

2003 춘계학술발표회 논문집
원자력학회

신뢰도기반규제의 적용 현황 및 전망
Status and Prospect of Risk Informed Regulation and Application

유호중, 이의중, 조성제

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 149호

요 약

신뢰도기반규제(RIR) 및 적용은 원전의 규제 효율성제고와 경쟁력 향상이라는 원전 산업계의 당면과제에 대한 돌파구를 마련해 주었다고 할 수 있다. 본 논문은 미국의 신뢰도기반규제 및 적용관련 최근의 현황을 기술하였다. 그리고 PSA 품질관련 현황도 기술하였다. 신뢰도기반규제는 현재 운영중인 발전소에 적용을 목표로 하고 있으나 앞으로 신규 원전설계에도 적용을 확장시킬 때 신규원전의 경쟁력을 제고할 수 있다. 이에 본 논문은 신규원전설계에 유용한 RIR Option 2 및 Option 3 기술의 미국현황과 적용 방안을 생각하여 보았다.

Abstract

Risk-informed regulations and applications in nuclear power plants have provided one of ways to get efficient regulation and enhancement of nuclear power's competitiveness over other electric power source. This paper describes current status of risk-informed regulation in US, especially for the RIR option 2 and option 3 area, which are more beneficial for the application of new plant engineering.

1. 세계 원전사업자의 주요 관심사항

2003년 2월 개최된 웨스팅하우스사오너그룹(WOG) 총회에서 미국, 영국, 프랑스, 대만, 한국 등 세계 각국의 PWR 원전사업자에게 기술 및 인허가 분야의 가장 중요한 현안을 질의한 결과 다음과 같은 응답을 보였다. 먼저 Outage Reduction, On-line Maintenance, Predictive Maintenance 등의 발전소 정비 원가절감 분야와 Corrosion and Alloy 600 Program, License Renewal 등의 재질 및 열화분야, 기타 High

burnup, Lower mode PSA, Obsolete equipment, Power uprate, Prevention of human error 등이 주요 관심사항으로 응답되었다[1]. 이러한 세계 원전사업자들의 관심사항 중 Outage Reduction, On-line Maintenance, Lower mode PSA, Power Uprate 등 상당 분야가 PSA 및 신뢰도기반규제(RIR) 분야와 직·간접적으로 관련이 있다. 이리 관계로 PSA 및 RIR 기술은 원전산업계의 중요한 기술개발 분야로서 인식되고 있다.

2. 신뢰도기반규제 및 적용관련 미국 현황

전력산업의 Deregulation (규제철폐)에 따라 원자력산업의 타 전원 대비 경쟁력은 지속적으로 요구되고 있다. 미국에서는 기존 원전에 대한 규제의 보수성을 보완하여 효율적으로 안전성과 경제성을 향상시킬 수 있는 신뢰도기반 규제 및 적용관련 연구를 원자력산업계 및 규제기관이 대대적으로 연구 중에 있다. 원전의 종합적 안전성 점검(PSA) 기술의 발전과 지난 수십년 간의 안정적인 원전운영 경험 등이 신뢰도기반 규제 및 적용을 태생시키는 계기가 되었다고 할 수 있다. 신뢰도기반 규제 및 적용은 사업자에게는 경제성을 향상시키고 규제기관에게는 안전성의 보장과 함께 합리적인 규제로 규제자원의 효율화를 도모할 수 있다.

Regulatory Guide 1.174 [2]의 발행이후 AOT (Allowed Outage Time) 및 STI (Surveillance Test Interval)의 연장으로 운영중인 발전소의 기술지침서 완화 기술개발이 가능하게 되는 등으로 현재 신뢰도기반규제 및 적용분야는 미국에서 활발하게 개발중에 있고 미국내 많은 원전에서 미국 규제기관(NRC)으로부터 각종 AOT의 연장 허가를 받아 발전소 경제성을 제고하고 있다. RI-ISI (가동중검사), RI-ILRT (격납건물누설율검사) 등도 이미 발전소에 적용중이거나 개발을 진행중에 있다.

본 논문은 원전사업자의 입장에서 RIR의 신규원전 설계의 적용성을 검토하고자 한다. 미국 원전사업자의 RIR 적용현황과 신규원전설계에 적용시 이득이 큰 RIR Option 2 (Graded QA)와 Option 3 (대형 LOCA 사고 재정의)에 대한 미국 기술개발 현황을 검토하고자 한다.

2.1 미국 원전 사업자의 RIR 추진현황

미국 전역에 약 104개의 원전이 운전중에 있고 원전사업자는 약 35개사로 제일 큰 회사인 엑셀론(Exelon)이 14개 원전을 소유하고 있으며 나머지 사업자는 평균 2~3개의 원전을 소유하고 있다. Deregulation 정책으로 미국 모든 유틸리티들은 적극적으로 발전소 원가절감 노력을 추진하고 있으며 RIR은 원가절감 분야중 가장 활발한 분야라고 할 수 있다. 대부분의 미국 유틸리티들이 규모가 작고 RIR 기술개발을 위한 재원, NRC와의 조율에 따르는 시간 등의 사유로 RIR 적용에 대한 종합적인

계획보다는 각 발전소의 필요분야, 기술능력, 투자여건 등에 따라 RIR 적용분야가 각각 다르게 추진되고 있다. 따라서 발전소 상태에 따라 RIR 적용분야 우선순위가 다르고 회사의 기술 및 투자 능력에 따라 심도도 다르게 나타나고 있다.

신뢰도기반규제 및 적용에 활발한 연구를 하고 있는 회사로는 14개 원전을 보유하고 있는 미국 최대 유틸리티인 엑셀론과 사우스 텍사스 프로젝트 2개 원전을 보유하고 있는 STP 원자력회사, San Onofre 1&2 원전을 보유하고 있는 Southern California Edison 회사, 영광 3,4호기 원전의 모델인 팔로버디 1,2&3 원전을 소유하고 있는 아리조나 원전회사 등을 꼽을 수 있다. 이중 STP 원자력회사가 Graded QA 적용까지 추진하는 등으로 가장 앞서 가는 회사라 할 수 있겠다. 대부분의 미국 원전사업자들은 자체의 Risk Management 팀과 PSA/RIR 전문기관과의 용역에 의해 RIR 적용개발이 추진되고 있으며 WOG 산하 Risk Management Working Group을 통해 웨스팅하우스사로부터 기술자문을 받고 각 원전사업자의 RIR 추진현안, 수행경험 등을 활발히 교환하고 있다.

2.2 Graded QA

Graded QA는 발전소 전체 SSC를 대상으로 발전소의 Safety Class 체계를 Risk-informed 기법으로 재분류하고 Low Safety로 분류된 기기에 대해서는 품질등급의 Commercial Standard 적용, 각종 규제면제 등 Special Treatment를 받을 수 있다. AOT가 부분적인 발전소인 반면 Graded QA는 적용분야 대상이 발전소 전체 SSC이므로 규모면에서 큰 RIR 적용분야라 할 수 있다. 2001년도에 10 CFR 50.69 Risk Informed Safety Classification 초안이 만들어졌으나 아직까지 NRC에서 의견 수렴과정에 있다.

미국 STP (South Texas Project)발전소는 31개 계통의 46,000개의 기기를 3년간에 걸쳐 재분류하여 2001년에 NRC로부터 승인을 받은 바 있는데 그 중 약 90%의 기기가 Low Safety Significant로 판명되었다. WOG에서도 Graded QA 기술개발을 시작하여 현재 Pilot Plants인 Wolf Creek 및 Surry 발전소를 대상으로 Risk Informed 안전등급 재분류 사업을 수행중에 있으며 2002년도 사업완료 후 비용/이득 분석결과가 상당히 긍정적으로 분석되었다. 2004년 10월까지 Pilot Plants에 대한 NRC 승인을 목표로 기술개발중에 있다.

2.3 대형냉각재 상실사고 재정의 (LBLOCA Redefinition)

대형 LOCA 재정의는 신뢰도기반규제 Option 3 항목으로 RIR 적용의 최종 단계라 볼 수 있는데, 이는 1950~60년대 기술에 근거한 10 CFR 50.46 (ECCS Acceptance Criteria), Appendix K (ECCS Evaluation Model) 및 GDC 35 (ECCS의 단일사고 적용요건) 등 기존 규제요건의 틀을 개선하기 위한 것이다. WOG내에 대형 LOCA

재정의 워킹그룹이 구성되어 운영중이며 현재 대형 LOCA 재정의 관련 주요현안은 대형 LOCA 빈도와 LOCA 파단면적이다. WOG의 접근 방법은 신뢰도기반 기법을 사용하여 대형 LOCA의 위험도가 낮음을 보이고, LOCA 최대 파단면적을 LBB (Leak Before Break) 기술의 발전을 고려하여 6" 배관으로 결정토록 하자는 것이다. LOCA 빈도관련 미국내 연구결과는 다음과 같다.

표. LOCA 빈도관련 주요결과

	Date	Small LOCA	Medium LOCA	Large LOCA
WASH-1400	1975	1E-3(*)	3E-4(*)	1E-4(*)
NUREG-1150	1990	1E-3	1E-3	5E-4
NUREG/CR-5750	1999	5E-4	4E-5	5E-6
Expert 의견수렴 (Elicitation)	2003~2004			TBD

* Median, 나머지는 Mean Values

NUREG/CR-5750은 1987-1995년 사이 서구형 원전을 대상으로 조사결과 세계적으로 8000 원자로·년(Calendar year)동안 대형 혹은 중형 LOCA의 기록이 없고 그 동안의 배관 파단 Mechanism의 분석 및 실험연구를 종합 검토하여 LBLOCA 빈도를 제시하였다. 오랜 원전운전 경험으로 LOCA 위험도는 소형 LOCA가 지배적이었으므로 우리의 관심과 자원을 소형 LOCA에 초점을 두어야 안전성이 더욱 개선될 수 있고 안전성을 개선하기 위해서는 아주 낮은 발생확율의 대형 LOCA는 설계기준사고(DBA)로서가 아니라 중대사고 시나리오로 처리되는 것이 바람직하다고 본다.

과거의 경험과 현재의 지식을 바탕으로 제한된 규제자원을 보다 필요한 곳에 집중함으로써 안전성을 개선할 수 있고 규제 효율화를 제고할 수 있다. 원전 산업계 측면에서 대형 LOCA 재정의시 주요 이득은 운전, 교육훈련, 시험 및 정비 등에 발생 가능성이 높은 사건에 집중할 수 있어 안전성을 개선할 수 있고, ECCS 계통 요구조건 완화를 통하여 디젤 기동시간 증가, 안전주입수 유량 감소, 안전주입수탱크 수 감소, Fan Cooler 수 감소, Spray 유량 감소, RWST 보론농도 감소, 격납건물 설계압력 감소 및 체적 감소 등의 설계 및 운전상 이득과 연료설계 제한치의 여유 증가로 연료경제성 제고, Power Uprate 적용성 용이 등이다.

3. PSA 품질관련 현황

신뢰도기반 기술의 발전소 적용을 위한 핵심 Tool인 PSA는 아직까지 많은 불확실

성과 Quality 개선 문제점을 갖고 있다. Reg Guide 1.174에 의하면 기기고장 확률, 초기사건 빈도, 인적실수 등에 초래되는 Parameter Uncertainty와 Human Performance Model, CCF, RCP Seal Behaviour Model 등에 대한 Model Uncertainty가 있음을 기술하고 있고, 아울러 PSA의 Quality 제고를 위한 한 방법으로 PSA Peer Review를 실시할 것을 제시하고 있다. 결국 인허가기준(Licensing Basis) 변경요청의 승인을 위한 종합결정 (Integrated Decisionmaking)은 CDF, LERF 등의 PSA 수치결과에 따라 결정되지 않으며 PSA 결과는 종합판단의 하나의 Input이고 제안된 개선 요구사항에 대한 전반적인 그림을 보여주는 데 도움을 주는 것이며 확률론적 분석 및 결정론적 분석 둘 다 제공되어야 한다는 것이 Reg Guide 1.174의 핵심이라고 할 수 있다. Reg Guide 1.174에서 요구하는 신뢰도기반 기술 적용을 위한 종합결정에 대한 기본원칙 5가지중 하나인 변경을 모니터링 할 수 있는 성능점검 요구사항은 RIR 적용과 정비규정(Maintenance Rule)이 연계되는 포인트라고 할 수 있다.

PSA Quality는 미국 NEI의 PSA Peer Review 절차서에 따라 WOG 및 CEOG 주도로 각 발전소의 PSA를 전문가들이 평가하였으며, 2002년 12월까지 미국내 40개의 발전소에 대한 PSA Peer Review 결과 모든 발전소의 Plant Specific PSA가 RI 적용을 위한 Quality를 보유하고 있는 것으로 최종 평가되었다[3]. 2002년 4월에 ASME PSA Standard가 발행됨에 따라 PSA의 Quality 점검은 ASME Standard로 이뤄질 예정이므로 ASME규정에 대해 현재 NRC 및 산업계가 검토중에 있다. ASME Standard는 PSA Quality를 Capability Category I, II, III 등급으로 분류하고 각 등급별로 Requirements를 제시하고 있는데 앞으로 RIR 적용이 점차 확대됨에 따라 PSA의 Scope과 Level of Detail에 대한 요구수준이 더욱 높아질 것이 예상된다.

4. 신규원전설계에 RIR 적용

미국원전사업자협회(NEI) Vision 2020에 의하면 미국은 신규 전원수요가 지속될 것으로 예측하고 있으며 이중 약 10,000 MWe 상당부분을 개선된 신규원전이 담당해야 할 것을 권고하고 있다. 미국의 신규 원전개발은 2010년내에 상용화를 위한 단기원전개발(Near Term Deployment)과 미국, 한국 등 10개국 주도의 Gen IV 원자로개발로 구별할 수 있다. ABWR, ESBWR, AP1000, IRIS, PBMR 등이 2010년까지 미국내 상용화를 위한 원전개발(Near Term Deployment) 대상 노형이다. 현재까지의 RIR 연구는 발전중인 원전을 대상으로 하고 있는데 Graded QA, LBLOCA 재정의 등의 RIR 기술이 신규원전 개발에 적용된다면 원전의 타전원 대비 경쟁력을 대폭 향상시킬 수 있다. IRIS 원자로의 경우 이미 LOCA를 설계기준사고에서 배제시키고 있다.

미국의 신규원전 건설이 저렴한 가스비용, 짧은 공기의 가스화력과 가격경쟁논리 (Deregulation)에 치중하여 신규노형의 다양화를 추구하다 보니 오히려 신규원전 건설 가능성을 계속 어렵게 진행하게 된 반면 우리나라는 한국표준형원전의 개선을 위해 1990년 초부터 일관되게 개발하여 2002년 설계인가를 취득한 신형경수로 1400 원전 개발은 대단한 성과라 할 수 있다. 앞으로 Risk Informed 설계개선 방안을 도출 적용하는 등으로 전세계 타 신형원전대비 우리 고유원전의 경쟁우위를 지속적으로 유지시켜 국내외 신규원전수요에 대비하여야 한다고 본다. 신형경수로 1400 원전에 적용가능한 Risk Informed 설계 개선 기술로서는 앞서 LBLOCA 재정의시의 이득에서도 언급한 바 있는 ECCS 계통설계 단순화 (안전주입계통, 비상디젤계통, 격납건물 팬쿨링 및 살수계통 등)와 Graded QA 적용 (비안전등급 기기비용과 안전등급 기기는 3~4배차이), 격납건물 설계압력 및 건물체적 축소, 발전소 이용률 제고 등을 들 수 있다.

5. 향후 전망 및 결론

미국원전에 대한 신뢰도기반 규제 및 적용은 규제효율성 제고 및 경쟁력 향상이라는 원전산업계의 당면과제에 대한 해결방향을 열어 주었다고 볼 수 있다.

신뢰도기반 규제 및 적용 분야는 AOT 연장으로부터 Graded QA, 대형 LOCA 재정의 등으로 점차 확산될 전망이다. 우리나라는 14개의 PWR 원전을 보유하고 있어 국내에 RIR을 적용시 파급효과가 큼으로 경제성제고에 상당한 효과가 전망된다. 미국의 RIR 적용 추진과정을 참고로 RIR의 효과적인 국내 적용 확산을 위해서는 규제효율성 제고와 안전성 증진을 동시에 추구하는 RIR 적용에 대해 원전사업자 및 규제기관의 적극적인 추진의지와 상호 협력하는 연구개발 노력이 필요하다고 본다. 아울러 신뢰도기반규제 및 적용의 신규원전설계에 적용에 대비한 연구를 지금부터 추진하여 우리 고유의 신형원전에 대한 타 전원대비 경쟁력을 향상시키는 노력도 병행하여야 할 것이다.

<감사의 글>

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

6. 참고 문헌

- [1] WOG International Member Forum 회의, 미국 샌디에고, 2003. 2
- [2] US NRC Regulatory Guide 1.174 : An approach for using PSA in risk-informed decisions on plant-specific changes to the licensing basis, July 1998
- [3] WOG General Session, PRA Peer Review Process (MUHP-6073) 최종결과발표자료, 2003. 2