

<연구논문>

탄소성 변형률 기반 내진성능 평가 절차서 개발 방안

황종근*, 정일석†, 김법식*, 안상원*, 방혜진*, 이민희*, 정현섭*

A Plan to Develop Seismic Capacity Verification Procedures Based on the Elastic-Plastic Strain Features

Jong Keun Hwang*, Ill Seok Jeong†, Beom Shig Kim*, Sang Won Ahn*, Hye Jin Bang*,
Min Hee Lee* and Hyeon Seob Jeong*

(Received 27 September 2018, Revised 7 November 2018, Accepted 7 November 2018)

ABSTRACT

A development plan for seismic capacity verification procedures of nuclear components based on the elastic-plastic strain (EPS) features is explained in this paper. The EPS methodology is more realistic to assess seismic responses of components to extreme seismic events beyond the safe shutdown earthquake (SSE) than current practices with the criteria of stress limits. The EPS based approach to analyze the seismic capacity of components can reduce over-conservatism in the current stress-based criteria and can incorporate the seismic responses of components deformed in plastic behavior by the motion of extreme earthquake.

Key Words : Amplification Factor(증폭계수), Elastic-Plastic Strain(탄소성 변형률), Extreme Earthquake(대형 지진), Seismic Capacity Verification(지진성능평가), Seismic Margin(지진 여유도)

1. 서 론

원자력발전소 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기는 지진과 같은 자연현상에서 그 안전기능이 유지되도록 설계되어야 한다.⁽¹⁾ 아직 지진에 의해 직접적인 원전 사고사례는 없지만 2011년 3월 동일본 지진해일과 후쿠시마 다이이치 원전 사고, 그리고 2016년 경주 지진의 여파로 국내에서는 원전 기기의 지진 안전성에 대한 우려가 있다.⁽²⁾

국내 원전은 0.3g 이하의 안전정지지진(safe shutdown earthquake, SSE) 요건으로 설계, 제작, 건설되어 가동 중에 있다. 국가 에너지기본계획의 ‘원전 안전성 최우선’ 정책⁽³⁾에 따라 원전 기기의 지진성능(seismic

capacity)을 0.6g 이상 상향할 수 있는 기술개발을 위해 “지진 취약설비의 최적 내진성능 상향 기술개발” 과제를 수행하고 있다. 본 연구는 동 과제의 한 분야로서 지반 지진하중이 기존보다 두 배 이상 상향되는 기기의 지진성능을 평가하기 위한 새로운 해석 및 시험 절차서를 개발하는 것이다.

기존에 사용하고 있는 탄성 응력 기반 내진설계와 성능검증 방법에 과다하게 적용되고 있는 지진 안전 여유도의 보수성을 검토하였다. SSE 이상의 대형 지진 외력을 받아 소성거동을 보이는 기기의 건전성을 평가하기 위해서는 비탄성 거동을 고려한 탄소성 변형률 (elastic-plastic strain, EPS) 기반 해석방법을 적용하여 지진성능 평가의 안전 여유도를 최적화할 필요가 있다.

본 논문에서는 SSE 이상 대형 지진에 대한 원전 기기의 내진성능을 해석과 시험으로 평가하는 절차서를 개발하기 위한 연구 추진방안을 제시하였다.

† 책임저자, 회원, (주)스마트이엔씨

E-mail : smartekenc@hanmail.net

TEL : (042)936-1689 FAX : (042)934-1689

* (주)스마트이엔씨

2. 현행 내진검증 방법

원전 기기의 내진설계의 적절성을 확인하기 위한 내진검증(seismic qualification) 요건은 KEPIC END 2000⁽⁴⁾에 제시되어 있고, 내환경(environmental)검증과 함께 기기(equipment)검증⁽⁵⁾의 일부 요건이다. 내진검증은 해석, 시험, 해석과 시험의 조합 및 경험 등의 방법을 사용할 수 있다. 해석적 내진검증을 위한 기기의 응력, 강도, 변형률 및 변위의 계산은 일반적으로 KEPIC MNB⁽⁶⁾ 요건을 적용하여 기기의 구조 건전성을 평가한다.

현행 KEPIC MNB의 기기 구조 건전성 평가 요건은 기기의 안전성을 보수적으로 평가하기 위해 기기 재료의 탄성강도 한계치인 항복응력을 허용기준으로 하는 탄성 응력 기반 해석 방법을 적용하고 있다. 이 방법은 기기의 계속 사용을 보장하기 위한 보수적인 접근이지만, SSE 설계기준지진 규모 이상의 지진하중이 부과되는 경우에는 기기에 소성 피로 현상이 발생될 수 있으므로 현실적이지 않다.

본 연구의 관심 대상인 SSE 이상 대형 지진인 경우에는 기기 및 구조물에 소성변형이 발생할 가능성이 크다. 재료에 소성변형이 발생하면 소성변형에 의한 에너지 소멸량(dissipation)이 증가하므로 외부하중에 의한 기기 응답이 감소한다.⁽⁷⁾

소성변형이 발생하는 기기의 내진성능 평가에 탄성 기반 건전성 해석 방법을 적용하면 응력해석 결과가 허용기준을 만족하지 못할 수 있다. 그러나 동일 기기에 EPS 기반 해석 방법과 요건을 적용하는 경우에는 변형률 기준을 만족함을 확인하였다.⁽⁸⁾

그러므로 SSE 초과 대형 지진 입력에 대한 기기의 지진성능을 해석적으로 평가하기 위해서는 EPS 기반 방법을 적용하는 것이 기술적으로 타당하고 현실적이라 할 수 있다.

3. 지진설계의 안전 여유도⁽⁷⁾

원전 구조물, 계통 및 기기의 현행 탄성기반 내진설계 해석, 시험 과정에는 다음과 같은 보수성이 누적되어 있어서 안전 여유도를 증가시킨다.

- 최대지반운동가속도(peak ground motion acceleration, PGMA) 및 층응답스펙트럼(floor response spectrum, FRS)의 보수성

- 보수적인 지진요구(seismic demand, SD) 산정
- 구조물 및 기기 재료 저항력의 보수성
- 진동대 시험의 보수성

PGMA 및 FRS에 내재된 보수성은 스펙트럼 생성 시 평활화(smoothing) 및 광역화(broadening) 하는 과정에서 인위적으로 추가된 것이다.

SD를 산정하는 과정에서도 다음의 이유로 보수성이 증가한다.

- SD 계산 세부 모델 및 과정별로 적용된 보수성의 승적(乘積)
- 입력 스펙트럼의 최대 한계치 사용 및 보수적인 하중 조합
- 세부 기기의 상호 작용 및 감쇠효과 무시
- 작은 변위 허용으로 공명을 회피하는 앵커 특성 무시
- 소성변형 및 마찰 등에 의한 에너지 소산 무시 또는 단순화

콘크리트 강도와 소성변형의 하중 저항성이 시간경과에 따라 증가함에도 불구하고 지진하중에 대한 기기 재료의 저항력을 보수적으로 결정하기 위해 이 현상을 무시하고 허용응력 이하로 사용한도를 설정하고 있다.

진동대 시험 시에도 다음과 같은 이유로 보수성이 증가한다:

- 10% 여유를 추가한 시험응답스펙트럼(test response spectrum, TRS) 결정
- 실제 기기 파손은 TRS를 초과하는 지진요구에서 발생
- 요구응답스펙트럼(required response spectrum, RRS)의 국부 최대값을 FRS에 반영
- 지진요구 이상의 RRS, TRS 산정
- 시험 시간 확대 적용

이상에서 살펴본 바와 같이 현행 탄성 기반 지진설계에는 원전의 안전을 우선적으로 고려하기 위하여 설계 여유도를 과다하게 보수적으로 적용하고 있다. SSE 이상 대형 지진이 발생하는 경우에는 기기의 지진응답 거동이 비탄성 소성 거동의 특성을 보인다.⁽⁹⁾ 그러므로 대형 지진에 대한 기기의 성능을 평가하기 위해서는 소성 변형 거동 특성이 반영된 변형률 기반 지진설계 방식을 도입하는 것이 물리적으로 합당하다.⁽¹⁰⁾

현행 지진설계의 과도한 보수성을 실험적으로 확인하기 위해서는 SSE 이상의 최대지반가속도에 해당하는 가진력을 단계적으로 증가시키는 파괴한도시험(fragility test)을 실시할 수 있다. 일례로서 국내외에서 실시된 원전 배관계통의 파괴한도시험 결과를 검토해보면 최소 5배에서 최대 100배까지의 안전 여유도가 있음을 확인할 수 있다.⁽²⁾

4. 탄소성 변형률 기반 지진성능 해석

김중성 등⁽¹¹⁾은 Tim Adams가 제안하였고 ASME BPVC Section III 및 VIII에서 사용중인 탄소성 변형률 기반 기기 건전성 및 피로평가 방법을 국내 특정 원자력 배관의 지진해석에 적용하고, 기존의 탄성응력 기반 해석 결과와 비교하였다.

해석 결과, 기존의 탄성 응력 기반 해석 방법 및 기준인 ASME BPVC Section III, NB-3600⁽¹²⁾ 절차에 따라서 설계기준초과지진으로 0.5g의 지반운동가속도를 입력하여 해석을 수행한 결과, 관성모멘트와 지진앵커운동 모멘트는 탄성 응력 기반 설계기준을 초과하였다.

그러나 EPS 기반의 해석방법을 적용하기 위해 등가 소성변형률을 분석하고, ASME BPVC Section III, Appendix FF⁽¹³⁾ 방법으로 소성붕괴 및 국부파손의 가능성을, 그리고 Section VIII, Part 5⁽¹⁴⁾의 방법으로 국부 파손의 가능성을 평가하였더니 파손되지 않고 소성 변형률 기반 기준을 만족하였다.

위 연구사례에서 보는 바와 같이 지반가속도 0.5g의 대규모 설계기준초과지진 조건에서 소성 변형률 기반으로 기기 건전성을 평가해 본 결과, 기기 파손이 발생하지 않았고 소성파손의 안전 여유도 역시 90% 이상이었다.

본 연구과제에서 기술개발 목표인 최대지반가속도 0.6g 이상 대형 지진의 경우에도 실제 기기의 응답 특성인 탄소성 변형률 기반 해석기법을 적용한다면 원전 주기기의 기기 건전성을 기술적으로 입증할 수 있을 것으로 예상된다.

5. 내진성능 상향 기기의 성능평가 방안

5.1 해석에 의한 평가 방안

최대지반가속도의 크기가 SSE 이상인 대형 지진에 대한 기기의 내진성능을 해석적으로 평가하기 위해서

는 탄소성 변형률 기반의 최적설계 방법을 사용하는 것이 바람직하다.

그러나 아직까지 이 해석 방법을 국내외적으로 원전 기기에 적용하기 위해 개발 완료된 기술기준은 없다. 일본 JSME⁽¹⁵⁾와 미국 ASME⁽¹⁶⁾에서는 원자력 배관계통의 지진해석을 비탄성 응답해석으로 수행할 수 있는 적용사례(code case)를 개발 중에 있다.

국내에서도 대형 지진에 대한 원전 기기의 내진성능 상향 및 확인 요구가 있으므로 우선 한국 지진환경에 적합한 기술기준 개발이 필요하다. 대형 지진에 대한 원전 기기의 내진성능을 평가하기 위해서는 국내 내진 기기검증 기술요건인 KEPIC END 2000, 7.0 절의 일부를 다음과 같은 내용을 수정, 보완, 추가할 필요가 있을 것으로 보인다.

- 7.2.3.2 시간이력
SSE 이상 대형지진에 대한 기기의 동적 응답을 해석하는 경우에는 시간이력해석으로 수행한다.
- 7.3 비선형 기기 응답
소성변형 에너지 소산(energy dissipation)과 같은 재료 원인 등에 기인한다.
- 7.6 SSE 이상 대형지진 해석
탄소성 변형률 기반으로 기기 내진성능을 해석하는 경우에 대한 기술적 고려 사항 및 요건 추가

본 논문에서 제안하는 기술 요건들을 반영하여 현행 기술기준을 개정하기 위해서는 기술적 타당성을 입증할 수 있는 연구개발 및 시험 결과를 바탕으로 적용 사례를 제정하여야 한다. 기술기준 개정은 관련 기술 전문가의 기술검토 및 의견 수렴 과정을 거쳐 객관성을 보장해야 하므로 KEPIC 분과위원회, 공청회, 그리고 전문위원회 등의 심의, 의결 과정을 거쳐야 한다.

5.2 시험에 의한 평가 방안

내진성능 상향을 위해 개발한 탄소성 변형률 기반 내진성능 평가방법의 타당성을 확인하거나, 해석적으로 내진성능을 평가하기 어려운 캐비닛, 전자 부품과 같이 구조가 복잡한 비강성체(非剛性體) 기기는 시험에 의해 내진성능을 평가해야 한다.

강성체 기기의 대형 지진 성능을 평가하기 위한 탄소성 변형률 기반 해석의 타당성을 입증하기 위한 지진시험 요건은 기존의 KEPIC END 2000 파괴한도시험 요건을 수정 보완하여 활용할 수 있다.

비강성체 기기인 캐비닛의 대형 지진에 대한 성능

을 진동대 시험으로 평가하기 위해서는 기존에 보수적으로 사용하고 있는 일괄(generic) 증폭계수(amplification factor, AF)를 시험 대상 캐비닛 별로 최적화하여 캐비닛내부응답스펙트럼(in-cabinet response spectrum, ICRS)의 크기를 줄이는 방안을 고려해야 한다.

5.2.1 파괴한도 시험 절차 보완 방안

현재 파괴한도 지진 요건은 KEPIC END 2000 8.3, 상세 내용은 부록 C에 수록되어 있다. SSE 이상 대형 지진 입력에 의한 지진 진동대 시험을 수행하기 위해서는 다음 내용들이 수정, 보완 또는 추가로 기술되어야 할 것이다

• 8.3 파괴한도 시험

파괴한도 시험의 과정과 방법은 SSE 이상 지진 환경에서의 기기 지진성능을 확인하기 위한 시험의 수단으로 사용될 수 있다.

• 부록 C.1 일반사항

파괴한도 시험 데이터의 용도는 ... SSE 이상 대규모 지진 환경에서의 기기 내진성능 평가 ... 에까지 다양하다.

• 부록 C.4 다른 고려사항

SSE 이상 대규모 가진 성능시험을 계획하는 경우에는 시험 중 기기 파손이 발생할 수 있으므로 파손 가진 규모를 해석적으로 예측하여 시험계획에 반영한다. 현실적으로 파손 예측을 최적화하기 위해서는 기기 재료의 비탄성 특성을 고려하고 탄소성 변형을 기반으로 기기 구조물의 변형을 해석한다.

5.2.2 캐비닛 증폭계수 최적화 방안

원전에는 전기기구나 계측장비를 장착하고 있는 캐비닛 또는 패널이 많이 설치되어 있다. 이들은 발전소의 안전운전과 정지 기능을 수행하는 필요한 설비로서 지진 발생 시 구조적인 건전성을 유지해야 함은 물론 각각에 부여된 고유 기능을 오작동 없이 수행해야 한다.

구조가 복잡하고 비선형성을 나타내는 캐비닛이나 캐비닛 내부에 장착되는 장치(device)의 내진성능은 통상적으로 진동대 시험을 통하여 결정된다. 캐비닛 내부 계전 장치의 지진요구는 장착 부위에서의 FRS로 구해지는데, 이때 캐비닛의 증폭계수를 알아야 한다. 계전기의 응답은 캐비닛 내부에 위치한 높이가 높아질수록 증폭이 커진다. 그러므로 계전기에 가해지는 ICRS를 낮추기 위해서는 캐비닛의 증폭계수를 낮추

는 방안을 도출하여야 한다.

캐비닛의 증폭계수에 대한 연구는 1990년대부터 시작되어 왔다. EPRI⁽¹⁷⁾에서는 포괄 증폭계수로 4.5를 사용하도록 권장했으나 매우 보수적인 값이다. 따라서 광대역 보정계수 및 다중 축 보정계수를 고려하여 현실적이고 덜 보수적인 증폭계수⁽¹⁸⁾로 캐비닛의 고유진동수가 9.0~13Hz, 13Hz 이상 및 20Hz 이상인 경우에 각각 6.0, 4.0 및 2.5를 권장했다. 일본의 JNES⁽¹⁹⁾는 캐비닛에 대하여 미국의 NRC 및 BNL와 공동연구를 수행하였는데, 고유진동수가 20Hz를 초과하는 캐비닛의 경우에는 증폭계수로 1.0~2.5를 제시했다. 이상과 같이 연구기관별로 제시한 증폭계수가 상이한 값을 보인다. 따라서 SSE 이상 대형 지진에서도 비보수적이고 일관되게 사용 가능한 최적화된 증폭계수가 필요하다.

특정 캐비닛의 증폭계수를 최적화하기 위해서는 먼저 복잡한 구조의 특정 캐비닛을 상세하게 3차원으로 모델링하여 동적해석을 수행하고, 그 결과의 신뢰성이 실험으로 확인되어야 한다. 신뢰성이 확인된 캐비닛 모델을 이용하여 설계 변수를 변화해 가면서 최적의 증폭계수를 도출하는 민감도 해석을 수행한다. 캐비닛의 증폭계수는 캐비닛의 강성도, 계전기의 내부 배열 상태 및 캐비닛 바닥면의 장착(anchorage) 방식 등과 같은 설계변수의 영향을 받을 것으로 예상된다.

6. 결 언

SSE 이상 대형 지진에서 원전 기기의 지진 안전성을 확인하기 위해 실제 기기의 응답특성인 탄소성 변형률(EPs)을 기반으로 지진성능을 평가하는 방안을 검토하고 다음과 같은 연구개발 방안을 제시하였다.

현행의 지진성능평가 해석 및 시험 방법에 내재되어 있는 보수성과 안전 여유도를 검토하였다. 대형 지진에서 원전 기기의 지진성능을 평가하기 위해서는 기존의 탄성기반 설계 여유도를 최적화할 필요가 있다.

설계 여유도를 최적화하기 위해서는 실제 기기의 소성변형 응답 특성을 반영하는 EPs 기반 해석 방법을 적용해야 한다. 실제 해석 사례를 검토하고 EPs 기반 지진성능 평가의 가능성을 확인하였다.

최대지반가속도 크기 0.6g 이상 대형 지진에 대한 기기의 지진성능을 평가하기 위해 EPs 기반으로 해석 및 시험하는 절차서를 개발하기 위한 후속 연구방안을 제시하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20171510102050)

참고문헌

- (1) NSSC No. 17, 2016, "Regulations on Technical Standards for Nuclear Reactor Facilities," Nuclear Safety and Security Commission, Seoul.
- (2) Hwang, J. K., Jeong, I. S., Kim, B. S. and So, J. Y., 2018, "Lessons Learned from Seismic Fragility Tests of Nuclear Piping Systems," *Trans. of KSME Chungcheong Branch Spring Conference*, Daejeon, pp. 69-72.
- (3) MOTIE, 2014, The Second Plan for National Energy Supply.
- (4) KEPIC END 2000, 2015, "Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations," Korea Electric Association, Seoul.
- (5) KEPIC END 1100, 2015, "Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations," Korea Electric Association, Seoul.
- (6) KEPIC MNB, 2015, "Nuclear Mechanical, Class 1 Components," Korea Electric Association, Seoul.
- (7) Yang, H., Sinha, S. K., Feng, Y., Mc-Callen, D. B. and Jeremic, B., 2017, "Energy Dissipation Analysis of Elastic-Plastic Materials," *Comput. Method Appl. M*, Vol. 331, pp. 309-326.
- (8) An Utility, 2017, *Development of Technology for Structural Integrity Evaluation of Major Components*, A Private propriety.
- (9) EPZ, 2011, "Complementary Safety Margin Assessment, Final Report," pp.2.26-2.30
- (10) Lee, D. Y., Park, H. B., Kim, J. W. and Kim, Y. J., 2016, "Strain-Based Structural Integrity Evaluation Methods for Nuclear Power Plant Piping under Beyond Design Basis Earthquake," *Trans. of the KPVP*, Vol. 12, No. 2, pp. 56-61.
- (11) Kim, J. S., Kim, J. W., Kim Y. J. and Kwon, H. D., 2017, "Development of Effective Elastic-Plastic Dynamic Analysis and Strain Based Assessment for Time History Seismic Analysis of Major Components of Nuclear Power Plants," The 33th MAGIC CoP Meeting, Presentation Material, KINS, Daejeon.
- (12) ASME BPVC Sec. III Div.1 Sub. NB, 2017, "Rules for Construction of Nuclear Facility Components," America Society of Mechanical Engineers, NY.
- (13) ASME BPVC Sec. III App.FF, 2017, "Strain-Based Acceptance Criteria for Energy-Limited Events," America Society of Mechanical Engineers, NY.
- (14) ASME BPVC Sec. VIII Part 5, 2015, "Design by Analysis Requirements," America Society of Mechanical Engineers, NY.
- (15) Morishita, M., Akihito O., Tomoyoshi W., Izumi N., Tadahiro S. and Masaki S., 2017, "Seismic Qualification of Piping Systems by Detailed Inelastic Response Analysis, Part 1- A Code Case for Piping Seismic Evaluation Based on Detailed Inelastic Response Analysis," *Proc. of ASME 2017 PVP Conference*, Waikoloa, HI, July 16-20, PVP2017-65166.
- (16) Adams, T. M., 2015, "Basis of the Upcoming Changes to Piping Seismic Design Rules in the ASME BPVC Section III, Division 1, Article NB-3200," *Proc. of ASME 2017 PVP Conference*, Boston, MA, July 19-23, PVP2015-45697.
- (17) EPRI, 1990, "Guidelines for development of in-cabinet amplified response spectra for electrical benchboards and panels," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, *EPRI-NP-7146-M*.
- (18) EPRI, 1995, "Guidelines for Development of In-Cabinet Seismic Demand for Devices Mounted in Electrical Cabinets," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, *NP-7146-SL RI*.
- (19) USNRC, 2011, "Evaluation of JNES Equipment Fragility Tests for Use in SPRA for US NPPs," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., *NUREG/CR-7040*.