J. Soc. Korea Ind. Syst. Eng Vol. 41, No. 4 : 171-178, December 2018
https://doi.org/10.11627/jkise.2018.41.4.171
ISSN : 2005-0461(print)
ISSN : 2287-7975(online)

Deciding the Optimal Shutdown Time Incorporating the Accident Forecasting Model

Hee Joong Yang†

Dept. of Industrial Engineering, Cheongju University

원자력 발전소 사고 예측 모형과 병합한 최적 운행중지 결정 모형

양 희 중†

청주대학교 산업공학과

Recently, the continuing operation of nuclear power plants has become a major controversial issue in Korea. Whether to continue to operate nuclear power plants is a matter to be determined considering many factors including social and political factors as well as economic factors. But in this paper we concentrate only on the economic factors to make an optimum decision on operating nuclear power plants.

Decisions should be based on forecasts of plant accident risks and large and small accident data from power plants. We outline the structure of a decision model that incorporate accident risks. We formulate to decide whether to shutdown permanently, shutdown temporarily for maintenance, or to operate one period of time and then periodically repeat the analysis and decision process with additional information about new costs and risks. The forecasting model to predict nuclear power plant accidents is incorporated for an improved decision making. First, we build a one-period decision model and extend this theory to a multi-period model. In this paper we utilize influence diagrams as well as decision trees for modeling. And bayesian statistical approach is utilized. Many of the parameter values in this model may be set fairly subjective by decision makers. Once the parameter values have been determined, the model will be able to present the optimal decision according to that value.

Keywords : Decision Model, Forecasting Model, Bayesian Statistics, Influence Diagram, Decision Tree

1. 서 론

국내 원자력 발전은 1978년 고리원전 1호기가 첫 운전을 시작한 이후 지속적인 건설을 통해 총 24기의 원자력 발전소를 운영하고 있으며 설비용량은 미국, 프랑스 등에 이어 세계 6위의 규모이다. 국내 원자력 발전량은 전체 발전량의 30%에 이르고 있다. 이러한 원자력 발전을 통해 상대적으로 저렴한 전기가 공급되고 이는 국민에게 저렴한 전기를 공급하고 기업의 세계시장에서의 경쟁력을 높이는데 상당 부분 기여를 해 왔다.

그러나 한 편에서는 원자력 발전소 관련 사고에 대한 사회적 두려움이 있고 환경적인 측면도 고려하는 분위기 속에서 원자력 발전에 대한 혐오감이 증대하고 있다. 특히 현 정권 출범이후에는 탈 원전 정책이 탄력을 받고 있는 상황이다.

발전소를 계속 운행 할 것인지 중지할 것인지를 정책적으로 결정 할 수도 있겠지만 그 이전에 정책뿐만 아니라 사회, 환경, 경제적인 요소를 비롯한 관련 요인들을 가능한 한

Received 1 November 2018; Finally Revised 11 December 2018; Accepted 12 December 2018
† Corresponding Author : hjyang@cju.ac.kr

분명히 고려해서 여러 측면을 감안한 결정을 내려 보는 것이 보다 합리적일 것이다. 본 논문에서는 발전소의 지속 운행이나 중지 중 어느 쪽을 지지하는 분석이 아니라 사고 관련 자료, 발전소 운행과 관련된 수익 및 비용 자료 등을 고려하려 최적의 운행 정책을 결정 하는데 도움을 줄 수 있는 모형을 제시하고자 하는 것이다.

2. 선행연구 분석

원자력 발전소 운행과 관련된 연구로는 원자력 발전소의 국민 경제적 효과를 분석하고 정부 정책의 수용성, 주민의 갈등 인식 등이 고려된 연구가 진행되었으며[9, 12] 이와 연관된 방법론 측면에서는 효율적인 의사결정을 위한 EFASIT 분석, 빅데이터 모델링, 의사결정나무 기법 등을 이용한 여러 방법에 관한 연구들이 이루어졌다[5, 15, 17].

최근 들어서는 현 정부의 탈원전 정책 기조와 함께 원자력 발전소 해체를 전제로 한 후속 조치에 관한 연구들이 많이 진행되고 있다. 이희선 등[13]은 발전소 해체시 폐기물의 안전한 처리정책에 관한 연구를 진행하였으며 최창근 등[3]은 대만 원자력 발전소 건설 중단에 관해 정책옹호연합모형을 이용하여 분석하였다. 이동대 등[11]은 원자력 발전소 해체의 해외 전략에 대해 연구하였다. 발전소 재난관리 강화방안에 관한 연구, 발전소 영구 정지에 관련된 프로그램 구축에 관한 연구등도 진행된 바 있다[4, 8, 14]. 이렇듯이 대다수의 연구가 발전소 중단을 전제로 하여 효율적으로 대처하기 위한 방안 등에 관한 연구가 주로 이루어졌다.

원자력 발전소의 지속 운행과 정지간의 결정을 내리기 위해서는 그 동안 원자력 발전소의 운행에서 나타난 위험요소들에 대한 분석이 필요하고 이를 발전소 운행을 통해 얻어지는 수익과 비교해서 분석할 필요가 있다.

원자력 발전소 사고와 관련해서는 양희중[19]이 원자력 발전소 사고예측방법에 대해 연구하였고 양희중[18, 20]은 베이지안 기법과 상호연관도를 이용한 예측방법에 대해 연구하였다. 원자력 발전소 운행에 관련된 의사결정 문제를 다룬 논문은 흔치 않으나 타 대상에 대한 효율적인 의사결정모형을 구축하려는 시도는 이루어져 왔다. 박수호[2]는 적조 탐지를 위해 회귀모형과 의사결정나무를 병합하는 모형을 개발하였으며 김상원[10]은 국내 자연 재해 관련 분석을 위해 의사결정기법을 활용하였다. 김현호[7], 양극영 등[21]은 여러 대안 중 최적 대안을 선정하는 의사결정 방법에 대해서 연구하였다.

그러나 발전소 건설 비용의 회수문제, 운행으로 인한 수익, 발전소 사고에 관한 자료등을 활용하여 원자력 발전소를 지속적인 운행해할 것인지 아니면 해체할 것인지를 결정하는 의사결정 모형에 관한 연구는 별로 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 어느 정도 주관적일 수 있는 사회, 정치적 요인보다도 우선 경제적인 측면에서 최적의 의사결정 방안을 수립하는 모형을 개발하고자 한다. 사회 정치적인 요인들은 비용 및 수익을 나타내는 파라메터 값을 보정하는 방식으로 반영할 수 있도록 한다. 또한 의사결정 나무와 상호연관도를 활용하고 베이지안 통계기법을 통한 예측모형을 의사결정과 연계하는 방법을 개발한다.

3. 용어 정리 및 가정

원자력 발전소를 안전하게 운행하기 위해서는 발전소를 즉시 운행 중지해야할 것인지, 보수 정비를 위해서 임시 운행 중지해야 할 것인지, 혹은 계속 운행하면서 관련 비용 및 위험성에 관한 정보가 입수 되는대로 주기적인 분석을 반복해야 할 것인지에 관해 결정해야한다. 각 점검 주기마다 이 세 가지 대안 중 경제적으로 가장 유리한 대안을 선정한다. 점검의 주기는 계산상의 복잡성과 의사결정 과정의 현실적 적용간의 적정성을 고려하여 결정되어야 한다. 계산상의 문제 이외에는 점검 주기가 1년이건 1달이건 1시간이건 개념상에 큰 문제가 되지는 않는다. 본 논문에서는 원자력 발전소를 영구중지, 일시중지, 혹은 계속 운행할 것인지를 결정하기 위해 고려되어야 하는 사항들을 나타내는 상호연관도와 의사결정 나무를 그리고 이들을 통해 최적 대안을 찾아가는 방법을 제시한다. 원자력 발전소의 운행 및 중지와 관련된 비용과 여러 등급 사고와 관련된 확률은 의사결정 나무를 따라 진행하는 시간 과정에서 계속 보정되고 있다고 가정한다.

본 논문에서 사용되는 용어와 가정을 아래에 정리한다. 먼저 사고의 유형을 그 심각도에 따라 아래와 같이 3가지로 분류한다;

- 치명적사고 : 원자로가 광범위하고 심각하게 손상을 받아 핵의 융해나 부분 융해가 동반되고 이로 인해 방사능이 대기로 유출되는 사고
- 심각한 사고 : 원자력 발전소 내 설비, 혹은 작업자들이 심하게 오염이 되거나 원자로의 최종 안전 시스템이 위협을 받을 정도의 사고
- 경미한 사고 : 심각한 사고, 치명적 사고를 제외한 모든 사고

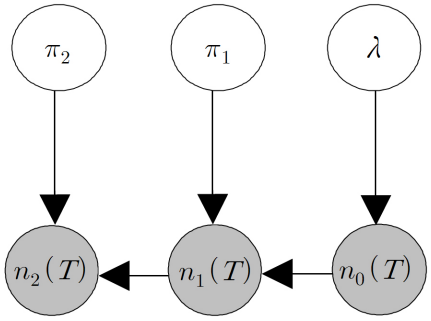
(0, T) 기간 동안 발생하는 경미한 사고수를 $m_0(T)$, 심각한 사고 수를 $m_1(T)$, 치명적 사고 수를 $m_2(T)$ 라고 표기한다.

사고에 대해 아래와 같이 또 다른 정의를 한다;
- 수준 0 사고 : 모든 유형의 사고
- 수준 1 사고 : 심각한 사고와 치명적 사고
- 수준 2 사고 : 치명적 사고

(0, T) 기간 동안 발생하는 수준 0 사고 수를 $n_0(T)$, 수준 1 사고 수를 $n_1(T)$, 수준 2 사고 수를 $n_2(T)$라고 표기한다. 그러면 n(T)와 m(T)간에 다음의 관계가 성립한다;

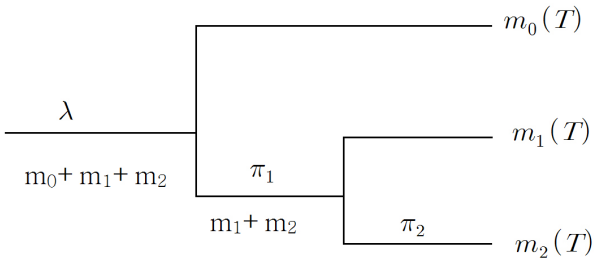
$$n_2(T) = m_2(T)$$
$$n_1(T) = m_1(T)+m_2(T)$$
$$n_0(T) = m_0(T)+m_1(T)+m_2(T)$$

<Figure 1>은 위의 분류에 따른 여러 유형의 발전소 사고를 나타내는 사건가지(Event Tree)이다.



<Figure 1> An Event Tree Showing Nuclear Power Plant Accident Initiation and Escalation to More Severe Accident

여기서 λ는 총 발전소사고의 발생율을 나타내며 π_1, 과 π_2 는 수준1과 수준 2사고로 확산되는 확률을 나타낸다. 이와 통계적으로 동일한 상호연관도가 <Figure 2>에 있다. 상호연관도의 응용과 베이지안 예측기법에 대해서는 Scheter [10]와 Aichison[1], Yang[13] 등의 연구가 있으며 사건가지와의 통계적 관계에 대해서는 양희중[12]에서 연구된 바 있다.



<Figure 2> Statistically Equivalent Influence Diagram to <Figure 1>

이를 바탕으로 본 논문에서 사용될 용어들이 아래에 정리되어 있다:

x_j : j 수준 사고 발생까지의 시간, j= 0, 1, 2

T : 점검 주기 횟수

D_t : 점검 주기 기간

F^i : i 기간 초에 사고 예측모형에 포함되고 원자로 운행 연수에 따라 변하는 파라메터 벡터

Yj^i : i 기간의 발전소 사고 상황
Y_0^i = 1, i 기간 중에 경미한 사고 발생
0, i 기간 중에 경미한 사고 발생안함
Y_1^i = 1, i 기간 중에 심각한 사고 발생
0, i 기간 중에 심각한 사고 발생안함
Y_2^i = 1, i 기간 중에 치명적 사고 발생
0, i 기간 중에 치명적 사고 발생안함

D : 분석 초에 수집 가능한 과거 자료

Z^i : i 기간 초에 이루어진 의사결정

b^i : i 기간 말까지 총 누적 임시운행 중지 횟수

I^i : i 기간 이전의 임시 운행 중지 횟수, 경미한 사고, 심각한 사고 수를 포함하여 i 기간 말에 가용한 모든 정보 세트

$p^i(j|I^{i-1}) = p^i(j|m, g, h) = Prob\{Y_j^i = 1|I^{i-1}\}$: 과거에 m개의 경미한 사고, g개의 심각한 사고, h개의 치명적 사고가 발생 했을 경우 j형 사고가 i 기간에 한 개 이상 발생할 확률(j = 0 : 경미한 사고, j = 1 : 심각한 사고, j = 2 : 치명적 사고)

$V^i(m, g, h)$: i 기간 말까지 경미한 사고 m건, 심각한 사고 g건, 치명적 사고 h건이 발생했을 때 기간 i 말부터 끝까지 운행하는데 드는 최소 기대비용

C^i : 건설비용에 대한 기간 i 말에서의 부채원금 잔액

DC^i : 기간 i에서 건설비용에 대한 부채원금과 이자의 차감액, $DC^i = C^{i-1} - C^i$

C_S : 치명적 사고로 인한 비용

C_G : 심각한 사고로 인한 비용

C_M : 경미한 사고로 인한 비용

A : 건설비용의 상환금

r : 연간 이자율

C_R : 한 기간 동안 전력 판매를 통해 벌은 수익

Yj^i의 확률밀도함수는 다음 번 사고까지의 시간, x_j,의 예측분포로부터 구할 수 있다. x_j는 상호배반 사상이 아니지만 Yj^i는 상호배반이 된다는 점에 주목해야 한다. 한 기간 내에 한 개 이상의 치명적 사고(2수준)가 발생할 확률은 사고가 D_t 이전에 발생하는 확률과 같다;

$$\Pr[Y_2^i = 1|I^{i-1}] = p^i(2|I^{i-1}) \quad (1)$$
$$= \int_{\Phi^i}\int_0^{\Delta t} p(x_2|\Phi^i)p(\Phi^i|I^{i-1})dx_2 d\Phi^i$$

식 (2)에서 한 개 이상의 심각한 사고가 발생할 확률은 1수준이면서 2수준이 아닌 사고의 확률을 뺌으로서 구해진다.

$$\Pr[Y_1^i = 1|I^{i-1}] = p^i(1|I^{i-1}) \quad (2)$$
$$= \int_{\Phi^i}\int_0^{\Delta t} p(x_1|\Phi^i)p(\Phi^i|I^{i-1})dx_1 d\Phi^i$$
$$- p^i(2|I^{i-1})$$

여기서 I^i는 i 기간에서 가용한 모든 정보 세트이다.

마찬가지로 한 개 이상의 경미한 사고가 발생하는 확률 (3)은 수준 0이면서 수준 1이 아닌 사고의 확률을 뺌으로서 구해진다. 마찬가지 논리로 식 (3)과 식 (4)가 구해진다;

$$\Pr[Y_0^i = 1|I^{i-1}] = p^i(0|I^{i-1}) \quad (3)$$
$$= \int_{\Phi_i}\int_0^{\Delta t} p(x_0|\Phi^i)p(\Phi^i|I^{i-1})dx_0 d\Phi^i$$
$$- p^i(2|I^{i-1}) - p^i(1|I^{i-1})$$

$$\Pr.[\text{무사고}|I^{i-1}] = p^i(3|I^{i-1}) \quad (4)$$
$$= 1 - p^i(0|I^{i-1}) - p^i(1|I^{i-1}) - p^i(2|I^{i-1})$$
$$= 1 - \int_{\Phi^i}\int_0^{\Delta t} p(x_0|\Phi^i)p(\Phi^i|I^{i-1})dx_0 d\Phi^i$$

x_j에 대한 사전분포, 사후분포 입수 과정은 양희중[13]에서 연구된 바 있다.

논문에서 일반적인 상황을 반영하기 위하여 여러 가지 가정이 사용되는데 이들을 아래와 같이 정리한다:

A1 : 장비와 시설물의 노후화로 인해 모델 파라메터는 발전소의 사용 기간에 따라 변화한다; $\Phi^i = f(\Phi^{i-1})$

A2 : 첫 기간 초에 가용한 정보 세트는 과거 자료로 구성되어 있다; $I^0 = I = [\text{과거 데이터}]$

A3 : 기간 i말에 가용한 정보 세트는 i-1기간 말에 가용한 정보 세트에 i 기간 중 발생한 임시 정지 횟수, 사고수가 포함된다.

A4 : 미상환된 원리금은 발전소 계획 수명의 초기에는 서서히 감소하다가 계획 수명 말기로 갈수록 급속히 감소한다. 따라서 $\Delta C^1 < \Delta C2 ... \Delta C^T$가 되며 이는 초기에는 상대적으로 원금 상환액 감소분이 적은 것을 나타낸다.

A5 : 임시 정지 기간 중에는 안전 시스템을 정비하고 개선하여 발전소 고장률이 감소된다.

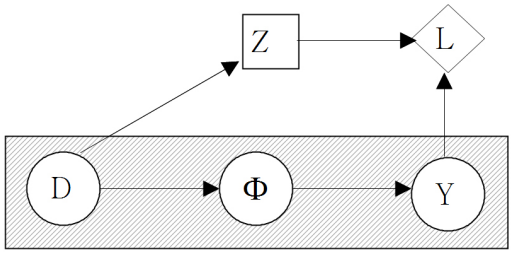
최적 의사 결정 모형을 완성하기 위해 먼저 1 기간 문제를 풀로 이를 다 기간 동적 의사결정 모형으로 확장한다.

5. 1기간 의사결정 모형

1기간 모형의 문제를 단순화하기 위해 본 절에서는 기간을 나타내는 윗 첨자를 생략한다;

$$\Phi = \Phi^i,\ Z = Z^i,\ Y = Y^i,\ I = I^0,\ C = C^0,$$
$$\Delta C = \Delta C^1,\ V = V^0(0,0,0), p_j = p(j|I) = p^i(j|I^0)$$

<Figure 3>에 있는 상호연관도는 1기간 의사결정 모형의 구조를 나타낸다. 기간 초에 발전소를 영구 폐쇄할 것인지(Z = 1) 정비를 위해 임시 정지 할 것인지(Z = 2), 혹은 한 기간 더 운행할 것인지(Z = 0)를 결정한다. 이 의사결정은 과거 데이터로부터 획득한 지식에 근거하여 이루어진다. L은 의사결정 Z와 실 상황 Y에 따른 손실함수이다.



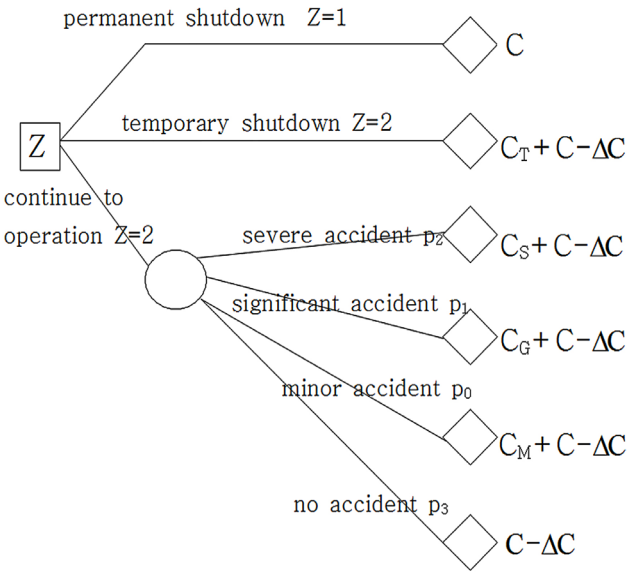
<Figure 3> An Influence Diagram for 1 Period Problem

최적 의사결정은 3개지 대안, 즉, 영구 정지(Z = 1), 임시정지(Z = 2)와 계속운행(Z = 0) 중 손실함수의 값을 극소화 시키는 대안으로 결정된다:

$$\min_Z \int L(Z,Y)p(Y|D)dY = \min_Z L(Z|D) = V \quad (5)$$

이와 통계적으로 동일한 의사 결정 나무 모형이 그림 4에 있다. 여기 각 가지에 각 경로에 연관된 확률과 비용을 나타낼 수 있다. 만일 발전소를 1기간 더 운행한다면 경미한 사고가 발생할 확률은 $p_0 = p(0|I^0)$, 심각한 사고가 발생할 확률은 $p_1 = p(1|I^0)$, 치명적 사고가 발생할 확률은 $p_2 = p(2|I^0)$, 사고가 발생하지 않을 확률은 $p_3 = p(3|I^0)$이다.

각 가지 끝에 치명적 사고 발생 시 유발되는 비용 C_S, 심각한 사고 발생 시 유발되는 비용 C_G, 경미한 사고 발생 시 유발되는 비용 C_M이 추가된다. 이들 비용은 청소, 혹시 발생되는 인명 피해 관련비용, 생존자 처리 비용 등을 포함하게 된다. 사고 발생 여부와 관계없이 각 기간



<Figure 4> An Event Tree for 1 Period Problem

말에 건설비용과 관련 이자를 지불하게 된다. 그러는 동안 전력 판매를 통해 수입을 올리고, C_R, 이러한 수입으로 발전소 운용, 유지 보수비용, 연간 상환금액등을 지출하게 된다. 일반적으로 발전소의 전력 판매로 한 기간 동안 버는 수입은 엄청난 크기의 C_S에 비해 상당히 작다. 본 논문에서는 전력판매를 통해 얻는 수입은 발전소 운용 및 유지보수비용과 발전소 건설비용에 대한 연간 상환액에 해당한다고 가정한다. 연간 상환액 A는 건설비용 C와 이자율 r, 상환기간 T에 의해 결정된다. 사고 발생이 없을 경우 잔액은 $\{C(1+r)+C_R\}-\{C_R+A\} = C(1+r)-A = C-DC$가 되고 여기서 DC는 한 기간 상환에 의한 원금 감소분을 나타낸다. 원자력 발전소를 영구 정지시키면 총 건설비용 C를 부담해야한다. 발전소를 일시 정지시키면 일시 정지 비용, C_T를 지불해야 하는데 이는 연간 상환금 A와 발전소 점검 및 정비비용에 해당한다. 따라서 일시 정지 비용은 C_T+C-DC가 된다. 일시 정지 비용 C_T는 원금 감소분 DC보다 더 큰 연간 상환금 A를 포함하고 있기 때문에 1 기간 문제에서는 일시정지 비용이 영구 정지 비용보다 클 수밖에 없다. 따라서 1 기간 문제에서는 일시 정지는 대안으로 선택 될 수가 없다.

계속 운행과 관련된 비용은

$$p_0(C_M+C-DT)+p_1(C_G+C-DT)+p_2(C_S+C-DT)+p_3(C-DT)$$

가 된다. 이 비용이 C와 비교 되어 아래 의사결정이 이루어진다.

만일 $p_0C_M+p_1C_G+p_2C_S > DC$이면 운행 중지,
$p_0C_M+p_1C_G+p_2C_S \leq DC$이면 계속 운행.

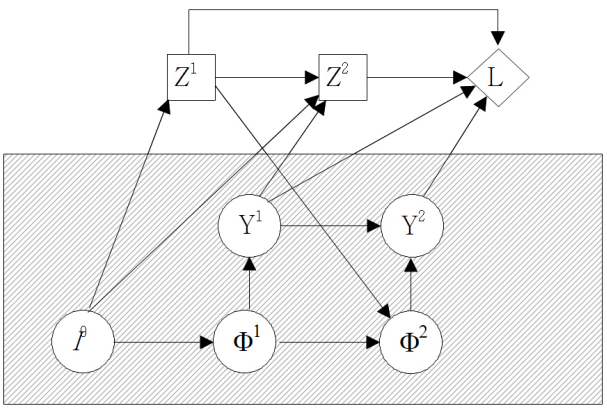
6. 다 기간 의사결정 모형

다 기간 의사결정 모형은 위 절에서 분석한 1 기간 의사결정 모형과 유사하다. 단지 다 기간 문제에서는 일시 정지 대안도 중요한 역할을 하게 된다. 이 절에서는 용어에 다루는 기간을 나타내는 첨자를 추가해야 한다. 시간 의존적인 값을 분명히 식별해야 하는데 특히 1)변화하는 부채 수준, 운용 및 보수 유지비용, 폐기 비용 등을 반영하는 가변 건설비용, 2)의사결정나무의 특정한 가지에 부여되는 실시간 보정 확률, 3)장비 및 시설의 노후화 현상 등을 시간에 따른 함수로서 명확히 처리해야 한다.

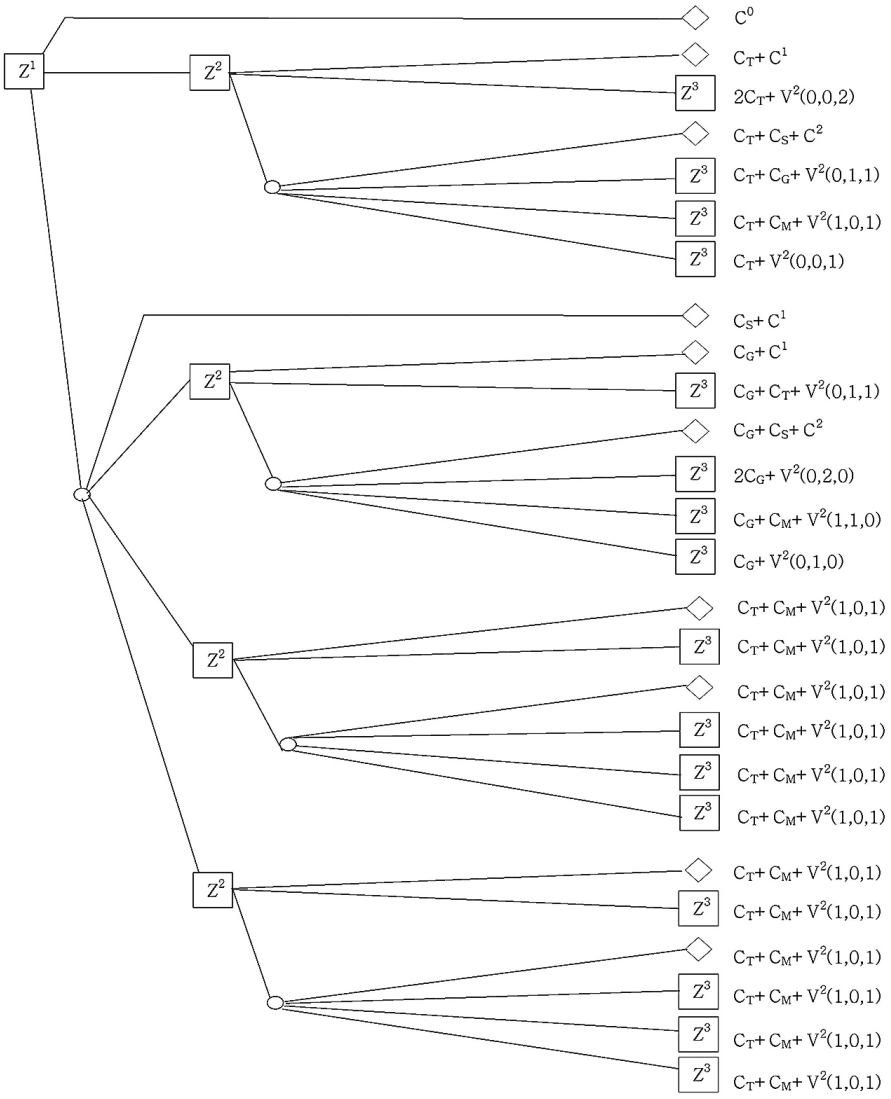
예를 들어 7년간 아무 사고 이력 없이 발전소를 운용하고 있다면 8기간에서의 의사결정 및 관련 확률은 이 기간 까지 아무 사고가 없었다는 것을 분명히 반영하여야 한다. 한편, 심각도가 떨어지는 사고가 치명적 사고에 영향을 준다면 이 정보가 파라메터 보정과정에 반영되어야 한다[1]. 특정 발전소의 사고 발생률은 부품의 마모와 같은 시간 의존적인 요인에 의해 영향을 받는다. 사고 없이 발전소를 오래 운행하면 할수록 발전소의 운행 프로세스가 우수하고 사고 발생 확률이 줄어들고 있다고 믿게 된다. 그와 동시에 발전소는 노후화되고 그로 인해 사고 가능성은 높아진다. 이러한 두 가지 충돌되는 양상도 적절히 고려되어야 한다.

<Figure 5>는 2기간 문제를 보여주는 상호연관도이다. 어둡게 칠한 네모 박스는 예측 모형을 나타낸다. 여기서 발전소가 노후화되면 F^i는 F^{i-1}에 영향을 받는다고 가정한다. i 기간의 발전소 사고 상황, Y^i,는 시간 의존적 파라메터에 영향을 받는다. 첫 번째 기간의 의사결정은 과거 자료에 의거해서 이루어진다. 한 기간이 지나면 첫 번째 기간 동안 발생한 사고 수, Y^i,를 조사하고 이 새로운 정보는 두 번째 기간의 의사결정에 영향을 미친다.

<Figure 5>의 상호연관도와 통계적으로 동일한 의사결정 나무가 <Figure 6>에 있다.



<Figure 5> An In Influence Diagram for 2 Period Problem



<Figure 6> Decision Tree for 3 Period Problem

최적의사결정은 후진 동적 프로그래밍 방법에 의해 구해진다;

1) 2 기간 초에 Z^1의 조건하에 Z^2를 선택한다;

$$\min_{z^2}\iint L(Z^2,Y^2|Z^1,Y^1)p(Y^1|I^0)p(Y^2|I^0,Y^1)dY^1dY^2$$
$$=\min_{Z^2}L(Z^2|Z^1,I^0)$$

2) 1 기간 초에 아래를 만족 시키는 Z^1을 선택한다;

$$\min_{Z^1}[\int C(Z^1,Y^1)p(Y^1|I^0)dY^1+\min_{Z^2}L(Z^2|Z^1,I^0)]$$
$$=\min_{Z^1}[C(Z^1|I^0)+\min_{Z^2}L(Z^2|Z^1,I^0)]$$

여기서 $C(Z^1|I^0)$는 의사결정 Z^1에 따는 1기간에서의 비용이다.

첫 번째 기간 초에 발전소를 영구 정지 할 것인지 일시 정지하고 안전 시스템을 보강할 것인지 아니면 한 기간 더 운행 할 것인지 결정한다. 만일 일시 정지 옵션을 선택한다면 새로 수정된 비용 요인, 보정된 사고 확률을 갖고 1기간 말에 의사결정 프로세스를 반복한다. 만일 한 기간 운행하는 옵션을 선택했는데 치명적 사고가 발생했다면 발전소를 영구 정지해야 한다. 관련 비용은 치명적 사고 비용 C_S와 미지급 상환금 C이다. 한편 한 기간 운행하는 동안에 심각한 사고, 경미한 사고가 발생하거나 혹은 사고가 발생하지 않았다면 이 기간 말에 의사결정 프로세스를 반복한다. 심각한 사고나 경미한 사고와 관련된 비용은 의사결정 나무에서 이와 연관된 가지에 표기되어 있다. 발전소 운행과 관련된 최소 기대 비용은 일시 정지 기록과 이전 기간에서의 운행 상황에 따라 변한다. 의사결정 프로세스는 적절하게 보정된 비용 요인과 확률을 갖고 각 기간 말에 반복적으로 이루어진다.

원자력 발전소 운행 정지와 관련된 최적 정책은 영구정지, 일시정지, 계속운행의 세 가지 옵션 중 최소비용을 보장하는 옵션을 선택하는 것이며 이러한 과정이 계속 반복된다. 각 가지에 연관된 확률이 <Figure 6>에 나타나 있다. 원자력 발전소 운행에 관한 최적 대안은 영구정지, 임시 정지, 계속 운행의 세 가지 대안 중 최소 비용을 제공하는 쪽으로 결정된다. 이는 아래 식을 반복적으로 푸는 것에 해당한다.

$V^T(m, g, h) = C^T = 0$, 모든 m, g, h에 대해,

$$V^i(m,g,h) = \min.\begin{bmatrix} C^i + mC_M + gC_G + hC_T : \\ C_T + mC_M + gC_G + hC_T + V^{i+1}(m,g,h+1) : \\ p^i(0|m,g,h)(C_M + V^{i+1}(m+1,g,h) + \\ p^i(1|m,g,h)(C_G + V^{i+1}(m,g+1,h) + \\ p^i(2|i,k,h)(C_S + C^{i+1}) + \\ p^i(3|i,k,h)\,V^{i+1}(m,g,h) + \\ mC_M + gC_G + hC_T \end{bmatrix}$$

i = T-1, T-2, …, 1, 0

의사결정 문제를 상호연관도와 의사결정나무를 이용해서 표현하였다. 의사결정나무 모형은 가능한 의사결정과 이와 연관된 비용을 명확하게 보여준다. 한 편 상호연관도 모형은 예측모형과 의사결정 모형간의 구조적인 연관성을 분명히 보여주고 또한 확률변수간의 상호 의존성 여부를 확실하게 나타내는 장점이 있다. 예측 모형을 의사결정 모형과 연계하였으며 실시간 입수되는 데이터에 의해 보정되는 예측모형의 파라메터 값들이 의사결정 모형에 반영된다. 의사결정 모형에 들어가는 비용 함수들을 정확히 산정하는 문제는 또 다른 연구 영역일 수 있다. 어떠한 값이 산정이 되던지 이에 따라 발전소 운행에 관한 최적대안을 결정 할 수 있는 방법론이 제시되었다.

7. 결 론

원자력 발전소의 운행에 관해서는 많은 격렬한 토론이 이어져 내려오고 있지만 사회 정서적, 정치적 견해가 먼저 주장되는 경우가 흔히 있다. 원자력 발전의 지속적인 운행이 되건 탈 원전으로 가건 간에 원자력 발전소의 운행과 관련된 가급적 많은 정보를 포함하여 운행에 관련된 최적 대안을 선택할 수 있는 모델을 구축하는 것은 의사결정의 합리성을 보장하는 측면에서도 도움이 될 것이다. 본 논문은 이러한 방향을 제시하는데 기여한 바가 있다고 본다.

발전소 사고 예측에 관한 연구와 발전소 운행 여부에 관한 연구는 별개로 진행되어 왔다. 그러나 발전소의 지속적 운행 여부는 반드시 발전소 사고예측과 연계되어 이루어져야 한다. 본 논문에서는 사고 예측모형을 의사결정에 연계하는 모델을 구축하여 원자력 발전소의 운행 내역이 발전소 운행 정책에 반영될 수 있는 방안을 제시하였다.

원자력 발전소의 최적 운행에 대한 의사결정은 의사결정론자가 누구인가에 따라 달라질 수 있다. 발전소 운행 관련자들은 건설비용이 주된 관심 비용이 되고 인적 사고와 관련된 비용은 원자력 발전소 이외의 다른 분야에서 책정되는 수준으로 책정 할 수도 있을 것이다. 반면 의사결정론자가 일반 국민, 특히 탈원전 성향의 사람들이라면 인적 사고 및 연관된 두려움으로 인한 관련 비용을 매우 크게 책정할 것이다. 현대 사회 생활에 필수 불가결한 자동차를 타다가 난 사고와 타 발전 방법이 존재함에도 불구하고 원자력 발전을 하다가 난 사고의 비용을 전혀 동일하게 책정할 수는 없을 것이다. 따라서 사고 관련비용(C_S, C_G,C_M)의 책정에 어느 정도 정책적, 사회적 선호도가 반영될 수 있을 것이다. 또한 발전으로 인한 수익 C_R에도 정책적, 사회적 선호도가 반영될 수 있을 것이다.

또한 본 모델에서는 의사결정이 일회성으로 끝나는 것이 아니고 매 기간 발전소를 운행하면서 축적되는 자료를 이용하여 발전소 운행의 위험도를 보정하고 이와 연관된 비용 및 수익도 고려하여 그때그때 최적의 대안을 선정하도록 하고 있다.

Acknowledgement

This research is supported by a special research fund 2018~2020 from Cheong Ju University.

References

[1] Aitchison, J. and Dunsmore, I.R., Statistical Prediction Analysis, Cambridge University Press, 1975.

[2] Bak, S.-H. et al., Study on Detection Technique for Cochlodinium polykrikoides Red tide using Logistic Regression Model and Decision Tree Model, *Korea Institute of Electronic Communication Science,* 2018, Vol. 13, No. 4, pp. 777-786.

[3] Choi, C.K. and Jang, J.H., Study of Taiwan's Nuclear Power Plant based on Advocacy Coalition Framework, *Korea Public Administration Quarterly,* 2015, Vol. 27, pp. 673-690.

[4] Ha, K.M., A Study on How to Enhance Nuclear Power Plants' Emergency Management, *The Korean Association for Local Government Studies*, 2017, pp. 1-16,

[5] Jeong, M.G., A Study on the Big Data Modeling and Analysis of Natural Disaster-Oriented Safety Index, Thesis, Pukyong National University, 2018.

[6] Ju, R.-J., Analysis of National Economic Effects of Nuclear Power Plants-Based on the unit No.5,6 of Shin-Kori Nuclear Power Plant, *Korean Association of Public Finance, Conference*, 2017, pp. 1-27.

[7] Kim, H.-H. and Kim, H.J., A Comparison of Fund-Operational Decision Making in Long-Term Car Rental Business Using Optimization, *Korean Production and Operations Management Society*, 2018, Vol. 29, No. 2, pp. 189-208.

[8] Kim, J.E. et al, A study on the Establishment of the Fire Protection Program for Permanent Shutdown and Decommissioning Nuclear Power Plant, *Korean Institute of Fire Science & Engineering,* 2018, pp. 107-108.

[9] Kim, K.H., The Conflicts and Awareness of Residents around Nuclear Power Plant : Case Study in the Surrounding Area of the Wolsong Nuclear Power Plant., Thesis, Daegu Catholic University, 2018.

[10] Kim, S.W. and Kim, G. Y., Flood-Disaster Safety Evaluation of Korean Local Governments Using Analytic Network Process, *The Korean Development Association,* 2012, Vol. 24, No. 2, pp. 1-14.

[11] Lee, D.D. and Son, I.C., Evaluation of Overseas Strategy of Nuclear Power plant Decommissioning, *Korean Society of Thermal Environmental Energies*, 2016, pp.187-190.

[12] Lee, D.W. et al., The effects of Trust in Government on Risk Perception and the Acceptance of Policies for high-rish Facilities in South Korea, *Korean Public Administration Revies*, 2018, Vol. 52, pp. 229-257.

[13] Lee, H.S., Strategies for Improving the Safety and Relief Management in the Disposal of Decommissioning Waste from Nuclear Power Plants, *Korean Studies Information Services System,* 2017, pp. 1-216.

[14] Rhee, Y.J., Kim, K.H., Choi, H.J., and Park, J.Y., Implementation of Environmental Impact Assessment for the Decommissioning of Nuclear Power Plant, Research report, *Korea Environmental Institute*, 2018, pp. 1-84.

[15] Ryu, K.H., The EFASIT Model for an Efficient Decision Making, Thesis, Daegu Catholic University, 2018.

[16] Shachter, R.D., Evaluating Influence Diagrams, *Operations Research*, 1987, Vol. 34, No. 26, pp. 871-882.

[17] Shin, W.W. and Shon, C.B., An Analysis on the Safety Accident Network and Risk Level of construction Machine and Equipment, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 2018, Vol. 5, No. 34, pp. 35-42.

[18] Yang, H.J., Forecasting Accidents by Transforming Event Trees into Influence Diagrams, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2006, Vol. 29, No. 1, pp. 72-75.

[19] Yang, H.J., Predicting Nuclear Power Plant Accidents in Korea, *IE Interfaces*, 1993, Vol.6, pp. 79-89.

[20] Yang, H.J., Safety Analysis using Bayesian Approach, *Journal of the Korea safety Management & Science*, 2007, Vol. 9, No. 5, pp. 1-5.

[21] Yang, K.Y. and Yoon, Y.W., A Study on the Selection of Construction Method by Decision Making Method, *Journal of the Korea Institute of Building Construction,* 2002, Vol. 2, No. 1, pp. 17-24.

ORCID

Hee Joong Yang | http://orcid.org/0000-0002-0928-7269