

풍하중을 받는 송전철탑의 정적, 동적 및 좌굴해석

Static, Dynamic and Buckling Analyses of a Power Transmission Tower under Wind Load

정형조* 신동승** 문병욱*** 박지훈**** 이성경***** 민경원†
Jung, Hyung-Jo Shin, Dong-Seung Moon, Byoung-Wook Park, Ji-Hun Lee, Sung-Kyung Min, Kyung-Won
(논문접수일 : 2005년 12월 8일 ; 심사종료일 : 2006년 11월 25일)

요지

가섭선 및 애자가 연결되어 있는 복잡한 구조물인 송전철탑의 3차원 모델링을 통하여 동특성을 파악하고, 풍하중에 대한 응답 특성을 정적, 동적 및 좌굴 해석을 가섭선의 절단 유무에 따라 분석하였다. 우선, 고유치해석을 통해, 송전철탑이라는 구조시스템이 일반 건축물과는 달리 극소수의 저차 모드가 구조물의 동적 거동을 좌우하지 않고, 상대적으로 많은 모드들이 동적 거동에 기여한다는 것을 확인하였다. 두 번째로, 정적 해석과 좌굴 해석을 통해, 대상 구조물이 정적인 개념의 풍하중에 대해서 구조적으로 안전하고 좌굴에 대해서도 충분한 안전율을 확보하고 있음을 확인하였다. 그러나, 모든 가섭선이 단절되는 극단적인 경우에는 안전율이 상당히 낮아졌으며 이러한 경우에 구조물의 붕괴 및 전도를 방지할 대책에 대한 검토가 필요하다고 사료된다. 마지막으로, 풍하중의 시간에 따른 변화를 고려한 동적해석을 통해, 풍하중의 동적 변동성분이 구조물의 응답을 증가시키고 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 송전철탑, 풍하중, 좌굴안정성, 풍응답특성

Abstract

This paper describes dynamic characteristics of a power transmission tower consisting of lots of power lines and insulators. A numerical 3D modeling for the static, dynamic and buckling analyses of the power transmission tower is presented considering the case when the power lines are cut. Eigenvalue analysis indicates that the transmission tower shows different behavior comparing to usual structures governed by several low modes. The transmission tower is governed by lots of modes. It is verified that the transmission tower is structurally safe against the static wind and buckling loads. But the structural and buckling safety is not guaranteed when all power lines are cut, which comes to collapse the transmission tower. Further study is in need to overcome such case. Wind dynamic analysis shows that fluctuating wind loads increase the response of the tower.

Keywords : transmission tower, wind load, buckling stability, wind response characteristics

1. 서론

송전철탑(power transmission tower)을 포함한 송전 및 변전 설비는 국가의 주요한 기간 시설물로서, 송전철탑이 태풍이나 국지적인 돌풍과 같은 강한 바람으로 인해 기능 수행에 장애가 발생하거나 최악의 경우 전력공급이 중단되는

경우에는 국내 사회 및 경제 전반에 미치는 파급효과가 매우 크다. 이러한 송전철탑의 붕괴 및 손상을 방지하기 위한 적절한 대책을 수립하기 위해서는 송전철탑이라는 구조 시스템에 대한 상세한 분석이 선행되어야 한다. 송전철탑은 기하학적 비선형 거동을 보이는 가섭선과 연결되어 있고, 고유진동수가 매우 근접한 매우 복잡한 다수의 진동모드를 가지고 있

† 책임저자, 정희원 · 단국대학교 건축공학과 교수
Tel: 02-709-2731 ; Fax: 02-795-7046
E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

* 세종대학교 토목환경공학과 조교수

** 한국유지관리 사원

*** 단국대학교 건축공학과 대학원 석사과정

**** 인천대학교 건축공학과 전임강사

***** 단국대학교 건축공학과 연구전임강사

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

다(Y. Momomura 등, 1997). 가섭선은 그림 1과 같이 낙뢰피해 방지를 위한 가공지선과 철탐암(arm)에 연결된 전력전송을 위한 전선으로 구성되어 있다. 철탐암과 전선 사이에 있는 애자는 절연체로써 송전철탐으로 전류가 흐르는 것을 방지한다. 풍하중에 의한 송전철탐의 거동 특성은 송전선의 거동에 매우 크게 영향을 받기 때문에, 철탐의 동적 거동을 정확하게 예측하는 것은 매우 어려운 해석으로 알려져 있다. 풍하중에 의하여 압축력을 받는 송전철탐의 부재는 세장한 L형강으로 구성되어 있기 때문에 좌굴파괴의 위험성이 있다. 풍하중에 따른 송전철탐의 특성을 살펴보기 위하여 응답면기법을 이용한 송전철탐의 풍하중 취약도를 예측한 결과 풍향각이 대략 30°~45°일 때, 가장 취약한 것으로 나타났다(조호연 등, 2005). 그러나 기존 연구에서는 가섭선의 장력, 질량 및 절단 여부와 애자의 질량 등을 고려한 상세 해석이 수행되지 않았다. 본 논문에서는 위의 영향을 고려하여 고유치 해석을 수행하여 고유주기와 모드의 분포를 분석하여 동특성을 파악하였다. 송전철탐의 정적해석에서는 철탐의 자중, 가섭선과 애자장치의 자중과 같은 수직하중과 철탐 본체와 철탐암에 대한 풍압력, 가섭선과 애자장치에 대한 풍압력과 가섭선의 장력과 같은 수평하중을 모두 고려한 상세 해석을 수행하였고 좌굴응력 계산을 통하여 철탐의 좌굴안정성을 검토하였다. 마지막으로, 정적 풍하중을 가지고 카이멀 스펙트럼(Kaimal's spectrum)을(John D.Holmes) 이용하여 풍하중에 대한 동적 시간이력 곡선을 도출해 낸 후, 선형 시간이력해석을 수행하여 풍하중의 동적 성분이 철탐의 응답에 미치는 영향을 분석하여 풍하중의 동적 변동성분이 송전철탐의 응답을 증가시키고 있음을 확인하였다.

2. 해석 구조물 개요

본 연구에서 고려한 해석 대상 구조물은 높이 70m의 송전전압 345kV급 송전철탐이다. 대상 송전철탐은 철탐주체가 4면 동형의 구성으로 되어있는 사각철탐이고, 애자장치가 현수 형태로 달려있는 현수애자장치 철탐이다. 여기서 현수형(suspension type)과 내장형(tension type) 송전철탐은 송전선의 수평각도에 따라 분류된다. 송전철탐 사이의 전선의 수평각도가 적고 직선에 가까울 경우 그림 1과 같이 현수형 송전철탐을 사용하며, 수평각도가 큰 경우는 그림 2와 같이 내장형 송전철탐을 사용한다. 본 논문에서는 송전철탐의 거동을 정확하게 구현할 수 있도록 그림 3과 같이 3차원 모델을 구성하였다. 가섭선 및 애자는 집중질량으로 치환하여 그림 3에 ●로 표시되어 있다.

해석프로그램은 SAP 2000을 사용하였다. 모델의 총 절점수는 608개이고, 모든 부재는 실제부재의 단면을 가진 1,716개의 보 요소로 구성하였다. 이음부의 거셋 플레이트, 볼트, 엘리베이터, 대피소 등은 모델에서 제외시켰다. 주주재 및 복재의 볼트 이음부위는 강결되어 있다고 가정하였으며, 지점부는 철탐기초인 콘크리트 구조물이 지반과 함께 거동하는 것으로 가정하여 고정 지점을 사용하였다. 이렇게 구성된 최종 모델의 총 자유도 수는 3,624개이다.

3. 송전철탐의 동특성 해석

3.1 동특성 해석을 위한 모델 개요

송전철탐을 해석하는 데 있어서 가섭선의 질량과 애자장치

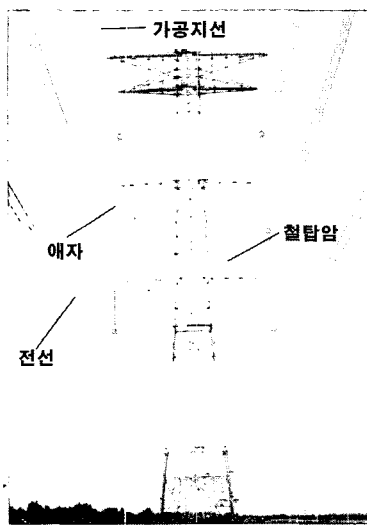


그림 1 현수형 송전철탐

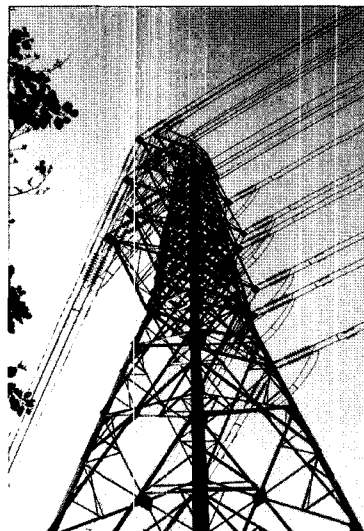


그림 2 내장형 송전철탐

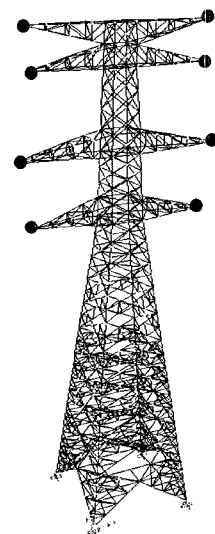


그림 3 송전철탐 3차원 해석 모델

의 질량 및 가섭선의 장력을 고려하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 기존 연구문헌(김기옥, 2001)의 결과를 바탕으로 하여, 그림 3과 같이 가섭선 및 애자장치의 질량은 첩탑압단부 조인트에 집중질량으로 고려하였고, 가섭선의 장력은 상시인 경우에는 양쪽의 장력의 균형을 이루게 되므로 고려하지 않았다. 여기서 상시 하중이라 함은 가섭선(가공지선+전선)의 절단을 고려하지 않은 경우의 하중을 말하고 이상시 하중이라 함은 가섭선의 절단을 고려하는 경우의 하중을 말한다. 첩탑 본체와 가섭선 및 애자의 질량을 집중질량으로 고려하여 가섭선 가설 후의 동특성을 파악하였다.

3.2 동특성 해석 결과

그림 4는 송전첩탑의 동특성 해석 결과 얻어진 저차고유 모드 4개를 나타내고 있다. 송전첩탑에 대한 고유치해석 결과를 일본 송전용지지물 설계 표준(한국전력공사, 2004)에 제시된 식 (1)로부터 얻어진 값과 비교해 보면 다음과 같다. 송전첩탑의 높이가 70m이므로 식으로부터 얻어진 1차 고유 주기의 범위는 0.49~0.84초이고 실제 고유치해석을 수행한 결과 얻어진 1차 고유주기는 0.707초이므로 일본 설계표준에서 제시하고 있는 주기 범위에 포함된다. 고유모드에 대한 질량참여율은 표 1에 나타내었다.

$$T_1 = 0.007H \sim 0.012H \quad (1)$$

여기서 T_1 은 구조물의 1차 고유 주기이고, H 는 송전첩탑의 높이이다.

4. 송전첩탑의 풍응답 특성 해석

본 장에서는 풍하중을 외부 하중으로 고려하여 송전첩탑을 해석하고 그 결과를 분석하였다. 먼저, 가공송전선용 첩탑 설계기준(일본전기학회, 1979)에 준하여 계산된 정적 풍하중을 가지고 선형 정적해석을 수행하였고, 좌굴응력 계산식을 통해 첩탑의 좌굴안정성을 검토하였다. 마지막으로, 정적 풍

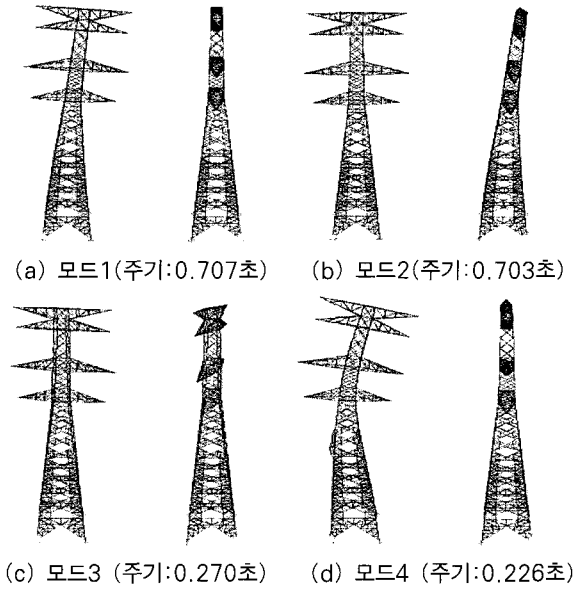


그림 4 송전첩탑의 고유 모드

표 1 첩탑의 고유주기와 질량참여율

모드	x-방향			y-방향		
	주기 (초)	모드별 질량참여율	누적 질량참여율	주기 (초)	모드별 질량참여율	누적 질량참여율
1	0.707	66%	66%	0.703	66%	66%
2	0.165	14%	80%	0.199	12%	78%
3	0.148	3%	83%	0.163	3.50%	82%
4	0.137	8%	91%	0.145	1%	83%
5	0.121	2%	93%	0.134	7%	90%

하중을 가지고 카이말 스펙트럼(Kaimal's spectrum)을 이용하여 풍하중에 대한 동적 시간이력 곡선을 도출해 낸 후, 선형 시간이력해석을 수행하여 풍하중의 동적 성분이 첩탑의 응답에 미치는 영향을 검토하였다.

4.1 정적해석

송전첩탑의 정적해석에서는 첩탑의 자중, 가섭선과 애자장치의 자중과 같은 수직하중과 첩탑 본체와 첩탑압에 대한 풍

표 2 하중 조합

구 분		직 풍			사 풍			H_a	P	W_t	W_c
		H_t	$H_{ta'}$	H_c	$1.6 H_t$	$0.5 H_{ta'}$	$0.75 H_c$				
90도 풍향	상시	○	○	○				○		○	○
	이상시	○	○	○				○	○	○	○
60도 풍향	상시				○	○	○	○		○	○
정 면(0도)	상시	○	○					○		○	○
	이상시	○	○					○	○	○	○

압력, 가섭선과 애자장치에 대한 풍압력과 가섭선의 장력과 같은 수평하중을 모두 고려하였다. 송전철탄에 가해지는 풍하중의 각도는 그림 5에서와 같이 풍향각에 따라 영향이 달라진다. 영향이 큰 90도 풍향과 60도 풍향을 다루며 가섭선의 절단 유무에 따른 상시와 이상시를 고려하여 해석한다.

취약철탄 교체공사용 설계도면(345KV 의정부 T/L NO.78, 1996)에 제시된 하중조합을 입력하중으로 하여 정적해석을 수행한 후, 철탄의 각 부재에 생기는 부재력과 응력을 계산하였다. 계산된 응력 값을 부재별로 설계기준의 허용응력 값과 비교하였다. 표 2와 같이 송전철탄 설계기준에 제시된 하중 조합에 따라서 하중을 작용시켰을 때, 송전철탄에서 가장 큰 축력을 받는 주주재의 하단부에 발생하는 최대인장력 및 압축력은 표 3과 같다. 표 2에서 H_t 는 철탄본체 풍압력, H_{ia} '는 철탄 압 축면 풍압력으로서 철탄압 정면풍압력의 0.2배, H_c 는 가섭선 풍압력과 애자장치등의 풍압력, $1.6 H_t$ 는 주주재 풍압력(풍향각 90도시 풍압력의 1.6배, $0.5 H_{ia}$ '는 암의 풍압력(풍향각 0도시 풍압력의 0.5배, $0.75 H_c$ 는 가섭선 풍압력(풍향각 90도시 풍압력의 0.75배), H_a 는 수평각도하중, P는 가섭선의 절단으로 인하여 생기는 불평형장력, W_t 는 철탄중량, W_c 는 가섭선과 애자장치등의 중량을 나타낸다. 변수조합시 O 표시에 해당하는 하중을 모두 합하여 가하였다.

주주재에 최대 압축력 및 압축응력이 발생하며 송전철탄의 높이에 따른 주주재의 최대 압축력 및 압축응력은 그림 6, 7과 같다. 특히, 압축응력은 가공송전선용 철탄 설계기준에서 제시하고 있는 허용압축응력 값과 비교하였다. 여기서, 상시 설계응력에 대한 구조용강재(SS540)의 허용압축응력(4100 kgf)에 따른 허용압축응력도는 $\sigma_y/1.5 [kgf/cm^2]$ 이고, 이 이상시 설계응력에 대하여는 이의 1.5배를 표준으로 한다. 여

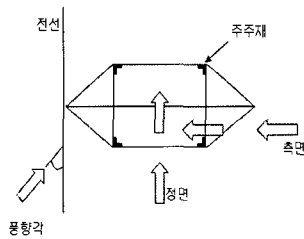


그림 5 풍향각

표 3 풍하중 작용시 주주재 하단부의 최대인장력 및 압축력

작용력	90도 풍향 상시 [kgf]	90도 풍향 이상시 [kgf]	60도 풍향 상시 [kgf]
인 장	42,900	168,600	54,600
압 축	59,800	188,900	71,800

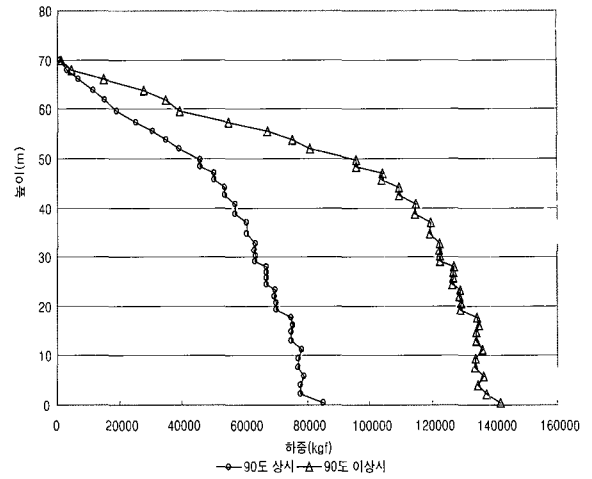
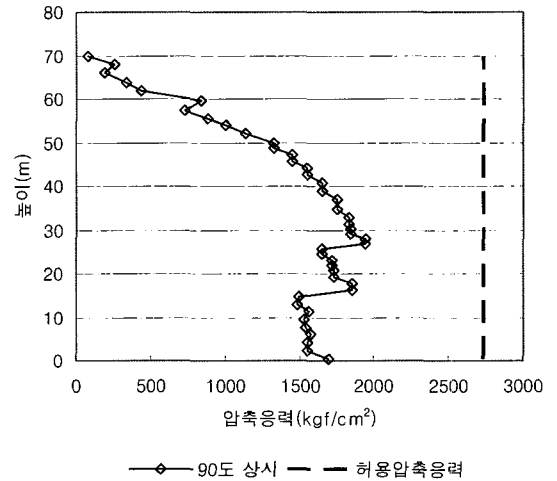
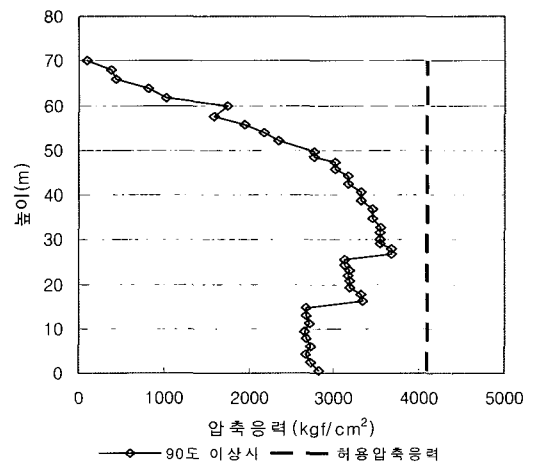


그림 6 90도 상시, 이상시의 철탄 높이별 최대 압축력



(a) 90도 상시 주주재의 압축응력 및 허용압축응력



(b) 90도 이상시 주주재의 압축응력 및 허용압축응력

그림 7 철탄높이에 따른 주주재의 압축응력 및 허용압축응력

기서 σ_y 는 항복점 응력도(kg/cm^2)이다. 표 2에 있는 여러 하중조합에 대해 정적해석을 수행한 결과, 상시와 이상시 모든 경우에 대해서 주주재의 압축응력이 설계기준에서 제시한 허용압축응력보다 작음을 확인하였다. 상시의 경우에는 계산된 압축응력이 허용압축응력의 70%수준이었다. 반면에, 모든 가섭선이 절단된 이상시에는 선로직각방향(풍향 90도)으로 하중이 작용하는 경우 허용압축응력에 90%정도 되는 상당히 큰 값을 보였다.

4.2 좌굴안정성 해석

선형 좌굴해석을 통해 대상 송전철탐이 충분한 좌굴 안정성을 확보하고 있음을 확인하였으나, 비탄성 좌굴에 의해서 파괴가 발생할 수 있기 때문에 송전철탐의 각 부재에 실제 정적해석을 통해 구해진 부재의 압축력을 표 4와 같이 가공 송전선용 철탐 설계기준(한국전력공사, 2004)에서 제시하고 있는 허용좌굴 응력 계산식과 비교하여 좌굴안정성을 검토하였다. 모든 부재에 대해 검토하는 것은 매우 번거로운 작업이므로 상대적으로 응력이 크게 걸리는 주주재에 대해 좌굴 여부를 파악하였다. 그림 8은 상시(풍향 90도)에 주주재 및 철탐암 주재의 좌굴 안정성을 검토한 결과이다.

가공송전선용 철탐 설계기준에서 제시하고 있는 표 4의 허용 좌굴응력 계산식을 이용하여 좌굴안정성을 검토한 결과, 모든 하중조합의 경우에 대해서 좌굴이 일어나는 경우가

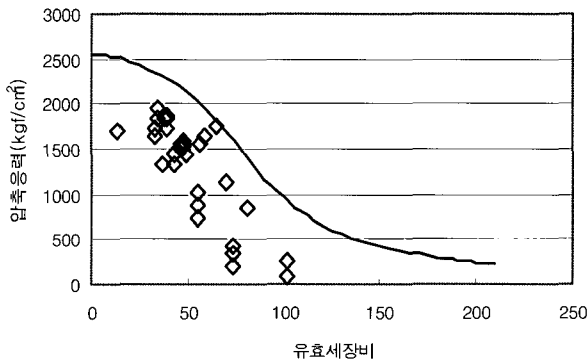


그림 8 주주재의 좌굴 안정성 검토 (상시)

표 4 주주재의 허용좌굴응력도 계산식 (SS540)

두께 t [mm]	세장비 λ_K	허용좌굴 응력도 σ_{ka} [kgf/cm^2]
$t \leq 16$	$0 < \lambda_K < 85$	$\sigma_{ka} = 2550 - 47(\lambda_K/100) - 1654(\lambda_K/100)^2$
	$\lambda_K \geq 85$	$\sigma_{ka} = 950 / (\lambda_K/100)^2$
$16 < t \leq 40$	$0 < \lambda_K < 85$	$\sigma_{ka} = 2500 - 46(\lambda_K/100) - 1586(\lambda_K/100)^2$
	$\lambda_K \geq 85$	$\sigma_{ka} = 950 / (\lambda_K/100)^2$

없음을 확인하였다. 따라서 본 구조물의 경우에 좌굴에 대한 안정성은 확보하고 있다고 사료된다.

4.3 동적해석

송전철탐 설계기준에서 얻을 수 있는 풍하중을 이용하여 동적하중을 계산한 후, 이 동적 하중을 입력하중으로 한 선형 동적해석을 수행하였다. 전체 풍하중은 다음 식과 같이 정적인 성분에 동적인 성분을 더한 것이다.

$$P(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot A \cdot V^2 + \rho \cdot C \cdot A \cdot \bar{V} \cdot v'(t) \quad (2)$$

$$\bar{V} = \alpha \cdot V_{G10} \quad (3)$$

$$\alpha = \left(\frac{h}{10}\right)^{\frac{1}{8}} \quad (4)$$

여기서, ρ 는 공기밀도이고, C는 풍력계수, A는 수평면적, \bar{V} 는 평균풍속, v' 는 변동풍속을 나타낸다. 그리고 식 (3)

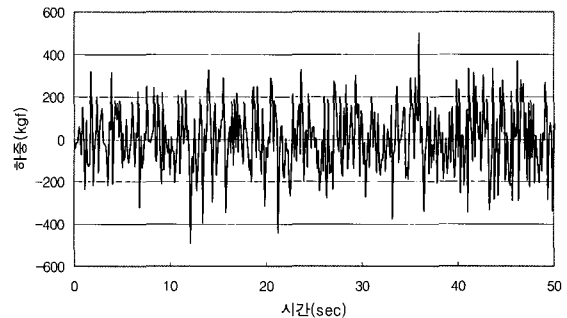


그림 9 70m 높이의 시간이력

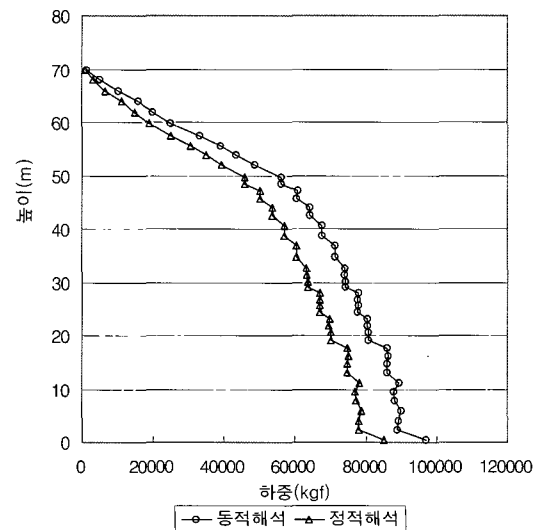


그림 10 철탐높이에 따른 주주재의 압축력

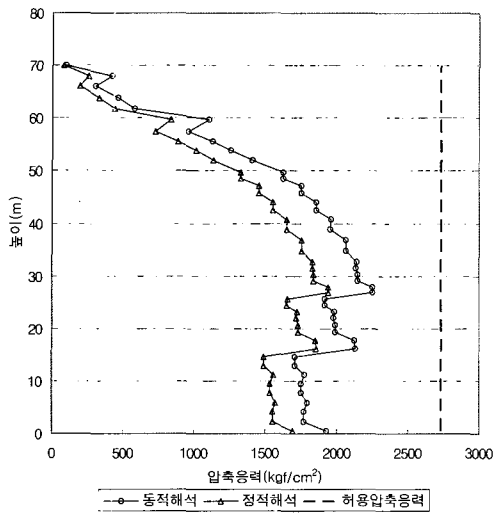


그림 11 철탄높이에 따른 주주재의 압축응력

에서 V_{G10} 은 50m/s이고, 식 (4)에서 속도에 대한 상공체 증계수(α)는 일본 송전용 지지물 설계 표준(일본전기학회, 1979)에 따른 식이다. 식 (2)에서 첫 번째 항은 평균속도에 의한 풍하중이고 이러한 풍하중에 의한 구조물의 응답은 정적해석을 통해 얻을 수 있다. 그리고 두 번째 항은 풍속의 변동성분에 의한 풍하중이고 이러한 변동성분에 의한 구조물의 응답은 동적해석을 통해 얻어진다. 위와 같은 풍하중을 송전철탄의 입력하중으로 고려하여 동적해석을 수행한 결과, 상시에 선로 직각 방향(풍향 90도) 하중을 고려한 경우의 시간이력은 그림 9와 같다.

이상의 동적해석 결과를 통해 알 수 있듯이, 바람의 동적 성분을 고려하게 되면 정적해석에 비해 압축력 및 압축응력이 증가하게 된다. 고려하는 바람의 동적 변동 성분이 매우 큰 경우에는 그로 인해 증가되는 압축력 및 압축응력이 상당히 큰 값을 보이기 때문에, 이에 대한 세밀한 고려가 필수적으로 요구된다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 송전철탄에 대한 동특성을 파악하고, 풍하중에 대한 송전철탄의 풍응답 특성을 정적, 동적 및 좌굴해석을 통해 검토·분석하였다. 먼저, 고유치해석을 통해, 송전철탄이라는 구조시스템이 일반 건축물과는 달리 극소수의 저차 모드가 구조물의 동적 거동을 좌우하지 않고, 상대적으로 많은 모드들이 동적 거동에 기여한다는 것을 확인하였다. 두

번째로, 정적 해석과 좌굴 해석을 통해, 대상 구조물이 정적인 개념의 풍하중에 대해서 구조적으로 안전하고 좌굴에 대해서도 충분한 안전율을 확보하고 있음을 확인하였다. 하지만, 모든 가섭선이 단절되는 극단적인 경우에 주주재에 발생하는 압축응력이 허용압축응력의 90%정도 되는 상당히 큰 값을 보였다. 이러한 경우에 구조물의 붕괴 및 전도를 방지할 대책에 대한 검토가 필요하다고 사료된다. 마지막으로, 풍하중의 시간에 따른 변화를 고려한 동적해석을 통해, 풍하중의 동적 변동성분이 구조물의 응답을 증가시키고 있음을 확인하였다.

결론적으로, 본 연구에서 대상으로 하는 송전철탄은 철탄 설계기준에 제시된 설계 하중에 대해서 구조적으로 안전하다고 할 수 있지만, 이러한 형태의 구조물은 풍하중에 매우 민감하기 때문에 태풍이나 국지적인 돌풍과 같이 설계 하중을 넘어서는 경우에 대한 추가적인 검토 및 보강 방안에 체계적인 연구가 필요하리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업 (05산학연C103A2000010-05A0200-00510) 및 교육인적자원부 BK21 사업에 의한 것임.

참 고 문 헌

345KV 의정부 T/L NO.78(1996) 취약철탄 교체공사용 설계도 "F2" TYPE.
 김기욱(2001) 송전철탄의 내진성능에 관한 연구, 경기대학교 대학원 석사학위논문, 경기대학교.
 일본전기학회(1979) 송전용 지지물 설계 표준, 일본전기학회 전기 규격 조사회 표준규격.
 조호연, 조영래, 고현무(2005) "응답면 기법을 이용한 송전철탄의 풍하중 취약도 해석", 대한토목학회 정기학술대회.
 한국전력공사(2004) 가공송전선용 철탄설계기준.
 John D.Holmes, Wind Loading of Structures
 Momomura, Y., Marukawa, H., Okamura, T., Hongo, E., Ohkuma, T.(1997) Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area, *journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, (72), pp.241~252.