

## 전력구의 간편 지진취약도 선별법

강충현<sup>1</sup>, 허정원<sup>2\*</sup>, 박인준<sup>3</sup>, 황경민<sup>4</sup>, 장정범<sup>5</sup>

# A Simple Seismic Vulnerability Sorting Method for Electric Power Utility Tunnels

Choonghyun Kang<sup>1</sup>, Jungwon Huh<sup>2\*</sup>, Inn-Joon Park<sup>3</sup>, Kyeong Min Hwang<sup>4</sup>, Jung Bum Jang<sup>5</sup>

**Abstract** : Due to recent earthquakes, there is a growing awareness that Korea is not a safe zone for earthquakes any more. Therefore, the review of various aspects of the seismic safety of the infrastructures are being carried out. Because of the characteristics of the underground structure buried in the ground, the electric power utility tunnels must be considered not only for the inertia and load capacity of the structure itself but also the characteristics of the surrounding soils. An extensive and accurate numerical analysis is inevitably required in order to consider the interaction with the ground, but it is difficult to apply the soil-structure interaction analyses, which generally requires high cost and extensive time, to all electric power utility tunnel structures. In this study, the major design variables including soil characteristics are considered as independent variables, and the seismic safety factor, which is the result of the numerical analysis, is considered as a dependent variable. Thus, a method is proposed to select vulnerable electric power utility tunnels with low seismic safety factor while excluding costly and time-consuming numerical analyses through the direct correlation analysis between independent and dependent variables. Equations of boundary limits were derived based on the distribution of the seismic safety factor and the cover depth and rebar amounts with high correlation relationship. Consequently, a very efficient and simple approach is proposed to select vulnerable electric power utility tunnels without intensive numerical analyses. Among the 108 electric power utility tunnels that were investigated in this paper, 30% were screened as fragile structures, and it is confirmed that the screening method is valid by checking the safety factors of the fragile structure. The approach is relatively very simple to use and easy to expand, and can be conveniently applied to additional data to be obtained in the future.

**Keywords**: electric power tunnel, seismic vulnerability, correlation analysis

## 1. 서 론

2016년 9월 경주지진과 2017년 11월 포항지진 이후로 우리나라도 더 이상 지진 안전지대가 아니라는 인식이 확산되고 있다. 실제로 1978년 우리나라에서 처음 지진 관측이 시작된 이후로 크고 작은 지진이 지속적으로 관측되어 왔으며, 규모 5.0 이상의 지진은 2000년도 이전까지 3회, 2010년도 이전까지 2회 관측되었으나 최근 8년 동안에만 5회 측정되었다(기상청 자료). 그 중에서도 경주 지진과 포항 지진은 규모 5.8과 5.4로 대한민국 전역에서 느낄 수 있을 정도로 국민들의 경각심을 자극하기에 충분하였다. 이에 건축 및 토목 구조물 전반에 걸쳐 지진 안전성 검토가 이루어지고 있는 실정이다. 특히, 사

회기반시설물의 경우 지진에 따른 피해 발생 시 그 파급 효과가 상당히 복구까지 오랜 시일이 필요한 구조물이 대부분이라는 점에서 선제적으로 지진에 취약한 구조물을 선별/보강하는 것이 필요하다.

전력구는 일반적으로 ‘지하 송전구조물’로 불리우는 지중 구조물로서 일반적으로 대중의 접근이 쉽지 않고 눈에 보이지 않아서 잘 알려지지 않은 구조물에 속한다(Woo et al., 2012). 현재까지 준공된 전력구는 1200여 개소, 총 연장 480km 이상(2015년 기준, 전력연구원)으로 보이지 않은 곳에서 전력 공급의 주요 라인으로 이용되고 있다. 전력구의 주요 형식은 깊은 깊이에 적용되는 터널형과 상대적으로 얕은 깊이에 적용되는 개착형으로 크게 나눌 수 있다. 전력구의 깊이는 전력구 구조물 최상단에서부터 지표면까지의 깊이를 나타내는 토피고로 표현되며, Fig. 1과 같이 토피고가 얕은(6m 미만) 전력구의 형식은 대부분 개착식이며 토피고가 깊은 경우 터널식이 대부분 적용되었음을 확인할 수 있다. 특히, 개착식 전력구의 경우, 표층까지의 깊이가 얕아 지하수의 영향과 활하중에 의한 영향이 크고, 기반면으로부터의 거리가 길어서 지진하중에도 상대적으로 취약한 특성을 갖고 있다.

<sup>1</sup>정회원, 전남대학교 해양토목공학과 연구교수

<sup>2</sup>정회원, 전남대학교 해양토목공학과 교수

<sup>3</sup>정회원, 한서대학교 공학융합학부 공학토목전공 교수

<sup>4</sup>정회원, 한전 전력연구원 선임연구원

<sup>5</sup>정회원, 한전 전력연구원 수석연구원

\*Corresponding author: jwonhuh@chonnam.ac.kr

Dept. of Ocean Civil Engineering, Chonnam National University, Yeosu, 59626, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

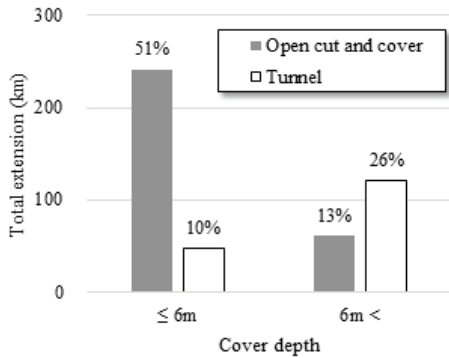


Fig. 1 Status according to Electric Power Tunnel Type

개착식 전력구는 일반적으로 내부 폭이 평균 2.5m, 내부 높이가 평균 3.0m인 직사각형 구조물로 상·하부 슬래브 두께 및 외벽 두께는 0.3~0.5m 내외로 작용하는 하중을 고려하여 결정된다. 하중은 토피고, 활하중, 지하수와 같은 상시하중 변수와 지진 발생 시의 지반변위에 의한 지진하중 변수의 조합으로 구성되며 이를 설계하중으로 고려한다. 전력구의 지진취약성을 확인하기 위해서는 이러한 입력변수를 고려하여 수치해석모델을 제작하고 설계하중을 적용하여 내하력 검토를 수행하여야 한다. 하지만, 다양한 설계변수와 더불어 준공년도가 1970년대 이후부터 현재까지 다양하게 분포되어 있어 동일한 설계기준이 적용되지 않았고, 현재 기준 대비 누락되거나 정확하지 않은 자료 역시 적지 않다. 이렇듯 다양한 설계변수와 통일되지 않은 설계기준을 갖는 전력구 모두를 일괄적인 기준으로 전수 조사하는 것은 경제적으로 고비용이 요구되며 매우 비효율적이다.

본 연구에서는 확보 가능한 전력구의 제원을 기초로 한 상세 수치해석 결과를 바탕으로 전력구 각 부위의 상시 및 지진시 안전율을 평가하였다. 이 때, 1.0~1.2 정도의 상대적으로 낮은 안전율을 나타내는 전력구를 지진에 취약한 전력구로 선정하고, 가장 많은 노력과 비용이 요구되는 수치해석 과정을 배제하고자 하였다. 주요 설계변수와 지진 취약도 간의 직접적·간접적 상관성을 분석하여 지진취약 전력구의 선별 가능성을 확인하였다. 이를 위해 다양한 크기, 지반특성 및 제작 시기의 전력구가 분포되어 있는 부산, 울산, 경상남북도, 대구의 총 108개의 전력구를 분석하였다. 주요 설계 제원인 내부 폭/높이, 단면 두께, 철근량과 주요 지반특성 변수인 토피고, 지하수위, 기반면 깊이, N치 등을 독립변수로 고려하였을 때, 수치해석 결과인 내진안전율을 종속변수로 두고 상관관계 해석을 수행하였다. 이를 통해 직접적인 구조 해석과정을 거치지 않고 지진 발생 시 취약할 것으로 예상되는 전력구를 선별할 수 있는 방법을 제안하는데 본 연구의 주안점을 두었다. 이에 주요 독립변수들 간의 상관관계 분석, 회귀분석, 다중회귀 분석 등을 적용하여 지진취약 전력구 선별에 효율적으로 적

용 가능한 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 전력구 내진성능 평가

### 2.1 응답변위법

구조물의 내진성능 평가에 이용되는 방법은 해석법에 따라 등가정정해석과 동적해석으로 크게 분류된다. 또한 지반과 구조물간의 상호작용의 고려 방법에 따라 간이해석과 상세해석으로도 나뉜다. 전력구는 주변 지반에 비해 상대적으로 중량과 강성이 작은 지하구조물로 지진동 발생에 따라 지반내에서 자유롭게 진동하기 보다는 지반에 구속되어 움직인다. 즉, 지반 가속도에 의한 구조물 자체의 관성력 보다는 주변 지반의 변형에 의존적인 경향을 띤다. 특히, 전력구 주변 지반에서 일정하지 않은 변위가 발생함으로써 전력구에 변위하중 혹은 전단력에 의한 강제력이 크게 작용한다. 응답변위법은 이와 같이 지반변위에 의존적인 구조물에 주로 적용하는 방법으로 먼저 구조물이 존재하지 않는 상태에서의 지반변위를 구하고 이를 구조물에 정적인 하중으로 적용하는 간이해석 방법으로, 주변지반은 탄성스프링으로 모델링하여 지반운동과 구조물 변위 간의 오차를 고려한다. 지반의 지진응답변위의 산정은 지층 구성이 복잡하여 지반의 특성이 크게 변화하는 경우 지진응답해석을 통해 구하기도 하나, 일반적으로 지반을 단일 층으로 가정하여 기반암의 상부지층을 단자유도계(SDOF)로 고려하고 응답스펙트럼을 이용하여 상대변위를 산정하는 단일 코사인법 혹은 이중코사인법을 적용한다(Fig. 2).

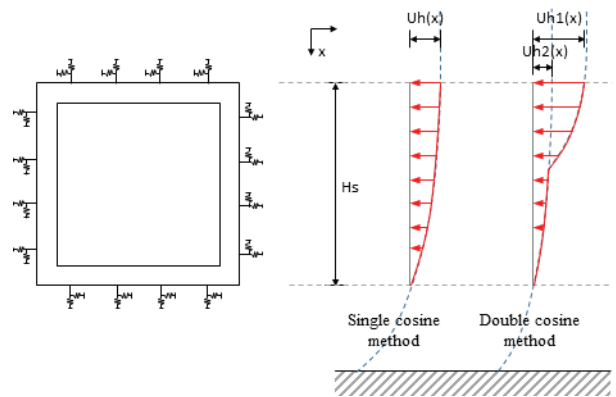


Fig. 2 Single cosine method and double cosine method

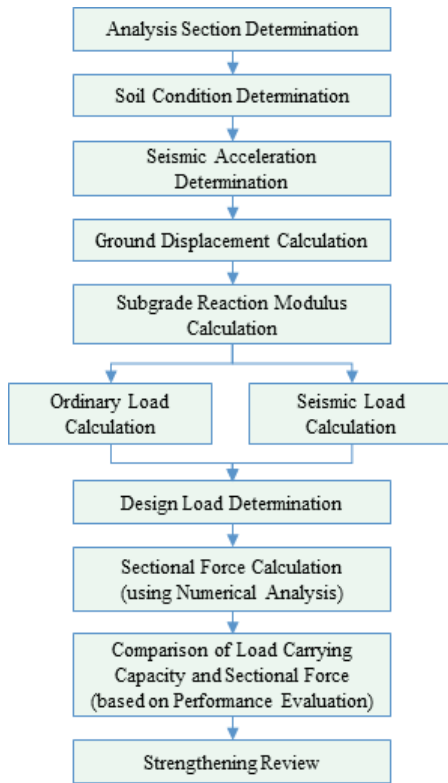
### 2.2 내진성능평가 절차

전력구의 내진성능평가는 「송배전설비 내진설계 실무 지침서(2017)」에 제시된 응답변위법으로 Fig. 3과 같은 해석 절차에 따라 수행된다. 먼저, 해석단면 및 지반조건은 대상 전력구의 설계 당시 도면을 참고하여 결정하였다. 다음으로 지

**Table 1** Load Combination

Load Comb	Dead Load	Surface Load (with Ground Water)	Surface Load (without Ground Water)	Live Load	Live Lateral Earth Pressure	Earth Pressure (with Ground Water)	Earth Pressure (without Ground Water)	Vertical Hydraulic Pressure	Lateral Hydraulic Pressure	Seismic Load
Comb 1	1.0	1.0	-	1.0	1.0	1.0	-	-	-	1.0
Comb 2	1.0	-	1.0	1.0	1.0	-	1.0	1.0	1.0	1.0

진가속도는 전력구가 위치한 지역을 고려하여 결정되었으며, 일반적으로 전력구는 기설 핵심설비로 분류되어 내진 등급 1 등급, 최대지반가속도(PGA)는 0.22g가 적용된다. 이를 바탕으로 단일코사인에 의한 지진응답해석법을 적용하여 지반변위를 산정한다. 또한 전력구 구조물을 Beam 요소로 주변지반을 Spring 요소로 가정하여 수치모델을 작성하고 연직 및 수평방향 지반반력계수를 산정한다(Huh et al., 2017). 지침서에 의거 상시 및 지진시 하중을 산정하고 이를 합한 설계하중을 고려하여 수치해석으로 단면력을 산정하고, 전력구 단면의 내하력과 비교하여 안전율을 확인한다.



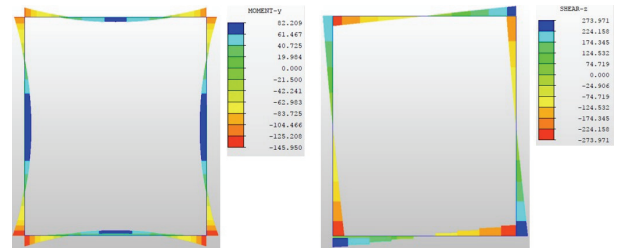
**Fig. 3** Seismic Performance Evaluation Flow

일반적인 내진성능평가는 이상과 같으나, 평가대상 전력구의 구조도면이 존재하지 않거나 지반조건변수 등이 확실하게 표시되지 않은 경우 구조해석의 정확성을 담보하기 힘들어진

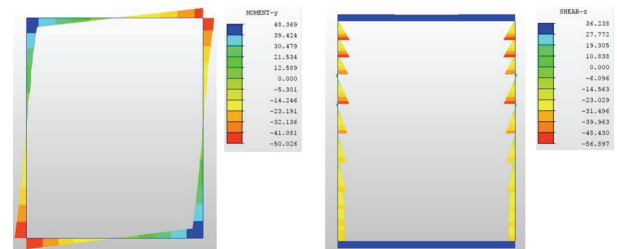
다. 비용적 측면에서 구간 내 지반조건 변수의 평균값을 수치해석에 적용하기 때문에 구간 전체에 일률적인 안전율이 산정되는 것이 일반적이다.

**2.3** 하중조합 및 단면검토

전력구의 내진설계시 내진성능목표를 만족하기 위하여 Table. 1과 같은 하중조합을 사용하여 설계한다(건설교통부 지하공동구 내진설계기준, 2004). 수치해석 모델에 주어진 하중조합을 적용하여 얻어진 결과를 Fig. 4, 5와 같이 모멘트와 전단력 분포로 표시하였다. 이렇게 구해진 상시 및 지진시 모멘트와 전단력의 합계를 작용하중으로 고려하여 「콘크리트 구조기준(2012)」에 따른 단면력을 검토하며, 안전율은 작용하중 대비 설계강도의 비로 산정한다.



**Fig. 4** Example of Moment Distribution



**Fig. 5** Example of Shear Force Distribution

**2.4** 최소안전율

Fig. 6은 개착식 전력구의 안전율을 검토하는 주요 위치를 나타낸다. 상·하부 슬래브 단부와 중앙부, 외벽 상단, 하단 및

중양부가 대상이며, Table 2는 전형적인 전력구 일레에 대한 각 위치에서의 산정된 모멘트 하중 값을 보여준다. 일반적으로 상시하중이 작용하중의 대부분을 차지하는 것을 확인할 수 있으며, 상하부 슬래브 중앙부와 외벽 중앙부에서 모두 지진시하중이 0.0이 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 응답변위법의 지반변위에 의한 하중 작용에 따른 특징이라고 할 수 있다. 더불어 상시하중의 크기 역시 단부에서 크게 작용하는 것을 확인할 수 있다. 설계강도는 앞서 하중조합에서의 최대값을 작용하중으로 고려하여 결정되며, 작용하중 대비 설계강도의 비를 안전율로 산정한다. 각 위치에서 산정된 안전율 중 최소값이 전력구의 내진성능평가에서의 대표값으로 사용되며, 예시된 Table 2의 전력구에서는 외벽 하단의 모멘트 안전율 1.31이 최소 모멘트 안전율이 된다. 같은 방식으로 전단 안전율도 각 위치에서의 전단 안전율을 비교하여 최소값을 최소 전단 안전율로 선정한다.

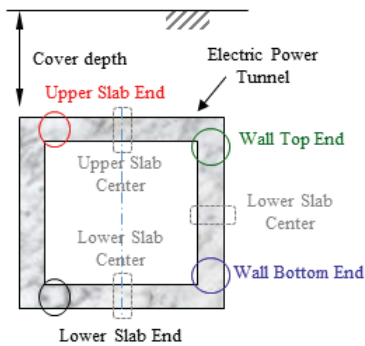


Fig. 6 Primary Safety Factor Review Location

Table 2 Estimation of Safety Factor by Section

Section	Moment (kN-m)/m				Safety Factor	
	Ordinary	Seismic	Total	Design		
Upper Slab	End	-127.0	-22.8	-149.8	-253.2	1.69
	Center	63.9	0.0	63.9	218.1	3.41
Lower Slab	End	-145.9	-25.0	-170.9	-253.2	1.48
	Center	67.0	0.0	67.0	253.2	3.78
Wall	Top	-127.0	-22.8	-149.8	-253.2	1.69
	Center	82.2	0.0	82.2	223.9	2.72
	Bottom	-145.9	-25.0	-170.9	-223.9	1.31

※ Section info : Inside height = 3.15m, Inside width = 2.3m  
Wall thickness = 0.45m(all), Cover depth = 8.0m

부재 중앙부에서는 양단 구속 구조물의 특징으로 작용하중의 크기가 단부에 비하여 상대적으로 작으며 비틀림 변형을 유발하는 응답변위법의 특징 상 지진하중이 거의 작용하지 않지만, 단부와 동일한 부재 두께가 적용되어 대체로 2.0이상의 높은 안전율을 나타낸다. 부재 단부는 상시하중이 중앙부보다 크며 지진하중이 집중적으로 작용하는 부위이다. 최소

안전율은 주로 단부에서 발생하므로 전력구 전체에서 가장 취약한 부분으로 판단될 수 있다.

Fig. 7은 본 연구에서 고려한 108개의 전력구를 대상으로 각 전력구의 내진성능평가에 사용되는 최소 안전율이 전력구의 어느 부분에서 주로 선정되었는지를 보여준다. 대상으로 한 전력구의 91%에서 최소 모멘트 안전율이 외벽 하단에서 선정되었음을 확인할 수 있다. 즉, 대부분의 전력구에서 외벽 하단 부분이 모멘트에 가장 취약하다고 판단할 수 있다. 전단력은 상부슬래브단부와 외벽하단이 각각 45%, 44%로 선정되었음을 확인할 수 있다. Table 3은 외벽하단을 기준으로 최소 모멘트 안전율과 최소 전단 안전율의 선정 분포를 나타낸다. 최소 전단 안전율의 위치에 상관없이 최소 모멘트 안전율은 108개소 중 98개소가 외벽하단에서 선정되었음을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 대부분의 최소 안전율이 발생한 외벽하단을 가장 취약한 요소로 판단하고 취약 전력구를 선정함에 있어서 분석 대상 구역으로 한정하였다.

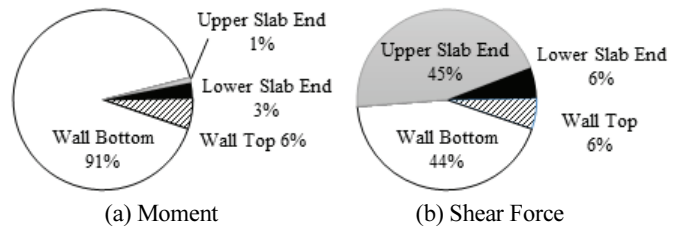


Fig. 7 Minimum Safety Factor Location

Table 3 Minimum Safety Factor Location Distribution

[Unit : EA]		Minimum Moment Safety Factor	
		at Wall Bottom	at Other
Minimum Shear Safety Factor	at Wall Top	5	1
	at Wall Bottom	45	2
	at Upper Slab End	44	5
	at Lower Slab End	4	2

## 2.5 지진하중 비율 및 내진여유율

지진시하중은 지진에너지에 비례한다. 지진에너지는 일반적으로 아래 식 (1)으로 산정한다(Spottiswoode and McGarr, 1975).

$$\log E_s = 11.5 + 1.5M \quad (1)$$

여기서  $E_s$ 는 지진에너지이고  $M$ 은 지진규모를 나타낸다.

식 (1)에 의하면 규모 1.0의 차이는 약 32배의 에너지 차이를 나타내며, 규모 0.2의 차이로도 2배의 지진에너지 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.



앞서 Table 2에서 전체 작용하중에서 지진하중이 차지하는 비율이 높지 않음을 확인하였다. Fig. 8은 전체 작용하중에서 지진시하중이 차지하는 비율의 분포를 나타낸 것이다. 지진시 모멘트하중의 비율은 평균 19.6%, 지진시 전단하중의 비율은 평균 17.6%로 확인되었다. 그래프의 박스는 백분위수 1/4~3/4구역을 나타내며, 대체적으로 10~30% 비율을 갖는 분포를 나타낸다.

지진하중의 비율이 높지 않다는 것은 전력구의 안전율이 낮을 경우 큰 위험요소로 작용한다. 상대적으로 상시하중 대비 지진하중의 불확실성이 높으므로, 설계 예상치를 초과하는 지진이 발생할 경우 설계저항력을 초과하는 작용하중이 발생할 가능성이 높아진다. 예를 들어 Fig. 9와 같이 상시하중이 80, 지진하중이 20, 설계저항력을 115로 가정하면, 안전율은 1.15로 산정된다. 이 때, 예상보다 2배 큰 지진하중(즉 20+20=40)이 발생하면 작용하중이 120보다 커져 안전율은 1.0보다 작아지게 된다.

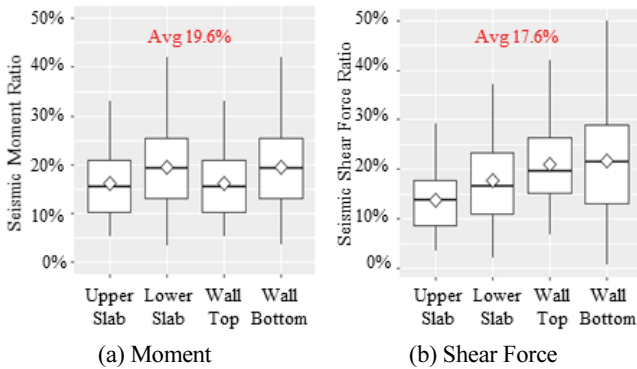


Fig. 8 Seismic Load Ratio

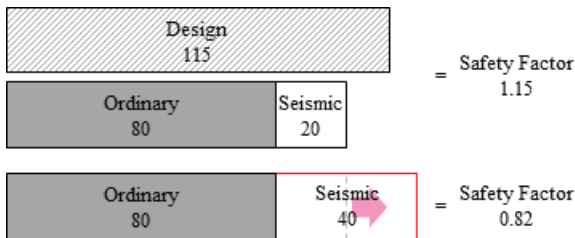


Fig. 9 Example of Safety Factor changes due to Seismic Load Increase

본 연구에서는 예상규모 이상의 지진발생에 대한 여유도의 비율을 아래 식 (2)와 같이 내진여유율로 산정하여 전력구의 지진취약성 판정에 적용하였다.

$$SR = \frac{DS - (OL + SL)}{SL} \quad (2)$$

여기서 *SR*은 내진여유율(Seismic Redundancy), *DS*는 설계강도(Design Strength), *OL*은 상시하중(Ordinary Load) 그리고 *SL*은 지진하중(Seismic Load)를 나타낸다.

본 연구에서는 지진취약 전력구를 선별함에 있어 확보된 수치해석 결과를 바탕으로 안전율과 더불어 내진여유율을 사용하였다. 내진여유율이 1.0보다 크다는 것은 지진하중의 크기가 설계지진하중의 2배가 되어도 안전율이 1.0이상이 확보됨을 의미한다.

### 3. 지진취약 전력구의 선별 절차 및 기준

#### 3.1 주요 설계변수의 선정

전력구의 주요 설계변수는 크게 지반조건 설계변수와 단면관련 설계변수로 나눌 수 있다. 지반조건 설계변수로는 토 피고, 지하수위, 기반면 깊이, 토층 전체 N치 평균, 전력구 위치의 N치, 지표층 고유주기, 최대지반 상대변위 및 지반강성 등을 고려하였으며, 단면관련 설계변수는 내부폭, 내부높이, 상·하부 슬래브 두께, 외벽두께, 철근량, 콘크리트 강도 및 철근 강도가 있다. 후자인 단면조건 변수는 각각의 변수가 전력구의 상·하부 슬래브 및 외벽 구조물을 대표하기 때문에 개별적으로 처리하는 것이 바람직하다. 반면, 지반조건 변수는 변수간의 상호 연관성을 유추할 수 있었다. 예를 들어 전력구 위치의 N치가 높으면 지반강성도 높아진다. 본 연구에서는 주요 설계변수의 설정에 있어서 이러한 연관변수를 배제하고자 지반조건 변수들 간의 상관관계 분석을 수행하였다.

상관분석(correlation analysis)은 두 독립변수 사이의 선형적 상호관계성과 그 크기를 분석하고자 하는 경우에 사용한다(Tang and Ang, 2007). 두 변수 X와 Y의 상관관계는 아래 식 (3)의 상관계수로 측정할 수 있다.

$$\rho = \text{Corr}(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{VAR}(X)\text{VAR}(Y)}} \quad (3)$$

여기서 *Corr*은 상관계수(correlation coefficient), *Cov*는 공분산(covariance) 그리고 *VAR*은 분산(variance)을 나타낸다.

일반적으로 전체 모집단을 고려하는 것은 거의 불가능하기 때문에 표본으로부터 얻은 표본 상관계수(sample correlation coefficient)를 통해 추정하는 것이 보편적이며 아래 식 (4)로 계산할 수 있다.

$$r = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_{XX}}\sqrt{S_{YY}}} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

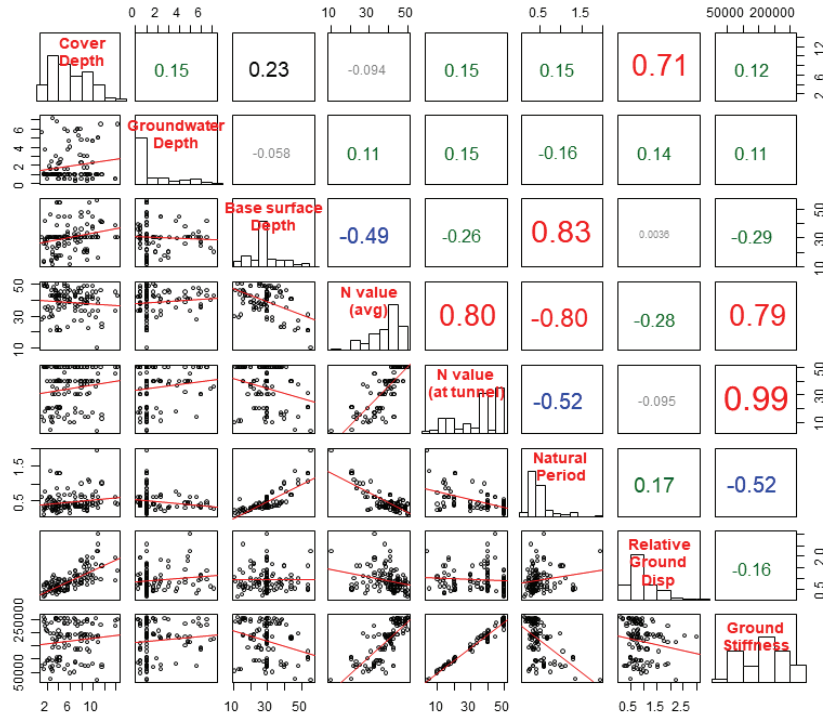


Fig. 10 Correlation Analysis between Design Parameters related to Soil Condition

여기서  $S$ 는 표본공분산(sample covariance)을 나타낸다.

상관계수( $r$ ) 값은 관련성이 크면 클수록 1 또는 -1에 가까워지며, 정비례 관계일 때 양수 값을, 반비례 관계일 때 음수 값을 나타낸다. 반면 관련성이 적으면 적을수록 0에 가까운 값을 나타낸다.

Fig. 10은 전력구의 지반조건 변수간의 상관관계분석 결과를 나타낸다(Chang, 2012). 좌하단 그래프는 두 변수간의 분포와 회귀곡선을 나타내며 우상단은 두 변수간의 상관계수를 나타낸다. 결과에서 확인할 수 있듯이, 지표층 고유주기는 기반면 깊이와 토층평균  $N$ 치와 각각 0.83, -0.80의 상관계수를, 최대지반 상대변위는 토피고와 0.71의 상관계수를, 지반강성은 전력구 위치  $N$ 치와 0.99의 상관계수를 나타내며 높은 관련성을 보인다. 실제로 이들 변수는 응답변위법 적용 과정 중에 산정되는 값으로 1차 독립변수를 바탕으로 산정된 매개변수라 할 수 있다. 본 연구에서는 응답변위법의 매개변수 산출역시 수치해석의 일환으로 고려하여 배제하고 독립변수만을 취약도 분석에 사용하였다.

### 3.2 주요 설계변수와 안전율간의 상관관계

먼저 주요 설계변수와 안전율간의 직접적인 상관관계를 확인해 보았다. Fig. 11은 각각 토피고와 외벽 두께의 모멘트 안전율과의 상관도를 나타낸다. 토피고가 깊어질수록 모멘트 안전율이 감소하는 경향은 확인할 수 있으나, 토피고와 모멘트 안전율의 상관계수는 -0.327로 상대적으로 약한 상관성이

있음을 확인할 수 있다. 반면, 외벽두께는 연속적이지 않는 값의 분포와 더불어 뚜렷한 경향성이 나타나지 않고, 모멘트 안전율과의 상관계수 역시 -0.107로 거의 관련성이 없음을 확인할 수 있다. Table 4는 외벽하단과 관련이 있는 모든 설계변수와의 상관계수를 정리한 표이다. 상관도 그래프에서 확인할 수 있듯이 토피고와 철근량은 절대값 0.3이상의 상관계수로 비교적 상관성 높다고 판단할 정도의 경향성을 띄었다. 반면, 지하수위, 기반면 깊이 등 다른 주요 설계변수의 상관계수는 상관성이 있다고 판단하기 어려울 만큼 낮았으며, 상관도 분석에서도 뚜렷한 경향성을 확인되지 않았다.

주요 설계변수와 안전율과의 상관계수가 높지 않은 이유는 크게 두 가지로 설명 가능하다. 먼저, 응답변위법에 따른 지진시하중 산정 과정에서의 비선형성이다. 단일 코사인법에 의한 지반변위 계산에서 기반면과의 상대거리에 따라 전력구 외벽에 가해지는 하중분포가 거의 일정하거나 혹은 크게 변화한다. 이 때, 하중 분포가 크게 변할지라도  $N$ 치가 높은 경우 지반 변위의 발생을 억제하여 지진시하중 크기를 작게 만든다. 이렇듯 지진시하중은 지반조건변수를 종합적으로 고려하여 산정되며, 한 두 개의 설계변수로 경향을 확인하기 힘들 것으로 판단된다. 다음으로는 설계시 확보된 안전율의 일관성 부재 때문이다. 즉, 설계시 산정된 작용하중에 대하여 부재의 설계강도를 결정함에 있어서 최소 안전율 1.0이상이어야 한다는 기준만으로 설계가 이루어지므로 단면치수, 부재 두께 및 철근의 배근간격 및 철근량을 선정할 때 설계자의 주관적

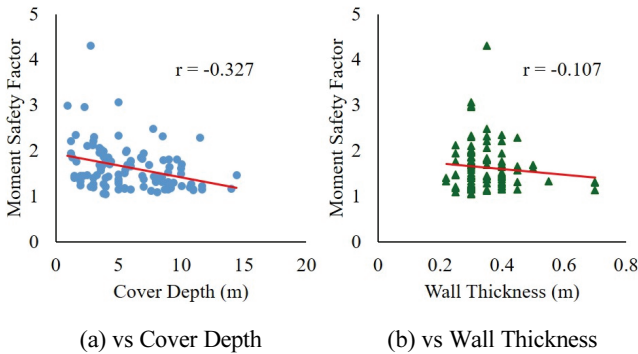


Fig. 11 Correlation with Moment Safety Factor (Wall bottom)

Table 4 Correlation Coefficient with Moment Safety Factor

Key Variables	Correlation Coefficient
Cover depth	-0.327
Groundwater level	0.093
Base surface depth	-0.156
N value	0.141
Internal height	-0.218
Wall thickness	-0.107
Amount of rebar	0.336

인 판단에 따라 단면저항력이 달리 결정된다. 이에 따라 부재별 안전율은 전력구에 따라 1.05~6.60의 큰 변동성을 갖는 분포를 나타내었다. 즉, 작용하중과 설계강도 결정에 주관적인 설계자 판단이라는 변수가 존재하며, 주요 설계변수와 안전율의 직접적인 상관성을 저감하는 주요원인이 된다.

Fig. 12는 토피고와 철근량에 따른 안전율의 분포를 나타낸 그래프이다. 가로축은 토피고, 세로축은 철근량을 나타내며, 이는 앞서 안전율과의 상관관계 분석에서 비교적 높은 상관계수를 나타낸 두 설계변수이다. 점의 크기는 주어진 토피고와 철근량에서의 모멘트 안전율의 크기를 나타낸다. 안전율 구분을 명확하게 하기 위하여 안전율 1.2 미만은 붉은 색 원으로, 1.2~1.5사이는 푸른색 사각형으로, 1.5이상은 녹색 삼각형으로 표시하였다. 앞서 언급한 응답변위법의 비선형성과 안전율의 일관성부재에 의한 영향으로 명확한 경계는 확인되지 않으나, 전반적으로 그래프 좌상단으로 갈수록 안전율이 커지며 우하단으로 갈수록 안전율이 작아지는 경향을 확인할 수 있다. 안전율 1.2 미만의 점들의 상한선을 회기분석을 통해 3차 연립방정식으로 표현하면 이를 경계로 지진취약 전력구를 선별할 수 있다. 얻어진 3차 다항식은 아래와 같다.

$$y = 0.1501x^3 - 5.753x^2 + 71.379x + 34.571 \quad (5)$$

여기서  $x$ 는 토피고이고  $y$ 는 철근량을 나타낸다.

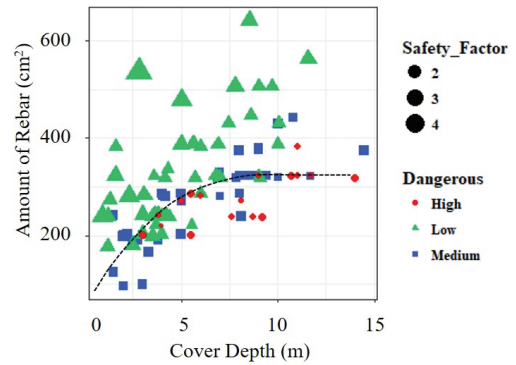


Fig. 12 Distribution of Moment Safety Factor according to Cover Depth and Amount of Steel Rebar

경계 방정식을 기준으로 우하단에 속한 전력구는 전체의 30% 해당하는 32개소로 선별되며, 선별된 전력구의 평균 안전율은 1.39로 산정되었다. 반면 좌상단에 속한 전력구의 평균 안전율은 1.70으로, 경계 방정식으로 낮은 안전율의 선별이 양호하게 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 충분한 데이터가 확보된다면 취약 전력구를 선별함에 있어서 일정 안전율 이하의 분포를 토피고와 철근량을 바탕으로 보다 신뢰성 높은 경계방정식의 수립이 가능할 것으로 기대할 수 있다.

### 3.3 안전율과 내진여유율의 상관관계

Fig. 13은 모멘트 안전율과 내진여유율의 상관도를 나타낸다. 앞서 작용하중에서 지진하중의 비율이 상대적으로 낮음을 확인하였고, 내진여유율로 설계 초과 지진발생에 대한 취약도를 판별하고자 하였다. 내진여유율은 모멘트 안전율이 커질수록 커지는 경향을 나타내었으며, 내진여유율 1.0 미만의 경우는 모두 모멘트 안전율 1.5이하에서만 관찰된다. 즉, 모멘트 안전율로 선별된 지진취약 전력구는 내진여유율 역시 낮은 값을 나타낸다는 것을 의미한다.

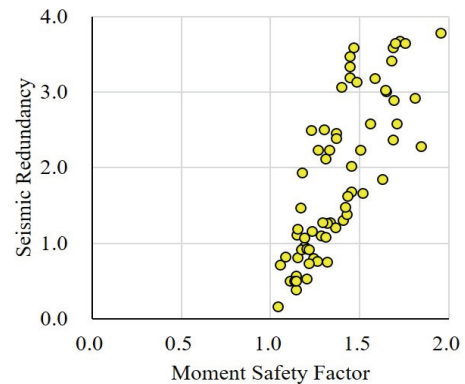


Fig. 13 Correlation between Moment Safety Factor and Seismic Redundancy

### 3.4 지진취약 전력구 선별기준

본 연구에서는 내진성능평가 과정에서 가장 비용이 큰 상세 수치해석 과정을 생략하기 위하여 전력구의 주요 설계변수만을 가지고 지진취약 전력구를 선별하고자 하였다. 주요 변수간의 상관분석을 통하여 매개변수를 배제한 주요 설계변수를 선별하였고, 최소 안전율 위치 분석에 의해 외벽하단이 가장 취약한 부분으로 확인되어 지진취약 전력구 선별을 위한 비교 대상으로 선정하였다. 외벽하단에서의 모멘트 안전율을 대상으로 선정된 주요 설계변수와외 상관관계 분석을 통하여 토피고와 철근량이 가장 높은 연관성을 갖고 있음을 확인하였고, 토피고와 철근량에 따른 모멘트 안전율 분포로부터 경계방정식을 설정하여 지진취약 전력구의 선정이 가능함을 확인하였다. 추가적으로 예상규모 이상의 지진 발생을 고려한 내진여유율과의 상관분석 결과에 의하면 모멘트 안전율은 내진여유율과 높은 상관성을 갖으며, 이는 모멘트 안전율이 낮은 전력구가 내진 측면에서도 취약하다는 것을 의미한다. 일련의 과정을 정리하여 지진취약 전력구 선정과정을 간단하게 요약하면 아래와 같다.

- (1) 전력구의 토피고와 철근량 수집
- (2) 경계방정식에 토피고와 철근량을 대입하여 취약 유무 판정

본 연구에서는 이미 수행된 수치해석 결과를 바탕으로 전력구의 지반 변수와 전력구 제원 변수만을 이용하여 지진취약 전력구를 선별하는 것에 주안점을 두었다. 이를 통하여 내진성능 평가 과정 중에서 가장 높은 비용이 요구되는 엄밀 수치해석을 선별된 지진취약 전력구에만 적용한다면 매우 효율적인 내진성능 평가가 가능하리라 판단된다.

## 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 다양한 설계변수, 지반조건 및 준공시기를 갖는 108개의 전력구를 대상으로 지진 발생시 취약할 것으로 예상되는 전력구를 선별하는 간편하고 효율적인 방안을 제시하고자 하였다. 즉, 주요 설계변수 및 지반변수를 독립변수로 하고 수치해석 결과인 안전율을 종속변수로 하여 독립변수와 종속변수간의 직접적인 상관관계를 비교함으로써 취약한 전력구를 선별하는 방안을 제시하였다. 이를 통하여 비싼 비용과 많은 시간이 소요되는 수치해석을 취약한 전력구로 판정된 경우에 대해서만 수행함으로써 내진성능 평가에서의 효율성을 증진할 수 있을 것으로 판단된다. 연구 과정 중에 얻은 결

과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 대부분의 전력구에서 가장 취약한 부위는 외벽하단으로 나타났다. 본 연구 대상인 108개의 전력구 중 98개(91%)의 전력구의 외벽하단이 모멘트 및 전단 안전율의 최저값을 나타내는 위치로 확인되었다.
- (2) 설계변수와 지반변수의 대부분은 안전율과 직접적인 상관관계가 낮았으며, 설계변수 중 ‘철근량’, 지반변수 중 ‘토피고’만이 비교적 높은 상관성을 나타내었다. 이는 설계후 확보된 안전율의 일관성 부재와 응답변위법의 비선형성에 그 원인이 있는 것으로 확인되었다.
- (3) 높은 상관성을 나타낸 철근량과 토피고를 독립변수로 하고 안전율을 종속변수로 한 경계방정식을 유도하고, 이를 바탕으로 대부분의 지진취약 전력구를 선별할 수 있음을 확인하였다.
- (4) 지진하중을 기준으로 산정한 내진여유율은 부재의 모멘트 안전율이 낮은 경우에 함께 작아지는 경향을 확인하였다. 즉, 외벽하단의 모멘트 안전율을 기준으로 본 연구에서 선별된 취약 전력구는 내진성능 역시 취약하다고 판단할 수 있다.

단, 본 연구의 결과는 국내 전력구 전체를 대상으로 수행된 것이 아니므로 제시된 방안이 100% 적합하다고 할 수는 없다. 하지만 대상으로 한 전력구 108개의 설계변수 및 지반변수가 편향되지 않고 고루 분포되어 있으므로, 전체 전력구의 특징을 대표한다고 함에 큰 무리가 없다고 판단된다. 추가적인 데이터 확보가 이루어진다면 제시된 방법에 의한 보다 적합한 선별기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구에 대한 재정지원을 해주신 KEPCO에 깊은 감사를 표합니다.

## References

1. Korea Meteorological Administration, List of Earthquake in Korea. [http://www.weather.go.kr/weather/earthquake\\_volcano/domestic\\_list.jsp](http://www.weather.go.kr/weather/earthquake_volcano/domestic_list.jsp)
2. Chang, W. (2012). R Graphics Cookbook: Practical Recipes for Visualizing Data. "O'Reilly Media, Inc"
3. 송배전설비 내진설계 실무 지침서 (2017). Korea Electric Power Corporation.
4. Huh, J., Tran, Q. H., Haldar, A., Park, I., and Ahn, J. H. (2017).



Seismic Vulnerability Assessment of a Shallow Two-Story Underground RC Box Structure. *Applied Sciences*, 7(7), 735.

5. 지하공동구 내진설계기준 (2004), Ministry of Construction & Transportation, Korea.

6. 콘크리트구조기준 (2012), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea

7. Spottiswoode, S. M., and McGarr, A. (1975). Source parameters of tremors in a deep-level gold mine. *Bulletin of the seismological society of America*, 65(1), 93-112.

8. Tang, W. H., and Ang, A. (2007). *Probability concepts in engineering: Emphasis on applications to civil & environmental*

*engineering*. Hoboken, NJ: Wiley.

9. Woo, S. K., Lee, Y., and Yi, S. T. (2012). Estimation of carbonation and service life of box culvert for power transmission line. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 16(4), 116-121.

Received : 07/24/2018

Revised : 08/08/2018

Accepted : 08/31/2018

---

**요 지 :** 최근 발생한 지진들로 인해 한국도 지진 안전지대가 아니라는 인식이 확산되고 있다. 이에 사회 기반시설물에 대한 다각도의 내진 안전성 검토가 수행되고 있다. 전력구는 대표적인 송전시설물의 하나로 땅 속에 묻혀있는 지중 구조물이 갖는 특성으로 인해 구조물 자체의 관성, 내하력 뿐만 아니라 주변부의 지반특성을 함께 고려해야만 한다. 이를 위해서는 지반과의 상호작용을 고려할 수 있는 엄밀한 수치해석이 요구되나, 많은 비용과 시간이 요구되는 구조물-지반 상호작용해석을 모든 전력구에 적용하기엔 무리가 따른다. 본 연구에서는 지반특성과 관련된 변수를 포함하는 주요 설계변수를 독립변수로 하고 내진성능에 대한 안전율을 종속변수로 하는 직접적인 상관관계 분석을 통하여 비용이 큰 수치해석을 배제하면서도 내진안전율이 낮은 취약 전력구를 선별할 수 있는 방안을 제시하였다. 높은 상관성을 보이는 토피고와 철근량을 주요 독립변수로 설정하고 종속변수인 내진안전율과의 분포를 바탕으로 경계방정식을 도출하였다. 이를 이용하여 지진취약 전력구를 수치해석과정 없이 선별하는 방안을 제시하였다. 대상으로 한 108개의 전력구 중 30%가 지진취약 전력구로 선별되었으며, 선별된 전력구의 내진 안전율 확인을 통해 타당한 선별 방안임을 확인하였다. 제안 기법은 상대적으로 매우 단순하며 추가적인 데이터에 적용하기 쉽고 확장이 용이하다.

**핵심용어 :** 전력구, 지진 취약도, 상관분석, 내진여유율, 응답변위법

---