

# 지진해일에 의한 원자력발전소 소외변압기의 취약도 평가 Tsunami Fragility Evaluation for Offsite Transformer in Nuclear Power Plants

김민규\* · 최인길\* · 강금석\*\*  
Min Kyu Kim\*, In-Kil Choi\* and Keum Seok Kang\*\*

**요 지 :** 본 연구에서는 지진해일에 의한 원자력발전소의 확률론적 안전성 평가를 위하여 취약도 함수 도출에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 기존의 지진 등을 대상으로 한 외부사건에 대한 확률론적 안전성 평가방법을 분석하여 원자력발전소를 대상으로 한 지진해일의 취약도 평가방법을 제시하였으며 주요 설비 및 구조물에 대한 파괴모드 및 파괴기준을 검토하였다. 최종적으로 원자력발전소의 소외 변압기를 대상으로 지진해일 취약도 평가를 수행하였다. 결과적으로 원자력발전소의 소외변압기는 지진해일 발생시 동수압에 의한 전도와 미끄러짐과 같은 구조적인 손상 보다는 범람에 의한 기능적 손상에 의해서 파손될 가능성이 높은 것으로 평가되었다.

**핵심용어 :** 지진해일, 확률론적 안전성 평가, 취약도 평가, 소외변압기, 구조적 손상, 기능적 손상

**Abstract :** In this study, a tsunami fragility methodology was determined for a probabilistic safety assessment(PSA) induced tsunami event in Nuclear Power Plant(NPP) site. For this purpose, a fragility evaluation method was presented using previous external PSA method. Failure mode and failure criteria about major safety related equipments and structures were determined. Finally, a tsunami fragility assessment was performed for offsite transformer in NPP site. For the fragility evaluation, structural failure like overturning and sliding and functional failure induced by inundation. Through this study, it can be concluded that a functional failure according to inundation height was governed total probability of failure of offsite transformer in NPP.

**Keywords :** Tsunami, Probabilistic Safety Assessment (PSA), fragility, offsite transformer, structural failure, functional failure

## 1. 서 론

2004년 인도네시아에서 발생한 수마트라 지진해일 이전까지는 국내외를 비롯해서 지진해일에 대한 연구가 널리 이루어지고 있지 않았다. 그러나 수마트라 지진 이후 지진해일이 큰 피해를 발생시킬 수 있는 자연재해로서 인식되었으며 많은 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 지진해일의 발생이 거의 없는 것으로 일반인들은 인식하고 있으나 최근에도 우리나라 동해안에서는 지진해일의 기록이 있고 이로 인한 인명 및 재산 피해의 사례가 있다.

한국의 동해안에 영향을 미칠 수 있는 지진해일의 발생은 일본의 서해안에서 발생한 지진에 기인한다. 일본의 서해안은 일본의 동해안에 비하여 지진의 발생도 적고 그 규모도 상대적으로 작은 것으로 평가되어 왔으나 최근 들어 일본 서해안에서도 지진의 발생이 증가하고 그에 의한 지진해일의 발생도 적지 않은 것이 현실이다. 한국의 동해안에서 발생한 기록을 찾을 수 있는 지진해일은 1741년의 Kanpo 지진해일, 1940년의 Shakotan 지진해일, 1964년의 Niigata 지진해일, 1983년

의 동해중부 지진해일 그리고 1993년의 남서외해 지진해일로 총 5회이다(윤성범 등, 2002). 이중 1983년의 동해중부 지진해일은 2명의 인명피해가 발생하기도 했으며 상당한 재산 피해를 동반하였다. 그러나 당시에는 지진해일에 대한 대비가 전혀 되어 있지 않은 상황이므로 실제 지진해일에 의한 최대범람고가 어느 정도 되는가는 당시 주민과 목격자에 의한 증언에 의존해야 하는 열악한 상황이다. 따라서 문헌마다 당시 최대범람고가 상이하게 표현되어 있지만 대체적으로 임원항에서 최대 4 m 이상의 범람이 발생하였다는 것에는 이견이 없는 것으로 판단된다. 과거의 역사기록인 조선왕조실록 및 승정원일기에 기록되어 있는 해일기록을 정리한 결과 조선시대에도 지진해일의 발생으로 판단되는 기록이 8건 정도인 것으로 나타나고 있다(한국수력원자력, 2006).

이러한 이유로 지진해일에 대한 연구가 국내외에서 많은 연구자들에 의해서 수행되고 있으나 이러한 연구의 대부분은 수리학적 이론에 근거하여 지진해일의 전파를 모의하는 연구에 집중되어 있다(윤성범 등, 2007, 최병호 등, 2006, 최병호 등, 2002). 원자력발전소와 같이 해안가에 위치하고 있는 중요시

\*한국원자력연구원 종합안전평가부(Corresponding author: Min Kyu Kim, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea, minkyu@kaeri.re.kr)

\*\*한국전력공사 전력연구원

설을 대상으로 하여 지진해일에 대한 안전성을 평가하기 위해서는 지진해일에 의한 범람고를 정확하게 산정하는 것도 중요하지만 지진해일시 동수압에 의한 구조물 또는 기기의 파괴확률을 산정하는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 원자력발전소를 대상으로 하여 지진해일에 의한 확률론적 안전성 평가를 수행하기 위한 지진해일 취약도 평가방법을 제시하였다. 최종적으로는 지진해일의 발생시 피해가 예상되는 소외 변압기를 대상으로 취약도 평가를 수행하여 어느 정도의 파괴확률을 갖는지 평가하였다.

## 2. 지진해일에 대한 확률론적 안전성 평가

지진해일에 대한 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)는 기본적으로 지진과 같은 외부사건에 대한 확률론적 안전성 평가방법을 따른다. 외부사건 PSA란 원자력발전소의 100% 출력 운전 중 외부적 요인 즉, 지진, 화재 및 침수 등에 의하여 초래될 수 있는 주요 노심손상 사고경위들을 파악하고 그 발생 빈도를 정량화 하는 것이다. 외부사건 분석 과정을 통하여 외부사건에 대한 원전의 안전성 관점에서 구조물, 계통, 기기 및 운전원 직무의 상대적 중요도를 평가하며, 노심손상 사고에 대한 주요 영향 인자들을 파악하여 그 대처 방안을 제시함으로써 궁극적으로는 원전의 안전성을 향상시키도록 하는 것이다(ANS and IEEE, 1982).

외부사건에는 일반적으로 지진, 홍수, 화재, 폭풍, 비행기 충돌 등이 포함되며, 분석 목적과 범위에 따라 PSA 수행 수준은 달라질 수 있다. 외부사건 PSA의 분석결과는 내부사건 PSA의 경우보다 많은 불확실성을 포함하게 된다. 이것은 외부사건의 경우 내부사건에 비하여 경험데이터가 부족하며 새로운 분석기법을 사용하여야 하고 공학적 판단 및 전문가의 판단에 의한 의존정도가 높기 때문이다.

외부사건으로 인한 위험도 평가 요소는 고려하고자 하는 외부사건에 따라서 다소 변동이 있지만 일반적으로 Fig. 1에 제시한 바와 같이 재해도 분석, 계통 및 구조 응답분석, 기기(구조, 배관 및 장치)의 취약도 분석, 계통 및 사고경위 분석 그리고 결과분석으로 구성된다.

다섯 단계의 평가 요소를 수행하여 나온 결과는 발생빈도(Release Frequency) 또는 피해 수준 빈도(Damage-State Frequency) 그리고 위험도이다. 재해도 분석, 응답 분석(Response Analysis) 및 기기 취약도 분석에서 얻은 정보는 계통 모델의 입력자료로 사용되며, 계통 모델은 외부사건 분석을 위해서 내부사건에서 사용된 계통 모델을 적절하게 재구성한다. 그 다음 선정된 외부사건에 해당하는 사고경위별로 정량화를 수행하며, 각 사고경위별로 발생 빈도를 산출한다. 결과 분석(Consequence Analysis)은 외부사건이 환경에 미치는 영향을 고려하기 위해서 결과 분석 모델을 사용한다. 각 평가요소에 대하여 기술하면 다음과 같다.

■ 재해도 분석: 다양한 크기의 외부사건이 임의 부지에 발

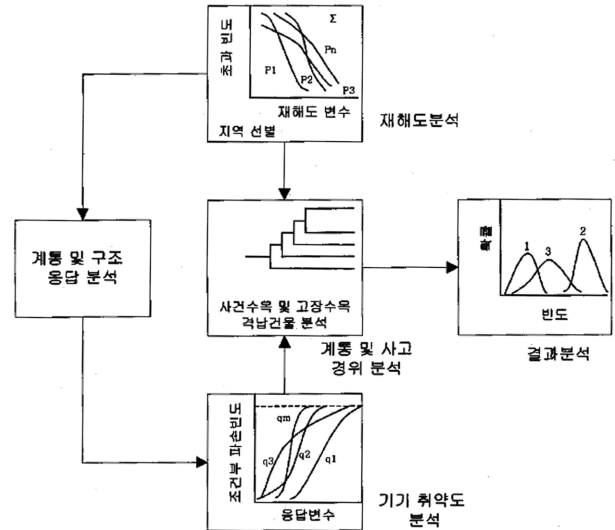


Fig. 1. Schematic Overview of an External Event.

생할 수 있는 확률을 평가하고 외부사건으로부터 스펙트럼 형상을 결정하는 것이 포함된다. 재해도 분석에서 재해도 강도(Hazard Intensity)라 불리는 외부사건의 각기 다른 강도를 지닌 사고경위의 발생빈도가 계산되고 재해도 곡선의 형태로 표현된다.

■ 계통 및 구조 응답분석: 특정 재해도 입력자료에 대한 발전소 계통 및 구조의 반응이 계산되며, 여기에서의 주요 관심사는 특정 구조, 배관 및 장치 지역에서의 구조적 반응 결과이다.

■ 기기 취약도 분석: 해당 기기의 조건부 파손확률(Conditional Probability of Failure)이 계산된다. 기기의 취약도란 주어진 외부 하중에 대한 발전소 설비의 조건부 파손 빈도를 의미하는데, 이것의 무작위성과 불확실성을 감안한 계산 값을 누적 분포함수(Cumulative Distribution Function)로 나타낸 것이 취약도 곡선이다.

■ 계통 및 사고경위 분석: 고장수목 및 사건수목을 사용하여 기기 및 계통들의 외부사건의 영향으로 그 기능이 저하되거나 이용 불가능하게 될 경우를 분석하며, 외부사건의 특징을 반영하여야 한다.

■ 사고경위의 정량화: 각 외부사건들의 사고경위를 정량화 하여 그 결과를 종합한다.

외부사건 PSA의 적용범위를 제일 처음 정의한 것은 미국 NRC의 보고서인 NUREG/CR-2300이다. NUREG/CR-2300은 'PRA Procedure Guide'로서 원자력발전소의 확률론적 안전성 평가지침서이며 1983년에 발간되었으나 지금까지 큰 변화없이 PRA 지침으로서 전 세계적으로 인용되고 있는 보고서이다(ANS and IEEE, 1982). 위 보고서에서는 PSA 연구에서 고려해야 할 자연재해와 사람으로 인한 외부사건을 정리하고 있다. 외부사건 PSA에서 고려하고 있는 사건은 매우 다양하지만 현재 미국을 비롯한 전세계적으로 실제로 고려하고 있는 외부사건은 지진, 화재, 홍수 등에 제한되어 있으며

최근 들어 항공기 충돌에 의한 영향과 지진해일에 대한 연구가 수행되고 있다(IAEA, 2006, USNRC, 2008).

### 3. 지진해일에 의한 원전 구조물의 거동

#### 3.1 기기 및 구조물 선별

지진해일 발생시 원자력발전소의 안전성에 영향을 미칠 수 있는 기기와 구조물을 선별하였다. 주요 구조물과 기기의 선별을 위하여 토목공학자와 시스템공학자가 팀을 구성하여 울진 5,6호기 원자력발전소에 대한 현장답사를 실시하였다. 현장답사 결과를 바탕으로 원자력발전소의 주요 기기를 옥내와 옥외로 구분하여 검토대상 구조물과 기기를 선별하였다. 선별결과를 다음 Table 1에 정리하였다.

#### 3.2 파괴모드 분석

선별된 구조물/기기에 대하여 현장답사 결과를 중심으로 하여 발생가능한 파괴모드를 분석하였다.

방과제는 외해에서 발생하는 파고를 차단하는 가장 최전방의 구조물이다. 지진해일에 의해서 방과제가 파손될 경우 직접적인 원자력발전소의 손상이 발생할 수 있다. 파괴모드는 구조적인 파손으로 방과제의 파손은 직접적으로 발전소의 노심 손상으로 이어질 수 있다.

취수구조물은 발전소의 냉각수를 공급하기 위한 펌프 등을 포함하고 있는 콘크리트 구조물이며, 취수구에는 1차적으로 Bar Screen으로 이물질을 거르도록 하는 구조로 되어 있다. 취수구와 방과제 사이에는 외부에서 유입되는 어류와 새우류를 차단시키기 위한 많은 그물이 설치되어 있다. 따라서 취수구조물의 파손은 지진해일에 의한 동수압으로 인한 구조물의 파손이 가능하며 그물이나 소형 어선 등에 의해서 취수구

Table 1. Target Structures/Facilities for Tsunami Event

구분	구조물/기기	비고
옥외	방과제	Main Transformer, Start-up Transformer
	취수구조물	
	소외변압기	
	소외전원 보조건물	
옥내	EDG Fuel system	Emergency Diesel Generator
	ESWS	Essential Service Water System
	CCWS	Component Cooling Water System

Table 2. Target Structures and Failure Modes for Tsunami Event

구분	설비	파괴모드	상세	응답변수
옥외	취수구조물	기능적 손상	침수에 의한 해수펌프의 손상	범람고
			초기 물빠짐에 의한 냉각수 부족 부유물에 의한 취수구 막힘	범람고
	소외변압기	기능적 손상 구조적 손상	동수압에 의한 취수구조물 손상	동수압
			침수에 의한 기능적 손상	범람고
옥내	노심냉각계통	기능적 손상	동수압에 의한 전도/미끄러짐 손상 침수에 의한 노심냉각기능 손상	동수압 범람고

가 막히는 기능적 손상의 발생이 가능하다.

소외 변압기는 옥외에 위치하고 있는 전기설비로서 구조적 파손과 기능적 파손이 모두 가능한 설비이다. 기능적 파손은 지진해일에 의한 수위상승으로 인하여 변압기의 기능이 정지되는 현상이다. 구조적인 손상은 과력으로 인하여 변압기가 전도되거나 미끄러지는 구조적 파괴가 발생하는 것이다.

소외전원은 발전소에서 생산한 전기를 외부로 공급하거나 외부전원을 발전소로 받아들이는 데에 사용되는 설비로서 과력에 의하여 구조물이 손상되는 구조적인 손상이 발생하기는 어려운 형상인 것으로 판단되며, 전기설비이므로 수위상승에 의하여 기능적 손상의 발생이 가능한 것으로 판단된다.

비상디젤발전기의 연료설비가 침수되어 연료공급에 차질이 발생하면 비상시 원자로를 안전하게 정지시키는 기능이 상실되어 노심손상으로 이어질 수 있다. 따라서 수위상승에 의한 침수로 인하여 펌프가 동작을 멈추게 되는 기능적 손상에 대하여 고려하여야 할 것으로 판단된다.

펌프기냉각해수계통이 침수되어 펌프의 동작이 정지하면 냉각수의 공급이 중단되므로 발전소에는 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 펌프실이 침수되면 기능상실이 우려되며 외부 창문까지 수위가 상승하면 침수가능성이 있는 것으로 판단된다.

상기와 같이 여러 기기와 구조물에 대한 검토결과를 종합하여 손상가능 설비 및 각 설비의 파괴모드를 정리하여 다음 Table 2에 정리하였다.

### 4. 소외변압기에 대한 취약도 평가

3장에서 정리한 바를 근거로 하여 실제 취약도 평가를 수행하였다. 취약도 평가는 구조적 손상과 기능적 손상의 발생이 모두 가능한 것으로 판단되었던 소외변압기를 대상으로 수행하였다. 소외 변압기는 발전소에서 생산된 전기를 154 kV로 변환하여 외부로 송전하는 역할을 하는 기기로서 지난 2007년 일본의 가시와자키 가리와 원전의 지진피해시 화재가 발생하여 큰 주목을 받았던 기기이다.

#### 4.1 평가대상 소외변압기

지진해일에 의한 원자력발전소의 취약도 평가를 위하여 전체 구조물/설비 중에서 소외변압기를 선택하여 구조적 손상 및 기능적 손상에 대한 취약도 평가를 수행하였다. 평가대상

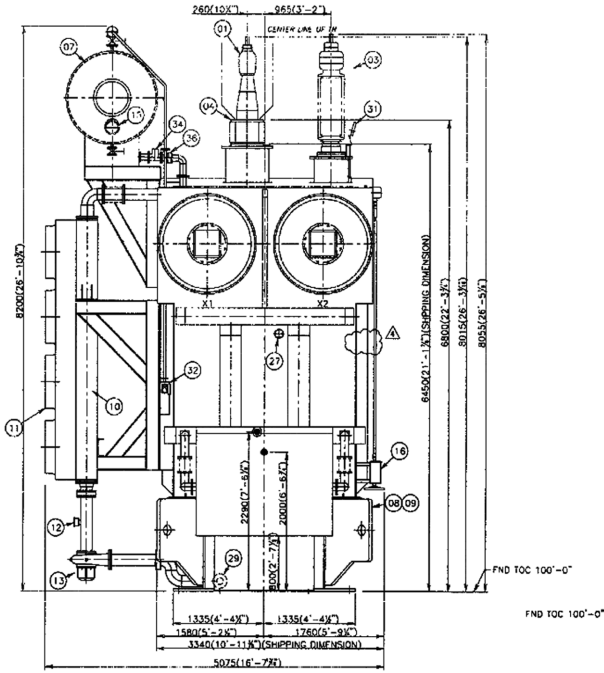


Fig. 2. Drawing of offsite transformer.

Table 3. Specification of offsite transformer

Dimension	Width	5,070 mm
	Depth	5,075 mm
	Height	8,200 mm
Weight	Core & Coil	1,250 kN (125tf)
	Tank & Fitting	330 kN (33tf)
	Insulation Oil	280 kN (28tf)
	Total weight	1,860 kN (186tf)

변압기의 상세 도면과 제원은 각각 Fig. 2와 Table 3에 정리하였다.

### 4.2 지진해일에 의한 동수압 산정

소외변압기의 구조적 파괴를 산정하기 위하여 파력을 산정하였다. 파력의 산정을 위해서 FEMA(Federal Emergency Management Agency)에서 발간한 “Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunami”에서 제시하고 있는 방법을 사용하였다. 지진해일에 의한 동수압은 식 (1)을 이용하여 산정할 수 있으며 구조물에 적용하기 위한 모식도는 Fig. 3과 같다(FEMA, 2008).

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{\max} \quad (1)$$

여기서,  $\rho_s$ : 부유물을 고려한 유체의 밀도

$C_d$ : 항력계수(drag coefficient)

$B$ : 구조물의 폭

$hu^2$ : 단위중량당의 운동량속(momentum flux)

이다.

식 (1)에서 제시하고 있는 momentum flux를 구하기 위해서는 해당 지점의 상세 모델링을 통한 수치해석을 수행하여야

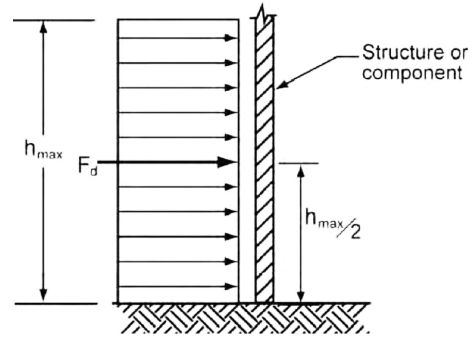


Fig. 3. Schematic Diagram for Hydrodynamic Force.

하지만 FEMA 보고서에서는 간략식을 이용하여 momentum flux를 구할 수 있는 방법을 식 (2)와 같이 제시하고 있다.

$$(hu^2)_{\max} = gR^2 \left( 0.125 - 0.235 \frac{z}{R} + 0.11 \left( \frac{z}{R} \right)^2 \right) \quad (2)$$

여기서,  $g$ =중력가속도

$z$ =구조물기초의 높이

$R$ =수위

이다.

### 4.3 취약도 평가 방법

변압기의 취약도함수를 도출하기 위하여 가능한 파괴모드를 전도, 미끄러짐 그리고 침수에 의한 기능적 손상으로 결정하였다. 각 파괴모드에 따른 지진해일 취약도함수를 도출하여 변압기에서의 지배 파괴모드를 결정하고 그에 따른 지진해일 취약도함수를 결정하여야 한다. 우선적으로 전도와 미끄러짐에 대한 지진해일 취약도 분석을 위하여 Fig. 4와 같은 모식도를 변압기의 개략적인 모델로 채택하였다. 무게중심은 Fig. 2에서 제시한 도면에 나타나 있는 변압기의 실제 무게중심점을 고려하였다.

변압기가 전도에 대한 안정성을 확보하기 위해서는 다음의 관계식을 만족하여야 한다.

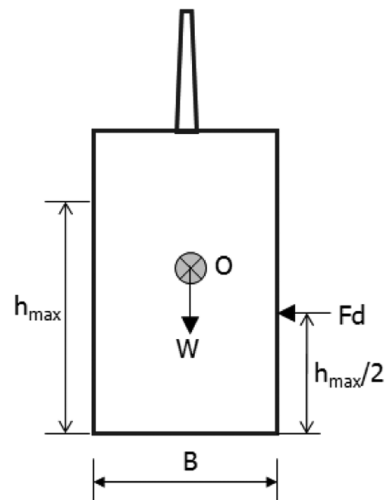


Fig. 4. Schematic diagram for fragility evaluation of Tsunami Event.

$$F_d \cdot \frac{h_{\max}}{2} < \frac{B}{2} W \quad (3)$$

여기서,  $h_{\max}$ =침수깊이  
 $W$ =변압기의 무게  
 $B$ =변압기의 폭

이다. 이 관계를 이용하여 변압기에 전도를 일으킬 수 있는 한계동수압(critical hydrodynamic force)을 결정할 수 있다.

$$F_{dc,overturning} = \left( \frac{B}{h_{\max}} \right) W \quad (4)$$

변압기가 동수압에 의해 미끄러짐이 발생할 수 있는 조건은 변압기에 작용하는 동수압에 의한 힘이 변압기 자중과 마찰면에서의 마찰 저항력보다 크게 되는 것이다. 따라서 미끄러짐에 대한 저항을 다음의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$F_d > F_s = \mu W, \quad F_{dc,sliding} = \mu W \quad (5)$$

여기서  $F_s$ 는 마찰에 의한 저항력이다. 전도와 미끄러짐에 대한 파괴확률은 다음의 식을 이용하여 하여 산정할 수 있다.

$$P_f = \Phi \left[ \frac{\ln(\bar{\sigma}_R) - \ln(\bar{\sigma}_U)}{\sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2}} \right] \quad (6)$$

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

이다. 불확실성을 나타내는 계수는 다음과 같이 하나의 계수로도 표현할 수 있다.

$$\beta_C = \sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2} \quad (7)$$

변압기의 기능적 파괴를 고려하기 위하여 한계수위를 결정하여 파괴기준으로 선택하여 취약도 평가를 수행하였다. 변압기는 기초면에서 수심이 1 m, 3 m, 5 m에 이르면 기능손상이 발생하는 것으로 각각 가정하여 취약도 평가를 수행하였다. 구조적 손상인 전도와 미끄러짐 및 기능적 손상에 대한 취약도 평가를 위해서는 식 (6)을 이용하여 조건부 파손확률을 산정할 수 있으나 타당성 있는 불확실성 계수의 산정은 어려운 것이 현실이다. 따라서 기존에 변압기에 대한 전도와 미끄러짐에 대한 파괴확률 산정시 Hwang와 Huo(1998)의 연구에서 제시한 값인 0.5와 0.7을 사용하였으며, 기능적 손상의 경우는 손상기준의 산정은 불확실하지만 손상기준에 따른 불확실성은 오히려 그리 크지 않을 것으로 판단하여 불확실성 계수를 0.3으로 가정하였다. 각 파괴기준에 의한 파괴확률을 산정하고 최종적으로 변압기 전체에 대한 취약도 곡선을 도출하기 위하여 각 파괴확률을 독립사건으로 간주하여 Fig. 5와 같은 고장수목(fault tree)을 사용하였다.

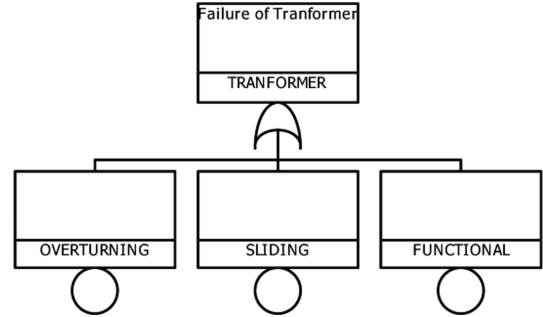


Fig. 5. Fault Tree for Total failure probability evaluation.

Table 4. Input parameter for failure probability evaluation

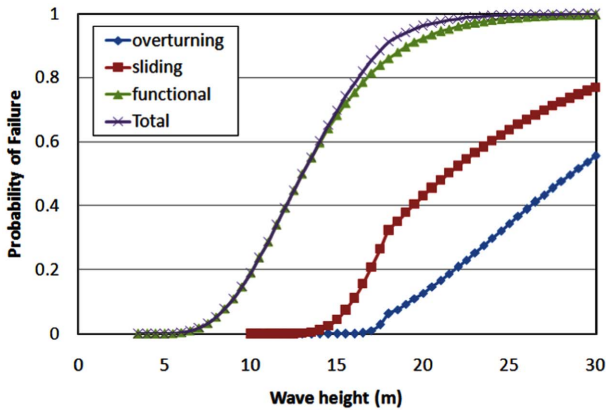
항목	기호	입력값	비고
부유물을 포함한 유체의 밀도	$\rho_s$	1200 kg/m <sup>3</sup>	FEMA(2006)
항력계수	$C_d$	2.0	FEMA(2006)
구조물의 폭	$B$	5 m	
마찰계수	$\mu$	0.4	Hwang와 Huo(1998)

#### 4.4 취약도 평가 결과

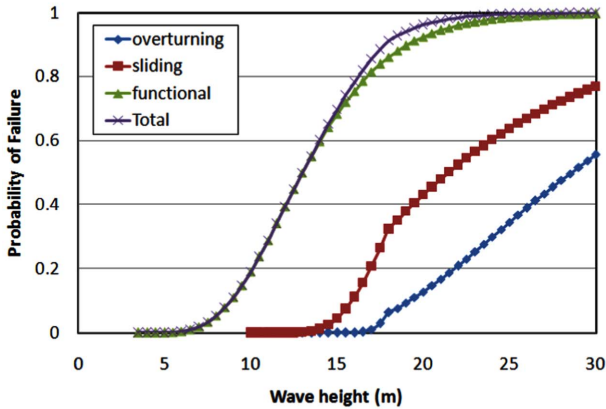
원자력발전소 소의 변압기에 대한 취약도 평가를 위해 식 (6)을 이용하여 파괴확률을 산정하였다. 변압기의 파괴확률을 도출하기 위한 변수는 지진해일에 의한 범람고로서 평균해수면을 기준으로 하여 파괴확률을 도출하였다. 파괴확률 산정을 위한 변수는 Table 4에 정리하였다.

최종적으로 구조적 파괴와 기능적 파괴를 고려한 변압기에 대한 취약도 곡선을 Fig. 6에 도시하였다. 전술한 바와 같이 기능적 손상의 발생 기준을 기초면 으로부터 1 m, 3 m, 5 m인 경우에 대하여 각각 계산하여 비교하였다. 또한 각각의 기능적 손상기준에 대하여 변압기의 전체 파괴확률을 Fig. 7에 도시하여 비교하였다. 구조적인 손상의 경우 변압기의 높이인 8 m를 초과하는 경우, 즉 평균해수면으로부터 18 m 이상의 범람이 발생할 경우는 변압기에 가해지는 동수압의 크기는 수위의 상승에 따라서 증가하지만 동수압이 작용하는 높이는 구조물의 크기 이상으로 증가하지 않으므로 변압기에 작용하는 동수압은 평균해수면에서 10 m에서 18 m까지와 18 m 이후의 증가하는 경향에 차이가 발생하게 된다. 따라서 이를 고려한 해석을 수행하였으므로 최종적으로 전도와 미끄러짐에 의한 파괴확률 곡선이 평균해수면 18 m에서 다소 변화하는 것을 알 수 있다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 전체 파괴확률은 기능적 손상에 의해서 지배되고 있는 것을 알 수 있다.

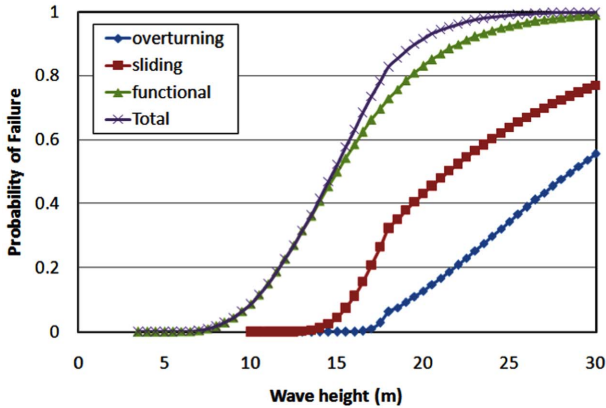
구조적인 손상에서는 미끄러짐에 의한 파괴가 전도에 대한 파괴보다 파괴확률이 높은 것으로 나타났다. 소외변압기는 중량의 구조물이며 Fig. 2에서 보는 바와 같이 무게중심이 기초면에서 3 m 이내에 있는 안정된 구조물이므로 전도에 의한 파괴가 발생하는 것 보다는 미끄러짐에 의한 파괴발생 가능성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 기초면 으로부터 5 m의 침수가 발생하는 경우인 15 m의 범람고가 발생한 경우에도 전도에 의한 파괴확률은 거의 0에 가까우며, 미끄러짐에



(a) Maximum critical wave height : 1m



(b) Maximum critical wave height : 3m



(c) Maximum critical wave height : 5m

Fig. 6. Failure probability of offsite transformer in the case of Tsunami event according to critical maximum wave height.

의한 파괴확률도 5% 정도에 불과한 것을 알 수 있다. 소외 변압기가 완전히 잠기는 18m의 범람고가 발생한 경우 전도에 의한 파괴확률은 6.3%에 불과하며 미끄러짐의 경우는 32%의 파괴확률이 나타나는 것을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 침수에 의한 기능적 손상은 단순히 기초면 으로부터 최대수심이 1m, 3m, 5m인 경우를 평균파괴 확률인 것으로 가정하고 불확실성계수는 0.3으로 가정하여 파괴확률을 도출하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 기능손상을 유발하는 최대수심이 증가할수록 전체파괴확률이 구조적인 손상에 영향을 받긴 하지만 전체적으로는 구조적인 손상확률이

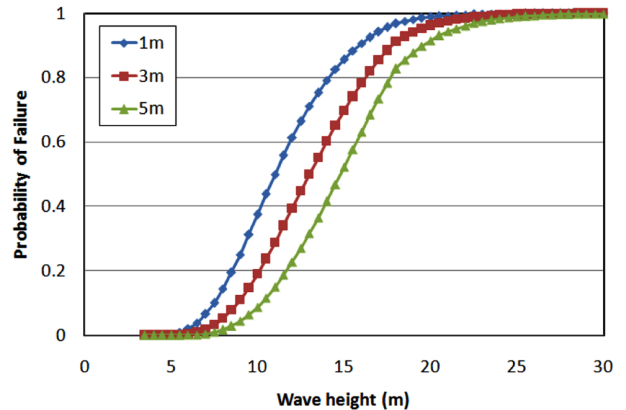


Fig. 7. Total Failure probability of offsite transformer according to critical maximum wave height.

변압기의 전체 손상확률에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 결과적으로 어느 정도의 침수에도 동작이 가능하도록 변압기를 제작한다면 지진해일에 의한 변압기의 손상확률을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 단 본 연구에서의 기능적 손상에 대한 파괴기준은 단순 가정에 의한 것이므로 변압기 제작사의 제작도면과 전기 전문가의 의견을 수렴하여 좀 더 정확한 파괴기준을 선정할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 7에서 제시한 바와 같이 기능손상을 유발시키는 최대수심 손상기준의 변화에 따른 변압기 전체의 파괴확률을 비교하면 최대 한계수심에 따라서 명확하게 변압기의 파괴확률이 변화하는 것을 알 수 있으며 파괴를 일으키는 한계수심이 증가함에 따라서 파괴확률이 크게 증가하는 것을 좀 더 명확하게 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소의 지진해일에 대한 안전성 평가기법을 개발하기 위하여 기존의 지진 등을 대상으로 한 외부사건에 대한 확률론적 안전성 평가방법을 분석하여 원자력발전소를 대상으로 한 지진해일의 취약도 평가방법을 제시하였으며 주요 설비 및 구조물에 대한 파괴모드 및 파괴기준을 검토하였다. 최종적으로 원자력발전소의 소외 변압기를 대상으로 지진해일 취약도 평가를 수행하였다. 다만 본 연구는 많은 부분에서 자료 및 기존의 연구가 없는 상황에서 수행하였으므로 지진해일에 대한 취약도 방법론을 제시하였다는 의미가 있지만 예제로 도출한 변압기의 취약도 평가 결과는 최종 결과인 것으로 보기 어려우며, 추후 상세한 분석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기술개발사업(연구과제 관리코드: M20702030003-

08M0203-00310) 및 한국수력원자력의 지원(과제명: 지진해일 확률론적 안전성 평가 기법 연구)으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

윤성범, 임채호, 김경희, 이동영 (2002). '1993 북해도 남서외해 지진해일 전파 수치모의', 대한토목학회논문집, 제22권, 제4-B호, 1, 573-582.

윤성범, 임채호, 배재석 (2007). '완변수심상 지진해일 전파 모의를 위한 분산보정 유한차분법', 대한토목학회논문집, 제27권, 제1B호, 1, 91-99.

최병호, 에뎀 페리놉스키, 이제신, 우승범 (2002). '공백역 지진에 의한 동해에 연한 해안에서의 지진해일 위험도 산정', 한국지진공학회 논문집, 제6권, 제5호, 10, 1-17.

최병호, 에뎀 페리놉스키, 홍성진 (2006). '병렬 FEM 모형을 이용한 1993년 동해 지진해일 시뮬레이션', 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제3호, 6, 35-45.

한국수력원자력(주), 원자력환경기술원, 한반도 주변해양 및 원양

의 지진해일에 의한 원전 안전성 평가, 2006-환경-단32, 2006. 8.

ANS and IEEE (1982). PRA Procedure Guide-A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants, US NRC, NUREG/CR-2300.

FEMA P646 (2008). Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunami.

Hwang, H.H.M and Huo, J.-R. (1998). Seismic Fragility Analysis of Electric Substation Equipment and Structures, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 13, No. 2, pp. 107-116.

IAEA (2006). Advanced nuclear plant design options to cope with external events, IAEA-TECDOC-1487, 2.

USNRC (2008). Tsunami Hazard Assessment at Nuclear Power Plant Sites in the United States of America, NUREG/CR-6966, PNNL-17397.

---

원고접수일: 2009년 11월 24일

수정본채택: 2009년 12월 8일(1차), 2010년 1월 19일(2차)

게재확정일: 2010년 1월 20일