

## 개선된 기술지침서 검토를 위한 의사결정 방법론 연구

### A Study on A Decision-making Methodology for Reviewing Improved Technical Specifications

17

19

#### 요 약

본 연구를 통하여 위험도 기반 기술 지침서의 개선 안을 검토하는데 이용될 의사결정 방법론을 개발하였다. 영향도를 이용하여 개발한 이 방법론은 예제 문제에 적용되었다. 본 연구의 수행 결과는 사업자가 제안하는 운영기술지침서를 의사결정자 또는 분석자로 하여금 체계적으로 검토하고 분석하게 함으로써 궁극적으로 원전의 안전성과 효율성 향상에 기여할 수 있을 것이다.

#### Abstract

This study has been done for developing a decision-making framework which is used for reviewing the improvements of the Risk Based Technical Specifications systematically. The developed framework using influence diagrams has been applied to an example problem. This work may contribute to enhancing both the safety and the efficiency of nuclear power plants by reviewing the changes of Technical Specifications proposed by the utility.

#### 1. 서 론

운영기술지침서를 원전의 안전성을 유지하고 향상시킬 수 있도록 개선하기 위해서는 허용정지시간(Allowed Outage Time: AOT)과 감시시험주기(Surveillance Test Interval: STI) 등과 같은 운영기술지침서의 여러 요구 사항들이 원전의 안전성에 미치는 영향을 상세히 분석하여야 한다. 이와 관련하여 많은 기술 및 경험이 축적되어 있는 확률론적 안전성 평가(PSA: Probabilistic Safety Assessment)를 이용하여 위험도 또는 안전성의 관점에서 원전을 더욱 효율적으로 규제하기 위해, 미국 NRC를 중심으로 위험도 기준 규제(Risk Informed Regulation; RIR)가 도입되었다[1]. 이러한 국제적 추세에 따라 국내에서도 운영기술지침서의 여러 가지 비효율적인 요구 사항들을 PSA 결과 및 위험도 정보를 이용하여 개선하기 위한 연구를 수행 중에 있다. 그러나 규제기관에서 이러한 운영기술지침서의 개선 안을 검토하기 위한 지침이 아직 마련되어 있지 않은 상태여서, 위험도를 반영한 운영기술지침서의 개선 안을 검토하기 위한 방법의 개발이 필요한 상황이다. 따라서 본 연구를 통하여 운영기술지침서의 개선안 검토 시에 영향도(Influence Diagrams)를 이용한 의사결정방법론을 개발하였으며, 이 방법론을 예제문제에 적용하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 영향도의 특징

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 사용한다. 영향도는 직접적으로 관련이 있는 노드들간의 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 유용하다[2]. 일반적으로 영향도의 기회노드는 두 가지 형태의 불확실성을 내포하고 있는 데, 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 구분된다[3].

### 2.2 영향도의 구성

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



그림 1. 변경에 대한 승인 여부를 결정하는 초기 영향도

규제기관의 의사결정 기준은 일반적으로 안전성(Safety)과 경제성(Economy)을 극대화시키는 데에 있다. 또한 위험도 관점에서, 승인기준치( $\Delta$ Risk/Risk)를 만족하여야 한다. 이러한 요소들은 가치노드인 만족도에 영향을 준다. 또한, 개선 안을 검토하기 위한 의사결정과정에서는 현재의 규제요건(Current Regulations; CR)과의 부합성, 심층방어(Defense in Depth; DD)의 구현, 충분한 안전여유도(Safety Margins; SM)의 유지, 요건 변경으로 인한 위험도를 감시하기 위한 성능측정(Performance Measurement; PM)방안의 사용과 같은 요소를 고려해야 한다. 위의 의사결정 요소와의 인과관계를 영향도에 적용하면 그 영향도는 <그림 2>와 같이 확장된다.

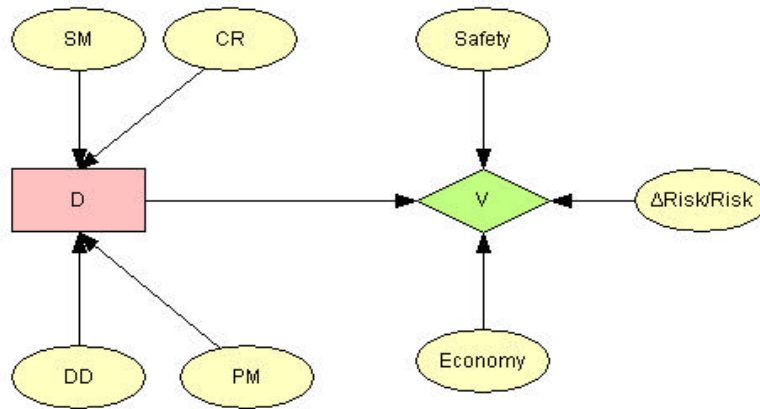


그림 2. 의사결정 요소를 적용한 영향도.

<그림 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 <그림 3>과 같이 확장된다.

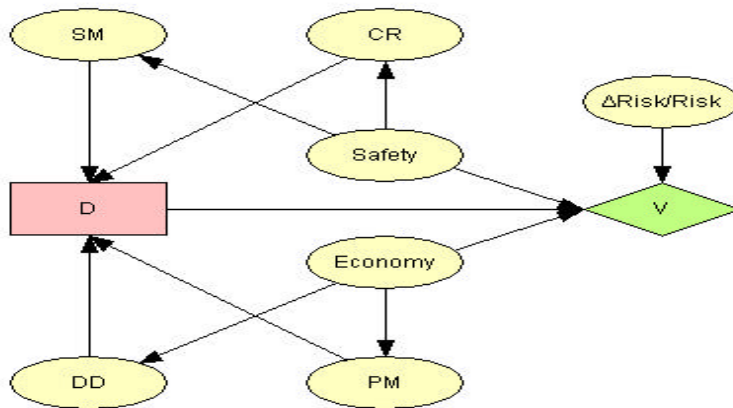


그림 3. 개선된 상세 영향도.

### 2.3 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 참고문헌

[2]의 기회노드 흡수 및 제거 기능에 의하여 베이지안과 정확률 이론으로 계산된다. 따라서 데이터에는 기본 확률과 조건부확률이 필요하며 이러한 데이터는, Y. Armand와 J.M. Mattéi 등이 제안한 방법에 의해 도출할 수 있다[4]. 이 방법은 전문가에 의한 확률자료 생산방법론으로 본 논문에서 사용된 데이터는 이 방법을 통해서 도출된 값으로 가정한다. 전문가에 의한 확률자료 생산방법론은 영향도의 기회노드가 필요로 하는 확률 평가에서 경험적인 자료가 없는 경우에 전문가의 의견을 체계적으로 집약해서 베이지안으로 자료를 생산하는 방법이다. 이 방법을 통해 도출된 값을 정량화에 사용하였다.

운영기술지침서의 요건을 변경할 경우에 발전소가 안전할 확률을 0.90, 발전소의 경제성이 향상될 경우를 0.95라 하면 노드 Safety와 Economy의 발생확률은 <표 1>과 같다. 각 경우의 확률은, 지수(Index)를 확률로 간주하여 그에 따른 영향도를 계산한 것이다.

표 1. 노드 Safety와 Economy의 발생확률

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

<그림 3>에서와 같이 안전성은 CR, SM 노드에 영향을 준다. 요건 변경시 발전소가 안전할 경우(Saf1)에 제안된 개선 안이, 현 규제요건과 부합할 경우(CR1)의 확률과 충분한 안전여유도를 유지할 경우(SM1)의 확률을 각각 0.95라 하고, 발전소가 안전하지 않을 경우(Saf2)에 제안된 개선 안이 현 규제요건과 부합하지 않을 경우(CR2)의 확률을 0.20, 충분한 안전 여유도를 유지하지 못 할 경우(SM1)의 확률을 0.95라 한다<표 2>. 또한 경제성(Economy)노드에 영향을 받는 노드 PM과 노드 DD에 대해서도 그 발생확률을 설정한다. 요건 변경시 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 변경시 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 <표 3>과 같다.

운영기술지침서 요건변경과 관련한 NRC의 위험도척도는 노심손상빈도 증가( $\Delta CDF$ ), 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-1.174[5]에서 NRC가 제시한  $\Delta CDF$ 의 승인 기준치는 CDF의 1%이내 증가(매우 작은 변경) 즉,  $\Delta CDF$ 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  $\Delta CDF$ 가  $1.0E-6$  이상  $1.0E-5$  이하(구역 2)이면 제한을 두고,  $1.0E-5$  이상(구역 3)의  $\Delta CDF$ 는 허용하지 않는다[7]. 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. 참고문헌 [7]에서 제안한 변경 계통 중, 저압안전주입계통을 영향도에 적용하면 위험도평가 결과 얻어진 저압안전주입계통의  $\Delta CDF$ 가  $6.0E-9$ 이므로 노드  $\Delta Risk/Risk$ 의 승인기준치 내에 있을 확률은 0.9이다.

표 2. 안전성에 영향을 받는 CR, SM, IR 노드의 발생확률

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

표 3. 경제성에 영향을 받는 PM, DD 노드의 발생확률

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

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 24 가지 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 100에서 빼어 줌으로써 승인하거나 불허한 경우의 만족도의 차이가 큰 경우에는 보류에 대한 만족도가 작게 되고, 만족도 차이가 작은 경우에는 보류에 대한 만족도가 크게 되도록 설정하였다. 의사결정론자가 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. <그림 4>에는 만족도에 대한 설정 값들이 나타나있다.

## 2.4 결과

영향도를 기회노드 흡수 및 제거 기능에 의하여 베이지안과 전확률 이론으로 계산한 결과가 <표 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 요건을 승인하는 것이 최적화 방안임을 알 수 있다.

<그림 5>는 규제요건 변경시 발전소가 안전할 경우의 확률이, 다른 확률이 변화하지 않는다는 조건하에서, 변화할 때에 최종 의사결정에 미치는 영향을 보여준다. 요건 변경시 발전소가 안전할 경우(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.

또한, <그림 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  $\Delta$ Risk/Risk가 높은 확률값을 가져 상대적으로 경제성에 영향을 덜 받는다고 판단된다.

$P(\text{Saf1})$ 과  $P(\text{Eco1})$ 의 값이 동시에 변화할 때의 각 의사결정에 대한 만족도는 <그림 7>, <그림 8>, <그림 9>와 같이 분포한다. 각 의사결정에 대한 최대 만족도는 변경을 불허할 경우에는 ( $P(\text{Saf1})$ ,  $P(\text{Eco1})$ )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.

표 4. Influence Diagrams에 대한 베이지안 수행결과

기회노드	설 명	발생확률
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 승인가준치 이내에 있을 경우(R1)	0.90
	△Risk/Risk가 승인가준치 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
<b>Decision</b>	변경을 불허하는 경우의 만족도	<b>18.21</b>
	변경을 승인하는 경우의 만족도	<b>81.80</b>
	변경을 보류하는 경우의 만족도	<b>20.22</b>

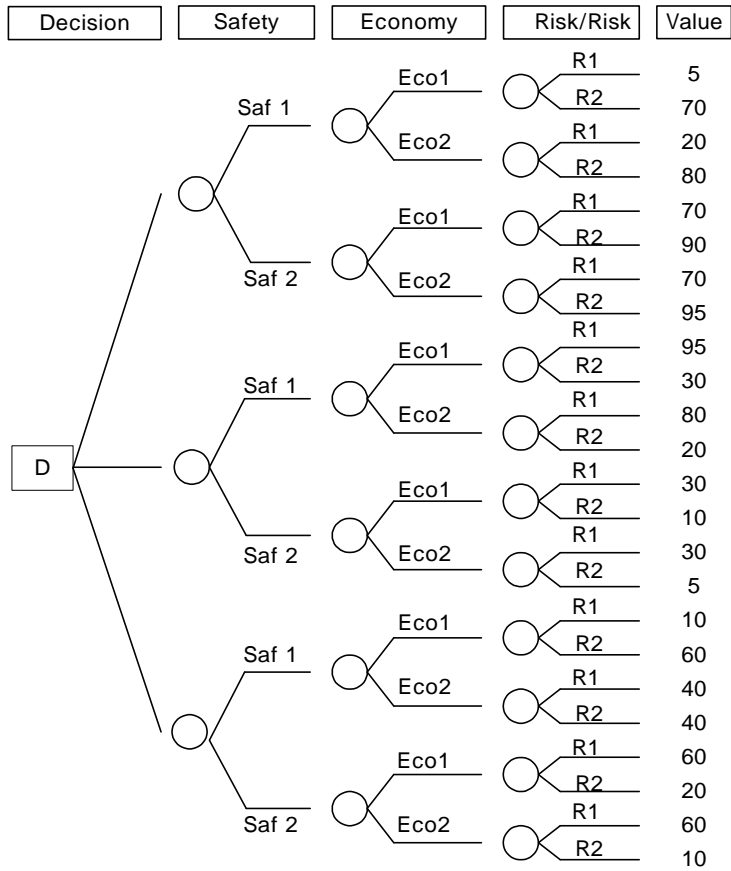


그림 4. 가치노드에 사용한 입력자료

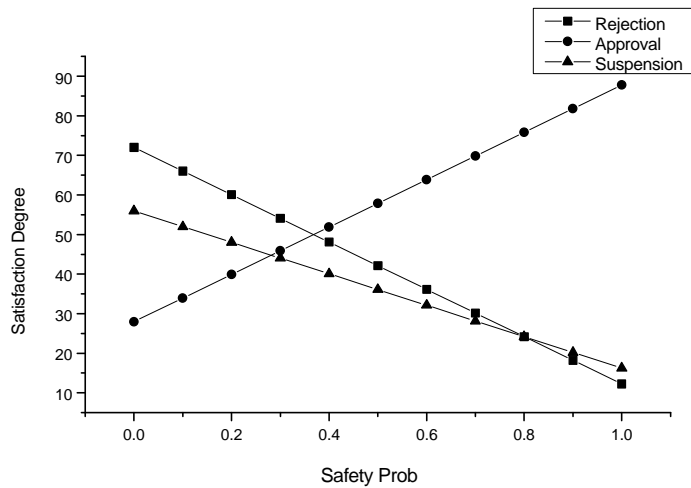


그림 5. P(Saf1)에 따른 만족도의 변화

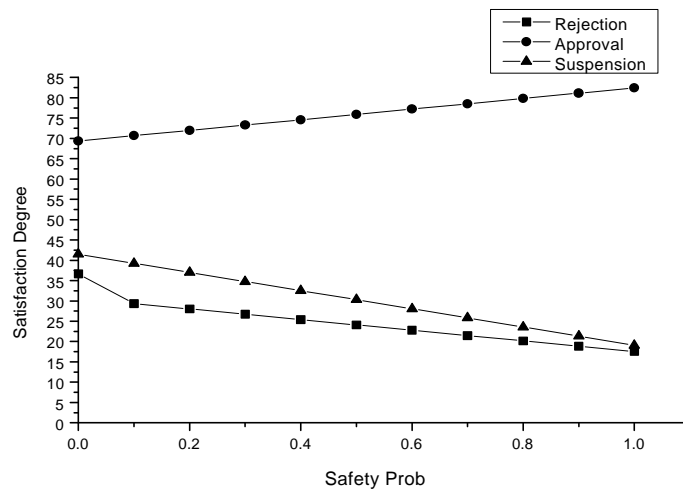


그림 6. P(Eco1)에 따른 만족도의 변화

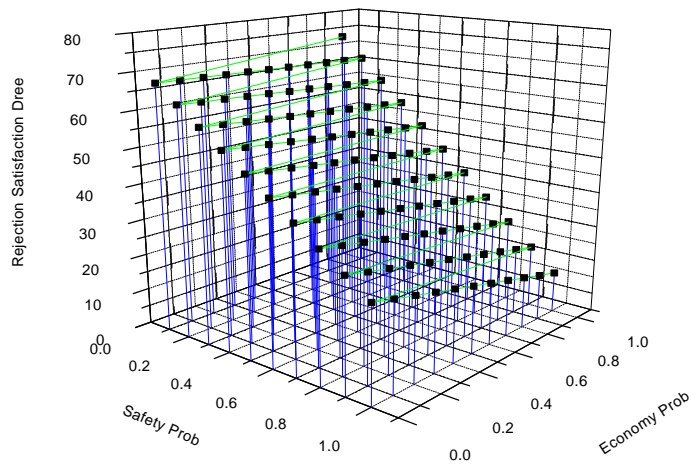


그림 7. P(Saf1)와 P(Eco1)에 따른 만족도(변경불허)의 변화



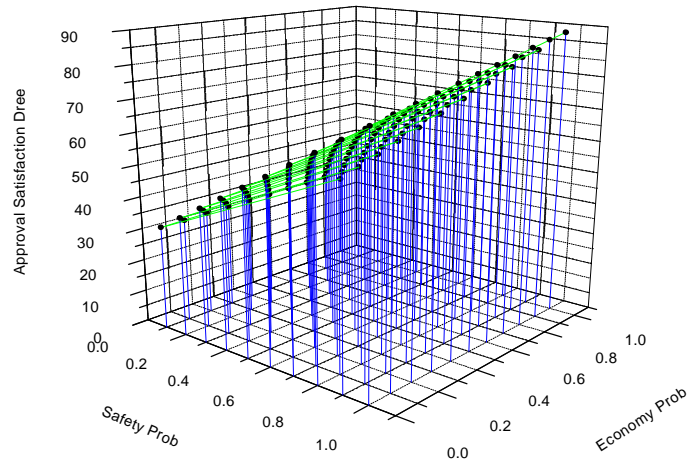


그림 8. P(Saf1)와 P(Eco1)에 따른 만족도(변경승인)의 변화

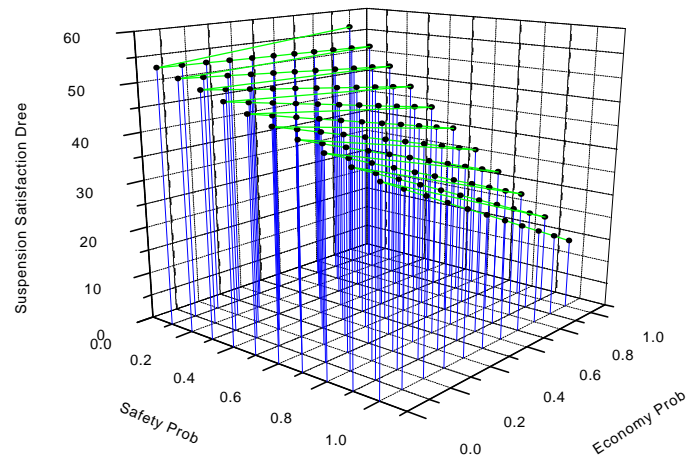


그림 9. P(Saf1)와 P(Eco1)에 따른 만족도(변경보류)의 변화

### 3. 결론

운영기술지침서의 비효율적이고 비합리적인 규제요건은 체계적이고 과학적인 방법을 통하여 개선되어야 한다. 본 연구는 규제기관과 같은 의사결정자가 운영기술지침서의 요건변경 안을 검토하여 승인여부를 판단하는데 도움을 주기 위해 영향도를 이용하는 방법론을 제시하여, 의사결정문제를 정량적으로 평가하는 방법을 소개하였다. 이 방법은 불확실한 데이터와 정보들 간의 조건적인 의존성을 표현하는 노드들과 조건적이고 정보적인 방향성을 가지는 아크들로 이루어진 연결망인 영향도를 구성하여 기회노드 흡수 및 제거 기능에 의

하여 베이지안과 정확률 이론을 적용하여 정량화하는 과정을 포함하고 있다. 본 논문에서 제시한 방법론은 운영기술지침서의 규제요건을 PSA 방법을 이용하여 개선해야 할 필요가 있을 경우 운영기술지침서의 개선안의 승인여부를 결정하는데 기여할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국원자력안전기술원의 “위험도 기준 운영기술지침서 개선 연구” 과제수행의 일환으로 수행된 것입니다.

## 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, 1998. 7.
- [6] “An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking: Technical Specifications,” Regulatory Guide 1.177, 1998. 8.
- [7] 강대일 외, “위험도 정보를 이용한 울진 3,4호기의 허용정지시간 변경,” KAERI/TR-1667/2000, 한국원자력연구소, 2000. 12.