

Seismic Performance Evaluation and a Comparative Study on the Design Wind and Earthquake Loads for Power Transmission Towers

송전철탑의 내진성능평가 및 설계 풍하중과 지진하중의 비교 연구

Kyeong-min Hwang^{1†}, Nak-hyun Chun¹, Jung-bum Jang¹, Kwan-hee Yun¹, Tae-kyun Kim¹
황경민^{1†}, 전낙현¹, 장정범¹, 연관희¹, 김태균¹

Abstract

In this study 24 power transmission towers were selected by considering various variables such as power transmission capacity, height and structural type to evaluate their seismic performance using the standard design response spectrum recently announced by the government. In addition, the stresses and sectional forces generated by the current design wind loads and revised seismic ones were compared to review the effects on the design of power transmission towers when the government-required seismic standards were raised. The results of seismic performance evaluation for the target power transmission towers showed that they had seismic capacity of 0.31~0.91g, and that they met the level of the earthquake-resistant special grade, which is the 2,400-year earthquake return periods and secured seismic safety. Further, the sectional forces caused by earthquakes in the towers were 33~82.5% of the ones due to wind loads, and it was also confirmed that the design wind loads were more dominant than design earthquake ones under the elevated seismic standards.

본 연구에서는 최근 정부에서 제시한 표준설계 응답스펙트럼을 이용하여 송전용량, 높이 및 구조타입 등 다양한 변수를 고려한 송전철탑 24기를 선정하여 내진성능평가를 수행하였다. 또한, 정부에서 요구한 내진기준 상향 시 철탑의 설계에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 현 설계 풍하중 및 개정 지진하중에 의해 발생하는 응력 및 단면력의 크기를 비교해 보았다. 내진성능평가 결과 대상 철탑들은 0.31~0.91g의 내진성능을 보유하고 있는 것으로 나타나, 2,400년 재현주기의 내진특등급 수준을 만족하였으며 내진안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 철탑의 지진에 의한 단면력은 풍하중에 의한 값의 33~82.5%로 나타나, 상향된 내진기준에서도 설계 풍하중이 지진하중보다 지배적임을 확인하였다.

Keywords: Power Transmission Towers, Seismic Design Standard, Design Wind and Earthquake Loads, Seismic Performance, Stress, Axial Forces

I. 서론

최근 국내 기상관측 이후 최고 규모의 경주지진(2016년, 규모 5.8)과 포항지진(2017년, 규모 5.4)으로 인해 공공 시설물에 피해가 발생하면서, 국가 기간설비에 대한 체계적인 지진재해 대응이 강조되고 있다. 정부에서는 1997년 '내

진설계기준 연구 II'를 통해서 미국 UBC (Uniform Building Code, 1997)에 기반한 국내 표준설계 응답스펙트럼을 최초로 제시하였으며, 한국전력공사에서는 2003년 이 설계응답 스펙트럼을 반영한 '송변전설비 내진설계 실무지침'을 제정함으로써 신설 전력설비에 대한 내진설계 및 기설 전력설비의 내진성능 개선을 수행해 왔다.

Manuscript received on April 5, 2019, Accepted on July 16, 2019

¹ KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea
[†] hkm0316@kepcoco.kr

This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. This paper and/or Supplementary information is available at <http://journal.kepcoco.kr>.

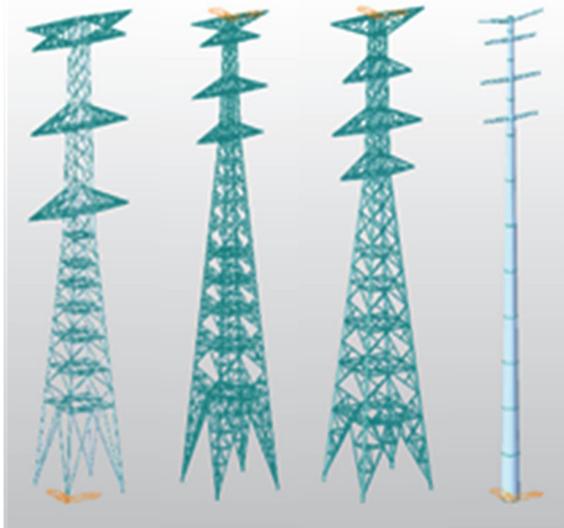


Fig. 1. Numerical analysis models of transmission towers.

대표적인 전력설비인 송전철탐(이하 철탐)은 발전소에서 생산된 전력을 변전소 등으로 보내기 위한 구조물로서, 수요자에게 안정적으로 전력을 공급하기 위한 중요한 사회 기반 시설물이다. 일반적으로 철탐 부재의 단면은 철탐자중과 가선선의 장력 및 설계 풍하중에 의해서 결정되며, 풍하중 대신 지진하중이 작용되는 경우는 부재단면의 크기 결정에 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다. 즉, 국내 일반적인 철탐는 현행 설계 풍하중에 대하여 안전하도록 설계되었다면, 설계 시 지진에 대한 영향은 별도로 고려하지 않아도 된다. '송배전설비 내진설계 실무지침(한국전력공사, 2014)'에서도 철탐 구조물에서 지진에 의한 단면력은 풍압하중의 약 12~37% 수준이라고 기술되어 있다.

그러나, 경주지진 이후 행정안전부에서 '내진설계기준 공통적용사항(2017)'을 통해 국내 지진환경과 지반특성을 고려한 새로운 국가 공통의 표준설계 응답스펙트럼을 제시함으로써, 향후 이 스펙트럼을 반영한 전력설비의 내진설계 및 내진성능평가를 요구하고 있다. 또한, 산업통상자원부에서는 공공시설물의 내진성능 개선을 위해, 기설 송전설비의 내진성능을 기존 0.154g 수준에서 최소 0.22g 이상으로 확보하도록 요구하였다. '송배전설비 내진설계 실무지침(2014)'에서는 지반등급이 양호한 보통압(SB) 지반에 철탐가 설치된 경우를 대상으로 한 것으로, 지진에 불리한 토사지반을 고려하여 내진성능평가를 수행하여 철탐의 내진안전성을 확인할 필요가 있다.

따라서, 본 논문에서는 최근 정부에서 제시한 표준설계 응답스펙트럼을 이용하여 송전용량, 높이 및 구조타입이 다른 다양한 철탐들을 대상으로 내진성능평가를 수행하였다. 또한, 정부에서 요구한 내진기준 상향 시 철탐의 설계에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 현 설계 풍하중 및 개정 지

Table 1
Power transmission towers subject to seismic capacity evaluation

Order	Types	Height (m)	Weight of insulators (kgf)	Remarks		
1	765 kV	125	1,567	Straight		
2		Aas-32P			112	
3					99	
4		Ab2	116.6			
5			118			
6		Ba-32P	99		5,652	
7			88			
8		XCa	109			
9			79.3			
10	Lattice	A2	565	Straight		
11					68.3	
12					54.3	
13		345 kV	B2	1,350	Angle	
14						72.1
15						55.1
16			70			
17			62.3			
18		A2	165	Straight		
19					48.3	
20					38.3	
21		154 kV	Ba2	440	Angle	
22			69.1			
23			52.1			
24			40.1			
25	Tubular	C2	165	Straight		
26					39.1	
27		A2	165	Straight		
28		52.7				
29		C2	440	Angle		
30		52.7				

진하중에 의해 발생하는 응력 및 단면력의 크기를 비교해 보았다.

II. 수치해석 개요 및 방법

A. 평가대상 및 해석조건

1) 평가대상 철탐

평가대상 철탐는 Table 1과 같이 송전용량, 높이 및 구조타입 등을 고려하여 일반형 송전철탐(Lattice types) 22기 (765 kV급 8기, 345 kV급 7기, 154 kV급 7기) 및 관형주 타입 154 kV 철탐 2기 등 총 24기를 선정하였다.

2) 모델링

본 연구에서는 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS CIVIL을 사용하여 철탐를 모델링하고 풍하중 및 지진하중에 대한 수치해석을 수행하였다. 주주재, 수평재, 사재 등 부재는 프레임 요소로 모델링하였으며, 철탐의 자중은 해석모델에 반영이 안 되는 볼트 및 플레이트 등의 중량을 고려하여 15%를 가산하였다. 가선선의 장력은 수평성분과 수직성분으로 구분하고, 수평성분은 힘으로, 수직성분은 Mass로 치환시켜서 모든 방향으로 가속도에 의한 힘이 유발되도록 하였다.

지진하중과 비교하기 위한 풍하중은 한국전력공사의 '가공송전용 철탐 설계기준(2013)'에 의해 일반적인 지역조

Table 2
Mode analysis results of transmission towers.

Order	Types	Height (m)	Natural frequency(Hz)		
			1st	2nd	
1		125	0.591	0.609	
2	Aas-32P	112	0.628	0.652	
3		99	0.671	0.702	
4		Ab2	116.6	0.585	0.612
5	765 kV	118	0.679	0.708	
6		Ba-32P	99	0.752	0.796
7		88	0.795	0.848	
8	XCa	109	0.815	0.851	
9		79.3	0.768	0.790	
10	A2	68.3	0.844	0.876	
11		54.3	0.939	0.987	
12		79.3	1.044	1.073	
13	Lattice 345 kV	B2	72.1	1.121	1.160
14		55.1	1.195	1.321	
15	C2	70	1.272	1.317	
16		62.3	0.935	0.958	
17	A2	48.3	1.067	1.107	
18		38.3	1.212	1.280	
19	154 kV	Ba2	69.1	1.186	1.205
20		52.1	1.373	1.410	
21		40.1	1.585	1.654	
22	C2	39.1	2.057	2.149	
23		A2	52.7	0.520	0.525
24	Tubular	C2	52.7	0.647	0.651

건에 해당하는 풍압 III지역 및 고온계(기준 속도압 76 kgf/m²)의 설계조건을 적용하였으며, 중요도 계수(K1) 1.15를 사용하였다. 한편, 철탑의 표준경간은 154 kV급 400 m, 345 kV급 450 m, 765 kV급 500 m를 각각 적용하였으며, 이를 고려한 전선 및 가공지선의 자중을 암에 재하하였다. 또한, 애자의 중량은 철탑의 송전용량과 타입에 따라 한전일반기매규격에서 제시하고 있는 값을 적용하였다. 그리고, 상정하중과 설계응력, 불평형 장력, 표시구 제원 등 기타 설계사항은 '가공송전용 철탑 설계기준'을 참조하였다. Fig. 1은 대표적인 철탑의 수치해석 모델을 보여주고 있다.

3) 모드해석

Table 1의 모든 철탑들을 대상으로 모드해석을 수행하여 그 결과를 Table 2와 같이 정리하였다. 모드해석 시 각 방향별 누적참여도는 모두 90% 이상 고려되도록 하였다. 대상 철탑들의 1차 고유진동수는 0.5~2.1 Hz로 나타났다.

B. 내진해석 방법

1) 지진응답스펙트럼

철탑의 내진해석을 위한 지진응답스펙트럼은 행정안전부의 '내진설계기준 공통적용사항'의 표준설계응답스펙트럼을 사용하였다. 토층 평균 전단파속도가 180 m/s 미만인 깊고 연약한 지반에 철탑이 설치되는 경우는 드물며, Table 2와 같은 철탑의 1차 고유진동수를 고려할 때 S3지반보다 S4지

Design response spectrum

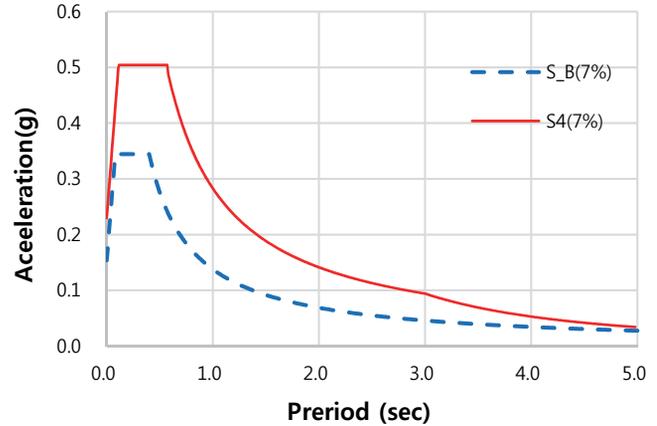


Fig. 2. Design response spectrum.



Fig. 3. A representative stress diagram.

반을 적용하는 것이 보수적이다. 따라서, 본 연구에서는 철탑이 설치되는 지반조건으로 기반암 깊이 20 m 이상의 깊고 단단한 지반인 S4지반을 선정하였다. 한편, '송배전설비 내진설계 실무지침'에 따라, 수직 지진응답스펙트럼은 수평 지진응답스펙트럼의 가속도를 절반으로 줄여서 적용하였으며 감쇠비는 볼트연결 강구조물의 경우를 채택하여 7%를 사용하였다.

본 연구에서 적용한 지진응답스펙트럼을 '송배전설비 내진설계 실무지침'에서 철탑의 내진성능평가 시 적용한 지진응답스펙트럼과 비교하면, Fig. 2와 같다. 최대지반가속도 0.154g에 해당하는 보통암(SB) 지반조건과 최대지반가속도 0.23g에 해당하는 S4지반의 스펙트럼을 비교해 보면, 후자가 단주기 영역(0.2~0.4초)에서는 약 1.4배, 장주기 영역(1~3초)에서는 약 2배 정도 하중이 큼을 알 수 있다.

2) 내진해석 방법

모드조합은 모드 간의 고유진동수가 근접함을 고려하여,

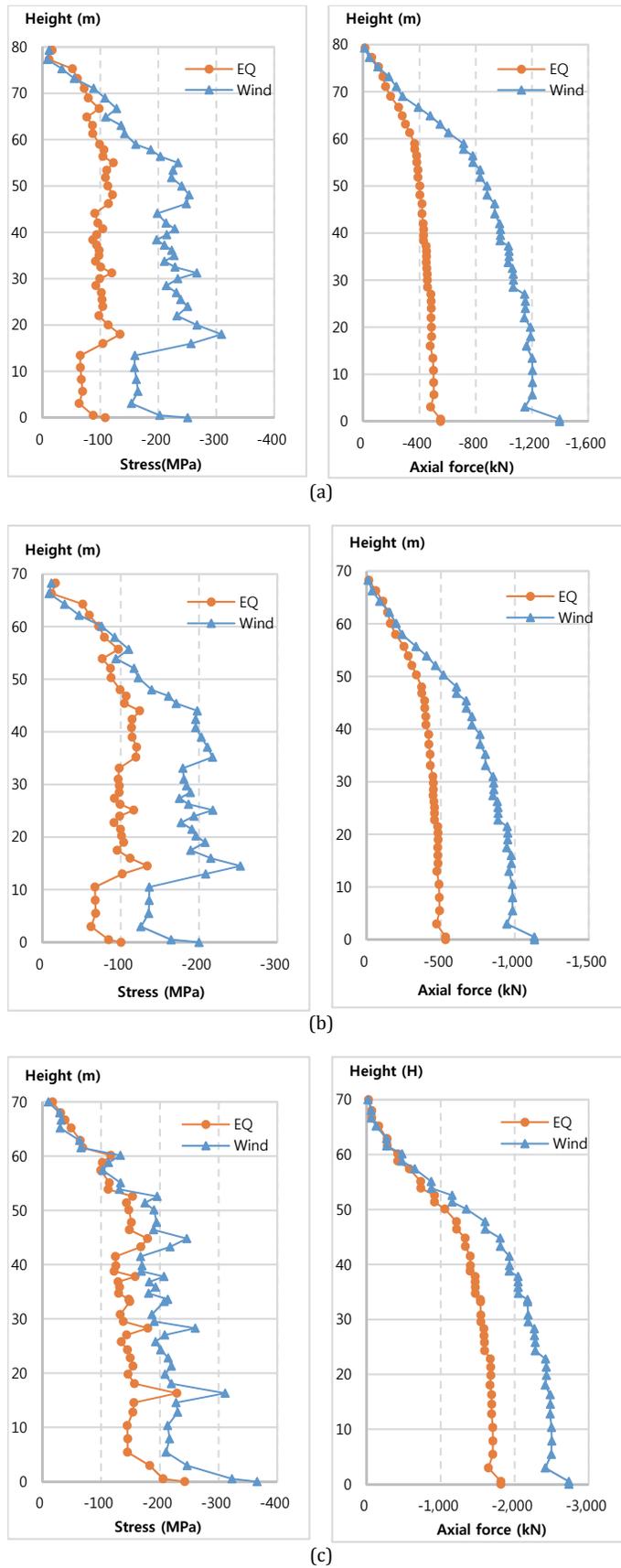


Fig. 4. Comparison of earthquake and wind load analysis results 1. (a) 345 kV A2 type transmission tower (No.9). (b) 345 kV A2 type transmission tower (No.10). (c) 345 kV C2 type transmission tower (No.15).

Table 3
Seismic capacity of transmission towers.

Order	Types	Height (m)	Min. capacity and member Seismic cap. (g)	Members
1	Aas-32P	125	0.67	Bracing
2		112	0.70	
3		99	0.63	
4	Ab2	116.6	0.39	Horizontal member
5		118	0.48	
6	Ba-32P	99	0.49	
7		88	0.46	
8	XCa	109	0.43	Bracing
9		79.3	0.68	
10	A2	68.3	0.67	Main member
11		54.3	0.61	
12	B2	79.3	0.61	
13		72.1	0.69	
14	C2	55.1	0.66	
15		70	0.31	
16	A2	62.3	0.71	
17		48.3	0.78	
18	154 kV Ba2	38.3	0.70	Arm
19		69.1	0.70	
20	C2	52.1	0.63	
21		40.1	0.64	
22	A2	39.1	0.57	
23		52.7	0.91	
24	Tubular C2	52.7	0.88	

CQC(Complete Quadratic Combination) 방법을 적용하였다. 또한, 지진방향 성분은 100:40:40 방법을 적용하여 세 가지 조합식 중 큰 값을 취하였다. 그리고, 지진 시 하중조합으로 상시하중과 지진하중을 함께 고려하였다.

III. 내진성능평가 결과

A. 내진성능평가 결과

내진성능평가 결과 모든 대상 철탑들은 최소 0.31g (지표면 기준) 이상의 내진성능을 보유하고 있는 것으로 나타나, 2,400년 재현주기의 내진특등급(지진I구역, S4지반일 때 최대지반가속도 0.299g) 적용 시에도 내진안전성을 확보하고 있는 것으로 확인되었다. Fig. 3은 대표적인 응력도를, Table 3은 대상 철탑들의 내진성능평가 결과를 보여주고 있다. 여기서, 보유 내진성능은 허용응력값에서 상시하중에 의한 응력값을 뺀 후, 지진하중에 의한 응력값으로 나누어서 산정한 것이다.

B. 내진성능평가 결과 분석

일반형 철탑 중 765 kV급의 경우 사재와 수평재가, 345 kV 및 154 kV급에서는 주주재가 내진성능이 가장 낮은 부재로 나타났다. 이는 345 kV 및 154 kV 철탑의 경우 주주재 단면이 L형강인데 반해 765kV 철탑은 단면강성 및 허용응력이 큰 강관부재(STKT590)를 사용함에 따라, 765 kV 철탑

Table 4
Comparison of sectional forces by earthquake and wind loads

Order	Types	Axial force(kN)		Ratio (E/W)		
		EQ.	Wind			
1	765 kV	Aas-32P	1,309	2,683	0.487	
2		1,225	2,440	0.502		
3		1,158	2,569	0.450		
4		Ab2	1,276	2,513	0.508	
5		2,023	3,209	0.630		
6		Ba-32P	1,910	3,008	0.634	
7		1,846	2,827	0.730		
8	345 kV	XCa	2,670	3,502	0.762	
9		551	1,396	0.395		
10		A2	532	1,132	0.470	
11		507	693	0.732		
12		Lattice	B2	1,084	1,977	0.548
13			1,049	1,823	0.575	
14		996	1,813	0.549		
15	C2	1,813	1,293	0.664		
16	316	760	0.416			
17	A2	301	616	0.489		
18	154 kV		297	528	0.562	
19		598	1,189	0.503		
20		Ba2	514	1,026	0.500	
21		543	884	0.613		
22		C2	1,004	1,293	0.777	
23		Tubular	A2	2,121	6,426	0.330
24	C2		17,340	21,024	0.825	

은 주주재에서 상대적으로 응력이 작게 발생되므로 단면강성 및 허용응력이 작은 부재(SPS400)를 사용하는 사재와 수평재에서 최소 내진성능 값이 나타난 것으로 판단된다.

또한, 모든 철탑들 중 345 kV C2 타입의 철탑이 0.31g로서 내진성능이 가장 낮게 나타났다. 이는 345 kV C2 타입이 양측 송전선로 간 각도가 3°를 초과하는 내장형 각도철탑이므로 전선의 수평방향 불평형 장력이 커서 전선 횡방향 장력에 의한 상시응력이 크기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 345 kV C2 철탑은 현수형 직선철탑인 345 kV A2 타입보다 큰 단면의 주주재를 사용하고 있지만, 단면의 증가율보다 불평형 장력으로 인한 응력의 증가율이 상대적으로 크기 때문에 내진성능이 낮은 것으로 판단된다.

한편, 관형주의 경우 일반형 철탑에 비해 내진성능이 크게 나타났으며, 최대응력이 주주재가 아닌 암에서 발생하였다. 이는 관형주의 주주재는 직경이 큰 강관이며, 허용응력의 경우 주주재는 332 MPa (A572), 암은 190 MPa (SM490)로서 암의 허용응력이 주주재의 허용응력의 60% 미만이기 때문인 것으로 판단된다.

IV. 풍하중과 지진하중 해석결과와 비교

A. 철탑 높이별 주주재의 응력 및 단면력

지진하중과 풍하중에 의한 주주재의 높이에 따른 단면

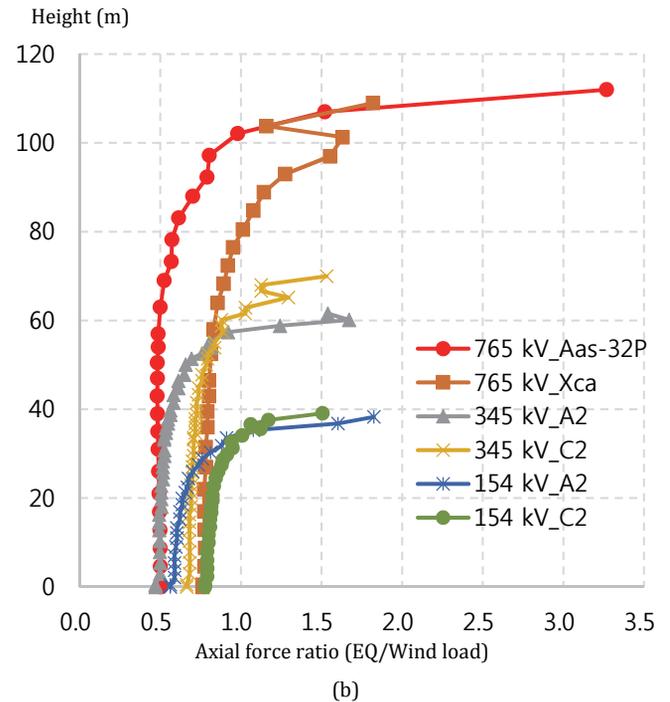
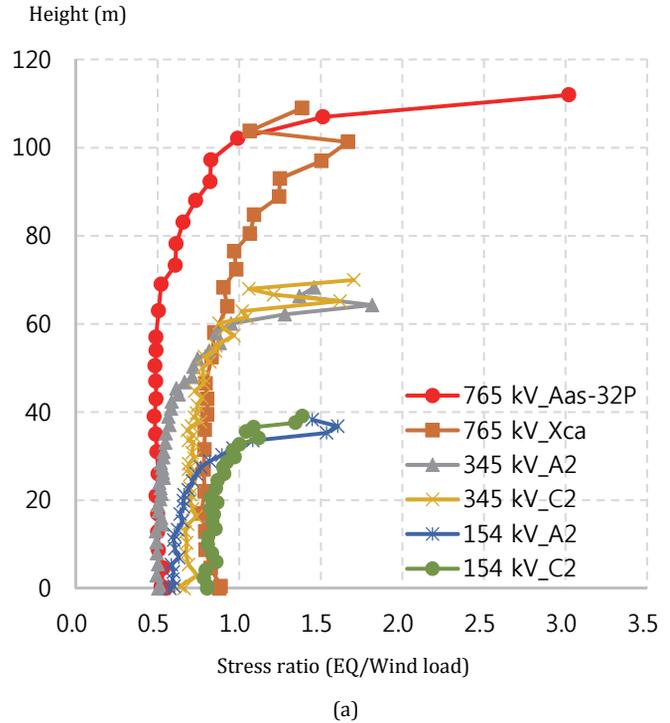


Fig. 5. Comparison of earthquake and wind load analysis results 2. (a) Stress ratio according to the height of towers. (b) Axial force ratio according to the height of towers.

응력 및 축력(단면력)을 비교하여, 지배적인 설계하중을 확인하고자 하였다. Fig. 4는 대표적인 철탑을 대상으로 한 주주재의 지진 및 풍하중 시 응력을 비교한 그림을 보여주고 있으며, 모두 풍하중이 지배적인 하중으로 나타났다. 주주재

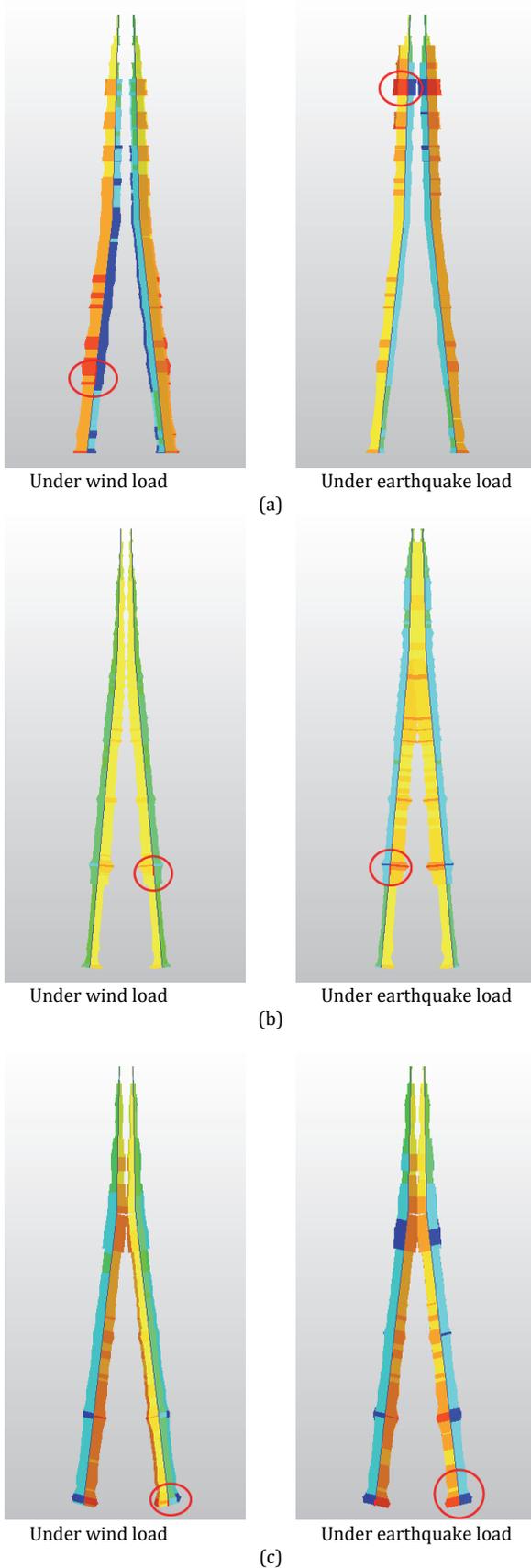


Fig.6. The location of maximum stress of main member for the towers. (a) 765 kV XCa type transmission towers. (b) 345 kV A2 type transmission towers. (c) 154 kV C2 type transmission towers

상단부에서 지진하중 조합이 풍하중 조합 시 보다 축력 및 응력이 크게 나타나고 있으나, 최대응력이 발생하는 주주재 하부에 비해 작은 응력구간이며, 이는 상부의 철탁 압에 걸린 애자 등의 질량으로 인해 일부구간에서 지진하중이 풍하중보다 큰 응력과 축력이 나타난 것으로 판단된다.

한편 Fig. 5(a)는 철탁높이에 따른 주주재의 풍하중 대비 지진하중에 의한 응력비를, Fig. 5(b)는 풍하중 대비 지진하중에 의한 축력을 비교한 그림을 보여주고 있다.

B. 주주재 하단부의 단면력

주주재 중 가장 큰 단면력이 작용하게 되는 철탁의 최하단부에서 풍하중 대비 지진하중에 의해서 발생하는 최대 단면력과 단면력 비를 나타내면, Table 4와 같다. Table 4에서 볼 수 있는 바와 같이 철탁에서 지진에 의한 단면력은 풍하중에 의한 값의 33~82.5%로 나타났으며, 동일한 송전용량 및 유사한 높이의 철탁 간에는 현수형 철탁보다 내장형 철탁에서 단면력의 비가 더 큰 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 대상 철탁의 해석조건이 풍하중이 비교적 약한 풍압 III지역이며, 지진하중이 보수적인 S4 지반조건인데다 반응수정계수가 미적용된 탄성해석임을 감안할 때, 철탁 설계 시 설계 풍하중에 대하여 안전하도록 설계된다면 새로운 내진기준에 의한 설계지진에 대해서도 안전한 것으로 결론을 내릴 수 있다.

C. 최대응력 발생위치

앞선 수치해석 결과를 바탕으로, 대표적인 철탁의 주주재에서의 최대응력 발생위치를 나타내면, Fig. 6과 같다. 일반적으로 주주재 하단부에서 부재력이 가장 크게 발생되나, 주주재의 단면이 상부로 올라갈수록 작아지기 때문에, 주주재의 단면이 변경되는 지점에서 최대응력이 크게 나타나는 경우도 생길 수 있음을 알 수 있다. 또한, 일부 철탁에서는 지진하중 조합 시 암 접합부에서 최대응력 발생위치가 나타나는데, 이는 애자의 무게가 암에 많이 실리기 때문인 것으로 판단된다.

V. 결론

본 논문에서는 최근 정부에서 제시한 표준설계 응답스펙트럼을 이용하여 송전용량, 높이 및 구조타입이 다른 철탁 24기를 대상으로 내진성능평가를 수행하였다. 또한, 정부에서 요구한 내진기준 상향 시 철탁의 설계에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 현 설계 풍하중 및 개정 지진하중에 의해 발생하는 응력 및 단면력의 크기를 비교해 보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 철탁의 모드해석 결과 1차 고유진동수는 0.5~2.1

Hz로 나타났다. 따라서, 철탑이 설치되는 일반적인 지반조건 중 기반암 깊이가 20 m 이상인 깊고 단단한 지반(S4) 조건이 지진하중에 불리한 것으로 나타났다.

(2) 대상 철탑들의 내진성능평가 결과 0.31~0.91g의 내진성능을 보유하고 있는 것으로 나타나, 2,400년 재현주기의 내진특등급 수준(지진구역, S4지반조건, 최대지반가속도 0.299g)을 상회하는 등 산업통상자원부의 상향된 내진기준에서도 내진안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

(3) 일반형 철탑의 경우, 765 kV급은 단면강성 및 허용응력이 작은 사재와 수평재에서, 345 kV 및 154 kV급은 주주재에서 최대응력이 발생하였다. 한편, 관형주의 경우 일반형 철탑에 비해 내진성능이 크게 나타났으며, 암에서 최대응력이 발생하였다.

(4) 철탑에서 지진에 의한 단면력은 풍하중에 의한 값의 33~82.5%로 나타났으며, 동일한 송전용량 및 유사한 높이의 철탑 간에는 현수형보다 내장형에서 풍/지진하중 단면력의 비가 더 큰 것으로 확인되었다. 따라서, 철탑 설계 시 설계 풍하중에 대하여 안전하도록 설계된다면 상향된 내진기준에 의한 설계지진에 대해서도 안전한 것으로 결론을 내릴 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Korea Electric Power Corporation (Grant Number: R16SA06).

본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 주력연구개발

과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R16SA06).

REFERENCES

- [1] The Ministry of Construction & Transportation, "A Study on the Seismic Design Criteria II," Dec. 1997.
- [2] Korea Electric Power Corporation, "Seismic Design Guidelines for Transmission & Distribution Facilities," May 2014.
- [3] Korea Electric Power Research Institute, "Seismic Design Guidelines for Transmission and Substation Facilities," pp. 73-100, Nov. 2001.
- [4] Japanese Electric Society, "Design Standards for Power Transmission Towers (JEC-127)," 1979.
- [5] The Ministry of Interior & Safety, "Common Application of Seismic Design Criteria," Apr. 2017.
- [6] The Ministry of Trade, Industry & Energy, "Requests for Detailed Revision of each Facility according to the Establishment of Seismic Design Standards for Power Equipment," Official Paper, Electric Power Division-1688, 25-Apr. 2018.
- [7] Korea Electric Power Corporation, "Design Standard of a Steel Towers for Overhead Power Transmission (DS-1111)," Sep. 2013.
- [8] Korea Electric Power Corporation, "Design Standard of Dip for Overhead Power Transmission Lines (DS-1211)," Sep. 2013.
- [9] Korea Electric Power Corporation, "General Technical Specification of Tower (GS-5445-0011)," pp. 8-9, Jul. 2017.
- [10] Korea Electric Power Corporation, "General Technical Specification of Steel Pipe Tower for 765kV Double Circuit Transmission Lines (GS-5445-0009)," pp. 37-38, Dec. 2014.
- [11] Jinwon Chang, Seungjun Kim, Jongsup Park and Youngjong Kang, "Suggestion of Reasonable Analysis Model for Steel Transmission Tower based on KEPCO Design Specifications," Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol 19, No 4, pp. 367-381, Aug. 2007.
- [12] Hyosang Park, Duyduan Nguyen, and Taehyung Lee, "Seismic Facilities of Bridges and Transmission Towers Considering Recorded Ground Motions in South Korea," Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, Vol 20, No 7, pp. 435-441, Dec. 2016.