

핵연료 집합체 지진해석을 위한 지진공학 정리 Earthquake Engineering Summary for Fuel Seismic Analysis

이강희† · 강홍석* · 김재용* · 윤경호* · 김형규*
Kanghee Lee†, Heungseok Kang*, Jaeyong Kim*, Kyungho Yoon*, Hyungkyu Kim*

1. 서 론

원자력 연구원에서는 설계기준 초과 지진사고 및 중대사고 동반 시, 가동중 원자로 내부 핵연료 집합체의 기계적 건전성을 확인하기 위한 연구와 고지진에 강건한 핵연료 집합체의 구조개발에 관한 연구를 수행하고 있다. 본 논문에서는 핵연료 집합체의 지진사고해석에 필요한 지진공학의 주요내용을 간략히 정리하였다. 주요한 내용으로 지진의 발생이유, 지진의 발생이력과 분포, 크기표현에 대해서 기술하고, 핵연료 집합체의 지진응답해석의 절차에 관하여 간략히 기술한다.

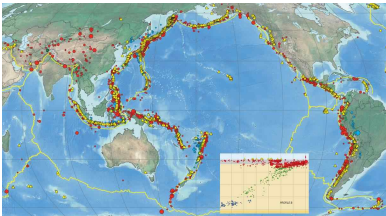


그림 1. 전세계 지진 및 화산 분포도(image source: <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/index.php>)

2. 지진공학 주요내용

지진은 왜 일어날까? 그림1은 대략 100년 동안 누적된 전세계 지진발생 누적이력과 화산의 분포를 보여준다. 붉은색으로 표시된 원은 지표부근에서 발생한 지진을 나타내는데, 특이한 것은 바다와 육지가 접해있는 대평양 인접국가의 해안 경계에서 화산과 지진의 발생이 두드러진 것을 관찰할 수 있다. 참고로, 지표부근에서 발생한 지진은 심지층에서 발생하는 지진에 비해 발생의 빈도가 높고, 지진파의 전달

경로가 짧으며, 토양의 감쇠작용이 작아 큰 인적, 경제적 피해를 줄 수 있다⁽¹⁾. 지구 표면은 그림2에서와 같이, 여러 개의 지각 판의 조합으로 구성되어 있고, 이러한 지각판이 생성/이동/상호작용하면서, 한쪽 판의 지표가 가라 앉거나(해안의 경계에서), 솟아오르거나 혹은 엇갈리는 것으로 알려져 있다^(2, 3). 대양과 인접한 나라에서 발생하는 지진의 대부분은 지각 판과 판의 상호작용에 의한 해양판의 미끄럼 침하(subduction, 선입)에 의한 것으로, 앞의 그림1에서 보았던 지진발생 분포도를 설명하고 있다. 해안 경계에서 발생하는 지각 판의 선입(subduction)은 판과 판의 상호작용력(마찰력)에 갑작스런 이완을 가져오므로, 이것이 지진발생의 주요한 원인으로 알려져 있다.

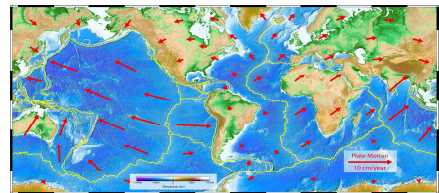


그림 2. 지각판의 생성과 이동, 상호작용

그림3은 일본 근해에서 발생한 지진분포 이력도를 도시하는데, 불행히도 일본은 앞서 보았던 지각판 경계에서 발생하는 선입대(subduction zone)의 대표적인 예가 되어 왔다. 2011년도 4월에 있었던 푸쿠시마 원자력 발전소의 대규모 원전 사고도 일본 근해에서 발생한 대형 지진이 쓰나미를 유도하여 발생한 크나큰 재해였다.

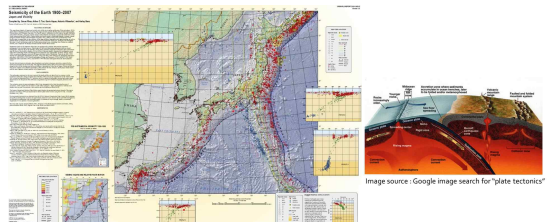


그림 3. 일본 근해 지진분포도와 선입(image source: <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/index.php>.)

† 교신저자; 정회원, 한국원자력 연구원
E-mail : leekh@kaeri.re.kr
Tel : 042-868-2298, Fax :042-863-0565
* 한국원자력연구원, 경수로핵연료기술부

발생된 지진의 크기 혹은 강도를 어떻게 표현할까? 이것에는 두 가지의 익숙한 표현이 있는데, 하나는 진도(지진의 강도, intensity)로 표현되는 주관적인 scale이 있고, 다른 하나는 규모(지진의 크기, magnitude)로 표현되는 객관적인 scale이 있다. 진도 표현으로 애용되는 MMI(Modified Mercalli scale)은 사람들이 느끼는 정도, 피해의 규모 등으로 도표화하여 12단계까지로 구분을 하였으며, 평가되는 기준에 따라 다양한 강도표현 방법이 존재한다.

지진의 크기를 객관적으로 표현하는 리터규모(Richter magnitude)는 진앙지로부터 100 km 떨어진 위치에서 정밀한 지진 계측기를 이용하여 측정된 진폭을 기준으로 등급을 나눈 것이며, 진앙지의 깊이, 거리, 측정위치 등에 따른 보정계수를 고려하여 표현될 수 있다. 진도와 규모 스케일의 상관관계는 진도가 주관적인 스케일이기 때문에, 엄밀한 대응관계를 갖지 못하나 대략의 상관성을 수식으로 표현하면 식 (1)와 같이 표현할 수 있다. 참고로, 지진의 크기를 에너지의 단위로 표현하는 방법이 활용되고 있으며, 이 경우 큰 지진의 발생 에너지와 원자폭탄 수준의 폭발 에너지를 그림4과 같이 비교할 수 있겠다.

(1)
$$M_L = 0.67I_0 + 1.0$$

Seismic Energy Release

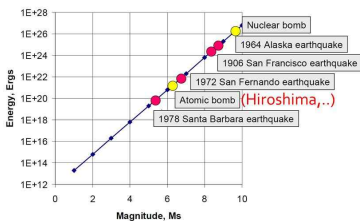


그림 4. 에너지 단위로 표현된 지진과 스케일 비교

전세계 지진 관측소에서 관측/측정된 지진의 상세 정보 및 시간이력은 위치와 방향, 시점에 따라 데이터 베이스화 되어, 인터넷에서 자유롭게 공개되고 있다. 표3은 일부 지진 측정자료를 제공하는 인터넷 사이트를 나타내며, 이로부터 발생된 지진의 정보에 대한 상세한 분석을 수행할 수 있다.

3. 핵연료 집합체 지진해석과 결론

지진 발생에 의해, 가동중 원자력 발전소 노심에

위치하는 핵연료 집합체의 건전성을 어떻게 평가할 수 있을까? 이것은 핵연료의 설계 인허가를 위하여 사고 시 핵연료 건전성을 입증해야할 필요성에 따라, 해석적인 방법으로 평가할 수 있는 방법론이 핵연료 공급사별로 정립되어져 있으나 표준화되어 있지는 않다⁽⁴⁾. 통상의 방법은 기준이 되는 지진의 스펙트럼(설계기준 스펙트럼)이 존재하고 이로부터, 원자로 전체의 지진 응답해석에 필요한 지반 변위이력을 계산하게 된다. 계산된 원자로의 지진 응답해석 결과로부터, 다시 원자로 내부에서 핵연료 집합체와 인접하는 하부 지지판과 상부 고정판, 그리고 측면 노심 배럴의 동적응답을 계산하게 되는데, 이것을 다시 질점 질량으로 단순화된 원자로 및 핵연료 집합체 모델에 입력하고 수치해석으로 풀어 최종적으로 핵연료 집합체의 동적 응답을 계산하는 방식이다. 계산된 핵연료 집합체의 지진 응답이력으로 부터 핵연료 집합체가 인접한 지지격자와 충돌했을 경우, 충격력이 지지격자의 좌굴강도를 넘는지를 여부를 평가하거나, 집합체의 굽힘 변형에 따른 과도응력이 정해진 설계 기준치를 넘는지의 여부 등을 평가하여 핵연료 집합체의 건전성을 최종 평가하게 된다. 이때, 해석모델의 신뢰성과 타당성이 먼저 입증되어야 하며, 기계적 물성과 같은 입력 자료는 엄밀한 실험을 통하여 획득되고, 지진하중과 같은 입력 자료는 충분한 분석과 검토를 통하여 이용되어야 하겠다.

후 기

본 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(사업명, No.2013M2A8A5013146)

참고문헌

- (1) FEMA document (Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures (Part 1, Provisions, and Part 2, Commentary)
- (2) Bolt, B. 1999. Earthquakes, 4th Ed. New York, New York: W. H. Freeman and Company.
- (3) Reiter, L. 1990. Earthquake Hazard Analysis. New York, New York: Columbia University Press.
- (4) D.-K. Ha et al, LWR fuel assembly seismic analysis procedure and evaluation, 2011 KSNVE spring meeting(2011).