2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원전 운전원의 사고진단에 대한 정량적 평가

A Quantitative Assessment Method for the NPP Operators' Diagnosis of Accidents

김만철, 성풍현
한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

요 약

본 연구에서는 원자력발전소가 사고상황에 처하게 될 때, 운전원이 사고상황을 어떻게 판단해 나가는가 하는 과정에 대한 정량적인 분석 방법을 개발하였다. 본 연구에서는 사고의 발생확률과 각종 정보원천에 대한 이용불능도, 그리고 정보원천과 사고 사이의 인과관계를 명시하여 베이시안 네트워크를 기반으로 하여 각각의 정보가 수집되어 감에 따른 사고발생확률의 변화에 대한 분석을 통해 이루어졌다. 개발된 방법론을 간단한 사고와 정보원천의 예제에 적용하여 분석을 수행한 결과, 각종 사고와 정보원천 사이의 복잡한 관계 및 사고발생확률과 정보원천의 이용불능도 등의 여러 변수들을 함께 고려할 수 있는 체계적인 정량적 분석 방법인 것으로 밝혀졌다.

Abstracts

In this research, we developed a quantitative model for the operators’ diagnosis of the accident situation when an accident occurs in a nuclear power plant. After identifying the occurrence probabilities of accidents, the unavailabilities of various information sources, and the causal relationship between accidents and information sources, Bayesian network is used for the analysis of the change in the occurrence probabilities of accidents as the operators receive the information related to the status of the plant. The developed method is applied to a simple example case and it turned out that the developed method is a systematic quantitative analysis method which can cope with complex relationship between the accidents and information sources and various variables such accident occurrence probabilities and unavailabilities of various information sources.

1. 서 론

원자력발전소가 사고상황에 처했을 경우, 발전소를 안정화시키는 것이 최우선과제일 것이나, 궁극적으로는 사고원인을 규명하여 그에 맞게 대처하는 것이 중요할 것이다. 이를 위하여 원전 운전원들은 발전소에 대한 각종 정보를 수집, 종합 및 분석하여 사고원인을 규명하기 위하여 노력하게 된다. 이 때, 운전원들이 수집하게 되는 자료들에는 계측제어시스템을 통해서 수집된 발전소의 상태와 관련된 정보들, 현장 운전원들의 오감을 통해 수집되는 각종 정보들 및 절차서 또는 기술지침서 도면 등의 자료 등이 있다. 원전 운전원들은 이러한 모든 정보 및 자료들을 종합하여 발전소 상태에 대한 최종적인 진단을 하게 되는데, 이 때 가능한 정확한 정보 및 자료를 최대한 확보하여 사고진단 결과의 불확실성을 최소화하고자 한다.

TMI-2 원자력발전소 사고, Bhopal 화학공장 사고, 그리고 1974 년의 DC-10 기의 추락사고와 같은 대형사고에서 찾아볼 수 있는 공통점은, 안전문화의 결핍과 운전원의 미숙 뿐만 아니라, 계측제어시스템이 운전원에게 적절한 정보를 주지 못하거나 혹은 잘못된 정보를 주고 있었다는 점이다.[1] 이는 대형사고를 일으키는 주요 원인들 중 하나가 운전원들이 상황을 판단하기에 충분한 정보를 주지 못하거나, 혹은 잘못된 정보로 인해 운전원들이 상황을 잘못 판단하게 하는 것임을 의미한다. 이에 따라서, 발전소의 안전성과 관련된 분석에 있어서 운전원들이 올바른 판단을 내릴 수 있는 여건이 이루어져 있는지, 그리고 몇몇 가용하지 않은 정보들 및 잘못된 정보는 운전원의 사고진단에 어떤 영향을 미칠 수 있는지에 대한 평가가 중요할 것이다. 이러한 취지에서 본 논문은 원자력발전소가 사고상황에 처해있다고 가정했을 때, 운전원들에게 가용한 정보들의 범위안에서, 운전원들이 어떠한 판단을 내리게 될 것인가 하는 문제에 대한 정량적인 평가 방법을 제시하고자 한다.

2. 베이시안 네트워크(Bayesian Network)

Bayes 의 정리는 확률변수에 대한 새로운 정보가 주어졌을 때, 새로운 정보를 이용하여 기존의 확률변수의 값이 어떻게 변화하게 되는가에 대한 평가를 위한 기본적인 틀을 제공한다. 이러한 Bayes 의 정리를 기본으로 하는 베이시안 네트워크는 변수들 사이의 확률론적인 원인 결과관계를 표현하는 네트워크에 대한 도식적인 표현을 의미하며, Belief network, Causal Probabilistic Network, Causal net, Probabilistic Cause-Effect Model, 혹은 Probabilistic Influence Diagram 으로 불리기도 한다. 이러한 베이시안 네트워크는 지금까지 불확실성 하에서의 의사결정에 대한 문제에 널리 쓰여왔으며, 최근에서 소프트웨어 신뢰도 평가에도 적용되기도 한다.[2-4]

베이시안 네트워크에 대한 간단한 예로 포커 칩 문제(Poker Chips Problem)[5]를 들 수 있다. 포커 게임에서 서로 다른 두 종류의 포커 칩 세트가 있는데, 하나의 세트에는 흰색과 빨간색이 5:5 의 비율로 준비되어 있고, 다른 세트에는 흰색과 빨간색이 3:7 의 비율로 준비되어 있다. 이러한 포커 칩 세트는 주머니에 담겨져 있는데, 지금까지의 경험상으로 볼 때, 흰색과 빨간색이 5:5 의 비율로 준비된 칩 세트보다는 흰색과 빨간색이

3:7 로 준비된 칩 세트가 낡은 주머니에 담기게 되는 확률이 더 큰 것으로 나타났다. (표 1) 또한 두 종류의 포커 칩 세트는 서로 다른 제조사에 의해서 제작되는데 흰색과 빨간색의 비율이 5:5 인 칩 세트가 3:7 인 칩 세트에 비해서 분포상으로 약간 더 가볍게 제조되는 것으로 알려져 있다. (표 1) 이러한 상황에서 하나의 칩 세트가 주어졌을 때, 그 칩 세트가 흰색과 빨간색이 5:5 로 준비된 칩 세트인지 (H1), 3:7 로 준비된 칩 세트인지 (H2) 알아내고자 한다면, 주머니의 외형이나 임의로 칩 세트에서 칩을 하나 뽑아서 그 색상을 확인한다던가 혹은 그 크기를 확인하는 등의 정보수집 활동을 통해 어떤 칩 세트인지에 대한 불확실성을 계속해서 줄여나갈 수 있다.

관찰	관찰결과 D	$p(D\|H_1)$	$p(D\|H_2)$
주머니의 외형	낡음	0.3	0.9
	낡지 않음	0.7	0.1
칩 하나의 색상	흰색	0.5	0.3
	빨간색	0.5	0.7
칩의 크기	지름 <= 0.997	0.1	0.1
	0.997 < 지름 <= 0.999	0.3	0.2
	0.999 < 지름 <= 1.001	0.3	0.3
	1.001 < 지름 <= 1.003	0.2	0.3
	1.003 < 지름	0.1	0.1

표 1 포커 칩 문제에 대한 확률 데이터

두 개의 서로 다른 가설 H1 과 H2 가 동일한 확률을 가진다고 가정하면, 두 가설에 대한 초기 확률은 동일하게 0.5, 0.5 로 줄 수가 있다. 이러한 상황에서 주머니의 외형 확인이라는 정보수집활동을 통해서 주머니가 낡았다는 정보를 수집했다면, 두 가설에 대한 확률은 다음과 같이 수정되며, 그 결과를 통해서 우리가 알고자 하는 칩 세트가 흰색과 빨간색의 비가 3:7 인 칩 세트일 가능성이 더 높다는 것을 추정할 수 있는데, Bayes 의리에 의해 두 가설이 대한 확률은 다음과 같이 주어지게 된다.

$$p_1(H_1) = \frac{0.3\times0.5}{0.3\times0.5+0.5\times0.9} = \frac{3}{12} = 0.25 \quad (1)$$

$$p_1(H_2) = 1 - p_1(H_1) = 0.75 \quad (2)$$

이러한 상황에서, 만일 두 번째 우리가 알고자 하는 칩 세트에서 하나의 칩을 꺼내서 그 색상을 확인해서, 그 색상이 빨간색이라는 정보를 수집했다면, 이는 우리가 알고자 하는 칩 세트가 흰색과 빨간색의 비가 3:7 인 칩 세트일 것이라는 추측을 더욱 뒷받침해 주는 것으로써, Bayes 의 정리에 의해 계산되는 두 가설에 대한 확률은 다음과 같다.

$$p_2(H_1) = \frac{0.5\times 0.25}{0.5\times 0.25 + 0.75\times 0.7} = \frac{5}{26} = 0.19 \qquad (3)$$

$$p_2(H_2) = 1 - p_2(H_1) = 0.81 \qquad (4)$$

이러한 상황에서, 마지막으로 칩 세트에서 하나의 칩을 꺼내어 그 크기를 측정하였을 때, 그 크기가 0.998 이었다고 한다면, 이는 지금까지 우리가 알고자 하는 칩 세트가 흰색과 빨간색의 비가 3:7 인 칩 세트일 것이라는 추측과 상반되는 정보이다. 이 경우에 대한, Bayes 정리에 의해 계산되는 두 가설에 대한 확률은 다음과 같다.

$$p_3(H_1) = \frac{0.3\times 0.19}{0.3\times 0.19 + 0.81\times 0.2} = \frac{19}{73} = 0.26 \qquad (5)$$

$$p_3(H_2) = 1 - p_3(H_1) = 0.74 \qquad (6)$$

베이시안 네트워크에 대한 분석은 관련 소프트웨어들을 이용할 수 있다. 그림 1 은 베이시안 네트워크 분석 소프트웨어 중 하나인 MSBNx 를 이용하여, 주머니가 낡은 주머니라는 첫 번째 정보를 반영한 후의 베이시안 네트워크의 확률분포를 나타낸 것이다. 그림 1 에서 Bag 노드의 확률이 H1 에 대해서 0.25, H2 에 대해서 0.75 로써 (1), (2)에서 계산된 값과 동일한 값을 나타냄을 볼 수 있다.

3. 분석을 위한 자료조사

정량적 분석을 위하여 필요한 자료로써 우선 고려대상이 되는 사고상황과 운전원이 정보를 얻을 수 있는 정보의 원천(source)을 정의해야 한다. 여기서 정보의 원천은 위에서 언급한 바와 같이 각종 계측기 및 경보를 통한 정보, 현장 운전원에 의해 전해지는 정보 및 각종 절차서 등이 있다. 이에 더하여 사고상황의 대한 발생확률, 각종 계측기 등의 이용가능도(availability) 그리고, 사고상황과 각종 정보 원천 사이의 인과관계의 자료가 필요하다. 본 연구에서는 고려 대상이 되는 사고상황으로 LOCA(Loss Of Coolant Accident), SLB(Steam Line Break) 그리고 SGTR(Steam Generator Tube Rupture)의 세 가지 서로 다른 사고상황을 정하였고, 정보의 원천으로는 격납용기 방사선 준위 (Containment Radiation, CTMT_R), 격납용기 습도 (Containment Humidity, CTMT_Humidity), 그리고 2 차측 방사선 준위(Secondary Loop Radiation, Second_R)의 서로 다른 세 감시 변수를 정하였다. 이에 더하여 사고상황에 대한 발생확률과 계측기의 이용가능도는 가정된 값을 이용하였고, 각종 정보원천과 사고상황과의 인과관계는 10 년 이상의 원자력발전소 운전 경험을 가진 연구원의 의견을 반영하여 설정하였다. 본 연구의 분석을 위해 사용된 데이터들을 정리하면 표 2 에서 표 4 와 같다.

사고상황	LOCA	SLB	SGTR
발생확률(연간)	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}

표 2 세 가지 사고상황에 대한 발생확률

계측기	CTMT_R	CTMT_Humidity	Second_R
이용불능도	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}

표 3 세 가지 계측기의 이용가능도

Event	CTMT R	CTMT Humidity	Second_R
LOCA	Increase	Increase	Stable
SLB	Stable	Increase	Stable
SGTR	Stable	Stable	Increase

표 4 사고상황에 계측기 사이의 인과관계

4. 예제상황에 대한 분석 결과

그림 2 는 표 2 에서 표 4 에 나타난 데이터를 바탕으로 구성된 베이시안 네트워크의 정상상태에 대한 모형(model)을 보여주고 있다. 정상상태의 경우 세 가지 변수에 대한 경보가 뜨지 않음으로 해서 세 변수 모두 안정상태(stable)에 있다고 생각할 수 있다. 이에 따라 그림 2 의 세 노드 CTMT_R_Sensor, CTMT_Humidity_Sensor, 그리고 Second_R_Sensor 의 세 변수에 대해 모두 안전상태라는 관측결과를 반영하였다. 그림 2 에서 볼 수 있는 바와 같이, 운전원은 위의 관측결과들을 바탕으로 LOCA, SLB, 그리고 SGTR 의 사고상황에 대해서 매우 낮은 발생확률을 판단함으로써 발전소가 정상운전 상태임에 대한 확신을 가지게 될 것을 확인할 수 있다.

운전원이 경보를 통하여 격납용기 내의 방사선 준위(CTMT_R)가 증가(increase)하고 있음을 확인한 후의 운전원의 판단은 그림 3 의 결과를 통하여 추정할 수 있다. 그림 3 에서 볼 수 있는 바와 같이 LOCA 발생에 대한 확률이 10-16 에서 10-6 으로 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있으나, 아직은 LOCA 에 대한 발생확률을 10-6 으로 판단함으로써, 아직은 LOCA 발생에 큰 비중을 두고 있지 않음을 알 수 있다. 이는 근본적으로 LOCA 가 발생할 경우, 격납용기 내의 방사선 준위(CTMT_R) 뿐만 아니라 격납용기 내의 습도(CTMT_Humidity)도 함께 증가하여야 한다는 사실에 따라 운전원이 판단을 하고 있기 때문이라고 할 수 있다.

그림 4 는 그림 3 의 상황에서 운전원이 격납용기 내의 습도(CTMT_Humidity)의 증가(increase)라는 추가적인 정보를 확인한 후의 운전원의 판단을 묘사하고 있다. 그림 4 의 결과에 따라 운전원이 격납용기 내의 습도의 증가를 확인한 후, LOCA 발생을 거의 확신하게 될 것임을 알 수 있다.

그림 5 는 정상상태에서 운전원이 격납용기 내의 습도(CTMT_Humidity)의 증가(increase)를 확인한 경우를 보여주고 있다. 그림 3 의 경우에는 격납용기 내의 방사선

준위의 증가가 SLB 사고발생에 대한 운전원의 판단에 거의 영향을 미치지 않음을 볼 수 있지만, 격납용기 내의 습도의 증가는 SLB 사고 이외에도 LOCA 사고에 대한 운전원의 판단에 상당한 영향을 미침을 확인할 수 있다. 이는 격납용기 내의 습도의 증가는 SLB 뿐만 아니라 LOCA 의 발생에 의해서도 일어날 수 있는 현상이기 때문이며, 이는 비록 격납용기 내의 방사선 준위가 안정된 상태를 유지하는 것으로 관측된다 하더라도 LOCA 의 발생 확률을 급격하게 증가시키게 된다.

그림 6 은 정상상태에서 이차측 방사선 준위(Second_R)이 증가(increase)를 확인한 후의, 운전원의 판단을 묘사하고 있다. 이차측에서 방사선 준위의 증가가 발생할 경우 운전원은 이를 통해서 즉시 SGTR 사고의 발생으로 판단할 수 있을 것이라고 생각할 수도 있으나, 그림 6 에 나타난 결과에 따르면 운전원은 SGTR 의 발생확률을 9% 정도로만 추정하는 것으로 묘사되고 있다. 운전원이 이러한 판단을 내리게 하는 주된 원인은 바로 계측기의 신뢰도에 대한 고려로써 표 2 와 표 3 에 나타난 바와 같이 SGTR 사고의 발생확률이 10-6 인데 비해 계측기의 이용불능도가 10-5 으로 운전원은 이를 SGTR 사고 발생 보다는 단순한 계측기의 고장에 더 중점을 두고 판단하고 있음을 의미한다. 이를 통하여 운전원이 경보발생시 그 원인을 판단하는데 있어서 섣불리 사고발생을 판단하는 것이 아니라, 계측기의 계측기의 이용불능도와 실제 사고의 발생빈도를 함께 고려하여 최종판단을 내리게 된다는 것을 묘사하고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 원자력발전소가 사고상황에 처해있을 때, 운전원이 정보수집을 통하여 사고진단을 하는 과정을 베이시안 네트워크를 이용하여 정량적인 분석을 수행하는 방법을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 정량적인 분석 방법을 통하여 운전원이 사고상황에서 발전소의 상태에 관련된 정보를 수집해나감에 따라 각 사고상황에 대한 발생확률을 판단해 나가는 과정을 정량적으로 평가할 수 있음을 보였다. 본 논문에서 제시한 예제는 아주 단순화된 경우에 대한 예제로써 각각의 사고상황 및 그와 관련된 각종 정보원천에 대한 조사를 통하여, 사고상황에서 운전원의 판단이 올바르게 이루어질 수 있도록 필요한 정보를 제공할 수 있는가에 관한 정보흐름분석 등에 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업의 지원을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

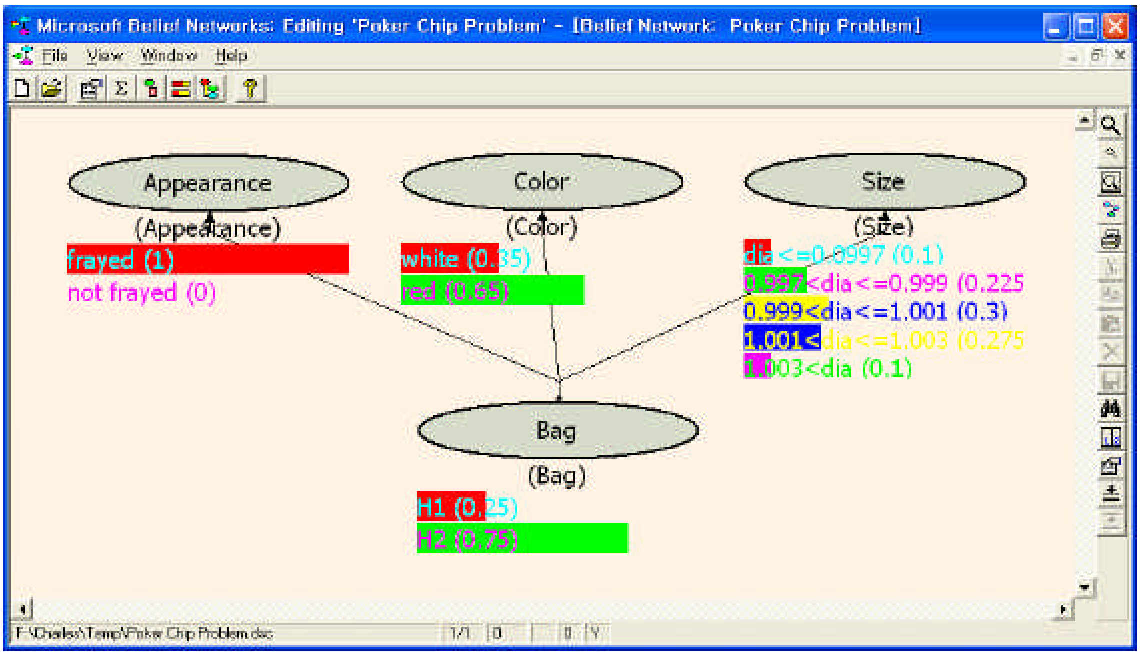
[1] N. G. Leveson, Safeware: System Safety and Computers, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1995

[2] M. Bouissou, F. Martin, and A. Ourghanlian, Assessment of a safety-critical system including software: a Bayesian belief network for evidence sources, In: Proc Ann Reliab Maintain Symp. 1999:142-50

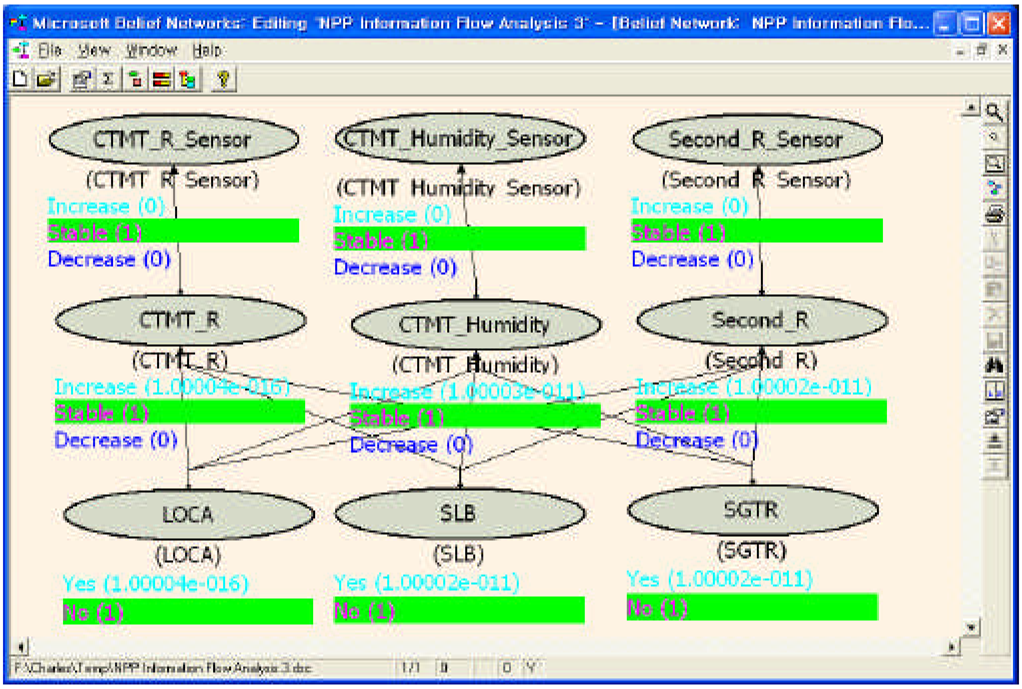
[3] N. E. Fenton, B. Littlewood, M. Neil, L. Strigini, A. Sutcliffe, and D. Wright. Assessing dependability of safety critical systems using diverse evidence, IEE Proc Software 1998;145:35-9

[4] N. E. Fenton, and M. Neil. Software metrics: successes, failures and new directions, Journal of System and Software 1999;47:149-57

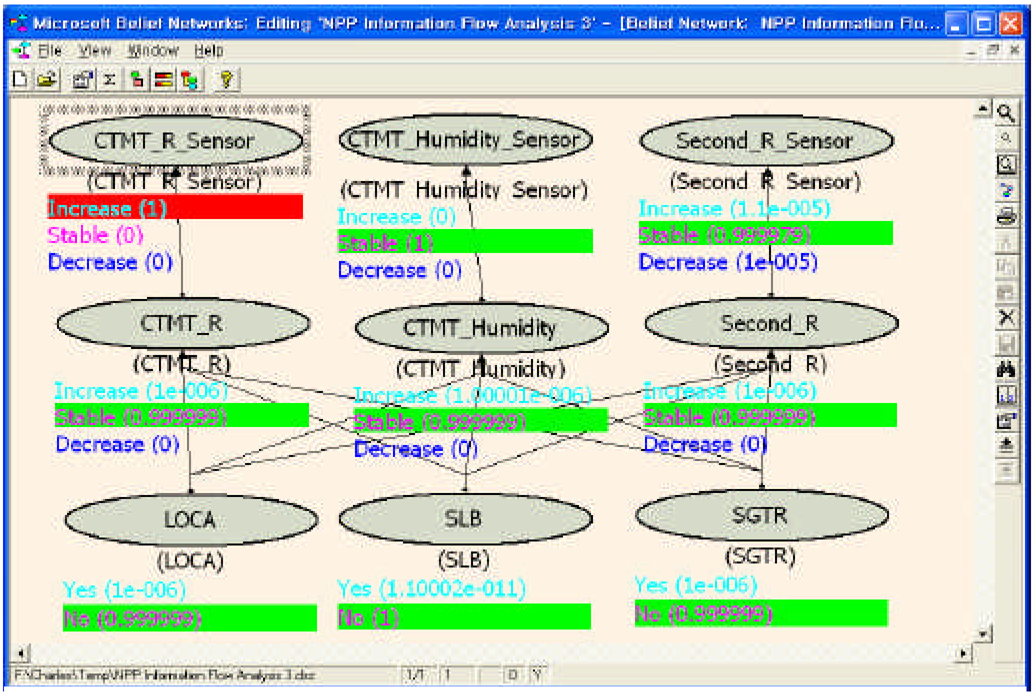
[5] T. B. Sheridan and W. R. Ferrel, Man-Machine Systems: Information, Control and Decision Models of Human Performance, The MIT Press, 1974



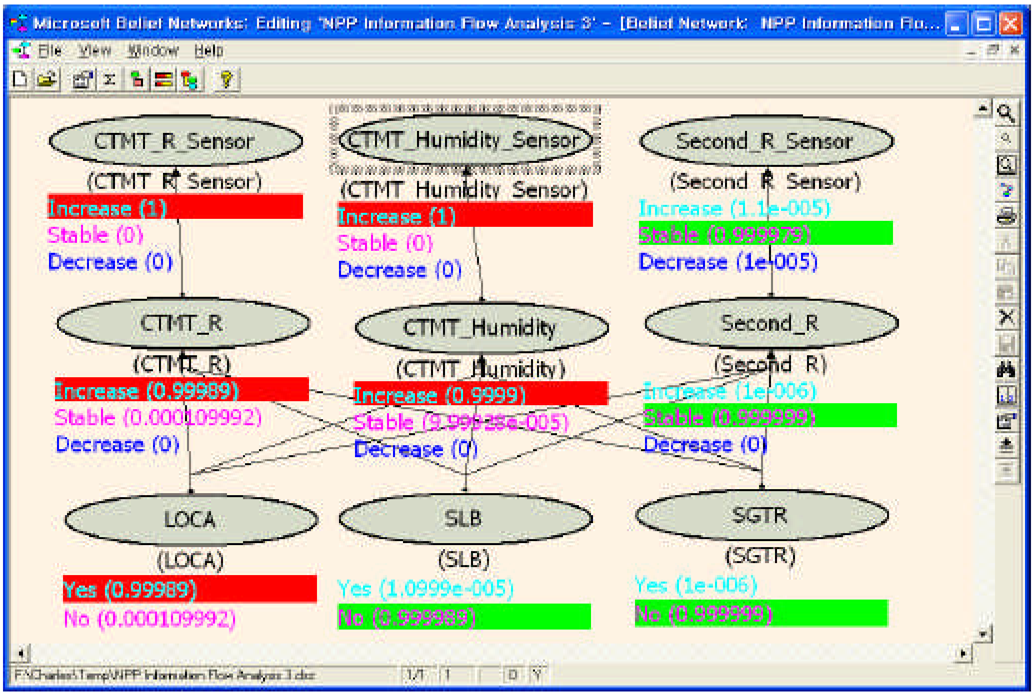
Microsoft Belief Networks: Editing 'Poker Chip Problem' - [Belief Network: Poker Chip Problem]
File View Window Help
Appearance
(Appearance)
frayed (1)
not frayed (0)
Color
(Color)
white (0.35)
red (0.65)
Size
(Size)
dia<=0.0997 (0.1)
0.997<dia<=0.999 (0.225
0.999<dia<=1.001 (0.3)
1.001<dia<=1.003 (0.275
1.003<dia (0.1)
Bag
(Bag)
H1 (0.25)
H2 (0.75)



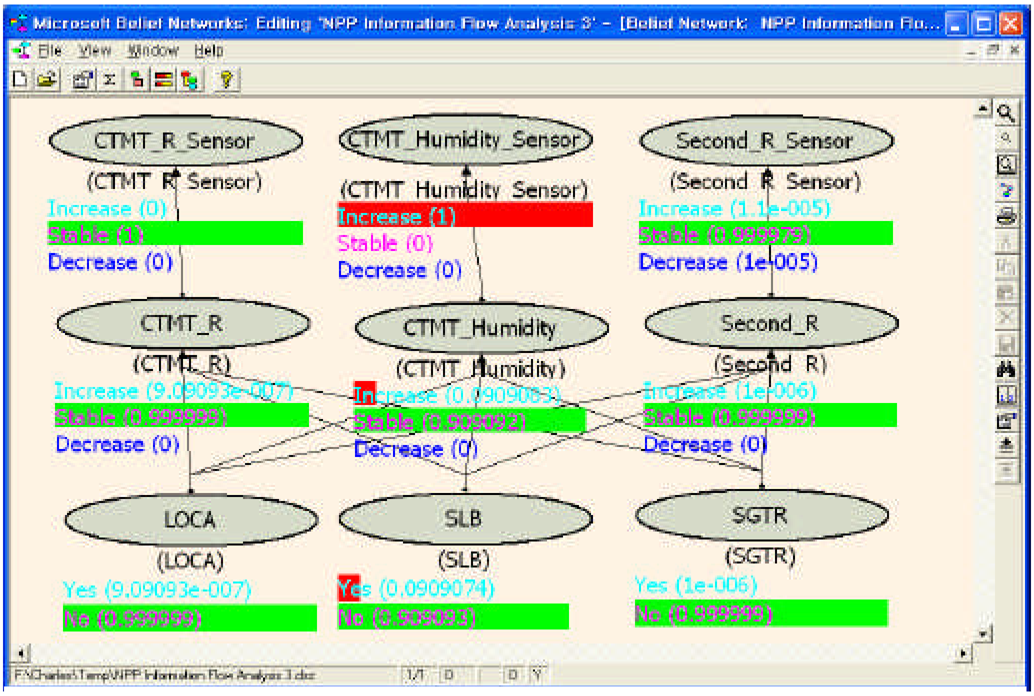
Microsoft Belief Networks: Editing 'NPP Information Flow Analysis 3' - [Belief Network: NPP Information Flo...
File View Window Help
CTMT_R_Sensor
(CTMT R Sensor)
Increase (0)
Stable (1)
Decrease (0)
CTMT_Humidity_Sensor
(CTMT Humidity Sensor)
Increase (0)
Stable (1)
Decrease (0)
Second_R_Sensor
(Second R Sensor)
Increase (0)
Stable (1)
Decrease (0)
CTMT_R
(CTMT R)
Increase (1.00004e-016)
Stable (1)
Decrease (0)
CTMT_Humidity
(CTMT Humidity)
Increase (1.00003e-011)
Stable (1)
Decrease (0)
Second_R
(Second R)
Increase (1.00002e-011)
Stable (1)
Decrease (0)
LOCA
(LOCA)
Yes (1.00004e-016)
No (1)
SLB
(SLB)
Yes (1.00002e-011)
No (1)
SGTR
(SGTR)
Yes (1.00002e-011)
No (1)

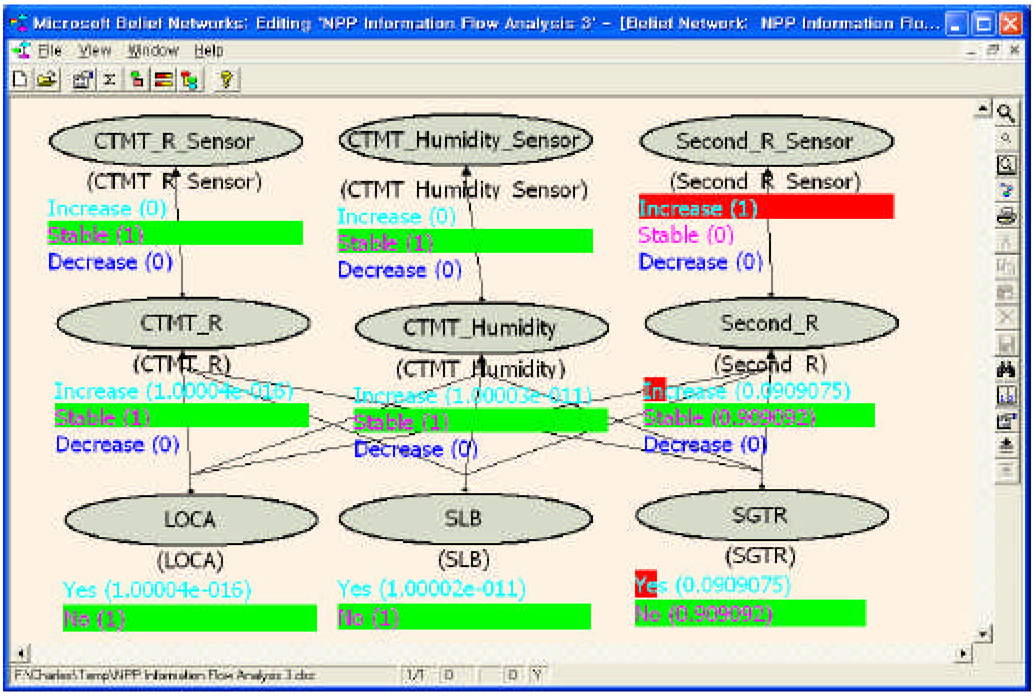


Microsoft Belief Networks: Editing 'NPP Information Flow Analysis 3' - [Belief Network: NPP Information Flo...
File View Window Help
CTMT_R_Sensor
(CTMT R Sensor)
Increase (1)
Stable (0)
Decrease (0)
CTMT_Humidity_Sensor
(CTMT Humidity Sensor)
Increase (0)
Stable (1)
Decrease (0)
Second_R_Sensor
(Second R Sensor)
Increase (1.1e-005)
Stable (0.999979)
Decrease (1e-005)
CTMT_R
(CTMT_R)
Increase (1e-006)
Stable (0.999999)
Decrease (0)
CTMT_Humidity
(CTMT_Humidity)
Increase (1.00001e-006)
Stable (0.999999)
Decrease (0)
Second_R
(Second R)
Increase (1e-006)
Stable (0.999999)
Decrease (0)
LOCA
(LOCA)
Yes (1e-006)
No (0.999999)
SLB
(SLB)
Yes (1.10002e-011)
No (1)
SGTR
(SGTR)
Yes (1e-006)
No (0.999999)



Microsoft Belief Networks: Editing 'NPP Information Flow Analysis 3' - [Belief Network: NPP Information Flo...
File View Window Help
CTMT_R_Sensor
(CTMT R Sensor)
Increase (1)
Stable (0)
Decrease (0)
CTMT_Humidity_Sensor
(CTMT Humidity Sensor)
Increase (1)
Stable (0)
Decrease (0)
Second_R_Sensor
(Second R Sensor)
Increase (1.1e-005)
Stable (0.999979)
Decrease (1e-005)
CTMT_R
(CTMT_R)
Increase (0.99989)
Stable (0.000109992)
Decrease (0)
CTMT_Humidity
(CTMT_Humidity)
Increase (0.9999)
Stable (9.99928e-005)
Decrease (0)
Second_R
(Second R)
Increase (1e-006)
Stable (0.999999)
Decrease (0)
LOCA
(LOCA)
Yes (0.99989)
No (0.000109992)
SLB
(SLB)
Yes (1.0999e-005)
No (0.999989)
SGTR
(SGTR)
Yes (1e-006)
No (0.999999)


Microsoft Belief Networks: Editing 'NPP Information Flow Analysis 3' - [Belief Network: NPP Information Flo...
File View Window Help
CTMT_R_Sensor
(CTMT_R_Sensor)
Increase (0)
Stable (1)
Decrease (0)
CTMT_Humidity_Sensor
(CTMT_Humidity_Sensor)
Increase (1)
Stable (0)
Decrease (0)
Second_R_Sensor
(Second_R_Sensor)
Increase (1.1e-005)
Stable (0.999979)
Decrease (1e-005)
CTMT_R
(CTMT_R)
Increase (9.09093e-007)
Stable (0.999999)
Decrease (0)
CTMT_Humidity
(CTMT_Humidity)
Increase (0.0909083)
Stable (0.909092)
Decrease (0)
Second_R
(Second_R)
Increase (1e-006)
Stable (0.999999)
Decrease (0)
LOCA
(LOCA)
Yes (9.09093e-007)
No (0.999999)
SLB
(SLB)
Yes (0.0909074)
No (0.909093)
SGTR
(SGTR)
Yes (1e-006)
No (0.999999)


Microsoft Belief Networks: Editing 'NPP Information Flow Analysis 3' - [Belief Network: NPP Information Flo...
File View Window Help
CTMT_R_Sensor
(CTMT_R_Sensor)
Increase (0)
Stable (1)
Decrease (0)
CTMT_Humidity_Sensor
(CTMT_Humidity_Sensor)
Increase (0)
Stable (1)
Decrease (0)
Second_R_Sensor
(Second_R_Sensor)
Increase (1)
Stable (0)
Decrease (0)
CTMT_R
(CTMT_R)
Increase (1.00004e-016)
Stable (1)
Decrease (0)
CTMT_Humidity
(CTMT_Humidity)
Increase (1.00003e-011)
Stable (1)
Decrease (0)
Second_R
(Second_R)
Increase (0.0909075)
Stable (0.909092)
Decrease (0)
LOCA
(LOCA)
Yes (1.00004e-016)
No (1)
SLB
(SLB)
Yes (1.00002e-011)
No (1)
SGTR
(SGTR)
Yes (0.0909075)
No (0.909092)