

Influence Diagrams를 이용한 방사선 누출/피폭 최적화 방안평가

제무성

한성대학교 산업시스템공학부

1. 서론

원자력 발전소의 중대사고는 비록 발생 확률은 매우 낮지만 사고 발생시 결말 효과가 크기 때문에 TMI 사고나 체르노빌 사고 이후 이에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있다. 방사성 물질이 일단 환경으로 방출된 이후에 인체 및 환경에 영향을 미치는 주요 변수로는 풍향, 풍속, 강수량, 대기안정도로 대표되는 기상 조건과 방사선원 및 방출 고도, 열 함량, 방출 시간 등과 같은 방사선원 방출 특성에 관한 여러 가지 많은 변수들을 고려하여야 한다. 리스크 및 인체 건강에 미치는 변수로는 풍속, 강수량, 대기안정도, 그리고 건강영향 인자로는 조기 사망자 수, 조기 상해자 수, 암 사망자 수, 암 상해자 수, 조기 사망 리스크, 암 사망 리스크, 플룸 중심선에서의 골수 및 유효 전선 피폭 선량 등이 있다. 이때 이들 변수들을 종합하여 결말 분석에 미치는 영향을 분석하기는 매우 복잡하고 어려운 일이기 때문에 의사결정 도구인 영향도(Influence Diagrams)를 이용한 종합적인 분석이 필요하다[1]. 영향도(Influence Diagrams)는 불확실한 데이터와 정보들 간의 조건적인 의존성을 표현하는 노드들과 조건적이고 정보적인 방향성을 가지는 아크들로 이루어진 연결망(Networks)이다. 이것은 방사선 피폭 최적화 방안을 평가할 때 고려하여야 할 여러 가지 복잡하고 상호의존적인 현상 간에 관계를 쉽게 모사할 수 있는 해석적인 Tool이다. 본 논문에서는 영향도(Influence Diagrams)를 이용하여 참조원전에 대한 중대사고 시에 방사선 피폭의 최적화 방안을 정량적으로 평가하는 체계를 개발하였다.

2. 영향도(Influence Diagrams)를 이용한 방사선피폭 최적화방안의 평가 체계

2.1 영향도의 정의

참조원전에 대하여 중대사고시 방사선 피폭의 최적화 방안을 체계적이고 정량적으로 평가하기 위하여 본 연구에서는 영향도(Influence Diagrams)를 사용하였다. 영향도(Influence Diagrams)는 불확실한 데이터와 정보들 간의 조건적인 의존성을 표현하는

노드들과 조건적이고 정보적인 방향성을 가지는 아크들로 이루어진 연결망(Networks)이다. 이것은 방사선 피폭 최적화 방안을 평가할 때 고려하여야 할 여러 가지 복잡하고 상호의존적인 현상간에 관계를 쉽게 모사할 수 있는 해석적인 장점을 제공한다. 이 도구는 방사선원 누출과 방사선 피폭과 관련하여 여러가지 요인이 복잡하게 연계되어 있을 때 최적화 방안을 해석적으로 모델링하고 평가할 수 있는 특징이 있다. 따라서 중대 사고시 방사선 피폭 최적화 방안을 도출하는데 분석자나 원전종사자(의사결정론자) 입장에서 필요한 자료에 대하여 연관이 있는 노드들과 아크들을 추가 및 삭제하는 데 용이한 Influence Diagrams를 사용하여 효율적으로 방사선피폭 최적화 방안을 평가하는 데 이용한다.

2.2 영향도의 모델링 방법론

앞서 정의 한 대로 영향도는 불확실한 양과 정보 및 결정의 시기들간의 조건적인 의존성을 표현하는 노드들과 조건적이고 정보적인 방향성을 가지는 아크들로 이루어진 연결망(Networks)이다. 노드들은 결정(Decision), 기회(Chance), 결정론적(Deterministic), 가치노드(Value Node) 등의 네가지 타입이 있다. 통상적으로 결정점을 나타내는 결정노드는 사각형 모양이고, 불확실한 양을 나타내는 기회노드는 원형 모양이며, 전 노드들의 값의 기능을 나타내는 결정론적 노드는 이중원형 모양을 사용한다. 가치노드의 모양은 표준화되어 있지 않고 분석자에 따라 다이아몬드 모양 혹은 모서리가 둥근 사각형 모양으로 모델링한다[2-4].

영향도는 문제를 모델링하는 기능이 훨씬 간단하다. 영향도와 같이 의사결정 도구로 사용되고 있는 의사결정수목은 확률론적 안전성 평가(PSAs)에 있어서 널리 사용되는 사건수목의 상위도구이다. 사건수목은 의사결정노드 없이 단지 기회노드만으로 구성된 의사결정수목이다. 의사결정수목의 장점은 결정구조를 명료하게 나타내 주는 장점이 있으나 방사선 누출과 피폭문제와 같이 복잡한 문제를 다루기 힘들며 노드변수들간의 확률적인 의존성에 대하여 명확히 표현할 수 없다. 그러나 영향도는 직접적으로 관련이 있는 노드들간의 확률적인 의존성을 나타내 줄 수 있고, 의사결정론자로 하여금 문제의 목표와 연관이 있는 노드들과 아크들을 추가 및 삭제하는 데 용이하다. 또한 이것은 중요한 변수들을 신속하게 파악할 수 있게 한다. 특히 영향도는 복잡한 변수들 간의 독립성을 모사하는데 유용하다. 기회노드의 독립성을 확인하기 위해서는 확률분포 값을 검토하는 것이 필요하다. 그림 1.a는 의사결정문제의 최적방안을 계산하기 위한 충분한 정보를 제공하는 의사결정수목이다. 이 수목한 등가의 그림 1.b는 동일한 문제를 매우

함축적으로 표현해 내는 영향도이다. 여기서 기회노드 A와 B사이에 아크가 없는 것은 A, B가 조건적으로 독립이라는 것을 바로 보여주고 있으며 정보값(Value of Information) 계산이 쉬워서 복잡한 의사결정문제를 푸는데 유용한 특징을 보여주고 있다. 다음은 영향도와 이에 상응하는 의사결정수목에 대한 간단한 설명으로서 영향도를 어떻게 실제 문제에 적용할 수 있는지를 쉽게 설명해 준다.

일반적으로 영향도는 하나 이상의 다중의사결정(Multiple Decisions)을 포함하게 된다. 이때 “Non-forgetting”아크를 이용하여 선행자의 정보를 의사결정에 활용하는 기능을 추가하여 사용하여야 한다. 영향도의 기회노드는 두 가지 형태의 불확실성을 내포하고 있는데, 하나는 확률론적인 변화에 기인하고 있고, 다른 하나는 부적절한 지식과 데이터(정보의 불확실성)에 기인하고 있다. 어떤 기회노드들은 본래적으로 결정론적인 현상적 사건을 나타낸다. 즉, 주어진 선행자 노드들의 상태에서 항상 일어나거나 아니면 절대로 일어나지 않는 것이다. 우리는 어느 쪽인지를 예측할 수는 없다. 불확실성을 특정 짓는 분포는 두 가지 가능한 상태, 즉, 사건이 항상 발생하는지(확률적으로 1.0)와 결코 일어나지 않는 지(확률적으로 0.0)로 구분된다. 그러나, 본래부터 확률적 데이터가 필요한 경우로 나누어진다.

3. 영향도의 정량화

영향도를 정량적으로 계산한다는 것은 방사전피폭 방안을 포함한 여러 가지 후보 방안들에 대하여 에 대하여 가치노드(Value Node)의 속성과 관련이 있는 기대치를 계산한다는 것을 뜻한다. 영향도의 정량화는 다음과 같은 4가지의 수학적 계산이 요구된다[5-6].

- (1) 아크역전(Arc Reversal) : 기회노드 X에서 다른 노드 Y로의 아크를 가지는(X에서 Y로의 직접적으로 연결된 다른 경로가 없이)영향도가 주어졌을 때, 이 아크의 방향을 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 단 하나의 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 제거 할 수 있다.

4. 영향도를 이용한 방사선원항 평가

여러 가지 초기사건의 발생으로 인하여 기계적 결함과 인적오류가 동시에 발생되어 중대사고가 발생하는 경우, 격납건물 외부로 방사능 물질이 방출되는데 이 때 외부로 방출된 방사능 물질을 방사선 원(Source Term)이라고 정의하며, 방사능 물질의 에너지, 방출량, 방출시간, 그리고 구성성분 들이 포함된다. 이 때 방사능 물질의 방출관점에서 유사하다고 판단되는 그룹을 군집화하여 적당한 수의 방사능 방출그룹을 구성하게 되는데 이것이 방사능 누출과 피폭을 최소화하는 후보방안들이다. 방사선 피폭과 관련한 방사능 방출 그룹에는 유사한 특성의 다양한 사고경위가 할당되는데 그 중 대표적인 사고경위를 선정하여 MAAP등과 같은 중대사고 해석코드를 이용하여 노심가열 및 용융, 압력변화, 일차계통의 냉각수 감소, 격납건물의 파손 형태와 시간, 방사능 물질의 이송, 대기로 누출되는 양을 결정하여 최적화 방안평가에 기본 Data로 활용하여야 한다[7].

방사선원을 결정하고 평가하기 위하여 격납건물우회, 격납건물고립, 원자로용기에서 사고정지, 격납건물 α 파손, 격납건물 파손 시간 및 모드, 압력용기외부용융물 냉각여부, 살수계통 재순환여부 등의 요소들을 이용하여 방사선원 그룹과 최적화 방안을 평가하는 영향도(Influence Diagrams)를 그림 2와 같이 구성하였다. 이 영향도는 중대사고시 방사선 누출과 주민 피폭을 최소화시키기 위하여 감행될 수 있는 여러 가지 최적화 방안을 고려하였다. 압력용기 외부에 인위적으로 물을 공급하는 공동범람방안(Cavity Flooding), 격납건물직접가열(DCH)이나 격납건물 α 파손 등을 예방하기 위한 1차측 감압방안(Depressurization), 그리고 아무런 조치도 취하지 않는 방치(No Action)의 3가지 방안에 대한 영향도를 구성하여 그 후보 방안을 최적화하고자 하였다. 이 때 Value Node의 각 값은 적절한 중대사고관련 전산코드를 사용하여 방사선원 항을 평가한 값을 입력으로 사용한다. 방사선 방출과 주민 피폭은 원전 고유의 설계특성과 사고경위에 따라 달라진다. 방사선원항(Source Term)으로 알려진 핵종들이 격납건물 외부로 방출되면 원전의 잠재적인 중대사고에 의한 피폭피해가 발생한다. 방사선원항의 크기와 특성은 원전유형 및 격납건물의 계통특성과 중대사고 진행양상에 영향을 받는다. 방사선원 항에 영향을 미칠 수 있는 설계특성에는 제어봉 집합체설계, 노심출력 밀도 및 분포, 금속의 조성비, 1차계통 및 발전소의 기하학적 구조, 1차 계통의 압력, 냉각수 가용

성, 노외 노심용융물의 온도 및 두께, 콘크리트의 조성, 격납건물 잔열제거시스템 특성, 격납건물에서의 보조건물로의 누출 및 손상정도 등 매우 다양하고 복잡한 요소들이 있는데 최적화 방안을 평가하기 위해서는 이들 요소들을 모사하고 정량적으로 평가하여야 한다[8].

5. 결론

본 논문에서는 영향도(Influence Diagrams)의 기본원리를 제시하고 그 실현성(Feasibility)을 검토하였으며, 아울러 그림 6에서 보는 바와 같이 격납건물우회(CONBYPASS), 격납건물고립(CONISOLAT), 원자로용기에서 사고정지(MELTSTOP), 격납건물 α 파손(NO-ALPHA), 격납건물 파손 시간 및 모드(Time-CF & MODE-CF), 압력용기의부용융물 냉각여부(EXVCOOL), 살수계통재순환여부(NO-RECSP) factor를 기본 요소로 하는 영향도를 개발하여 방사선 누출 및 피폭 최적화 방안을 평가하는 체계를 제시하였다. 본 연구를 통해서 제시한 최적화 방안평가방법은 민감도 및 불확실성 평가도 가능하며, 방사선 피폭 최적화와 관련한 어떤 문제에도 적용 가능한 매우 유연한 평가체계임을 보여 주고 있다.

참고문헌

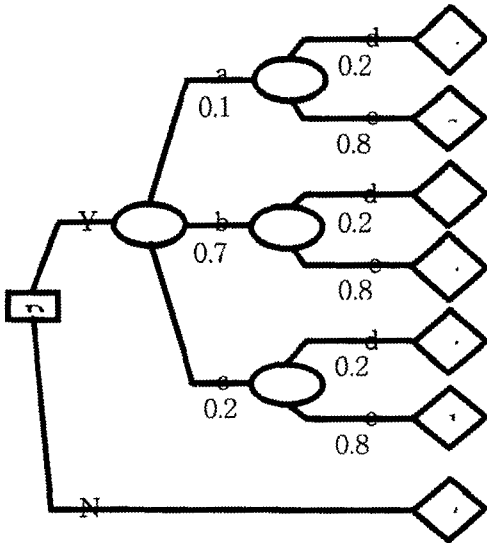
- [4-1] R. D. Shachter, "Evaluating Influence Diagrams," *Operational Research*, Vol. 34, No. 6, p. 871 (1986).
- [4-2] R. D. Shachter, D. M. Eddy, and V. Hasselblad, "An Influence Diagram Approach to the Confidence Profile Method for Health Technology Assessment," *Conf. Influence Diagrams for Decision Analysis, Inference, and Prediction*, Berkeley, California, USA, (May 1988).
- [4-3] S. Holzman, *Intelligent Decision Systems*, Addison-Wesley, New York (1989).
- [4-4] R. D. Shachter, "Probabilistic Influence Diagrams, Belief Nets and Decision Analysis" *Operational Research*, Vol. 36, No. 1, p. 589 (1988).
- [4-5] 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)
- [4-6] Moosung Jae, George E. Apostolakis, "Sensitivity and Uncertainty Analysis of Accident Management Strategies Involving Multiple Decision", *Nuclear*

Technology, vol.104, No.2, pp. 13-36 (1993)

[4-7] USNRC, "PRA Procedure Guide, A Guide to the Performance of Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Plants", NUREG/CR-2300, Vol. 1 & 2 (January 1983).

[4-8] USNRC, "Severe Accident Risks: An Assessment for Five U. S. Nuclear Power Plants", NUREG-1150 (1990).

(a)



(b)

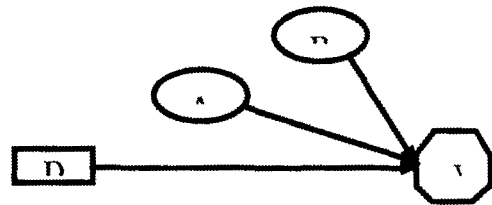
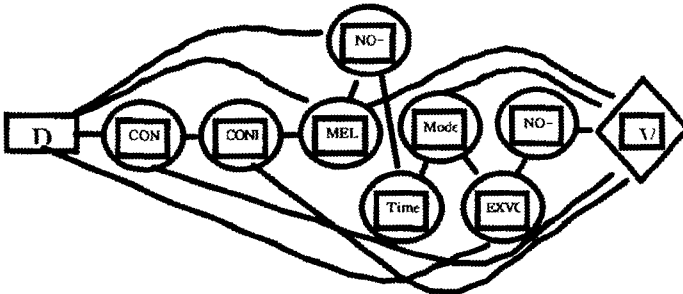


그림 1. 의사결정문제에서 독립성을 설명하는 영향도.



- D:
1. 공동범람(Cavity Flooding)
 2. 감압(Depressurization)
 3. 방치(No Action)

범례: CONBYPASS : Containment Bypass, CONISOALT : Containment Isolation Status, MELTSTOP : Containment Melt Progression, NO-ALPHA : No Alpha Mode Containment Failure, Time-CF : Time of Containment Failure, Mode-CF : Mode of Containment Failure, EXVCOOL : Debris Cooled Exvessel, NO-RECSP : No Recirculation Sprays Failure

그림 2. Source Term과 방사선 누출 최적화 방안을 평가하기위한 영향도.