

노심출구열전대 및 과냉각도계 적용성에 관한 연구  
A Study on the Application of Core Exit Thermocouple and  
Subcooled Margin Monitor

윤덕주\*, 이재용

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자로 냉각재 계통의 과냉각도를 계산하기 위한 계기로서 온도 및 압력계기가 있으며 온도계기는 고온관 광역 온도 측정기(Wide Range RTD) 및 노심 출구 열전대(CET)를 이용하여 계산할 수 있다. 고리3,4호기 및 영광1, 2호기의 경우 노심출구열전대는 지시장치인 소내 전산기의 전원이 비안전등급 전원으로부터 수전하여 사용이 배제되어 왔으나 TMI 후속조치로 안전등급의 지시장치를 MCR에 별도로 설치하므로 이러한 문제점이 해결되었다. 따라서 ERG에 과냉각도 계산 근거 계기로 표기되어 있는 노심출구열전대와 광역저항온도감지기 중에 비상운전 절차서에 적용할 수 있는 최적방안을 검토하고자한다. 또한 과냉각도를 계산하기 위해 현재 비상운전절차서는 온도와 압력을 읽은 후 포화냉각 곡선의 계산표를 활용하였으나 과냉각도계를 활용할 경우 이런 번거로움 없이 한눈에 바로 과냉각도를 읽고 다음단계로 넘어갈 수 있는 편리함이 있어 이러한 과냉각도계의 비상운전절차서 적용성을 검토하였다. 과냉각도는 CET에 근거한 값이 가장 보수적이며 그 다음은 과냉각도계(SMM)이고 광역 RTD에 근거한 과냉각도가 가장 큰 값을 나타내므로 덜 보수적이라는 것을 현장자료를 통해 알 수 있었다.

Abstract

In order to calculate the degrees of RCS subcooling, we use temperature detector and pressure gauge. The temperature can be inputted from Wide Range RTD and CET(Core exit thermocouple). We calculate the degrees of RCS subcooling from two parameter and P-T saturation curve. This process is inconvenient in performing the emergency operating procedure. So, If we use SMM(subcooled margin monitor) we can perform the procedure just by reading the amount without calculating the degrees of RCS subcooling. Also, in order to calculate the subcooled margin, The temperature inputs that can be used in the computation are RTD or CET in according to ERG(emergency response guideline). But we do use only the wide range RTD in EOP now. This paper evaluate the optimum methodology in the applicability of the wide range RTD and CET(core exit thermocouple) and the applicability of SMM(subcooled margin monitor).

1. 개요

원자력발전소 비상운전절차서를 수행함에 있어 과냉각도는 노심의 상태를 나타내는 중요한 변수

이다. 즉, RCS 과냉각도는 노심냉각이 적절히 유지되고 있는지 판단하기 위한 가장 직접적인 자료이다. 압력은 가압기 압력이나 RCS 광역범위 압력으로부터 입력될 수 있다. 계산에 허용되는 온도 입력은 RCS Hot Leg 온도, RCS Cold Leg 온도, Core Exit Thermocouple 온도가 있는데 고온부위 온도를 가장 잘 측정하고 루프의 정체에 영향을 받지 않기 때문에 Core Exit Thermocouple 온도를 ERG에서 주로 사용한다. 격납용기 비정상시에도 계산되어야 하며 더욱이 과냉각 불확실도는 압력이 감소할 때 증가한다. RCS 과냉각도 계측은 단일고장기준을 만족해야 한다. 원자로 냉각재 계통의 과냉각도를 계산하기 위한 운전변수로서 원자로냉각재온도 및 압력 계기가 있으며 이중 온도계기는 고온관 광역 온도 측정기(RTD) 및 노심 출구 열전대(CET)를 이용하여 계산할 수 있다. 고리3,4호기 및 영광1,2호기의 경우 노심출구열전대는 지시장치인 소내 전산기 CRT의 전원계통이 비안전등급 전원으로부터 수전 받았기 때문에 사용이 배제되어 왔으나 TMI 후속조치로 과냉각도 지시장치를 MCR에 안전등급으로 별도로 설치하므로 이러한 문제점이 해결되었다. 따라서 ERG(Emergency Response Guideline)에서 과냉각도 계산근거 계기로 표기되어 있는 노심 출구 열전대와 광역 RTD중 비상운전 절차서에 적용할 수 있는 최적방안을 검토하고자한다. 또한 과냉각도를 계산하기 위해 현재 비상운전절차는 온도와 압력을 읽은 후 포화냉각 곡선의 계산표를 활용하였으나 현재 설치된 과냉각도계를 활용할 경우 이런 번거로움 없이 한눈에 바로 과냉각도를 읽고 다음단계로 넘어갈 수 있는 편리함이 있어 이러한 과냉각도계의 비상운전절차서 적용방안을 검토하였다.

## 2. 코드 요건검토

우선 적용코드요건을 검토한다. 과냉각도 계산을 위해 사용되는 온도와 압력계측은 Reg. Guide 1.75(Physical Independence of Electric Systems)에 따라서 전기적, 물리적으로 독립된 두 채널로부터 공급되어야 하고 Class 1E 전원으로부터 수전 받아야 한다. REG GUIDE 1.97 내용 중 TYPE B 변수는 안전기능의 수행여부를 확인하기 위한 변수로서 CORE COOLING을 확인할 수 있는 변수로 원자로냉각재 고온관온도, 원자로 냉각재 저온관 온도, 원자로냉각재 압력, 노심출구 온도, 원자로 냉각재 재고량, 과냉각도 등이 있다. 변수 측정 항목 중 노심출구 온도계는 CATEGORY 3으로 되어있고 용도는 확인용으로만 쓰이며 CATEGORY 3의 경우 전원에 관한 특별한 규정내용이 없다. 따라서 원자로 냉각재 계통 과냉각도계(Subcooled Margin Monitor: SMM)는 확인 및 발전소 상태 평가를 위한 목적으로 설치된다. 여기서 과냉각도 계기는 CATEGORY 2로 구분되어 있으며 CATEGORY 2의 계기는 고 신뢰도의 전원을 필요로 하나 반드시 D/G등에 의해 공급되는 STAND-BY 전원을 받을 필요는 없으며, 전원공급이 차단되지 않는 배터리 등에 의하여 백업되어야 한다. 계측기가 최종적인 부적절한 노심냉각(ICC) 탐지계통의 일부분일 경우 NUREG-0737의 II.F.2에 명시되어 있는 실제 요구조건을 만족해야 한다. K TYPE의 THERMOCOUPLE이 사용될 경우 이 조건을 만족한 것으로 본다. 그래서 고리3,4 및 영광 1,2 호기에 설치된 노심출구열전대는 TYPE K이므로 이러한 요건을 만족한다.

표 1. TYPE B 변수의 분류

변수	범위	범주	목적
RCS 압력계	1 - 3000 Psig	1	기능감지, 사고완화, 확인, 장기감시
RCS 고,저온관 온도계	50 - 700°F	1	기능감지, 사고완화, 확인, 장기감시
Core Exit Temperature	200 - 2300°F	3	확인
과냉각도계	200°F Subcooling - 35°F Superheat	2	확인 및 상태분석

표 2. 변수의 분류

변수 유형	기능	변수
TYPE A 변수	자동제어가 이뤄지지 않는 경우와 설계기준 사고시 안전기능을 수행하기 위하여 요구되는 경우 운전원이 수동조치를 취할 수 있도록 제공되는 운전변수(안전기능의 직접 수행에 필요한 정보)	운전원 조치에 요구되는 변수
TYPE B 변수	안전기능의 수행여부를 확인할 수 있는 정보 즉, 반응도제어, 노심냉각(CET), RCS 건전성유지, 격납용기 건전성유지	핵계측기, 제어봉지시기, 보론농도, RCS 온도, 압력, CET, 냉각재 재고량, 과냉각도, 격납용기수위지시, 격납용기 압력,
TYPE C 변수	핵생성물질 장벽의 파손여부를 확인할 수 있는 변수로 핵연료 피복재(CET), 일차 압력경계, 격납용기가 있음	CET, 일차냉각재 방사능, 일차냉각재 감마선분석, RCS 압력, 격납용기 압력, 격납용기 수위, 격납용기 내부 방사선, 격납용기 수소농도, 격납용기 배출 방사선
TYPE D 변수	안전계통 개개의 운전여부를 확인하는 데에 필요한 변수로 사고완화를 안전관련계통을 이용하는데 필요한 변수임	RHR 유량, RHR 온도, 축압기 수위, 축압기 압력, 안전주입유량, 가압기 수위, 주급수 유량, 격납용기 살수유량, 보충수, 취출수 유량 등

표 3. TYPE C 변수의 분류

변수	범위	범주	목적
Core Exit Temperature	200 - 2300°F	1	파손탐지, 사고완화, 장기감시
RCS 압력계	1 - 3000 Psig	1	파손탐지, 사고완화, 장기감시

표 4. 범주별 적용 요건

항 목	Category 1 (광역RTD)	Category 2 (SMM)	Category 3 (CET)
Reg. Guide 1.89에 따른 1E 기기검증 및 내환경검증(NUREG-0588)	적용	적용	미적용
Reg. Guide 1.100에 따른 내진검증	적용	미적용	미적용
전기적 독립성, 물리적 격리, 다중화	적용	미적용	미적용
Standby Power로부터 수전	적용	미적용	미적용
무정전 전원(Battery)에 의한 백업	적용	적용	미적용
실시간 표시 및 기록장치	적용	각각의 표시장치 설치	

### 3. TMI 후속조치에 의한 설비개선

노심출구열전대 검출기로부터 JUNCTION BOX를 거쳐 소내전산기를 통하여 배전반 CRT에 지시되던 설비를 개선하여 COMPUTER I/O CARD 전단에서 JUMP하여 배전반에 DISPLAY 되도록 설비개선을 하였다. COMPUTER의 신뢰도 문제점이 해결되었으며 CATEGORY 2 전원요구 조건을 만족한다. DISPLAY용 전원을 안전등급의 전원으로부터 수전받음으로써 CATEGORY 1 전원요구 조건도 만족한다.

### 4. 비상운전절차서 검토

이것은 부적절한 원자로냉각 방지에 필요하다. 여러 개의 Thermocouple들은 Core내의 가장 높은 온도를 감지할 수 있는 지역에 위치해 있어야 하며 Hot Leg 가까운 부분에 위치해야한다. 측정범위는 LOCA 사고후 발전소 저온정지 조건에서부터 최대 원자로 온도까지를 측정해야하므로 일반적으로 100 °F ~ 2,200 °F이다. RCS 고온관 온도계가 노심출구온도계를 대신한다면 정체가되어 있지 않은 루프의 온도계만 측정온도자료로 활용되어야 한다. 증기발생기 세관 파열사고후 정체루프가 발생할 시 세관 파열에 의한 누설을 방지하기 위해 감압한 후 RCS 과냉각도 유지여부를 판단하기 위한 자료로 사용되어서는 안 된다. RCS 과냉각도는 노심냉각이 적절히 유지되고 있는지 판단하기 위한 가장 직접적인 자료이다. RCS 과냉각도 제한곡선을 작성하기 위해 Steam Table을 이용하여 Computer로 계산한다. 압력은 가압기 압력이나 RCS 광역범위 압력으로부터 입력될 수 있다. 계산에 사용될 수 있는 온도는 RCS Hot Leg 온도, RCS Cold Leg 온도, Core Exit Thermocouple 온도가 있는데 고온부위 온도를 가장 잘 측정하고 루프의 정체에 영향을 받지 않기 때문에 Core Exit Thermocouple 온도를 ERG에서 주로 사용한다. 격납용기 비정상시에도 계산되어야 하며 더욱이 과냉각 불확실도는 압력이 감소할 때 증가한다. RCS 과냉각도 계측은 단 일고장기준을 만족해야 한다. 즉, 과냉각도 계산을 위해 사용되는 온도와 압력계측은 전기적, 물리적으로 독립된 두 채널로부터 공급되어야 하고 Class 1E 전원으로부터 수전 받아야 한다. 노심출구온도계가 과냉각 계산에 이용된다면 노심고온부위의 온도를 계측하는 값을 입력으로 선택해야한다. 적어도 5개 이상의 노심출구온도의 평균치를 온도로 이용해야 하며 그중 하나는 노심 중앙에 위치해야한다. 다른 4개 온도계는 노심 각 사분면의 가장 높은 핵연료집합체에 분포해야한다. 낮은 온도를 계측할 수 있는 외각 핵연료 집합체는 배제되어야한다. 가장 높은 온도부위의 핵연료집합체를 미리 결정하여 여러 노심출구 온도계중 어느 부위 온도계를 이용할 것인지 결정해야한다. 이렇게 미리 여러 노심출구온도계중 어느 온도계를 사용할 것인지 결정하여 놓음으로써 여러 온도계를 관리해야하는 운전원이 일으킬지도 모르는 실수가능성을 줄일 수 있다. SPDS와 같이 여러 노심출구온도계를 제어하여 그중 5개의 최고온의 온도를 선택할 수 있는 시스템이 있다면 이를 이용할 수 있을 것이다. 광역 고온관 온도계(RTD)를 노심출구온도계 대신 이용한다면 정체루프는 이용하지 않아야 한다.

### 5. 발전소 설치 현황

웨스팅하우스형 발전소 중 고리1호기는 과냉각도계 설치계획 없으며 고리2호기는 과냉각도계(Subcooled Margin Monitor, SMM)가 계열별 2개 SMM가 설치예정이며 CET 및 광역 RTD를 이용한 과냉각도 계산한다. 여기서 CET는 가장 높은 온도 5개를 선택하여 평균치를 기준으로 계산하며 RTD는 3개 루프 중에서 가장 높은 온도를 선택하여 계산하게된다. 고리3,4호기 및 영광 1,2호기는 과냉각도계(Subcooled Margin Monitor)가 계열별 1개 SMM가 설치되어 있으며 광역 RTD를 이용하여 과냉각도를 계산한다. RTD는 3개 루프 중에서 가장 높은 온도를 선택하며

CET는 입력으로 사용하지 않는다. 이는 '88년 과냉각도계 설치 당시 CET Display 설비가 없었으므로 요건을 충족하지 못하였다.

표 5. 노심출구온도계 및 과냉각도계 설치현황

	CET 총수량	CET Display 수량	과냉각도계	
고리1호기	39개	2 Train×10=20	미설치	
고리2호기	26개	2 Train×10=20	추진중 (CET,광역 RTD)	
고리3,4호기	39개	2 Train×12=24	기설치 (광역 RTD)	
영광1,2호기	39개	2 Train×10=20	기설치 (광역 RTD)	

표 6. 계기 불확실도 비교

	CET		광역 RTD	
	CV 정상시	CV 비정상시	CV 정상시	CV 비정상시
고리1호기	<700°F이하> -1.2% ~2.2%	<700°F이하> -1.9% ~3.8%	-2.6% ~2.6% -10°C ~10°C	-4.1% ~2.6% -15.7°C ~10°C
고리2호기	-4.6°C ~8.5°C	-7.5°C ~14.9°C	-3.1% ~3.1% -12°C ~12°C	-4.6% ~3.1% -17.8°C ~12°C
고리3,4호기	<700°F이상> -0.8% ~2.1%	<700°F이상> -1.2% ~3.0%	-3.6% ~3.6% -14°C ~14°C	-3.6% ~3.6% -14°C ~14°C
영광1,2호기	-5.3°C ~14°C	-8°C ~20°C		

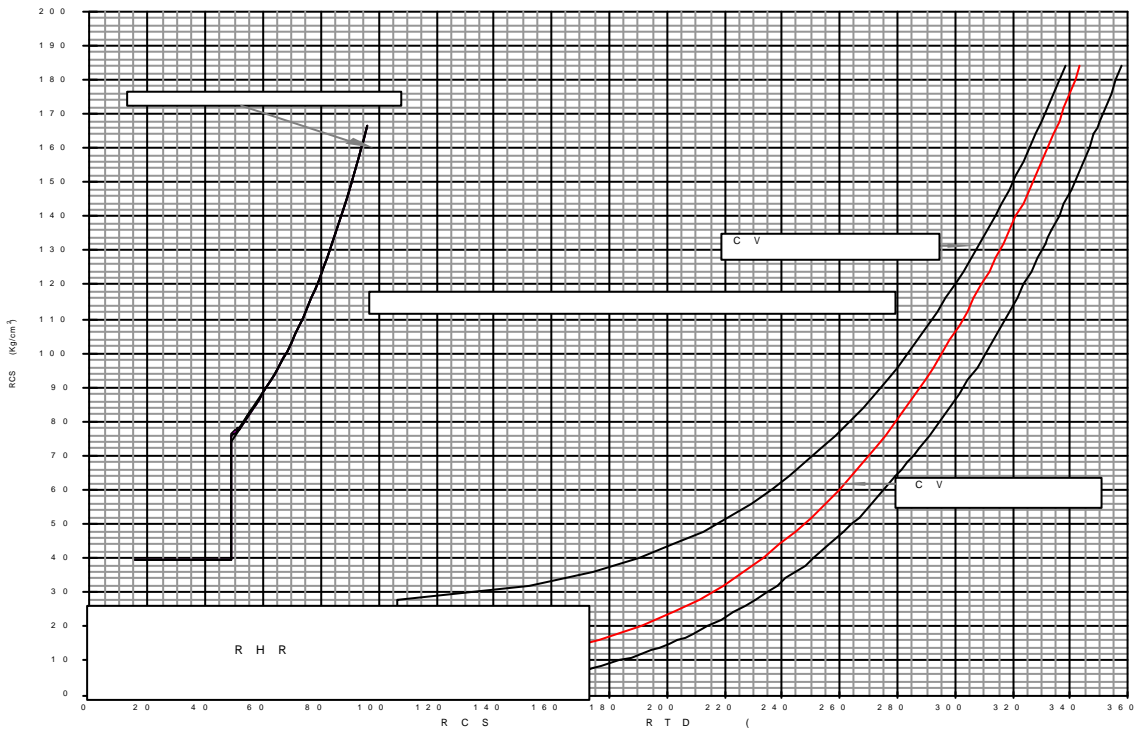


그림 1 불확실도를 고려한 과냉각 운전 제한곡선

## 6. 적용성 검토결과

TYPE B 변수중 하나인 CORE COOLING을 확인하기 위한 계기로써 노심출구 열전대는 노심출구 온도계, 과냉각도 계기의 CATEGORY 3.2 요구조건을 만족한다. TYPE C 변수 (분열 생성물의 방출을 방지하기 위한 방호벽의 손상 가능성을 지시하는 변수)의 하나인 FUEL CLADDING의 건전성을 확인하기 위한 계기는 노심출구 온도계, 방사능농도 또는 1차 냉각재중의 방사선 준위, 1차냉각재의 감마 스펙트럼분석 등이 있다. 이중 노심출구 온도계는 CATEGORY 1으로 되어 있어서 전원을 STAND BY POWER를 공급해야 하나 노심출구 열전대 REFERENCE JUNCTION BOX의 가열기 전원이 비안전등급으로부터 공급되어 불만족한다. 그러나 노심출구열전대 이외의 온도계기는 나타나 있지 않으며 측정범위(200-2,300°F)를 대신할 계측기가 없다. 불확실도는 광역 고온관 RTD가 최대 17.8℃인데 반해 노심출구열전대가 최대 20℃로서 조금 더 크다. 현재 운전중인 데이터를 분석해보면 노심출구열전대가 노심의 중앙의 높은 온도를 계측함으로써 광역 고온관 RTD 보다 조금 더 높은 값을 지시하고 있으나 평균값을 비교하면 비슷하다. 현재 설치된 고리3,4 호기 및 영광1,2호기의 과냉각도계(Subcooled Margin Monitor)는 광역 RTD를 근거로 하여 계산하며 수계산 결과보다 약 8℃ 낮은 값을 지시하여 보수적으로 계산되고 있다. 그러나 이러한 과냉각도는 최고온의 노심출구온도계(CET)에 근거한 과냉각도보다는 높은 값이다. 과냉각도는 CET에 근거한 값이 가장 보수적이며 그 다음은 과냉각도계(SMM)이고 광역 RTD에 근거한 과냉각도가 가장 큰 값을 나타내므로 덜 보수적이라는 것을 알 수 있었다.

## 7. 결론

노심출구 열전대의 비상운전 절차서 사용 가능성을 검토한 결과 TYPE B의 노심냉각 변수중 노심출구 온도계, 과냉각도 계기의 요구조건을 만족하고 가장 보수적인 결과를 나타내고 있으므로 비상운전절차서에 적용할 수 있다. 그러나 노심출구온도계는 불확실도가 상대적으로 높기 때문에 현행과 같이 고온관 광역 RTD를 사용하는 것이 바람직하다. TYPE C의 핵연료피복재 건전성 변수중 노심출구 온도계의 CATEGORY 1조건을 만족시키기 위하여 JUNCTION BOX의 HEATER 전원을 STAND BY POWER로 바꾸는 작업이 필요하다. 현재의 비상운전절차서에서는 과냉각도를 계산하기 위해 광역RTD의 온도와 광역 RCS 압력계를 활용하여 불확실도를 고려한 과냉각곡선의 포화온도와 비교함으로써 과냉각도를 산출하고 있다. 이러한 불편함을 해소할 수 있는 것이 바로 과냉각도계를 사용하는 것이나 현재의 과냉각도계는 불확실도를 고려하지 않았으므로 불확실도를 고려하려면 설비 개선이 뒤따라야 하므로 적용치 않는 것이 바람직하다. 또한 과냉각도계를 읽은 다음 불확실도만큼 감해주는 방법도 있으나 이 또한 압력에 따라 불확실도가 달라 지므로 압력을 읽은 후 계산된 도표에 따라 감해줘야 함으로 또한 불편하다. 그래서 현재와 같이 온도와 압력을 읽은 후 과냉각곡선을 활용함이 바람직하다. 그리고 과냉각도계는 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

## Reference

1. Reg. Guide 1.97, "Instrumentation for Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants To Assess Plant and Environs Conditions During and Following an Accident", Revision 2, published 12/1979, US NRC

2. Reg. Guide 1.75 Physical Independence of Electric Systems, 09/1978, US NRC
3. Westinghouse Owner's Group, "Emergency Response Guideline" Revision 1C, HP Version 1996
4. Westinghouse Owner's Group, "Emergency Response Guideline" Revision 1C, LP Version 1996
5. 고리3,4호기 비상운전절차서 고유기술배경서
6. 고리3,4호기 비상운전절차서
7. 영광1,2호기 비상운전절차서 고유기술배경서
8. 영광1,2호기 비상운전절차서