

## 고리 1호기 가압열충격 해석을 위한 계통 열수력 해석 연구

김용수  
한국전력 기술공사

김재학, 홍순준, 박군철  
서울대학교  
서울시 관악구 신림동 산 56-1

### 요약

고리 1호기 원전 수명 연장을 위한 가압열충격(Pressurized Thermal Shock ; PTS) 해석은 확률론적 안전성 평가 방법에 따라 수행된다. 본 연구는 가압열충격 상세 해석 연구의 일환으로 가압열충격 해석을 위한 계통해석시 사용되는 최적 평가(Best Estimate) 방법과 기존의 PCT(Peak Cladding Temperature) 관점의 해석에 사용되는 결정론적 안전성 평가 방법간의 해석 방법론 차이에 의한 열수력 거동의 상이점을 평가하기 위함이다. 이를 위해 1998년 설치 예정인 고리 1호기 교체 증기발생기(Replacement Steam Generator ; RSG) 안전성 분석 보고서<sup>[1]</sup>의 주증기관 파단사고 해석 결과와 동일한 파단 크기 및 운전 출력에 대해 최적 평가 방법론에 따라 해석된 본 연구의 해석 결과를 비교, 평가하였다. 해석 결과 전출력 소형 주증기관 파단 사고에서는 터빈 유량 모델링 및 반응도 계수, 고온 영출력 대형 파단 사고에서는 가압기 모델, 반응도 계수 및 정지여유도가 해석 방법론에 따른 열수력 거동의 차이에 영향이 큰 것으로 평가되었다.

### 1. 서론

지구 환경이 국제적 문제로 부각되면서 전세계적으로 청정 에너지원인 원자력 이용 확대의 필요성이 증대되고 있다. 반면, 국내에서는 원전 안전성에 대한 막연한 불안감으로 인한 건설부지 확보난으로 신규 원전 건설에 많은 어려움을 겪고 있다. 전력 수요 증가에 대처하면서 신규 원전 건설을 최소화하기 위한 최적 방안은 원전 운전수명 연장이다. 이에 따라, 전세계적으로 원전수명 관리 연구가 활발히 진행되고 있으며, 국내에서도 원전수명관리 연구 3단계 중 1단계인 수명 연장 타당성 평가가 고리 1호기에 대해 수행되었다.

본 연구는 원전수명관리 2단계 연구의 일환으로써, 가압열충격 상세 해석을 위한 주증기관 파단사고시 열수력 거동 해석이다. 특히, 가압열충격 해석에 관련한 열수력 거동 해석시 사용되는 최적 평가(Best Estimate) 방법과 기존의 PCT(Peak Cladding Temperature) 관점의 해석에서 사용된 결정론적 안전성 평가 방법 사이의 해석 방법론에 따른 열수력 거동의 상이점을 평가하기 위함이다. 해석 방법론에 따른 열수력 거동의 상이점을 평가하기 위해 LOFTRAN<sup>[2]</sup>을 이용하여 해석된 고리 1호기 교체 증기발생기(Replacement Steam Generator ; RSG) 안전성 분석 보고서의 전출력 주증기관 소형파단(파단면적 :  $0.7ft^2$ ) 및 고온 영출력 대형파단(Double Ended Break)사고에 대한 PCT 관점의 해석 결과와 이와 동일한 파단 크기 및 운전 출력에서 RETRAN-3D<sup>[3]</sup>를 사용한 해석 결과와 비교하였다.

### 2. 해석 모델

가압열충격에 관련한 열수력 거동 해석에는 최적 평가(Best Estimate) 방법을 사용하므로 해석

표-1 PCT 해석과 PTS 해석 주요 입력 비교

구분	PCT 해석	PTS 해석
노심 열출력	1758 MW	1723.5 MW
RCP 출력	10 MW	5MW
반응도 계수	주기말	주기초
정지 여유도	Worst Stuck Rod Worth 제외	Worst Stuck Rod Worth 포함
봉산주입탱크	고려	제외
고압안전주입 지연 시간	12.0 sec(소외전원 가용시)	3.7sec(소외전원 가용시)
고압안전주입 유량	최소값 사용	설계값 사용
보조급수 유량	터빈구동 보조급수펌프 제외	터빈구동 보조급수펌프 포함
주증기 격리밸브 닫힘	Step Close	Ramp Close
원자로 정지 지연 시간	정지 지연	정상 정지
제어 계통	제외	고려
RCS 유량	86,100 gpm/Loop	97,100 gpm/Loop
증기발생기 세관 관막음을	15%	0%
잔열 생성량	ANS 1979 + 2σ	ANS 1979
가압기 모델	Thermal Equilibrium model	Non-Equilibrium model
터빈	일정 증기 유량	압력차에 의한 유량 형성
파단부위 방출량	Moody Model	Homogeneous Equilibrium model

모델 수립에 사용되는 입력 자료는 기존의 PCT 관점의 해석 입력과 다르다. 고리 1호기 증기발생기 교체 안전성 분석보고서의 PCT 관점의 해석에서는 보수적 해석(Conservative Estimate) 방법론에 입각하여 주증기관 파단사고 해석 모델이 수립되었다. 반면, 본 연구에서는 최적 평가(Best Estimate) 방법론에 입각하여 과도한 보수성을 배제한 입력 자료들을 해석 모델 수립에 사용하였다. 해석 방법론에 따른 입력 자료의 차이점을 표-1에 비교, 기술하였다.<sup>[4][5][6][7][8][9][10][11]</sup>

고리 1호기 해석 모델은 RETRAN-3D에서 45개의 Volume, 75개의 Junction, 110개의 Trip Card와 132개의 Control Card 등으로 그림-1과 같이 구성하였다.

1차계통은 크게 원자로 용기, 냉각재 펌프, 가압기, 그리고 연결 배관으로 구성되어 있다. 원자로 용기는 상하부공동, 하향유로, 우회유로 및 노심으로 이루어져 있으며 노심은 3개의 영역으로 나누었다. 가압기는 실제적인 거동을 모사하기 위해 열적 비평형 모델(Thermal Nonequilibrium Model)을 사용하였으며, 압력방출밸브, 스프레이, 비례전열기, 그리고 보조전열기를 모델링하였다.

2차계통은 크게 증기발생기, 주급수 유로, 보조급수 유로, 주증기관, 터빈, 그리고 복수기로 구성되어 있다. 증기발생기 2차측 모델은 미국의 Wolf Creak 발전소의 안전성 분석 보고서 개정본에서와 같이 대부분의 Non-LOCA 사고에 대한 해석에서 채용하고 있는 단일 포화 체적으로 모사하였다.<sup>[12]</sup> 단일체적으로 모사함에 따라 재순환 유량은 고려하지 않았으며, 유로 단면적은 증기발생기 세관 영역의 단면적을 사용하였다. 증기발생기 수위는 2차측의 냉각수 재고량에 따라 수위를 계산하도록 모델링하였다. 주급수 계통은 증기발생기 수위, 증기유량, 및 급수유량에 의해서 수위조절이 이루어지도록 모사하였다. 보조급수 계통은 전동기구동 및 터빈구동 보조급수로 모사하여 사고시 작동 조건에 도달하면 복수저장탱크에서 저온의 2차냉각재가 공급되도록 하였다.

안전주입 계통은 1차계통 압력에 따라 사고시 주입유량이 결정되는 고압안전주입 계통과 계통 압력이 765 psia로 감소시 주입되는 안전주입탱크(Accumulator)로 구성하였다.

기타 주요 계통으로서 원자로 정지계통과 가압기 수위 및 압력 제어계통, 증기발생기 수위 제어계통, 증기덤프밸브 제어계통 등을 모델링하였다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 전출력 주증기관 소형파단사고(SG 1 주증기 격리밸브 전단 파단)

전출력 주증기관 소형파단사 PCT 해석에서는 터빈 정지 이전까지 터빈으로 가는 증기 유량은 정상운전 유량으로 유지되는 것으로 가정하였다. 반면, PTS 해석에서는 압력차에 의해 증기 유량이 결정되도록 터빈을 모사하였다. 이로 인해, PCT 관점의 해석에서는 그림-2(A)에서 보는 바와 같이 사고 초기 방출 증기량이 증가되어 터빈 정지 이전까지 거의 일정한 유량으로 방출이 이뤄진다. 증기 방출에 따른 원자로냉각재 온도 감소 및 주기말 반응도계수 사용에 따른 상대적으로

큰 정반응도 궤환(Feedback)으로 원자로 출력은 그림-2(B)에서 보는 바와 같이 원자로 출력이 증가하여 원자로 정지가 발생한다. 반면, PTS 해석에서는 그림-2(A)에서 보는 바와 같이 파단 순간에 방출 증기량이 증가한 후 터빈 충동단, 파단부위를 통한 대기와 주증기관 사이의 압력차에 의해 방출 증기량이 결정되므로 상대적으로 방출 증기량이 작은 상태로 안정된다. 또한, PTS 측면에서 보수적인 주기초 반응도 계수를 사용함으로써 냉각재 온도 감소에 의해 궤환되는 정반응도량이 작아서 그림-2(B)에서 보는 바와 같이 원자로 정지되지 않고, 새로운 출력상태로 안정된다.

그림-2(C)에서 보는 바와 같이 냉각재 평균온도 초기 조건이 서로 다른 원인은 PCT 관점의 해석에서는 원자로냉각재 유량을 최소 열적여유도 측면에서 보수적인 증기발생기 세관 관막음을 15%로 가정한 Thermal Design Flow (86,100 gpm/Loop)를 사용하지만, PTS 해석에서는 PTS 측면에서의 보수성을 고려하여 관막음을 0%로 가정한 Best Estimate Flow(97,100 gpm/Loop)를 사용하기 때문이다. 사고의 진행에 있어 그림-2(C), (D)에서 보는 바와 같이 PCT 관점의 해석에서는 방출 증기량 증가로 인해 원자로 정지 이전까지 원자로 냉각재 계통 압력, 온도가 서서히 감소된다. 이후, 원자로 정지에 따른 열출력 감소로 인해 온도, 압력이 급격히 감소된다. 반면, PTS 해석에서는 가압기 압력 제어 계통의 정상 동작으로 원자로 냉각재 계통 압력 변화는 거의 없다. 또한, 파단 순간에 방출 증기량이 증가한 후 터빈 충동단, 파단부위를 통한 대기와 주증기관사이의 압력차에 의해 방출 증기량이 결정되므로 정상운전 증기량보다 조금 큰 상태로 안정된다. 따라서, 원자로 출력의 상승에 따른 열생성량의 증가와 증기 방출에 의한 열제거량이 서로 상쇄되어 냉각재 평균온도는 조금 감소된 상태에서 안정된다.

### 3.2 고온 열출력 주증기관 대형파단사고(SG 1 주증기 격리밸브 전단 파단)

PCT 관점의 해석에서는 가압기를 최소 열적 여유도 측면에서 보수적인 상(Phase)간 열적 평형 모델(Thermal Equilibrium Model)로 모사한다. 반면, PTS 해석에서는 실제적인 가압기 거동을 모사하기 위해 열적 비평형 모델(Thermal Nonequilibrium Model)을 사용한다. 그림-3(A)에서 보는 바와 같이 PCT 관점의 해석에서는 사고 초기 방출 증기량 증가 및 고압안전주입에 의한 냉각재 온도 감소로 가압기내 증기가 급격히 응축되면서 상대적으로 압력이 크게 감소한다. 이후, 파단 유로의 방출 증기량 감소 및 건전 유로 주증기 격리밸브의 차단으로 압력이 안정된다. 반면, PTS 해석에서는 가압기를 상(Phase)간 열적 비평형 모델로 모사함으로써 PCT 관점의 해석에서와 같은 가압기내 증기의 급격한 응축 및 이에 따른 급격한 압력 감소는 발생하지 않는다. 사고 전반에 걸쳐 증기 방출 및 고압안전주입에 의한 냉각재 온도 감소로 압력 변화가 이뤄지므로 PCT 관점의 해석에 비해 압력 감소율이 상대적으로 작다.

또한, PCT 해석에서는 최소 열적여유도 관점에서 보수적인 주기말 반응도 계수 및 Worst Stuck Rod Worth를 제외한 정지여유도를 사용한다. 이에 따라, 그림-3(B)에서 보는 바와 같이 사고 초기 대량의 증기 방출에 따른 냉각재 온도 감소로 인한 정반응도 궤환으로 원자로 임계에 도달한다. 원자로 임계 도달에 따른 열생성량 증가와 증기 방출에 의한 냉각재 온도 감소가 서로 상쇄되어 사고 중반부에서 온도가 안정된다. 이후, 붕산주입탱크의 고붕산수(20,000ppm) 주입으로 원자료가 다시 미임계 상태로 유지되면서 지속적인 증기 방출로 냉각재 온도는 감소된다. 반면, PTS 해석에서는 PTS 측면에서 보수적인 주기초 반응도 계수 및 Worst Stuck Rod Worth를 포함한 정지여유도를 사용하므로 사고 기간중 원자로 임계에 도달하지 않는다. 이에 따라, 냉각재 온도

변화는 파단부위를 통한 증기 방출 및 저온의 안전주입수 공급에 의해 이루어지므로 상대적으로 일정한 온도 감소율을 보인다. 하지만, 그림-3(C)에서 보는 바와 같이 PCT 관점의 해석과 PTS 해석간의 상이한 방출량 계산 모델 사용에 따른 방출 증기량의 차이는 거의 없다. 이로 인해, 파단 증기발생기 증기 방출량이 유사하게 유지됨으로써 두 경우간의 냉각재 평균 온도 차이는 거의 없는 것으로 평가되었다.

그림-3(D)의 증기발생기 압력 변화를 보면, 주증기 격리밸브 차단이전까지 증기발생기 압력 변화는 해석 모델에 무관하게 유사한 거동을 보인다. 이 후, 주증기 격리밸브 차단신호 발생으로 PCT 관점의 해석에서는 주증기 격리밸브가 7초 지연 후 Step Close된다. 반면, PTS 해석에서는 2초 지연 후 5초 동안 Ramp Close된다. 이로 인해, PTS 해석에서는 PCT 관점의 해석과 비교하여 건전한 증기발생기로부터의 총 증기 방출량이 작아서 증기발생기 압력이 상대적으로 높게 유지된다.

#### 4. 결론

본 연구는 고리 1호기 원전 수명 연장을 위한 가압열충격 상세 해석 연구의 일환으로 주증기관 파단사고시 해석 방법론에 따른 열수력 거동의 상이점을 평가하였다.

해석 방법론 차이에 따른 상이한 입력변수 중 열수력 거동에 영향이 큰 인자는 전출력 주증기관 소형파단사고에 있어서는 터빈 모델링 및 반응도 계수이다. PCT 관점의 해석에서는 사고시 터빈으로 정상운전 유량이 형성되도록 모델링하고 주기말 반응도계수를 사용함으로써 냉각재 온도 감소에 의한 상대적으로 큰 정반응도 궤환으로 출력이 증가하여 원자로가 정지된다. 반면, PTS 해석에서는 압력차에 의해 유량이 형성되도록 터빈을 모델링함으로써 방출 증기량이 작고, PTS 측면에서 보수적인 주기초 반응도 계수를 사용함으로써 냉각재 온도 감소에 의해 궤환되는 정반응도량이 작아서 원자로는 정지되지 않고, 새로운 출력상태로 안정된다.

고온 영출력 대형파단사고 해석에서 열수력 거동에 영향이 큰 인자는 가압기 모델, 반응도계수 및 정지 여유도 모델링이다. PCT 관점의 해석에서는 가압기를 상간 열적 평형 모델로 모사함으로써 사고 초기 급격하게 압력이 감소된다. 반면, PTS 해석에서는 실제적인 가압기 거동을 모사하기 위해 열적 비평형 모델을 사용함으로써 완만한 압력 변화율이 나타난다. 또한, PCT 해석에서는 주기말 반응도 계수 및 Worst Stuck Rod를 제외한 정지여유도를 사용함으로써 사고시 재임계에 도달한다. 반면, PTS 해석에서는 PTS 측면에서 보수적인 주기초 반응도계수 및 Worst Stuck Rod를 포함한 정지여유도를 사용함으로써 사고 기간중 원자로는 재임계에 도달하지 않는 것으로 평가 되었다.

위에서 살펴본 바와 같이 해석 방법에 따라 열수력 거동이 현저한 차이를 보이는 것으로 평가 되었다. 향후, 사고 해석시 해석 목적에 따라 안전성을 기반에 두고 과도한 보수성을 배제함으로써 발전소 운전 여유도가 증대될 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] 고리 1호기 증기발생기 교체 안전성 분석 보고서, 한국전력공사, 1997
- [2] T. W. T. Burnett, C. J. McIntyre, J. C. Buker, LOFRAN Code Description, WCAP-7907, 1972
- [3] EPRI, RETRAN-3D-A Program for Transient Thermal Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems, NP-7450, 1996
- [4] Westinghouse Electric Corporation, Delta 60 Steam Generator Thermal and Hydraulic Design Data Report for Kori Nuclear Plant Unit 1, WNEP 9516, Rev. 1, 1996
- [5] 고리 1호기 최종안전성 분석보고서, 한국전력공사, 1993
- [6] 고리 1호기 천이 노심 안전성 분석 보고서, 한국전력공사, 1997
- [7] 고리 1호기 비상운전절차서, 한국전력공사, 1994

- [8] 고리 1호기 운전주의, 제한, 설정치, 개정 2, 한국전력공사, 1993
- [9] 고리 1호기 계통도, 한국전력공사, 1996
- [10] 고리 1호기 Functional Diagram, 한국전력공사, 1996
- [11] 고리 1호기 Block Diagram, 한국전력공사, 1996
- [12] L.J. Agee, Steam Line Break Methodologies, EPRI TR-100521, April 1992

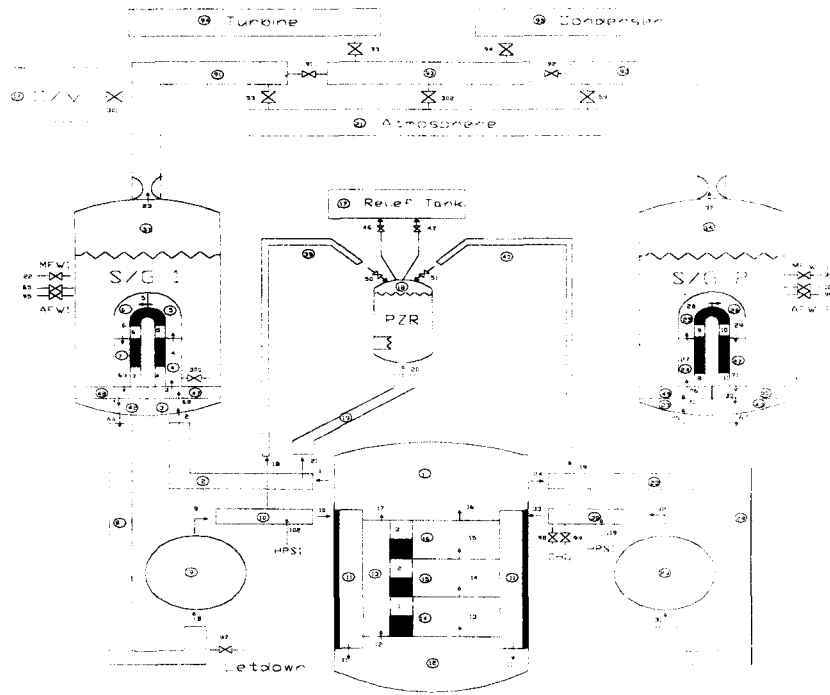


그림-1 고리 1호기 RETRAN-3D 계통 해석 모델

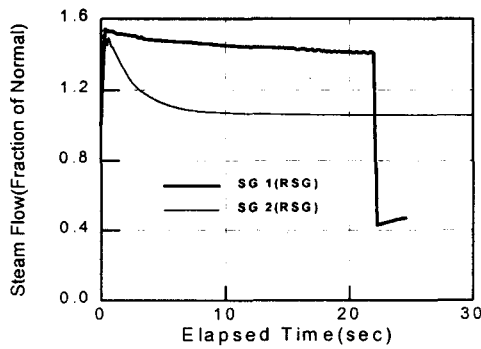


그림-2(A) 전출력 주증기관 소형파단사고 증기 유량

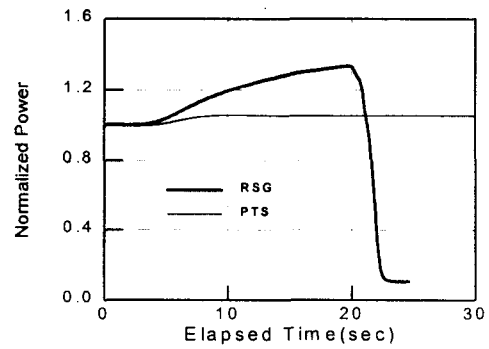


그림-2(B) 전출력 주증기관 소형파단사고 원자로 출력

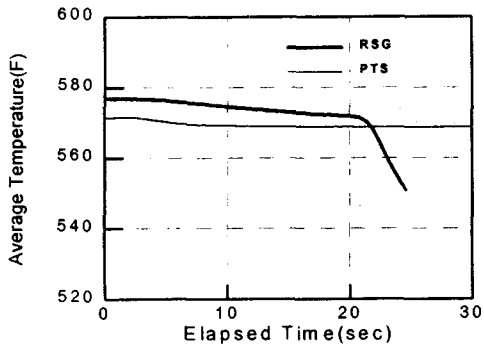


그림-2(C) 전출력 주증기관 소형파단사고  
평균온도

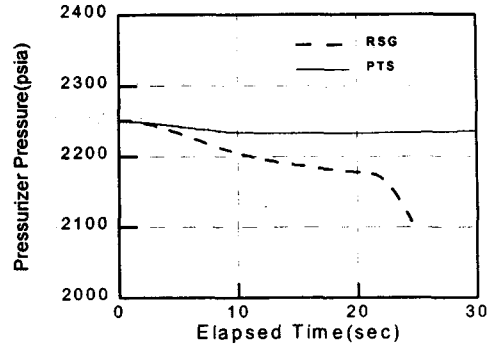


그림-2(D) 전출력 주증기관 소형파단사고  
가압기 압력

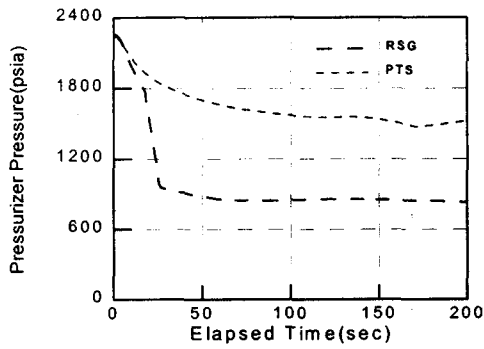


그림-3(A) 고온 영출력 주증기관  
대형파단사고 가압기 압력

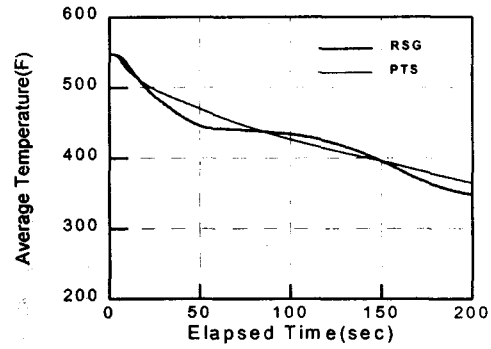


그림-3(B) 고온 영출력 주증기관  
대형파단사고 평균온도

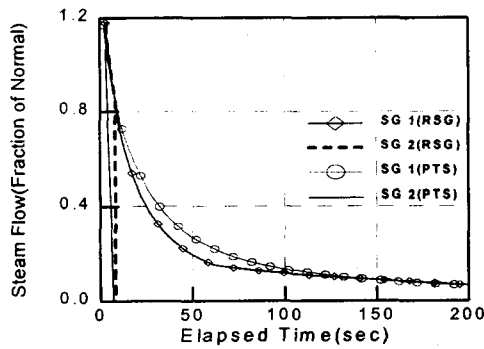


그림-3(C) 고온 영출력 주증기관  
대형파단사고 증기 유량

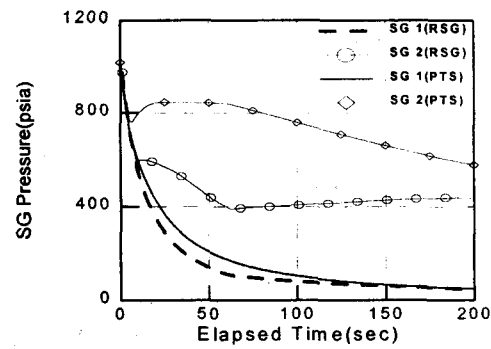


그림-3(D) 고온 영출력 주증기관  
대형파단사고 증기발생기 압력