환경영향평가 제9권 제3호 : 203~214

전과정평가에 있어 확률론적 건강영향분석기법 적용

Part II : 화학제품의 환경부하 전과정평가에 있어 건강영향분석 모의사례연구

박재성 · 최광수
국립환경연구원 환경위해성연구부 환경역학조사과

Application of Probabilistic Health Risk Analysis in Life Cycle Assessment

Part I : Life Cycle Assessment for Environmental Load of Chemical Products using Probabilistic Health Risk Analysis : A Case Study

Park, Jae-Sung · Choi, Kwang-Soo
Environmental Epidemiology Division, Department of Environmental Risk Research
National Institute of Environmental Research, Seoul, Korea

Abstract

Health risk assessment is applied to streamlining LCA(Life Cycle Assessment) using Monte carlo simulation for probabilistic/stochastic exposure and risk distribution analysis caused by data variability and uncertainty. A case study was carried out to find benefits of this application. BTC(Benzene, Trichloroethylene, Carbon tetrachloride mixture alias) personal exposure cases were assumed as production worker(in workplace), manager(in office) and business man(outdoor). These cases were different from occupational retention time and exposure concentration for BTC consumption pattern.

The result of cancer risk in these 3 scenario cases were estimated as 1.72E-4 ± 1.2E+0(production worker; case A), 9.62E-5 ± 1.44E-5(manger; case B), 6.90E-5 ± 1.16E+0(business man; case C), respectively. Portions of over acceptable risk 1.00E-4(assumed standard) were 99.85%, 38.89% and 0.61%, respectively. Estimated BTC risk was log-normal pattern, but some of distributions did not have any formal patterns. Except first impact factor(BTC emission quantity), sensitivity analysis showed that main effective factor was retention time in their occupational exposure sites.

This case study is a good example to cover that LCA with probabilistic risk analysis tool can supply various significant information such as statistical distribution including

personal/environmental exposure level, daily time activity pattern and individual susceptibility. Further research is needed for investigating real data of these input variables and personal exposure concentration and application of this study methodology.

Keyword: Life Cycle Assessment, Probabilistic Health Risk Analysis, Monte Carlo Simulation, Latin Hypercube Method, Daily Time Activity Pattern

I. 서 론

국제무역기구(World Trade Organization; WTO)의 출범과 더불어 환경과 무역간의 연계문제가 국제사회에서 공감대를 형성하고 있다. 그 중에서 특히 관심이 모아지고 있는 것이 WTO에서 추진하고 있는 환경경영표준화(ISO 14000시리즈) 활동이다. 최근 유럽과 미국을 중심으로 환경경영시스템(Environmental Management System), 전과정평가(Life Cycle Assessment) 등을 포함한 7개 환경 분야에 대한 환경경영표준화 작업이 이루어지고 있으며 국내에서도 ISO 14000 시리즈가 국제 규격화된 하나의 무역장벽으로 작용하여 경제에 심각한 영향을 미칠 수 있다는 우려 때문에 환경경영 및 전과정평가분야에 대한 활발한 대응이 이루어지고 있다(국제환경경영표준화대책반/제4작업반, 1994).[1]

전과정평가는 제품, 공정, 서비스를 포함한 활동 등으로 인한 환경부하를 평가하는 기법으로서 모든 제품은 생산단계부터 최종 폐기물이 되기까지 전과정에 걸쳐 얼마간의 환경부하를 초래하게 되므로 환경 부하의 크고 작음을 논할 때는 가능한 정량적이고 종합적으로 평가하는 것이 전과정평가의 기본 원칙이다(山本良一, 1997).[3] 최근의 전과정평가 관련 연구들을 보면 전과정평가가 적용되는 제품의 범위가 점차 커지고 다양한 방법론이 적용되고 있다(Huijbregts, 1998).[11]

위해성 평가와 관련된 연구에서는 위해도 예측시 존재하는 불확실성(Uncertainty)을 다소나마 해소하기 위하여 몬테카를로 모의실험(Monte Carlo Simulation)이 이용되고 있다(Su et al., 1998).[16] 몬테카를로 모의실험은 가능한 상황을 확률분포로 가정하여 이들 분포를 이루는 자료들이 예측모델 내에서 계산되어 그 결과물 또한 특정 분포로 예측을 하는 기법(Copeland et al., 1993; 박재성, 1997)[8,2]인데 전과정평가에서도 본 기법의 적용 필요성이 제기되고 있다(Huijbregts, 1998).[12] 최근 들어 확률론적인 방법을 이용하여 대기오염으로 인한 위해성평가 연구사례(환경부, 1997)[5]와 화학제품의 생산 및 소비에 따른 대기오염 여부와 그 위해 정도를 연구한 사례들이 일부 보고되어지고(Hertwich et al., 1999)[10] 있으나 이를 전과정평가에 적용한 사례는 아직 보고된 바 없다.

본 연구는 전과정평가단계에 확률론적 위해도 분석기법을 적용한 사례연구로서 특정 화학제품을 가정하여 제품의 소비행태 및 실내공기오염에 따른 모의실험을 수행함으로써 전과정평가에 위해성평가기법의 적용 가능성 등을 검토하고자 한다.

II. 연구방법

사례연구의 단계는 제시된 전과정평가 및 위해성평가의 일반적 단계에 따라 사례연구의 목적 및 대상물질을 선정, 화학제품의 특성을 파악, 소비행태별 시나리오 설정의 순서로 수행하였다. 설정된 시나리오에 따라 몬테카를로 모의실험을 수행하여 이들의 각 소비행태(노출시간, 노출빈

도, 노출장소)별 건강 위해도를 추정하고 민감도 분석도 동시에 수행하였다.

본 연구에서는 전과정평가의 3단계에 있어 위해도 분석기법을 영향평가단계에 적용하여 사례연구의 대상물질 소비양상의 차이에 따른 위해도 분포차이를 보고자 하였다. 위해성평가단계에서 확률론적 위해도분석기법의 적용범위는 Fig. 1에서 음영으로 표시된 노출평가와 위해도결정에 한정시켰다.

사례 연구의 중점범위(Focal Zone)는 제품 소비시의 건강위해도로 국한하였고 능률화 전과정평가기법(Streamlining LCA)을 적용하여 소비단계 이전과 이후를 모두 생략하였다. 그 밖에 본 연구의 각 단계에서 적용된 기법은 Table 1과 같다.

본 사례연구의 전반적인 연구의 틀은 Fig. 2와 같다. 음영으로 표현된 부분은 기존의 위해성평가의 단계이며 각 단계의 흐름은 위에서 아래로 진행된다.

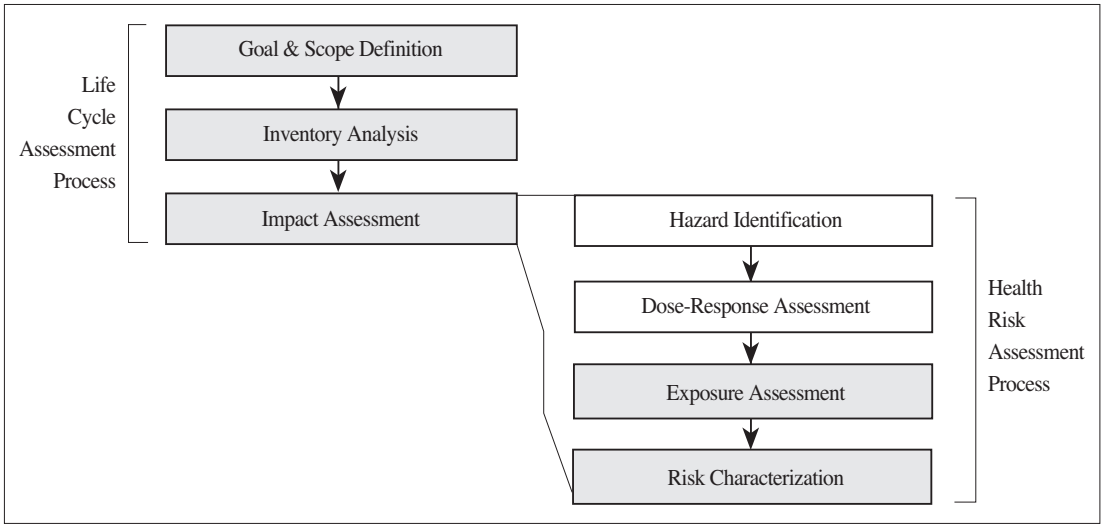


Fig. 1. Framework for risk analysis in life cycle Assessment

Table 1. Applied techniques in this LCA case study

Applied Technique	Criteria	Description
Focal zone*	Primary	Exposure patterns in consumption process
	Secondary	Exposure material in consumption process
	Non-focal	Other process
Streamlining method**	Method D	Removal of up- and downstream components
Scenario***	What-if	Case worker(A), manager(B), Business man(C)
Probabilistic simulation****	Monte-Carlo	100,000 random sampling/probabilistic distribution To consider parameter uncertainty, variability in objects/sources
Scenario modelling****	Multi-case	Exposure concentration/time distribution type To consider uncertainty due to choices, Temporal variability
Multi-media modelling****	Multi-case	Multi-raw material/occupational space To consider model uncertainty, Spatial variability

* Trinius et al., 1999[17)] ** Hunt et al., 1999[13)] *** Pesonen et al., 2000[15)] **** Huijbregts, 1998[11)]

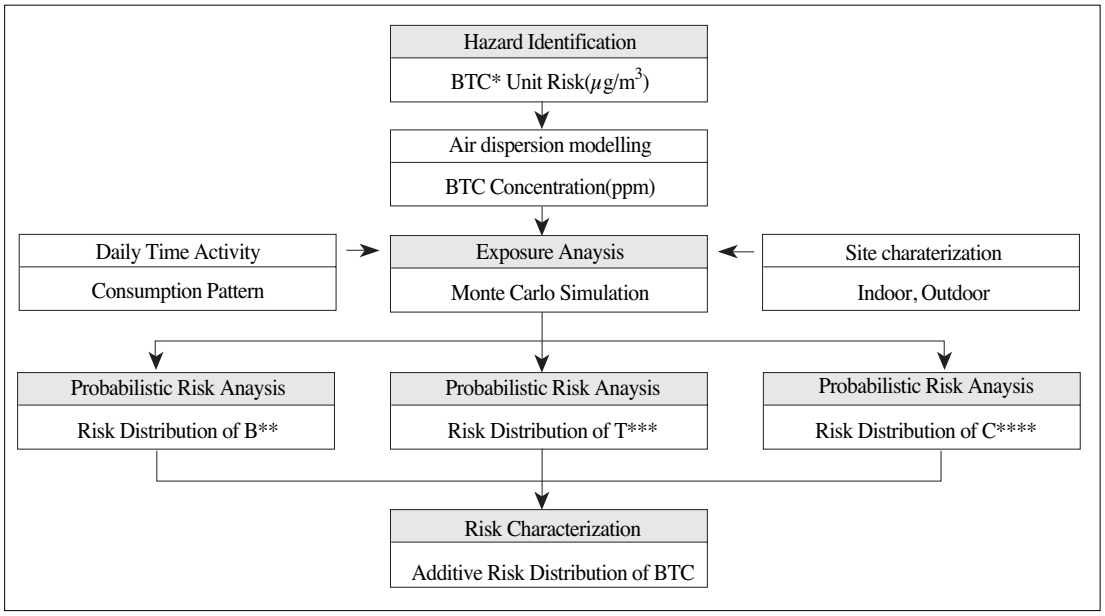


Fig. 2. Research process in LCA using probabilistic risk analysis in this study

* BTC : Benzen, trichloroethylene, carbone tetrachloride mixture product ** B : Benzen
*** T : Trichloroethylene **** C : Carbone tetrachloride

1. 사례연구목적 및 대상물질설정

먼저 본 사례연구의 목적은 화학제품의 소비단계에서 노출되는 건강영향을 파악하는 것으로 하였다. 대상화학물질은 유기용매로서 가상의 화학제품인 BTC(Benzene, Trichloroethylene, Carbon Tetrachloride등 3종 원재료가 섞인 혼합물의 가칭)로 결정하고 이 물질로 인한 실내공기오염을 가정하였다. 적용범위는 전과정평가의 생산에서 소비까지의 전과정중 소비과정에 국한하였으며 위 BTC를 원재료의 형태로 사용하는 작업장의 생산직, 사무직, 영업직 근로자를 BTC의 주요 소비자로 설정하였다. BTC의 기능단위는 화학물질 1㎏ 소비로 하였다.

2. 화학제품의 특성-제품내 조성, 독성, 단위위해도

BTC를 3종의 화학물질이 혼합된 상태를 가정하였으므로 소비과정에서 노출될 가능성이 있는 물질목록은 Benzene, Trichloroethylene, Carbon Tetrachloride에 관한 것으로 하였다. 이들은 소비과정에서 배출되는 양으로 표시하고 각각의 물질에 대한 위해도를 계산하였다. 대상물질들은 발암 위해도를 지닌 것으로 보고 부가모형(Additive Model)을 적용하였다. BTC 일일사용량은 3L로 설정하고 각 원재료의 조성성분 가정치에 의하여 배출되는 량을 1.5, 0.9, 0.6kg으로 하였다. 노출경로는 흡입에 의한 것만을 고려하였으며 각 원재료의 발암성에 관한 자료는 EPA의 분류를 이용하였다. 각 화학물질의 단위위해도와 추계모형등은 정용 등(1997)[4]이 수행한 연구자료를 인용하였다(Table 2). BTC의 각 성분별 소비자 일인당 배출량은 하루 평균 0.0050kg을 기준으로 배출되는 유기용매중 각각의 물질 조성비를 적용하였다.

Table 2. Inventory for BTC case study

Raw material	Emission** (kg/capita)	Property** (%)	Carcinogenicity EPA criteria*	Model*	Unit risk* ($\mu g/m^3)^{-1}$
Benzene	0.0025	50	A	One-hit	8.30E-06
Trichloroethylene	0.0015	30	B2/C	Multistage	2.52E-07
Carbon tetrachloride	0.0010	20	B2	Multistage	1.98E-07
BTC**	0.0050	100	Unknown	Unknown	Unknown

* Chung et al.(1997) ** assumed

3. 소비행태(Daily Time Activity Patterns) - 노출양상(Exposure Time & Pattern)

BTC의 노출도와 각 생활공간에서의 소비시 체류시간을 조사한 것으로 가정하여 Monte Carlo Simulation의 입력변수 분포특성을 설정하였다. BTC는 유기용매이므로 그 소비형태에 따른 노출을 1) 작업장에서의 직접노출, 2) 사무실에서 근무시의 간접적 노출, 3) 실외 생활공간의 노출 등으로 나누어 다중매체 모델링(Multi-media Modelling) 개념을 도입, 환경농도와 체류시간을 노출농도 및 시간으로 설정하였다(Table 1).

각 공간에서 나타나는 노출분포특성은 인위적인 오염원으로 작용하는 경우(작업장)에 Log-normal 분포, 인위적인 오염원이 없는 경우(사무실, 외기)는 Normal 분포로 가정하였다(Table 3). 노출 시나리오는 3가지로 설정하였다. 사례 A는 작업장에서 주로 근무하는 생산직 근로자인 경우, 사례 B는 사무실에서 주로 근무하는 사무직 근로자인 경우, 사례 C는 외근을 주로하는 영업직의 경우로 하였다.

각 화학물질의 농도는 배출량이 약 20%내외로 변이하는 것으로 가정하여 표준편차를 구하였고, 실내 및 실외에서 확산에 의해 고르게 분포하여 대기중 농도를 나타내는 것으로 가정하였다. 작업장에서의 확산공간은 100,000m^3, BTC의 비중은 1로 가정하여 BTC 확산에 따른 각 조성성분의 농도를 추계하였고 다른 공간에 대해서도 동일한 방법으로 확산공간의 차이를 두어 추계하였다.

특히 본 연구에서는 환경오염물질의 노출수준을 결정하고 역학적 인체반응을 측정하는 것은 자료의 특성상 매우 어렵고 산출된 자료가 불확실성을 내포하고 있기 때문에(Brand et al., 1995)[6] 통계학 및 확률론적인 방법을 이용한 추정을 통해 해결하려는 연구기법(Lee et al., 1999; Gratt, 1996)[14,9]을 적용하였다. 이로써 확률론적 모의실험(Probabilistic Simulation), 시나리오 모델링(Scenario Modelling), 다매체 모델링(Multi-media Modelling)의 세가지 기법이 동시에 적용되어 불확실성/변이원성의 모든 분류를 고려하도록 설정

Table 3. Assumed exposure scenario factors of BTC

Case*	Indoor(office)			Indoor(workplace)			Outdoor(ambient air)		
	Conc.** ($\mu g/m^3$)	Time*** (hour)	Type****	Conc. ($\mu g/m^3$)	Time (hour)	Type	Conc. ($\mu g/m^3$)	Time (hour)	Type
A	20±4	1	Normal	50±10	6	Log-nor.	10±2	1	Normal
B	20±4	6	Normal	50±10	1	Log-nor.	10±2	1	Normal
C	20±4	1	Normal	50±10	1	Log-nor.	10±2	6	Normal

* Case : A(Production worker), B(Manager), C(Business man) ** Exposure concentration
*** Exposure time **** Exposure distribution type

했다(Table 1).

모의실험에 적용된 모델은 시간가중평균(time weighted average, TWA)식을 이용하였다. TWA 모델식은 식 (1)과 같다.

$$TWA = \Sigma [\, Conc._i \times Time_i \,] / \Sigma Time \qquad (1)$$

here, Conc.i : Exposure concentration at ith site
Timei : Exposure time at ith site
Σ Time : Total exposure time

산출된 농도에 대해서 기존 연구들에서 제시되는 q_1* 값과 노출 평가를 통해 얻어진 노출량을 곱하거나 노출농도(Exposure Concentration)에 단위위해도(Unit Risk)를 곱하여 개인위해도(Individual Risk)를 구하였다(식 2).

$$\begin{aligned} \text{Individual Risk} &= \text{Exposure Dose(mg/kg/day)} \times q_1^*(\text{mg/kg/day})^{-1} \qquad (2) \\ &= \text{Exposure Concentration}(\mu g/m^3) \times \text{Unit Risk}(\mu g/m^3)^{-1} \end{aligned}$$

입력 변수값은 상기 Table 2, 3과 같다. 모의실험은 100,000회 반복하였으며 Sampling 방법은 Monte Carlo Method를 적용하였다. 각 입력 변수들의 분포추정과 동시에 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 수행하도록 프로그램하고 모의실험이 끝난 후 추정된 TWA의 분포와 개인노출도의 연속적인 분포 추정치를 서로 비교하여 각각의 특성과 차이점을 분석하였다(Table 1).

III. 결 과

1. BTC 조성물질의 시나리오 Case별 위해도

입력변수에 따른 모의실험결과 각 시나리오별 BTC 조성물질 각각의 발암위해도는 Case A인 경우 Log-noraml 분포하는 것이 확인되었으나 Case B, C에서는 Normal 분포에 근접하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 노출되는 물질의 조성차이가 각 소비공간별로 차이를 두지 않고 모의실험하였으므로 각 물질에 따른 평균 발암위해도의 순위가 바뀌지는 않았다. 발암위해도 평균상으로는 Benzene이 가장 높고 Tricholroethylene, Carbon tetrachloride 순이었다. 이들의 위해도 각각은 최종적으로 부가모형(Additive Model)을 적용하여 BTC의 위해도를 나타내도록 하였다.

2. BTC의 시나리오 Case별 위해도

노출시나리오별로 추정된 발암 위해도를 비교하기 위하여 중첩하였다(Fig. 4). 생산직의 경우가 평균 위해도가 가장 높고 범위가 넓게 분포하였으며, 영업직의 경우가 평균 위해도가 가장 낮고 범위가 좁은 형태를 보였다. 각 조성물질별로 추정된 위해도를 종합하여 최종적인 BTC의 위해도 분포를 구하고(Fig. 5) 각각의 분포특성을 파악하기 위하여 Goodness-of-fit 검정을 하였다. Case A의 발암위해도는 1.72E-4±1.2E+0, Case B는 9.62E-5±1.44E-5, Case C는 6.90E-5±1.16E+0로 나타났다. 본 사례연구에서는 BTC의 소비가 주로 직업적인 것으로 가정하였으므로 통상적인 10-6의 발암위해도를 기준으로 적용하기에는 무리가 있다고 판단하여 임의로 10-4의 위해도를 기준으로 전체 노출인구중 기준 초과율을 산정하였다(Table 4). Table에서 나타난 0.15, 61.11, 99.39%는 각 시나리오 Case에 적용되는 인구중 안전하다고 판단되는 인구의 비율이다. 따라서 작업장에서 BTC에 노출되는 경우에는 노출자의 0.15%만이 안전하고 나머지 99.85%는 건강장해를 나타낼 가능성이 높다고 할 수 있다. Case B와 C도 마찬가지로 사무직인 경우 38.89%는 건강장해가 나타날 가능성이 높고 영업직의 경우에 초과율은 0.61%로 BTC로 인한 발암 영향은 미미하다고 볼 수 있다.

3. 민감도 분석(Sensitivity Analysis)

모의실험모형에 입력된 변수들이 최종 결과인

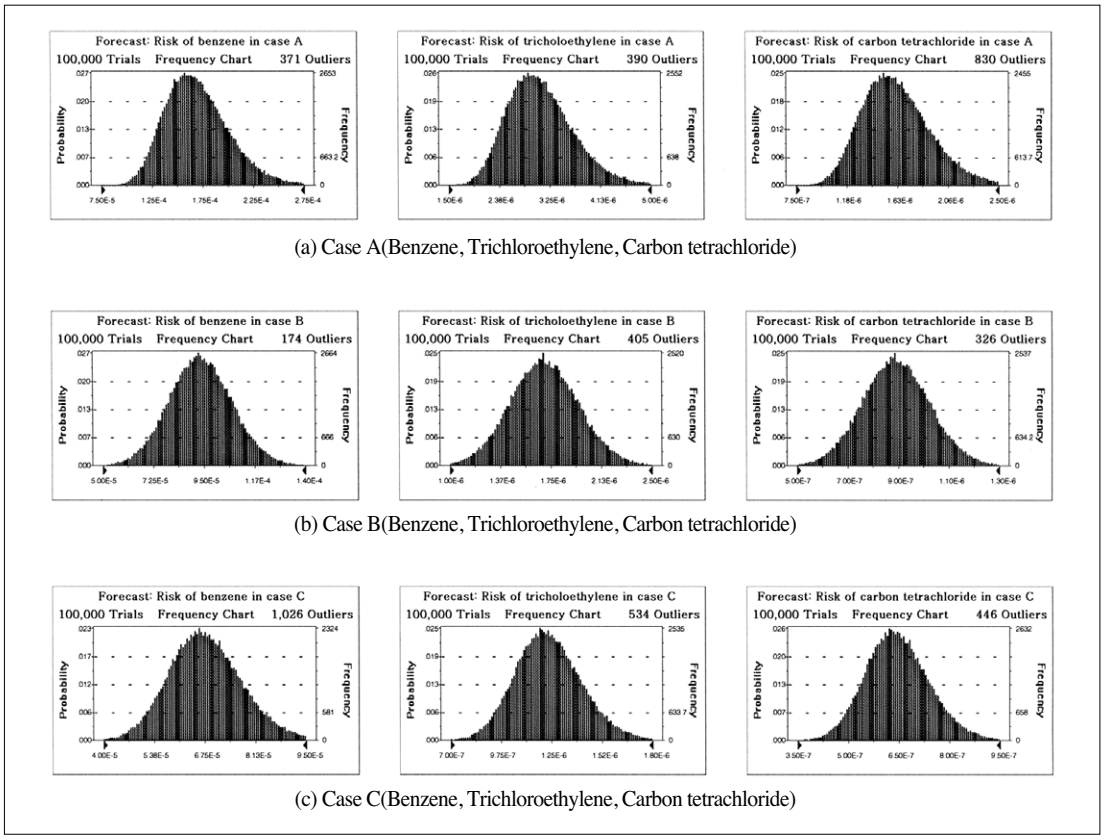


Fig. 3. Cancer Risk of BTC composition material in each scenario case

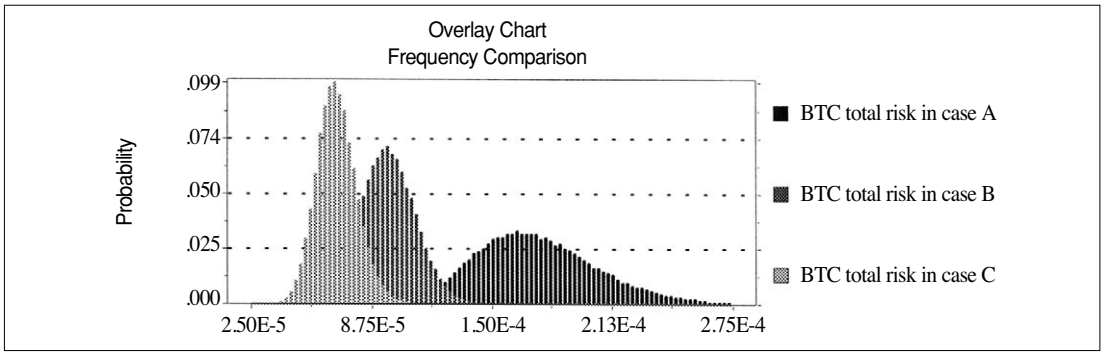
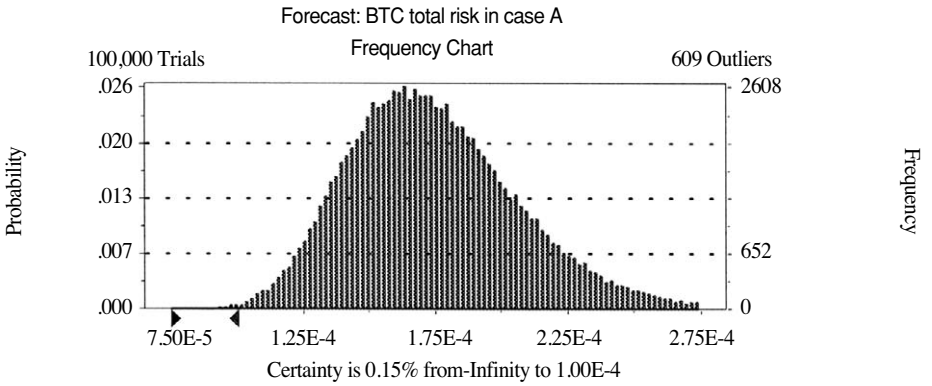
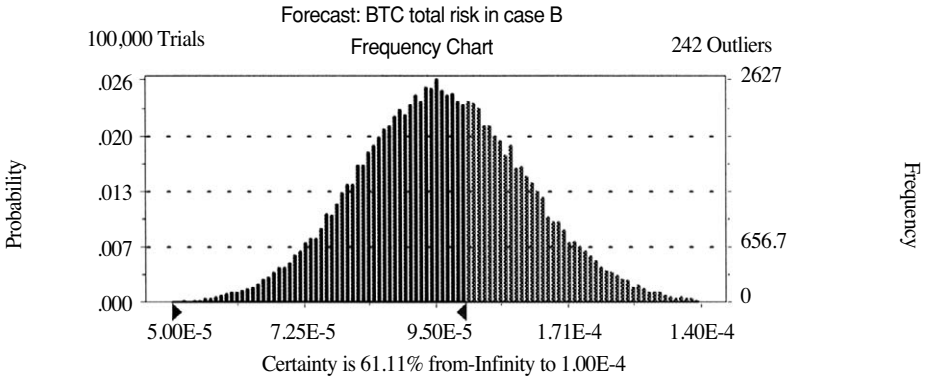


Fig. 4. BTC scenario case A, B, C overlay chart

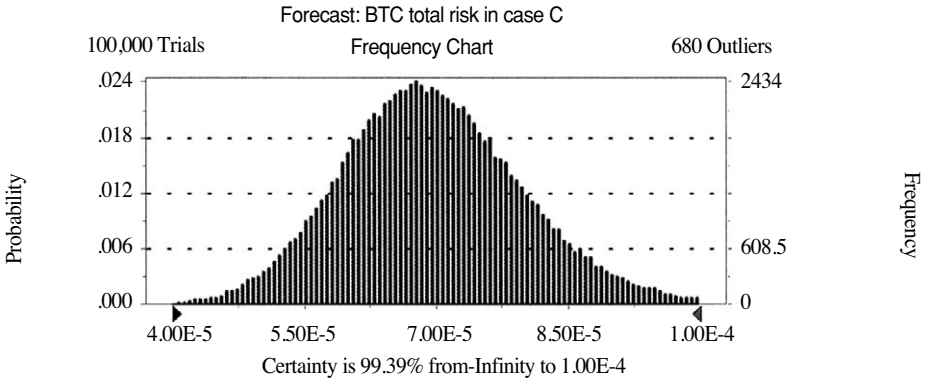
발암 위해도에 각각 얼마나 민감한 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 민감도 분석을 수행한 결과 생산직의 경우 소비시 노출되는 BTC 이외에 작업장에서의 노출시간과 외부체류시간의 순위상관계수(Rank Correlation Coefficient)가 각각 0.97, 0.17로 가장 민감하게 작용하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 특히 외부체류시간은 위해도를 줄이는데 민감하게 작용하고 있으므로(순위상관계수: -0.1)



(a) Risk distribution of BTC case A



(b) Risk distribution of BTC case B



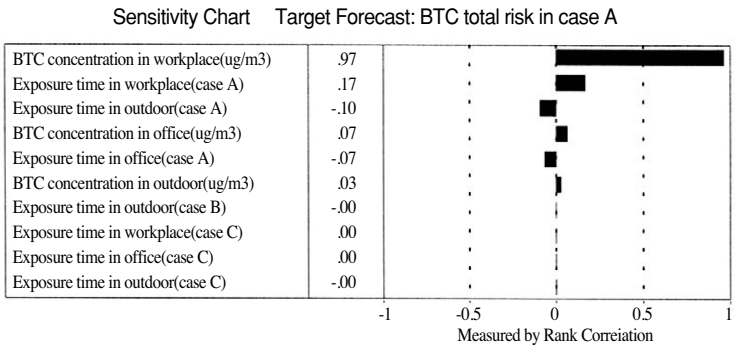
(c) Risk distribution of BTC case C

Fig. 5. BTC cancer risk probability and excess cancer risk of each case

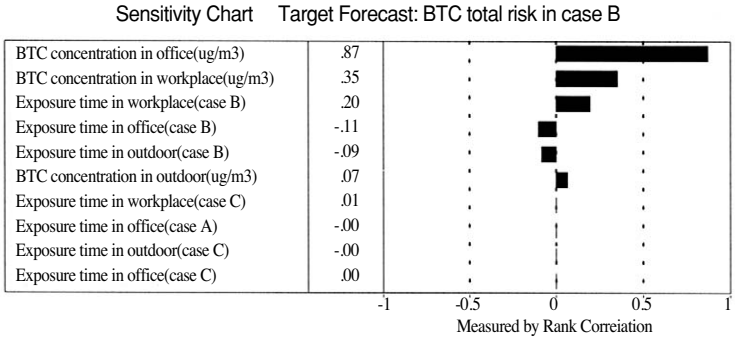
Table 4. Cancer risk distribution of BTC consumption exposure each three cases

Case	Type	Parameter (hr)	Under 1.00E-4	Goodness-of-fit test			
				X^2	p-value	Kolmogorov -Smirnov	Anderson -Darling
A	Log-normal	1.72E-4 ± 1.2E+0[a]	0.15%	201.46	0.3987	0.0045	3.1727
B	Normal	9.62E-5 ± 1.44E-5[b]	61.11%	311.32	0.0000	0.0058	5.1119
C	Log-normal	6.90E-5 ± 1.16E+0	99.39%	628.38	0.0000	0.0018	31.6584

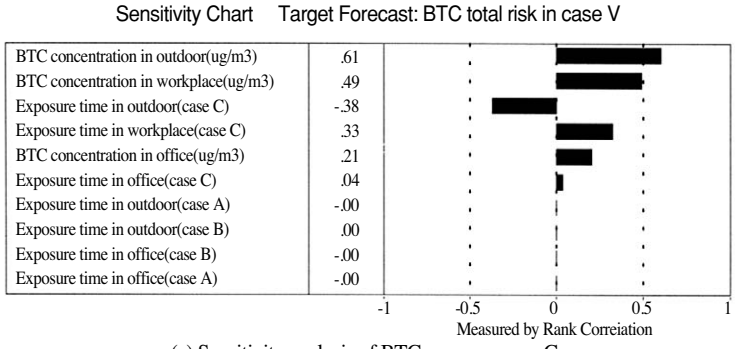
a Geometric Mean ± Standard Deviation b Mean ± Standard Deviation



(a) Sensitivity analysis of BTC exposure case A



(b) Sensitivity analysis of BTC exposure case B



(c) Sensitivity analysis of BTC exposure case C

Fig. 6. BTC cancer risk estimation scenario sensitivity analysis

위 결과에서 외부 휴식시간이나 외기를 이용한 환기로 다소 줄일 수 있을 것으로 판단할 수 있다. 그러나 원천적으로 BTC의 배출량을 줄이지 않으면 그 위해도를 감소시키는데 큰 효과를 기대하기는 어렵다. 사무직인 경우는 작업장 이외에 사무실에서 노출되는 양이 크게 영향을 주는 것으로 나타났으며(사무실의 노출농도: 0.87, 작업장의 노출농도: 0.35) 따라서 사무실내에서 근무하는 것이 노출을 줄일 수 있지만 작업장에 의한 영향이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 영업직의 경우는 외부에서 노출되는 BTC의 양이 상대적으로 매우 낮기 때문에 다른 인자들에 비해 큰 폭으로 발암 위해도를 낮추는 것으로 나타났다.

IV. 고 찰

전과정평가는 미국에서 최초로 수행된 이후 자원 및 환경 프로파일 분석(Resource and Environmental Profile Analysis; REPA), 1970년대 유럽의 Ecobalances등의 연구로 이어졌으며 1980년대 초에는 자원절약의 관점에서 1990년대 초까지는 폐기물 감축의 측면에서 원재료와 에너지 소비, 배출되는 다량의 폐기물등의 환경부하에 초점을 두고 수행되어 왔다.[6]

위해성 평가는 환경오염도 수준에 따른 역학적 영향을 계량적으로 파악하여 장기적인 환경관리에 유용하며 기준치설정에 필요한 기초자료를 제공하는 반면 평가의 대상에 대해 접근 방식은 다소 체계적이지 못하다는 단점이 있다. 반면 전과정평가는 평가대상, 평가단계, 평가항목 등을 체계화하였다는 장점이 있다. 그러므로 본 사례연구와 같이 두 기법을 상호보완적으로 접목하면 특정 대상에 대한 환경부하를 체계적으로 건강영향의 측면에서 평가할 수 있다.

사례연구결과 BTC를 소비하게되는 직종의 근무자들은 그 노출특성과 소비행태에 따라 다양한 발암위해도를 나타내며 이 때 나타나는 불확실성 또는 변이성을 고려하기 위하여 확률론적 위해도 분석기법을 이용한 결과, 발암 위해도의 점추정에서 보다 더 다양한 정보를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 특히 근무의 형태를 어떻게 바꾸는 것이 가장 효과적인 것인가에 관한 정보를 민감도 분석을 통해 얻을 수 있었다. 노출 분포의 형태의 차이에 따라 위해도 분포의 중첩을 통하여 가시적으로 판단할 수 있는 정보도 제공하였다.

국외의 전과정평가 연구경향을 살펴보면 위해성평가 적용에 관한 사례연구등이 보고되고 있으나 국내에서는 개념적 논의에 그치고 있는 실정이다. 그러나 본 연구는 가정된 모의실험이지만 구체적인 사례와 결과해석까지도 제시하였다는데 의의가 있다. 또한 전과정평가의 개념상 다양한 소비형태를 가정하여 비교하였고, 그 결과 나타나는 위해도의 차이를 해석하였으며, 민감도 분석을 통해 위해도 변화에 가장 큰 영향을 미치는 변수를 도출해 낼 수 있다는 점도 주목할 사항으로 생각된다.

본 연구에서 추정된 노출결과는 기업에서 생산된 제품관련 데이터는 대부분이 기밀이고 획득이 어렵다는 점 때문에 특정화학제품(BTC)을 가정하여 분석한 사례이다. 그러나 그 분석단계와 과정, 입력변수, 평가방법 등은 실제 여러 가지 제품들의 전과정평가에 그대로 적용하여 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 기법을 이용하면 전과정평가 대상 제품의 소비공간과 소비행태에 따라 노출 및 건강위해도의 차이가 나는 것을 구체적인 자료로 제시가 가능하므로 추후 실제 노출시간과 소비행태를 설문을 통해 조사하고 실내공기오염에 따른 노출량을 모니터하는 과정이 필요하다. 또한 노출평가에 있어 몬테카를로 모의실험은 많이 적용되고 있는 방법이나 특정 화학제품을 대상으로 수행된 연구는 많지 않은 실정이므로 여러 가지 제품에 대해 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결 론

국제무역기구의 출범과 더불어 환경경영을 평가하기 위한 기준이 설립되고 이에 따라 기업의 생산제품에 대하여 환경친화성을 평가하는데 전과정평가(Life Cycle Assessment)기법이 도입되고 있다. 본 연구에서는 전과정평가단계에 위해성평가 기법을 도입하여 그 유용성을 파악하고자 하였다. 평가의 대상으로는 임의로 화학제품을 선정하였으며 이 제품의 소비단계에서 나타나는 실내공기오염으로 인한 건강 위해성을 평가하였다. 평가단계에 위해성평가 기법을 적용함에 있어 최근 자료의 변이성(Variability)과 불확실성(Uncertainty)를 해결하는데 이용되는 확률론적 위해도분석기법(Probabilistic Risk Analysis)을 적용하였다.

화학산업에서 제품화된 화학물질에 대한 환경친화성 전과정평가에 위해성평가 기법을 도입하여 임의로 선정된 유기용매 가칭 BTC를 대상으로 소비행태에 따른 확률론적 위해도분석 사례연구를 수행한 결과 각 시나리오별 발암위해도는 생산직 1.72E-4±1.2E+0, 사무직 9.62E-5±1.44E-5, 영업직 6.90E-5±1.16E+0로 나타났으며 위해도 허용기준을 1.00E-4로 하였을 때 발암 위해도의 기준을 초과하지 않는 안전한 인구는 각각 0.15%, 61.11%, 99.39%로 추정되었다. 사례연구의 대상물질인 BTC를 소비하게되는 직종의 근무자들은 그 노출특성과 소비행태에 따라 다양한 발암위해도 분포를 나타내었고 민감도 분석결과 작업장에서 소비되는 BTC의 배출이외에 근무공간내 체류시간등도 민감한 영향을 미치는 것으로 추산되었다.

사례연구를 통해 확률론적 위해도분석기법은 점추정과 달리 전과정평가 대상 제품의 소비공간과 소비행태에 따라 위해도 분포의 중첩을 통하여 가시적으로 판단할 수 있는 정보를 제공하고 민감도 분석을 통해 소비행태 결정인자관리가 가능함을 파악할 수 있었다. 또한 일반적인 전과정평가의 단계중 영향평가단계에 위해성평가를 도입하는 것이 가능하였으며 확률론적 위해도분석기법을 통해 전과정평가에서 사용되는 정보들의 불확실성 또는 변이성에 따른 정보의 왜곡을 보완하여 다양하고 유용한 정보를 제공할 수 있었다.

본 사례연구의 결과는 여러 가지 가정들이 포함되어 있는 모의 실험결과이므로 추후 실제 노출시간과 소비행태를 설문을 통해 조사하고 실내외 오염도 측정분석 결과에 근거하여 본 기법을 여러 가지 화학제품에 대해 적용하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 국제환경경영표준화대책반/제4작업반, 1994, 국제환경경영표준화(ISO/TC207/SC5 관련문서), 한국경영자총협회, 공업진흥청.
2. 박재성, 1997, 대기오염에 따른 건강영향지수의 평가-대기오염모델의 몬테카를로 시뮬레이션 적용, 연세대학교 보건대학원 석사학위논문.
3. 山本良一, 이동훈 편역, 1997, LCA(Life Cycle Assessment) 환경부하를 평가한다, 서울시립대학교 환경공학센터.
4. 정용, 신동천, 최용욱 등, 1997, 여천공단지역의 환경오염으로 인한 건강위해성평가, 연세대학교 환경공해연구소.
5. 환경부, 1997, 대기오염물질의 위해성평가 및 관리기술, 환경위해성평가 및 관리기술 제2단계 1차년도 보고서.
6. Brand, K.P., Small, M.J., 1995, Updating uncertainty in and integrated risk assessment: conceptual framework and methods, Risk Analysis, 15(6), 719-731.
7. Breville, M., Gloria, T., O'Connell, M., Saad, T.,

Blake G., 1994, Life cycle assessment, trends, methodologies and current implementation, Department of civil and environmental engineering, Tufts University.

8. Copeland, T.L., Paustenbach, D.J., Harris, M.A., Otani, J., 1993, Comparing the results of a monte carlo analysis with EPA's reasonable maximum exposed individual(RMEI): A case study of a former wood treatment site, Regul. Toxicol. Pharmacol., 18, 275-312.
9. Gratt, L.B., 1996, Probablistic health risk assessment, Air toxic risk assessment and management, Van Nostrand Reinhold, 317-339.
10. Hertwich, E.G., McKone, T.E., Pease, W.S., 1999, Parameter uncertainty and variability in evaluative fate and exposure models, Risk Analysis, 19(6), 1193-1204.
11. Huijbregts, M.A., 1998, Application of uncertainty and variability in LCA- Part I: A general framework for the analysis oif uncertainty and variability in life cycle assessment, Int. J. LCA, 3(5), 273-279.
12. Huijbregts, M.A., 1998, Application of uncertainty and variability in LCA- Part II: Dealing with parameter uncertainty and uncertainty due to choices in life cycle assessment, Int. J. LCA, 3(6), 343-351.
13 Hunt, R.G., Boguski, T.K., Weitz, K. Sharma, A., 1998, Case studies examining LCA streamlining techniques, Int. J. LCA, 3(1): 36-42.
14. Lee, J.T., Shin, D., and Chung, Y., 1999, Air pollution and daily mortality in Seoul and Ulsan Korea, Environ. Health Perspect., 107(2), 149-154.
15. Pesonen, H., Ekvall, T., Fleischer, G. et al., 2000, Framework for scenario development in LCA, Int. J. LCA 5(1): 21-30.
16. Su, S.H., Little, R.M., and Gudka, N.J., 1998, Charaterization of Uncertainty, Risk assessment and indoor air quality, Lewis Publishers, 137-160.
17. Trinius, W., T no, J.F.L, 1999, System boundaries according to decision scope: A concept of focal zones, Int. J. LCA 4(5): 253-256.