'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

점근사 동력학 모델을 이용한 MIDAS/PK 코드 개발

MIDAS/PK Code Development Using Point Kinetics Model

송용만, 박선희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 중대사고 기인사고의 하나인 '정지불능 예상과도상태' (Anticipated Transients Without Scram : ATWS) 사고경위를 해석하기 위한 MIDAS/PK 코드를 개발하였다. MIDAS 코드는 기존의 중대사고 해석코드인 MELCOR 코드를 바탕으로 '중대사고 위해고 완화전략 분석'을 위해 한국원자력연구소가 개발하고 있는 종합전산코드이다. 한편 현재의 MELCOR(1.8.3) 코드의 동력학 모듈내에 내장된 기존의 Chexal-Layman 관계식은 BWR 조건에서 개발되어 PWR에 적용하기는 부적절한 것으로 판명되었다. 따라서 개발중인 MIDAS 코드에 중대사고로서의 ATWS 사고의 해석 능력을 부여하기 위해, 우선 기존 사고해석용 코드의 동력학 모델을 보강하여 점근사 동력학 독립모듈인 'PKINETIC'을 구성하였다. 다음으로, MIDAS에 개발된 독립모듈을 삽입하고 기존의 열수력 인자와의 연결을 완성해 MIDAS/PK를 완성하였다. 개발된 독립모듈 및 MIDAS/PK는 RETRAN 코드와의 비교계산에 의해 검증되었다. 특히, ATWS 사고 해석시에 가장 주요한 관심은 사고시작 초기의 수분내에 나타나는 일차계통의 최고 압력이며, 개발된 코드는 이를 잘 모사하는 것으로 나타났다. MIDAS/PK 코드는 AMSAC (ATWS Mitigating System Actuation Circuitry) 대신 수동조치절차가 마련되어 있는 국내 초기 W 발전소에서, ATWS의 거동 및 영향을 결정론적인 방식으로 분석할 때 유용하게 이용될 수 있으며 이는 국내 발전소의 사고완화 및 관리 관점에서도 중요할 것으로 사료된다.

Abstract

In this study, a MIDAS/PK code has been developed for analyzing the ATWS (Anticipated Transients Without Scram) which can be one of severe accident initiating events. The MIDAS is an integrated computer code based on the MELCOR code to develop a severe accident risk reduction strategy by Korea Atomic Energy Research Institute. In the mean time, the Chexal-Layman correlation in the current MELCOR, which was developed under a BWR condition, is appeared to be inappropriate for a PWR. So as to provide ATWS analysis capability to the MIDAS code, a point kinetics module, PKINETIC, has first been developed as a stand-alone code whose reference model was selected from the current accident analysis codes. In the next step, the MIDAS/PK code has been developed via coupling PKINETIC with the MIDAS code by inter-connecting several thermal hydraulic parameters between the two codes. Since the major concern in the ATWS analysis is the primary peak pressure during the early few minutes into the accident, the peak pressure from the PKINETIC module and the MIDAS/PK are compared with the RETRAN calculations showing a good agreement between them. The MIDAS/PK code is considered to be valuable for analyzing the plant response during ATWS deterministically, especially for the early domestic westinghouse plants which rely on the operator procedure instead of an AMSAC (ATWS Mitigating System Actuation Circuitry) against ATWS. This capability of ATWS analysis is also important from the view point of accident management and mitigation.

1. 서론

본 연구의 목적은 중대사고 기인사고의 하나인 ‘정지불능 예상과도상태’ (Anticipated Transients Without Scram : ATWS) 사고경위를 해석하기 위한 동력학 모델을 구성하고, 나아가 이를 중대사고 해석용 대형전산코드내에 삽입하는 기술을 정립하는 데 있다. 이를 위해 기존의 동력학 모델을 검토.분석하여 기본적인 독립모듈을 우선 구성하고, 기존코드의 약점으로 생각되는 중대사고시의 특성을 쉽게 반영할 수 있도록 독립모듈을 보강하였다. 즉, 대부분의 기존 설계코드 (TASS[1]/MARS[2]/KMRRSIM[3] 등)는 정상상태에서의 노심변화를 추적하므로 중대사고시 고압 및 다량의 기포 조건에서의 노심변화를 고려하지 않으며, 기존의 천이사고 (Transient) 해석코드 (RELAP5[4]/RETRAN[5] 등)는 위 조건에서의 반응도 궤환계수 (reactivity feedback coefficient)를 입력데이타로 요구하고 있어 사용자의 불편이 예상된다. 따라서 기본모듈의 보강은 기존코드에서 이미 계산되는 노심의 열수력 변수 (온도/압력/기포율/수위 등)만을 이용하여 반응도 궤환효과를 쉽게 예측하도록 하였다. 다음으로 ATWS 사고해석에 필수적인 노심의 열수력 인자와의 연결을 대형코드내 삽입을 통하여 꾀하였다. 삽입대상 대형코드로는 MELCOR(1.8.3) 최신판 [6]에 기반한 MIDAS 코드가 선택되었는데, 현재의 MIDAS 에는 PWR에 사용가능한 동력학 모델이 없어 ATWS 사고의 해석이 불가능하므로 동력학 모델을 개발. 추가해야 할 필요가 있었다. 이처럼 최종적으로 개발된 동력학 모델은 하나의 독립된 모듈로서 MIDAS 코드내에 이식되었으며, 검증은 기존결과와의 비교해석이 가능한 예제계산을 통하여 수행하였다.

2. 동력학 독립모듈의 특성 및 구성

중대사고 해석에서는 노심평균 출력정보로 충분하므로 점근사 동력학 모듈이 선정되었다. 선정된 모듈의 참조코드로 활용하기 위해 ATWS 분석능력을 가진 것으로 알려진 기존의 코드중 접근이 용이한 MELCOR/SCDAP-RELAP5/TASS/KMRRSIM의 동력학 모델을 검토하였다. 검토결과 중대사고 대형코드로 널리 이용되고 있는 MELCOR 및 SCDAP/RELAP5 는 각각 PWR에 대한 분석능력 및 모델에 대한 기술이 부족하여 선정대상에서 제외되었다. 다음으로 한국원자력연구소가 개발/보유하여 접근이 용이한 TASS 및 KMRRSIM은 프로그래밍 언어로 비교적 최신의 FORTRAN 77 을 사용하고 PC를 기반으로 한 장점이 높게 평가되었다. 이 중 소형코드이고 모듈의 독립성이 좀 더 나은 KMRRSIM 코드의 동력학 모델을 참조코드로 선정하였다. 한편, 축/반경방향으로의 출력분포값이 필요한 경우에는 계산된 노심평균 출력값을 사용자가 제공한 출력분포에 따라 분배할 수 있다. 참조코드로부터 구성한 본 모듈에서는 점근사 동력학 방정식으로부터 유도된 차분방정식을 상미분방정식의 초기치 문제에 대한 해법의 일종인 Runge-Kutta 해법을 사용하여 풀이하였다[7]. 구성된 독립모듈은 아래와 같이 특성을 보강하여 PKINETIC (Point KINETIC) 이라고 명명하였다:

– 본 모듈은 핵분열에 의한 원자로의 열출력 (Fission thermal power) 및 핵분열생성물 (fission product)의 붕괴에 의한 붕괴열 (decay heat)을 모두 계산할 수 있다. 정상출력시 붕괴열에 의한 출력은 통상 전출력의 10% 미만이어서, 그 중요도가 핵분열 출력에 비해 작으나 노심노출이후 또는

원자로정지시는 매우 중요하다. 따라서 ATWS 사고 해석을 위한 원자로 출력의 계산시에 붕괴열을 계산할 수 있는 모델이 포함되었다.

- 계산에 이용될 발전소의 종류를 지정할 수 있다. 이를 위하여 발전소의 특성이 고려된 발전소 입력 데이터베이스가 몇 개의 국내 발전소에 대해 구축되어 있다.
- 반응도 궤환효과 (reactivity feedback)는 초기 정상상태 값으로부터의 변화에 근거한다. 반응도 궤환효과를 가지는 요소에는 제어봉의 위치변화, 핵연료의 온도변화, 냉각재의 온도(/밀도) 변화, 냉각재 붕산농도의 변화, 및 제논 (xenon)량의 증감등이 있으며, 이의 변화는 반응도 변화를 초래하고 결국 노심출력을 변화시킨다. 이중 본 모듈에서는 일반적인 중대사고의 진행에서 가장 변화정도가 크고 중요한 요소인 핵연료 온도 및 냉각재 온도(/밀도) 만을 우선 고려하였다.
- 수치해법과 관련하여 절단오차 (Truncation Error)의 한계를 정하기 위한 허용도 (Tolerance) 및 계산시간/계산간격/출력간격을 사용자가 제어할 수 있다.

PKINETIC의 사용자 입력은 3가지 종류가 있다. 첫째는 수치해법 관련 입력이다. 여기에는 차분방정식 변수의 개수 및 오차허용도등이 포함된다. 둘째는 시간제어 입력이다. 여기에는 계산 시작/종료시간, 계산간격 및 출력인쇄 간격등이 포함된다. 셋째는 현재 계산간격에서의 핵연료 및 냉각수의 온도이다. 온도 입력은 매 계산시간 간격마다 입력되어야 반응도 온도궤환 정도를 예측할 수 있다. 따라서 본 입력은 시간에 따른 테이블 또는 함수형태로 줄 수 있으며, 열수력코드와 연결된 후에는 열수력 코드의 온도계산 결과를 본 코드의 입력으로 대체시키는 방법을 사용하게 된다. 현재 PKINETIC 에서는 입력파일 (‘ pkinetic.in’)의 존재여부를 물어보며, 입력파일이 존재하지 않는 경우 코드네 내장된 기본입력이 사용되나 기본입력은 참조수행외의 별 의미는 없다. 사용자 입력의 종류 및 설명을 <표.1>에 수록하였다.

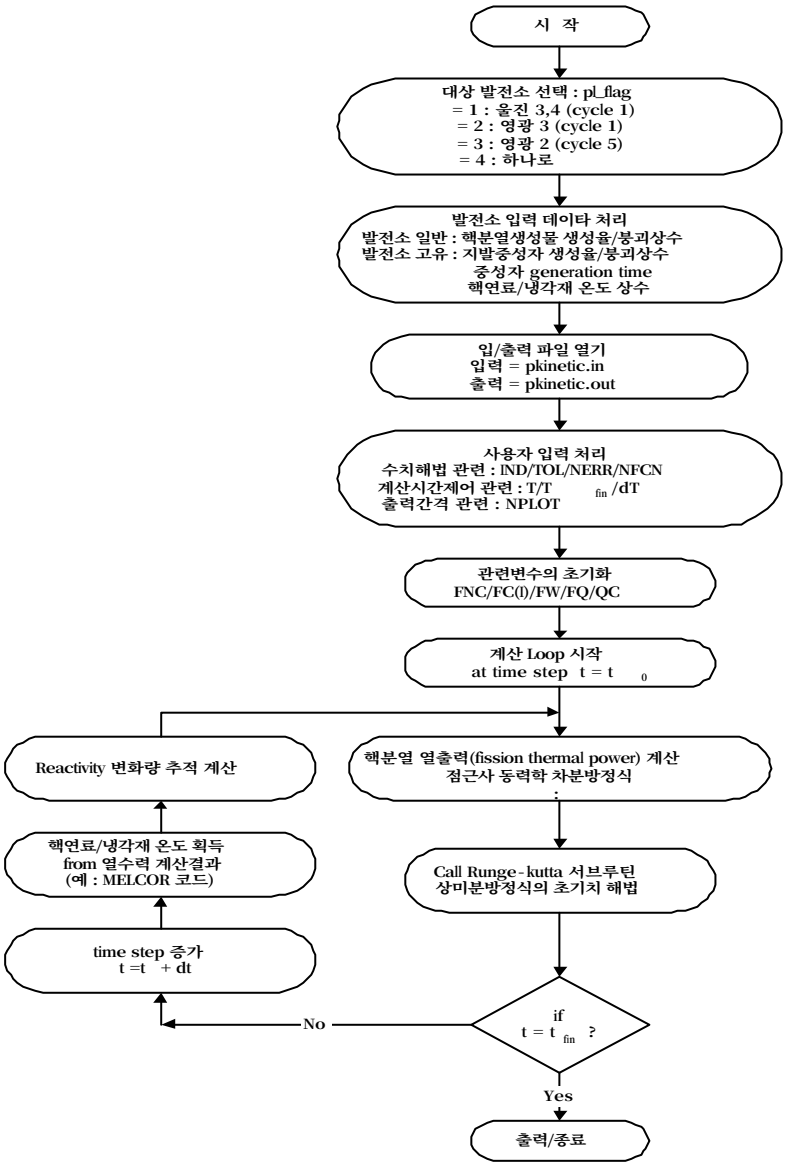
<표.1> PKINETIC 모듈의 사용자 입력 데이터

입력변수	정의
NVAR	미분방정식의 변수 개수
IND	수치해법의 시간간격 제어관련 변수
TOL	오차허용도
NERR	오차제어 관련 가중치 변수
TCNTEND0	시작시간 [초]
TEND	계산종료 시간 [초]
DTC	계산시간 간격 [초]
NPLOT	인쇄간격 제어 변수
AVETEMPF	평균 핵연료 온도
AVETEMPC	평균 냉각수 온도

PKINETIC의 계산출력에는 각 계산시간 간격에서의 중성자 밀도, 지발중성자 모핵의 밀도, 핵분열생성물의 밀도, 초기출력에 대한 출력분율 및 노심열출력이 있다. 특히 최종출력인 노심열출력은 핵분열출력과 붕괴열을 모두 고려한 값으로 MWth 의 단위로 표시하여 결과값이 한눈에 들어올 수

있도록 배려하였다. 출력파일 (‘pkinetic.out’)은 계산이 수행되는 디렉토리에 생성되며, 한국원자력연구소에서 개발된 CONPAS [3]를 이용하여 곧바로 그림을 그릴 수 있도록 형식을 갖추고 있다.

<그림.1>은 PKINETIC 모듈의 흐름도를 보여준다.



<그림.1> PKINETIC 계산 흐름도

3. PKINETIC과 MIDAS 코드의 연결

동력학 독립모듈 (PKINETIC)은 노심내 핵연료봉의 평균온도, 노심내 냉각재의 질량/온도, 시간제어 변수를 입력으로 하여 노심출력을 계산한다. 독립 모듈의 입.출력변수를 MIDAS의 변수와 연결시키기 위하여 common block을 MIDAS내에 선언하였고 MIDAS의 노심 냉각재 온도변수 및 핵연료봉의 평균온도를 구하기 위한 각 노심 cell의 질량/온도변수를 시간제어 변수와 함께 common block에 저장하였다. 독립 모듈의 출력 변수인 노심출력은 MIDAS의 부프로그램내의 해당변수를 대치하도록 하였다. 이러한 과정에서 현재는 해당변수가 MIDAS내에서 변경될 때마다 그 값으로 common block의 변수를 갱신하여 최종값으로 저장하고 이것을 입력으로 사용하고 있으나 차후 MIDAS의 해당변수에 대한 배열의 pointer가 확인되면 그 변수를 직접 이용하여 기억장소를 절약하고 변수추적을 용이하게 할 수 있다.

4. 검증

개발된 동력학 모듈을 검증하기 위해 비교코드로 동력학 계산이 가능한 코드중 중대사고의 초기과도상태의 모사가 가능한 RETRAN 코드를 선택하였다. 우선, PKINETIC 독립모듈의 검증을 위하여 RETRAN-02 (Mod5) 와의 비교계산을 수행하였다. 본 비교계산에서는 완전급수상실사고시 ATWS 경위에 대한 RETRAN의 예제계산을 이용했으며, 사용된 반응도 궤환 데이터를 <그림.2>에 보여주었다. 여기서 RETRAN-02 의 반응도 궤환은 냉각수의 온도/밀도 및 핵연료의 온도에 대해 이루어지며, 이는 냉각수의 온도계수에 밀도의 효과를 포함시키고 있는 현 PKINETIC의 방식과는 약간 다르므로 총 반응도를 PKINETIC의 입력으로 사용하였다. 사고시작후 200초까지 PKINETIC을 이용하여 RETRAN의 경위를 모사한 결과를 <그림.3>에 표시했다 (PKINETIC은 약 25초 간격으로 모의). 한편, 반응도 궤환입력을 제외한 주요 입력변수를 예시하기 위해, 사고시작후 100초에서의 RETRAN 및 PKINETIC 코드의 입력 데이터와 계산결과를 <표.2>에 상세히 수록하였으며, RETRAN 결과 (출력=33.8%)와 PKINETIC 결과 (출력=35%)는 잘 일치하였다.

다음으로, MIDAS/PK(1.8.3)의 계산결과와 RETRAN의 결과를 비교하였다. 이러한 결과비교를 위해서는 동일한 발전소에 대한 계산이 비교코드간에 가능해야 한다. 그러나 현재 시점에서 MELCOR의 입력은 국내의 울진 3,4호기만이 이용가능한 상태이며, 본 발전소에 대한 (대형발전소의 ATWS 사고모의가 가능한 여타코드를 포함해서) RETRAN의 입력을 구할 수 없었다. 따라서, MELCOR-PK(1.8.3)의 계산은 완전급수상실사고시 ATWS 경위에 대한 Trojan의 계산결과[1][5]와 비교를 수행하였다. 한편, Trojan 발전소는 웨스팅하우스의 4-Loop 발전소로서 울진3,4호기와는 차이가 있으나 계산의 경향을 비교하는 데는 큰 무리가 없다. <그림.4> 및 <그림.5>은 급수상실사고 ATWS에서의 출력거동 및 일차계통 압력거동을 각각 비교하고 있다. 압력의 최고치는 약간 다르나 사고진행 시간을 포함해 거동이 거의 일치함을 알 수 있다.

[1] 본 Trojan 결과는 RETRAN-02 와 RETRAN-3D 코드간의 비교계산에 사용되었다.

<표.2> RETRAN 과의 비교계산을 위한 데이터 및 결과

	RETRAN	PKINETIC
FTC	-0.000533 * 3 = -0.001599 [$/F]	-0.01039 [mk/F]
MTC	0.0012206 [$/F]	0.007934 [mk/F]
Density Coeff.	<그림.2> 참조	N/C
ΔT_f (At t=100 sec)	1435-2033 = -598 [F]	779-1112= -333[C] = -598 [F]
ΔT_c (At t=100 sec)	640-572 = 68 [F]	338-300 = 38[C] = 68 [F]
Void fraction	0	0
Total	-0.67 [$]	-4.375E-3 [k]
Delayed n. yield fraction (= beta(i))	0.038, 0.213, 0.188, 0.407, 0.128, 0.026 (= beta(i)/beta)	2.71E-4,1.518E-3,1.340E-3,2.902E-3,0.913E-3,1.85E-4 (beta =7.129E-3)
Delayed n. decay constant	.0127, .0317, .115, .311, 1.40, 3.87	.0127, .0317, .115, .311, 1.40, 3.87
n. generation time	253.5 (= beta / l)	0.28E-4
f.p. yield fraction (11개 그룹)	코드내부에서 고려	.704E-2,.149E-1,.183E-1,.105E-1,.176E-2,.832E-2,.457E-2,.169E-2,.200E-2,.142E-2,.071E-2 (TOTAL = 0.72E-1)
f.p. decay constant	코드내부에서 고려	.7650,.9000E-1,.9829E-2,.1233E-2,.4910E-3,.1632E-3,.1674E-4,.3410E-5,.1034E-5,.1028E-6,.2557E-8
Power [fraction]	0.338	0.35

(비고) 1$ = 6.5 mK

5. 결론

본 연구의 목표는 크게 두가지로 요약될 수 있다. 첫째는, 중대사고 기인사고의 하나인 '정지불능 예상과도상태' (ATWS) 사고경위를 해석하기 위한 동력학 독립모델을 개발하는 것이고, 둘째는 개발된 동력학 모듈을 중대사고 해석용 대형전산코드내에 삽입하는 기술을 정립하는 데 있다. 첫째 목표를 달성하기 위해, 한국원자력연구소가 개발/보유하여 접근이 용이한 KMRRSIM 코드를 참조코드로 선정하였으며, 중대사고 코드에서 이미 계산되는 노심의 열수력 변수 (온도/압력/ 기포율/수위 등)만을 이용하여 중대사고시 반응도 궤환효과를 쉽게 예측하도록 보강하여 독립모듈 (PKINETIC)을 개발하였다. 다음으로 둘째 목표를 달성하기 위해, 최근 중대사고 분야에서 널리 사용되고 있는 대형전산코드 MELCOR(1.8.3)에 기반한 MIDAS 코드에 개발된 독립모듈을 삽입하고 기존의 열수력 인자와의 연결을 완성해 MIDAS/PK를 개발하였다. 또한, 이 두 코드는 RETRAN 계산결과와의 비교를 통하여 검증하였다. 이로인해 대형코드내 (특히, MELCOR) 모듈삽입기술의 정립과 더불어 ATWS 사고해석 능력이 없는 MIDAS의 사고해석 능력을 강화하는 효과를 얻게 되었다. 개발된 MIDAS/PK는 앞으로 국내의 기존 및

신규 발전소의 ATWS 사고에 대한 ET 작성시 성공요건 (success criteria)을 구하는 도구로 유용하게 사용될 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] **원자력 안전성 향상 연구 : 원전 과도기 성능 및 계통 분석 코드 개발**, KAERI/RR-1746/96, 1997.

[2] Realistic Thermal-Hydraulic System Code Development Workshop, ' 98 Fall KNS Conference, 1988.

[3] Program Description of KMRRSIM, KAERI, KM-031-400-02, July 1989.

[4] SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual (Volume I: SCDAP/RELAP5 Interface Theory), NUREG/CR-6150, EGG-2720, Vol.1, October 1993.

[5] EPRI, "RETRAN-02 (A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems) Code Manual", NP-1850-CCM-A, December 1995.

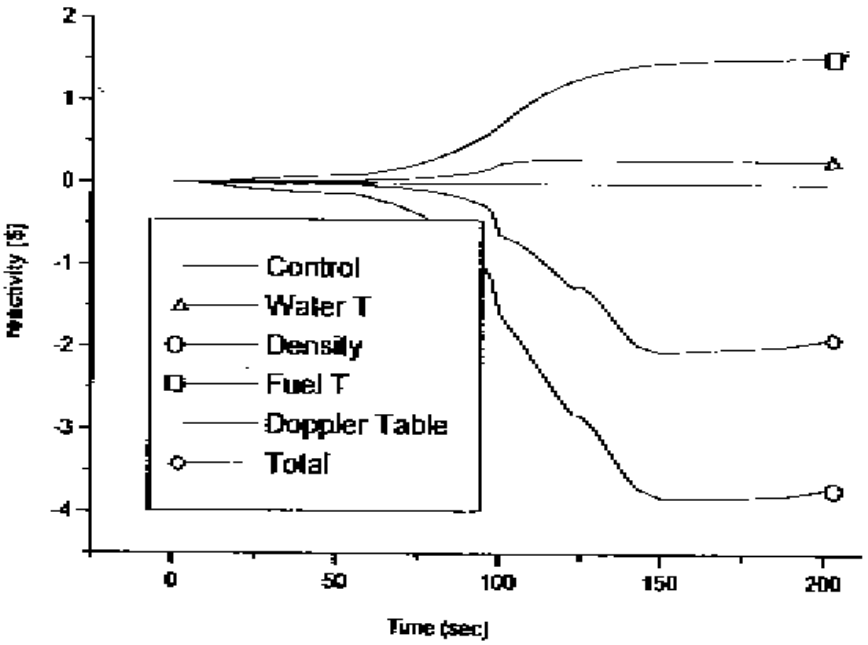
[6] MELCOR Computer Code Manuals (Primer and User's Guide Version 1.8.3), NUREG/CR-6119, SAND93-2185, September 1994.

[7] **송용만등**, "A Coupling of Kinetics Model with MELCOR Code and ATWS Analysis", KAERI/TR-1273/99, 1999.

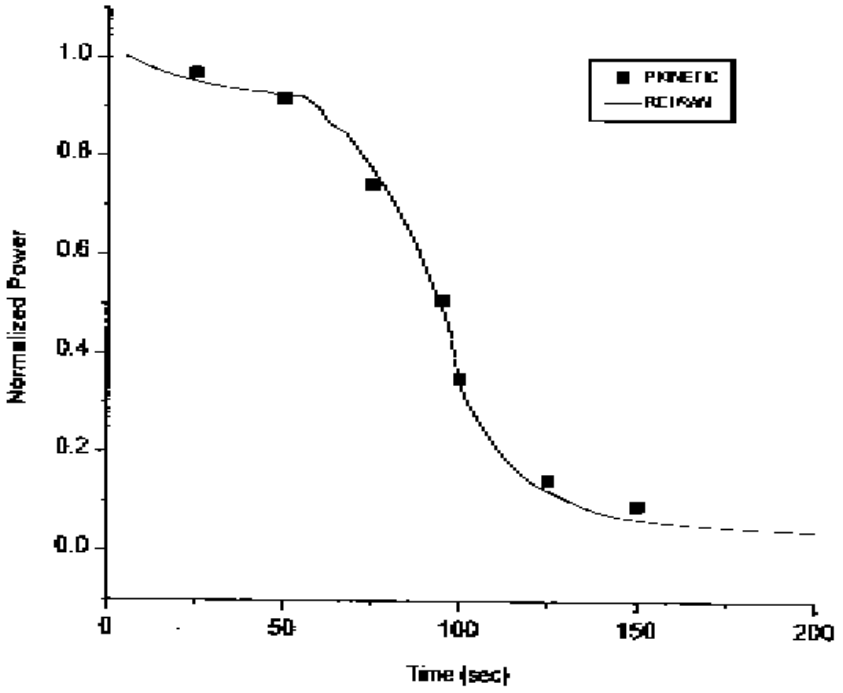
[8] **안광일등**, "Development of a Computer Code, CONPAS, for an Integrated Level 2 PSA", Journal of Korean Nuclear Society, Vol.30, Number 1, pp.58-74, February 1998.

<그림.2> <그림.3> ---------- 그림2+3.gif 파일 참조

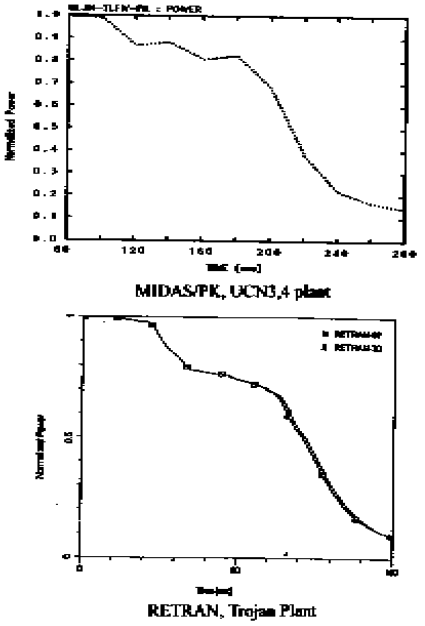
<그림.4> <그림.5> ---------- 그림4+5.gif 파일 참조



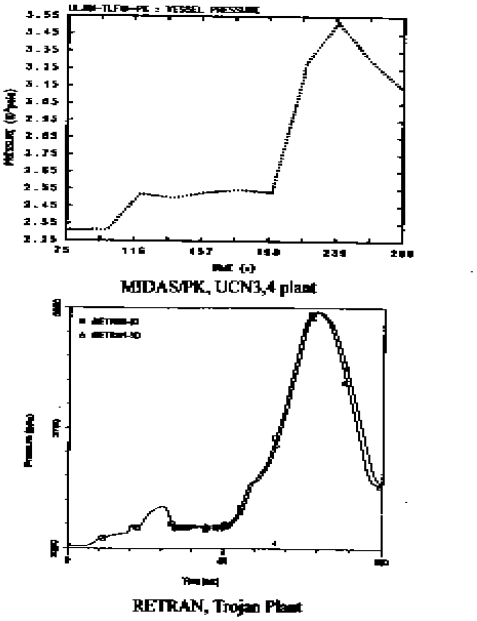
<그림2> RETRAN 계산시 반응도 궤환 데이터 .



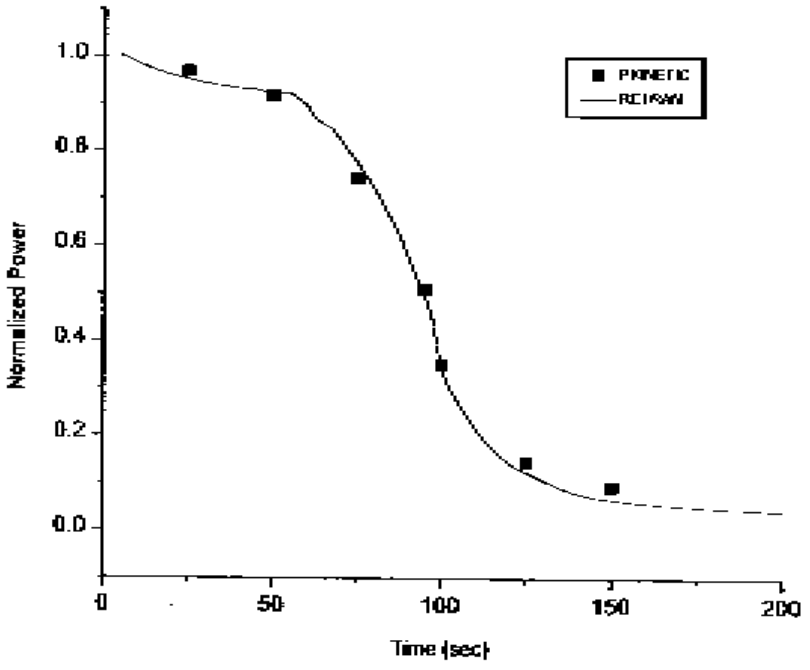
<그림.3> PKINETIC 과 RETRAN 의 계산결과 비교



<그림.4> 급수상실사고 ATWS 에서의 출력거동 비교



<그림.5> 급수상실사고 ATWS 에서의 1 차계통 압력거동 비교



<그림.3> PKINETIC 과 RETRAN 의 계산결과 비교