

Radiological Risk Assessment for the Public Under the Loss of Medium and Large Sources Using Bayesian Methodology

Joo-Yeon Kim · Han-Ki Jang and Jai Ki Lee

Dept. of Nuclear Engineering, Hanyang University

베이지안 기법에 의거한 중대형 방사선원의 분실 시 일반인에 대한 방사선 위험도의 평가

김주연 · 장한기 · 이재기

한양대학교 원자력공학과

(2005년 1월 15일 접수, 2005년 5월 31일 채택)

Abstract - Bayesian methodology is appropriated for use in PRA because subjective knowledges as well as objective data are applied to assessment. In this study, radiological risk based on Bayesian methodology is assessed for the loss of source in field radiography. The exposure scenario for the lost source presented in U.S. NRC is reconstructed by considering the domestic situation and Bayes theorem is applied to updating of failure probabilities of safety functions. In case of updating of failure probabilities, it shows that 5 % Bayes credible intervals using Jeffreys prior distribution are lower than ones using vague prior distribution. It is noted that Jeffreys prior distribution is appropriated in risk assessment for systems having very low failure probabilities. And, it shows that the mean of the expected annual dose for the public based on Bayesian methodology is higher than the dose based on classical methodology because the means of the updated probabilities are higher than classical probabilities. The database for radiological risk assessment are sparse in domestic. It summarizes that Bayesian methodology can be applied as an useful alternative for risk assessment and the study on risk assessment will be contributed to risk-informed regulation in the field of radiation safety.

Key words : Bayesian methodology, PRA, exposure scenario, prior distribution, risk-informed regulation

요약 - 베이지안 기법은 객관적 자료 이외에 주관적 지식도 평가에 반영하는 특성으로 인해 최근 PRA에서 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 비파괴검사 장비 분실에 대한 방사선 위험도를 평가하기 위해 베이지안 기법을 활용하였다. U.S. NRC에서 제시한 선원분실 피폭 시나리오를 국내 실정에 맞게 재구성하였고 안전인자의 사고발생 확률에 국한하여 적용하였다. 사고발생 확률수정의 경우 Jeffreys 사전분포를 사용한 결과가 모호사전분포를 사용한 결과보다 5 % 베이지안 하한치가 더 낮아서 방사선 사고와 같은 낮은 사고발생 확률을 가지는 시스템에 대한 위험도 평가에 적합하다. 위험도의 결과를 보면 일반인의 연간 예상되는 평균선량은 베이지안 기법이 고전적 기법에 의거한 평가보다 높은 선량을 나타내는데 이는 수정된 안전인자 확률의 평균이 고전적 확률값보다 높게 평가된 것에 기인한다. 국내의 경우 방사선 위험도 평가를 위한 자료구축이 미비한 바 베이지안 기법은 위험도 평가에 유용한 대안으로 활용할 수 있으며 이러한 연구는 위험도 정보-기반 규제에 기여할 것이다.

중심어 : 베이지안 기법, 확률론적 위험도 평가, 피폭시나리오, 사전분포, 위험도 정보-기반 규제

서 론

확률론적 위험도 평가 (PRA)는 평가대상 시스템의 사고확률 및 이에 따른 결과를 평가하는 것에 그 목적을 두고 있으며 평가 대상을 묘사하는 중요한 양인 확률을 상대적 빈도에 기인한 참값으로 하는 고전적인 기법에 의거한 평가가 과거 수십 년간 주를 이루어 왔다. 이러한 확률론적 위험도 평가의 대상은 일반적으로 자료를 활용하는 것이 거의 불가능할 만큼의 아주 낮은 사건발생 확률을 갖기 때문에 공학적 자료뿐만 아니라 전문가 판단 등과 같은 주관적 지식을 결합하여 위험도를 평가하는 베이지안 평가기법이 확률적 추리 및 판단의 영역에서 유용한 과학의 논리로 인정받고 있다[1,2].

베이지안 기법에 의거한 위험도 평가는 평가대상 모수에 대한 사전분포 (prior distribution)를 정량화하고, 수집된 자료에 근거한 우도함수 (likelihood function)를 구축한 후 베이즈 이론에 의거하여 사전분포와 우도함수를 결합한 사후분포 (posterior distribution)를 도출하여 이를 평가에 적용하는 것으로써[1,3] Oliver 등[4], Chow 등[5]의 선례와 같이 시스템의 사고발생 확률 혹은 사고율을 평가하는 것이 일반적이다. 이러한 평가는 사후분포에 대한 해석적인 결과를 용이하게 도출하기 위해서 Binomial-Beta 조합 혹은 Poisson-Gamma 조합과 같은 공액조합 (conjugate family)을 적용하거나 모호사전분포 (vague prior)와 같은 정보에 기반하지 않는 사전분포 (noninformative prior)를 적용하여 수행한다.

방사선 위험도는 평가에 사용되는 변수들의 자료부족 등의 이유로 단일값 혹은 평균값을 사용하여 결정론적인 평가를 하였기 때문에 그 평가 결과는 과대평가 또는 과소평가될 수 있다. 최근 U.S. NRC[6]에서 수행한 연구결과를 보더라도 40개의 방사성 동위원소 내장 시스템에 대한 위험도를 시나리오별, 직무별로 평가한 후 이러한 위험도 정보를 바탕으로 규제 선택적 요건을 도출하기 위한 방법론을 마련하였지만 이러한 위험도 평가방법도 평가에 사용되는 변수들 중 자료 구축이 미흡한 변수에 대해서는 가정에 근거한 단일값 혹은 평균값을 사용하였다. 이는 평가자의 주관에 따라 평가에 사용되는 변수들의 값을 다양하게 설정할 수 있다는 것을 의미하므로 위험도 결과의 신뢰구간이 넓어지게 되어 불확실성이 증가하는 원인을 제공한다. 결국 이러한 상황은 방사선 안전규제의 부담을 가중시키는 원인이기

도 하므로 합리적인 위험도 평가방법론에 의거한 평가가 요구된다. 그러므로, 본 연구는 주관적 지식과 같은 다양한 정보를 평가에 반영하는 베이지안 평가기법의 특성에 주목하여 본 평가기법이 방사선 위험도 평가 시 새로운 방법론으로써 대안이 될 수 있는가에 대한 검토를 목적으로 한다.

이러한 배경에 따라 본 연구에서는 중대형 방사선원의 분실행위에 대한 위험도를 베이지안 기법에 의거하여 평가하고자 한다. 국내 방사선 기기 분실 사고사례를 검토한 후 U.S. NRC[6]에서 제시한 선원분실 피폭 시나리오를 국내 실정에 맞게 재구성하였으며 베이즈 이론에 의거하여 안전인자의 사고발생 확률을 수정한 후 이를 바탕으로 중대형 방사선원 중 비파괴 검사 장비의 분실행위 시 야기될 일반인의 위험도를 평가하였다.

연구방법론

이론적 배경

위험도 평가에서 적용되는 베이즈 이론은 식(1)과 같다[3,7].

$$f(\theta_i | E) = \frac{f(\theta_i) L(E | \theta_i)}{\sum_j^n f(\theta_j) L(E | \theta_j)} \quad (1)$$

여기서, $f(\theta_i | E)$: 사상 E 가 발생한 경우 θ_i 에 대한 사후분포

$f(\theta_i)$: 사전 결정된 θ_i 의 사전분포

$L(E | \theta_i)$: θ_i 가 주어질 경우 E 에 대한 우도함수

사전분포는 미지의 모수에 대한 평가자의 믿음의 정도를 정확히 반영하기가 어려우므로 베이지안 평가에서 가장 큰 논쟁을 제공해 왔다. 이러한 이유로 객관적 자료가 부족하여 우도함수 구축이 어렵거나 위험도 결과에 주된 영향을 미치는 모수에 대한 평가가 아니라면 정보에 기반한 사전분포를 도출해야 할 필요는 없다[1]. 본 연구에서 평가하고자 하는 선원분실 사고발생 확률의 경우 우도함수 구축을 위한 객관적인 자료가 부족하여 정보에 기반한 사전분포 (informative prior)가 평가에 타당하나 이에 관련한 자료가 전무한 이유로 부득이 정보에 기반하지 않은 사전분포를 평가에 적용하였다. 사전분포는 모호사전분포 및 Jeffreys 사전분포를 활용하였으며 도출된 사고발

생 확률 및 위험도 결과에 대한 각각의 90 % 베이지 신뢰구간을 비교하여 위험도 평가 시 불확실성을 좀 더 감소시키는 사전분포를 확인하였다.

한편, 적절한 우도함수를 구축하기 위해서는 평가 대상에 대한 공학적, 과학적 지식뿐만 아니라 정확한 모델링이 요구된다. 본 연구에서는 위험도를 평가하는 사전단계로써 사고 분지에 대한 확률을 우선 수정해야 하므로 이항분포가 우도함수로 타당하다.

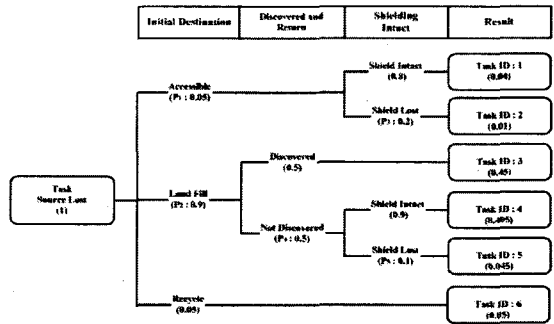


Fig. 1. Exposure scenario for the loss of source.

선원분실 시 일반인의 잠재피폭 발생가능 요인

면허자의 부적절한 폐기 또는 분실, 도난 등에 의해 일반인 구역에 유입된 방사선 기기는 일반인에 대한 피폭을 유발하게 된다. 일반인 구역에 선원이 유입될 가능성은 선원 및 기기의 물리적 특성, 적절한 폐기에 대한 면허자의 관심, 분실 및 도난을 방지하기 위한 예방조치, 선원 및 기기의 가치 등에 따르게 된다.

일반적으로 선원이 일반인 구역으로 유입되는 경우는 다음의 4가지 경우이다: 1) 일반인이 접근 가능한 상태 (Accessible); 2) 매립지 (Landfill); 3) 도시의 소각로 (Incineration); 4) 재활용을 위한 야적장 (Recycling).

피폭 시나리오의 구축

본 연구에서 사용한 시나리오는 U.S. NRC[6]에서 제공하는 것에 기초한다. 분지별 확률은 PNL[8], Lubenau[9]을 바탕으로 도출된 것이며 U.S. NRC는 분실에 대한 사고발생 확률은 방사선원을 사용하는 시스템에 대해서 동일하게 적용할 수 있다고 권고하고 있다[6]. 이 중 국내에서는 보고되지 않은 소각에 관한 시나리오는 매립지 시나리오로 통합하였다. 일반폐기물의 경우 부피를 감용시키기 위해 소각을 한 후 잔재물을 매립하는 절차를 거친다. 만약 분실선원이 일반폐기물과 함께 소각된다면 일반폐기물의 잔재물과 함께 매립지에서 최종 처리될 것이므로 소각 시나리오를 매립지 시나리오로 통합하는 것은 타당할 것이다. 재활용의 경우는 국내 보고서[10]에 의하면 모두 발견된 것으로 드러났다. 이러한 과정을 거쳐 재구성된 피폭 시나리오를 그림1에 도시하였다. 국내의 경우, 선원분실 및 도난사고는 약 20여건이 보고되어 있으나[11] 이를 그림1에 적용하여 확률을 수정하기에는 불가능하다. 그래서, 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 보고 누락된 사고를 가정하여 평가가 가능한 최소의 횟수인 100회로 하였다. 수정대상 확률은 사고발생 확률만으

로 국한하였으며 그림1에서 P₁ - P₅로 나타내었다. 여기서, P₁은 분실장비 중 일반인이 접근가능한 상태로 방치되어 있을 확률, P₂는 분실장비 중 매립지에 방치되어 있을 확률, P₃는 일반인이 접근가능한 상태로 방치된 분실장비 중 차폐장치가 손상되어 있을 확률, P₄는 매립지에 방치된 분실장비 중 발견되지 않아 미회수된 확률, P₅는 매립지에 방치되고 발견되지 않아 미회수된 장비 중 차폐장치가 손상된 확률을 의미한다.

결과 및 토의

사고발생 확률의 수정

(1) 모호사전분포를 이용한 사고발생 확률의 수정

모호사전분포는 균일분포로 정의되며 평가 대상 모수에 대한 사후분포는 식(1)에 의해 계산된다. 일반적으로 확률은 $0 \leq \theta \leq 1$ 로 주어지므로 먼저 이 구간을 균등분할하여 확률을 수정하면 $\theta \geq 0.2$ 에서 확률밀도는 10^{-6} 이하로 급격히 떨어지게 되어 구간 (0.2, 1]에 대해서 위험도를 평가하는 것은 무의미하다[12]. 이러한 과정을 통해 다시 확률을 수정하려는 구간을 [0, 0.2]로 제한한 후 구간을 더 세분하여 확률을 수정하였으며 사후분포에 대한 90 % 베이지 신뢰구간, 평균값을 도출하였다. 이러한 평가과정은 Jeffreys 사전분포를 이용하는 경우에도 동일하게 적용된다.

그림2에 P₁에 대해 수정된 사후분포 결과를 예시하였다. Apostolakis[12]은 PRA에서는 분포의 특성을 대표하는 값으로는 중앙값 (median)이 평균값 (mean)보다 더 타당하다고 제시하였지만 본 연구에서 도출된 중앙값은 P₁의 경우 0.116으로 그림2에서 보는 바와 같이 평균값인 0.059에 비해

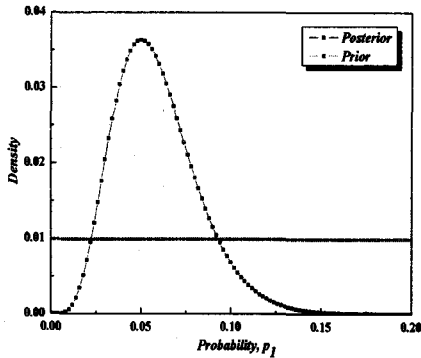


Fig. 2. Posterior distribution of P_1 using vague prior distribution.

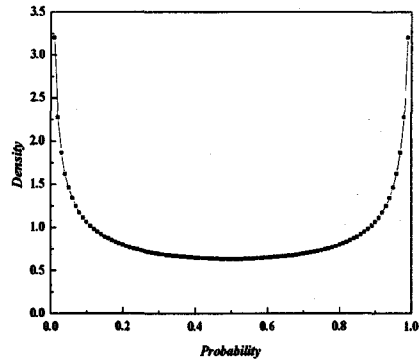


Fig. 3. Jeffreys prior distribution, Beta(0.5, 0.5).

훨씬 사후분포의 오른쪽으로 치우쳐 있어서 분포를 대표할 수 없기 때문에 평균값을 사후분포를 대표하는 값으로 채택하였다. 이 경우의 사후분포에 대한 평균값은 $\sum_i \theta_i f(\theta_i)$ 가 된다. 여기서, n 은 $[0, 0.2]$ 구간을 균등분할한 횟수, i 는 균등분할한 임의의 지점, i 는 i 번째 확률, $f(\theta_i)$ 는 i 번째 확률에 대한 사후분포의 밀도를 의미한다.

(2) Jeffreys 사전분포를 이용한 사고발생 확률의 수정

Jeffreys 사전분포는 사전정보가 전혀 주어지지 않거나 다양한 의사형태로 인해 하나의 사전분포를 도출하기가 어려울 경우 유용하며 우도함수에 따라 정해진 형태를 취한다[13]. 본 연구에서는 우도함수가 이항분포를 가지므로 이에 적합한 Jeffreys 사전분포는 Beta(0.5, 0.5)가 된다. 이를 적용한 평가대상 모수에 대한 사후분포는 Beta($r+0.5, n-r+0.5$), 평균값은 $\frac{r+0.5}{n+1}$ 이 된다 [3,13]. 여기서, n 은 총시행횟수, r 은 사고발생 횟수를 의미한다. 그림3 및 4에 Jeffreys 사전분포 및 이를 활용하여 수정된 P_1 의 사후분포를 예로써 도시하였다.

(3) 베이지 신뢰구간의 비교

두 개의 사전분포에 의거하여 도출된 사고발생 확률 수정 결과를 표1에 정리하였다. 각각의 사전분포에 대응하는 사후분포의 평균값을 고전적 확률값과 비교해 보면 별 차이가 없지만 Jeffreys 사전분포를 사용한 평균값이 고전적 확률값에 좀더 근접함을 알 수 있다. 이는 비록 두 개의 사전

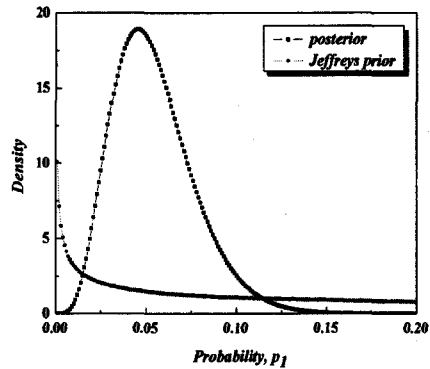


Fig. 4. Posterior distribution of P_1 using Jeffreys prior distribution.

분포가 사전(삭제)정보에 기반하지 않는 분포라 하더라도 Jeffreys 사전분포가 모호사전분포보다 더 평가에 적합함을 의미한다.

Jeffreys 사전분포는 그림3에서 보는 바와 같이 확률이 0이나 1에 가까이 갈수록 밀도가 급격히 증가한다는 것을 제외하면 그 형태가 모호사전분포와 별 차이가 없다. 그러나, Jeffreys 사전분포를 사용하여 사후분포를 도출할 때 확률이 0에 가까울수록 사후분포는 사전분포의 영향을 더 받게 되어 5 % 베이지 하한치가 모호사전분포를 사용한 결과에 비해 조금 더 왼쪽으로 치우치게 된다. 이러한 사실은 Jeffreys 사전분포가 방사선 사고와 같이 낮은 사고발생 확률 혹은 사고율에 대한 확률수정에 더 적합하며 위험도 평가에 적용가능함을 보여주는 사례라 할 수 있다. 한편, P_4 의 경우는 고전적 확률치인 0.5를 기준으로 좌우의 분포형태를 보면 각각의 사전분포가 모두 균일 분포를 따르므로 수정된 확률 결과는 동일한 것으로 판단된다.

Table 1. Comparison of failure probabilities updating for P₁, P₂, P₃, P₄ and P₅.

Failure prob.	Prior	5 %	Mean	95 %	Classical
P ₁	Vague	0.025	0.059	0.110	0.05
	Jeffreys	0.023	0.054	0.096	
P ₂	Vague	0.837	0.892	0.937	0.9
	Jeffreys	0.841	0.896	0.939	
P ₃	Vague	0.059	0.285	0.579	0.2
	Jeffreys	0.031	0.250	0.561	
P ₄	Vague	0.411	0.500	0.582	0.5
	Jeffreys	0.411	0.500	0.582	
P ₅	Vague	0.048	0.117	0.201	0.1
	Jeffreys	0.043	0.108	0.190	

Table 2. Expected annual doses for the public.

Quantile	Expected annual dose [mSv ⁻¹]		
	Vague	Jeffreys	Classical
5 % Bayes credible interval	0.171	0.163	
Mean	0.378	0.347	0.301
95 % Bayes credible interval	0.929	0.824	

위험도 평가

국내에 보고된 방사선 기기의 분실 및 도난사건은 지난 20여 년간 총 21건이며 그 중 비파괴 검사 장비에 관련된 사건은 12건이다[11]. 이를 바탕으로 $6.48 \times 10^{-4} \text{ y}^{-1}$ 의 연간 발생빈도를 도출하였으며 선원의 세기, 거리 및 노출시간은 각각의 시나리오에 따라 U.S. NRC[6]에서 제시한 단일값을 사용하였다. 위험도 평가방법은 마찬가지로 U.S. NRC[6]에서 제시한 방법론에 기초하였다. 선원분실 시에는 일반인의 잠재피폭이 더 우려되므로 본 연구에서는 일반인에 대한 위험도 평가를 수행하였다.

표2 및 그림5에 일반인의 연간 예상되는 선량을 나타내었다. 베이지안 기법에 의해 계산된 연간 평균선량이 고전적 결과치보다 약간 높았다. 이는 수정된 안전인자 확률의 평균값이 고전적 확률값보다 조금 높게 평가된 것에 기인한다. 그리고, 베이지안 기법을 이용한 결과를 고전적인 계산방법에 의거한 결과와 비교해 보면 Jeffreys 사전분포에 의해 계산된 연간 평균선량이 고전적 결과치에 좀 더 근접함을 알 수가 있다. 이는

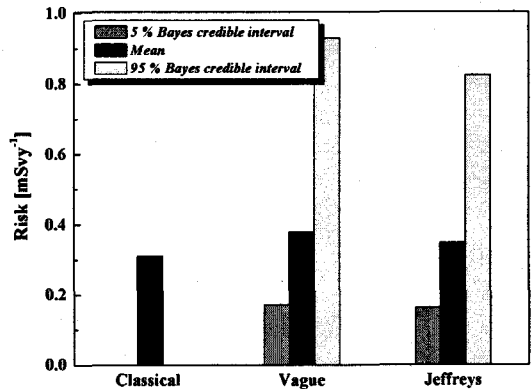


Fig. 5. Comparison of representative risks for the public.

베이지안 기법을 이용해 방사선 위험도를 평가할 경우 Jeffreys 사전분포가 모호사전분포보다 평가에 더 적합하다는 것을 암시한다.

본 연구는 제한된 자료로 인해 U.S. NRC에서 제시한 피폭 시나리오내의 안전인자를 삭제하였기 때문에 그 평가결과가 다소 보수적이다. 그러

나, 국내의 사고사례에서도 보듯이 일단 사고가 발생하면 일반인 및 사회에 미치는 영향이 클 수 있다는 점에서 주의가 요망된다. 아울러 본 연구에서는 베이지안 기법을 사고발생 확률만(삭제)을 수정하는 절차에만 베이지안 기법을(삭제) 적용하였기 때문에 위험도 결과치는 다소 불확실성을 내포하고 있다. 그러므로, 이를 바탕으로 선원의 세기, 작업시간 및 작업거리와 같은 다양한 모수에 베이지안 기법을 적용하기 위한 방법론을 개발하여 평가에 적용하는 것이 요구된다.

방사선 기기 등의 합리적인 방사선 규제를 위해서는 취급행위에 대한 위험도의 크기가 정량화되어야 한다. 그러나, 국내의 경우 방사선 사고 등의 관련 자료구축 미흡 및 낮은 사고발생 빈도로 인해 주로 객관적 자료에만 의존하는 고전적 평가기법이나 일반적인 PRA 기법으로는 위험도 평가에 한계가 있다. 그러므로, 전문가 판단이나 믿음의 정도와 같은 주관적 지식을 결부한 베이지안 기법이 위험도 평가에 유용한 도구로 활용될 수 있다.

결 론

베이즈 이론에 의거하여 수정된 안전인자의 확률을 바탕으로 비파괴검사장비의 분실행위 피폭 시나리오에 대한 위험도 평가를 수행하였다. U.S. NRC에서 제시한 피폭 시나리오를 국내 실정에 맞게 재구성하였고 안전인자의 사고발생 확률에 대해서 적용하였다. 확률수정의 경우 Jeffreys 사전분포를 사용한 확률의 평균값이 모호사전분포를 사용한 평균값보다 고전적인 값에 더 근접하였다. 또한 일반인의 연간 예상되는 평균선량의 경우도 마찬가지로 Jeffreys 사전분포에 의거한 결과가 고전적인 위험도 결과에 더 근접하였다. 이러한 사실은 베이지안 기법을 이용한 방사선 위험도 평가에서 Jeffreys 사전분포가 더 타당하다는 것을 의미한다. 본 평가에서는 베이지안 기법이 안전인자의 확률에 대해서만 적용되었다. 그러나, 선원의 세기, 작업시간 및 작업거리 등과 같은 다양한 모수에 대해서도 동시에 적용할 수 있는 베이지안 방법론을 개발하는 것이 요구된다. 국내의 경우 방사선 위험도 평가를 위한 자료구축이 미비한 바, 베이지안 기법은 객관적 자료뿐만 아니라 주관적 지식도 결합시키는 특성으로 인해 위험도 평가에 유용한 도구로 활용될 수 있다. 이러한 연구는 위험도 정보-기반 규제 (RIR;

risk-informed regulation) 확립에 기여할 것이다.

감사의 글

본 연구는 방사선안전기술연구센터 (iTRS)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Nathan O. Siu and Dana L. Kelly, "Bayesian Parameter Estimation in Probabilistic Risk Assessment," *Reliability Engineering and System Safety*, 62, 89-116(1998)
2. 이영의, "베이즈적 추리와 가설 확증," *한국인지과학회 논문지*, 8(2), 49-57(1997)
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment*, NUREG/CR-6823, SAND2003-3348P(2003)
4. R.M. Oliver and H.J. Yang, "Bayesian Updating of Event Tree Parameters to Predict High Risk Incidents," in: *Influence Diagrams, Belief Nets and Decision Analysis*, R.M. Oliver and J.Q. Smith, eds., pp. 277-296, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, New York(1990)
5. Tat-Chi Chow, Robert M. Oliver, G. Anthony Vignaux, "A Bayesian Escalation Model to Predict Nuclear Accidents and Risk," *Operations Research*, 38(2), 265-277(1990)
6. U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Risk Analysis and Evaluation of Regulatory Options for Nuclear Byproduct Material Systems*, NUREG/CR-6642(2000)
7. S. James Press, *Bayesian Statistics: Principles, Models, and Applications*, pp. 23-41, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, New York(1989)
8. D.J. Strom, R.L. Hill, J.S. Dukelow and G.R. Ciotte, *Technical Letter Report: Task 7, Final Review of the 1987 Report by Oak Ridge Associated Universities, "Improper Transfer/Disposal Scenarios for Generally Licensed Devices"*, PNL-11905(1994)
9. J.O. Lubenau and J.G. Yusko, "Radioactive

- Materials in Recycled Metals-An Update," *Health Physics*, 74, 293-299(1998)
10. 윤길현, 재활용고철에 대한 방사선안전관리 지침개발에 관한 연구, 한국원자력안전기술원 보고서, KINS/AR-749(2000)
 11. 한국원자력안전기술원, 사이버방사선안전정보센터 (<http://rinet.kins.re.kr/>).
 12. George Apostolakis, "The Concept of Probability in Safety Assessments of Technical Systems," *Science*, 250(4986), 1359-1364(1990)
 13. George E.P. Box and George C. Tiao, *Bayesian Inference in Statistical Analysis*, pp. 25-46, John Wiley and Sons, Inc., New York(1992)