2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 확률론적 안전성평가에서의 절삭오차 평가

# Truncation Error Evaluation for Probabilistic Safety Assessment

**최종수**
**한국원자력안전기술원**
**대전광역시 유성구 구성동** 19

## 요 약

**원자력발전소에 대한** PSA**에서 모든 단절집합을 평가하기에는 전산기 기억용량 및 계산시간의 제한으로 인해 불가능하다. 적절한 정도의 정확성을 갖고 최소단절집합** (MCS)**을 구하기 위해서 발생 빈도가 작은 단절집합을 제거하고 있다. 이런 절삭방법을 적용하는 경우에는 절삭된 단절집합에서 비롯된 절삭오차를 평가할 필요성이 제기된다. 본 논문에서는** PSA **응용분야에서의 절삭오차 취급 현황을 소개하고 본 논문에서 정의한** event space coverage**에 따른** MCS **정량화 결과의** trend**에 근거한 절삭오차 평가방법을 소개하고 있다.**

## Abstract

In the PSA of nuclear power plants, it is impossible to enumerate all the cut sets due to high memory requirements and long computation time. To determine a set of minimal cut sets with adequate accuracy, minimal cut sets (MCSs) with probabilities less than a specified probability cut-off value are discarded. The application of the cut-off technique entails the need to estimate the truncation error, i.e., the probability of system failure due to truncated cut sets. In this paper, the treatment status of truncation error in PSA application is summarized and a new truncation error evaluation method, which is based on the trend of MCS results in terms of newly established event space coverage, is developed.

## 1. 서 론

**확률론적 안전성 평가 (PSA: Probabilistic Safety Assessment)는 원자력발전소의 안전성 평가를 위해 광범위하게 적용되고 있으며, 기타 산업계에서도 위험도 평가를 목적으로 수행되고 있다. 또한 미국에서는 위험도 정보 규제개념이 규제 전반에 반영됨에 따라 PSA 정보를 활용한 규제 결정이 일반화되어가고 있다.**

국내에서도 위험도 정보 규제 개념의 도입 및 다양한 측면에서 위험도정보 활용을 위한 기술개발 및 적용사례가 있고, 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기에 대한 PSA를 시작으로 신규원전에 대한 PSA가 완료되었으며, 2001년 8월에 확정된 "원자력발전소 중대사고 정책"과 관련하여 가동중 원전에 대한 PSA 완료 및 일부 원전에 대한 재평가가 수행될 예정이다.

일반적인 확률론적 안전성 평가는 고장수목 및 사건수목 방법에 기초하고 있으며, 노심손상빈도 (CDF), 격납건물파손빈도, LERF (Large Early Release Frequency) 등을 정량적으로 제시하고 있다.[1,2] 전반적인 위험도 정량화 과정은 분석대상 사고추이를 나타내는 MCS (minimal cut set)를 PSA 전산코드를 이용하여 생산하고 해당 MCS를 이용하여 위험도 척도 (CDF, LERF 등) 및 중요도 척도 (Importance Measure)를 계산하고 있다. 원자력발전소처럼 다양하고 복잡한 시설에 대한 위험도평가 모델은 그 자체의 복잡성으로 인하여 수 많은 MCS 존재하게 되고, 이를 모두 밝혀낸다 것은 현실적으로 불가능하며 그럴만한 가치 또한 없다.

매우 복잡한 위험도 모델에 대한 정성적인 평가인 MCS 생산 과정은 컴퓨터의 기억용량 및 계산시간의 제한으로 인해 주요 MCS 만이 포함된 제한적인 MCS (truncated set of minimal cuts sets)을 제시하게 된다. 일반적으로 MCS 생산 과정에서는 분석자가 지정한 절삭기준치 (cut-off value) 이하 발생빈도를 갖는 cut set 들을 제거함으로써 계산을 가능케 하고 있다. 제한적인 MCS만을 확인할 수 밖에 없기 때문에 해당 MCS에 근거한 위험도 척도 및 중요도 척도 계산결과에는 모두 절삭오차가 포함되어 있는 것이다.

일반적으로 작은 값의 절삭기준치를 적용하고 있어 절삭오차가 작을 것이라 판단하고 있으나, 절삭오차를 평가하지 않고서는 그 영향을 알 수 없고, 위험도분석 모델의 특성에 따라 절삭오차에 영향이 클 수도 있다는 점에서 절삭오차의 영향이 고려되어야 한다.

본 논문에서는 PSA 분석결과에 포함된 절삭오차의 영향 및 평가방법에 대한 연구 결과를 제시한다.

## 2. 절삭오차

확률론적 안전성 평가 (PSA: Probabilistic Safety Assessment)의 정량화는 문제의 사고(노심손상사고, 조기방사능누출사고 등)을 야기하는 사고 시나리오의 발생과 관련된 MCS들을 구하여 평가하는데 기본 개념은 고장수목의 평가 개념이 기본적으로 적용되고 있다. 예로서 한 개의 고장수목을 가정한다면, 정확한 정점사상 (top event)의 발생확률 $h(\mathrm{p})$은 다음과 같이 표현된다.

$$h(\mathbf{p}) = \Pr\{\text{union of all MCSs}\} \tag{1}$$

여기서 $\mathbf{p}=(p_1, \ldots, p_k)$ 이고, $p_i$ 는 i 번째 기본사상 (basic event)의 발생 확률이다.

일반적으로 고장수목 평가에서 발생확률에 근거한 절삭방법을 적용하고 있으므로 절삭기준치 $V_C$ 이상의 확률을 갖는 MCS 만을 알 수 있으므로 이 과정에서 절삭오차가 야기된다. 즉, 임의의

MCS $K_i$ 가 분석결과로 제시되었다면 다음의 조건을 만족하는 것이다.

$$\Pr\{\mathbf{K}_i\} = \prod_{j \in \mathbf{K}_i} p_j > V_C \tag{2}$$

여기서 절삭기준이 적용된 제한적 MCS을 갖고 정점사상의 발생확률을 평가한다면 그 평가결과는 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$M(\mathbf{p}) = \Pr\{\text{truncated set of MCSs}\} \tag{3}$$

따라서 모든 MCS에 대해 알 지 못한다면 $h(\mathbf{p}) > M(\mathbf{p})$ 이므로 제한적 MCS에 의한 절삭오차가 포함된다.

MCS를 이용한 정량화는 *rare-event approximation* 및 *min-cut upper-bound approximation*을 적용하여 평가하고 있고, 이 들은 어느 정도의 보수적인 결과를 제공한다. MCS 합집합의 발생확률을 정확히 구하는 것은 쉽지 않다는 점과 대부분의 문제에서 근사방법의 정확성이 인정된다는 점에서 근사방법이 적용되고 있다.

여기서 m개의 MCS이 있다고 가정하면 $(\mathbf{K}_i, i = 1, ..., m)$ 각각의 근사식은 다음과 같다.

1) *rare-event approximation* : $M(\mathbf{p}) \approx \sum_{i=1}^{m} \text{pr}\{\mathbf{K}_i\}$

2) *min-cut upper-bound approximation* : $M(\mathbf{p}) \approx 1 - \prod_{i=1}^{m} [1 - \text{pr}\{\mathbf{K}_i\}]$

임의 고장수목에 대한 MCS 계산 결과인 표1를 보면 위의 근사식에 따른 계산결과를 알 수 있으며, 이들 값 또한 $M(\mathbf{p})$에 대해 어느 정도 overestimate 한 값이다.

원자력발전소에 대한 PSA에서 위험도 척도로 CDF 및 LERF도 제한적인 MCS과 위와 같은 근사식이 사용되므로 절삭오차와 근사식의 보수성을 함께 갖고 있다. PSA 결과의 응용이 확대됨에 따라 중요도 척도의 가치도 높아 가고 있다. 중요도는 SSCs (structures, systems and components)별 위험도 영향 정도에 따라 분류하는데 사용되며, 아래와 같은 중요도 척도가 위험도 정보 규제 활용에 주로 사용되고 있다. [3]

Risk Achievement Worth : $a_i = \frac{R_i^+}{R_0}$

Risk Reduction Worth : $r_i = \frac{R_0}{R_i^-}$

Fussell-Vesely Importance : $FV_i = \frac{R_0 - R_i^-}{R_0} = 1 - \frac{R_i^-}{R_0}$

여기서

$R_i^+$ = overall risk with the probability of basic event $i$ set to 1;

$R_i^-$ = overall risk with the probability of basic event $i$ set to 0;

$R_0$ = base (reference) case overall risk.

일반적인 중요도 계산도 PSA 전산코드를 이용해 파악된 절삭기준이 적용된 MCS 만으로 계산하고 있다. Base case 위험도와 관련해서 절삭기준을 만족하는 $m$개의 MCS ($\mathbf{K}_k$, $k$ = 1, ..., $m$) 들만이 파악된 경우에 일반적으로 적용되는 계산방법은 다음과 같다:

$$R_0 = \sum_{k=1}^{m} \Pr\{\mathbf{K}_k\} \tag{4}$$

$m$ 개의 MCS 중에서 임의의 i 번째 기본사상 ($b_i$)을 포함하는 $m_i^+$ 개의 MCS ($\mathbf{P}_k$, $k$ = 1, ..., $m_i^+$)와 $b_i$ 을 포함하지 않는 $m_i^-$ 개의 MCS ($\mathbf{N}_k$, $k$ = 1, ..., $m_i^-$)로 분류할 수 있다. ($m = m_i^+ + m_i^-$)
$R_i^-$ 에 대한 계산 또한 아래와 같이 최종 MCS을 이용하여 계산하고 있다:

$$R_i^- = \sum_{k=1}^{m_i^-} \Pr\{\mathbf{N}_k\} \tag{5}$$

$R_i^+$ 에 대해서는 다음과 같이 계산하고 있다.

$$R_i^+ = \sum_{k=1}^{m_i^-} \Pr\{\mathbf{N}_k\} + \frac{1}{p_i} \sum_{k=1}^{m_i^+} \Pr\{\mathrm{P}_k\} \tag{6}$$

위와 같이 제한적인 MCS을 적용한 위험도 척도 ( $R_i^+$ , $R_i^-$ 및 $R_0$ )도 절삭오차가 존재하므로 중요도 척도 계산 값에도 절삭기준에 따른 영향이 있다.

그림 1과 2는 미국 NRC의 교육자료[4]에서 인용한 내용으로 절삭기준 선정에 따른 위험도 및 중요도 척도의 영향을 잘 설명하고 있다.

MCS의 절삭과 관련한 연구결과로는 절삭오차를 적게 하기 위한 절삭기준 선정에 대한 연구결과[5]와 절삭오차를 평가하는 방법에 대한 연구결과 [6,7]가 있다. 일반적으로 절삭기준을 선정하는 것은 분석자의 주관적 판단에 주로 의존하고 있으며, 절삭오차 평가방법으로는 MCS 생성과정에서 삭제되는 term 들의 크기를 보수적으로 계산하는 방법들이 제시되어 있다. 절삭오차를 평가해 주는 전산코드로는 RISKMAN과 ISPRA - FTA 등이 언급되어 있다.

미국 NRC의 위험도 정보 규제 관련 지침인 Reg, Guide 1.174[8], 1.177[9] 및 SRP 19장에서는 절삭기준치로 충분히 작을 값을 선정할 것을 요구하고 있으며, 특히 $R_i^+$ 에 대한 정확한 계산에는 절삭기준치에 따른 영향이 클 수 있음을 말하고 있다. NEI 00-02 [10]에는 PSA 목적에 따라 다음과 같은 절삭기준을 예로서 제시하고 있다.

| | Level 1 | LERF (per yr) |
|---|---|---|
| Grade 1 | < 0.01 * CDF Base | < 0.01 * LERF Base |

| | | |
|---|---|---|
| Grade 2 & 3 | < 0.0001 * CDF Base | < 0.0001 * LERF Base |
| Grade 4 | < 0.00001 * CDF Base | < 0.00001 * LERF Base |

Grade 1 : IPE, Prioritizing licensing issues

Grade 2 : Maintenance rule support GL 89 - 10 (MOV ranking), Inspection activities

Grade 3 : IST, ISI, Grade QA, On - line Maintenance

Grade 4 : Risk based TS, Quality category of equipment

## 3. 절삭오차 평가 방법

제한적인 MCS 만으로 평가함으로 발생하는 절삭오차는 분석모델의 특성에 따라 영향 받으며, 정량화가 쉽지 않다. 본 논문에서는 MCS를 이용한 정량화 결과로부터 데이터 추적을 통해 절삭오차를 평가할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

그림 3은 표1에서 제시된 고장수목에 대한 절삭기준 변경에 따른 평가결과로서 *rare-event approximation*를 이용한 계산한 결과이다. 그림 3은 절삭기준치를 충분히 큰 경우에 정점사상 빈도가 특정 값에 근접하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 현장의 계산과정에서는 어느 정도의 절삭오차를 포함하게 되는 절삭기준치를 적용하게 된다. 이로 인해 제한적인 MCS 데이터 만으로 절삭오차를 고려한 true value를 추정한다는 것은 어렵고, 일부의 절삭기준 변경을 통한 계산결과로도 절삭기준의 타당성을 확인하는데 객관성을 확보하기 어렵다.

임의 고장수목에서 k개의 기본사상의 상태가 정점사상의 상태에 영향을 미치는 경우, 신뢰도 공학에서 말하는 relevant [11]한 경우일 때, 기본사상의 상태에 따른 $2^k$개의 사건조합이 가능하며, 각 사건조합을 random vector $\mathbf{X}=(x_1, \ldots, x_k)$로 표현할 수 있다. 임의 $\mathbf{X}$에 대해 발생된 ($x_i=1$) 기본사상들의 집합은 다음과 같이 표현된다.

$$C_1(X) = \{i : x_i = 1\} \tag{7}$$

또한 임의 $\mathbf{X}$에 대한 $C_1(X)$가 MCS으로 제시되기 위해서는 다음의 조건이 최소한 만족되어야 한다.

$$\prod_{i \in C_1(\mathbf{X})} p_i > V_C \tag{8}$$

여기서 $V_C$ 는 절삭 기준치이다. 식 (8)에서 분석자가 설정하는 $V_C$ 가 매우 작게 선정되었다면 거의 모든 random vector $\mathbf{X}$가 식 (8)을 만족할 것이다. 따라서 식 (8)을 만족할 확률을 새로운 변수로 정의할 수 있다. 여기서 임의 $\mathbf{X}$가 식 (8)을 만족할 사건의 집합을 $\mathbf{A}$로 표현하자:

$$\mathbf{A} = \{\mathbf{X}_k : \prod_{i \in C_1(\mathbf{X}_k)} p_i > V_C\} \tag{9}$$

여기서 θ = Pr{A}라 하면 θ는 $V_C$ 의 함수이며, 절삭오차가 전혀 없는 $V_C$ = 0 인 경우에 θ = 1이고, $V_C$ = 1 인 경우에 θ = 0이 된다. θ는 $V_C$에 따른 식(8)을 만족하는 event space의 크기를 나타내는 값이 되므로 *event space coverage*라 부르기로 한다.

그림 4은 표1에서 제시된 고장수목에 대한 event space coverage의 변화를 보여주고 있다. 그림 4의 곡선은 Monte Carlo Simulation을 통해 얻어진 결과로서 적절한 수의 random vector를 이용하여 모든 경우에 간단히 모의할 수 있다. 그림 5는 그림 4의 결과를 이용한 것으로 절삭기준 ($V_C$)에 따른 MCS로 계산한 정점사상빈도와 event space coverage와 관계를 보여주고 있다. 여기서 독립변수 θ가 (0 ~ 1)사이의 제한적인 범위에서 정의되며 θ=1인 경우의 정점사상빈도가 절삭오차를 포함치 않은 true value로 볼 수 있다는 점에서 데이터의 추세분석을 통해 해당 true value를 추정하기가 용이하다 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

제한적 MCS을 이용한 정량화에는 절삭오차를 포함하므로 PSA 분석결과를 활용하는 위험도 정보 규제에서는 절삭오차에 의한 판단의 오류 가능성이 충분히 검토되어야 한다, 본 논문에서는 MCS을 이용한 정량화 결과에서 절삭오차의 발생원인 및 정량화 과정의 보수성과 위험도 정보 규제 측면에서의 절삭오차의 취급 현황을 살펴 보았다. 아울러 절삭기준에 따른 영향을 분석하여 true value를 추정할 수 있는 방법을 제시하였다. 여기서 제시된 true value 추정 방법은 (0 ~ 1)의 제한적인 값을 갖는 event space coverage 변수를 이용하여 절삭기준에 따른 MCS 정량화 결과의 trend 분석을 통해 true value를 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

## 참고 문헌


[1] US Nuclear Regulatory Commission (NRC). Fault tree handbook. NUREG-0492, Washington, DC, 1981.

[2] Henley EJ, Kumamoto H. Reliability engineering and risk assessment. New Jersey: Prentice Hall, 1981.

[3] Cheok MC, Parry GW, Sherry RR. Use of importance measures in risk-informed regulatory applications. Reliab Engng Syst Safety 1998; 60:213-226.

[4] US Nuclear Regulatory Commission (NRC). PRA Technical Managers P-107. Rockville, MD, 2001.

[5] Modarres M, Dezfuli H. A truncation methodology for evaluating large fault trees. IEEE Trans Reliab 1984; 33(4):325-328

[6] Contini S. A new hybrid method for fault tree analysis. Reliab Engng Syst Safety 1995; 49:13-21.

[7] Brown KS. Evaluating fault trees with repeated events. IEEE Trans Reliab 1990; 39(2):226-235

[8] US Nuclear Regulatory Commission (NRC). An approach for using probabilistic risk assessment in risk-informed decisions on plant-specific changes to the licensing basis. RG-1.174, Washington, DC, 1998.

[9] US Nuclear Regulatory Commission (NRC). An approach for plant-specific, risk-informed decision-making: technical specifications. RG-1.177, Washington, DC, 1998.

[10] Nuclear Energy Institute (NEI). Probabilistic risk assessment peer review process guidance. NEI 00-02.

[11] Barlow RE, Proschan F. Statistical theory of reliability and life testing: probability models. Silver Spring, MD, 1981.

표 1. 근사식 계산결과

| Cut-off value | # of MCS | Rare Event Approximation. | Min. cut upper bound |
|---|---|---|---|
| 1.0E-5 | 4 | 1.98585996E-04 | 1.98572923E-04 |
| 1.0E-6 | 14 | 2.26624614E-04 | 2.26605634E-04 |
| 1.0E-7 | 55 | 2.36143248E-04 | 2.36122068E-04 |
| 1.0E-8 | 230 | 2.41640317E-04 | 2.41617824E-04 |
| 1.0E-9 | 806 | 2.43573632E-04 | 2.43550670E-04 |
| 1.0E-10 | 2245 | 2.44065653E-04 | 2.44042570E-04 |
| 1.0E-11 | 5423 | 2.44174462E-04 | 2.44151353E-04 |
| 1.0E-12 | 12201 | 2.44197792E-04 | 2.44174677E-04 |
| 1.0E-13 | 25371 | 2.44202363E-04 | 2.44179247E-04 |
| 1.0E-14 | 51321 | 2.44202724E-04 | 2.44179608E-04 |
| 1.0E-15 | 103170 | 2.44202724E-04 | 2.44179608E-04 |

**기본사상 : 677개 gate : 776개**

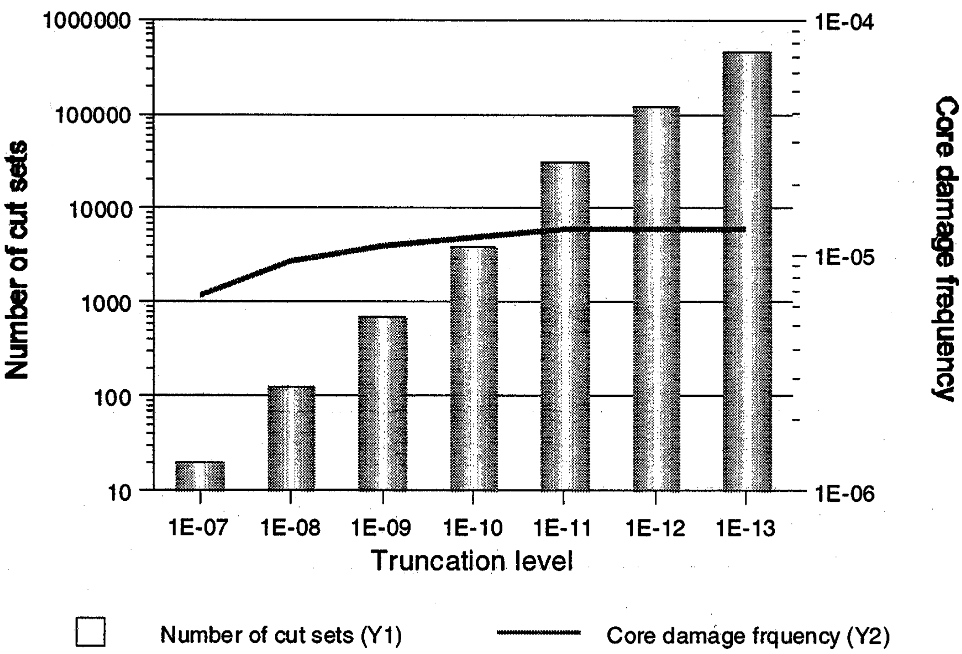


그림 1. 절삭기준에 따른 노심손상빈도 및 MCS 의 영향

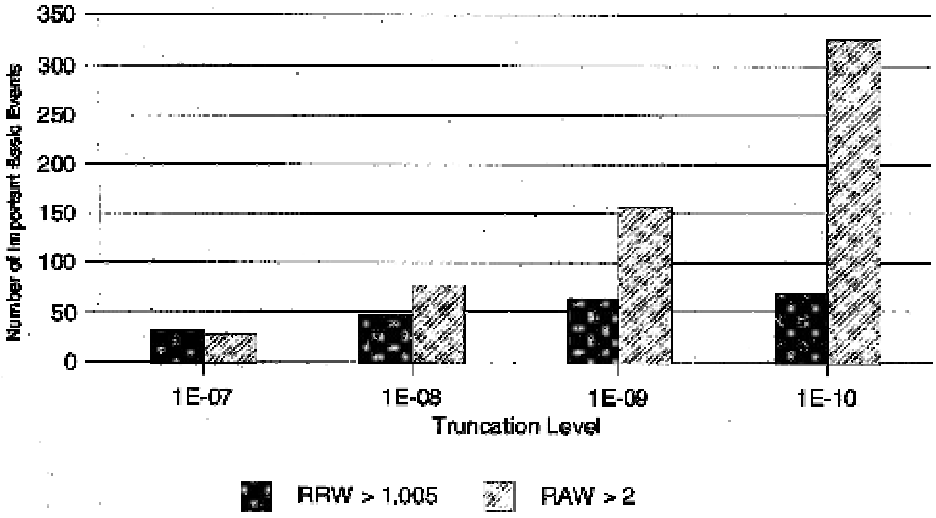


**그림 2. 절삭기준에 따른 중요도 순위의 영향**

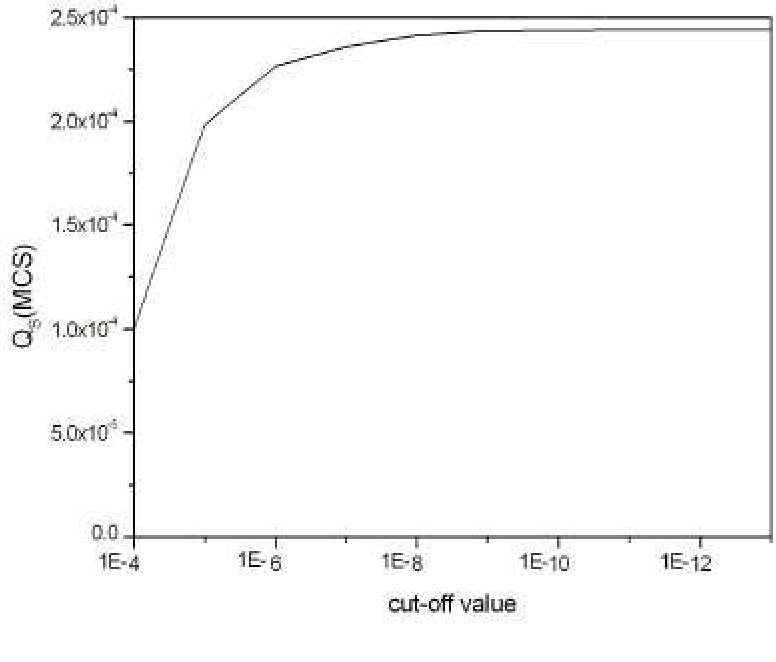


**그림 3. 절삭기준에 따른 정점사상빈도의 영향**

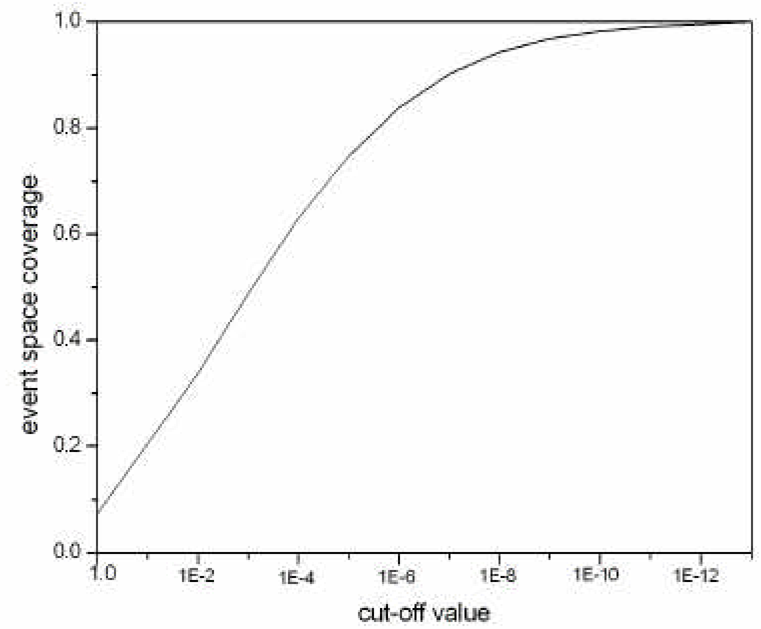


**그림 4. 절삭기준에 따른 event space coverage**

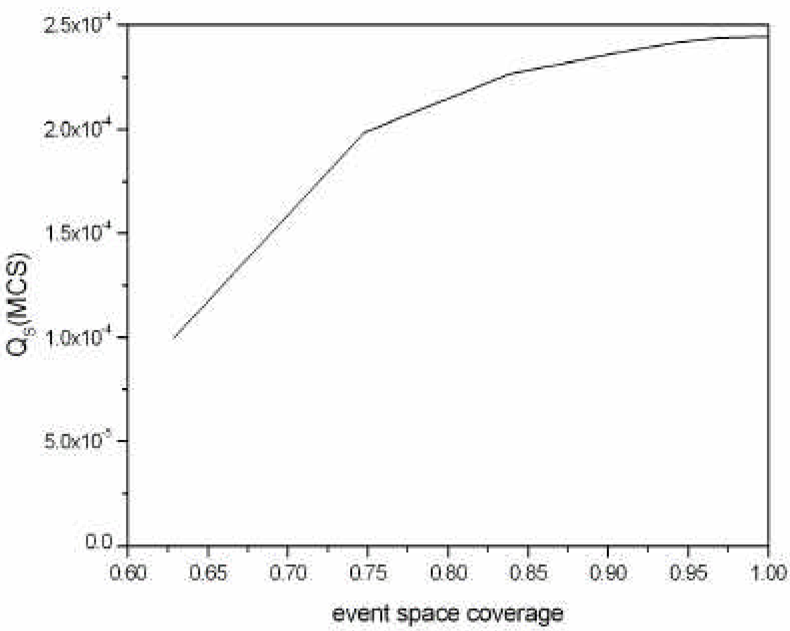


**그림 5. event space coverage 에 따른 정점사상빈도의 영향**