

Decision Analysis를 이용한 원전 기기 최적교체시기 결정방법

Methodology to Decide Optimum Replacement Term for Components of Nuclear Power Plants Using Decision Analysis

문호림, 장창희, 박준현, 정일석

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소 주요기기의 교체에 대한 경제성평가는 대부분 결정론적 방법으로 수행하고 있으나 불확실성을 가진 입력변수에 따라 결과값이 매우 가변적일 수 있다. 현실세계의 불확실성을 보다 면밀히 고려하기 위해 확률론적 방법을 활용하고 있다. 본 논문에서는 decision analysis를 이용하여 원자력발전소 기기 교체에 대한 경제성평가를 확률론적 방법으로 수행하였다. Decision analysis는 불확실성과 위험에 직면한 선택을 이끄는 기회를 이성적으로 개선하기 위한 방법론이며, 확률론과 통계이론이 복합되어 있다. Decision analysis의 주요요소는 여러 가지 방안 중 선택한 대안, 선택으로부터 결정된 결과, 그리고 다른 대안과 비교해서 상대적인 우선순위이다. 또한, decision analysis는 값, 불확실성, 그리고 위험도를 구조적으로 통합하는 원리를 제공한다. Decision analysis의 중요한 이점은 이러한 불확실성과 위험도에 대한 처리에 있으며, 모델은 influence diagram과 decision tree를 이용하여 작성한다. 본 논문에서는 decision analysis를 이용하여 국내 A형 원자력발전소 증기발생기의 최적교체시기를 결정하여 보았다. 이러한 방법은 향후 원자력발전소 주요기기의 교체에 관한 경제성평가가 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

Mostly, the economic analyses for replacement of major components of nuclear power plants(NPPs) have been performed in deterministic ways. However, the analysis results are more or less affected by the uncertainties associated with input variables. Therefore, it is desirable to use a probabilistic economic analysis method to properly consider uncertainty of real problem. In this paper, the probabilistic economic analysis method and decision analysis technique are briefly described. The probabilistic economy analysis method using decision analysis will provide efficient and accurate way of economic analysis for the repair and/or replace major components of NPPs.

1. 서 론

원자력발전소는 고온, 고압의 열악한 환경하에서 가동되며 이로 인해 부식, 기계적 응력 및 진동 등이 지속적으로 작용한다. 이러한 가동중 발생조건으로 인해 주요기기에서의 결함발생 가능성이 있다. 특히, 증기발생기는 1 개당 3,000~9,000여 개의 전열관으로 구성되어있으며 이들 전열관에서 발생하는 결함은 발전소의 안정적인 운전에 중요한 문제이다.

원자력발전소의 가동년수가 증가할수록 균열이 발생한 증기발생기 전열관의 개수가 증가하고 또 개별 균열의 크기도 계속 성장하는 경향을 보인다. 이로 인해 증기발생기의 누설 및 관막음율이 증가하고 발전량 손실을 유발한다. 발전량 손실은 소비자와 전력회사 모두에게 경제적 손실로서 추가적인 경비비용 발생과 증기발생기의 조기교체를 고려해야하는 경우도 발생할 수 있다. 실제로 미국, 독일, 그리고 일본 등의 총 51 개 원자력발전소에서 150 개의 증기발생기를 교체하였다[1]. 국내에서도 1998년 고리 1호기 증기발생기를 교체한 바 있다. 그러나, 이러한 증기발생기 교체는 많은 예산이 소요되고 경영상의 주요판단이므로 면밀한 경제성평가를 근거로 교체여부 또는 교체시기에 대한 결론을 도출해야 한다.

국외에서는 미국, 일본 등, 원자력산업 선진국을 중심으로 증기발생기 교체의 경제성에 대한 연구가 추진되어 왔다. EPRI(Electric Power Research Institute)[2]와 Westinghouse에서 증기발생기에 대한 경제성평가 방법이 개발되었으며, 최근에 EPRI에서는 Calvert Cliffs 원자력발전소의 대상으로 인허가 갱신(licence renewal)를 목적으로 증기발생기 교체에 대한 연구[3]를 수행하였다. 국내에서는 한국전력공사에서 고리 원자력발전소 1호기[4]와 울진 원자력발전소 1·2호기 증기발생기[5]의 교체 타당성 및 최적 교체시기 결정에 대한 연구를 수행한 바 있다. 그러나 이들 연구의 대부분은 결정론적 시뮬레이션(deterministic simulation)으로 불확실성(uncertainty)을 가진 변수의 변화에 따라 결과값에 영향을 미치는 정도가 크며 현실세계의 불확실성을 묘사하기에는 다소 부족한 면이 있다. 현실세계의 불확실성을 고려하기 위해서는 결정론적 방법보다는 확률론적 경제성평가를 수행하여야 한다[6].

본 논문에서는 기기 교체에 대한 경제성평가를 decision analysis 방법으로 수행하였다. 이를 통해, 첫째, 국내 운전중인 A형 원자력발전소 증기발생기를 대상으로 decision analysis를 이용한 경제성평가를 시범적으로 수행하여 최적교체시기를 결정하여 보았다. 둘째, 이를 향후 발생할 것으로 예측되어지는 증기발생기를 비롯한 원자력발전소 주요기기의 교체에 관한 경제성평가지 적용할 수 있도록 하고자 한다.

2. 관련이론

2.1 Probability Theory

확률론의 기본이론은 첫째, 확률(p)은 항상 양수이며 0과 1사이에 있어야 한다($0 \leq p \leq 1$). 즉 100%보다 큰 chance가 있을 수 없고 0%보다 작은 chance가 있을 수 없다.

둘째, 두 결과값이 상호 배타적이라고 가정하면(only one can happen, not both), 하나 또는 다른 것이 발생할 확률은 개개의 확률의 합으로 구할 수 있다. 이것을 수학적으로 표시하면 다음과 같다.

$$P(A_1 \text{ or } A_2) = P(A_1) + P(A_2) \quad \text{if } A_1 \text{ and } A_2 \text{ cannot both happen}$$

셋째, 결과의 set이 mutually exclusive하고 collectively exhaustive라고 가정하면, 가능한 결과가 모두 발생해야하고, 이러한 set의 확률의 합은 1이어야 한다.

넷째, 조건부 확률(conditional probability)이다. 조건부 확률, $P(A/B)$ 는 B가 발생한다고 주어졌을 때 A가 발생할 확률을 의미하며 이를 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

$$P(A/B) = \frac{P(A \text{ and } B)}{P(B)} \quad (1)$$

다섯째, 독립(independence)이다. A와 B가 서로 independence 하다는 것은 A와 B가 발생할 때 서로에게 어떤 영향도 주지 않는다는 것을 의미하며 이를 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

$$P(A) = P(A/B) = \frac{P(A \text{ and } B)}{P(B)} \quad (2)$$

여섯째, bayesian theorem이다. 이것은 Conditional probability로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$P(B/A) P(A) = P(A/B) P(B) \quad (3)$$

이것을 다시 정리하면 식 (4)와 같다.

$$P(B/A) P(A) = \frac{P(A/B) P(B)}{P(A)} \quad (4)$$

식 (4)를 Bayesian theorem이라 하며 decision analysis에서 주로 사용되는 공식이다.

2.2 Decision Analysis

Decision analysis는 불확실하고 위험에 직면한 선택을 이끄는 기회를 이성적으로 개선하기 위한 방법론이다. Decision analysis는 불확실성에 의해서 영향을 받는 복잡한 상황에 대한 의사결정(decision making)의 질을 촉진시킨다. Decision analysis는 값(value), 불확실성(uncertainty), 그리고 위험도(risk)를 구조적으로 통합하는 원리(philosophy)를 제공한다.

Decision analysis는 확률론(probability), 통계이론(statistical theory) 등의 요소가 복합되어 있으며, 중요한 이점은 불확실성과 위험도에 대한 처리에 있다. Decision analysis의 주요요소는 여러 가지 방안 중 선택한 대안(alternative), 선택으로부터 결정된 결과(consequences or outcome), 그리고 다른 대안과 비교해서 상대적인 우선순위(preference)이다. 확률론적 평가(Probability analysis)는 불확실성을 모델링하기 위한 기본 개념과 도구를 decision analysis에 제공한다. Decision analysis는 “a formalization of common sense for decision problems that are too complex for the informal use of common sense”[7]로써 정의 할 수 있다. 이러한 decision analysis시에 일반적으로 influence diagram과 decision tree를 이용한다.

Influence diagram은 강력한 structuring tool이다. Chance nodes(uncertainties)는 타원형으로 decision nodes는 사각형으로 나타낸다.

둥근 사각형은 mathematical calculation 또는 constant value를 나타내며, 특히, consequence로 표현하는 것이 가장 중요하다. 이러한 세 가지 형상은 일반적으로 node로써 언급한다. 즉 influence diagram은 decision node, chance node, consequence or calculation node로 구성된다. Node는 화살표로 연결되며, 화살표는 인과관계를 나타낸 것이 아니라, 확률론적 영향(probabilistic influence)의 흐름을 표현한다. Fig. 1과 같이 node 'A'에서 chance node 'B'로 화살이 연결되었다면 'B'의 확률은 A의 결과에 의존한다는 것을 의미한다. 여기서, 화살표가 시작되는 노드를 predecessor라 하고 화살표의 끝에 있는 노드를 successor라고 한다.

Decision tree는 influence diagram과 함께 자주 사용되는 structuring tool이다. Decision tree는 influence diagram에 숨겨져 있는 내용을 쉽게 표현할 수 있으며 influence diagram의 모든 node로부터 추출한다. Fig. 2는 decision tree의 예로서 사각형은 decision node를 나타내고, chance node는 타원형으로 표현된다. 각 가지(branch)는 node로부터 분기되며 만들어질 수 있는 choice를 나타낸다. 세 번째 decision 요소인 consequence node는 가지의 끝에 표시된다.

Decision tree의 표현상 특징은 첫째, decision node로부터 가지로 표현된 option중에서 의사결정자에 의해 한 가지만 선택되어야 한다. 즉 양쪽 또는 모두 다 선택되어질 수 없다. 둘째, decision tree에 결정에 대한 모든 choice와 chance에 대한 모든 결과가 포함되어져야 한다.

Fig. 3은 decision analysis 과정의 흐름도이다[8]. 1단계에서는 의사결정자가 의사결정 상황(decision situation)을 규명하고 그 상황의 목적을 이해하는 단계이다. 이 단계에서 해결하기 위한 결정과 풀기 위한 문제를 발견하기 어려울 수 있으며, 이로 인해 정확한 문제를 규명하기에 어려울 수 있고, 종종 잘못된 문제를 다룰 수도 있다. 이것을 “error of the third kind”라고 한다. 따라서 decision identification은 매우 중요하다. 예를 들어 표면적 문제(surface problem)는 현실적 문제(real issue)를 숨길 수 있다. 의사결정 상황에 관한 이해는 매우 중요한 1단계의 목적이고 많은 내적관찰을 포함한다. 의사결정 상황에 대한 중대한 목적의 분명한 이해를 얻는 것은 analysis 계획이 세밀히 완성되기 전에 수행되어야 한다.

2단계에서는 1단계의 목적에 대한 지식을 바탕으로 대안을 규명한다. 그러나 이 단계에서는 결과를 어떻게 측정해야하는 것과 분석에서 고려해야 할 불확실성의 종류가 무엇인지를 포함하고 있지는 않다. 의사결정 상황과 적절한 목적을 수립함과 더불어 대안의 창출이 이루어져야 한다. 종종 주의 깊은 목적에 대한 조사 및 분석은 착수단계에서 분명하지 않았던 대안을 드러낼 수 있다.

3단계는 모델링과 해결(solution) 단계이다. 이 단계는 세 개의 level로 나눌 수 있다. 첫 번째

level에서는 다룰 수 있는 작은 조각으로 문제를 구조화한다. 의사결정자에 의한 부수적인 분해는 문제의 다른 부분에 대한 불확실성의 고려와 목적에 대한 다른 관점에서 주의 깊은 고려가 필요할 것이다. 모델링에 대한 새로운 생각은 decision analysis에서 매우 중요한 문제이다. 다음 level에서는 문제를 표현(representation)하고 모델을 생성하기 위해 influence diagram과 decision tree를 사용한다. 문제에 대한 고유한 불확실성의 모델을 작성하기 위해 확률론을 사용하며, 다양한 목적들 사이의 관계를 이해하기 위해 hierarchical 또는 network 모델을 사용한다. 이러한 모델은 수치적으로 보여주며, 표면적으로 나타나지 않고 이해하기 힘든 것을 쉽게 알 수 있도록 도와준다. Decision making perspective로부터 주요한 이점은 결정에 대한 수치적인 표현(mathematical representation)이 우선적인 대안을 지시할 수 있다는 것이다.

Decision analysis는 전형적인 반복과정이다. 원형 모델을 작성한 후 민감도분석을 수행하여야 한다. 이때 모델의 한 개 또는 그 이상의 관점에서 약간의 변화가 있을 때, 최적의 결정이 변화하는 지를 검토한다. 만약에 영향을 준다면, 결정은 작은 변화에 민감하다고 판단할 수 있으며, 의사결정자는 결정이 민감하다는 관점에서 모델을 좀 더 면밀하게 재고하여야 한다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 의사결정자는 1단계로 되돌아가서 이전 모델에서 포함하지 않았던 목적을 포함하여 목적을 수정하여야 한다. 이에 따라서 새로운 대안을 다시 규명하고, 모델 구조도 수정해야 할 것이다. 불확실성과 우선순위를 재설정하는 과정이 뒤따르게 될 것이다. 이처럼 decision analysis는 만족할 만한 해결책을 발견하기까지 여러 번의 반복을 거쳐야 한다.

이러한 반복적 과정의 경우에, 문제에 대한 의사결정자의 인식은 변화하고, 다양한 불확실성을 가진 사건이 일어날 가능성에 신뢰가 발달하고 변화할 것이다. 전에 고려되지 않았던 결과에 대한 우선순위는 새로운 생각의 반영으로 점점 완성도가 높아질 것이다. Decision analysis는 결정에 대해 생각해야 할 구조화된 방법을 제공할 뿐만 아니라 의사결정자가 신뢰할 수 있는 기초적인 구조를 제공한다.

3. 경제성평가

3.1 평가방법

경제성이란 최소의 비용을 투입하여 최대의 효과를 얻고자 하는 것이며 경제성평가란 최소비용의 투자로 최대의 투자효과를 얻기 위한 방안을 모색하는 것을 말한다[9]. 즉, 임의의 투자비용에 대해 최대의 이득을 도출할 수 있는 방법을 정량적으로 판단하는 것이다. 이를 위해서는 각 대안 별로 예상되는 투자액 및 이에 대한 이득을 일정한 기준에 따라 평가하고 여러 투자대안 중 어떤 안이 최대의 효과를 나타내는지를 분석해야 한다. 이와 같이 경제성평가는 “최소비용에 의한 최대효과”를 나타내는 투자대안을 선정하기 위한 것이지만, 경우에 따라서는 단순히 “최소비용” 혹은 “최대비용” 혹은 “최대효과”를 나타내는 투자대안을 선정하기도 한다. 투자대안을 선택하는 기준으로는 다음과 같은 것들이 있다[10].

- 사용할 수 있는 투자자금이 고정된 경우에는 수입 또는 효과가 최대가 되어야 한다. 이때의 기준은 “최대효과”이다.
- 효과 또는 수입이 고정된 경우에는 “최소비용”이 기준이 된다.
- 비용과 효과가 고정되어 있지 않은 경우에는 비용과 얻어진 효과의 차가 가장 큰 것, 즉 “최소비용에 의한 최대효과”가 기준이 된다.

본 논문에서 수행한 증기발생기 교체에 대한 경제성평가는 세 가지 투자대안 중 동일한 송전단 전력을 생산, 즉 수입이 고정된다고 가정하고 소요되는 비용들을 비교함으로써 “최소비용”을 나타내는 투자대안을 선택하였다. 이 경우 증기발생기의 검사비용, 정비비용, 교체이득, 교체비용, 그리고 정지기간의 연장에 따른 전력손실 등을 비용으로 간주하고 이것들을 모두 합하여 총비용을 구한다. 즉, 총비용이 가장 작은 것을 경제성이 있는 방안으로 선정하는 방법이다.

3.2 입력변수 및 평가모델

입력변수는 크게 일반변수, 성능변수, 검사 및 정비변수 그리고 교체관련변수로 구분하였으며 그 상세 구성항목은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Input variables for economic analysis.

구분	구성항목
일반변수	기준년도, 실질할인율, 장기 대체전력비 단가, 단기 대체전력비 단가
성능변수	원전출력, 연료주기, 계획정지기간, 이용률, 소내전력률, 불시정지빈도, 불시정지기간
검사 및 정비변수	세관 검사물량, 세관 검사비용, 세관 정비비용, 세관 정비물량, 세관 정비비용, 세관 정비기간, 피폭량, 피폭비용
교체관련변수	교체비용, 교체년도, 교체기간, 교체 후 출력변화, 출력상승(power uprating)비용, 출력상승으로 인한 출력증가

Fig. 4는 증기발생기 최적교체시기 결정을 위한 influence diagram이다. 교체시기는 확률론적 경제성평가의 결과[11]를 토대로 17, 18, 21, 22, 23 그리고 수명말기로 예측되는 30 주기¹⁾로 선정하였으며, 검사비용, 정비비용, 교체이득, 교체비용, 대체전력비용으로 나누어 모델링하였다. 각각의 비용에 영향을 주는 인자로 피폭비용, 출력상승효과, 불시정지빈도, 그리고 불시정지기간을 선정하였으며, 실질할인율의 변화를 고려하였다.

Influence diagram을 토대로 decision tree를 작성하였다. Decision tree의 입력변수 및 입력값은 확률론적 경제성 평가결과[11]를 이용하였다. 즉, 확률론적 경제성 평가결과를 이용하여 실질할인율에 따른 피폭비용, 출력상승효과, 불시정지빈도, 그리고 불시정지기간에 대한 기대값과 확률을 결정하였다. 그러나, 미래상황에 대한 예측이 어렵고 충분한 데이터가 없는 변수에 대해서는 발생 확률을 동일한 값으로 주었다.

Fig. 5는 증기발생기 최적교체시기결정을 위한 decision tree의 주모델이다. 주모델은 검사비용, 정비비용, 교체이득, 교체비용, 및 대체전력비용의 부속모델로 나누어 구성하였으며 각각의 부속 모델에서 계산된 값이 주 모델에서 합해지도록 하였다. 최종 계산결과는 현가화된 총누적비용이다. Fig. 6~10은 부속 모델로서 각각 검사비용, 정비비용, 교체이득, 교체비용 및 대체전력비용 계산을 위한 decision tree이다. 검사비용, 정비비용, 교체이득, 교체비용 및 대체전력비용의 부속 모델은 각각 18개의 작은 모델로 나누어 구성하였다. 이는 실질할인율과 교체시기에 따른 값 차이를 세분하여 입력할 수 있도록 하기 위함이다.

4. 평가 결과

Decision analysis 결과, 17·18·21·22·23·30 주기중 현가화된 총누적비용이 최소값을 나타낸 교체시기는 18 주기로 나타났으며, 이에 대한 결과를 Fig. 11~12에 나타내었다. Fig. 11과 12에서 알 수 있듯이, 현가화된 총누적비용이 평균은 783.14에서 893.73억 원, 표준편차는 44.32에서 101.77억 원이다. Fig. 13에 확률론적 경제성평가 결과 중 왜도를 도시하였다. 경제성평가 결과, 분포의 치우친 정도를 측정하는 분석도구인 왜도의 값이 0.19에서 -0.65로 그 값이 0에 가까우므로 좌우대칭에 가까운 모양을 갖는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 14에는 최적교체시기로 나타난 18주기에 대한 확률과 값을 도시하였다. 즉, 경제성평가 결과, 최적교체시기는 18주기이고, 실질할인율이 9.5%일 때, 현가화된 총누적비용이 717.28로 가장 작고 실질할인율이 7.5%일 때는 836.38로 가장 크다.

5. 결론

본 논문에서는 decision analysis를 이용하여 증기발생기 교체에 대한 경제성평가를 확률론적 방법으로 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 핵연료주기

- (1) 국내 A형 원자력발전소 증기발생기를 대상으로 증기발생기 교체에 대한 경제성평가를 decision analysis 기법을 이용하여 수행하였다.
- (2) Decision analysis를 이용한 확률론적 경제성평가 결과, 증기발생기 최적교체시기는 17·18·21·22·23·30 주기중 현가화된 총누적비용이 최소값을 나타낸 18주기에 교체하는 것이 경제적이다.
- (3) 본 논문에서 사용한 decision analysis를 이용한 확률론적 경제성평가 방법이 향후 국내 원자력발전소의 주요기기 교체에 대한 경제성평가지 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Electric Power Research Institute, *Steam Generator Progress Report, Revision 14, NP-106365-R14*, 1994.
- [2] Electric Power Research Institute, *PWR Steam Generator Cost-Benefit Methodology -Denting, NP-2295*, 1982.
- [3] Electric Power Research Institute, *Calvert Cliffs Nuclear Power Plant Life Cycle Management/License Renewal Program, Steam Generator Decision Analysis, TR-104732*, 1995.
- [4] 한국전력공사, *고리 1호기 증기발생기 교체 타당성 검토 용역, 제 1단계: 증기발생기 교체 필요성 및 최적 교체시기 결정*, 1993.
- [5] 전력연구원, *울진 원전 1·2호기 증기발생기 종합대책 수립, TM.99NP09.T1999.770*, 1999.
- [6] A. M. Law and W. D. Kelton, *Simulation Modeling & Analysis*, McGraw-Hill, Inc., 1991.
- [7] R. L. Keeny, *Decision Analysis: An Overview, Operations research*, Vol.30, No.5, 1982, pp.803-838.
- [8] R. T. Clemen, *Making Hard Decision: An Introduction to Decision Analysis*, Dexbury Press, 2nd Edition, 1996.
- [9] 함효준, *경제성공학*, 동헌출판사, 1999.
- [10] 한국전력공사 전력경제처, *전력경제론*, 제 4권, 전력설비투자이론, 1995.
- [11] 문호림, 장창희, 박준현, 정일석, "원전 증기발생기 교체에 대한 확률론적 경제성평가 방법," 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2000.

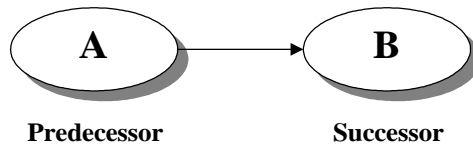


Fig. 1 Example of influence diagram.

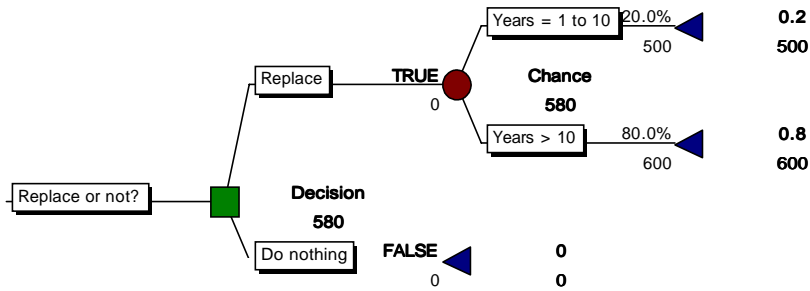


Fig. 2 Example of decision tree.

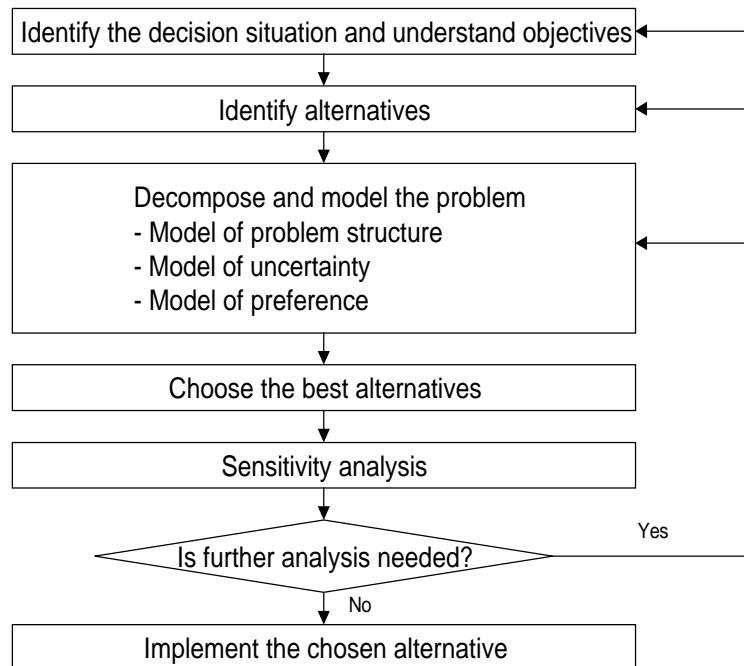


Fig. 3 A decision analysis process flowchart.

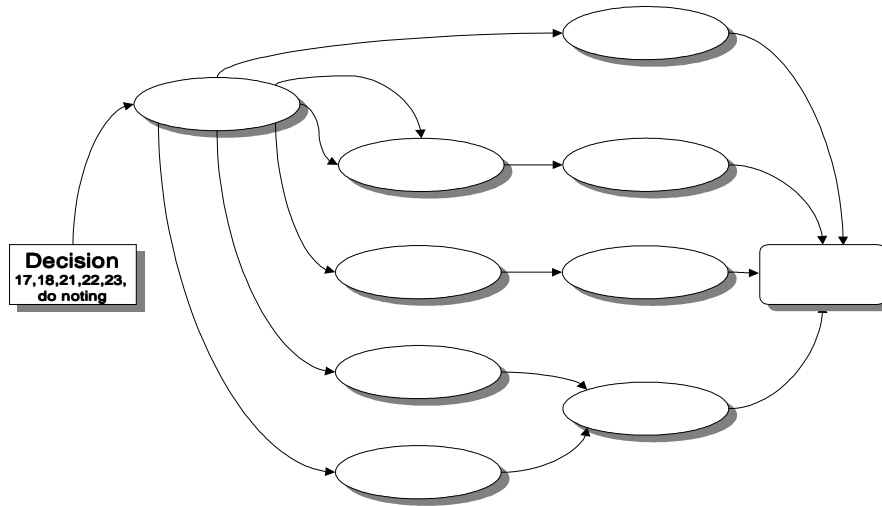


Fig. 4 Influence diagram for economic analysis.

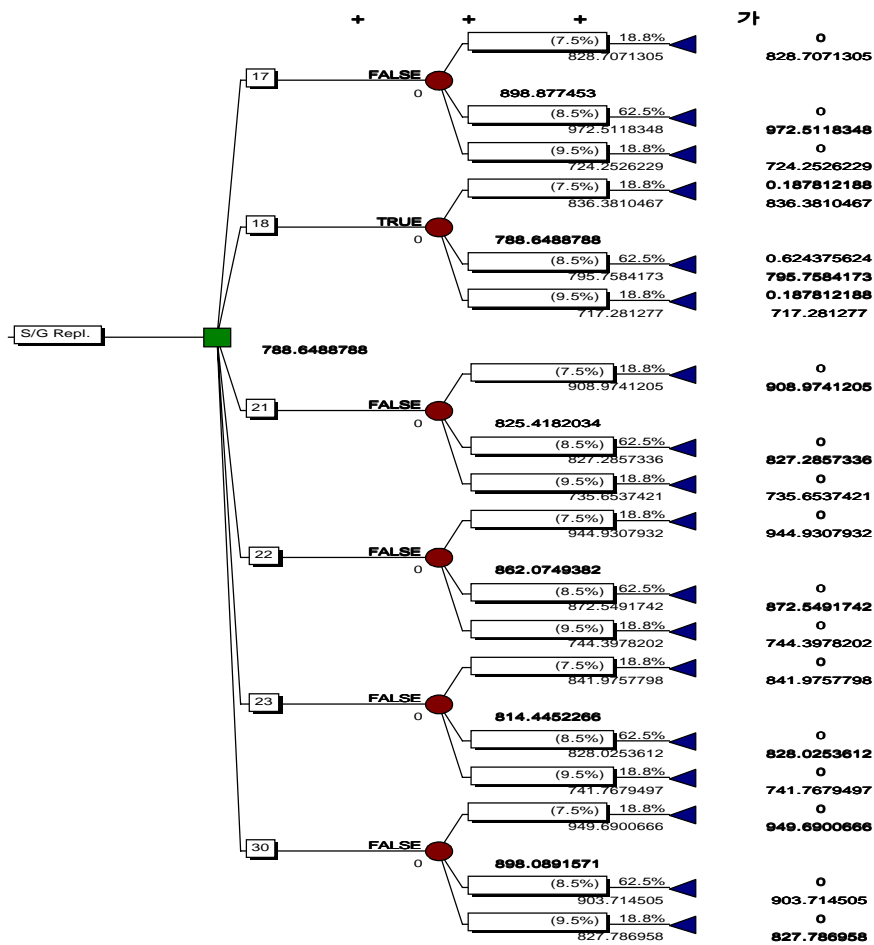


Fig. 5 Decision tree for economic analysis.

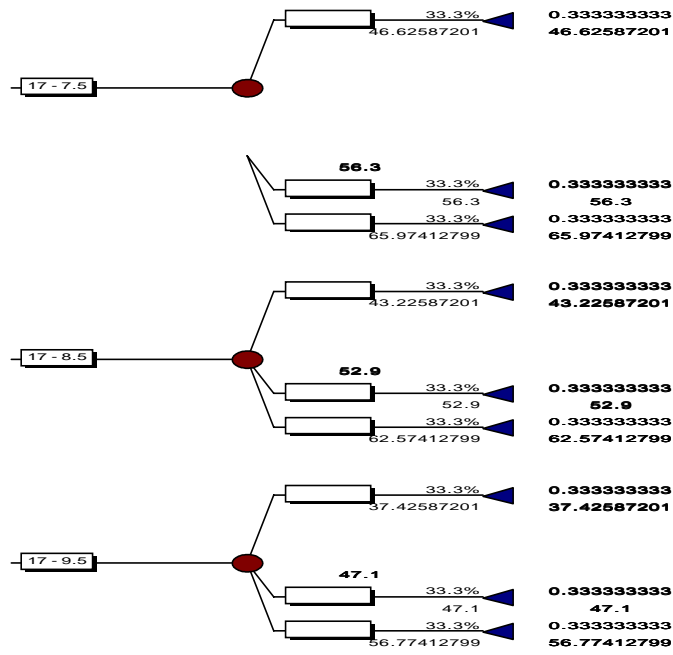


Fig. 6 Decision tree for inspection costs.

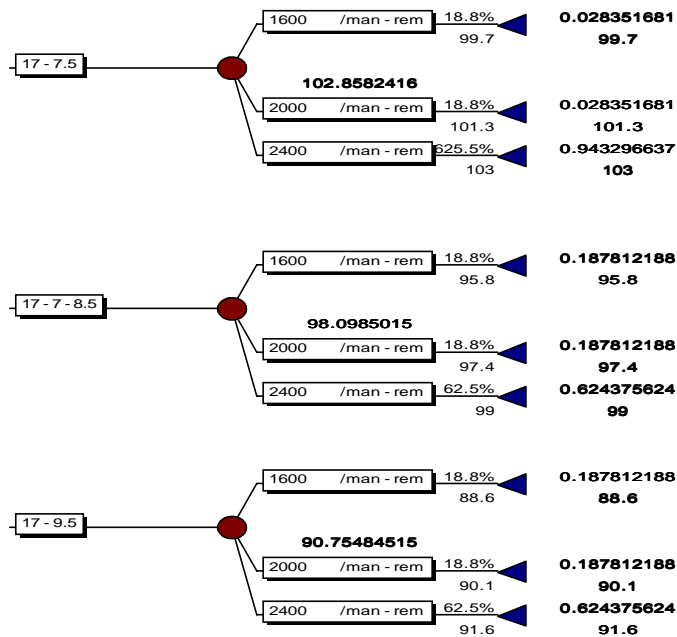


Fig. 7 Decision tree for maintenance costs.

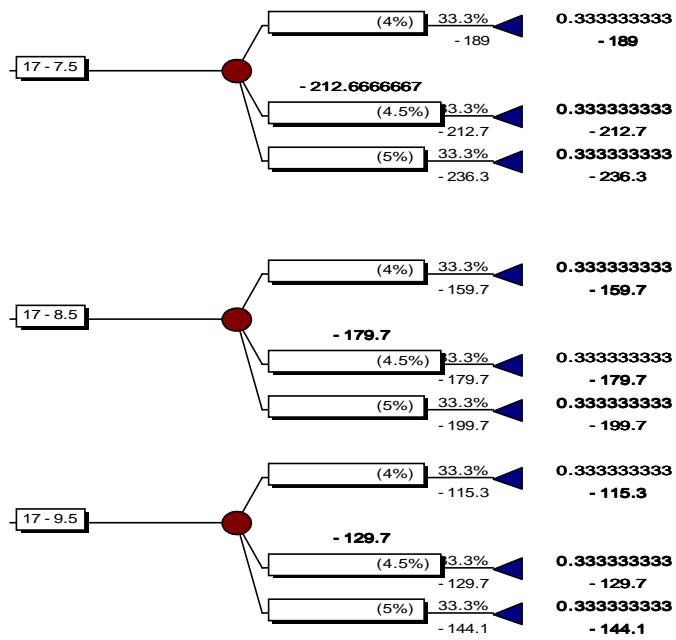


Fig. 8 Decision tree for replacement benefits.

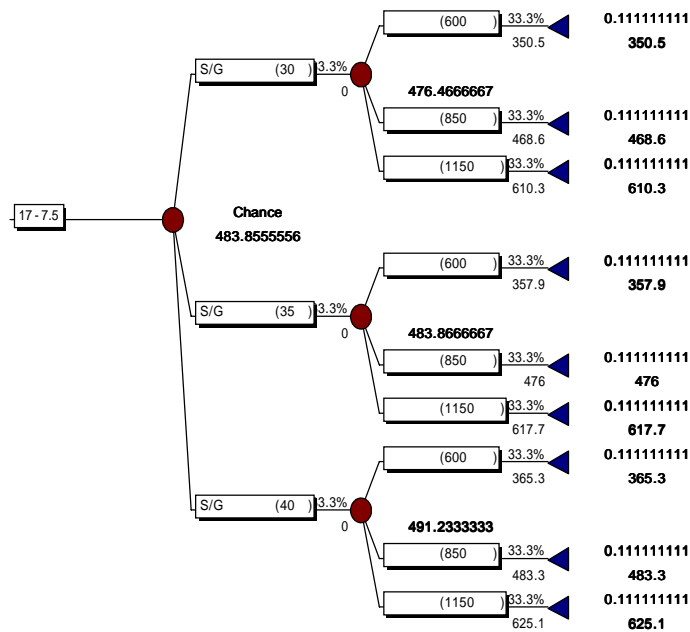


Fig. 9 Decision tree for replacement costs.

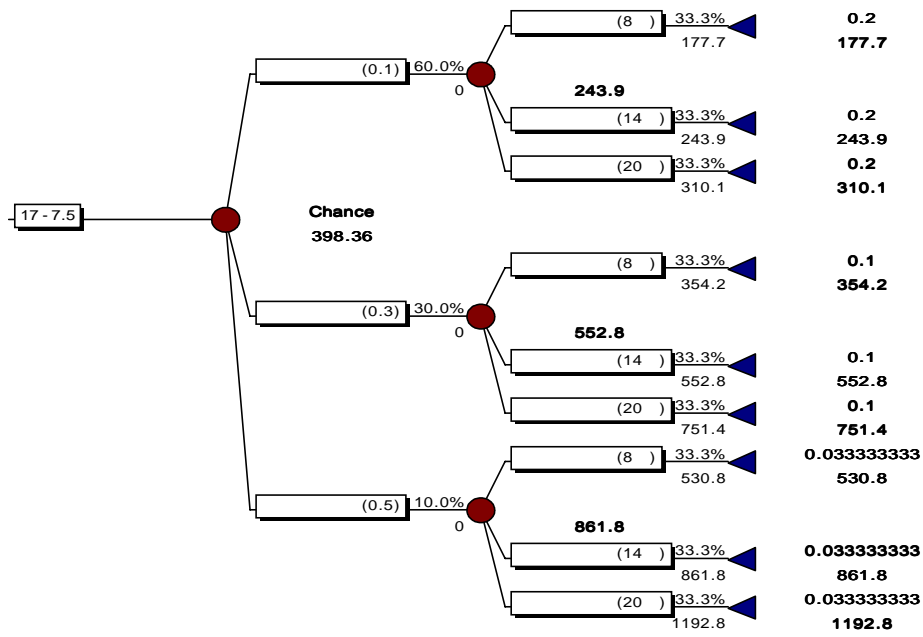


Fig. 10 Decision tree for power generation costs to substitution.

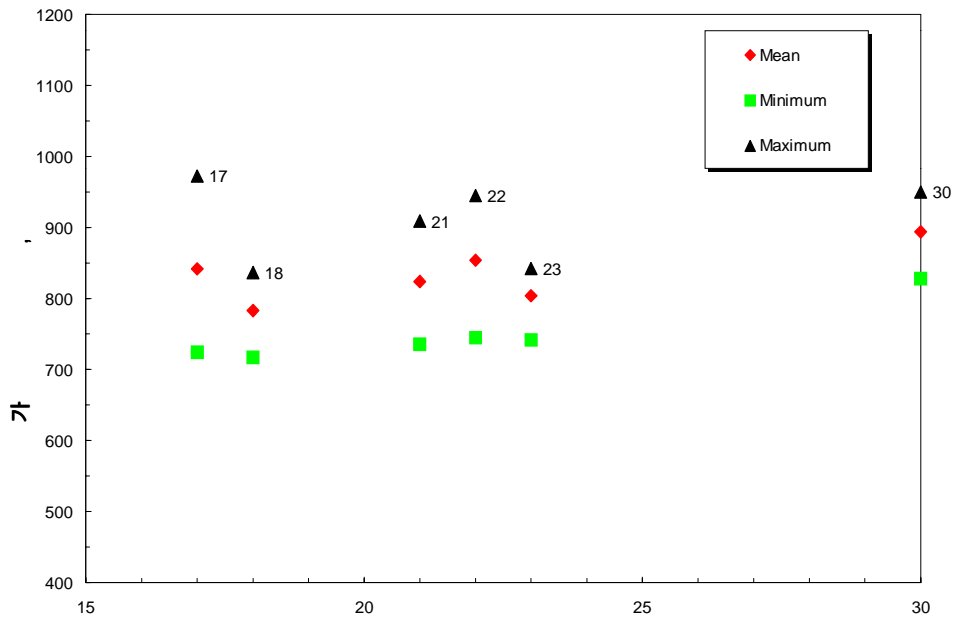


Fig. 11 Cumulative present values by replacement term.

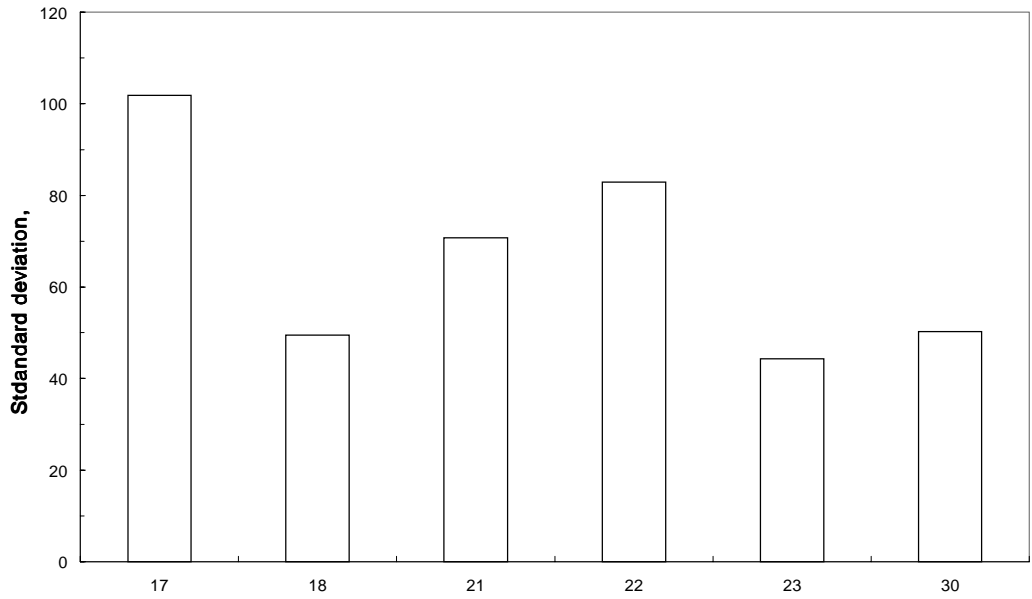


Fig. 12 Standard deviations by replacement term.

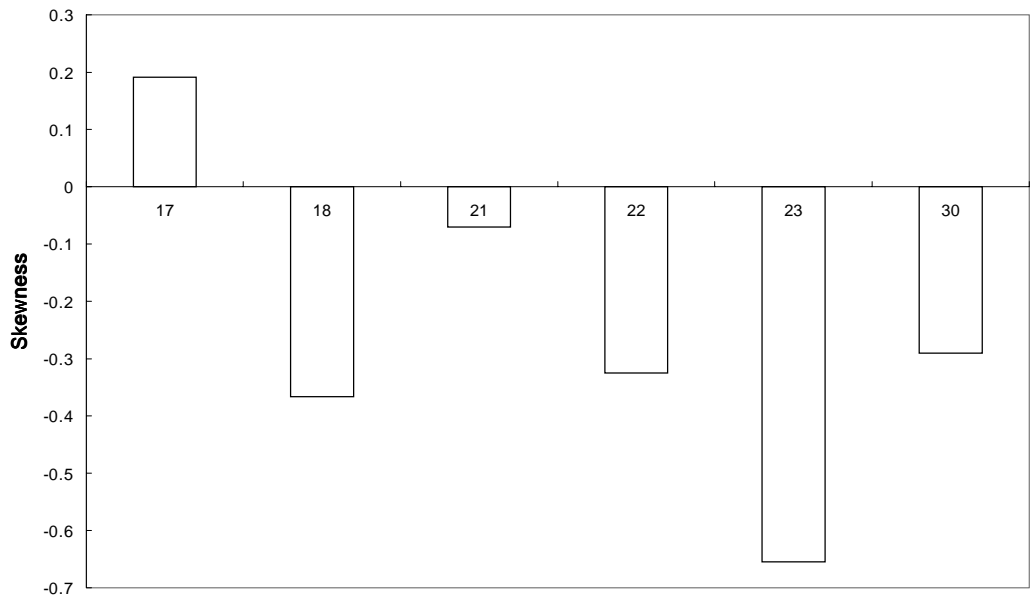


Fig. 13 Skewness by replacement term.

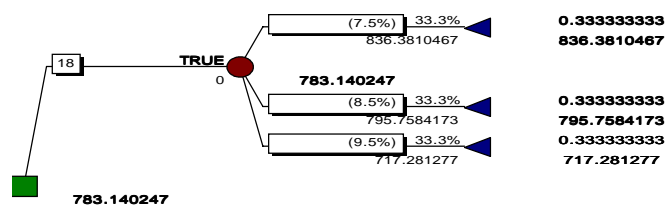


Fig. 14 Policy suggestion for steam generator replacement.