

## 사고관리방안 평가도구의 연구 A Study on Tools for Accident Management

제무성  
Moosung Jae  
한성대학교 산업안전공학과

### 1. 서론

산업화가 진행됨에 따라 점점 복잡해지고 위험해지고 있는 산업설비에는 사고의 리스크가 잠재하고 있다. 이러한 위험설비와 위험시설물에서 발생할 수 있는 중대한 사고의 경우 그 사고의 예방과 피해최소화를 위해서 사고관리방안이 강구되어야 하고 그 방안을 수행할 절차서의 개발이 이루어 져야하고 개발된 절차사에 대한 사용교육과 훈련이 병행되어야 한다. 이를 위해 선행되어야 할 것은 어떠한 사고관리방안이 최선인지를 평가하는 사고관리 방안의 평가가 필요하다. 사고관리 방안평가에 수반되는 불확실성의 모델링에는 의사결정수목(Decision Trees) 영향도(Influence Diagrams)의 이용할 수 있다. 본 연구는 이러한 사고관리방안 평가를 위한 도구(Tools)을 개발하여 사고관리방안 평가체계를 세우고 아울러 개발된 평가체계의 실현성과 적용가능성을 보이고자한다.

사고관리의 요소는 첫째, 사고관리의 후보방안들의 사전평가, 둘째, 적절한 조치들을 효율적으로 수행하기 위한 절차서 개발, 셋째, 조치수행에 필요한 자료, 도구 및 가능한 해당설비시스템의 변경과 사전준비로 구성된다. 사고관리방안을 평가할 때에는 그 방안의 효율성 뿐만 아니라 부작용, 타당성, 필요한 정보, 기존 절차서와의 양립성 등을 고려하여야 한다. 사고관리와 관련한 주요 불확실성의 요소를 파악하고 모델링 해야하는데 이를 위한 도구의 개발이 필요하다.

### 2. 의사결정수목과 영향도

의사결정수목은 의사결정 문제의 도시 및 수학적인 표현을 가능하게하는 도구이다 이 모델은 두가지 노드형태(결정과 기회)와 가지형태(확률과 대안)로 연결된 수목으로 의사결정 문제에 흔히 사용되고있는 도구이다. 확률론적 평가(PRA)에 있어서 중요하게 사용되는 사건수목(Event Trees)은 의사결정노드가 없이 단지 기회노드 만으로 구성된 의사결정수목에 속한다. 의사결정수목의 장점은 결정구조를 명료하게 나타내 주는 장점이 있으므로 이모델은 의사결정자에게 각각의 가능한 결과, 발생할 수 있는 가능한 모든 시나리오를 명료하게 보여준다. 그러나 의사결정수목 도구는 두가지 중대한 결함이 있다. 첫째는 문제가 복잡해짐에 따라 의사결정수목의 구성은 지수함수적으로 커진다는 것이다. 따라서 복잡한 위험설비에서의 사고관리를 모델링하는 것은 대단히 복잡함으로 실제적인 문제를 다루기 힘들다. 둘째는 의사결정수목은 노드변수들간의 확률적인 의존성에 대하여 명확히 표현할 수 없다는 제한성을 가지고 있다. 반면 영향도는 불확실한 양과 정보, 미 결정의 시간들 간의 조건적인 의존성을 표현하는 노드들과 조건적이고 정보적인 방향성을 가지는 아크들로 이루어진 연결망(Networks)이다. 노드들은 결정(Decision), 기회(Chance), 결정론적(Deterministic), 가치

노드(Value Node) 등의 네가지 타입이 있다. 통상적으로 결정점을 나타내는 결정노드는 네모 혹은 사각형 모양이고, 불확실한 양을 나타내는 기회노드는 원형 모양이며, 전 노드들의 값의 기능을 나타내는 결정론적노드는 이중원형 모양으로 표시한다. 가치노드의 모양은 표준화되어 있지 않고 분석자에 따라 다이아몬드 모양 혹은 모서리가 둥근 사각형 모양을 모델링한다. 이 영향도는 문제표현 면에서 훨씬 간단명료하다. 직접적으로 관련이 있는 노드들 간의 확실적인 의존성을 나타내 줄 수 있고, 의사결정론자로 하여금 문제의 목표와 연관이 있는 노드들과 아크들을 추가 및 삭제하는 데 용의하다. 또한 이 도구는 중요한 변수들을 신속하게 파악할 수 있게 한다. 영향도에 대한 상세한 설명은 참고문헌 [1, 2]에 설명되어 있다.

그림 1-3은 의사결정 문제와 관련된 가능한 세가지 경우들을 나타낸다. 각각의 그림은 결정, 기회, 가치노드를 각각 포함하고 있다. 그림 1.a에서, 가치는 확률변수(기회노드)에 의존하고 있고, 확률변수 자체는 의사결정에 의존하고 있다. 유사한 의사결정수목인 그림 1.b에서는 결정노드가 직접적으로 가치에 영향을 미치지 않는다. 예를들어, 결정노드 D는 화공시설의 반응로 고압계통에대한 감압유무를 나타내고, 확률노드 C는 반응로 내 증기폭발이 발생하는 지의 유무를 나타낸다. 증기폭발의 확률은 반응로 내 압력에 의존하고 있으므로  $P1 \neq P2$ 이다. 그러나, 증기폭발에 의한 시설물의 파손의 경우 손실  $F1$ 과  $F2$ 는 서로 같다고 가정되는 경우에 가치노드는 기회노드인 C에만 의존한다.

그림 2.a는 그림 1.a와 유사하지만 가치변수는 결정변수와 이에 의존하고 있는 확률변수(기회변수)들 모두 의존하고 있다. 이에 대응하는 의사결정수목이 그림2.b에 나타나 있다. 예를 들어, 결정노드D를 원자로 공동을 범람시키는지의 유무를 나타내고, C를 압력용기의 실패 유무를 나타내는 경우에 원자로 압력용기가 파손될 확률이 결정변수( $P1 \neq P2$ )에 의존하고,  $F1$ 과  $F2$ 는 서로 상이하다고 볼 때 가치노드는 기회노드 C와 결정노드 D모두에 의존하게 된다.

그림 3.a에서는 가치노드는 결정노드와 기회노드에 모두 의존하고 있지만, 확률변수는 결정변수와 무관하다. 전자제품을 구매 할때 고장에 대비한 보험을 들것인가에 대한 의사결정문제의 예를 들어보자. 이 경우에 노드C는 전자장비가 수명기간 동안 고장날 것인지를 나타내는 확률을 나타낸다. 의사결정은 그림 3.a와 같이 도식화된 구조로 나타낼 수 있다. 시스템이 실패할 확률은 그 사람이 보험을 구입하느냐와는 무관하지만, 비용(F)은 그림 3.b에서와 같이 보험 구입액과 실패할 확률에 의존한다. 일단 보험을 구입하면 아래쪽 가지는 무관하게 되며, 비용은 시스템의 고장에 상관없이 동일하게 된다.

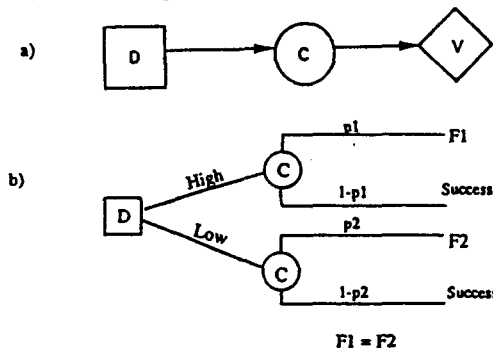


Fig. 1. Three Cases with Decision, Chance, and Value nodes ( $p1 \neq p2, F1=F2$ ).

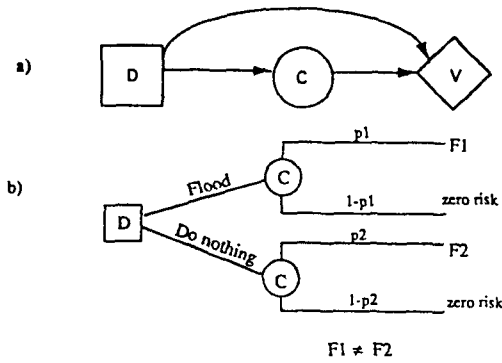


Fig. 2. Three Cases with Decision, Chance, and Value nodes ( $p1 \neq p2, F1=F2$ ).

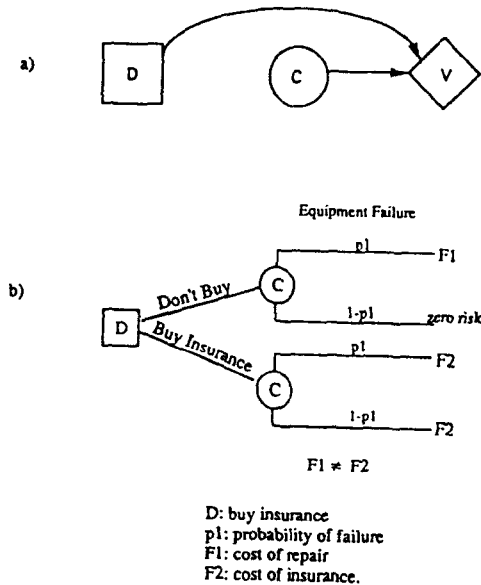


Fig. 3. Three Cases with Decision, Chance, and Value nodes ( $p1 \neq \text{const}, F1=F2$ ).

많은 경우에 있어서, 결정수목과 영향도는 하나 이상의 의사결정을 포함하게 된다. 그림 4.a는 두 개의 의사결정이 모델화되어있는 영향도를 나타낸다. 즉, 원자로사고시 공동을 범람하는 지의 여부와 일차계통을 감압시키는 지의 여부를 모사한 영향도이다. 이에 해당하는 의사결정수목은 그림 4.b와 같다. 그림 4.a와 4.b에서 두 개의 결정노드가 기회노드가 기회노드로 분리되어 있었지 않기 때문에, 네 개의 Alternatives(즉, 공동범람시는 경우, 일차계통만 감압하는 경우, 모두하는 경우, 어느쪽도 아닌 경우)를 가지는 하나의 결정노드로 통합할 수 있다.

그림 5에서와 같이 시간에 따른 순차적인 문제에서는 결정노드들 사이에 기회노드들이 있을 수 있다. 예를 들면, D1은 원자로 공동이 범람하는 지에 관한 결정을 나타내고, D2는 압력용기로 물을 주입시킬 지의 유무를 나타낸다고 하고, 기회노드 C를 정전사고시 교류전원이 복구되었는 지를 나타낸다고 하자. 이러한 경우에 압력용기에 물을 주입하는 것은 교류전원이 복구(기회노드)되었는 지에 의존하고 있기 때문에, 두 개의 결정노드들은 하나의 노드로 합칠 수가 없을뿐 아니라, 초기 영향도의 논리는 그대로 유지된다. 해당되는 의사결정수목이

그림 5.b에 나타나 있다.

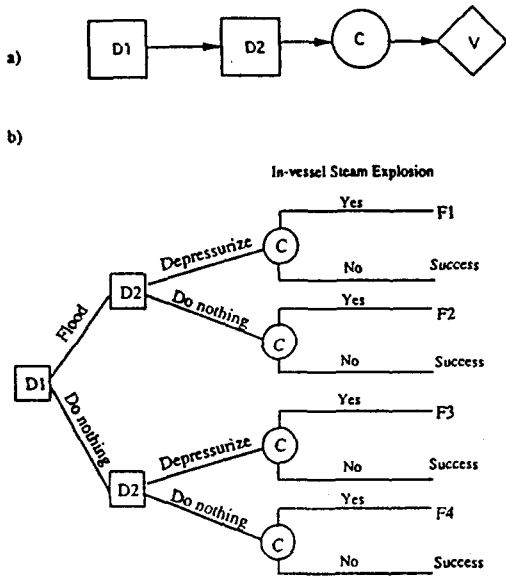


Fig. 4. Influence Diagrams and Decision trees Associated with Multiple and Sequential Decisions.

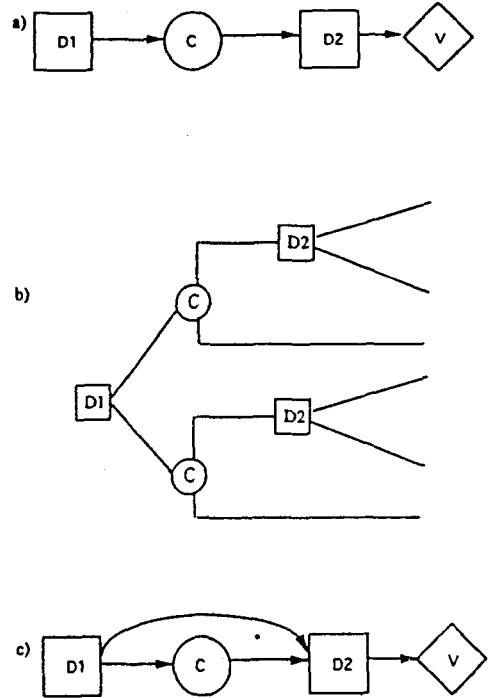


Fig. 5. Influence Diagrams and Decision trees Associated with Multiple and Sequential Decisions.

만약 일반적인 영향도에서 결정노드 D1이 D2를 선행한다면, 노드 D1과 이 노드의 모든 정보 선행자들이 노드 D2의 정보 선행자가 되어야 한다. 이것을 나타내어 주기 위하여 그림 5.c는 “Non-forgetting” 아크의 추가를 해야함을 보여준다. 노드 D2로 향한 정보아크는 D2가 결정될 때 결정노드 D1뿐만 아니라, 노드 C의 결과를 D2의 의사결정자가 알 수 있다는 것을 보여준다.

### 3. 불확실성 자료분석

사고관리를 설명하기 위한 의사결정수목과 영향도에서의 기회노드는 두가지 형태의 불확실성을 내포하고 있는데, 하나는 확률론적인 변화에 기인하고 있고, 다른 하나는 부적절한 지식과 데이터(정보의 불확실성)에 기인하고 있다. 어떤 기회노드들은 본질적으로 결정론적인 현상적 사건을 나타낸다. 즉, 주어진 선행자 노드들의 상태에서 항상 일어나거나 아니면 절대로 일어나지 않는 것이다. 우리는 어느 쪽인지를 예측할 수는 없다. 불확실성을 특정짓는 분포는 두가지 가능한 상태, 즉, 사건이 항상 발생하는지 (확률적으로1.0)와 결코 일어나지 않는 지(확률적으로0.0)로 구분된다. 참고문헌[3]에 있는 용어를 사용하면, 이러한 경우에는 “Model of world”의 변수가 불확실성을 내포하지 않는다. 그러나, 본래부터 확률적으로 발생하는 현상학적 사건을 나타내는 노드들도 있다. 예를 들면, 고장률,  $\lambda$ 의 발생확률로 일

어난다고 하더라도 부적절한 데이터이기 때문에  $\lambda$  라는 값은 불확실하다. 이러한 경우에 최신정보의 불확실성을 나타내는 분포는 가능한 사고 발생률의 값들에 대한 연속적확률함수이다. 참고문헌 [3]의 용어를 사용하면 “Model of world”의 변수,  $\lambda$ 가 불확실성을 내포하고 있고 주로 이러한 변수들은 시스템안전성 평가에 많이 나타난다. 때때로 결정적인 사건과 확률적인 사건간에 명확한 구별이 되지 않는 경우도 있다.

#### 4. 사고관리 방안 평가체계

일반적으로 일단 의사결정수목과 영향도가 구성되고 데이터가 모두 마련되면 의사결정방안을 평가하기 위해 의사결정수목과 영향도에 대하여 정량적으로 계산할 수 있다. 의사결정수목 및 영향도를 계산한다는 것은 후보결정들에 대하여 가치노드의 속성과 관련이 있는 기대치를 계산한다는 것을 뜻한다. 영향도의 평가는 네가지의 수학적 계산이 요구되며 기본적인 기능을 간략히 기술하면 다음과 같다.

- (1) 아크역전(Arc Reversal): 기회노드 X에서 다른 노드Y로의 아크를 가지는 (X에서 Y로의 직접적으로 연결된 다른 경로가 없이 영향도가 주어졌을 때, 이 아크의 방향을 베이지안 연산을 이용하여 Y에서 X로 역전할 수 있다. 수정된 영향도에서는 X와 Y모두 서로 다른 노드의 조건적 선행자를 받을 수 있다.
- (2) 침몰노드(Sink Node)제거: 영향도에 있는 어떠한 노드도 적절한 아크 역전의 순차를 통해 침몰노드로 전환할 수 있다. 계승인자가 없는 기회노드는 제거할 수 있다.
- (3) 기회노드(Chance Node)제거: X노드에서 Y노드로 방향을 갖는 아크에서 두 노드를 단하나의 노드로 대신할 수 있다. 이 작용은 Y가 X의 유일한 계승인자이어야만 한다는 조건이 있다.
- (4) 결정노드(Decision Node)제거: 결정노드는 기대가치를 최대화 혹은 최소화하여 적절한 결정노드를 취함(최적화 방법)으로서 제거할 수 있다.

사고관리방안을 평가할 때는 사고관리방안의 실행가능성, 사고관리방안의 효율성, 사고관리방안의 실행으로 인한 부작용 발생가능성, 필요한 정보의 확보정도, 그리고 방안수행 절차서 적절성 등이 고려되어야 한다. 원전의 위험성 평가 기술인 확률론적안전성평가(PRA: Probabilistic Safety Assessment)에서 많이 사용되고있는 사건수목(Event Trees)은 의사결정수목의 한 형태이다. 즉, 사건수목(Event Trees)은 의사결정 수목의 Decision Node가 없이 Chance Node로만 구성된 수목이다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 사고관리 방안평가의 불확실성 모델링에 의사결정수목(Decision Trees)과 영향도(Influence Diagrams)가 유용하게 이용될 수 있음을 보여주었다. 본 논문에서 제시한 사고관리방안 평가체계는 방안평가의 실현성과 적용가능성을 보임으로서 석유화학 플랜트나 개스설비 등 위험시설물의 사고관리 방안평가, 절차서 개발, 그리고 정책결정에 유연하게 사용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] Moosung Jae and G. Apostolakis, "The Use of Influence Diagrams for Evaluating Severe Accident Management Strategies", *Nuclear Technology*, August 1992, Vol. 99, pp. 142-157.
- [1] Moosung Jae, T. Milici, W. Kastenberg, and G. Apostolakis, "Sensitivity and Uncertainty Analysis of Accident Management Strategies Involving Multiple Decisions", *Nuclear Technology*, October 1993, Vol. 104, pp. 13-36.
- [3] G. Apostolakis, "The Concept of Probability in Safety Assessments of Technological Systems", *Science*, December 1990, Vol. 250, pp. 1359-1368.