index to sizing optimization of transmission towers. And using Python subroutine of Abaqus we developed a program that made a tower with only several dimensions and treated results automatically, so that the solution time was decreased.

Key words: fourth-moment method, failure probability