

설계기준초과지진 하의 원전 배관 구조건전성 평가를 위한 변형률 기반 방법

이대영[†]·박흥배^{*}·김진원^{**}·류호완^{***}·김윤재^{***}

Strain-Based Structural Integrity Evaluation Methods for Nuclear Power Plant Piping under Beyond Design Basis Earthquake

Dae Young Lee[†], Heung Bae Park^{*}, Jin Weon Kim^{**}, Ho Wan Ryu^{***} and Yun-Jae Kim^{***}

(Received 1 December 2016, Revised 20 December 2016, Accepted 22 December 2016)

ABSTRACT

Following the 2011 Fukushima Nuclear Power Plant accident, the IAEA has issued a revised version of the Nuclear Safety Standard for beyond design basis earthquake to consider the core meltdown accident. In Korea, relevant laws and regulations were also revised to consider beyond design basis earthquake to nuclear components. In this paper, CAV, an seismic damage factor that determines the restart of nuclear power plant after operating breakdown earthquake, is proposed for extension to the beyond design basis earthquake. For pipings not satisfying the beyond design basis earthquake condition, several evaluation methods are suggested, such as strain-based evaluation methods, simple nonlinear analysis method and cumulative damage evaluation method.

Key Words : Beyond Design Basis Earthquake(설계기준초과지진), Cumulative Absolute Velocity(누적절대속도), Simplified Nonlinear Analysis(간략비선형해석), Cumulative Damage Evaluation Method(누적손상평가법), Strain Based Analysis(변형률기반해석)

1. 서 론

국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)는 후쿠시마 사고 이후 설계기준초과지진에 대한 원전안전기준⁽¹⁾을 발행하였고, 국내에서도 설계기준초과지진과 관련된 법령⁽²⁾이 개정된 바 있다. 이에 따라 국내외 원전은 설계기준초과지진에서도 발전소의 안전정지와 소의 방사능 누출이 제어되어야 하는 안전성 강화 개념이 도입되었다. 본 논문

에서는 설계기준지진(운전정지지진)에만 제한적으로 적용되고 있는 발전소 차원의 손상을 나타내는 누적절대속도 개념을 설계기준초과지진으로 확대적용을 제안하였다. 그리고 누적절대속도 크기를 근거로 개별기기의 상세해석에 적용할 수 있는 배관에 대한 변형률 기반 상세 평가법들과 파괴변형률을 이용해 본 연구에서 확장시킨 누적손상 평가기법에 대해 소개하고자 한다.

2. 지진 후 원전 기기 건전성 평가

2.1 지진손상인자의 누적절대속도

미국 전력연구원(Electric Power Research Institute, EPRI)은 지진에 의한 발전소 기기의 손상을 정량화할 수 있는 손상인자(Damage Parameter)로서 누적절

[†] 책임저자, 회원, 한국전력기술 미래전력기술연구소

phenix@kepco-enc.com

TEL: (054)421-6452 FAX: (054)421-6438

^{*} 한국전력기술 미래전력기술연구소

^{**} 조선대학교 원자력공학과

^{***} 고려대학교 기계공학부

대속도(Cumulative Absolute Velocity, CAV) 개념³⁾을 도입하였다. CAV는 지진에 의해 원전에 가해진 에너지 정도를 나타낸다. 이후 계속된 연구를 통하여 CAV는 지반운동의 최대값을 이용한 평가방법보다 신속하게 지진 피해정도를 평가할 수 있는 손상인자로 인정받고 있다. CAV를 이용한 평가는 정량화된 지진손상정보의 파악으로 발전소 기기에 대한 신속한 후속조치가 가능하다. 또한 국내와 같이 고주파 지진 특성을 갖는 곳에 설치된 지진가속도계는 측정에 어려움이 있기 때문에 최대지반가속도보다 CAV를 이용한 평가방법이 더 효과적인 것으로 알려져 있다.

미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Committee, NRC)는 Reg. Guide 1.166⁴⁾에서 발전소 운전정지지진 결정을 위하여 응답스펙트럼과 CAV를 평가하도록 규정하고 있다. 즉, X, Y, Z 세 방향 계측기에서 측정된 지반가속도값을 이용하여 응답스펙트럼과 CAV를 평가하도록 제시하고 있다.

CAV는 세 방향 계측기로부터 측정된 절대가속도-시간이력을 1초 단위로 구분하고 이 중 절대가속도가 0.025g를 넘는 값만 시간 적분하여 계산한다. 이렇게 계산된 세 방향의 CAV 중 한 방향이라도 0.16g-sec를 넘는 경우 이에 대한 검토를 수행하도록 보수적으로 Reg. Guide에서 규정하고 있다. 따라서 발전소에 영향을 미치는 지진은 Fig. 1과 같이 CAV가 0.16g-sec미만인 경우 비손상지진거동(Non-damaging Earthquake Motion)으로 규정할 수 있고, 0.16g-sec 이상은 손상지진거동(Damaging Earthquake Motion)으로 구분하여 관리할 수 있다. 미국 전력연구원(EPRI)는 CAV 결정을 위한 세부적인 방법론을 TR-100082⁵⁾로 제시하고 있다.

응답스펙트럼 평가에서는 발생 지진의 수평과 수직방향 응답스펙트럼이 원전 설계에 사용된 스펙트럼 및 내진범주 1 등급 건물에 사용된 응답 스펙트럼으로 포괄되어야 한다. 하지만 응답스펙트럼 평가는 발전소의 손상을 나타내는 인자로는 부족하여 NRC에서는 CAV에 의한 방법을 같이 제시하고 있다.

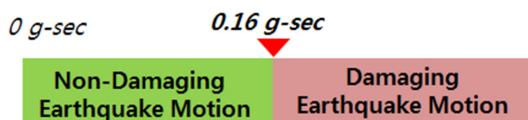


Fig. 1 Damaging Earthquake Motion

따라서 국내 원전의 경우 CAV가 원전 기기 등의 지진 후 손상여부를 판별하는 기준으로 적용될 경우 후속조치 결정 등에서 효과적인 것으로 판단된다. 발전소 계통, 구조물 및 기기에 지진으로 인해 가해진 에너지로 정량화된 CAV는 다음 절에 제시된 변형률 기반의 평가 방법들과 함께 배관기기의 건전성을 평가하는 데 적용할 수 있다. 현재까지는 운전정지기준에 대한 절대적 CAV 기준만 제시되어 있고 그 이상의 지진에 대한 정량적 CAV기준을 수립하는 것은 별도의 연구가 필요하다. 그러나 CAV가 갖는 에너지 개념에 기초하여 설계기준초과지진이 발생한 해외 원전의 CAV와 해당 원전의 피해 정도를 연계화시키는 상대적인 CAV 기준을 수립할 경우 국내 원전에서 설계기준초과지진이 발생하더라도 상응하는 피해정도를 예측하게 되어 신속한 후속조치를 수립하는데 활용할 수 있다.

2.2 ASME Section VIII 변형률 해석방법

재료의 항복강도를 넘어서는 고강도 지진을 진동대 위에서 모사한 여러 배관 시험들은 응력 기반 해석으로는 배관 파손을 모사하기 어렵기 때문에 변형률 기반 해석을 수행해야만 지진에 의한 손상을 실제와 가깝게 평가할 수 있다. ASME Section VIII, Division 2에서는 대안적인 방법으로 배관 등에 적용할 수 있는 변형률 기반 손상해석 방법을 제시하고 있다. 이에 따른 배관계의 지진에 의한 변형률 해석은 식(1)과 같은 작용하중 조합을 사용하고 지진하중의 경우 실제 발생된 하중의 1.7배를 보수적으로 적용한다.

$$Load = 2.1 \times (P + DW) + 1.7E \quad (1)$$

여기서, P 는 내외부 설계압력, DW 는 자중, E 는 지진하중이다. 보수적으로 지진하중을 고려하여 최종 배관 재료의 국부 변형률은 식(2)로 나타내는 한계변형률 ϵ_L 을 넘지 않아야 한다.

$$\epsilon_L = \epsilon_{LU} \times \exp \left[- \left(\frac{\alpha_{sl}}{1+m_2} \right) \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_e} - \frac{1}{3} \right) \right] \quad (2)$$

여기서, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 주응력, σ_e 는 등가 Von Mises 응력이며, ϵ_{LU} 는 재료의 단축 한계변형률이고, α_{sl} 와

m_2 은 재료상수이다. 최종적으로 한계변형률 ϵ_L 은 식(3)과 같이 등가소성변형률 ϵ_{peq} 와 제작 중에 발생된 변형률 ϵ_{cf} 를 합한 값보다 작아야 한다.

$$\epsilon_{peq} + \epsilon_{cf} \leq \epsilon_L \quad (3)$$

ASME Section VIII의 변형률 방법을 적용하기 위해서는 비선형 소성해석을 수행해야 하고, 작용하는 지진하중에 하중계수 1.7배를 곱하기 때문에 실제 하중에서보다 소성변형률이 상대적으로 크게 산정된다. 일부 제한조건을 만족할 경우 균열 없는 배관의 건전성 평가에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

2.3 에너지 제한적 사고의 변형률 해석방법

폐기물 저장용기에 대한 에너지 제한적 사고의 경우 변형률을 이용한 해석 기준이 수립되어 있다. 이 방법은 미국에서 사용후핵연료 저장용 고준위 폐기물 용기 설계를 위해 개발된 방법이며 ASME Section III Appendix FF⁶⁾로 발행되었다. 현재 이를 더욱 확장하여 면진 및 비면진구조물 관통 배관과 같이 구조물 간의 과도한 변위가 발생하는 배관 해석에도 적용하기 위한 연구가 진행되고 있는 것으로 알려져 있다.

ASME Appendix FF는 폐기물 저장용기의 경우 ASME 코드의 압력용기 부분을 적용하여 해석할 경우 용기 설계가 지나치게 보수적인 문제를 해결하기 위해 개발되었다. ASME 코드에서 고려하는 압력용기의 지지하중(온도, 압력 등)과 동하중(지진 등)은 에너지 제한적 사고의 성격을 갖는 저장용기의 충격하중 특성과 서로 다르기 때문이다. 초기 에너지 제한적 사고의 변형률 해석은 저장용기에 초점이 맞추어져 있어 저장용기 재질과 동일한 스테인리스강 SA304/304L과 SA316/316L 재질에 국한되어 고찰되었다. 에너지 제한적 사고의 진소성변형률(True Plastic Strain) ϵ_{eq}^p 는 식(4)와 같이 정의한다.

$$\epsilon_{eq}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt \quad (4)$$

용기 두께에 걸쳐 발생하는 등가소성변형률의 평균값 $(\epsilon_{eq}^p)_{avg}$ 은 불연속부의 경우 식(5)의 기준보다 작아야 한다. 불연속부에서 기기 두께의 3배 이상 벗어난 부위의 경우에는 0.85대신 0.67의 안전계수를 고려한다.

$$(\epsilon_{eq}^p)_{avg} \leq (0.85 \times \epsilon_{uniform}) / TF \quad (5)$$

이러한 기준은 배관에 적용하기 위해 $\epsilon_{uniform}$ 대신 경화지수 n 을 적용하고 별도의 안전계수를 고려하는 연구가 진행 중이다. 삼축응력인자 TF (Triaxiality Factor, TF)는 식(6)과 같이 세 방향 주응력의 조합으로 나타낸다.

$$TF = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \quad (6)$$

설계기준초과지진으로 인해 과도한 변위가 발생된 균열없는 배관은 상기 기준이 Code Case로 승인될 경우 평가에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

2.4 간략 비선형해석기법

기존 탄성응력해석 기반의 평가법은 설계기준초과지진 조건의 배관 및 기기 평가 시 재료의 탄소성 거동을 반영하지 못하여 과도하게 높은 탄성응력을 예측한다. 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 간략 비선형해석기법을 노이버(Neuber) 법칙을 기반으로 정립하였다.

금속재료의 비선형 경화이론을 바탕으로 한 비선형 해석은 고지진하중에서 구조물의 변형거동을 보다 정확하게 예측할 수 있는 장점이 있지만 다소 복잡하고 많은 시간이 소요된다. 이에 비하여 노이버 법칙은 간단한 탄성해석 결과를 통해 탄소성의 응력 및 변형률을 예측할 수 있다. 노이버 법칙은 공칭응력 및 변형률과 국부응력 및 변형률과의 관계를 정리함으로써 비교적 계산이 쉬운 공칭응력과 변형률을 이용하여 국부적인 탄소성응력과 변형률을 예측하게 된다. 이때 노이버 수정계수 K_e 를 이용하여 탄성해석 결과로부터 탄소성의 변형률을 구한다. 노이버 수정계수는 식(7)과 같이 탄소성변형률에 대한 탄성변형률의 비로 나타낸다.

$$K_e = \frac{\epsilon_{elasto-plastic}}{\epsilon_{elastic}} \quad (7)$$

노이버 법칙은 간단하게 Fig. 2에서와 같이 탄성 모델로부터 얻은 A점 응력과 B점 변형률 값으로부터 노이버 수정계수를 이용하여 탄소성 모델의 등가 변형률 C를 구한다. 노이버 법칙을 지진하중에 적용하기

위해서는 재료의 반복응력-변형률 선도와 수치적인 계산이 요구되지만 해석 단계에서 탄소성해석이 아닌 탄성해석을 사용하기 때문에 다른 비선형 해석기법에 비해 비교적 간단하게 탄소성응력 및 변형률을 예측할 수 있어 현장 적용에 용이하다.

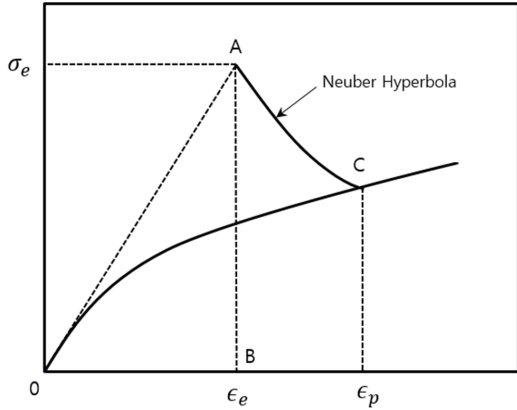


Fig. 2 Neuber Hyperbola

ASME Section III NB-3228의 단면소성계수 K_e 는 노이버 수정계수와 같은 것으로 탄성해석으로부터 도출한 변형률을 소성변형률로 변환할 수 있는 계수이다. 단면소성계수는 배관계에 적용할 경우 탄성해석의 총변형률에 대한 탄소성해석의 총변형률의 비가 되는데, 재료별로 결정되는 단면소성계수와 탄성해석의 변형률로부터 탄소성해석의 변형률을 얻을 수 있어 배관계의 넓은 부위에서 소성변형이 발생할 때 실제 변형률을 계산하는 데 효과적이다.

K_e 계수는 초기 상당한 보수성을 내포하고 있어 이를 저감하기 위한 연구가 진행되었으며, 프랑스와 일본에서도 같은 목적으로 연구를 진행한 바 있다.

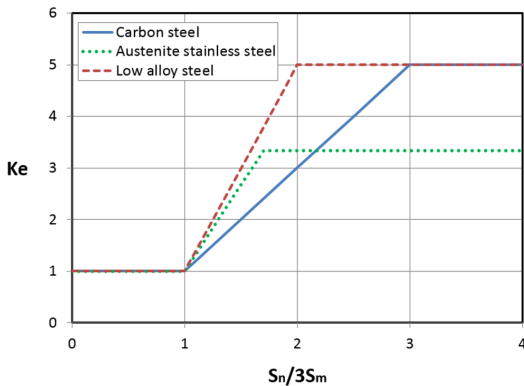


Fig. 3 K_e factor by materials

ASME는 K_e 계수에 대한 보수성 저감 연구를 바탕으로 2009년 Code Case N-779⁽⁷⁾를 발행한 바 있다. Code Case N-779의 K_e 계수는 ASME Section III와 같은 값을 갖지만 국부 및 굽힘 열응력에는 적용되지 않는다.

ASME Section III에 제시되어 있는 K_e 계수는 Fig.3과 같이 재료에 따라 달리 적용한다. 오스테나이트강의 경우 1~3.3의 값을 적용하며, 탄소강과 저합금강은 1~5의 값을 적용한다.

2.5 누적손상 평가기법

ASME Section XI에는 운전조건 D를 넘어서는 설계기준초과지진 등의 사건조건인 일명 운전조건 E에서 발전소 기기의 결함 안전성을 평가할 수 있는 방법이 실질적으로 없는 상태이다. 탄성응력을 기반으로 한 해석을 그대로 적용할 경우 1.0g의 지반가속도 조건에서 배관계에 가해지는 응력은 운전조건 D의 허용응력에 10배까지 확대되는 것으로 본 연구⁽⁸⁾에서 분석되었다. 이러한 탄성기반 접근 방법에 대한 한계에 따라 ASME에서는 소성해석 방법을 제시하였으나 이 또한 현장 적용 경험이 부족하여 실제 적용 사례는 매우 드문 것으로 알려져 있다. 이러한 탄성해석 기반 접근 방법의 한계성을 인식하여 ASME Section XI Working Group에서는 설계기준초과지진 조건에서 기기의 안전성을 평가하기 위한 논의가 진행되고 있다.

본 연구에서는 고강도 지진 조건에서 재료의 특성을 고려한 평가법을 개발하기 위해 원전 배관 재료의 동하중에 따른 손상을 평가할 수 있는 연구를 수행하였다. 이에 따라 정적하중 조건 이론을 기반으로 동적하중 조건에 적합한 이론식을 개발하였다. 이에 대해 간략히 살펴보면, 변형률 속도에 따른 인장시험 데이터로부터 식(8)의 인장물성 관계식의 변수 $\alpha, \beta, n, \gamma, \epsilon_{ot}$ 를 결정한다.

$$\sigma_{eq} = (\alpha + \beta(\epsilon_{eq}^{pl})^n) \left(1 + \gamma \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_{ot}} \right) \quad (8)$$

인장물성 관계식이 정의되면 Johnson/Cook이 제시한 변형률 시험 속도에 따른 파괴변형률과 삼축응력과의 관계를 바탕으로 식(9)의 파손에너지식을 정의한다. 식(9)는 변형률 속도에 따른 인장시험 결과를 통해 각각의 시험속도에서의 손상기준값으로 변형률 속도별 재료상수 $A, B, C, D, \epsilon_{of}$ 를 결정한다.

$$W_f = \left[A \exp\left(-B \times \frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) + C \right] \left[1 + D \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_{0f}} i\right) \right] \quad (9)$$

누적되는 소성변형에 의한 손상값을 계산하여 파손 손상값에 도달하면 연성파괴로 간주하여 평가한다. 이와 같은 방법으로 현장에 적용되는 탄소강 배관 SA508 Gr.1과 TP316 스테인리스강 배관 재질은 운전온도를 고려한 파손에너지식이 개발되었다. 개발된 누적손상 평가기법은 운전온도를 고려할 수 있으며, 운전환경의 변화에 따라 적용이 가능하여 현장 적용성도 확보하였다.

3. 결 론

원전에 영향을 미치는 지진거동의 유무를 판단할 수 있는 인자들과 고지진하중 조건에서 배관기에 적용할 수 있는 변형률 기반 해석방법들 및 누적손상 평가기법을 개발적으로 살펴보았다. 설계기준초과지진과 같이 고강도 지진이 발생한 경우 CAV는 현재까지 운전정지기준으로서만 사용되기 때문에 설계기준초과지진에 적용하기에는 제한적이다. 그러나 CAV는 발전소 배관을 포함한 기기가 지진으로부터 받는 에너지를 정량화하여 손상여부를 제시하는 개념이므로 해외 원전의 CAV와 배관의 피해 정도를 연계시킬 경우 설계기준초과지진에 대해서도 발전소 전체의 피해 정도를 간접적으로 파악하여 세부적으로 배관의 평가범위와 방법을 선정하는데 중요한 기준으로 활용이 가능할 것을 판단된다.

고강도 지진에 의해 배관계통이 탄성해석만으로 만족되지 않는 경우 평가범위를 선정하여 변형률 해석을 수행해야 한다. ASME Section VIII 변형률 해석과 개발되고 있는 에너지 제한적 사고의 변형률 해석은 설계기준초과지진과 같은 고강도 지진해석에 적용시 제한사항을 고려해서 적용할 수 있다. 변형률 해석 방법은 많은 시간이 소요되므로 배관계통과 라인에 적용하기 위해서는 선별적인 기준을 수립하는 것이 필요하다. 세부적으로 수립된 선별 기준에 따라 배관계통의 취약부위를 위주로 변형률 해석을 수행할 수 있다. 이때 간략 비선형해석 방법을 사용

할 경우 계산시간을 효과적으로 단축할 수 있다. 또한 가동중검사나 지진 발생 후 현장점검에서 결함이 발견된 기기의 경우 누적손상 평가기법을 통해 향후 균열의 진전에 따른 파손여부를 판단할 수 있는 보다 상세화된 결과를 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 2014년 에너지기술평가원 에너지기술 개발사업 과제(20141520100860)의 연구비 지원의 일환으로 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) IAEA, 2016, "IAEA safety standard for protecting peoples and the environment," Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements, No. SSR-2/1 Rev.1.
- (2) NSSC, 2016, Technical standards and rules for accident management related to reactor facilities.(in korean)
- (3) Lee, D. Y., Park, H. B., Kim, J. W. and Kim, Y. 2016, "Review of Evaluation Method for Nuclear Power Plant Pipings under Beyond Design Basis Earthquake Condition," *Trans. of KPVP*, Vol. 12, No.1, pp. 56-61
- (4) USNRC, 1997, "Pre-earthquake Planning and Immediate Nuclear Power Plant Operator Post-earthquake Actions," *Reg. Guide 1.166*,
- (5) EPRI, 1991, "Standardization of the Cumulative Absolute Velocity," *TR-100082*
- (6) ASME, 2015, "Strain-Based Acceptance Criteria for Energy-Limited Events," *ASME B&PV Sec. III, App. FF*.
- (7) ASME, 2015, "Alternative Rules for Simplified Elastic-Plastic Analysis Class 1," *ASME B&PV Sec. III, Div.1, CC N-779*.
- (8) KEPCO E&C, 2016, Annual Report-Development of Crack Assessment Methodology for Aged Main Components of Operating NPPs BDBE Condition and Validation by Simulated Experiment.