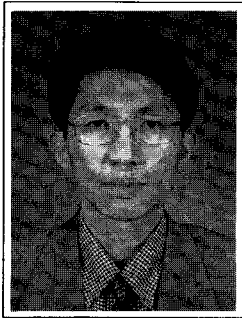


PSA 및 위험도 감시 전산시스템을 위한 고속 정량화 엔진

FORTE

정우식

한국전력기술(주) 위험도/신뢰도 평가팀



PSA의 흐름

화를 추적하고 주요 기기의 최적화된 정비 계획을 세우기 위해 단일 고장 수목에 대해 수많은 정량화를 수행하게 된다(발전소 배열 관리).

이 발전소 배열 관리를 위해 대용량의 단일 고장 수목에 대해 수없이 많은 정량화를 수행하기 때문에, 고속의 정량화 엔진에 대한 요구가 증대되고 있는 상황에서 한국전력기술(주)는 새로운 고속의 정량화 엔진 FORTE(Fully Optimized Risk&Reliability Quantification Engine)를 개발하여 해외 판매를 진행중이다.

FORTE는 미국의 SAIC사 및 Florida Power(2만달러)와 Commonwealth Edison 전력 회사에 공급 되었고(3만달러), 미국의 Southern Nuclear 전력 회사와는 계약 단계이다.

현재 미국의 30개 전력 회사에 대한 FORTE 판매 목표를 정해 놓고 있다(각 2만달러 이상).

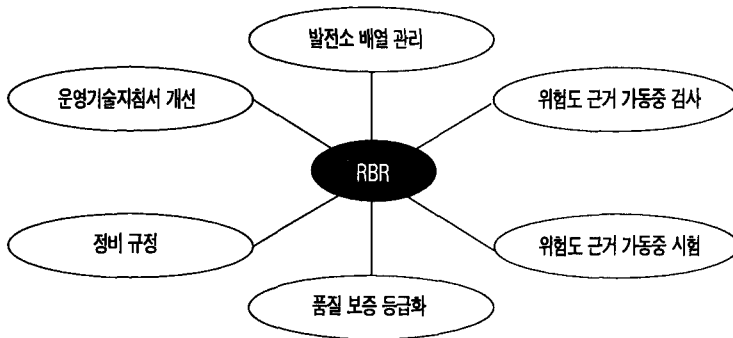
PSA는 특정 원자력발전소의 위험도를 종합적이고 체계적으로 평가하여 사고 발생 가능성 및 이로 인한 인근 주민의 사망 가능성을 확률론적으로 정량화하여 위험도를 낮추기 위한 개선 사항을 발전소 설계/운영시 반영하는 작업이다. 발전소의 모든 사고를 분석 대상으로 하기 때문에 상당한 양의 인력과 재원이 요구된다.

PSA는 계통 분석가, 구조 해석가, 데이터 분석가, 보건물리 전문가, 전산 처리 전문가 및 발전소 운전 요원 등 여러 분야의 전문가가 필요한 작업이다. 또한 PSA는 발전소의 운영에도 크게 활용되고 있다.

즉 발전소 운전원 증점 훈련 사항 도출이나 운영 기술 지침서 개선, 발전소의 각종 정보 관리, 방사성 폐기물 관리, 수명 연장 등에서도 활용되어 PSA 응용이 확대되고 있는 추세이다.

미국을 중심으로 한 많은 원자력발전소들은 원전의 위험도를 추적/관리하기 위해 위험도 감시 전산 시스템(Online Risk Monitor)을 사용하고 있다.

해당 원전의 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)시 작성된 모든 고장/사건 수목들을 합쳐 단일 고장 수목(Fault Tree)을 만든 후, 원전의 운전중 혹은 정지시 주요 기기의 고장 및 정비 등의 이용 불능으로 인한 위험도 변



(그림 1) 위험도 근거 규제(RBR)의 주요 구성

PSA는 지난 75년 미국 원자력규제위원회 (Nuclear Regulatory Commission, NRC)에서 발간된 WASH-1400에서 처음으로 시작되었다. 이 보고서에서 PSA는 79년에 발생한 TMI 같은 원전 사고 발생 가능성을 예측함으로써 그 효용성이 입증되어, 지금까지 운전중인 원전의 안전성 평가뿐만 아니라 신규 원전 설계시 취약점의 도출 수단으로 이용되고 있다.

이후 PSA는 미국의 경우 운전중인 모든 원전에 대해 PSA를 수행토록 하고 있다. 또한 우리 나라를 비롯한 프랑스·일본 등의 각국에서 PSA를 수행하고 있다.

원전에 대한 규제는 단순한 공학적 판단보다 원전을 구성하고 있는 기기들이 위험도에 미치는 영향(중요도, Importance)에 근거한 규제가 필요하다는 인식에 따라 PSA를 사용한 위험도 근거 규제(Risk Based Regulation, RBR)가 미국을 중심으

로 활발히 진행중에 있다.

PSA를 사용한 위험도 근거 규제

PSA는 위험도를 정량적으로 평가하므로 RBR의 유용한 도구로 인식되어 널리 사용되고 있다.

또한 PSA 기법은 결정론적인 방법에 의해 보수적으로 결정된 규제 요건을 개선하기 위해 사용되어 왔다.

불합리하게 설정되었던 기존의 허용 정지 시간 (Allowed Outage Time, AOT)과 정기 점검 주기 (Surveillance Test Interval, STI)의 완화 등이 그 예다.

미국의 경우, RBR의 도구로 사용되는 모든 원전에 대한 PSA가 완료되어 일관성 있는 위험도 평가 모델을 소유하게 되었다.

이에 따라 RBR의 시범 시행을 거쳐 최근에는 의무화 단계에 이르렀다. RBR의 주요 구성은 (그림 1)과 같다.

1. 발전소 배열 관리

위험도 근거 발전소 배열 관리의 목표는 위험도 관점에서 취약한 발전소 배열(Plant Configuration, 정상 기기와 이용 불능인 기기 상태들의 조합)을 식별하고 이를 관리하는 것으로 위험도를 증가시키는 배열을 억제하는 방향으로 정비 계획을 수립하기 위해 사용된다.

이를 위해 위험도 감시 전산 시스템이 사용된다.

발전소 배열 관리의 추가적인 이득은 발전소의 인적/물적 자원의 효과적인 사용에 있다.

2. 운영 기술 지침서 개선

운영 기술 지침서(Technical Specifications)는 안전성 분석 보고서의 분석과 일치하게 발전소가 운전 되도록 운전 제한 사항과 조건을 규정하고 있으며 주요 내용은 다음과 같다.

- ① 주요 공정 변수에 대한 안전 제한치(Safety Limit)
- ② 안전 계통의 설정 제한치(Limiting Safety System Setting, LSSS)
- ③ 운전 제한 조건(Limiting Conditions for Operation, LCO)
- ④ 정기 점검 요건(Surveillance Requirement)

위의 운전 제한 조건과 정기 점검 요건은 주로 결정론적 분석과 공학적 판단에 근거하고 있어 일부 요건은



영광 원전 중앙 제어실. 확률론적 안전성 평가(PSA)는 특정 원자력발전소의 위험도를 종합적이고 체계적으로 평가하여, 사고 발생 가능성 및 이로 인한 재해를 확률론적으로 정량화하여 위험도를 낮추기 위한 개선 사항을 발전소 설계·운영시 반영하는 작업이다.

불필요하게 제한적이며 어떤 경우에는 안전성에 나쁜 영향을 미치고 있다. 이와 같은 불합리한 운전 제한 조건 및 정기 점검 요건들을 개선하기 위해 PSA가 사용되고 있다.

위험도 근거 운영 기술 지침서 분석은 위험도 근거 규제 분야 중 가장 먼저 검토가 시작된 분야이다.

3. 정비 규정 (Maintenance Rule)

미국 NRC는 다음의 목적으로 정비 규정을 시행토록 하고 있다.

- ① 안전성에 영향을 미치는 고장 발생의 최소화
- ② 발전소 수명 기간 동안 지속적인 정비 효율성의 확인

③ 발전소 중요 기기의 기능 수행 능력 확인

정비 규정의 수행 내용은 크게 관리 대상 SSC(System, Structure, Component)의 선정, 성능 기준/목표의 수립 및 감시, 주기적 성능 평가, 시정 조치로 이루어져 있다.

이 SSC의 선정 및 성능 기준 수립/평가 등에 PSA에 의해 계산된 중요도가 사용된다.

4. 위험도 근거 가동중 검사 (Risk Based Inservice Inspection)

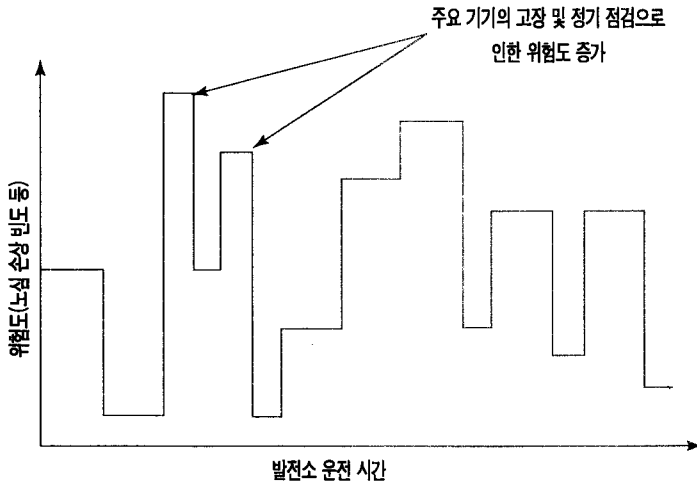
원자력발전소의 안전성에 대한 대중의 관심이 고조되어 원자력발전소는 엄격한 규제를 받고 있다.

특히 안전성 관련 기기는 건설·운전·정비 등 모든 분야에서 매우 높은 수준의 검사 요건을 적용받는다.

그동안 원자력 산업계는 가동중 검사(Inservice Inspection, ISI) 요건을 개선하기 위한 지침으로서 위험도에 근거한 방법을 적용하는 노력을 보여왔다.

한 예로, 원자력발전소에서 주재관으로서 종사하는 규제 기관의 요원이 원전 운전에 가장 중요한 항목에 시간과 인력을 집중할 수 있도록 PSA 결과를 이용하고 있다.

NRC는 위험도에 근거한 검사 지침(Risk Based Inspection Guide)을 개발하였는데, 이 지침은 현장에 상주하는 NRC 주재관이 일상적인



(그림 2) 주요 기기의 고장 및 정기 점검으로 인한 위험도 변화의 예

검사를 계획하고 수행할 수 있도록 개발되었다.

가동중 검사 요건 개선의 목적은 발전소 안전성을 향상시키고, 발전소 운전 및 정비에 필요한 인력과 자원을 효율적으로 배분하는 데 있다.

5. 위험도 근거 가동중 시험 (Risk Based Inservice Testing)

원자력발전소의 안전 운전을 위해 안전 관련 기기(Safety-Related Component)는 부여된 기능을 항상 수행할 수 있는 상태를 갖춰야 한다.

발전소 정상 운전중에 이들 기기의 운전 준비 상태를 보증해 주는 방법 중 하나가 가동중 시험(Inservice Testing, IST)이다.

현재까지는 IST 방법과 빈도가 규제 기관과 산업계의 결정론적 판단에 근거하여 결정되었다.

그리고 IST 규제 요건은 발전소 고유의 설계 사항과 발전소 안전성에 미치는 영향을 정확히 고려하지 않았다.

이에 따라 현재의 IST 요건은 위험도에 중요한 기기와 중요하지 않은 기기를 별도로 분류하지 않고 동일한 시험을 적용하고 있다.

현재 발전소 안전성에 중요한 기기에 대해서는 기능 유지를 위한 발전소 자원을 집중하고, 안전성에 중요하지 않은 영역에 대해서는 요건을 감소시키는 등의 IST를 최적화 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

미국의 NRC는 IST의 범위·형태·주기 결정에 결정론적 기법과 연계하여 확률론적 기법을 적용하는 방법에 관심을 집중하고 있다.

6. 품질 보증 등급화 (Graded QA)

원자력발전소에서의 품질 보증

(Quality Assurance)은 발전소의 안전성 유지 및 운전 에 필요한 SSC가 기능을 정확히 수행할 수 있도록 신뢰성을 확보하는 분야이다.

현재 발전소를 구성하는 모든 SSC는 안전성 관련 SSC와 비안전성 관련 SSC로 구분된다.

안전성 관련 SSC는 높은 수준의 품질 보증을 적용하기 위해 Q-목록에 속하게 된다.

Q-목록에 포함되는 SSC는 주어진 성능을 유지하기 위해 제작·설치·운전 및 점검시 엄격한 품질 보증 요건을 적용받는다.

일반적으로 원자력발전소에서 Q-목록에 포함되는 계통·기기 및 구조물은 약 75,000개로서 전력 회사는 이들에 대한 품질 보증 요건을 이행하기 위해 상당한 비용을 지불하고 있는 실정이다.

그러나 검토 결과, 실제로 발전소의 안전성에 영향을 미치는 SSC의 수는 상당히 적은 것으로 나타났다.

그 원인은 현재의 Q-목록이 발전소의 안전성에 영향을 미치는 SSC를 PSA의 정량적인 중요도 분석 결과에 근거하지 않고 정성적으로 결정했기 때문으로 판단된다.

품질 보증 등급화 프로그램은 PSA의 중요도에 근거해서 현재의 Q-목록을 재구성하고 상대적으로 낮은 중요도를 가지는 기기들의 품질 보증 요건을 완화하기 위해 수행된다.

**발전소 배열 관리로 인한
고속 정량화 엔진의 필요성**

최근 미국의 경우 원자력발전소 운영의 안전성과 경제성을 높이기 위해 RBR을 적극 시행하고 있고, RBR의 주요 내용인 발전소 배열 관리는 시범 실시를 거쳐 의무화 단계에 이르렀다.

이의 구현을 위해 위험도 감시 전산 시스템이 사용되고 있다.

위험도 감시 전산 시스템은 단일 고장 수목을 입력으로 사용한다.

① 해당 원전의 PSA시 작성된 모든 고장/사건 수목들을 모두 합쳐 단일 고장 수목을 만들고 ② 실제 정비가 수행되는 기기와 고장 수목의 기본 사건과 일대일, 다대일 등의 Mapping 정보를 데이터 베이스화한 후 ③ 원전의 운전중 혹은 정지시 주요 기기의 고장 및 정비 등의 이용 불능으로 인한 위험도 변화를 추적하고 주요 기기의 최적화된 정비 계획을 세우기 위해 단일 고장 수목에 대해 수많은 정량화를 수행하게 된다(그림 2).

이로 인해, ① 노심 손상을 유발하는 부품 고장들의 조합을 얻기 위한 논리 구조(고장 수목)가 대형화되었고 ② 각 기기들의 고장·시행·보수로 인한 위험도의 변화를 추적/예측하는 데 원전의 수명 동안 수많은 정량화가 요구되어 정량화 속도가 어느 정도 빠르냐가 중요한 요소가 되었다.

(표 1) FORTE의 기본 사양

Maximum length of gate or component name	30 characters
Maximum number of gates	No limit
Maximum number of basic events	No limit
Maximum number of top gates	No limit
Maximum number of initiators	No limit
Maximum number of house events	No limit
Maximum number of cutsets in any single gate	No limit
Maximum number of cutsets in top gate	No limit

(표 2) 사용 기종 및 비교 정량화 엔진

Benchmark test에 사용된 notebook	비교 정량화 엔진
Pentium MMX, 233 MHz MS Windows 95 48 MB of RAM 100 MB swap file	<ul style="list-style-type: none"> • FORTE : KOPEC 개발 • RSAT : 스웨덴의 RELCON 개발 • NURELMCS : 스웨덴의 RELCON/미국의 NUS 개발 • CQUANT : 미국의 SAIC 개발

(표 3) Benchmark Test 문제

Risk model	게이트 갯수	기본 사건 갯수
Test 1	3,269	1,010
Test 2	1,072	1,172
Test 3	4,786	2,558
Test 4	1,971	1,590

FORTE의 개발 및 상품화

미국을 중심으로 한 위험도 감시 전산 시스템의 사용으로 PSA 응용 분야가 큰 잠재 시장으로 부상하고 있고, 이 시장 개척을 위해서는 관련 PSA 전산 코드 개발이 필수적이며, 이 전산 코드의 핵심은 정량화 엔진의 속도이다.

이러한 상황에서 KOPEC은 세계에서 제일 빠른 정량화 엔진 FORTE를 개발하여 해외 판매를 진행중이다.

FORTE 개발 과정은 96년말 공식적으로 시작되었으며 성공 요인은 다음과 같이 요약된다.

① 선입관을 갖지 않기 위해 기존의 정량화 엔진들의 방법론을 검토하지 않았고 ② 독자적인 아이디어를 구현하기 쉽게 프로그램의 구조를 단순화하고 유연하게 설계하였으며 ③ FORTE의 단점을 개선하기 위해 많은 Benchmark Test가 미국의 SAIC사 (Science Application International Corp., EPRI R&R

〈표 4-a〉 Benchmark Test 결과 - Test 1

Quantifier \ Cutoff	1.0E-6	1.0E-7	1.0E-8	1.0E-9
FORTE	4	4	5	7
RSAT	10	16	30	71
NURELMCS	11	22	30	76
CQUANT	26	42	105	496

정량화 시간: 초, NT: Not Tested

〈표 4-b〉 Benchmark Test 결과 - Test 2

Quantifier \ Cutoff	1.0E-7	1.0E-8	1.0E-9	1.0E-10	1.0E-11	1.0E-12
FORTE	4	3	3	4	9	28
RSAT	6	6	9	16	66	424
NURELMCS	4	5	6	9	21	NT
CQUANT	17	30	267	NT	NT	NT

정량화 시간: 초, NT: Not Tested

〈표 4-c〉 Benchmark Test 결과 - Test 3

Quantifier \ Cutoff	1.0E-7	1.0E-8	1.0E-9	1.0E-10
FORTE	10	12	22	70
RSAT	38	90	223	NT
NURELMCS	70	169	NT	NT
CQUANT	142	976	NT	NT

정량화 시간: 초, NT: Not Tested

〈표 4-d〉 Benchmark Test 결과 - Test 4

Quantifier \ Cutoff	1.0E-6	1.0E-7	1.0E-8	1.0E-9	1.0E-10	1.0E-11
FORTE	3	3	4	6	16	58
RSAT	11	15	28	60	142	NT
NURELMCS	11	19	40	91	199	NT
CQUANT	24	34	156	739	NT	NT

정량화 시간: 초, NT: Not Tested

Workstation 사용자 그룹의 전산 코드 공급사의 도움으로 수행되었다.

97년 SAIC은 EPRI R&R Workstation 사용자 그룹 회의의

Benchmark Test에 FORTE를 초 대하였고 FORTE는 월등한 성능을 보여주었다.

이 후 SAIC사는 KOPEC과 판매 협약을 체결하여 FORTE의 북미 내 판매를 전담하고 있다.

FORTE의 주 수요처는 EPRI R&R Workstation 사용자 그룹이다.

EPRI R&R Workstation 사용자 그룹은 ① 신뢰도 분석/응용에 필요한 일관된 정보 체계와 ② 이를 중심으로 한 PSA 전산 코드로 구성된 R&R Workstation을 개발하고 있다.

R&R Workstation 사용자들은 멤버 자격으로 개발된 모든 신뢰도 코드들에 대한 사용 권한이 있다.

현재 미국의 26개 Utility(71 Units)와 미국 내 8개의 PSA Vendor 및 한전을 포함한 8개의 국제적인 기관들이 참여하고 있다.

FORTE의 기능

FORTE는 PSA 및 발전소 배열 관리를 위한 단일 고장 수목의 정량화에 사용된다.

고속 정량화를 위해 많은 독창적인 아이디어들이 고장 수목 재구성, 게이트 전개, Boolean Absorption 및 데이터 저장 방식에 구현되어 있다.

또한 홍수/화재 등의 위험도 정량화의 고속화를 위한 기능도 내장되어 있다.

FORTE는 ① AND, OR, N/M, NOT, NAND, NOR 등의 모든 게이트를 고려할 수 있고 ② 단일 실행 시 사용자가 입력 파일에 명시한 다중 정점 사상 (Multiple Top Events)을 풀 수 있고 ③ 자동적으로 하나 이상의 초기 사건을 가진 최소 단절 집합(Minimal Cut Set, MCS)을 제거하고 ④ Negate를 가진 고장 수목의 정확한 MCS를 계산하거나 선택적으로 Delete-term Procedure를 사용하여 근사해를 계산할 수도 있다.

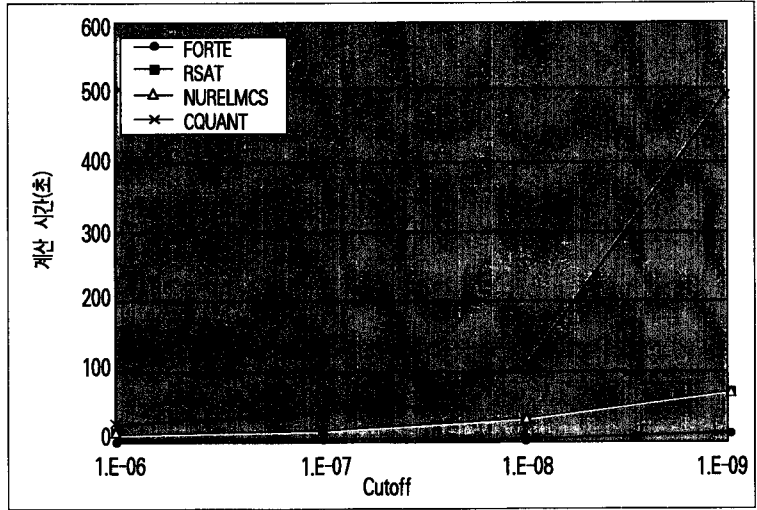
FORTE는 32bit 응용 프로그램으로 Windows 95 혹은 NT 환경하에서 사용되고 있다. ANSIC 언어로 작성되었기 때문에 Windows 3.x 및 UNIX 등의 운영 체제에서도 Compile 후 사용 가능하다.

현재 FTAP, KIRAP, 및 SETS 입력 화일을 읽을 수 있고, 문자 모드 (Text-mode)와 EPRI R&R Workstation 응용 프로그램을 위한 이진 모드(Binary-mode)의 두 가지 출력이 가능하다.

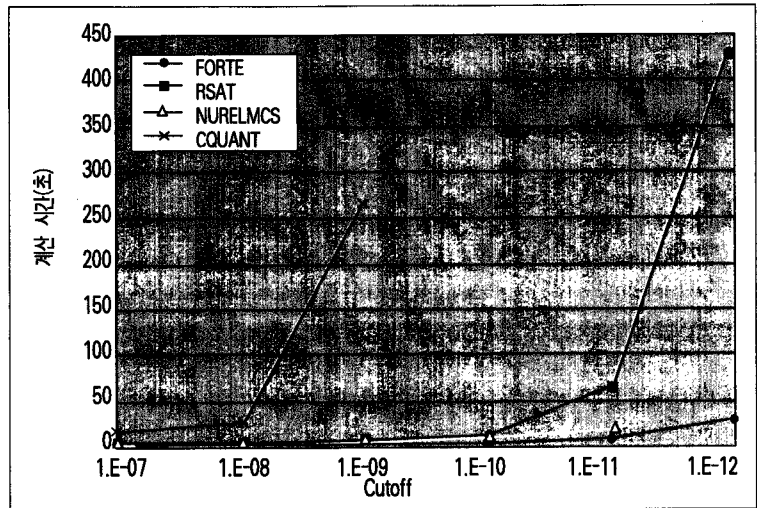
FORTE의 기본 사양은 <표 1>과 같고 각 변수들은 개인 컴퓨터의 사용 가능한 메모리에 제한 받는다.

FORTE는 EPRI R&R Workstation 표준을 지원하는 모든 PSA 프로그램에 사용 가능하다.

즉 EPRI의 위험도 감시 전산 시스템 인 EOOS, 1단계 PSA용 CAFTA, PRAQuant, 화재 분석용



(그림 3-a) Benchmark Test 결과 - Test 1

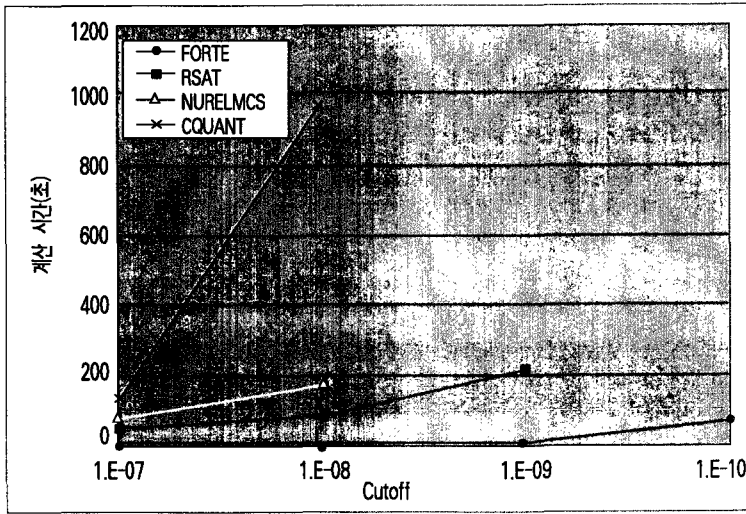


(그림 3-b) Benchmark Test 결과 - Test 2

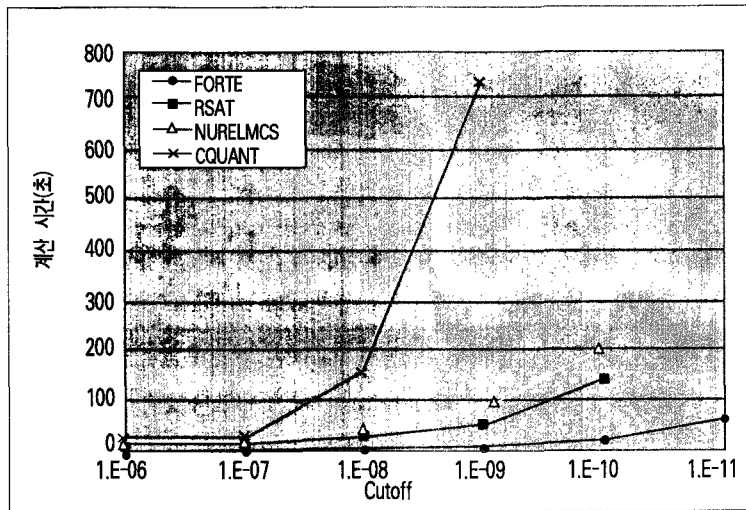
FRANC II 등이 FORTE를 정량화 엔진으로 사용할 수 있다.

Bottom-Up 계산 절차에 의해 정점 사건의 모듈화된 MCS들을 얻은 후, 모듈을 해당 MCS으로 대체하여 정점 사건의 최종 MCS들을 얻는다.

이 MCS들을 이용하여 ① Inclusion-Exclusion Principle의 First Order 발생 확률 ② Minimal Cut Upper Bound 발생 확률의 두 가지 정점 사건 발생 확률들을 계산한다.



(그림 3-c) Benchmark Test 결과 - Test 3



(그림 3-d) Benchmark Test 결과 - Test 4

Benchmark Tests

FORTE를 검증하기 위해 미국의 SAIC사와 Benchmark Test를 실시하였다.

Baseline으로 QA가 이미 실시된

CAFTA의 정량화 엔진 CQUANT가 사용되었으며, 사용 기종 및 비교 정량화 엔진은 <표 2>와 같다.

<표 3>의 4개의 단일 고장 수목 (www-losaltos.saic.com/r&r/benchmark.html)에 대해 여러 Cutoff값으

로 비교가 수행되었다.

Benchmark Test 결과 <표 4-a>에서 <표 4-d> 및 <그림 3-a>에서 <그림 3-d>까지 www-losaltos.saic.com/r&r/bench.html), 이전까지 최고속의 정량화 엔진이었던 NURELMCS 및 RSAT보다 FORTE가 10배에서 20배까지 빠른 계산 속도를 보였다.

결론

현재 세계적으로 원전의 안전성 확보 및 향상을 위해 PSA를 수행하는 것은 일반화되었으며, 이제는 원전의 폐기 때까지 위험도의 변화를 추적하는 위험도 감시 전산 시스템 등의 사용으로 PSA 응용 분야가 큰 잠재 시장으로 부상하고 있고, 이 시장 개척을 위해서는 관련 PSA 전산 코드 개발이 필수적이며 이 전산 코드의 핵심은 정량화 엔진의 속도이다.

KOPEC은 FORTE를 개발하였으며 장기적으로 FORTE의 고속화와 다양한 기능 추가 등으로 해외 시장 개척을 추진할 계획이다.

우리 나라의 원자력 관련 여러 기관에서도 위험도 감시 전산 시스템의 필요성 및 효용성을 인정하고 있고, 앞으로의 사용에 대해 충분히 공감하고 있는 상황이며, 이의 사용시 한정된 인적/물적 자원 내에서 합리적으로 원전의 위험도를 관리할 수 있을 것이다. ☼