

위험도 정보를 이용한 Technical Specifications 개선을 위한 정량적 의사결정 방법론 연구

김범석 · 제무성[†]

한양대학교

(2002. 11. 6. 접수 / 2003. 4. 25. 채택)

A Study on Decision-making Methods for Improving Technical Specifications

Beom-Seock · Moosung Jae[†]

Hanyang University

(Received November 6, 2002 / Accepted April 25, 2003)

Abstract : The utility and the nuclear research institutes in Korea have conducted research for improving inefficient requirements in technical specifications using the results of probability risk assessments and informations with risk. However, the guidance for reviewing the improved technical specifications has not been developed. The objective of this study is to develop a decision-making framework for investigating and reviewing the technical documents associated with the changes of technical specifications. This study has developed a decision-making framework for reviewing the improvements of the RI-TS(Risk-Informed Technical Specifications). This work may contribute to enhancing both the safety and the efficiency of nuclear power plants by changing Technical Specifications proposed by the utility.

Key Words : probability risk assessments, decision-making, technical specifications, risk-informed regulation

1. 서론

원자력 발전소의 안전성을 유지하고 향상시킬 수 있도록 운영기술지침서를 개선하기 위해, 허용정지 시간(Allowed Outage Time: AOT)과 감시시험주기(Surveillance Test Interval: STI)와 같은 운영기술지침서의 여러 요구 사항들이 원전 안전성에 미치는 영향을 상세히 분석하여야 한다. 이와 관련해, 많은 기술과 경험이 축적되어 있는 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA)를 이용하여 위험도 또는 안전성의 관점에서 원전을 더욱 효율적으로 규제하기 위해, 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)를 중심으로 위험도 기준 규제(Risk Informed Regulation; RIR)가 도입되었다¹⁾. 이러한 국제적 추세에 따라 국내에서도 운영기술지침서의 여러 가지 비효율적인 요구 사항들을 PSA 결과 및 위험도 정보를 이용하여 개선하기 위한 연구를 수행

하고 있다. 그러나 운영기술지침서의 개선을 위한 체계적인 의사결정체계가 정립되지 않은 상태에 있어, 이에 대한 방법의 개발이 필요한 상황이다. 따라서 본 논문에서 운영기술지침서의 정량적 의사결정체계를 제시함으로써, 운영기술지침서의 항목변경을 위한 의사결정에 도움을 주고자 하였다.

2. 본론

제안된 운영기술지침서를 정량적으로 평가하기 위해 영향도(Influence Diagrams)를 이용하였다. 영향도는 불확실한 양과 정보 및 결정시기들 간의 조건적인 의존성을 표현하는 노드와 조건적이고 정보적인 방향성을 가지는 아크들로 이루어진 연결망이다. 노드는 결정, 기회, 결정론적, 가치노드 등의 4가지 종류로 구성되어 있다. 통상적으로 의사결정을 나타내는 결정노드는 사각형 모양이고, 불확실한 양을 나타내는 기회노드는 원형모양을 사용한다. 가치노드는 표준화되어 있지 않고 분석자에 따라 다이아몬드 모양 혹은 모서리가 둥근 사각형 모양으로 사

[†]To whom correspondence should be addressed.
jae@hanyang.ac.kr

용한다. 영향도는 직접적으로 관련이 있는 노드 사이의 확률적인 의존성을 나타내 줄 수 있고, 의사결정론자가 문제의 목표와 연관이 있는 노드들과 아크들을 추가 및 삭제하는 데 용이하다. 또한 이것은 중요한 변수들을 신속하게 파악할 수 있게 할 뿐 만 아니라 복잡한 변수들 간의 독립성을 묘사하는데 유용하다²⁾. 일반적으로 영향도의 기회노드는 두 가지 형태의 불확실성을 내포하고 있는데, 하나는 확률론적 변화에 기인하고 있고, 다른 하나는 부적절한 지식과 정보의 불확실성에 기인하고 있다. 불확실성을 특정 짓는 분포는 두 가지 가능한 상태 즉, 사건이 항상 발생(확률값: 1)하는지의 여부와 결코 일어나지 않는 경우(확률값: 0)로 구분된다³⁾.

2.1. 영향도의 구성

사업자가 허용정지시간(Allowed Outage Time; AOT)이나 정기점검주기(Surveillance Test Interval; STI)와 같은 운영기술지침서의 개선 안을 제안하면, 제안한 변경요건에 대해 의사결정자는 검토를 통해 최적방안을 결정하여야 한다. 이 경우 의사결정자는 변경을 불허(Rejection)하거나 승인(Approval) 또는, 보류(Suspension)하는 세 가지 항목 중에 하나를 선택할 수 있고, 이에 대한 초기 영향도는 <Fig. 1>과 같이 구성된다. 여기서 노드 V는 결정에 대한 만족도를 나타내는 가치(Value) 노드이다.

의사결정자의 의사결정 기준은 일반적으로 안전성(Safety)과 경제성(Economy)을 극대화시키는데 있다. 또한 위험도 관점에서, 승인기준치(Δ Risk/Risk)를 만족하여야 한다. 이러한 요소들은 가치노드인 만족도에 영향을 준다. 개선 안을 검토하기 위한 의사결정과정에서는 미국 NRC에 의해 제시된 위험도 정보를 반영한 종합적인 의사결정 원리를 적용하였다. 이 원리는 현 규제요건(Current Regulations; CR)과의 부합성, 심층방어(Defense in Depth; DD)의 구현, 충분한 안전여유도(Safety Margins; SM)의 유지, 요건변경으로 초래되는 위험도를 감시하기 위한 성능측정(Performance Measurement; PM)방안의 사용과 같은 5 요소로 구성되어 있다. 의사결정 요소와의 인과관계를 영향도에 반영하면 <Fig. 2>와 같이 적용할 수 있다.



Fig. 1. Initial influence diagrams for decision-making

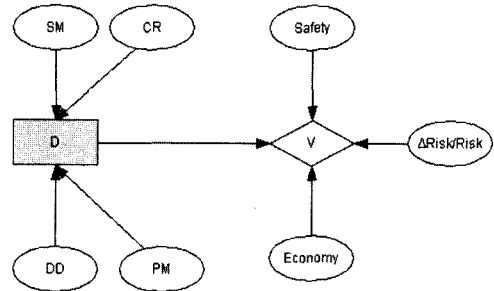


Fig. 2. Influence diagrams involving decision-making factors

<Fig. 2>에서 운영기술지침서 규제요건의 변경에 따른 발전소 안전성(Safety)은 현 규제요건(Current Regulations; CR)과의 부합성, 충분한 안전여유도(Safety Margins; SM)의 유지를 나타내는 CR, SM 노드에 영향을 준다. 그리고 운영기술지침서 규제요건의 변경에 따른 발전소 경제성(Economy)은 심층방어(Defense in Depth; DD)의 구현, 변경을 감시하기 위한 성능측정(Performance Measurement; PM)방안의 사용을 나타내는 DD, PM 노드에 영향을 준다. 이러한 인과관계를 영향도에 적용하면 개선된 상세 영향도는 <Fig. 3>과 같이 확장된다.

2.2. 영향도의 정량화

영향도를 정량적으로 계산한다는 것은 운영기술지침서의 한 요건인 AOT/STI의 변경에 따른 영향을 정량화시켜 가치노드(V)의 속성과 관련이 있는 기대치를 계산한다는 것을 뜻한다. 영향도의 정량화는 참고문헌²⁾의 기회노드 함수 및 제거 기능에 의하여 베이지안과 진확률 이론으로 계산된다. 따라서 데이터에는 기본확률과 조건부확률이 필요하며 이러한 데이터는, Y. Armand와 J.M. Mattéi 등이 제안한 방법에 의해서 도출할 수 있다⁴⁾. 이 방법은 전문가에 의한 확률자료 생산방법론으로 영향도의 기회노드가 필요로 하는 확률평가에서 경험적인 자료가 없는 경우에 전문가의 의견을 체계적으로 집약해서 베이지안으로 자료를 생산하는 방법이다. 본 논문의 목적이 방법론의 제시에 있으므로, 전문가의 자문을 통해 데이터를 생산하는 과정은 생략하였다. 따라서 사용된 데이터(Table 1.2,3)는 전문가에 의한 확률자료 생산방법론으로 도출된 값으로 가정하여 사용하였다.

운영기술지침서의 요건을 변경할 경우에 발전소가 안전할 확률을 0.90, 발전소의 경제성이 향상될 경우를 0.95라 하면 노드 Safety와 Economy의 발생 확률은 <Table 1>과 같다.

Table 1. Occurrence probability for node safety and node economy

기회노드	설 명	발생확률
Safety	요건 변경시 발전소가 안전할 경우 (Saf1)	0.90
	요건 변경시 발전소가 안전하지 않을 경우 (Saf2)	0.10
Economy	요건 변경시 발전소의 경제성이 향상될 경우 (Eco1)	0.95
	요건 변경시 발전소의 경제성이 감소할 경우 (Eco2)	0.05

Table 2. Occurrence probability for node CR, SM, and IR affecting safety

안전성	노드 CR		노드 SM	
	CR1	CR2	SM1	SM2
Saf1	0.95	0.05	0.90	0.10
Saf2	0.80	0.20	0.05	0.95

Table 3. Occurrence probability for node PM, and DD affecting safety

경제성	노드 PM		노드 DD	
	PM1	PM2	DD1	DD2
Eco1	0.40	0.60	0.40	0.60
Eco2	0.90	0.10	0.90	0.10

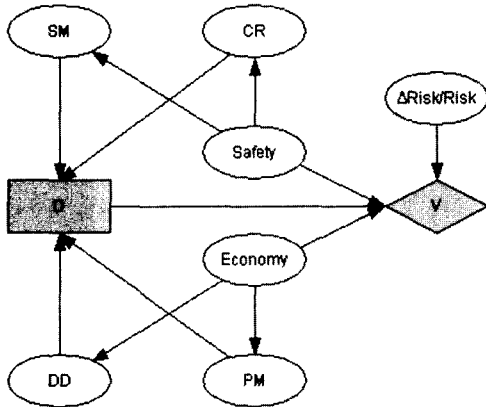


Fig. 3. Improved influence diagrams

<Fig. 3>에서와 같이 안전성은 CR, SM 노드에 영향을 준다. 요건 변경 시 발전소가 안전할 경우 (Saf1)에 제안된 개선 안이, 현 규제요건과 부합할 경우(CR1)의 확률을 0.95, 충분한 안전여유도를 유지할 경우(SM1)의 확률을 0.90이라 하고, 발전소가 안전하지 않을 경우(Saf2)에 제안된 개선 안이 현 규제요건과 부합하지 않을 경우(CR2)의 확률을 0.20, 충분한 안전 여유도를 유지하지 못할 경우 (SM1)의 확률을 0.95라 한다<Table 2>. 또한 경제성 (Economy)노드에 영향을 받는 노드 PM과 노드 DD에 대해서도 그 발생확률을 설정한다. 요건 변경 시 발전소의 경제성이 향상될 경우(Eco1)에, 제안된 개선 안의 심층방어가 구현될 경우(DD1)의 확률을 0.40, 변경에 대한 영향을 감시하기 위한 성능측정방안이 사용될 경우(PM1)의 확률을 0.40으로 설정하고, 요건 변경 시 발전소의 경제성이 감소할 경우 (Eco2)에 제안된 개선 안의 심층방어가 구현되지 않을 경우(DD2)의 확률을 0.10, 변경에 대한 영향을 감시하기 위한 성능측정방안이 사용되지 않을 경우 (PM2)의 확률을 0.10으로 설정하면 경제성에 영향을 받는 노드 PM과 DD의 데이터는 <Table 3>과 같다.

운영기술지침서 요건변경과 관련한 미국 원자력 규제위원회(NRC)의 위험도척도는 노심손상빈도 증가(ΔCDF), 대량초기누출빈도 증가($\Delta LERF$), 증가된 조건부 노심손상확률(ICCDP), 증가된 조건부 대량초기누출확률(ICLERF)이다^{5,6}. 관련된 위험도척도 모두를 영향도에 적용할 수 있으나 본 논문에서는 $\Delta CDF/CDF$ 를 영향도에 적용하였다. RG-1.174⁵에서 NRC가 제시한 ΔCDF 의 승인 기준치는 CDF의 1% 이내 증가(매우 작은 변경) 즉, ΔCDF 가 $1.0E-6$ 보다 작을 경우(구역 1)에 규제기관에서 제한을 크게 안 두고, 1%이상 10%미만 증가(작은 변경) 즉, CDF가 $1.0E-4$ 보다 작을 시에 ΔCDF 가 $1.0E-6$ 이상 $1.0E-5$ 이하(구역 2)이면 제한을 두고, $1.0E-5$ 이상(구역 3)의 ΔCDF 는 허용하지 않는다⁷. 따라서 이를 영향도의 노드 $\Delta Risk/Risk$ 에 적용하기 위해 구역 1의 범위에서는 승인 기준치 내에 있을 확률을 0.9, 구역 2에서는 0.6, 구역 3에서는 0.1로 설정한다. 참고문헌⁷에서 제안한 변경 계통 중, 저압안전주입계통을 영향도에 적용하면 위험도평가 결과 얻어진 저압안전주입계통의 ΔCDF 가 $6.0E-9$ 이므로 노드 $\Delta Risk/Risk$ 의 승인기준치 내에 있을 확률은 0.9이다.

여기서 가치노드 V의 만족도 값을 설정하여야 한다. 이를 위하여 가치노드에 영향을 주는 결정노드와 기회노드인 Safety, Economy, $\Delta Risk/Risk$ 노드에 대한 만족도를 결정한다. 의사결정에 따라 (Saf1, Eco1), (Saf1, Eco2), (Saf2, Eco1), (Saf2, Eco2)가 발생하는 경우에 각각 R1, R2가 발생하여 총 24가지 경우가 만족도에 영향을 미친다. 각 경우에 따른 의사결정의 만족도를 100으로 보았을 때, 불허하는 경우의 만족도와 승인하는 경우의 만족도의 합을 100으로 설정하고, 보류하는 경우의 만족도는 승인과 불허하는 경우의 만족도 차의 절대치를 만족도 100

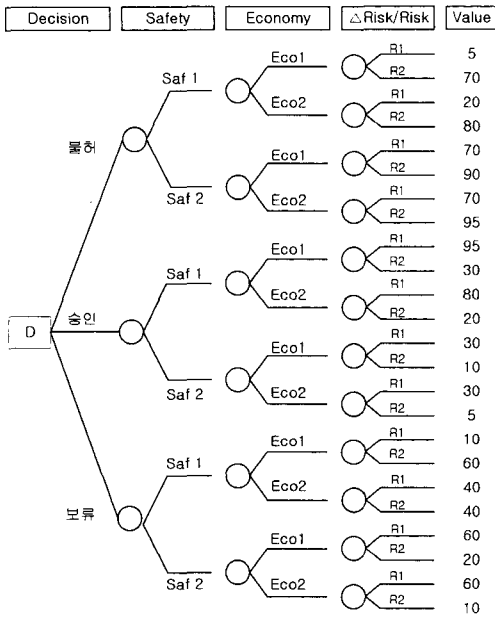


Fig. 4. Input for a value node

에서 빼어 줌으로써 승인하거나 불허한 경우의 만족도의 차이가 큰 경우에는 보류에 대한 만족도가 작게 되고, 만족도 차이가 작은 경우에는 보류에 대한 만족도가 크게 되도록 설정하였다. 의사결정자가 안전성에 중요성을 둘 경우, 발전소가 안전할 확률에 대한 만족도를 상대적으로 높게 가정하거나 발전소가 안전하지 않을 경우의 만족도를 상대적으로 낮게 가정하여 의사결정자의 의사를 영향도에 반영할 수 있다. 반대로 경제성에 중요성을 둘 경우에도 그러한 견해를 적용할 수 있다. <Fig. 4>에는 만족도에 대한 설정 값들이 나타나있다.

2.3. 정량화 결과

영향도를 기회노드 흡수 및 제거 기능에 의하여 베이저안과 전확률 이론으로 계산한 결과가 <Table 4>에 나타나 있다. 변경을 불허하는 경우의 만족도는 18.21, 변경을 승인하는 경우의 만족도는 81.80, 변경을 보류하는 경우의 만족도는 20.22이다. 제안된 요건으로 변경을 승인하는 경우의 만족도가 가장 크므로 의사결정자가 운영기술지침서의 요건변경을 승인하는 것이 최적화 방안임을 알 수 있다.

<Fig. 5>는 규제요건 변경 시 발전소가 안전할 경우의 확률이 다른 확률이 변화하지 않는다는 조건 하에서 변화할 때에, 최종 의사결정에 미치는 영향을 보여준다. 요건 변경 시 발전소가 안전할 경우

Table 4. Results of influence diagrams evaluation using bayesian theorem

기회 노드	설 명	발생 확률
CR	현 규제요건과 부합할 경우 (CR1)	0.94
	현 규제요건과 부합하지 않을 경우 (CR2)	0.07
DD	심층방어가 구현될 경우 (DD1)	0.43
	심층방어가 구현되지 않을 경우 (DD2)	0.58
SM	충분한 안전여유도를 유지할 경우 (SM1)	0.82
	충분한 안전여유도를 유지하지 못할 경우 (SM2)	0.19
PM	성능측정방안이 사용될 경우 (PM1)	0.43
	성능측정방안이 사용되지 않을 경우 (PM2)	0.58
△Risk/Risk	△Risk/Risk가 승인기준치 이내에 있을 경우 (R1)	0.90
	△Risk/Risk가 승인기준치 이내에 없을 경우 (R2)	0.10
Safety	요건 변경시 발전소가 안전할 경우 (Saf1)	0.90
	요건 변경시 발전소가 안전하지 않을 경우 (Saf2)	0.10
Economy	요건 변경시 발전소의 경제성이 향상될 경우 (Eco1)	0.95
	요건 변경시 발전소의 경제성이 감소할 경우 (Eco2)	0.05
Decision	변경을 불허하는 경우의 만족도	18.21
	변경을 승인하는 경우의 만족도	81.80
	변경을 보류하는 경우의 만족도	20.22

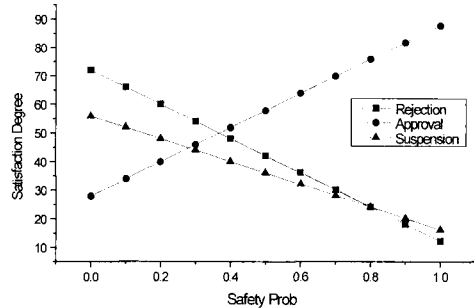


Fig. 5. Results of satisfaction with respect to P(Saf1)

(Saf1)의 확률이 0~1까지 변화할 때, 요건변경을 불허할 경우에는 $0 \leq P(\text{Saf1}) \leq 0.35$, 변경을 승인할 경우에는 $0.35 \leq P(\text{Saf1}) \leq 1$ 구간에서 가장 큰 만족도를 제공함을 알 수 있다.

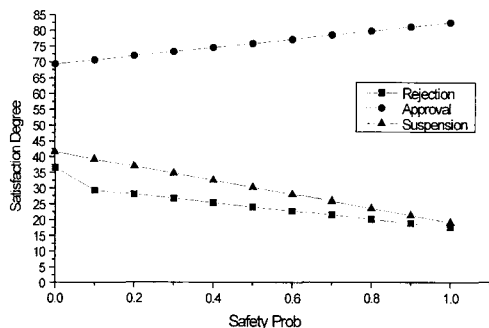


Fig. 6. Results of satisfaction with respect to P(Eco1)

또한, <Fig. 6>에서와 같이 요건변경 시, 발전소 경제성이 향상될 경우(Eco1)의 확률이 0~1까지 변화할 때, 전 구간에서 변경을 승인하는 것이 가장 큰 만족도를 제공한다. 이는 가치노드 V에 영향을 주는 노드 Safety와 Δ Risk/Risk가 높은 확률 값을 가져 상대적으로 경제성에 영향을 덜 받는다고 판단된다.

P(Saf1)과 P(Eco1)의 값이 동시에 변화할 때의 의사결정에 대한 만족도는 <Fig. 7>, <Fig. 8>, <Fig. 9>와 같이 분포한다. 각 의사결정에 대한 최대 만족도는 변경을 불허할 경우에는 (P(Saf1), P(Eco1))이 (0, 0)일 때 가장 만족도가 크고, 변경을 승인할 경우에는 (1, 1)이 가장 만족도가 크다. 변경을 보류할 경우에는 (0, 1)일 때 만족도 56으로 가장 크다.

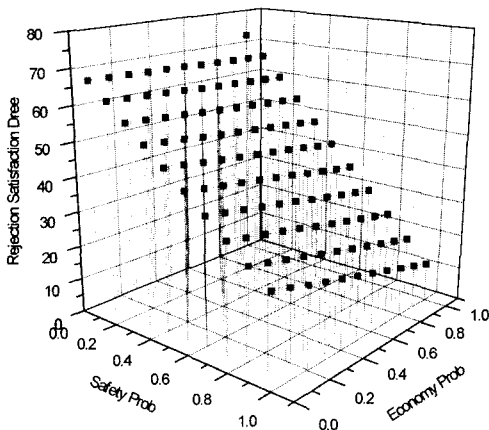


Fig. 7. Results of satisfaction with respect to P(Saf1) & P(Eco1) (Reject)

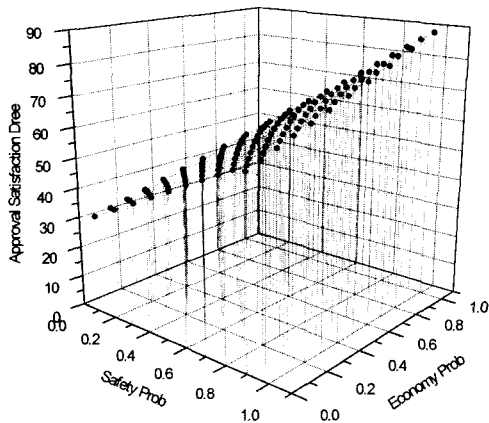


Fig. 8. Results of satisfaction with respect to P(Saf1) & P(Eco1) (Accept)

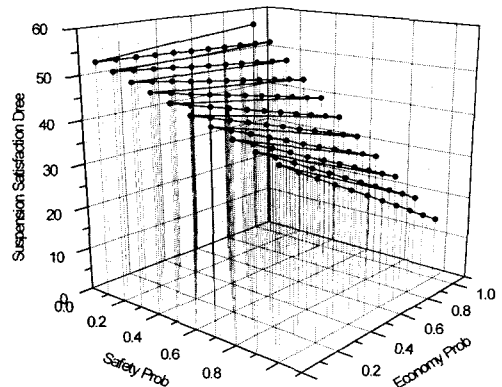


Fig. 9. Results of satisfaction with respect to P(Saf1) & P(Eco1) (Hold)

3. 결론

본 논문은 규제기관과 같은 의사결정자가 운영기술지침서의 요건변경 안을 검토하여 승인여부를 판단하는데 도움을 주기 위해 영향도를 이용한 방법론을 제시하여, 의사결정 문제를 정량적으로 평가하는 방법을 소개하였다. 이 방법은 영향도를 구성하여 기회노드 흡수 및 제거 기능에 의하여 베이지안과 전 확률 이론을 적용하여 정량화하는 과정을 포함하고 있다. 따라서 제시한 방법론은 운영기술지침서의 규제요건을 PSA 방법을 이용하여 개선해야 할 필요가 있을 경우, 운영기술지침서 개선 안의 승인 여부를 결정하는데 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글 : 본 연구는 한국원자력안전기술원과 방사선안전신기술연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 김인석 외, “위험도 기준 기술지침서 개선기술 개발,” 한국원자력안전기술원, 2001. 3.
- 2) Moosung Jae, George E. Apostolakis, “The Use of Influence Diagrams for Evaluating Severe Accident Management Strategies,” Nuclear Technology, vol. 99, No. 2, pp. 142-157, 1992.
- 3) 이윤중, “의사결정론,” 대광출판사, 1999. 2.
- 4) Y. Armand, et al, “The Process of Consulting Experts on the Reliability of the Equipment Challenged in Severe Accidents as Part of a Level 2 Probabilistic Safety Assessment(PSA2),” PSAM 5.

- 5) "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis," Regulatory Guide 1.174, Nuclear Regulatory Commission, 1998. 7.
- 6) "An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking: Technical Specifications," Regulatory Guide 1.177, Nuclear Regulatory Commission, 1998. 8.
- 7) 강대일 외, "위험도 정보를 이용한 울진 3,4호기의 허용정지시간 변경," KAERI/TR-1667/2000, 한국원자력연구소, 2000. 12.