

# 고리3,4 및 영광1,2호기 원자력발전소 원자로보호계통 및 공학적안전설비 신뢰도 평가를 통한 정기점검주기평가

김명기<sup>1)</sup>, 권종주<sup>2)</sup>

## 요약

고리 3,4호기 및 영광 1,2호기의 원자로보호계통 및 공학적안전설비작동계통의 정기점검주기와 허용정지시간에 대하여 계통의 신뢰도와 노심손상빈도를 평가하여 안전성이 저해되지 않는 범위에서 합리적인 정기점검주기와 허용정지시간을 도출하였다. 이를 위하여 원자로보호계통의 17개 원자로정지신호와, ESFAS계통의 11개의 안전설비작동신호에 대해서 고장수목을 작성하였고, 정기점검주기 변화에 따른 신뢰도를 평가하였다. 또한 계통의 신뢰도가 발전소의 안전성에 어떤 영향을 미치는가를 파악하기 위하여 노심손상빈도를 분석하였다. 분석 결과 현행 1개월의 점검주기를 3개월로 연장한다 하더라도 신뢰도는 20%미만 노심손상빈도는 2%정도 저하되는 것으로 나타났다. 이런 정도의 신뢰도와 위험도가 변화는 원자력발전소의 안전성에 거의 영향을 주지 못하기 때문에 점검주기를 연장하는 안이 타당한 것으로 나타났다.

## 1. 서론

원자력발전소는 안전성을 확보하기 위하여 운영기술지침서(Technical Specification, TS)에서 안전설비 및 기기에 대하여 정기검사주기 및 허용정지시간을 요구하고 있다. 정기점검시험주기(Surveillance Test Interval, STI)란 주요안전계통의 성능확인 및 품질보증을 위하여 정기적으로 시험이 수행되어야하는 최소주기를 의미하며 허용정지시간(Allowed Outage Time, AOT)은 원자로가 운전중에 운전대기 상태로 있는 계통을 점검 또는 보수하는 데에 허용되는 최대시간을 말한다. 그러나 이러한 활동의 수행으로 계통의 신뢰도가 얼마나 보장되는지에 대한 정량적 평가가 없이 공학적 판단(Engineering Judgement)에 기반을 두고 결정되어 사용되어지고 있다. 그러나 정기점검시 인적실수로 인한 발전소의 불시정지사례가 있어 과도하게 짧게 설정된 정기점검주기는 오히려 역효과를 일으킬 수도 있고 정기점검에 투입되는 인적, 물적 자원을 고려해 볼 때 재검토가 필요하다 하겠다.

본 논문에서는 그림 1에서 보는바와 같이 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기의 원자로보호계통(Reactor Protection System, RPS) 및 공학적안전설비작동계통(Engineered Safety Feature Actuation System, ESFAS)에 대한 STI 및 AOT에 대하여 신뢰도 및 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)기술을 사용하여 STI와 AOT를 변화시켜 가며 신뢰도와 위험도를 평가하고 그 결과를 바탕으로 합리적인 점검주기를 도출하고자 하였다.

이를 위해 먼저 분석대상 계통인 원자로보호계통의 17개 원자로정지신호에 대한 정점사건을 정

1) 대전 유성구 문지동 103-16 전력연구원 원자력연구실 책임연구원(kimmk@kepri.re.kr)

2) 대전 유성구 문지동 103-16 전력연구원 원자력연구실 선임연구원(jjkwon@kepri.re.kr)

의하였으며 이에 대한 고장수목을 작성하였고 마찬가지로 공학적안전설비작동계통에 대해서도 11개의 안전설비작동신호에 대한 정점사상을 정의하고 고장수목을 작성하였다. 대상 계통은 주로 전자회로카드(아날로그 및 디지털 카드)를 사용하여 필요한 신호를 만들어 내기 때문에 보다 정확한 계통의 신뢰도를 파악하기 위하여 아날로그 카드는 카드단위까지, 디지털카드는 부품수준까지 고장수목의 기본사건으로 처리하였다. 전자회로카드 및 부품의 고장자료를 구하기 위하여 발전소의 고장이력자료 및 운전이력자료를 수집, 평가하여 일반 데이터베이스와 베이지안처리를 통하여 발전소 고유 신뢰도데이터베이스를 만들어 사용하였다. 이렇게 구축된 고장수목과 데이터베이스를 사용하여 점검주기의 변화에 따른 계통의 신뢰도를 평가하였다.

다음은 계통의 신뢰도가 원자력발전소의 안전에 어떤 영향을 미치는가를 보기 위하여 원전 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)를 수행하였다. 이는 원자력발전소의 모든 계통의 신뢰도를 평가하고 임의의 사고가 발생했을 때 안전계통의 작동 유무에 따라 사고의 진행(사건수목, Event Tree)을 파악하여 최종적으로 최악의 상황인 발전소의 노심손상빈도(Core Damage Frequency, CDF) 값을 구하는 것이다. 본 논문에서는 RPS 및 ESFAS계통의 점검주기의 변화가 노심손상빈도에 어떤 영향을 미치는지에 대해서도 분석하였다. 마지막으로 계통의 신뢰도 값과 노심손상빈도 값을 종합 평가하여 RPS 및 ESFAS계통의 STI 및 AOT의 최종 값을 도출하였다.

## 2. 본론

### 2.1 RPS/ESFAS 정기점검 시험 개요

고리 3,4호기 및 영광 1,2호기의 RPS 및 ESFAS는 아날로그채널(감지기,바이스태블 등), 반도체 논리보호계통 회로, 주/부계전기 및 원자로정지차단기로 구성되어 있다(그림 1). 계통별 정기점검시험의 종류는 크게 1)아날로그채널 시험 2)반도체논리 시험 3)주/부계전기 시험 4)원자로정지차단기 시험으로 나눌 수 있다. 계통의 정기점검 시험은 시험스위치를 시험위치에 놓고, 우회 정지 차단기를 닫고, 반도체 논리보호계통 회로 보드를 제거하여 수행한다. 한 계열이 시험중일 때 다른 계열은 정상운전모드에 있어야 하며, 두 트레인을 동시에 시험할 수는 없다. 또한 RPS 및 ESFAS를 구성하고 있는 부계통의 STI/AOT는 계통별로 각각 다르게 규정되어 있다(표 1). 아날로그 채널시험은 각 공정 채널의 공정랙에 설치되어 있는 채널 시험장치에 의해 수행되는 데 시험중인 해당 채널은 트립 상태로 되므로 다른 채널에서 단지 한 개의 트립신호가 발생하더라도 원자로보호계통이 작동하게 되어 발전소는 정지하게 된다. 따라서 발전소에서는 RPS 및 ESFAS 시험시 많은 주의를 기울이고 있다.

### 2.2 정기점검주기가 발전소 안전성에 미치는 정성적 평가

현재까지 축적된 운전 경험에 의하면 지나치게 짧은 AOT와 빈번한 STI는 발전소 운전원들에게 과중한 부담이 되고 있을 뿐 아니라 오히려 어떤 면에 있어서는 발전소 안전성에 악영향을 주는 것으로 나타났다. 현재까지 나타난 기존의 AOT 및 STI가 발전소 운영 및 안전성에 미치는 정성적 영향 평가는 표 2에 기술되었다.

### 2.3 AOT/STI 변화에 따른 신뢰도 평가

RPS 및 ESFAS에 대한 고장수목 구성은 RPS의 경우 17개의 원자로 정지 신호에 대한 정점 사건을 정의하여 이들에 대한 고장수목을 구성하였으며, ESFAS의 경우에는 11개의 안전 설비 작동 신호에 대한 정점 사건을 정의하여 고장수목을 구성하였다. 고장수목의 정점사건은 “해당 신호가 부품의 고장으로 발생되지 않을 확률”로 정의되었다. 고장수목에 고려된 기본사건은 Random 고장율, 시험 및 정비에 의한 이용불능도, 인간오류 그리고 공통원인고장에 의한 이용불능도를 고려하였다. 이 중에서 앞의 3가지 원인에 의한 이용불능도는 NUREG/CR-6141 (Handbook of Methods for Risk-based Analysis for Technical Specifications)에서 제시된 방법에 따라, 공통원인고장은 MGL방법으로 분석하였다. 고장수목은 일반 PSA에서는 기기 단위로 분석을 하지만 본 연구에서는 계통의 고장 논리를 상세히 모델링하기 위해 카드 레벨까지 범위를 확대하여 분석하였다. 고려된 인간 오류로는 원자로 정지 실패 오류와 교정 오류 및 시험 후 배열오류가 있는데, 원자로 정지 실패 오류로는 주 제어실에서 운전원이 원자로를 수동으로 정지시키지 못하는 사건, 시험 후 배열 오류는 우회 차단기 시험 후 배열 오류, 그리고 교정 오류로는 감지기들에 대한 개별 및 공통 교정 오류 등이었다.

계통 이용불능도 정량화를 위해서는 고장수목에 모델링 된 각 부품의 신뢰도 데이터베이스가 필요하다. 본 분석에서는 고리 3,4호기와 영광 1,2호기의 고유 고장 데이터를 조사하여 일반 데이터베이스와 베이지안 합성을 통하여 해당 발전소 고유의 신뢰도 데이터베이스를 구축하였다 (표 3).

표 1에서 보는 바와 같이 현행 수행되어지고 있는 AOT/STI 값과 연장안 Case 1 및 Case 2에 대하여 RPS 및 ESFAS 고장수목을 정량화 하였다(표 4). 분석 결과 RPS의 이용불능도는 고리 3,4호기의 경우 AOT 및 STI를 현행 요건에서 연장안으로 변경시 약 0.8 ~ 19.9%, 현행 요건에서 Case 1으로 연장시에는 1.5 ~ 31.0% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 영광 1,2호기 경우에는 현행 요건에서 연장안으로 변경시 RPS 이용불능도가 0.8 ~ 30.7%, Case 1으로 변경시에는 1.4 ~ 48.1%로 증가하는 것으로 나타났다. ESFAS 이용불능도는 고리 3,4호기의 경우 현행 요건에서 연장안으로 변경시 4.8 ~ 14.7 %의 증가율을, Case 1으로 연장시에는 7.6 ~ 31.9 %의 증가율을 보이고 있다. 영광 1,2호기의 경우에는 현행 요건에서 연장안으로 변경시 7.4 ~ 16.4 %의 증가율을, Case 1으로 연장 시에는 10.6 ~ 33.1 %의 증가율을 보이고 있다.

AOT 및 STI 연장에 따른 고리 3,4 및 영광 1,2호기 의 RPS 계통의 원자로정지신호(가압기 고수위 정지)와 ESFAS 계통의 안전주입신호(가압기 저압력)의 각 안에 대한 이용불능도 변화가 그림 2와 3에서 보여주고 있다.

### 2.4 발전소 위험도 분석

AOT와 STI 변경이 발전소 안전성에 미치는 영향을 평가하기 위해 발전소 수준의 위험도 분석을 수행하였다. 이는 원자력발전소의 모든 계통의 신뢰도를 평가하고 임의의 초기사고가 발생했을 때 안전계통의 작동 유무(고장수목 분석을 통해 신뢰도 값을 구함)에 따라 사고의 진행(사건수목을 통해 사고의 진행과정 도식)을 파악하여 안전계통이 작동하지 않을 때 발전소의 노심손상빈도(Core Damage Frequency, CDF) 값을 구하였다.

본 분석에서는 RPS와 ESFAS의 AOT 및 STI에 대한 현행 요건과 변경안(표 2)에 대한 CDF를 정량화 하였으며, 민감도 분석을 위해 2가지의 분석 대안을 선정하여 이들에 대한 CDF도 정량화 하였다(표 5). 위험도 분석 결과 고리 3,4 호기의 경우 현행 요건에서의 CDF가  $7.924E-5/ry$ 이며, AOT 및 STI를 연장안으로 변경하는 경우에는 CDF가  $8.046E-5/ry$ 로 증가하여 1.47%의 증가율을 보이고 있다. 영광 1,2호기의 경우에는 현행 요건에서 CDF가  $6.776E-5/ry$ 이며, 연장안으로 변경시 CDF가  $6.861E-5/ry$ 로 증가하여 1.19%의 증가율을 보이고 있다.

또한 고리 3,4호기의 경우 현행요건에서의 CDF가  $7.930E-5/Ry$ 이며 Case 1에서는 CDF가  $8.086E-5/Ry$ 로 1.47%의 증가율을 보이고 있고 Case 2에서는  $8.086E-5/Ry$ 로 증가하여 1.97%의 증가율을 보이고 있다. Case 1의 경우는 아나로그 채널의 시험주기를 1개월에서 3개월로 늘리고 정지차단기를 제외한 아나로그채널,논리캐비넷,주계전기,부계전기의 시험시간을 현행요건인 2시간에서 4시간으로, 정비시간을 아나로그채널의 경우는 1시간에서 6시간으로 기타 다른 항목은 6시간에서 12시간으로 연장시킨값을 반영하여 노심손상빈도를 계산한 결과이다. 원자로 정지차단기는 발전소 위험도에 미치는 영향이 클것으로 예상되어 현행 AOT 및 STI요건을 그대로 유지하는 것으로 계산하였다.

이상과 같은 발전소 위험도 분석 결과로부터 고리 3,4호기와 영광 1,2 호기 모두 RPS 및 ESFAS의 AOT와 STI를 연장안과 같이 변경하더라도 CDF가 1.47% 미만으로 증가하여 위험도 모델과 데이터베이스의 불확실성 범위내에 있으므로 AOT 및 STI 연장이 발전소 위험도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

### 3. 결론

본 연구에서는 고리 3,4 호기 및 영광 1,2호기의 RPS 및 ESFAS 계통에 대한 현행 AOT 및 STI 요건의 안전성 저해요인 및 이에 따른 개선 필요성에 따라 RPS 및 ESFAS 계통의 AOT와 STI 변화에 따른 계통의 신뢰도와 위험도를 정량적으로 평가하였다. 분석결과를 보면 점검 주기연장에 따라 계통의 신뢰도는 연장안일 경우에는 20%까지 이용불능도가 증가하나 노심손상빈도 측면에서는 2% 미만으로 나타났다. 따라서 이런 정도의 신뢰도와 위험도 변화는 원자력발전소의 안전성에 거의 영향을 주지 못하기 때문에 RPS/ESFAS계통의 AOT와 STI를 표 2의 연장안으로 변경하는 것이 타당한 것으로 나타났다.

### 참고문헌

1. "고리3,4/영광1,2호기 원자로보호계통 및 공학적안전설비 정기점검요건 완화 연구," 전력연구원, 1999. 8
2. "Evaluation of Surveillance Frequency and Out-of-Service Times for the Reactor Protection Instrumentation System," WCAP-10271, Westinghouse, Jan. 1983

표 1. RPS 및 ESFAS의 AOT/STI 현행요건 및 연장안

항 목	현행 요건	연장안	Case 1	Case 2
○ 아날로그채널				
- 시험주기(개월)	1	3	<-	<-
- 시험시간(시간)	2	4	12	8
- 정비주기(개월)	24	<-	<-	<-
- 정비시간(시간)	1	6	72	24
○ 논리캐비넷				
- 시험주기(개월)	2	<-	<-	<-
- 시험시간(시간)	2	4	<-	<-
- 정비주기(개월)	18	<-	<-	<-
- 정비시간(시간)	6	12	30	18
○ 정지차단기				
- 시험주기(개월)	2	<-	<-	<-
- 시험시간(시간)	2	<-	<-	<-
- 정비주기(개월)	12	<-	<-	<-
- 정비시간(시간)	6	<-	<-	<-
○ 주계전기				
- 시험주기(개월)	2	<-	<-	<-
- 시험시간(시간)	2	4	<-	<-
- 정비주기(개월)	고장율	<-	<-	<-
- 정비시간(시간)	6	12	30	18
○ 부계전기				
- 시험주기(개월)	3	<-	<-	<-
- 시험시간(시간)	2	4	<-	<-
- 정비주기(개월)	고장율	<-	<-	<-
- 정비시간(시간)	6	12	30	18

<- : 좌동

표 2. 짧은 AOT 및 STI가 주는 영향

내 용	AOT 영향	STI 영향
1. 이용불능도 증가	-	○ 시험에 따른 이용불능도 증가 ○ 시험 후 회복 조치 실패 가능성 증가
2. 기기 신뢰도 저하	○ 불충실한 시험 및 정비	○ 기기 마모 및 성능 저하
3. 원자로 불시 정지 빈도 증가	○ AOT 이후의 원자로 정지 빈도 증가 ○ 운전원 스트레스에 의한 인적 오류	○ 시험 중 원자로 정지 빈도 증가
4. 합리적인 발전소 운영 제한	○ 발전소 운영상 융통성 감소 ○ 비현실적인 허용 시간 ○ 가동율 저하	○ 발전소 Burden 증가 ○ 작업자 방사선 피폭량 증가

표 3. 고리3,4호기 고유 데이터베이스

부품명	일반데이터 고장률(/hr)	고장 데이터			고유데이터 고장률(/hr)	비고
		고장횟수	기기운전시간	고장률		
Pressure Transmitter	2.80E-06	2	2,846,558	3.51E-07	9.67E-07	
RTD Sensor	8.60E-06	2	1,552,668	1.29E-06	2.02E-06	
Level Transmitter	4.90E-06	7	2,975,947	2.35E-06	2.45E-06	
Channel Test Card	1.70E-07	1	10,480,509	9.54E-08	1.11E-07	
Relay Card	7.80E-07	1	2,587,780	3.86E-07	4.78E-07	
Flower Transmitter	2.00E-06	0	1,164,501	8.59E-07	1.13E-06	주1
Master Relay	5.22E-07	1	2,846,558	3.51E-07	3.79E-07	
Slave Relay	5.18E-07	0	6,340,061	1.58E-07	2.39E-07	주1
Ion Chamber	1.44E-05	4	1,293,890	3.09E-06	3.85E-06	주1

주 1 : 고장횟수 0인 경우 1이라고 가정

표 4. 고리 3,4호기 RPS 신호별 이용불능도

신호종류	현행요건	연장안		CASE 1		CASE 2	
		Q	증가 (%)	Q	증가 (%)	Q	증가 (%)
1 Power Range, Neutron Flux High Setpoint	3.600E-05	3.676E-05	2.11	3.954E-05	9.83	3.782E-05	5.06
2 Power Range, Neutron Flux Low Setpoint	5.495E-05	5.656E-05	2.93	5.954E-05	8.35	5.770E-05	5.00
3 Power Range, Neutron Flux High Positive Rate	3.611E-05	3.729E-05	3.27	4.016E-05	11.22	3.839E-05	6.31
4 Power Range, Neutron Flux High Negative Rate	3.611E-05	3.729E-05	3.27	4.016E-05	11.22	3.839E-05	6.31
5 Intermediate Range, Neutron Flux with P10	4.378E-05	4.534E-05	3.56	5.013E-05	14.50	4.717E-05	7.74
6 Source Range, Neutron Flux with P6 & P10	2.126E-05	2.188E-05	2.92	2.255E-05	6.07	2.214E-05	4.14
7 Overtemperature Delta T	5.663E-04	6.789E-04	19.88	7.419E-04	31.01	7.031E-04	24.16
8 Overpower Delta T	4.854E-04	5.546E-04	14.26	6.107E-04	25.81	5.761E-04	18.69
9 Pressurizer Pressure Low with P7	2.879E-05	3.055E-05	6.11	3.566E-05	23.86	3.264E-05	13.37
10 Pressurizer Pressure High	2.648E-05	2.720E-05	2.72	3.169E-05	19.68	2.903E-05	9.63
11 Pressurizer Water Level High	5.319E-05	5.409E-05	1.69	6.282E-05	18.10	5.744E-05	7.99
12 Loss of RCS Flow with P7	2.219E-05	2.300E-05	3.65	2.308E-05	4.01	2.303E-05	3.79
13 Loss of RCS Flow with P8	4.570E-05	4.723E-05	3.35	5.004E-05	9.50	4.831E-05	5.71
14 Steam Generator Water Level Low - Low	1.782E-05	1.844E-05	3.48	1.867E-05	4.77	1.851E-05	3.87
15 Undervoltage, Reactor Coolant Pumps with P7	1.421E-05	1.433E-05	0.84	1.442E-05	1.48	1.436E-05	1.06
16 Underfrequency, Reactor Coolant Pumps with P7	1.438E-05	1.450E-05	0.83	1.460E-05	1.53	1.453E-05	1.04
17 Turbine Trip	3.704E-05	3.783E-05	2.13	4.064E-05	9.72	3.891E-05	5.05

표 5. 고리3,4 호기 및 영광 1,2호기 위험도 분석결과

발전소	고리 3, 4 호기		영광 1, 2 호기		W (2/4 Logic)		W 2/3 Logic	
	CDF(/ry)	증가율 (%)	CDF(/ry)	증가율 (%)	CDF(/ry)	증가율 (%)	CDF(/ry)	증가율 (%)
현행요건	7.930E-05	-	6.780E-05	-	5.706E-05	-	5.717E-05	-
Case 1	8.046E-05	1.47	6.861E-05	1.19	5.800E-05	1.6	5.832E-05	2.0
Case 2	8.086E-05	1.97	6.884E-05	1.53	5.836E-05	2.3	5.893E-05	3.1
Case 3	8.062E-05	1.67	6.870E-05	1.32	-	-	-	-

- 주) 1. CDF : Core Damage Frequency  
 2. W 2/4 Logic : W 형 발전소 2/4 논리 입력신호 계산결과  
 3. W 2/3 Logic : W 형 발전소 2/3 논리 입력신호 계산결과

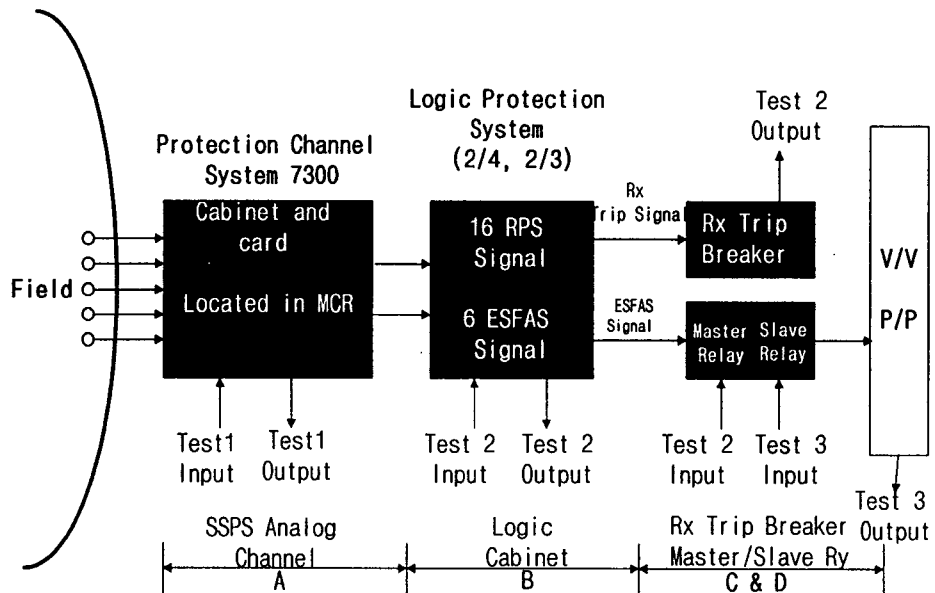


그림 1. 원자로보호계통 및 공학적안전설비작동계통 흐름도

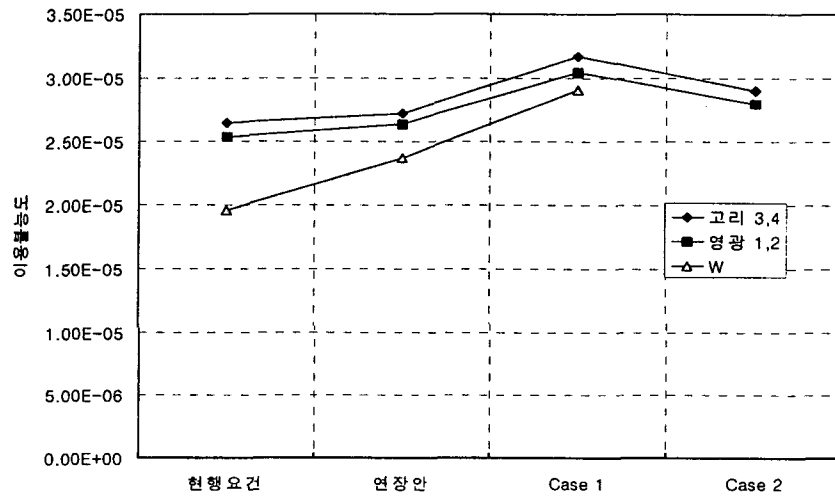


그림 2. 원자로 정지신호(PZR, Pr. High) 이용불능도

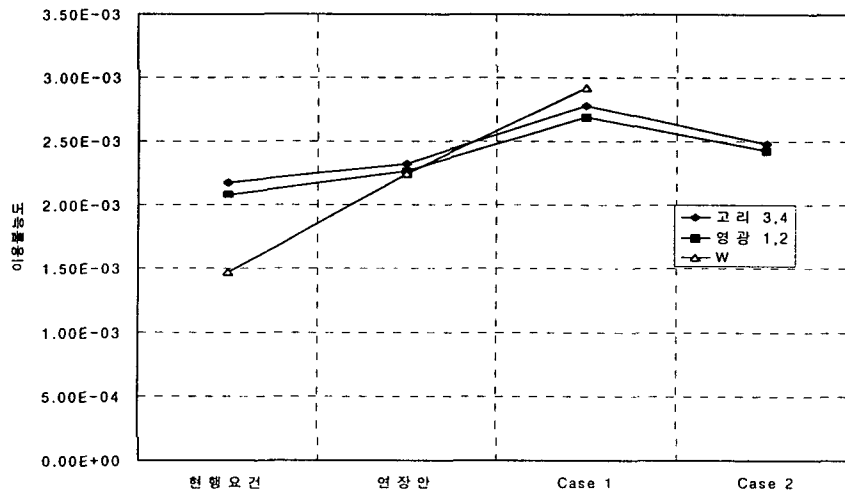


그림 3. 안전주입신호(PZR, Pr. Low) 이용불능도