

2001 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

WH형 원전 사고해석을 위한 RETRAN 반응도 모델링

The RETRAN Reactivity Modeling For Westinghouse Nuclear Plant Analysis

양 창근, 성 병욱, 김 요한

한전전력연구원(KEPRI)

대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

RETRAN 코드를 이용한 웨스팅하우스형 원전의 사고해석에서, 기존에 사용한 반응도 관련 모델을 개선하여 ANS Condition II 사고인 출력운전중 제어봉 인출사고와 정상급수상실사고를 분석하였다. 개선한 반응도 모델링은 OT Δ T, OP Δ T, 반응도 궤환효과를 다루었으며, 개선한 모델링을 이용한 RETRAN 사고분석의 검증을 위하여 FSAR 15장의 사고해석 결과와 비교하였다.

Abstract

RETRAN reactivity model for design basis analyses for Westinghouse NPP using RETRAN was developed and the analyses were performed for RWAP and loss of normal feedwater accidents. New reactivity model includes OT Δ T, OP Δ T and reactivity feedback effect. The results of analyses using new model were compared with the FSAR ch.15 which had been prepared with the vendor methodology. A result of this work showed the similar results of the FSAR .

1. 서론

현재 원전 안전해석을 위해 국내 원전 운영자, 설계사 및 원전 연료공급사 등에서는 주로 원전 또는 원전연료 설계공급사의 전산 코드와 해석 방법론을 사용하고 있다. 그러나 국내에서는 아직 안전해석 방법론을 체계적으로 개발한 경험이 부족하기 때문에 이미 개발되어 사용중인 방법론을 활용하는 기술은 상당한 수준에 올라와 있지만, 그 방법론

배경에 대한 충분한 이해가 미약한 상태이다. 그러므로 전력연구원에서는 과학기술부지원으로 수행중인 “원전주기적 안전성 평가기술개발 - 원전 운전과도해석 및 신안전해석 개발” 과제의 일환으로 설계 공급사 방법론과 RASP를 바탕으로 최신기술과 기준이 반영된, 최적평가용 전산코드를 이용한 새로운 독자적인 방법론을 개발하고 있다.

본 연구에서는 주기적 안전성 평가의 적용이라는 필요성을 반영하여 우선 WH형 원전을 대상으로 사고해석 방법론을 개발하고 있으며 본 논문에서는 영광 1, 2호기를 대상으로 미국전력연구소(EPRI)에서 개발한 경수로형 원전 거동 및 안전해석용 전산코드인 RETRAN을 이용하여 반응도 및 출력 분포 이상을 일으킬 수 있는 사고들 중에 출력중 제어되지 않은 제어봉 고장 인출사고와 정상급수상실 사고에 대하여 반응도 모델링을 개선하여 분석하였다.

2. 사고개요

2.1 출력운전중 제어봉 인출사고

제어봉 집합체(CRA) 인출사고는 출력의 폭주를 초래하는 CRA인출에 의해서 원자로 노심으로의 제어되지 않은 반응도의 첨가로 정의되며 이러한 과도 상태는 원자로 제어시스템의 고장 또는 제어봉 시스템의 고장에 의해 일어날 수 있다. 사고를 해석함에 있어 WH형 원전의 안전성 평가 기준은 최소 DNBR은 상관식을 이용하여 설정한 설계제한 보다 작아야 하며, RCS 압력은 규제요건의 압력 제한을 넘지 말아야 한다. 또한 첨두선형 열증가율은 핵연료 온도가 UO₂ 용융점 온도 이하가 되도록 제한시킨다.

출력 운전 조건에서 운전중 제어되지 않은 CRA 인출사고는 노심 열속의 증가를 가져온다. heat extraction은 노심 출력의 생산에 뒤이은 증기발생기의 지연에서부터 증기발생기의 압력이 방출밸브 또는 안전밸브 설정치에 도달할 때까지이므로 결국 원자로 냉각재 온도의 순 증가(net increase)가 있게 된다. 만약에 수동이나 자동으로 어떤 조치가 취해지지 않을 경우 출력의 불일치와 냉각재 온도의 상승으로 결국엔 DNB를 일으킬 수 있다. 그러므로 핵연료의 손상을 방지하기 위해 원자로 보호시스템은 DNBR이 한계 설정치 보다 아래로 떨어지기 전에 과도상태를 종결시키기 위해 설계되어야 한다.

2.2 정상급수상실

펌프고장, 밸브 오작동, 및 소외전원 상실에 의한 정상급수상실로 인해 노심 생성열을 제거하는 2차시스템의 능력이 감소하게 된다. 만약 발전소에 대체 급수가 공급되지 않으면, 노심 정지 후 잔열은 1차시스템 냉각재를 가열하여 1차시스템의 냉각재가 방출될 수도 있고, 이는 원자로 냉각계통에서 냉각재가 근본적으로 상실됨을 의미한다. 그러나 증기발생기의 열전달 용량이 감소 전에 발전소가 정지되기 때문에, 1차시스템 변수들은 결코 핵비등이탈(DNB)상태까지 이르지 않는다. 가장 최악의 정상급수상실 사고는 소외전원상실에 의해 시작되는 사고

이다. 이는 냉각재 펌프의 감속에 의해 노심 잔열제거 능력이 저하되기 때문이다.

주급수 펌프고장과 밸브 오작동이 발생했을 때 정상급수상실로 인해 다음사건이 발생한다.

- 정지 후, 증기계통 압력이 상승하면 증기발생기 방출 및 안전밸브가 자동으로 개방된다.
- 무부하 온도에 접근하면 증기 발생기 방출 및 안전밸브를 통해 잔열을 제거하고 발전소는 고온정지상태를 유지한다.

3. 반응도 모델링

3.1 ΔT 모델링

원자로 보호계통 운전변수의 선정시에는 원자로 보호계통의 공통 원인 고장에 대비하기 위하여 다양한 설계개념을 고려하여야 한다. 일반적으로 원자로 보호기능의 다양화를 추구하기 위한 기본 설계개념은 예상되는 특정 사고조건을 감지하기 위한 서로 다른 운전변수를 채택함으로써, 단일 원자로 보호변수의 공통원인 고장시에도 원자로 보호 조치가 원활히 수행될 수 있도록 하는 것이다. WH형 국내 원전 설계의 경우 원자로를 비상 정지시키기 위한 보호계통 운전변수가 여러 가지 있지만 본 논문에서는 핵연료 반응도 증가/감소에 의한 원자로 정지 신호와 핵연료 과잉 온도/과잉 출력 발생에 의한 원자로 정지 신호에 대하여 모델링 하였다.

가. 핵연료 반응도 증가/감소에 의한 원자로정지

- 출력영역 고중자속 트립(Power range high neutron flux trip)

출력 영역 고중자속 트립 회로는 4개의 출력영역 채널 중 2개 채널의 출력신호가 사전에 설정된 기준값을 초과 할 때 원자로를 트립시키는 것으로 설계 목적은 원자로 과출력에 의한 노심 손상을 방지하기 위한 것이므로 어떠한 경우에도 신호차단이 허용되지 않는다.

- 중간영역 고중성자속 트립(Intermediate range high neutron flux trip)

2개의 중간영역 채널 중 하나가 트립 설정값을 넘을 때 중간영역 고중성자속 트립 회로가 원자로를 트립시킨다. 중간영역 고중성자속 트립의 설계목적은 원자로 기동시에 노심 보호기능을 제공하기 위한 것으로 4개의 출력영역 채널 중 32개가 10% 출력(P-10)을 넘게 되면 수동으로 차단할 수 있다.

- 선원영역 고중성자속 트립(Source range high neutron flux trip)

2개의 선원영역 채널 중 하나가 트립 설정값을 넘을 때 선원영역 고중성자속 트립 회로가 원자로를 트립시킨다. 선원영역 고중성자속 트립의 기능은 원자로 기동시와 발전소 정지(shutdown)시에 노심 보호기능을 제공하기 위한 것으로 2개의 중간영역 채널 중 1개가 P-6 설정값 이하로 감소하게 되면 자동적으로 회복된다. 또한

이 트립 기능은 출력영역 보호연동장치(P-10)로부터의 4개의 논리중 2개에 의해서 자동적으로 우회될 수 있으며 P-10 아래에서 제어판에 있는 2개의 스위치의 수동 기능을 요구하는 행정적인 조치에 의해서 회복될 수도 있다. 각 스위치는 2개의 보호 논리 트레인 중 하나에서 트립 기능을 회복시키게 된다.

- 출력영역 중성자속 고증가율트립(Power range high positive neutron flux rate trip)
이 회로는 4개의 출력영역 채널 중 2개에서 비정상적으로 출력증가율이 커질 때 원자로를 트립 시킨다. 출력영역 고중성자속 고속 증가율 트립의 기능은 원자로 저출력 운전시 제어봉 인출 사고를 막기 위한 것으로 노심 핵연료의 DNB 조건이 발생되면 자동 기동된다.
- 출력영역 중성자속 고감소율 트립(Power range high negative neutron flux rate trip)
이 회로는 4개의 출력영역 채널 중 2개에서 비정상적으로 출력 감소율이 커질 때 원자로를 트립시킨다. 출력영역 중성자속 고감소율 트립의 기능은 2개 이상의 제어봉 낙하 사고를 감지하기 위한 것으로 국부 노심 손상을 방지하기 위한 것으로 단일 제어봉의 낙하 사고시에는 작동되지 않는다.

나. 핵연료 과잉 온도/과잉 출력 발생에 의한 원자로정지

- 과잉온도 ΔT (Over Temp. ΔT)
과잉온도 ΔT 는 핵비등이탈(DNB) 조건으로부터 노심을 보호하기 위하여 원자로의 출력, 냉각재 온도, 압력, 노심출력편차에 따라 설정치가 변하는 원자로 정지신호이다. 고리 3, 4 영광 1, 2호기(3 Loop)에서는 한 루프당 온도측정기 한 다발(set)이, 고리 1, 2호기(2 Loop)에서는 한 루프당 2 다발(set)이 동시에 원자로를 트립시키게 한다. OT ΔT 원자로 정지신호는 압력, 출력, 냉각재 온도 및 축방향 중성자속 분포의 조합으로 핵비등 이탈로부터 노심을 보호한다. OT ΔT 원자로 정지신호 설정치는 온도에 따른 물의 밀도 및 열용량 변화와 노심으로부터 유로 온도측정기까지의 배관지연에 대한 동적보상을 포함하고 있다. Tavg, 가압기 압력, 그리고 핵계측 설비의 중성자속 편파 신호로부터 구해진 설정값과 ΔT 신호를 비교하므로써 운전의 지속여부 또는 보호조치를 결정하게 된다.

OT ΔT 설정치 수식은 다음과 같다.

$$\Delta T_{sp} = \Delta T_0 \left[K_1 - K_2 \left(\frac{1 + \tau_1 s}{1 + \tau_2 s} \right) \left\{ \left(\frac{1}{1 + \tau_4 s} \right) T - T_r \right\} + K_3 (P - P_r) - f_1 (\Delta q) \right]$$

여기서

ΔT_0 = 정격 출력에서의 ΔT

T = 평균온도, Tavg

T_r = 정격 출력에서의 평균온도(Tavg,ref, 588.5 °F)

P = 가압기 압력 [psig]

Pr = 정격출력에서의 가압기 압력(Pref, 2235 psig)

운전중 Tavg가 높거나 증가되고 있으면, 또는 압력이 낮거나 Δq가 정상범위 밖에 있으면 이 설정치는 떨어진다. P-8(출력 30%) 아래에서 1개의 원자로 냉각재 유로가 운전되지 않은 상태에서의 출력운전은 원자로 보호계통 설정치 수정이 요구되지 않는데 그것은 P-8 설정치와 관련한 원자로 비상정지가 OTΔT 설정치와 관계없이 2유로 운전중 핵비등 이탈을 방지할 수 있기 때문이다.

중성자속 편차(Δq)로부터 OTΔT 회로로부터 입력은 축방향 침투가 설계값을 벗어난 경우 더 커져서 OTΔT 비상정지 설정치를 감소시킨다. 이것은 노심의 일부가 노심평균 출력(ΔT)가 지시하는 것보다 근본적으로 핵비등이탈에 접근하고 있음을 나타내는 것이다.

- 과잉출력 ΔT(OPΔT : Overpower ΔT) : 2/3 논리

과잉출력 ΔT(OPΔT)는 과잉출력 조건으로부터 노심을 보호하기 위하여 설계된, 연속적으로 계산되는 원자로정지신호이다. 고리 3, 4호기와 영광 1, 2호기(3 Loop)에서는 한 루프당 온도측정기 한 set이, 그리고 고리 1, 2호기(2 loop)에서는 한 루프당 2 set이 동시에 원자로를 트립시키게 된다. 과잉출력 ΔT원자로 정지로 과잉출력 조건으로부터 연료 펠렛의 건전성을 보증하고 OTΔT 보호에 대한 요구되는 범위를 제한하고 중성자속에 의한 고중성자속 원자로 정지신호를 보조하여 준다.

OPΔT 원자로 설정치 수식은 다음과 같다.

$$\Delta T_{sp} = \Delta T_o \left[K_4 - K_5 \left(\frac{\tau_3 S}{1 + \tau_3 S} \right) \left(\frac{1}{1 + \tau_4 S} \right) T - K_6 \left\{ \left(\frac{1}{1 + \tau_4 S} \right) T - T' \right\} - f_2(\Delta q) \right]$$

ΔT_o = 정격출력에서의 ΔT

T = 평균온도, T_{avg}

T' = 정격출력에서의 평균온도(T_{avg, ref}, 588.5 °F)

3.2 반응도 궤환효과 모델링

일차계통에서는 출력 변화가 발생하면 감속재온도와 핵연료온도 변화에 의해 반응도 궤환효과가 발생한다. 이 중에서 핵연료 온도 변화에 의한 반응도 변화는 감속재에 의한 반응도 변화 보다 더 빠른 영향을 미치게 된다. 이것은 핵연료에서 생성된 열 출력 변화가 감속재온도를 변화시키는데 시간이 소요되기 때문이다. 감속재온도변화는 감속재 밀도에 영향을 주어 냉각재온도가 증가하면 감속재의 밀도가 감소하여 반응도는 감소하게 된다. 또한 핵연료온도가 증가하면 도플러효과에 의해서 반응도가 감소한다. 사고해석 코드인 LOFTRAN과

RETRAN은 반응도궤환효과에 대한 입력값이 다르고 사용되는 반응도함수도 차이가 있다.

반응도 궤환효과와 관계된 두 코드의 반응도 함수를 고려하여 LOFTRAN 코드에서 사용한 입력자료를 RETRAN코드에서 사용할 수 있도록 입력자료를 다시 계산해야 한다. 따라서 LOFTRAN 코드에서 사용된 반응도 궤환효과 인자인 감속재 온도계수, Power Defect, 그리고 ATF 보정계수 대한 실제 입력 자료를 이용하여 RETRAN 코드용 입력 자료로 전환한다.

코드에 사용된 자료는 영광 1&2호기에 사용된 입력자료이고 이와 관련된 반응도 궤환효과 자료는 표2에 나타나 있다.

3.3 감속재 온도계수 모델링

감속재 온도 계수는 냉각재의 온도가 변할 때 반응도 변화를 나타낸다. LOFTRAN 코드에서 사용되는 입력자료는 냉각재 온도에 대한 밀도와 이 밀도에 해당되는 감속재 밀도계수이다. 그러나 RETRAN코드에서는 표3과 같이 LOFTRAN코드의 입력 양식이 다르다. 따라서 반응도 모델링에서는 RETRAN 코드에 이 값을 적용하기 위해 계산방식을 유도하고 이에 해당하는 RETRAN 입력문도 작성한다. RETRAN 코드 입력문은 70번 카드를 이용하여 계산한다.

반응도 모델링에서 사용하는 입력값을 이용하여 반응도를 계산하기 위해서는 $\Delta \rho$ 값을 구해야 한다. 이 밀도차는 계통내에서 시간의 함수로 변하는 각 온도와 밀도에 따라 다른 값을 나타내기 때문에 RETRAN 코드의 70번 카드를 이용하여 계산을 한다. $\Delta \rho$ 값을 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$\rho_1 \rightarrow T_1 \begin{array}{l} \nearrow +10^\circ\text{F} \rightarrow T_{1-1} \rightarrow \rho_{1-1} \searrow \\ \searrow -10^\circ\text{F} \rightarrow T_{1-2} \rightarrow \rho_{1-2} \nearrow \end{array} \Delta \rho_1$$

계통내 밀도 ρ_1 이 결정되면 온도 T_1 이 구해지고 이 온도에서 $\pm 10^\circ\text{F}$ 를 계산하여 T_{1-1} 과 T_{1-2} 를 얻는다. 이 온도를 다시 밀도로 바꾸어 $\Delta \rho$ 값을 구한다. 이때 밀도와 온도에 대한 상관관계는 계통내 압력(=2250psia)을 기준으로 ASME Stean Table 이용하여 구할 수 있지만, RETRAN 코드에서 직접 계산하기 위해 Fitting 함수를 구하여 RETRAN 입력문에 적용한다. $\Delta \rho$ 값을 구할 때 T_1 에 대해서 $\pm 10^\circ\text{F}$ 를 고려하는 것은 LOFTRAN 코드 입력문에서 각 밀도(ROCW)에 대한 감속재 밀도계수(AROCW)를 구할 때 ΔT 를 특정 온도에서 20°F 로 고려되었기 때문에 $\pm 10^\circ\text{F}$ 로 계산한다.

밀도와 온도에 대한 Fitting 함수는 표4와 같다.

반응도 모델링에서 RETRAN코드에서 사용되는 반응도 입력자료는 다음 표5와 같다. 이 값은 12번 카드에서 사용되고 최대 반응도 궤환효과와 최소반응도 궤환효과로 나누어서 고

려된다.

3.4 Power Defect 모델링

LOFTRAN 코드에서는 출력에 대한 반응도 함수로 DKQ 변수를 사용한다. 이 값은 각 출력에 대한 반응도 변화값(Δk)으로 RETRAN 코드에 사용하기 위해서는 지발 중성자분율(β)로 나눈 값을 사용한다.

3.5 ATF 보정계수

ATF 보정계수는 일정한 출력에서 냉각재 온도변화에 의한 핵연료온도변화로 발생하는 도플러효과를 나타낸다. 그리고 ATF 보정계수는 도플러 상수 값을 사용한다. 반응도 단위를 전환하고 지발 중성자분율로 나눈 값을 이용하여 RETRAN 코드에 사용할 수 있도록 한다.

4. 계통 모델링

본 연구에서 대상으로 하는 영광 1, 2호기를 적절히 나타내기 위해 67개의 제어체적, 104개의 junction으로 모델링 하였으며, 노심 설계 자료를 바탕으로 원자로를 3개의 제어체적으로 나타내었다.

감속재 온도계수, 도플러 계수, 지발중성자 분율, 중성자 주기 등은 최소 및 최대 반응도에 대해 각각 modeling 하였으며 Point Kinetics 모델을 사용하였다. 사용된 모델에 따른 계통 분할도는 그림 9와 같다.

5. 주요 가정 및 계산 방법

5.1 출력중 제어봉 인출사고

본 연구의 적용 대상호기인 영광 1, 2호기의 FSAR을 참조하여 초기조건과 가정을 설정하였다. 이때 사용된 초기 조건들은 표 1에 나타나있다. 초기조건들은 FSAR에 나타난 결과와 비교하기 위해 비슷한 조건을 사용하여 수행하였으며 본 사고는 P7 연동신호가 해지되는 10%부터 100% 까지의 출력범위와 1 pcm/sec ~ 75 pcm/sec의 반응도 범위에 대하여 분석하였다. FSAR에 나타나 있는 75pcm과 1pcm의 그림과 비교하기 위하여 RETRAN 코드로 분석한 그림을 서로 비교하였으며, 그 사이에 있는 반응도 삼입 값은 초기 트립신호가 어떤 신호로 초기화 되는지 검토 하였다.

5.2 정상급수 상실사고

정상급수상실 사고에서 사용되는 주요 변수의 공칭값은 표8과 같다

정상급수상실 과도상태에 사용된 초기가정은 다음과 같다.

- 발전소는 초기에 공학적 안전설비 설계 정격의 102%출력으로 운전하고 있다.
- 보수적인 잔열 생성율을 가정한다. 이것은 정지가 되기 전에 초기 출력수준에서 장기간 운전한 것을 근거한 것이다.
- 원자로 정지는 증기발생기 저-저 수위에 의해 정지된다.
- 보조급수계통에서 터빈구동 보조급수펌프가 고장나는 가장 심각한 단일사고가 발생한다. 보수적으로 모터구동 보조급수펌프는 1대만 작동된다고 가정하고, 이 펌프에서 3대의 증기발생기에 급수를 한다.
- 가압기의 분무계통과 방출밸브는 작동한다고 가정하고 이들 제어계통이 작동하지 않을 경우 가압기 안전밸브에 의해 1차계통 압력을 유지된다.
- 증기발생기 안전밸브를 의해서 2차계통 증기가 방출된다.
- 초기 원자로 평균온도는 정격치보다 4°F 높고, 압력은 정격치보다 30psi 높다.
- 초기 가압기수위는 정격치보다 7.5% 높다.

6. 계산 결과

6.1 출력중 제어봉 인출사고

전출력 운전중의 제어봉 인출 사고에 대하여 75 pcm/sec의 반응도가 삽입되었을 때와 1 pcm/sec의 반응도가 삽입되었을 때의 계산결과를 분석하였으며 대상호기인 영광 1, 2호기의 FSAR과 비교를 하여 그 결과를 그림 4 ~ 11에 나타내었다.

압력관점에서 영광 1, 2호기의 FSAR과 비교를 한 결과, 75 pcm/sec의 반응도가 삽입되었다고 가정하였을 때 전체적으로 비슷한 경향을 보였다, 특히 DNBR의 경우 FSAR의 경우와 같이 WRB-2를 사용한 THINC 코드 결과를 이용하여, RETRAN에서 사용하였기 때문에 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었으며 수치적으로 약간 차이가 있는 것은 RETRAN으로 계산할 때 세운 가정이 좀더 보수적이기 때문에 결과가 FSAR과 비교하였을 때 좀 더 보수적인 결과를 얻을 수 있었다. 1 pcm/sec의 경우도 FSAR과 비교하였을 때 경향이 비슷하게 나왔다. 그러나 75 pcm/sec의 경우와 다르게 반응도 모델링을 개선하기 전에는 FSAR에 비해 사고의 종결이 일찍 끝나는 경향을 보여왔지만 모델링을 개선한 후에는 FSAR에 나타나 있는 결과와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 개선한 모델링에 의하여 출력운전중 제어봉 인출 사고에 OT/T, OP/T 신호가 바르게 작동되었으며 표. 3에 나타내었다.

6.2 정상급수 상실사고

반응도 모델링에 의한 최대/최소 반응도 궤환효과와 전체 반응도 결과는 다음에 나와있는 그림에 나타나있고, 최대 반응도 궤환은 최소반응도 궤환보다 반응도가 더 작

은 범위에서 분포하고 전체 반응도에서도 동일한 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 정상급수상실에 대한 가압기 및 증기발생기의 압력과 가압기 부피 및 고온/저온관의 냉각재 온도는 그림 14 ~ 그림 17 에 나타나 있다.

7. 결론

7.1 출력운전중 제어봉 인출사고

출력중 제어봉 인출사고는 Condition II 사고로서 사고분류 기준인 “1) 가장 나쁜 경우라도 원자로 트립만으로 충분히 수습되며, 원자로 정지후 다시 정상 출력운전으로 회복할수 있다. 2) 핵연료 용융, 핵연료 피복재 손상이 발생하지 않는다. 3) 원자로 냉각재계통 압력은 설계압력×110% 보다 작아야 한다. 4) 방사선 유출량은 10CFR20 제한치 이다.” 를 만족해야 한다. 본 연구에서 분석한 결과 75 pcm/sec와 1 pcm/sec 두 가지 경우 모두 최소 반응도 효과와 최고로 높은 RCS 온도, RCS 압력에서 가장 나쁜 결과를 얻을 수 있었으며, 반응도 모델링을 개선한 후의 결과가 FSAR 결과와 유사하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 75 pcm ~ 1pcm 사이의 반응도 삽입에 따른 초기 트립 신호도 개선한 모델링에 의하여 작동된다는 것을 확인하였다.

7.2 정상급수 상실사고

반응도 케환효과에 대한 모델링은 최대 및 최소 반응도 케환에 의한 반응도를 RETRAN 코드를 통해 묘사 할 수 있고 정상급수상실사고에 적용하여 검증된 계산 결과로 WH형 원전에 사용된 기존의 사고해석을 위한 반응도 관련 자료를 RETRAN 에서도 반응도 모델링을 통해 적용할 수 있음을 확인 하였다.

8. 향후 연구계획

8.1 출력중 제어봉 인출사고

본 논문에서와 같은 계산을 수행하였고 향후에는 100% 출력중이 아니라 미임계 저출력에서의 반응도에 따른 여러 변수의 반응을 검토할 것이다. 또한 VIPER 체계가 구축되는 데로 압력 관점과 DNBR 관점에서 검토할 예정이다.

9. 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 “원전주기적 안전성 평가기술개발 - 원전 운전과도해석 및 신안전 해석 개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

10. 참고문헌

1. Safety Analysis Standard, Rev. 6, Apr. 1999, WH
2. YGN 1&2 FSAR, Apr. 1994, 한국전력공사
3. L. J. Agee, et al., "The Reactor Analysis Support Package (RASP), NP-4498, Vol. 3, May 1986, EPRI
4. Kewaunee Nuclear Power Plant, "DYNODE-P RETRAN-3D Benchmark", June 2000.
5. YGN 1&2 PL&S, 개정 3판, 1993. 12, 한국전력공사
6. G. H. Heberle, "LOFTRAN-Code Description and User's Manual", WCAP-7878, Rev. 5, Nov. 1989, WH
7. J. G. Shatford, et al., "RETRAN-3D User's Manual", NP-7450, Vol. 3, Oct. 1996, EPRI
8. 최희기, "TXU Reload Core Design and Safety Analysis Methodology", 2000. 11, 한국전력공사

표 1 사고해석시 초기조건

변수	공칭값
노심 열출력(MWt)	2775
원자로 용기 평균온도(°F)	5885.5
가압기 압력(psia)	2250
루프당 원자로 냉각재 유량(gpm)	95,600
감속재 온도계수(pcm/°F)	+5 ~ -48
도플러 계수(pcm/°F)	-0.91 ~ -2.9
지발중성자분율	0.004400005~0.007500009

표 2. 정상급수상실 해석시 초기조건

변수	공칭값
원자로 출력 (MWt)	2775
RCP에 의한 열출력 (MWt)	12
원자로용기 평균온도(°F)	588.5
가압기 압력 (psia)	2250
각 루프의 냉각재 유량 (gpm)	95,600
감속재 온도 계수 (pcm/°F)	+5 ~ -48
도플러 계수 (pcm/°F)	-0.91 ~ -2.9

표 3. 반응도 삽입에 따른 초기 트립 신호

반응도 삽입 값(pcm)	초기 트립 신호
75	High Flux
60	High Flux
55	High Flux
45	High Flux
35	High Flux
30	High Flux
25	High Flux
20	High Flux
15	High Flux
10	High Flux
6	High Flux
5	OT ΔT
3	OT ΔT
1	OT ΔT

표 4. 영광1&2호기 반응도 궤환효과 관련자료

구 분	최소반응도 궤환효과		최소반응도 궤환효과	
	감속재 온도계수	최대값	+5.0 pcm/°F	최소값
도플러 상수	최대값	-0.91 pcm/°F	최소값	-2.9 pcm/°F
지발중성자분율(β)	최대값	0.0075	최소값	0.0044

표 5. 각 코드 및 반응도 모델링에서 사용된 입력양식

구 분	LOFTRAN	RETRAN	반응도 모델링
밀 도	ρ_1, ρ_2, ρ_3	ρ_1, ρ_2, ρ_3	ρ_1, ρ_2, ρ_3
	[g/cc]	[lbm/ft ³]	[lbm/ft ³]
반응도	$(\frac{\Delta k}{\Delta \rho})_1 (\frac{\Delta k}{\Delta \rho})_2 (\frac{\Delta k}{\Delta \rho})_3$	$\$1, \$2, \$3$	$(\frac{\Delta k}{\Delta \rho})_1 (\frac{\Delta k}{\Delta \rho})_2 (\frac{\Delta k}{\Delta \rho})_3$
	[Δk/g/cc]	[\$]	[Δk/g/cc]

표 6. 감속재 밀도계수 관련 입력자료

구 분	밀 도	감속재 밀도계수	
		Min. FB. (BOL)	Max. FB. (EOL)
1	40.2348	-0.0269	0.5
2	46.9146	-0.0481	0.5
3	56.2164	-0.0893	0.5
단 위	[lmb/ft ³]	[$\Delta k / \Delta \rho$]	[$\Delta k / \Delta \rho$]

표 7. ATF 보정계수 관련 입력자료

구 분	pcm/°F	$\Delta k / ^\circ F$	β	$\$/^\circ F$
최소반응도계환	-0.91	-0.0000091	0.0075	-0.001213
최대반응도계환	-2.9	-0.000029	0.0044	-0.006591

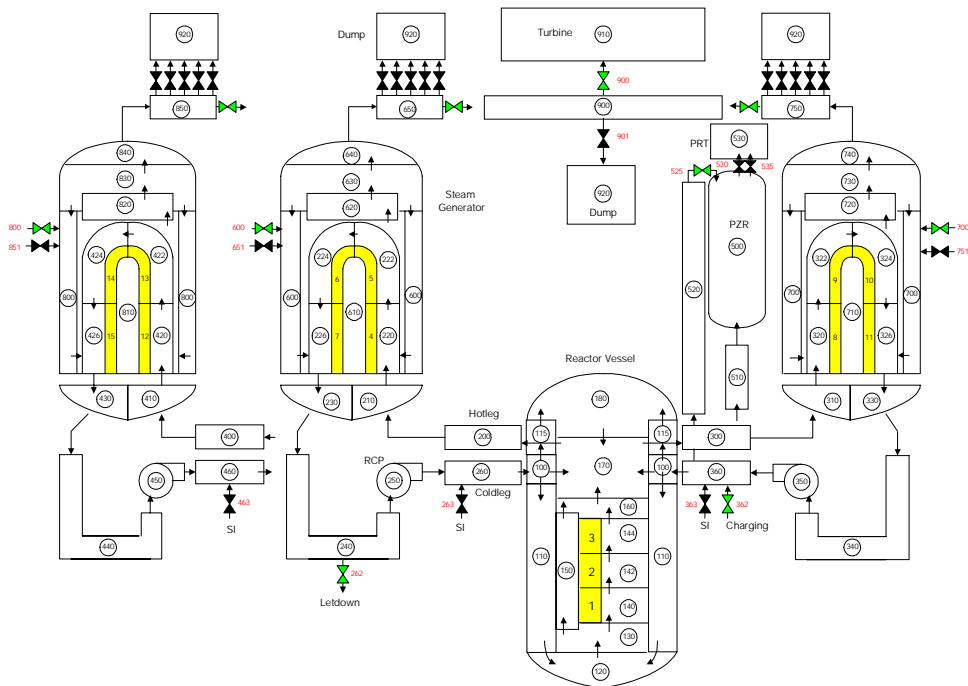


그림 1 RETRAN을 이용한 영광1/2호기 Nodalization

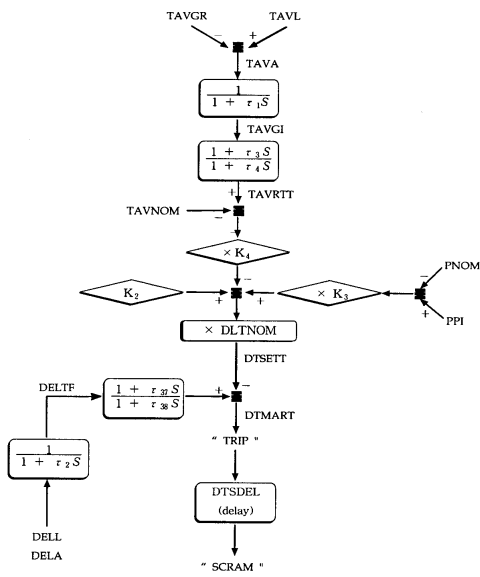


그림 2 OT/ΔT 논리도

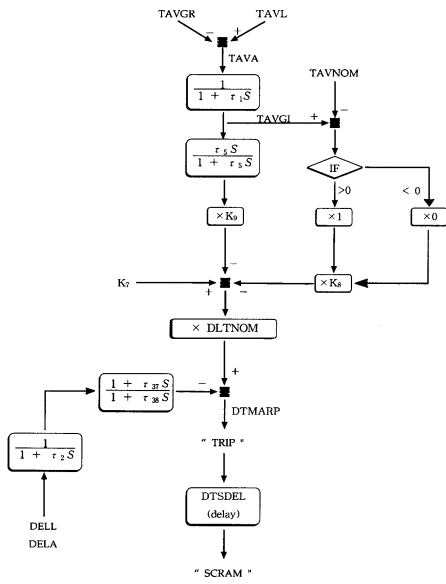


그림 3 OP/ΔT 논리도

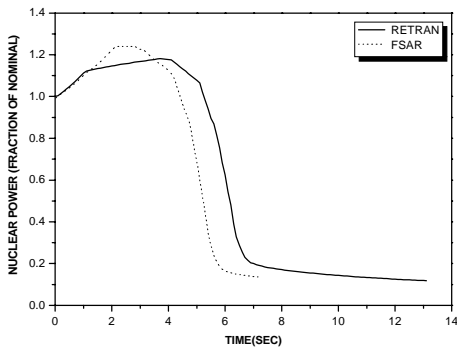


그림 4. FSAR VS. RETRAN Min. Reactivity Feedback, (75 pcm/sec)

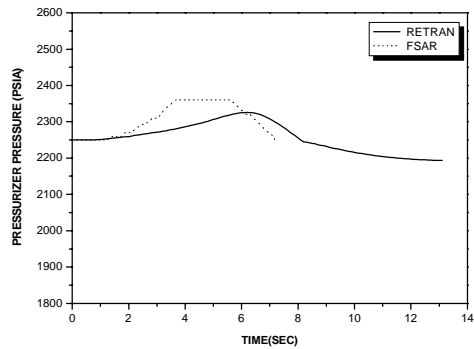


그림 5. FSAR VS. RETRAN Min. Reactivity Feedback, (75 pcm/sec)

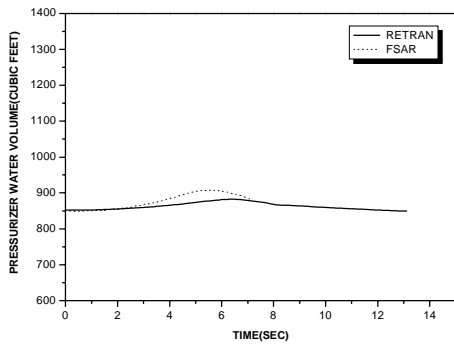


그림 6. FSAR VS. RETRAN Min. Reactivity Feedback, (75 pcm/sec)

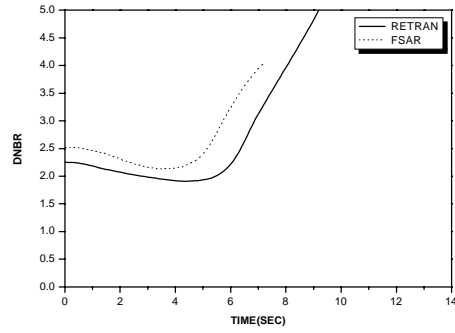


그림 7. FSAR VS. RETRAN Min. Reactivity Feedback, (75 pcm/sec)

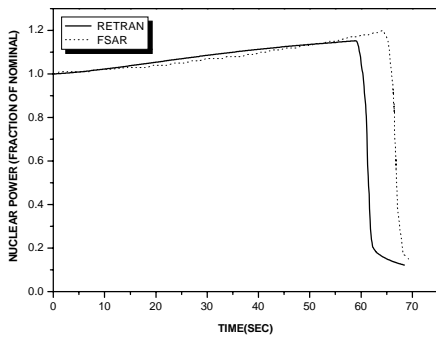


그림 8. FSAR VS. RETRAN Min. Reactivity Feedback, (1 pcm/sec)

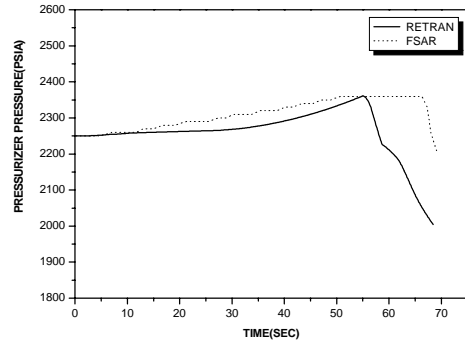


그림 9. FSAR VS. RETRAN Min. Reactivity Feedback, (1 pcm/sec)

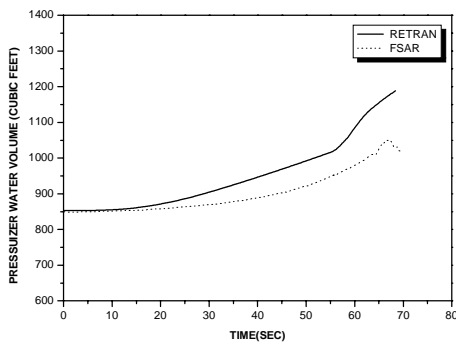


그림 10. FSAR VS. RETRAN Min. Reactivity Feedback, (1 pcm/sec)

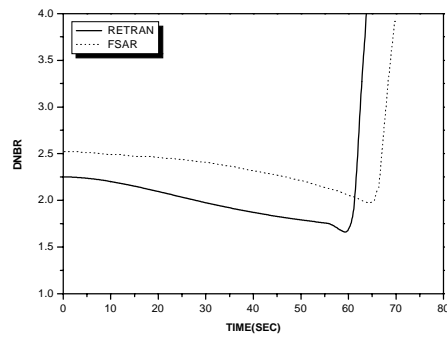


그림 11. FSAR VS. RETRAN Min. Reactivity Feedback, (1 pcm/sec)

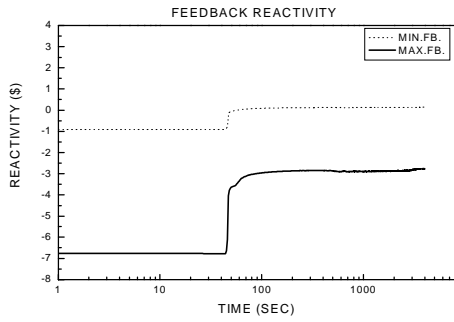


그림 12 최대/최소 반응도 궤환효과

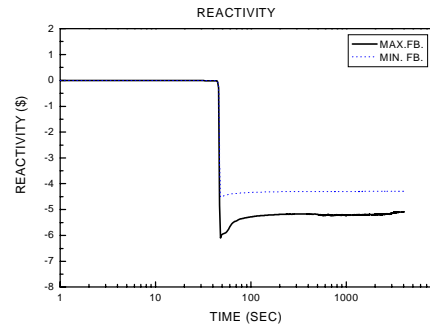


그림 13 전체 반응도

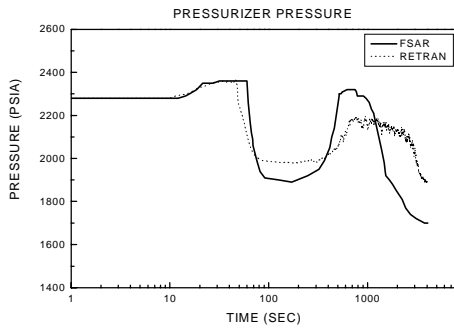


그림 14 정상급수상실시 가압기 압력

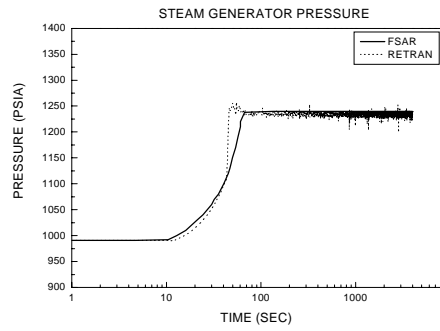


그림 15 정상급수상실시 SG 압력

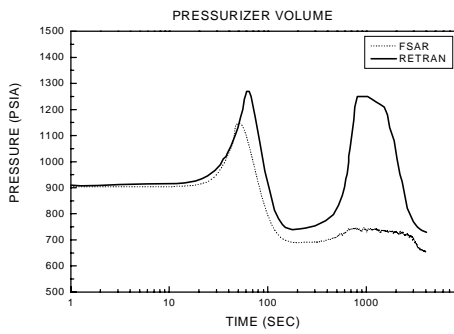


그림 16 정상급수상실시 가압기 냉각재부피

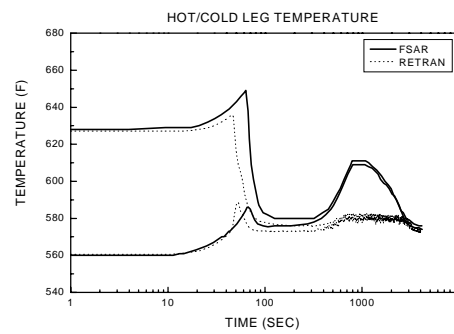


그림 17 정상급수상실시 고온/저온관 온도