

'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

RG 1.174를 적용한 격납건물 종합누설률 시험주기 연장 허용기준 개발

Development of Acceptance Criteria for ILRT Interval Relaxation Applying the RG 1.174

서미로, 김명기

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

국내 원자력발전소의 격납건물 종합누설률 시험주기 연장을 위한 위험도분석을 수행하여 미국 Surry 및 Zion 원전과 비교한 결과, 울진 3,4 호기의 노심손상빈도와 위험도, 위험도 증가량은 상당히 낮음에도 불구하고 위험도 증가율은 높게 나타나는 결과를 보였다. 이러한 결과는 위험도 증가율이 증가량이 같을 경우 기준위험도의 크기에 영향을 받아 나타나는 것으로 기준위험도가 낮은 발전소일수록 위험도 증가율이 커지게 된다. 따라서, 위험도 증가율만으로는 위험도 증가를 평가할 수 없으며 기준 위험도와 위험도 증가량을 동시에 고려하는 새로운 허용기준을 USNRC의 RG 1.174를 적용하여 제시하였다.

Abstract

We performed the risk analysis for relaxation of containment integrated leakage rate test interval of Korean Nuclear Power Plant, and compared these results with those of Surry and Zion Plant. In spite that the CDF, risk, and the amount of risk increase of Ulchin units 3,4 is much lower than that of Surry and Zion Plant, we find that the risk increase rate of Ulchin units 3,4 is somewhat higher. It is resulted from the fact that the risk increase rate is affected by the magnitude of baseline risk in case of the same amount of risk increase. So, It is shown that the baseline risk is lower, the risk increase rate is higher. We judge that the evaluation of risk increase simply by the increase rate is unreasonable. And we propose the new acceptance criteria considering both the baseline risk and the amount of risk increase applying the acceptance guideline of RG 1.174 published by USNRC.

1. 서론

최근 국내에서 관심이 높아지고 있는 Risk-Informed Inservice Inspection and Testing, Graded Quality Assurance, Tech-Spec Optimization 등, 위험도 정보를 활용한 연구들은 확률론적 안전성 평가(PSA) 방법을 응용하여 원전의 안전성 및 운영의 합리성을 확보하고 규제 자원의 효율적 운용을 목표로 하고 있다. 미국의 경우, 최근 USNRC가 PRA Policy Statement(1995)와 White Paper(1999, 3) 등, PSA 연구의 지속적인 확장을 밝히고 있어서, 지난 10여년간 PSA 연구 결과를 활용하여 원전의 경제성을 확보하기 위한 원전사업자들의 노력이 결실을 맺고 있다.

국내의 경우, 건설중인 원전에 대해서는 PSA가 진행되고 있으며, 가동중 원전에 대한 PSA가 계획되고 있으며, PSA 결과를 활용한 연구가 추진 중에 있다. 그러나, PSA의 기술적인 문제들, 즉 인간오류분석 방법론, 공통원인고장 데이터베이스, Aging, 불확실성 분석 방법론 등의 해결해야할 문제들이 아직 많이 남아있으며, 특히 위험도 평가를 통한 규제변경시 허용기준도 정립되어야 할 필요가 있다.

국내 원전의 격납건물 종합누설률 시험주기(Integrated Leakage Rate Test)를 5년에 1회에서 10년에 1회로 연장하기 위한 위험도 분석은 성능이력과 Level 3 PSA 평가를 수행한 국내 최초의 위험도 정보를 활용한 규제 완화 연구로써 위험도 분석결과가 이미 보고되었다. 그러나, 분석결과에 있어서 위험도 증가의 기준에 대한 문제가 계속 제기되어, 기존의 퍼센티지 위험도 증가율의 문제점을 민감도 분석을 통하여 분석하고 USNRC의 Regulatory Guidance 1.174에 기술된 Acceptance Guideline을 응용하여 새로운 허용기준을 제시하였다.

2. 국내원전 ILRT 주기연장을 위한 위험도 분석

분석 대상발전소로서 한국 표준형 원전인 울진 3,4 호기를 국내 대표원전으로 선정하여 NUREG-1493 "Performance Based Leakage Rate Program"의 방법론을 적용하여 ILRT 주기연장에 따른 위험도 영향을 분석하였다. 위험도분석을 위하여 Level III PSA 분석도구인 MACCS (MELCOR Accident Consequence Code System) 전산코드를 사용하였다. MACCS 코드의 입력자료로 울진 3,4 호기 Level II PSA 결과인 방사선원항 자료와 울진원전 반경 80 Km의 '98년 추정 인구분포 자료, 그리고 '91년부터 '95년까지 울진원전 인근 울진기상관측소 부근에서 측정된 기상자료를 이용하여 평가하였다. NUREG-1493에서는 주민선량을 원전주변 1000 mile(1600 km)에서 평가한 주민선량값으로 ILRT 주기연장시의 위험도를 평가한 반면, 국내에서는 원전 주변 50 mile (80 km) 이내의 거주인구에 대한 평가가 보편적으로 되어 있으며, 1000 mile이라는 평가 거리의 현실성이 없기 때문에 본 평가에서도 50 mile 이내의 주민선량을 계산하였다. Surry 및 Zion 원전의 경우 50 mile 이내에서 평가한 위험도 자료가 NUREG-1150 및 NUREG-1493에 제시되지 않아, 동일 거리에서 평가된 위험도의 비교는 불가능했다. Surry 원전 및 Zion 원전의 CDF 및 인구밀도와, NUREG-1493에서 평가된 위험도 분석결과 및 ILRT 주기연장으로 인한 위험도 증가 영향을 울진 3,4 호기의 분석결과와 비교 요약하여 표 1에 수록하였다. 위험도 증가 영향에 대한 정량화는 평가결과 중 인구밀도의 영향이 반영되는 주민선량으로 수행하였으며, 표 1에서의 위험도 증가치는 주민선량의 증가량을 나타낸다.

표 1에 나타나 있듯이, 울진 3,4 호기의 CDF는 Surry 원전 및 Zion 원전의 1/5 ~ 1/50 수준으로 상당히 건전한 것으로 알려져 있으며, 주민선량등의 기준 위험도 평가 결과도 울진 3,4 호기가

Surry 및 Zion 원전의 1/10 ~ 1/100 수준으로 상당히 위험도가 작음을 나타내고 있다. 또한, ILRT 주기연장으로 인한 위험도 증가 측면에서 울진 3,4 호기 주민선량의 증가량은 Surry 및 Zion 원전에 비해 1/7 ~ 1/60 수준으로 상당히 작다. 그러나, 위험도 증가율 측면에서 Surry 원전의 경우 0.07%, Zion 원전의 경우 0.14%로 위험도 증가가 미미한 것으로 결론을 내린 반면, 울진 3,4 호기의 위험도 증가율은 0.68%로 NUREG-1493에서 평가된 증가율보다 높게 나타나고 있다.

표 1. 위험도 평가 원전 부지특성 및 ILRT 주기연장으로 인한 위험도 변화 비교

Plant	UCN 3,4 (2%/일 Leak)	Surry (1%/일 Leak)	Zion (1%/일 Leak)
노심손상빈도 (내부사건) [/RY]	8,25E-6	4,1E-5	3,4E-4
인구밀도 [명/mile ²]*	126	230	1360
총 잠재적 암치사 (LC) [/RY]	2,11E-4	5,18E-3	2,44E-2
주민선량 (PD in 50 mile) [인·렘/Ry]	4,49E-1	7	55
주민선량 (PD in 1000 mile) [인·렘/Ry]	-	31	135,6
개별 잠재적 암위험도 (ILC in 10 mile) [/RY]	7,32E-10	1,74E-9	1,09E-8
주기연장시 위험도 증가치 (ΔPD)**	3,039E-3	2,148E-2	1,872E-1
주기연장시 위험도 증가율 (PD) [%]**	0,68	0,069	0,14

* : 인구밀도는 울진 3,4 호기의 경우 원전 반경 50 mile, Surry 원전 및 Zion 원전은 1000 mile 내의 거주인구로 계산한 것임

** : 주기연장시 위험도 증가치 및 증가율은 울진 3,4 호기의 경우 50 mile 이내의 주민선량으로 계산했으며, Surry 및 Zion 원전의 경우는 1000 mile 이내의 PD로 계산한 것임.

3. 위험도 증가율 증가 원인 분석

ILRT 주기연장에 따른 위험도 증가율은 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{Risk(\text{주기연장}) - Risk(BL)}{Risk(BL)} \times 100 = \frac{\Delta Risk}{Risk(BL)} \text{-----}(1)$$

여기에서 $\Delta Risk$ 는 ILRT 주기연장으로 인한 위험도 변화량을 나타낸다. 위험도 증가율의 차이 규명을 위해서 위험도 증가율 공식 (1)에서 다음과 같은 사항을 고려 및 비교하여야 한다.

3.1 $\Delta Risk$ 의 영향

식 (1)에 따르면 위험도 증가율이 작기 위해서는 ILRT 주기연장에 의한 $\Delta Risk$ 가 작아야 한다. 표 1에 나타나 있듯이 울진 3,4 호기의 $\Delta Risk$ (주기연장시 주민선량 증가치)는 Surry 및 Zion 원전의 $\Delta Risk$ 의 1/7 ~ 1/60 수준으로 위험도 증가량은 매우 작음을 알 수 있다.

3.2 $Risk(BL)$ 의 영향

$\Delta Risk$ 가 동일한 경우 위험도 증가율은 ILRT 주기연장을 하지 않았을 경우의 위험도(기준 위험도)인 $Risk(BL)$ 이 상대적으로 큰 원전의 위험도 증가율이 작게 나타난다. 따라서, $\Delta Risk$ 가 더

작은 올진 3,4 호기의 위험도 증가율이 크게 나타난 이유는 $Risk(BL)$ 이 Surry 및 Zion 원전보다 작기 때문이다. 즉, $\Delta Risk$ 와 $Risk(BL)$ 의 차이가 클수록 위험도 증가율은 작아진다는 결론을 내릴 수 있다. 따라서 위험도 증가율 차이의 규명은 $Risk(BL)$ 의 관점에서 파악하였다.

3.2.1 Level 1 및 Level 2 PSA 결과에서의 차이

ILRT 주기연장에 따른 위험도 분석은 Level 2 PSA 결과인 방사선원항 방출량에 근거하여 MACCS 전산코드로 분석하게 되므로 Level 1 및 Level 2 PSA 결과가 위험도 평가 결과에 영향을 미치게 된다. NUREG-1150에서 평가된 Surry 원전의 노심손상빈도(Core Damage Frequency)는 $4.1E-5$ [RY] 이고, Zion 원전의 경우는 $3.4E-4$ [RY]로 올진 3,4 호기의 $8.25E-6$ [RY] 보다 5배 ~ 50배정도 높다. 따라서, 올진 3,4 호기의 $Risk(BL)$ 이 작게 계산되는 것이 당연하다.

3.2.2 위험도 평가 거리 차이

NUREG-1493에서는 주민선량을 원전주변 1000 mile (1600 km)에서 평가한 주민선량값으로 ILRT 주기연장시의 위험도를 평가하였다. 2장에서 설명하였듯이 Surry 및 Zion 원전의 50 mile 이내 위험도 평가자료가 없으며, 국내에서는 1000 mile 이라는 거리의 비현실성으로 원전 주변 50 mile (80 km)이내의 거주인구에 대한 평가가 보편적이다. Level 3 PSA 관점에서는 기상조건 등의 부지조건에 의하여 주민선량이 변할 수 있지만, 일반적으로 평가거리가 커지면 인구밀도의 증가에 의하여 주민선량은 커지게 되며, 기본 위험도인 $Risk(BL)$ 이 증가하게 된다. 이러한 사실은 인구밀도 증가에 대한 민감도 분석을 수행한 표 2에서 알 수 있다.

표 2. 인구밀도 변화에 대한 위험도 비교

Plant	UCN 3,4 (2 %/일 Leak)			Surry (230명/mile ²)	Zion (1360명/mile ²)
	126명/mile ²	1446명/mile ²	4000명/mile ²		
주민선량 (PD in 50 mile) [인 · 렘/Ry]	4.49E-1	5.69	78.68	7	55
주기연장시 위험도 증가치 (PD)	3.039E-3	1.2888E-2	1.4117E-1	2.148E-2	1.872E-1
주기연장시 위험도 증가율 (PD) [%]	0.68	0.27	0.18	0.069	0.14

표 2의 민감도 분석은 ILRT 주기연장의 전호기 적용을 위하여 수행된 것으로 첫번째 민감도 분석 입력사항인 1446명/mile²의 인구밀도는 고리 원전 주변 50 mile 이내의 인구밀도(1981년 측정 자료)를 사용한 것이다. 인구밀도가 증가함에 따라 $\Delta Risk$ 도 4배정도 증가하지만 기준 위험도인 주민선량값이 12배 정도로 크게 증가하므로 위험도 증가율은 2.5배정도 감소하여 Zion 원전의 위험도 증가율과 비슷한 수준인 0.27%가 된다. 두번째는 4000명/mile²의 인구밀도를 임의로 가정하고 올진 지역의 기상조건중 가장 심각한 기상조건을 가정하여 계산한 결과이다. 이 경우, 기준 위험도는 175배 가량 증가하지만 $\Delta Risk$ 는 46배정도 증가하여 위험도는 0.18%로 Zion 원전의 증가율과 비슷하게 된다.

따라서, 위험도 증가율만으로 허용 위험도를 고려하게 되면 기준위험도가 낮은 발전소, 즉 CDF나 LERF가 낮아 견전성이 충분히 입증된 발전소일수록 위험도 증가율이 커져 PSA 결과를 응용

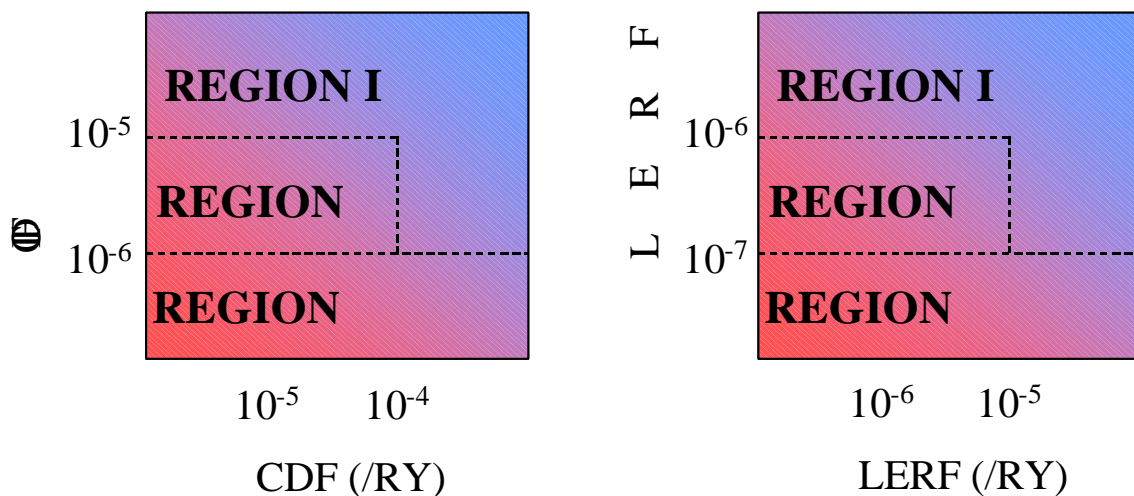
람부는 빈도가 높고 주 인구 거주 구역인 32 km 거리에 약한 강우가 발생하는 경우로 NUREG-1150 기상자료 민감도 분석 결과와 유사한 조건이다. 이 경우, 기본 위험도는 약 5배 정도 증가하지만, 주기연장으로 인한 주민선량 증가량은 기본 경우보다 감소하여 $\Delta Risk$ 와 $Risk(BL)$ 의 차이가 커지게 되어, 위험도 증가율은 위험도 증가율은 0.0983%로 Surry 원전의 수준으로 떨어진다. 이러한 현상은 위에서 설명한 바와 같이 기본 위험도에 누설에 의한 위험도기여가 상당히 작으며, 기후조건으로 인한 위험도 변동에 있어서도 격납건물 파손이나 우회와 같은 사건의 기여도가 주요하게 작용하며 ILRT 주기 연장으로 인한 위험도는 증가는 미미하다는 사실을 뒷받침하고 있다.

4 RG 1.174의 적용

4.1 RG 1.174의 Acceptance Guidelines

위에 기술한 내용은 위험도 평가 결과를 단순히 위험도 증가율만으로 판단할 경우의 문제점을 명확히 보여주고 있는 사실로 기본 위험도가 낮은 발전소일수록 위험도 증가율은 크게 나타난다는 문제를 지적하고 있다. 이러한 문제는 Risk-Informed Application을 주도하고 있는 미국에서 PSA Dilemma로 이미 지적되어 왔던 문제로써 NRC는 1998년 7월에 발간된 Regulatory Guide 1.174 "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis"에서 그림 1과 같은 Acceptance Criteria를 제시하고 있다.

그림 1. 위험도 Acceptance Guideline



위의 그림은 현재 허가 기준(Current Licensing Basis)을 위험도 정보를 활용하여 변경하고자 할 경우, 발전소의 기본적인 위험도(CDF 및 LERF)와 CLB 변경으로 인한 위험도 증가를 동시에 고려하기 위한 것으로, CLB 변경으로 인하여 증가되는 위험도를 계산하고, 계산된 위험도를 3개의 Region으로 나누어 각기 다른 허용 기준을 세우고 있다. Region III의 경우, 즉 CLB 변경으로 인한 ΔCDF 가 10^{-6} 이하이거나 $\Delta LERF$ 가 10^{-7} 이하이면 Total CDF의 계산이 요구되지 않으며, 위험도의 증가가 매우 작은 것으로 판단할 수 있으며, CLB 변경상의 상당한 유연성을 제공받게 된다. 단, CDF가 10^{-4} 이상인 발전소에서는 Total CDF를 감소에 집중적인 요구를 받게 된다. Region II의 경우(즉, $10^{-6} < \Delta CDF < 10^{-5}$, $10^{-7} < \Delta LERF < 10^{-6}$)는 CDF가 10^{-4} , LERF가 10^{-6} 이하인 경우

에만 위험도 변화가 작다고 판단되어 허용이 고려될 수 있다. Region I의 경우 CLB의 변경이 허용되지 않는다, 그러나, 허용이 허가된 Region에 대하여 누적효과의 추적을 요구하고 있으며, 불확실성에 대한 고려를 요구하고 있다.

4.2 ILRT 주기연장 위험도 증가 기준에의 적용

ILRT 주기연장으로 인한 위험도증가를 평가할 때 위험도의 단위는 CDF나 LERF가 아닌 주민선량 단위이므로, RG1.174의 Acceptance Guideline을 바로 적용할 수는 없다. 그러나, 1999년 3월에 발표된 NRC White Paper에서 Risk를 "risk in terms that can be applied to the entire range of activities involving NRC licensed use of AEA(Atomic Energy Act) materials"로 정의하고 있으며, Risk Insight에 대한 정의에서 CDF 및 LERF 이외에 다른 영역에서는 다른 형태의 결과(예를 들면, 예상 Dose, 방사선작업자 피폭 빈도 등)로 나타낼 수 있음을 설명하고 있다. RG 1.174에서도 Acceptance Criteria에 가능하다면 Level 3 PSA 결과 반영을 권고하고 있다. 따라서, 위의 그림 1 과 유사하게 본 ILRT 주기연장으로 인한 위험도 평가의 결과를 $\Delta Risk$ 와 $Risk(BL)$ 의 관점에서 비교하여 그림 2에 표시하였다.

그림 2. 울진 3,4 호기 $\Delta Risk / Risk$ 비교

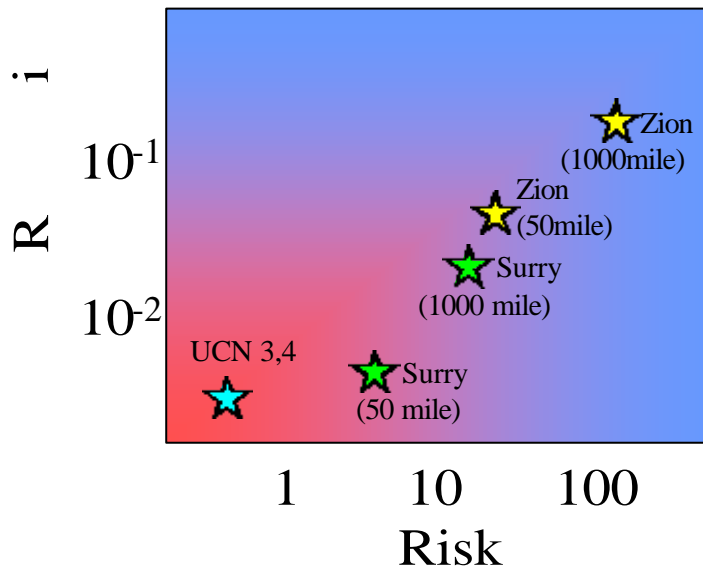


그림 2에서의 Risk는 주민선량이며, 본 적용에서는 단지 울진 3,4 호기의 ILRT 주기연장으로 인한 위험도를 Surry 및 Zion 원전과 비교하기 위한 것으로 주민선량의 수치적인 값을 허용기준으로 제시하는 것은 아님을 명확히 밝히는 바이다. 위에서 Surry 및 Zion 원전의 50 mile에 해당하는 값은 자료가 없어서 1000 mile 에서의 위험도 증가율을 50 mile에서의 기본 위험도에 적용하여 계산한 값이다. 3절의 민감도 분석에서 설명하였듯이 평가거리가 단축되면 위험도 증가율이 증가할 것으로 예상되므로 위와 같은 가정은 상당히 보수적인 가정에 해당한다고 판단하였다. 그림 2에 나타나 있듯이 그래프 상의 위치로 판단할 때 울진 3,4 호기의 위험도는 Surry 나 Zion 원전보다 Acceptance Criteria의 Region III에 위치할 가능성이 높다. 따라서, 울진 3,4 호기의 ILRT 주기연장에 있어서 Surry 및 Zion 보다 상당한 유연성을 갖을 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 격납건물 ILRT 주기연장에 따른 위험도 분석을 한국형 표준원전인 울진 3,4 호기에 적용하여 수행한 결과를 평가함에 있어서 위험도 증가의 기준으로 위험도 증가율을 고려할 경우 발생하는 문제점을 지적하고 새로운 허용기준 개발의 필요성을 제시하였다. 기존 위험도와 증가된 위험도의 양을 단순히 백분율로써 표시하여 비교하는 기존의 위험도 증가 평가 방법은 기본 위험도가 상이할 경우 기본 위험도가 큰 발전소일수록 위험도 증가율이 작게 나타나는 문제점을 나타내고 있다. 따라서, 허용 위험도를 CLB 변경시 위험도 증가율로만 판단하는 것은 문제가 있으며, 이러한 문제를 해결할 수 있도록 새로운 정의가 필요하다고 판단된다. 미국의 경우 RG 1.174에서 기본 위험도와 위험도 증가량을 동시에 고려하여 CLB 변경의 정도와 규제의 강도를 조절하는 Acceptance Criteria를 제시하고 있다. 본 연구에서는 CDF 및 LERF에 대해서 고려된 RG 1.174의 Acceptance Criteria를 위험도라는 일반적인 정의로 확대하여 ILRT 주기연장으로 인한 위험도 증가 비교에 적용하였다. 적용 결과, 기본 위험도와 ILRT 주기연장으로 인한 위험도를 동시에 고려할 수 있어, 단순한 증가율로만 비교할 경우의 문제점을 해결할 수 있었으며, 위험도 상태에 대한 효과적인 판단이 가능한 것으로 파악되었다.

향후, 국내에서도 기존의 결정론적 분석을 보완하여 원전의 안전성 및 경제성을 확보하기 위하여, 위험도 정보를 활용한 PSA Application 연구가 활발해 질 것으로 예상되며, 이에 따라 CLB 변경 허용 기준도 기존의 결정론적 판단에 추가적으로 위험도 정보를 반영하여 개발되어야 할 필요성이 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. "Severe Accident Risk : An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants, Final Summary Report," NUREG-1150, December 1990.
2. "Performance-Based Containment Leak-Test Program," NUREG-1493, January 1995.
3. "울진 원자력발전소 3,4 호기 최종 안전성 분석 보고서," 한국전력공사, 1993.
4. "Ulchin Unit 3&4 Final Probabilistic Safety Assessment Report," Vol. 5, KEPCO, 1998.
5. 김명기, 서미로, 오해철, "성능기반 격납건물 누설시험 주기연장", 전력연구원, '98전력연-단681, TMC97NS02,S1998.619, 1998, 9.
6. 김명기, 서미로, 오해철, "격납건물 종합누설률 시험주기 연장에 따른 위험도 평가 민감도 분석", 전력연구원, '99전력연-단024, TMS05.R1999.22, 1998, 9.
7. USNRC, "Risk-Informed and Performance-Based Regulation", White Paper, March 1999.
8. USNRC, "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant- Specific Changes to the Licensing Basis" Regulatory Guide 1.174, July 1998.