

# 고장수목을 이용한 변전소의 지진취약도 분석

## Seismic Fragility Analysis of Substation Systems by Using the Fault Tree Method

김민규<sup>1)</sup> · 전영선<sup>2)</sup> · 최인길<sup>3)</sup> · 오금호<sup>4)</sup>

Kim, Min-Kyu · Choun, Young-Sun · Choi, In-Kil · Oh, Keum-Ho

**국문 요약** >> 본 연구에서는 변전소 시스템의 지진취약도 분석을 수행하여 변전소에 대한 지진취약도 함수를 제시하였다. 변전소는 여러 개의 설비와 구조물이 복합적으로 구성되어 있는 시스템이므로 각 설비에 대한 지진취약도 분석을 수행하여 이를 바탕으로 고장수목을 작성하여 변전소 전체의 파괴확률을 산정함으로써 변전소에 대한 지진취약도 평가를 수행하였다. 이를 위하여 국내 변전소의 현황을 파악하여 지진피해추정을 위한 변전소의 분류형식을 결정하였으며, 결정된 대표변전소 형식에 대한 평가대상 기기를 선정하였다. 대표 변전소 형식으로는 765kV, 345kV, 154kV 변전소의 GIS형 변전소로 결정하였다. 각 변전소의 취약도 검토대상 기기로는 변압기와 절연 에자를 선택하였다. 각 변전소의 변압기와 절연에자의 파괴모드와 파괴기준을 설정하여 지진취약도 곡선을 도출하였다. 최종적으로 변전소에 대한 고장수목을 이용하여 각 기기의 지진취약도 곡선으로부터 변전소 전체의 파괴확률을 산정하여 정의된 손상상태별 변전소의 지진취약도 함수를 산정하였다.

**주요어** 변전소, 지진취약도 함수, 고장수목, 파괴확률, 손상상태

**ABSTRACT** >> In this study, a seismic fragility analysis was performed for substation systems in Korea. To evaluate the seismic fragility function of the substation systems, a fragility analysis of the individual equipment and facilities of the substation systems was first performed, and then all systems were considered in the fragility analysis of the substation systems using a fault-tree method. For this research, the status of the substation systems in Korea was investigated for the classification of the substation systems. Following the classification of the substation systems, target equipment was selected based on previous damage records in earthquake hazards. The substation systems were classified as 765kV, 345kV, and 154kV systems. Transformer and bushing were chosen as target equipment. The failure modes and criteria for transformer and bushing were decided, and fragility analysis performed. Finally, the fragility functions of substation system were evaluated using the fault tree method according to damage status.

**Key words** substation system, Seismic fragility function, fault tree method, failure probability, damage status

## 1. 서론

전력시스템의 손상은 일반 구조물의 손상과 달리 단일 구조물의 피해로 끝나는 것이 아니라 전력 계통상의 단절을 의미하므로 그 파급효과가 구조물의 피해와는 다른 측면이

있다. 따라서 전력시스템에 대한 지진취약도 함수를 개발하여 발생가능한 지진에 대비한 재해예측 시스템을 갖추어 놓는 것은 국가 전체의 재난방재라는 측면에서 필요한 작업이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 전력시설물 중에서 가장 종류가 많고 과거 지진시 손상이 많이 발생한 변전시설에 대해서 각 개별기기의 지진취약도를 산정하여 고장수목을 이용하여 변전소 전체의 지진취약도를 산정하는 연구를 수행하였다.

지진취약도함수 개발에 대한 연구가 수행된 것이 그리 오래된 일이 아니므로 전력시설에 대한 연구도 최근에 수행된 내용이 대부분이다. Ang et al.(1996)<sup>3)</sup>은 개별기기의 취약도 곡선을 이용하여 변전소의 취약도 함수를 제안하였으며

<sup>1)</sup> 정회원·한국원자력연구원 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사  
(대표저자: minkyu@kaeri.re.kr)

<sup>2)</sup> 정회원·한국원자력연구원 종합안전평가부 책임연구원, 공학박사

<sup>3)</sup> 정회원·한국원자력연구원 종합안전평가부 책임연구원, 공학박사

<sup>4)</sup> 정회원·국립방재연구소 연구관, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 5. 19 / 수정일 1차 : 2009. 3. 17, 2차 : 2009. 4. 2 / 게재확정일 : 2009. 4. 2)

연구결과를 1989년 발생한 Loma Prieta 지진시의 피해사례와 연계하여 피해정도를 예측하는 연구를 수행하였다. Camensig et al.(1997)<sup>(4)</sup>은 고압의 변압기에 대한 지진위험도 평가를 수행하였으며, Hwang and Huo(1997)<sup>(7)</sup>는 변전소의 주요 기기에 대하여 파괴모드에 따른 지진취약도 변화에 대한 연구를 수행하였으며, 이 연구는 다시 Hwang and Chou (1998)<sup>(6)</sup>에 의해서 고장수목과 사고수목을 이용하여 변전소 전체의 지진위험도를 평가하는 연구로 발전하였다. Murota et al.(2005)<sup>(8)</sup>은 변전소의 주요설비중 하나인 변압기를 대상으로 하여 변진장치를 설치하여 지진력 저감효과에 대한 연구를 실험과 해석적으로 수행한 바 있다.

국내에서 전력설비에 대한 지진취약도 함수 개발을 위한 연구는 고현무 등(2003)<sup>(10)</sup>이 전력 송전 네트워크 시스템에 대한 신뢰성 평가를 수행하였으며, 조양희와 조성국 (2006)<sup>(12)</sup>은 154kV 변압기 절연애자에 대한 내진성능 평가 연구를 수행하였다. 박영준 등(2006)<sup>(11)</sup>은 345kV 전력망의 지진재해 신뢰성 평가 연구를 수행하였다. 한전전력연구원에서는 765kV 변전소에 대한 내진성능평가 연구가 2005년 3월부터 3개년에 걸쳐서 진행되어 완료 된 바 있다.

본 연구에서는 국내 변전소의 현황을 분석하여 대표 변전소 형식을 선정하고 선정된 변전소에서의 취약 기기를 선정하여 선정된 기기에 대한 취약도 분석을 수행하였으며, 개별 기기의 취약도 분석 결과를 이용하여 변전소 시스템의 취약도 분석을 수행하였다.

## 2. 국내 변전소의 상세 현황

국내 변전소를 전압별 및 구조형식별로 분류하여 표 1에 제시하였다. 표에서 보는 바와 같이 국내의 변전소는 형식별로는 크게 철구형과 GIS형으로 구분할 수 있으며 이외 옥내형과 옥외형 그리고 지하형이 결합되서 전체 6가지 형태로 구분할 수 있음을 알 수 있다. 전압별로는 765kV, 345kV,

154kV, 66kV, 22.9kV의 다섯 단계로 구분할 수 있다.

미국의 재해추정 프로그램인 HAZUS에서는 위험도 평가를 위한 변전시설의 구분을 전압에 따라 3단계로 하고 있으며, 앵커 고정여부에 따라 두 가지 형태로 구분하고 있다. 이에 반해 국내의 경우는 대부분의 설비가 앵커 또는 용접으로 고정되어 있으므로 이러한 구분은 적절하지 않은 것으로 판단된다. 국내 변전소를 전압별 및 구조형식별로 분류하면 표 1과 같다.

변전소의 지진취약도 평가를 정확하게 수행하기 위해서는 5단계로 구분된 전압체계와 변전소의 위치에 따라 구분된 옥내형, 옥외형, 지하형 그리고 형식에 따라 구분된 철구형과 GIS형에 대한 모든 경우에 대한 검토를 수행하는 것이 타당하다. 그러나 본 연구에서는 전압체계는 현재의 변전소 구분에서 주된 형태인 765kV, 345kV, 154kV를 대상으로 하였으며 변전소의 설치위치는 고려하지 않고 GIS형과 철구형으로만 구분하여 고려하였다. 765kV 변전소의 경우 철구형이 존재하지 않으므로 전체적으로 5가지 형태의 변전소에 대하여 지진취약도 분석을 수행하였다.

## 3. 지진취약도 함수 도출방법

### 3.1 분류별 대표 지진취약설비

표 1에서 정리한 바와 같은 국내 변전설비의 형식별 분류와 각 전압별 및 형식별 변전소의 현장답사 결과 변전설비는 전압에 따라 3단계로 구분하고 각 전압단계에서는 대표 형식으로 GIS형을 선택하는 것으로 결정하였다. 기존의 형식인 철구형이 있지만 765kV인 경우는 모든 변전소가 GIS형으로 이루어져 있을 뿐 아니라, 345kV 및 154kV 변전소 모두 80% 가량이 GIS형으로 이루어져 있으므로 대표 변전소 형식으로 결정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. GIS형태의 변전소는 전술한 바와 같이 변압기를 제외한 단로기, 차단기, 피뢰기, 변류기 등의 주요 변전소 설비들이 절연가

〈표 1〉 변전소의 전압별, 구조형식별 분류

구분 전압	변전소							스위치 야드(개소)			합계
	옥내 철구형	옥내 GIS형	옥외 철구형	옥외 GIS형	지하 (복합) GIS형	지하 GIS형	계	옥외 철구형	옥외 GIS형	계	
765kV				4			4		1	1	5
345kV		8	13	34			55	3	22	25	80
154kV		315	74	91	37	12	529	6	13	19	548
66kV			6								6
22.9kV	1		4					2		2	7
합계	1	323	97	129	37	12	599	11	36	47	646

스를 충진한 관로내에 설치되므로 지진시에 상대적으로 안전한 구조물이라고 할 수 있다. 따라서 검토대상 주요 기기는 각 변전소의 변압기와 절연애자를 선정하여 검토하였다.

### 3.2 변전소 설비의 손상상태 정의

변전소 전체에 대한 취약도 함수를 정의하기 위해서는 변전소에서의 손상상태를 정의하여야 한다. 미국의 지진피해 추정 프로그램인 HAZUS에서는 전력시설물에 대한 손상상태를 None(ds1), Slight/Minor(ds2), Moderate(ds3), Extensive(ds4) 및 Complete(ds5)의 5가지로 구분하고 있다.

#### 3.2.1 경미한 손상(Slight Damage) - ds2

- 변전소 : 단로기 또는 차단기의 5%의 파괴로 정의
- 배전회로 : 모든 배선들의 4%의 파괴로 정의
- 발전소 : 터빈의 정지 또는 디젤발전소에 대한 가벼운 손상으로 정의

#### 3.2.2 중간손상(Moderate Damage) - ds3

- 변전소 : 단로기 또는 차단기의 40%의 파괴로 정의
- 배전회로 : 모든 배선들의 12%의 파괴로 정의
- 발전소 : 보일러와 압력용기의 상당한 손상, 건물이 중간손상 상태에 있는 경우로 정의

#### 3.2.3 광범위한 손상(Extensive Damage) - ds4

- 변전소 : 단로기 또는 차단기의 70%의 파괴로 정의
- 배전회로 : 모든 배선들의 50%의 파괴로 정의
- 발전소 : 모터구동 펌프에 대한 상당한 손상, 대형 연직 펌프에 대한 상당한 손상 또는 광범위한 손상상태에 있는 건물에 대해서 정의

#### 3.2.4 완전한 손상(Complete Damage) - ds5

- 변전소 : 단로기 또는 차단기의 100%의 파괴로 정의
- 배전회로 : 모든 배선들의 80%의 파괴로 정의
- 발전소 : 대형 수평 저장용기에 대한 심각한 손상, 대형 모터구동밸브에 대한 심각한 손상 또는 완전손상 상태에 있는 건물에 대하여 정의

HAZUS의 손상상태 정의를 적용하여 국내 변전시설에 대한 손상상태를 정의하고자 할 때 우선적으로 두 가지

념을 가지고 접근하였다. HAZUS의 개념과 국내 변전소의 경우와 다른 점은 국내 변전소는 3상 전압이 하나의 뱅크를 구성하고 있으므로 하나의 뱅크에서 단 한 개의 변압기가 손상이 되더라도 하나의 뱅크가 기능을 상실하는 결과가 된다. 따라서 하나의 뱅크에서는 몇 대의 변압기가 손상이 되더라도 변전소의 기능은 동일한 손상을 입게 되는 것이다. 이러한 손상구분은 변전소의 기능손실여부에 따른 분류가 될 것이다. 그러나 기능손실만을 고려할 경우에는 4뱅크 시스템의 변전소에서 전체 12개의 변압기 중에 단 4대만이 손상을 입어도 전체 기능이 정지하게 되므로 이러한 경우에 완전손상(Complete Damage)로 구분되게 된다. 따라서 변전소의 기능을 고려하지 않고 단순히 전체 변압기와 애자의 손상개수만을 고려하여 손상상태를 정의할 수도 있다. 이러한 경우 HAZUS에서 사용하고 있는 비율을 그대로 적용하여 5%, 40%, 70% 그리고 100%의 손상을 각 손상상태의 기준으로 할 수 있으며 이것은 변전소의 실제 복구경비와 시간을 고려한다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 기능에 따른 분류와 복구를 고려한 분류 두 가지를 조합하여 표 2에 변전소의 손상상태를 제시하였다.

### 3.3 파괴모드 및 취약부위

본 연구에서 변압기의 주요 검토대상기로서 선정한 변압기와 절연애자의 취약도 평가를 위해서는 각각의 파괴모드와 파괴모드별 파괴기준을 결정하여야 한다. 과거의 지진 기록을 살펴보면 지진시 변압기의 주된 파괴모드는 변압기의 미끄러짐, 전도 또는 변압기에 설치되어 있는 절연애자와 변압기와의 연결부 손상으로 인한 절연유 유출로 보고되고 있다.

주요 지진피해사례로는 1999년 발생한 터키 Izmit 지진시 전력시설중 변압기가 전도된 사례가 보고된 바 있고 최근 2007년 7월 16일 일본에서 발생한 니가타 지진시 일본 가시와자키 가리와 원전의 외부 변압기에서 절연애자의 연결부에서 손상이 발생하여 절연유가 유출되어 화재가 발생한 사례가 있다. 또한 다른 변압기에서는 앵커볼트가 전단 파괴되어 미끄러짐이 발생하기도 하였다.

따라서 본 연구에서는 변압기에 대한 파괴모드를 슬라이

〈표 2〉 지진피해추정을 위한 국내 변전소의 손상상태 정의

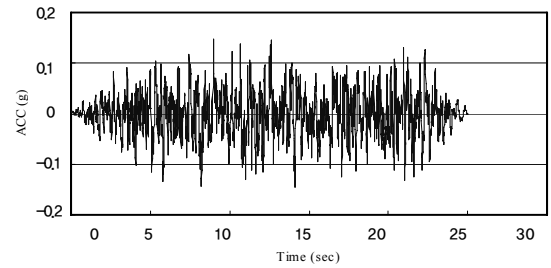
손상상태	설명	정의	4Bank 시스템의 경우
Slight/Minor Damage	경미한 손상	변전소 기능의 25% 손상	1Bank내 변압기 또는 애자의 손상
Moderate Damage	중간 손상	변전소 기능의 50% 손상	2Bank내 변압기 또는 애자의 손상
Extensive Damage	광범위한 손상	변전소 기능의 100% 손상	4Bank내 변압기 또는 애자의 손상
Complete Damage	완전 손상	변압기의 100% 손상 또는 절연애자의 100% 손상	모든 변압기 손상 또는 모든 절연애자 손상

딩, 전도 그리고 절연애자의 파괴를 모두 고려하였다. 슬라 이딩을 고려할 때는 국내 대부분의 변압기는 앵커볼트가 설치되어 있으므로 앵커볼트의 항복응력을 고려하여 앵커의 최대전단력이 변압기와 바닥 기초면과의 마찰력에 더해져서 고려될 수 있도록 하였으며 전도의 경우에는 앵커의 허용인장력을 고려하지 않고 순수 전도 가능성만을 평가하였다. 확보된 도면에서 변압기의 무게중심을 확인 할 수 있는 경우는 미끄러짐과 전도확률을 평가할 때 정적 수평하중이 무게중심에 작용하는 것으로 하였으나 도면에서 무게중심을 확인 할 수 없는 경우에는 전체 형상에서 중앙점에 전체 하중이 집중되고 있는 것으로 해석하였다.

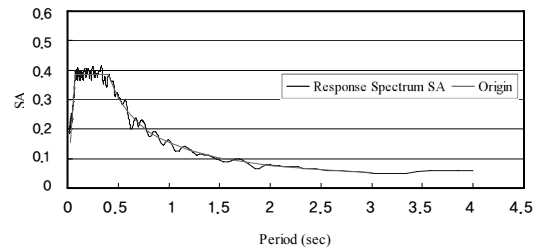
변압기 절연애자에 의한 파괴를 고려할 때는 수치해석에 의해서 절연애자와 변압기와의 연결부에서의 전단력을 구하고 연결되어 있는 볼트의 단면을 고려하여 검토하여야 한다. 그러나 이러한 작업은 경제적 시간적으로 많은 노력을 요하는 작업이다. 변압기에 대한 취약도 분석은 국외의 연구사례를 들어봐도 대부분의 경우 전도나 미끄러짐에 의한 파괴모드를 주된 모드로 하여 평가하고 있다. 따라서 변압기 절연애자에 의한 파괴모드를 규정하고 있는 것은 별로 없다. 그러나 일본 원자력 학회가 발간한 “원자력발전소의 지진에 기인한 확률론적 안전성평가 실시기준(일본원자력 학회표준, 2006)”<sup>(1)</sup>에서는 변압기의 지진시 주된 파괴모드를 변압기 절연애자의 손상에 의한 절연유 유출로 규정하고 있다. 이때의 파괴기준으로 절연애자 연결부에서의 최대 응답가속도가 0.6g인 경우로 제시하고 있다. 이러한 값은 과거의 지진경험과 여러 실험결과들을 종합하여 제시하고 있는 값이므로 국내에서도 적용이 가능한 사항이라고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 변압기 절연애자에서의 파괴기준을 절연애자연결부에서의 최대가속도 응답이 0.6g가 될 경우로 정의하였다.

절연애자의 경우는 동특성 실험에 대한 몇몇 연구가 발표되고 있지만 취약도 분석을 수행한 사례는 별로 찾아보기 힘들며 동특성 시험 결과는 10Hz 이상의 고유진동수를 가지는 고진동수 설비인 것으로 평가되고 있다. 파괴모드는 절연애자의 파괴가 될 것으로 판단되지만 절연애자의 파괴가 발생하기 전에 절연애자와 그것을 고정하고 있는 구조물과의 연결부에서 물성의 차이로 인한 손상이 발생할 가능성이 클 것으로 판단된다. 따라서 변압기와 동일한 파괴기준을 적용해서 절연애자와 지지구조물과의 연결부에서의 최대가속도가 0.6g가 될 때를 파괴기준으로 설정하였다.

지진응답해석을 위한 입력지진으로는 2001년 발간된 송변전설비 내진설계기준연구(한전전력연구원, 2001)<sup>(13)</sup>에서

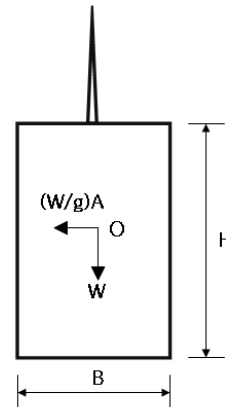


(a) 가속도 시간이력



(b) 응답 스펙트럼

〈그림 1〉 변전설비의 지진취약도 분석을 위한 입력지진



〈그림 2〉 변압기의 지진취약도 분석을 위한 모식도

제시하고 있는 설계스펙트럼을 이용하였으며 0.2g에서 2g 까지 0.2g간격으로 지진응답을 수행하여 파괴확률을 산정하였다. 해석에 사용한 가속도 시간이력 및 설계응답스펙트럼과의 비교는 그림 1에 도시하였다. 그림에서 최대지반가속도는 0.154g이며 이것은 송변전설비 내진설계기준에서의 1지역 1등급 붕괴방지수준에 해당하는 최대지반가속도이다.

#### 4. 변압기의 지진취약도 분석 방법

전술한 바와 같이 변압기의 지진취약도 함수를 도출하기 위하여 가능한 파괴모드를 전도, 미끄러짐 그리고 절연애자의 손상으로 결정하였다. 각 파괴모드에 따른 지진취약도 함수를 도출하여 변압기에서의 지배 파괴모드를 결정하고 그에 따른 지진취약도 함수를 결정하여야 한다. 우선적으로

전도와 미끄러짐에 대한 지진취약도 분석을 위하여 그림 2와 같은 모식도를 변압기의 개략적인 모델로 채택하였다. 실제 무게중심을 파악 할 수 있는 경우는 실제의 무게중심점을 고려하였으며 그렇지 않은 경우는 기하학적 중심점을 무게중심으로 가정하였다.

변압기가 전도에 대하여 파괴가 발생하기 위해서는 식 (1)과 같은 관계식을 만족하여야 한다.

$$\frac{H}{2} \frac{W}{g} A > \frac{B}{2} W \quad (1)$$

여기서,

- $H$  = 변압기의 높이
- $W$  = 변압기의 무게
- $A$  = 변압기에 작용하는 수평가속도
- $B$  = 변압기의 폭

이 관계를 이용하여 변압기에 전도를 일으킬 수 있는 한계지반가속도(Critical Acceleration,  $A_c$ )을 결정할 수 있다.

$$A_c = \left( \frac{B}{H} \right) \quad (2)$$

이 경우는 앵커볼트와 용접 등으로 인하여 변압기가 고정되어 있는 경우를 고려하지 않았으므로 앵커볼트 또는 용접으로 고정되어 있는 경우에는 다음 식 (3)과 같이 저항모멘트 항에 추가적인 모멘트가 더해져야 한다.

$$\frac{H}{2} \frac{W}{g} A > \frac{B}{2} W + M_a \quad (3)$$

여기서,  $M_a$ 는 앵커 또는 용접으로 인하여 추가적으로 발생하는 저항모멘트이다.

변압기에서 수평 지진력에 의해 미끄러짐이 발생할 수 있는 조건은 변압기의 질량에 작용하는 수평가속도에 의한 힘이 변압기 자중과 마찰면에서의 마찰 저항력보다 크게 되는 것이다. 따라서 미끄러짐에 대한 저항을 식 (4)와 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{W}{g} A > F_s, \quad \frac{A}{g} > \frac{F_s}{W} = 0.03 \quad (4)$$

여기서  $F_s$ 는 마찰에 의한 저항력이고 0.03은 마찰계수이다. 전도와 미끄러짐에 대한 파괴확률은 다음 식 (5)를 이용하여 산정할 수 있다.

$$P_f = P(\text{failure} \mid \text{PGA} = A_i) = \Phi \left[ \frac{\text{Ln}(\bar{\sigma}_R) - \text{Ln}(\bar{\sigma}_U)}{\sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2}} \right] \quad (5)$$

여기서,

- $\bar{\sigma}_R$ : 응답의 평균값
- $\bar{\sigma}_U$ : 내력의 평균값
- $\beta_R$ : 응답의 불확실성
- $\beta_U$ : 내력의 불확실성

이다.

불확실성을 나타내는 계수는 식 (6)과 같이 하나의 계수로도 표현할 수 있다.

$$\beta_C = \sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2} \quad (6)$$

변압기 절연애자의 파괴를 평가하기 위해서는 절연애자와 변압기 본체와의 연결부에서 응답가속도가 0.6g가 될 때를 파괴기준으로 설정하였다. 지진취약도 분석에서는 여러 가지 지진파를 이용하여 지진파의 랜덤성을 고려하는 방법이 일반적이지만 어떠한 지진파를 선택하는가에 따라서 그 결과에 영향을 받기도 하며 많은 지진파를 이용하여 최대가속도 수준에 따른 수많은 수치해석을 수행하여야 하므로 많은 노력이 필요한 것이 사실이다. 따라서 본 연구에서는 국내 송변전설계기준에서 제시하고 있는 설계스펙트럼을 이용한 단일 인공지진가속도 시간이력을 사용하여 수치해석을 수행하여 지진파의 랜덤성을 고려하기 위하여 EPRI (Electric Power Research Institute)에서 제시하고 있는  $\beta_R$ 을 사용하였다(Reed and Kennedy, 1994)<sup>(9)</sup>. EPRI의 보고서에서는 구조물의 동특성에 따라서 주파수 수준별로 표준편차의 값을 제시하고 있으며 본 연구에서는 5Hz에 해당되는 다음 식 (7)과 같은 값을 사용하였다.

$$\beta_R = 0.22 \quad (7)$$

$$\beta_U = 0.24$$

절연애자의 경우는 애자의 파괴를 파괴모드로 결정하였으며, 파괴기준으로는 변압기 절연애자의 파괴와 동일한 기준을 적용하였으므로 수치해석에 의해서 지진취약도 분석을 수행하였다. 변압기에 사용한 강재와 절연애자 및 앵커볼트의 재료 특성은 표 3과 같이 정의하여 수치해석에 적용하였다.

〈표 3〉 변압기와 절연애자의 수치해석에 사용한 재료물성

절연애자	탄성계수	$E = 8.2 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
	포아송비	$\nu = 0.25$
	단위중량	$\gamma_b = 2.6 \text{ tonf/m}^3$
강재	탄성계수	$E = 2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
	포아송비	$\nu = 0.3$
	단위중량	$\gamma_b = 7.85 \text{ tonf/m}^3$
앵커볼트	항복강도	$6,400 \text{ kgf/cm}^2$
	인장강도	$8,000 \text{ kgf/cm}^2$

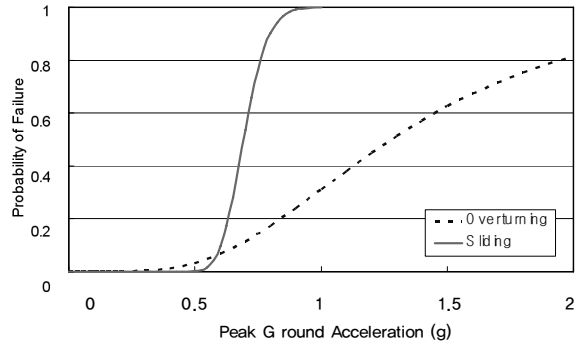
〈표 4〉 765kV 변압기의 제원

전체치수(mm)	가로	2,550
	세로	5,200
	높이	6,740
중량(tf)	수중중량	165
	총중량	241

### 5. 변압기와 절연애자의 취약도분석

#### 5.1 765kV 변전소

765kV 변전소의 변압기는 변압기 절연애자가 본체 내부에 포함되어 있는 형태로서 제원은 표 4에 제시하였다. 765kV용 변압기는 크기와 용량이 매우 크기 때문에 3상의 전류를 위하여 총 6대의 변압기가 사용된다. 즉 345kV와 154kV 변전소의 경우는 하나의 뱅크가 3대의 변압기로 구성되는데 반해서 하나의 뱅크가 6대의 변압기로 구성되는 것이다. 변압기의 외부에 절연애자가 노출되어 있지 않으므로 절연애자에 의한 파괴모드는 발생하지 않으므로 미끄러짐과 전도에 의한 파괴만을 고려하여 취약도 평가를 수행하였다. 765kV 변압기는 앵커볼트로 기초와 고정되어 있는 것이 아니고 기초콘크리트에 매립되어 있는 H형강에 용접으로 고정되어 있으므로 용접에 의한 허용응력을 고려하여 전도와 미끄러짐에 대한 취약도 평가를 수행하였다. 평가결과는 그림 3에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적



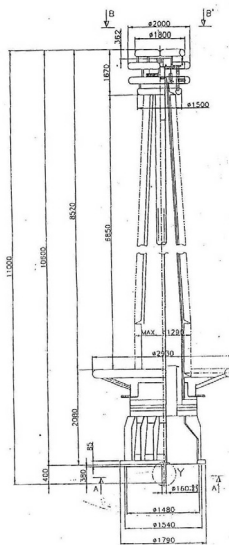
〈그림 3〉 765kV 변압기의 지진취약도 함수

인 파괴를 지배하는 파괴모드는 미끄러짐에 의한 파괴인 것으로 나타났다.

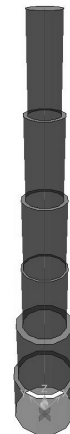
765kV 변전소의 절연애자는 자기형 애자와 복합형 애자의 두 종류를 사용하고 있다. 이중에서 지진에 더 취약할 것으로 판단되는 자기형 애자를 대상으로 하여 지진취약도 평가를 수행하였다. 자기형 절연애자에 대한 정확한 정보를 얻기가 힘든 상황이므로 변전소를 방문하여 수집한 개략적인 도면과 제작사에서 검토한 동특성을 이용하여 수치해석 모델을 작성하였으며 전술한 바와 같이 애자와 하부 철구와의 연결부에서 최대응답가속도가 0.6g인 경우를 파괴기준으로 설정하여 검토하였다. 그림 4에 자기형 애자의 형상과 도면 그리고 수치모델을 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 자



(a) 형상



(b) 도면



(c) 해석모델

〈그림 4〉 765kV 변전소의 절연애자

기형 절연애자는 상부로 갈수록 단면이 감소하는 형상을 하고 있으므로 전체 구간을 4구간으로 구분하여 절연애자의 직경을 감소시켜서 해석 모델을 작성하였다. 최종적으로 절연애자에 대하여 산정한 취약도 곡선은 그림 5에 제시하였다.

5.2 345kV변전소

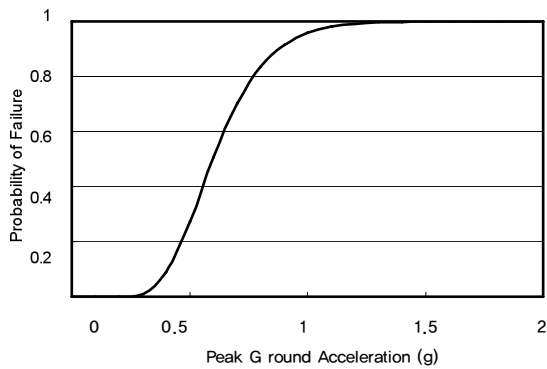
345kV 변전소의 변압기는 그림 6에 형상과 대표적인 단면을 제시하였으며 개략적인 제원을 표 5에 정리하였다.

345kV 변압기는 그림에서 보는 바와 같이 절연애자가 본체에 설치되어 있는 구조이므로 미끄러짐과 전도에 의한 파괴모드와 절연애자의 연결부에서의 손상을 고려한 취약도 분석을 수행하였다. 특히 미끄러짐의 경우는 앵커볼트의 설치로 인하여 변압기와 기초콘크리트와의 마찰력에 의한 저항력과 앵커볼트의 항복전단응력을 고려하여 검토하였다. 검토결과 변압기의 지진취약도 곡선은 그림 7에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 미끄러짐에 의한 파괴와 최대

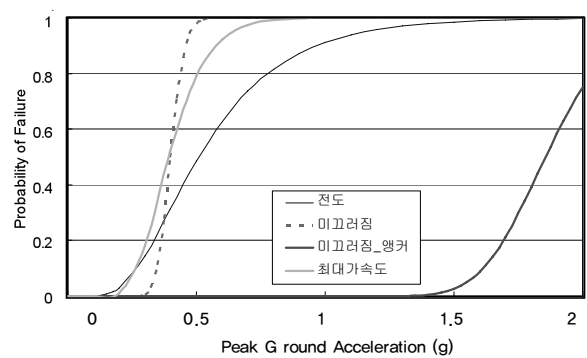
가속도에 의한 파괴가 전체 파괴모드를 지배하고 있는 것을 알 수 있으나 미끄러짐의 경우는 앵커볼트의 전단항복응력을 고려하지 않은 경우이고 앵커볼트의 전단력을 고려한 경우는 미끄러짐에 의한 지진안전성이 크게 증가하는 것을 그림을 통해서 알 수 있으므로 전체 파괴모드는 최대가속도에 의한 것이 지배하는 것을 알 수 있다. 따라서 변압기의 파괴모드는 최대가속도 응답에 의한 변압기 절연애자의 손상인 것으로 판단된다.

〈표 5〉 345kV 변전소 변압기의 형상 및 도면

전체치수(mm)	가로	6,980
	세로	5,075
	높이	8,055
중량(t)	수송중량	145
	유량	28
	총중량	173



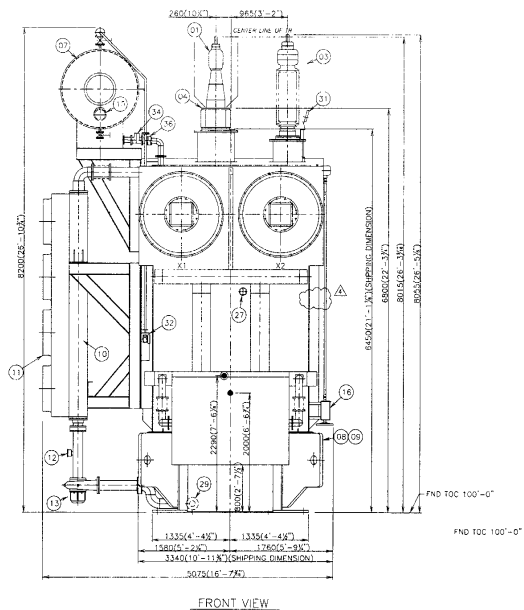
〈그림 5〉 765kV 변전소 절연애자의 지진취약도 함수



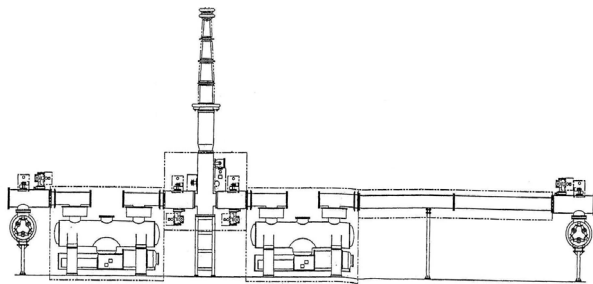
〈그림 7〉 345kV 변전소 주변압기의 지진취약도 곡선



〈그림 6〉 345kV 변전소 변압기의 형상 및 도면



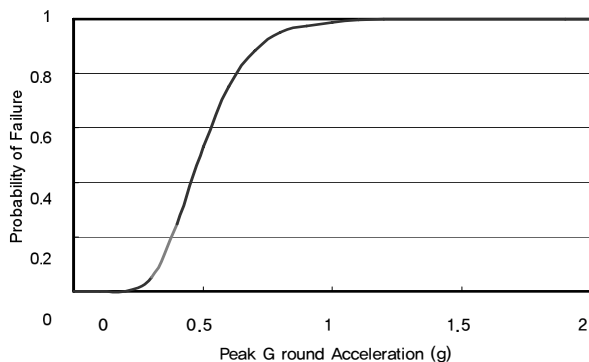
345kV 변전소의 절연애자는 GIS에 연결되어 있는 형태를 가지고 있으며 철구에서부터 들어오는 외부 전류를 절연시키는 기능을 하고 있다. 절연애자의 형상은 그림 8과 같으며 관련 도면은 그림 9에 도시하였다. GIS와의 연결을 고려하여 그림 9와 같이 수치모형화 하였으며 765kV의 경우와 동일하게 절연애자와 철구와의 연결부에서 최대가속도가 0.6g가 되는 경우를 파괴기준으로 하여 지진취약도 분석을 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 절연애자 부분과 연결 강관으로 모형화 하였다. 최종 분석결과는 그림 10에 도시하였다.



〈그림 8〉 345kV 변전소 절연애자의 도면



〈그림 9〉 345kV 변전소 절연애자의 해석 모델

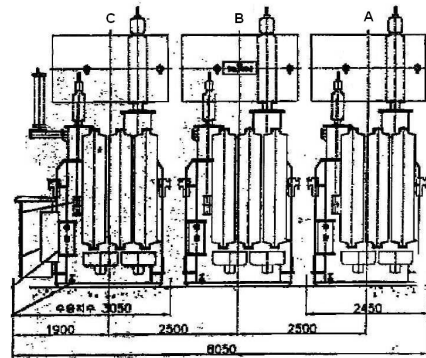


〈그림 10〉 345kV 변전소 절연애자의 지진취약도 함수

### 5.3 154kV변전소

154kV 변전소는 구성 형식 중에 가장 높은 비율을 차지하고 있는 옥내 GIS 형을 대표 형식으로 선정하였으며 설치되어 있는 기기중 주변압기와 절연애자에 대한 지진취약도 분석을 수행하였다. 154kV 변전소 주 변압기의 도면은 그림 11에 도시하였으며 그림에서 보는 바와 같이 3대의 변압기가 3상전류를 이루어 하나의 뱅크를 구성하고 있다. 765kV 및 345kV 변압기와 비교하여 크기나 무게가 상대적으로 작은 것으로 나타나고 있다. 154kV 변전소 변압기의 개략적인 제원은 표 6에 정리하였다. 지진취약도 분석을 위하여 동일하게 미끄러짐과 전도 및 최대가속도에 의한 변압기 절연애자의 손상을 고려하였다.

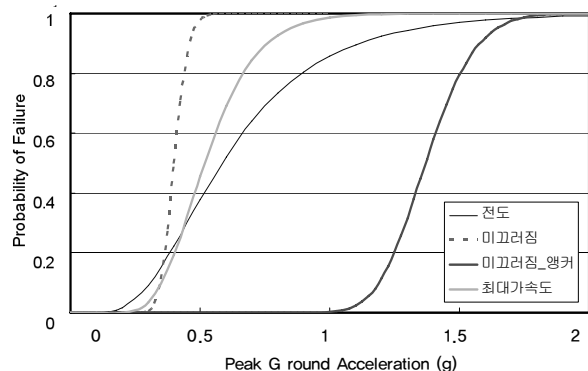
154kV 변전소의 주변압기에 대한 지진취약도 분석결과는 그림 12에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 345kV 변전소의 주변압기와 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있



〈그림 11〉 154kV 변전소 주변압기의 도면

〈표 6〉 154kV 변전소 주변압기의 제원

전체치수 (mm)	가로	2,000
	세로	4,100
중량(tf)	수송중량	24.3
	총중량	46.7



〈그림 12〉 154kV 변전소 주변압기의 지진취약도 분석

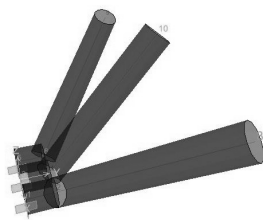


다. 앵커를 고려하지 않은 경우의 미끄러짐에 대한 파괴가 파괴모드를 지배하고 있으나 앵커를 고려한 경우 안전도가 크게 증가하므로 결국 최대가속도에 의한 파괴가 전체 파괴모드를 지배하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 154kV 변전소 주변압기의 파괴는 앵커손상에 의한 파괴보다는 변압기 절연애자의 손상이 지배적인 것으로 판단된다.

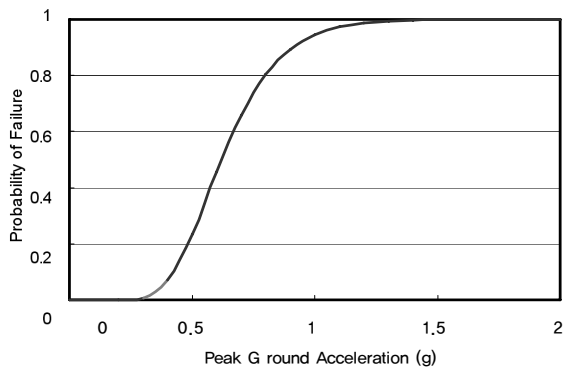
154kV 변전소의 가장 많은 형태를 차지하고 있는 옥내 GIS형의 경우는 절연애자가 그림 13과 같이 벽면에 부착되어 있는 형태이다. 이는 벽을 사이에 두고 GIS와 연결되어 있기 때문에 절연애자가 벽에 붙어 있는 것과 같은 형상을 보이고 있는 것이며, 벽체에 고정되어 있는 것으로 고려하여 해석을 수행하였다. 파괴모드는 동일하게 절연애자와 철구의 연결부에서의 손상을 고려하였으며 파괴기준은 연결부에서의 최대응답가속도가 0.6g인 경우로 설정하였다. 그



〈그림 13〉 154kV 변전소의 절연애자 형상



〈그림 14〉 154kV 변전소의 절연애자 해석모델



〈그림 15〉 154kV 변전소 절연애자의 지진취약도 곡선

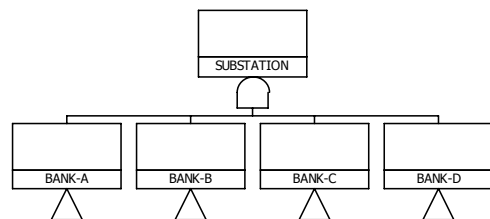
림 14에 154kV 변전소 절연애자의 수치해석 모형을 도시하였다. 단면의 변화가 크지 않으므로 절연애자와 철 구조물은 각각 단일 종류의 요소로 모형화 하였으며 각 요소의 제원은 표 9에 정리하였다. 최종 지진취약도 분석결과는 그림 15에 도시하였다.

## 6. 고장수목을 이용한 변전소의 지진취약도 해석

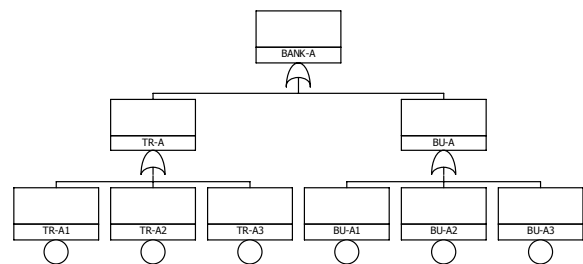
변전소 전체의 지진취약도 함수를 도출하기 위해서는 개별 기기의 취약도 분석을 통해서 개발된 각 기기의 지진취약도를 이용하고 전술한 바와 같은 고장수목(Fault Tree)과 사건수목(Event Tree)을 이용하여 전체 시스템의 손상확률을 산정하여야 한다. 변전소의 경우는 여러 기기가 복합적으로 연결되어 있는 시스템이므로 기기간의 상호작용에 의해서 하나의 기기의 손상이 타 기기에 영향을 미치고 그것이 전체 시스템에 영향을 미치기 때문이다.

본 연구에서는 각 변전소에서 주변압기와 절연애자에 대한 검토만을 수행하였으므로 두 가지 기기에 의한 전체 시스템의 파괴확률을 계산하였다. 전체 시스템의 파괴확률을 구하기 위해서는 미국 HAZUS에서 사용하고 있는 개념을 응용하여 표 2에서 제안한 손상상태를 적용하였다.

변전소는 3상의 전류를 다루기 위해서 3개의 주변압기 또는 3개의 절연애자가 하나의 뱅크를 이루고 있으므로 하나의 뱅크에서 단 한 대의 변압기만이라도 손상을 입으면 하나의 뱅크의 기능이 상실되게 된다. 이러한 상황을 고려하기 위하여 하나의 뱅크 시스템에 대한 고장수목을 구성하고 각 뱅크간의 고장확률을 고려한 고장수목을 구성하였다. 각 고장수목은 그림 16과 17에 도시하였다.



〈그림 16〉 변전소의 위험도 분석을 위한 고장수목



〈그림 17〉 변전소 하나의 뱅크에 대한 고장수목

그림 17에서 도시한 바와 같이 변전소에서 Bank-A에서의 변압기 한대의 지진에 의한 손상확률을  $P(TR_A)$ 라고 정의하고 절연애자 하나의 손상확률을  $P(BU_A)$ 라고 정의한다면 각 Bank에서의 변압기의 파괴확률과 절연애자의 파괴확률을 구할 수 있고 변압기의 파괴확률과 변압기의 파괴확률을 이용하여 각 Bank의 파괴확률을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 각 Bank의 파괴확률을 이용하면 변전소 전체의 파괴확률을 구할 수 있다. 각 변압기의 파괴확률을 이용하여 한 Bank에서의 변압기의 파괴확률은 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(TR_A) &= P(TR_{A1} + TR_{A2} + TR_{A3}) \\ &= P(TR_{A1}) + P(TR_{A2}) + P(TR_{A3}) \\ &\quad - \left\{ \begin{aligned} &P(TR_{A1})P(TR_{A2}) + P(TR_{A2})P(TR_{A3}) \\ &+ P(TR_{A3})P(TR_{A1}) \end{aligned} \right\} \\ &\quad + P(TR_{A1})P(TR_{A2})P(TR_{A3}) \end{aligned} \quad (8)$$

동일한 방법으로 절연애자의 파괴확률  $P(BU_A)$ 를 산정할 수 있으며 하나의 Bank 내에서의 변압기와 절연애자의 파괴확률을 이용하여 Bank의 파괴확률을 식 (9)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(BANK_A) &= P(TR_A + BU_A) \\ &= P(TR_A) + P(BU_A) - P(TR_A) \times P(BU_A) \end{aligned} \quad (9)$$

변전소의 파괴확률은 표 2에서 제시한 바와 같이 정의된 손상상태에 따라서 각각 구하여야 한다. 본 연구에서 제안한 바와 같이 경미한 손상의 경우는 4개의 Bank중에서 1개의 Bank가 손상될 확률을 계산함으로써 산정할 수 있다. Bank의 파괴확률이 구해졌으므로 경미한 손상의 경우 식 (10)을 이용하여 구할 수 있다. 이 경우 네 개의 Bank중에서 어느 하나라도 손상이 발생하는 경우에 해당한다.

$$\begin{aligned} P(\text{Substation}_{\text{slight}}) \\ &= P(BANK_A) \cup P(BANK_B) \cup P(BANK_C) \cup P(BANK_D) \end{aligned} \quad (10)$$

중간손상인 경우는 네 개의 Bank중에서 임의의 두개의 Bank에서 손상이 발생할 확률을 구하면 된다. 광범위한 손상인 경우는 모든 Bank가 손상일 입는 것으로 규정하였으므로 각 Bank의 손상확률이 교집합으로 구성되어야 한다. 식 (11)로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(\text{Substation}_{\text{slight}}) \\ &= P(BANK_A) \cap P(BANK_B) \cap P(BANK_C) \cap P(BANK_D) \end{aligned} \quad (11)$$

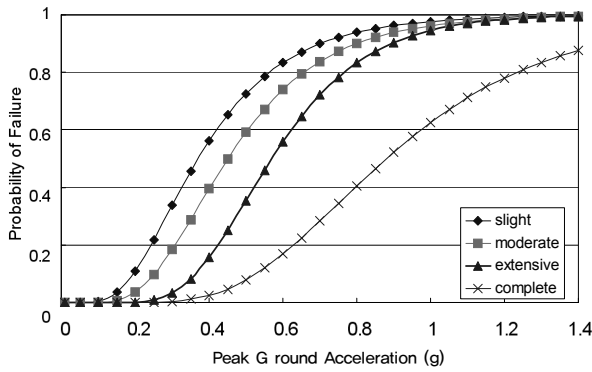
완전손상인 경우는 각 Bank의 손상확률이 아니고 각 변압기와 절연애자의 손상확률을 이용하여 모든 변압기 또는 모든 절연애자가 손상이 발생할 확률을 산정할 수 있다.

변전소별로 주변압기와 절연애자에 대한 지진취약도 함수를 도출하여 시스템 분석을 통하여 피해수준에 따른 지진취약도곡선을 도출하였다. 전술한 바와 같이 피해정도를 경미한 손상, 중간정도의 손상, 극심한 손상, 완전 손상의 네 단계로 구분하여 각 단계별 지진재해도 곡선을 구분된 전압별 변전소에 따라서 도출하였다. 그림 18~그림 20에 765kV, 345kV 그리고 154kV 변전소의 지진취약도 함수를 정리하여 도시하였다. 또한 각 변전소별로 손상상태에 따른 취약도 함수를 구하여 표 7에 정리하였다. 본 연구에서 산정한 지진취약도 함수는 응답의 평균값은 본 연구의 해석결과를 적용하였으며 불확실성을 나타내는  $\beta$ 값은 미국 HAZUS에서 사용하는 값을 준용하였다(FEMA, 1999)<sup>(5)</sup>. 불확실성 계수를 산정하기 위해서는 많은 지진피해 자료와 실험결과 등이 있어야 하지만 국내의 여건은 그러한 자료를 얻을 수가 없는 상황이므로 응답의 평균값은 시스템분석을 통한 결과를 사용하고 불확실성 계수는 HAZUS의 값을 사용하였다.

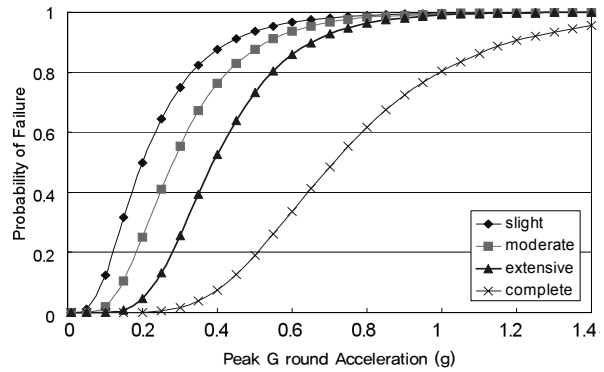
미국의 전력시설에 대한 지진취약도평가 결과에서는 고전압일수록 지진에 취약한 것으로 나타나고 있지만 국내의 경우는 765kV 변전소가 154kV 변전소와 유사한 범위의 취약도 함수를 갖고 345kV 변전소가 가장 취약한 것으로 나타나고 있다. 이론적으로는 고전압으로 갈수록 지진에 취약한 것이 맞지만 국내의 경우는 송변전설비의 내진설계기준이 제정된 것이 2001년이며 대부분의 변전시설이 그 이전에 건설되었음에도 765kV 변전소는 국내 내진설계기준이 없을 때 일본의 변전시설에 대한 내진설계 기준을 준용하여 건설되었기 때문인 것으로 판단된다. 또 다른 이유는 765kV 변전소의 변압기는 절연애자가 변압기 본체에 내장되어 있는 형태로서 154kV 변전소나 345kV 변전소에서 사용하고 있는 변압기와는 다른 구조형식을 가지고 있다. 154kV와 345kV 변전소의 변압기는 파괴모드가 전도, 미끄러짐 그리고 절연애자의 파괴 중에서 모두 절연애자의 파괴가 전체 파괴모드를 지배하고 있는 것으로 나타나고 있는 데에 반해서 765kV는 절연애자가 내장되어 있으므로 파괴확률이 154kV 및 345kV 변전소에 비하여 작게 평가되는 것으로 판단된다.

## 7. 결론

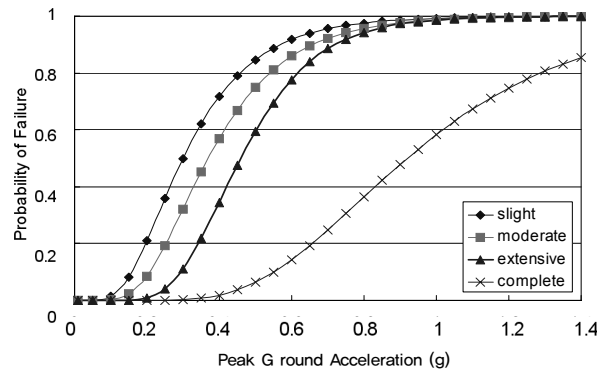
본 연구에서는 국내 변전소의 현황을 분석하여 대표 변전소 형식을 선정하고 선정된 변전소에서의 취약 기기를 선정



〈그림 18〉 765kV 변전소의 지진취약도 곡선



〈그림 19〉 345kV 변전소의 지진취약도 곡선



〈그림 20〉 154kV 변전소의 지진취약도 곡선

〈표 7〉 전압별 변전소의 지진취약도 함수

구분	손상상태	Median	Beta
765kV	slight	0.37	0.50
	moderate	0.45	0.45
	extensive	0.57	0.35
	complete	0.88	0.40
345kV	slight	0.20	0.60
	moderate	0.28	0.50
	extensive	0.39	0.40
	complete	0.71	0.40
154kV	slight	0.31	0.70
	moderate	0.37	0.55
	extensive	0.46	0.45
	complete	0.92	0.40

하여 선정된 기기에 대한 취약도 분석을 수행하였으며, 개별 기기의 취약도 분석 결과를 고장수목을 이용하여 변전소 시스템 전체의 취약도 평가를 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 변전시설의 설비를 집중적으로 파악하고 각 설비별 파괴 모드 분석 등을 통하여 전체 시스템의 지진취약도 함수를 제안하였다. 변전시설은 국내에 가장 널리 사용되고 있는 전압형태인 765kV, 345kV 및 154kV로 구분하였

으며 국내 변전소의 현황파악을 통하여 GIS형 변전소를 대표 변전시설로 선정하였다. GIS형 변전소는 변압기와 절연애자를 제외한 변전소의 주요 설비가 절연가스로 충전된 강관 내부에 설치되어 있어 지진에 상대적으로 안전한 구조형식이라 판단하여 검토 대상 기기로서 변압기와 절연애자를 선정하였다.

2. 각 변전소별로 변압기와 절연애자에 대한 지진취약도 분석과 시스템 분석을 수행하여 최종적으로 변전소에 대한 지진취약도 함수를 도출하였다. 변압기의 경우 미끄러짐,

전도 그리고 절연애자에 대한 파괴모드를 고려하였으며, 절연애자의 경우는 절연애자의 파괴만을 고려하여 지진 취약도 해석을 수행하였다. 기기별로 구해진 지진취약도 함수는 시스템 분석을 위하여 고장수목을 작성하여 전체 변전소의 지진취약도 함수를 제시하였다.

3. 미국의 전력시설에 대한 지진취약도평가 결과에서는 고전압일수록 지진에 취약한 것으로 나타나고 있지만 국내의 경우는 765kV 변전소가 154kV 변전소와 유사한 범위의 취약도 함수를 갖고 345kV 변전소가 가장 취약한 것으로 나타났다. 이것은 765kV 변전소는 국내 내진설계기준이 없을 때 일본의 변전시설에 대한 내진설계 기준을 준용하여 건설되었기 때문에 보다 안전한 것으로 판단된다. 또한 154kV와 345kV 변전소의 변압기는 절연애자의 파괴가 전체 파괴모드를 지배하고 있는 것으로 나타나고 있는 데에 반해서 765kV는 절연애자가 내장되어 있으므로 절연애자의 파괴모드가 나타나고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 과학기술부 원자력 중장기연구사업 및 방재연구소의 전력시설물의 지진취약도함수 국산화 연구의 일환으로 수행되었음.

### 참고 문헌

1. (社)日本原子力學會標準, 原子力發展所の地震에起因한確率論的 安全性評價實施基準, (2006).
2. Ang, A. H-S., Tang, W. H., Probability concepts in engineering planning and design, J. Wiley and Sons, New York, Vol. I, 1975.
3. Ang, A.H.-S., Pires, J.A. and Villaverde, R., A Model for the Seismic Reliability Assessment of Electric Power Transmission Systems, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 51, 1996, pp. 7-22.
4. Camensig, C., Bresesti, L., Clementel, S. and Salvetti, M., Seismic Risk Evaluation for High Voltage Air Insulated Substations, Reliability Engineering and System Safety, Vol 55, 1997, pp. 179-191
5. FEMA(미국재난관리청), HAZUS99 User's Manual, 1999.
6. Hwang, H.H.M and Chou, T., Evaluation of Seismic Performance of and Electric Substation using Event/Fault Tree Technique, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 13, No. 2, 1998, pp. 117-124.
7. Hwang, H.H.M and Huo, J-R., Seismic Fragility Analysis of Electric Substation Equipment and Structures, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 13, No. 2, 1998, pp. 107-116.
8. Murota, N., Feng, M. Q. and Liu, G. Y., Experimental and Analytical Studies of Base Isolation Systems for Seismic Protection of Power Transformers, Technical Report MCEER-05-0008, MCEER, 2005.
9. Reed, J.W. and Kennedy, R.P., Methodology for Developing Seismic Fragilities, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute (EPRI), prepared by Jack R. Benjamin and Associates, Inc., 1994, TR-103959.
10. 고현무, 김영호, 박영석, “지진 재해에 대한 전력 송전 네트워크 시스템의 신뢰성 평가 모형”, 한국지진공학회, Vol. 7, No. 2, 2003, pp. 93-102.
11. 박영준, 조호현, 박원석, 고현무, 변압기의 병렬운전을 고려한 국내 345kV 초고압 전력망의 지진 재해 신뢰성 평가, 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제3호, 2006, pp. 13-20.
12. 조양희, 조성국, 진동시험에 의한 154kV 변압기 부상의 동특성 분석 및 내진성능 평가, 한국지진공학회 논문집, 제10권 제5호, 2006, pp. 107-115.
13. 한전전력연구원, 송변전설비의 내진설계기준 설정 연구, 2001.