

위험도에 근거한 안전주입탱크 허용정지시간 연장

Risk-Informed Evaluation of an Extension to Accumulator Completion Times

김 명 기, 정 백 순

한전전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

울진 5,6호기의 기술지침서에 기술된 안전주입탱크의 허용정지시간은 너무 엄격하여 운전의 유연성이 없을 뿐 아니라 정비시간이 불충분하여 완벽한 정비가 어려운 실정이다. 본 논문에서는 이런 애로사항을 타개하기 위하여 기술지침서의 완화를 위험도를 근간으로 분석하여 타당성을 제시하였다. 분석 결과 현행 1시간으로 되어 있는 허용정지시간을 안전주입탱크의 붕산농도 기준치 미달 혹은 초과 시에는 72시간, 그 이외의 경우 예를 들면 기기고장일 경우에는 24시간으로 연장했을 경우 위험도 증가는 매우 미미하였으며 Regulatory Guide 1.174에서 제시한 허용기준에 충분히 만족되는 것으로 나타났다.

Abstract

Currently the completion time described in technical specifications of Ulchin units 5 and 6 is insufficient to respond to accumulator operability problem and to solve the mechanical failure problem. In order to resolve these operable problems, this paper provides, through risk-informed regulation approaches, the technical justification for extending the completion time for one inoperable accumulator to 72 hours for accumulator boron concentration out of specification and to 24 hours for reasons other than boron concentration, such as mechanical failure of valves. The results show that the increases of core damage frequency and large early release frequency with respect to the completion time are very small enough to meet the acceptable criteria in Regulatory Guide 1.174.

1. 서론

원자력발전소의 효율적인 운영을 위하여 미국 원자력규제위원회에서는 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA) 결과를 원전 운영의 규제에 활용할 것에 대한 정책성명[1]을 천명하였다. 이후 PSA Implementation 방침[2]을 발표하였고 1999년 위험도에 근거한 원전의 규제 방침을 분야별로 Regulatory Guides[3],[4]를 발표하였다. 그 중 Regulatory Guide 1.174는 위험도에 근거한 원전의 규제에 대하여 기본적인 방침 및 허용범위를 언급하였으며 Reg. Guide 1.177은 위험도기반 기술지침서 변경에 대하여 분석 깊이 및 허용기준에 대하여 기술하였다. 이들 Regulatory Guide는 현행 기술지침서에 정해져있는 정기점검주기 혹은 허용정지시간은 엔지니어링 판단과 기기 제작사의 권고에 의해서 정하여진 것이 많으므로 이들을 위험도 관점에서 재분석하여 위험도의 증가에 따라 점검주기 및 허용정지시간 연장 여부를 결정하는 기준을 언급하고 있다. 대표적인 것으로서는 안전주입탱크 허용정지시간, 비상디젤발전기 허용정지시간, 공학적안전계통/원자로정지계통 정기점검주기, 고압안전주입탱크 및 저압안전주입탱크의 허용정지시간 등이 있다. 발전소 위험도측면에서 보면 정지허용시간을 연장함으로써 얻는 이점은 첫째 충분한 정비시간으로 신뢰성 있는 정비를 수행할 수 있으며 둘째 정비시간 부족으로 인해 원자로를 강제 정지시키는 경우가 줄어들어 발전소의 과도상태 혹은 시스템의 충격을 방지할 수 있다. 본 논문에서는 올진 5.6호기 원전을 대상으로 안전주입탱크의 허용정지시간 연장에 대한 타당성을 위험도에 근거하여 제시하고자 한다.

현행 올진 5.6호기의 기술지침서에서는 안전주입탱크의 봉산농도와 수위에 대하여 허용치 이내에 들지 못 할 경우에는 1시간 내 정상상태로 복구를 요구하고 있으며 그렇지 않을 경우에는 원자로 강제정지까지 요구하고 있다. 그러나 원전 운전경험에 비추어 보면 1시간 내 봉산농도를 규정치 이내로 들어오게 하는 것과 격리밸브고장 시(이로 인해 원자로 냉각재가 역류하여 안전주입탱크 수위 증가 유발) 이를 1시간 내에 정비하는 것은 현실적으로 거의 불가능하다. 현재 규정되어 있는 정지허용시간은 이러한 운전 경험을 고려하지 않은 상황에서 만들어진 것으로 현실을 반영한 정지허용시간 제정이 필요하다. 미국의 원전에 적용하고 있는 표준기술지침서에서는 안전주입탱크와 관련하여 봉산농도가 규정치를 위배했을 때에는 72시간의 정지허용시간을 주고 그 이외의 경우에는 1시간으로 정하고 있다. 본 논문에서는 봉산농도에 관한 허용정지시간을 72시간으로 연장했을 경우의 위험도변화와 봉산농도관련 이외의 기계적인 고장일 때를 24시간으로 연장했을 경우에 대하여 위험도를 계산하여 연장에 대한 타당성을 검토하였다. 분석 방법은 WCAP-15049[5]와 Regulatory Guide 1.177에서 언급한 방법을 따랐다.

2. 본론

2.1 안전주입탱크 허용정지시간 기술지침서 요건

안전주입탱크는 질소가스로 가압된 봉산수로 채워진 압력용기이며, 운전원의 조치가 필요 없는 수동기기이고 냉각재 압력이 안전주입탱크 이하로 떨어지면 자동으로 주입되도록 질소가스로 가압되어 있다. 안전주입탱크는 1개의 모터구동밸브와 2개의 체크 밸브로 구성된 주입라인으로 RCS 저온관과 연결되어 있으며 가압기 압력이 415psig 보다 올라갔을 때 모터구동밸브가 자동으로 열리도록 연동(P-103, 014)되어 있다[그림 1]. 안전주입탱크는 고압, 중

압 및 저압 안전주입시스템과 함께 기능을 수행한다. 안전주입탱크의 기능은 냉각재 상실사고시에 원자로 노심에 냉각수를 공급하는 것으로써 안전주입과 함께 노심을 재충수한다. 표 1은 울진 5,6호기의 안전주입탱크의 기술지침서 요건과 연장 허용정지시간을 보여주고 있다. 경우 1은 붕산농도가 기준치를 벗어나 하나의 안전주입탱크 운전불가일 경우에 허용정지시간을 72시간으로 확장한 경우이고, 경우 2는 그밖에 다른 이유로 하나의 안전주입탱크 운전불가일 경우에 허용정지시간을 24시간으로 확장한 경우이다.

표 1 울진 5,6호기 현행 및 연장 허용정지시간

상태	요구조건	허용정지시간 (시간)		
		울진5,6호기	경우 1	경우 2
A. 붕산농도가 기준치를 벗어나 하나의 안전주입탱크 운전불가	붕산농도를 제한치 이내로 복구	1	72	72
B. A 가 아닌 다른 이유로 하나의 안전주입탱크 운전불가	안전주입탱크를 운전 가능상태로 복구	1	1	24
C. 요구조건 및 허용정지시간	C.1 모드 3 유지	6	6	6
	C.2 가압기를 1000 psig 이하로 감압	6	12	12

2.2 Regulatory Guide 규정

Regulatory Guide 1.177에서 위험도에 근거하여 기술지침서의 정기점검주기 및 허용정지시간을 완화할 경우에 대하여 아래와 같은 사항(Three Tier Approach)을 요구하고 있으며 각각의 허용기준을 언급하고 있다.

Tier 1 : 확률론적안전성평가 및 위험도 영향분석

위험도를 분석할 시에는 노심손상빈도(Core Damage Frequency, CDF), 노심손상빈도증가분(Incremental Core Damage Frequency, Δ CDF), 조건부노심손상빈도증가분(Incremental Conditional Core Damage Probability, ICCDP), 대량초기방출빈도(Large Early Release Frequency, LERF) 대량초기방출빈도증가분(Incremental Large Early Release Frequency, Δ LERF) 및 조건부대량초기방출빈도증가분(Incremental Conditional Large Early Release Probability, ICLERP)을 분석하여야 한다.

Tier 2 : 위험도에 심각한 영향을 줄 수 있는 발전소 배열(Configuration) 회피

발전소 정비 전략이 바뀌어 발전소 배열이 변경되는 경우는 이로 인해서 위험도가 증가 될 수가 있으므로 이에 대한 방지 수단을 강구하여야 한다.

Tier 3 : 정비시 대상 기기의 이용불가에 따른 위험도 분석 및 관리

변경된 정비전략에 의해 해당 기기의 정비시 사전에 위험도 증가 분석 및 이에 대한 일련의 관리체계를 구축하여야 한다.

2.3 확률론적안전성평가 및 위험도 영향분석

울진5,6호기 확률론적안전성보고서[6]에 의하면 안전주입탱크의 기능은 대형냉각재상실사고가 발생하였을 때 원자로용기 내로 냉각수를 공급하는 역할을 하며 이의 성공기준은 '파단

된 저온관과 연결된 안전주입탱크를 제외한 나머지 3개의 안전주입탱크 중 2개로부터 원자로냉각재계통의 저온관으로 냉각재를 주입' 하는 것으로 나타나 있다. PSA 분석에서는 보수적인 관점에서 중형냉각재상실사고시와 소형냉각재상실사고시에 안전주입탱크를 사고수목에 포함시키지 않았다. 따라서 안전주입탱크의 정지허용시간 변경에 따른 영향은 대형냉각재상실로 인한 노심손상빈도에만 영향을 끼치게 된다.

$$CDF = IE_{LLOCA} \times U_{SIT} \dots\dots\dots (1)$$

IE_{LLOCA} : 대형냉각재상실사고 빈도($1.7E-4$)

U_{SIT} : 안전주입탱크계통 이용불능도

그림 2는 안전주입탱크의 고장수목을 보여주고 있으며 WCAP-15049에 데이터를 사용하면 각 기본사건의 이용불능도 값은 다음과 같다.

역지밸브

고장모드 : Failure to open on demand

고장율 : $2.0E-4$

모타구동밸브

고장모드 : Spuriously closes or plugs

고장율: $3.0E-8/hr$

이용불능도: $3.0E-8/hr \times 8760 hr/yr \times 1.5yr(18개월) \times 1/2 \approx 2.0E-04$

불산농도가 기준치를 벗어남에 따른 안전주입탱크 이용불능도

발생빈도 : $2/300.5 \approx 0.01/yr$

이용불능도 : $0.01 events/yr \times 1 yr/8760 hr \times (1+6) hr = 8.0E-6$

다른 이유에 따른 안전주입탱크 이용불능도

발생빈도 : $27/300.5 \approx 0.1/yr$

이용불능도 : $0.1 events/yr \times 1 yr/8760 hr \times (1+6) hr = 8.0E-5$

역지밸브 및 모타구동밸브 공통원인고장

Failure of 2 of 3 트레인 : $0.5 \times \beta \times (1-\gamma) \times n \times q$

β : 0.06 (역지밸브), 0.08 (모타구동밸브)

γ : 0.33

n : 공통원인고장 cutset 수

q : 밸브이용불능도

2.4 허용정지시간 연장에 따른 CDF 증가

먼저 표1에 기술되어 있는 각 경우에 대하여 안전주입탱크의 이용불능도를 KIRAP 코드를 사용하여 구하였으며 수식(1)을 사용하여 대형냉각재상실사고에 대한 노심손상빈도를 구하였다. 분석 결과 경우 1의 경우 노심손상빈도증가(ΔCDF)는 $5.0E-11$ 로, 경우 2는 $2.2E-10$ 으로 나타났다(표 2). 이 값은 Reg. Guide 1.174[3]에서 언급한 허용기준치 $1E-6$ (노심손상빈도가 $1E-3$ 인 발전소)에 충분히 만족됨을 보여주고 있다.

조건부노심손상빈도증가분(ICCDP)은 수식 (2)과 같이 정의되며 이를 사용하여 각 경우에 대하여 ICCDP를 구하였다.

$$ICCDP = \{[\text{조건부 CDF} - \text{기존 CDF}] \times \text{확장허용정지시간}\} \dots\dots\dots (2)$$

조건부 CDF : 기기가 정비중일 때의 노심손상빈도

기존 CDF : 허용정지시간을 확장하지 않았을 때의 노심손상빈도

확장허용정지시간 : 확장시키고자 하는 허용정지시간 (72시간, 24시간)
 분석 결과 각 경우에 대한 ICCDP는 2.13E-9, 3.08E-9로 나타났다 (표 2). 이 값은 Reg. Guide 1.174 [3]에서 언급한 허용기준치 5E-7에 충분히 만족됨을 보여주고 있다.

표 2 허용시간연장에 따른 계통이용불능도 및 노심손상빈도

경우	안전주입탱크계통 이용불능도	노심손상빈도	Δ CDF	ICCDP
기본경우	5.50E-5	9.35E-9	-	-
경우 1	5.53E-5	9.40E-9	5.0E-11	2.13E-9
경우 2	5.63E-5	9.57E-9	2.2E-10	3.08E-9

2.5 허용정지시간 연장에 따른 발전정지 위험도 회피 분석

안전주입탱크 허용정지시간의 연장이 주는 이점 중 하나는 발전정지 및 재기동을 회피하므로써 위험도를 줄일 수 있다는 점이다. 즉 허용정지시간의 연장은 기기 고장시 정상화하는데 걸리는 데 필요한 시간을 줄이므로써 강제정지를 방지하게 되기 때문이다. WCAP-15049[5]에 의하면 원자로 출력 증감발시 부주의로 원자로가 정지되는 경우가 각 0.068과 0.088로 나타났다. 따라서 울진5,6호기 PSA보고서[6]에 의하면 1회 불시정지로 인한 노심손상빈도 증가는 1.2E-7이므로 출력증감발시에 야기될 수 있는 노심손상빈도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$CDP = (0.088 + 0.068) \times 1.2E-7 = 1.9E-8$$

또한 WCAP-15049 [5]에 의하면 연간 안전주입계통의 고장이 0.326건으로 나타났으므로 만약 10번 정비시 정비시간의 불충분으로 1회 발전소 강제정지사건이 발생한다면 이로 인한 위험도는 다음과 같다.

$$\Delta CDP = 1.9E-8 \times 0.326 / 10 = 6.2E-10$$

이 값은 허용정지시간을 연장해서 발전소 강제정지를 막음으로 해서 얻는 위험도 감소를 의미하므로 앞에서 구한 (표 2) 계통의 이용불능도 증가에 의한 위험도 증가와 비교할 때 오히려 전체 위험도는 감소하는 것을 알 수 있다.

2.6 허용정지시간 연장에 따른 LERF 영향분석

안전주입탱크는 노심손상방지를 위한 설비이지 격납건물로부터 방사물누출을 방지하기 위한 설비는 아니다. 대량방사물 방출은 격납건물무회사건, 격납건물격리사건, 격납건물파손사건과 직접적으로 관련이 있으므로 안전주입탱크의 기기고장은 대량방사물 방출에 직접적인 영향을 주지 않는다. 단 안전주입탱크의 허용정지시간의 연장으로 대형냉각재상실사고로 인한 노심손상빈도가 증가하므로 이로 인해서 간접적으로 격납건물의 파손확률 증가하므로 대량방사물누출빈도는 증가하게 된다. 그리고 이 증가량은 노심손상빈도에 비례한다고 할 수 있다. 그런데 노심손상빈도증가분(Δ CDF), 조건부노심손상빈도증가분(ICCDP)의 증가분은 매우 적으므로 대량초기방출빈도증가분(Δ LERF), ICLERP 또한 그 증가량은 매우 적다 할 말 할 수 있어, 허용정지시간연장에 따른 Δ LERF, 조건부대량초기방출빈도증가분(ICLERP)은 Reg. Guide 1.174의 허용범위에 들어온다고 말할 수 있다.

2.7 심층방어(Defence-in-Depth) 및 안전여유도(Safety Margins)에 대한 영향 평가

Reg. Guide 1.177에 의하면 기술지침서 변경 시에는 심층방어 원칙을 만족시켜야 함을 보여야 하며 이 원칙은 다음과 같다.

- 1) 노심손상 방지, 격납건물 실패의 예방 및 결말의 방지의 적절한 균형
- 2) 발전소 설계의 취약점을 보완하기 위하여 프로그램에 지나치게 의존 회피
- 3) 계통의 중첩성, 독립성 및 다중성의 유지
- 4) CCF의 예방 유지 및 새로운 CCF의 발생 평가
- 5) 방지벽의 독립성 손상 방지
- 6) 인적오류의 예방

이상의 원칙에 대하여 5.1E-6안전주입탱크의 허용정지시간의 연장에 대한 영향을 각 항목별로 살펴보면 다음과 같다. 1) 안전주입탱크 허용정지시간의 연장에 따른 노심손상확률의 증가는 미미하고(오히려 위험도가 감소할 수도 있음), 격납건물의 기능 및 노심손상의 억제에는 별다른 영향을 주지 못하며 이에 따라 새로운 사건이나 과도상태가 유발되지 않는다. 2) 발전소 설계가 변경되지 않으며 모든 안전계통은 같은 기능을 수행하며 추가 시스템 및 절차서 추가도 없다. 3) 계통의 중첩성, 독립성 및 다중성의 유지에 전혀 영향을 주지 않는다. 4) 추가적인 정비가 요구되지 않으므로 새로운 공통원인고장 유발과는 관련이 없다. 5) 방지벽의 독립성 손상과는 관련이 없다. 6) 새로운 인간오류를 유발시키는 작업이 추가되지 않으므로 관련이 없다. 따라서 안전주입탱크의 허용정지시간을 연장하여도 심층방어의 원칙은 준수됨을 알 수 있다.

다음은 허용정지시간의 연장에 대한 안전여유도에 대한 영향을 살펴보면 다음과 같다. 올진 5.6호기 예비안전분석보고서[7]에 언급되어 있는 안전분석 성공기준에 영향을 미치는 것은 안전주입탱크가 가용하지 않을 때에만 영향을 주게된다. 안전분석에는 대형냉각재상실사고와 소외전원이 동시에 상실되었을 때 3개의 건전루프에 안전주입이 가능하여야 노심손상을 막을 수 있고 한다. 그러므로 하나의 안전주입탱크가 가용하지 못하면 노심은 손상을 입게된다. 이런 조건 때문에 기술지침서에서 운전불능인 안전주입탱크는 1시간 이내에 운전가능 상태로 되든지 안되면 발전정지로 갈 것을 요구하고 있다. 그러나 이런 안전분석시의 조건인 “완전파단 대형냉각재상실사고와 소외전원의 동시 발생” 사고빈도는 매우 낮은 값이며 아울러 WCAP-15049에 의하면 이에 의한 위험도는 매우 낮은 것으로 나타났다. 따라서 안전여유도에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

이상과 같이 안전주입계통의 허용정지시간 연장은 심층방어 및 안전여유도 측면에서 영향이 없는 것으로 나타났다.

3. 결론

안전주입탱크의 허용정지시간의 연장에 대한 위험도의 계산과 Reg. Guide의 허용기준을 비교 검토한 결과 아래와 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 안전주입탱크의 허용정지시간 연장에 의한 노심손상확률의 증가는 허용기준 이내이다.
경우 1과 경우 2 각각에 대한 CDF의 증가는 5.0E-11과 2.2E-10으로 전체 CDF가 1.0E-3 일 경우의 허용기준인 1.0E-6 이내이며 이는 발전정지 및 재기동에 따른 CDF 증가량 6.2E-10보다 오히려 작다.
- 경우 1과 경우 2에 대한 ICCDP는 각각 2.13E-9와 3.08E-9로 Reg. Guide 1.177에 허용기준 5E-7 보다 적다.
- 격납건물의 기능에 안전주입탱크는 영향을 미치지 않기 때문에 LERF는 단지 CDF의

증가에만 영향을 미친다. 따라서 안전주입탱크의 허용정지시간 연장에 의한 CDF와 ICCDP가 허용기준내에 있기 때문에 LERF에 대한 영향도 적고 만족할 만한 수준이다.

- 심층방어 및 안전여유도 측면에서 보면 허용정지시간연장은 영향을 주지 못한다.
- 허용정지시간연장으로 인해서 발전소 배열이 변경되는 사항이 없으므로 Tier 2와는 직접적으로 관련이 없으며 Tier 3은 실제로 발전소에서 시행할 때 수행한다.

이상과 같이 현행 기술지침서를 봉산농도가 기준치를 벗어나 하나의 안전주입탱크 운전불가시와 봉산농도가 아닌 다른 원인에 의한 경우 허용정지시간을 현행 1시간에서 각각 72시간과 24시간으로 기술지침서를 변경하는 것은 타당한 것으로 결론을 지을 수 있다.

참고문헌

1. USNRC, "Use of Probabilistic Risk Assessment Methods in Nuclear Activities: Final Policy Statement," Federal Register 60FR42622, August 16, 1995.
2. "Quarterly Status Update for the Probabilistic Risk Assessment Implementation Plan," SECY-97-234, October 14, 1997.
3. Regulatory Guide 1.174, "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis," July 1998.
4. Regulatory Guide 1.177, "AN Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decision-making: Technical Specifications," August 1998.
5. WCAP-15049, "Risk-Informed Evaluation of an Extension to Accumulator Completion Times," 1998.
6. "울진 5,6호기 확률론적안전분석보고서(중간보고서)," 99전력연-단-413, 1999. 8
7. "울진 5,6호기 예비안전분석보고서," 한국전력공사.

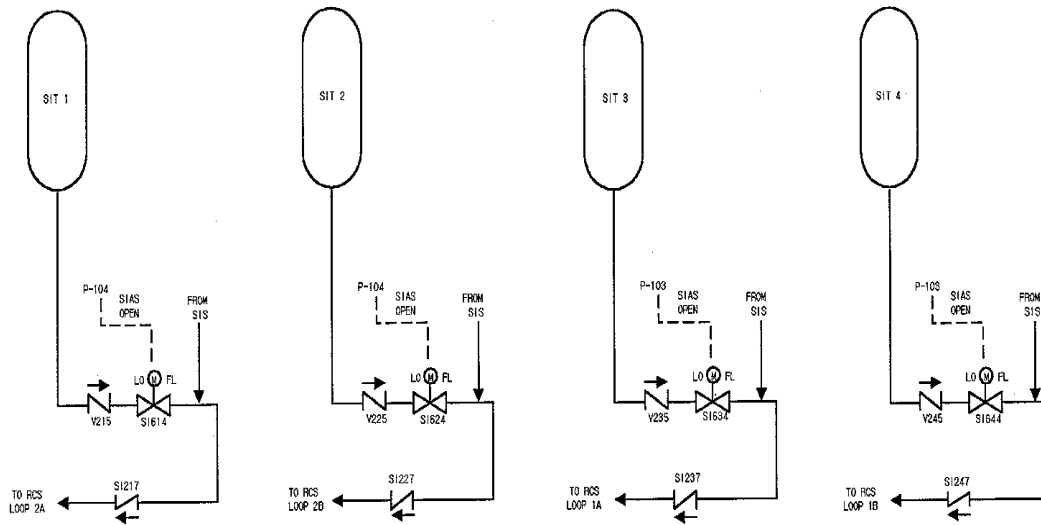


그림 1 안전주입탱크계통 단순계통도

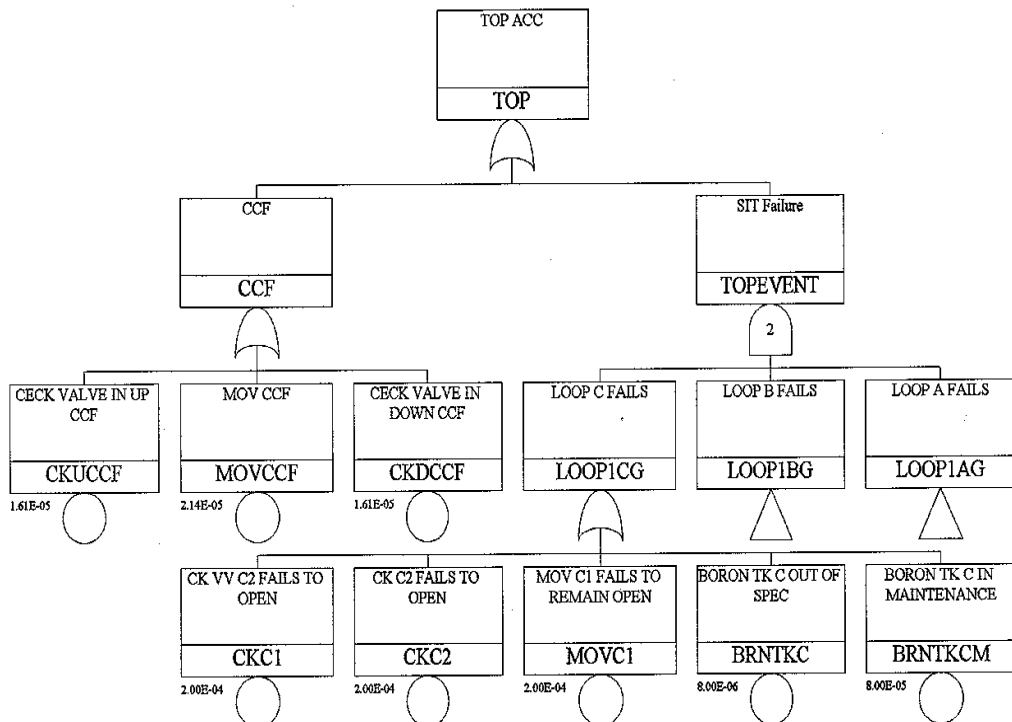


그림 2 안전주입탱크계통 고장수목