'99춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

확률론적 파괴역학 해석 코드간 비교분석

Comparative Study of Probabilistic Fracture Mechanics Codes

장 창희, 정 일석

한국전력공사 전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

정 성규, 진 태은
한국전력기술주식회사 전력기술개발연구소
경기도 용인시 구성면 마북리 360-9

요 약

가압열충격 규정 및 하부 규제지침서에 의한 발전소별 가압열충격 상세 평가의 일부로써 확률론적 파괴역학 해석이 수행되어야 한다. 확률론적 파괴역학 해석의 목적은 가압열충격 발생시 원자로 압력용기의 파손확률을 정량적으로 평가하기 위한 것이다. 이를 위한 전산 코드들의 해석 방법의 차이로 인해 평가 결과에 영향을 미치므로 해석 결과의 정확한 이해를 위해 전산 코드들 간의 차이를 분석하고 해석결과를 비교하였다. 그 결과 VISA-II가 FAVOR에 비해 전반적으로 보수적인 해석 결과를 보이며 특히, 원주방향 균열에 대해서는 보수성이 더욱 증가하였다. 이는 결정론적 해석 모듈에서 VISA-II 코드가 열수력 조건을 보수적으로 근사함으로 인한 효과와 클래딩 부위를 해석하는 방법상의 차이로 인한 효과가 동시에 작용한 것으로 볼 수 있다.

Abstract

Probabilistic fracture mechanics(PFM) analysis is an integral part of the plant specific PTS analysis required by PTS rule and regulatory guide. The purpose of the PFM analysis is to quantify the conditional vessel failure probability at the event of PTS transients. Though several PFM codes are available for this purpose, differences in analytical methods of the codes could have significant effect on calculated vessel failure probability. To understand the code dependency of the analysis, the details of the analytical methods of the code and the results were compared. From the comparative study, it was found that VISA-II code estimated greater failure probability, especially for circumferential cracks. The differences in treating thermal hydraulic boundary conditions as well as in treating the effects of cladding were thought to be in part responsible for conservatism in VISA-II.

1. 서론

원전 운전 중에 가상의 과도상태가 발생하여 원자로 압력용기의 급격한 냉각과 함께 압력이 높게 유지되거나 재가압되는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 현상을 가압열충격(PTS, pressurized thermal shock)이라 하며 이때 열응력뿐만 아니라 압력에 의한 응력이 동시에 작용하여 조사취화로 인하여 파괴인성이 저하된 원자로 압력용기의 급격한 파손을 유발할 수 있다[1]. 이러한 점에서 미국원자력규제위원회(USNRC)의 가압열충격규정은 가압열충격에 대한 원자로 압력용기의 건전성을 평가하는 1차적인 기준으로써 가압열충격 심사기준온도(screening criteria)를 정의하고 이를 초과할 것으로 예상되는 원전에 대해서는 상세한 안전성분석을 수행할 것을 요구하고 있다[2].

이러한 안전성 분석은 크게 가압열충격 사건추이 선정 및 정량화, 이에 따른 열수력해석, 그리고 확률론적 파괴역학 해석을 수행 등 3부분으로 구성되어 있다[3]. 이 중 특히 Monte Carlo 기법을 이용한 확률론적 파괴역학 해석(PFM, probabilistic fracture mechanics)은 가압열충격 과도상태 발생시 원자로 압력용기의 파손확률을 정량적으로 평가하기 위한 것으로 이를 위해 여러 가지 전산 프로그램들이 개발되었다[4,5]. 이들 전산코드들은 기본적으로는 유사한 방법을 적용하고 있으나 일부분에서 차이가 있어 전체적인 해석 결과에 영향을 미치게 된다. 따라서 PFM 해석의 신뢰성을 높이고 서로 다른 해석결과들을 이해하기 위해서는 이들 코드들간의 차이점 및 장단점을 이해해야 한다. 이 논문에서는 원자로 압력용기의 PFM 해석에 사용되는 두 개의 대표적인 전산코드 즉, FAVOR와 VISA-II 코드의 결정론적 및 확률론적 파괴역학 해석의 결과를 비교, 검토하였다.

2. 확률론적 파괴역학 해석 방법

원자로 압력용기의 PFM 해석 코드들은 약간의 차이는 있으나 기본적으로는 그림 1에 나타나있는 기본적인 절차에 따라서 해석을 수행한다.

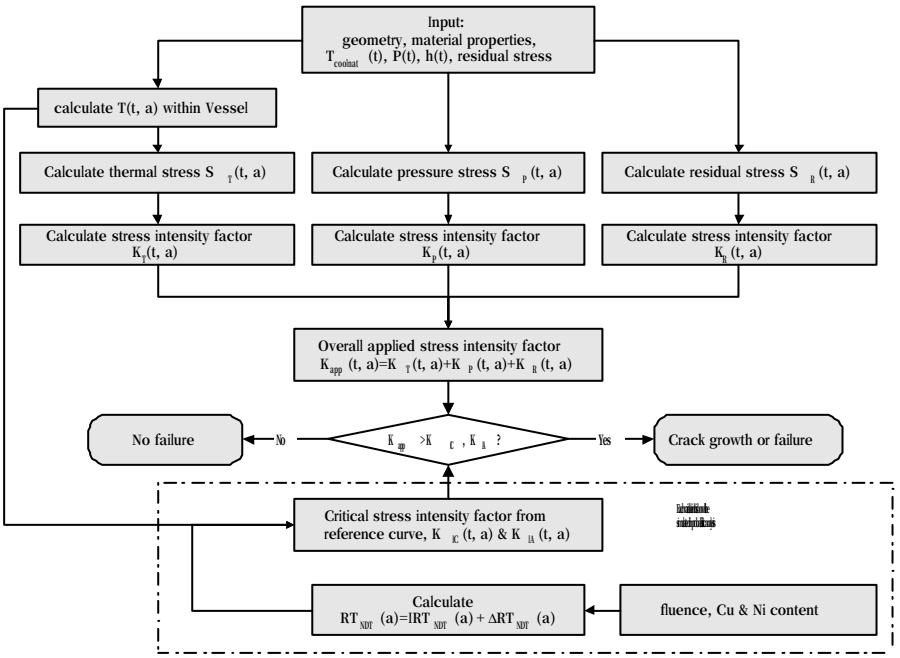

그림 1 확률론적 파괴역학 해석의 개략적인 흐름도

PFM 해석 코드는 크게 두 부분으로 구성되어 있다. 첫째, 열수력해석의 결과 원자로 압력용기 내벽에서의 온도, 압력, 열전달계수가 온도의 함수로 주어지면, 이를 기반으로 열전달/열전도해석, 응력해석, 응력확대계수 계산을 수행하여 응력확대계수, $K_{app}(t,a)$와 온도, $T(t,a)$를 시간과 위치의 함수로 산출하는 결정론적 파괴역학 해석(DFM, deterministic fracture mechanics analysis) 부분이 있다. 둘째로는 중성자 조사취화와 관련된 변수들을 Monte Carlo 기법을 이용하여 모사하고 이로부터 재료의 파괴인성, $K_{IC}(t,a)$ 및 $K_{IA}(t,a)$를 추출하여 $K_{app}(t,a)$와 비교함으로써 균열의 진전 여부를 판단하는 확률론적 파괴역학 해석(PFM, probabilistic fracture mechanics analysis) 부분이 있다. 여기에서는 이 중 VISA-II와 FAVOR 코드의 결정론적 파괴역학 해석 부분을 주로 비교하였다.

2.1 열전달/열전도해석

원자로 압력용기의 노심대 영역은 노즐이나 상·하부돔으로부터 충분히 떨어져 있어 열전달/열전도해석이나 응력해석시 축대칭의 1차원 판재나 원통으로 가정할 수 있다. 원자로 압력용기 벽 내부의 온도분포를 구하기 위해서는 아래의 식 1)과 2)로 주어지는 일반적인 열전달 및 열전도 방정식을 풀어야 한다.

$$-k \cdot \nabla T\big|_{wall} = h \cdot (T_{wall} - T_{\infty}) \qquad (1)$$

$$\nabla^2 T = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (2)$$

원통에서의 위 식에 대한 일반해는 Bessel 함수로 주어지므로 closed form solution을 구하기가 용이하지 않다. 이와는 달리 판재에서의 일반해는 삼각함수와 지수함수에 대한 series solution으로 표시될 수 있다. VISA-II 코드[4]는 원자로 압력용기를 판재로 가정하여 해석적인 해를 구하는 방법을 사용하며 따라서, 유체온도 역시 시간에 따른 함수의 형태로 제시되어야 한다. 즉, 유체의 온도는 지수함수로 주어지거나, 4차 다항식의 형태로 변환이 가능하도록 균일한 시간간격별로 온도가 주어져야 한다. 열전달계수 역시 시간에 대한 상수로 입력되어야 한다. 이와 같은 입력조건으로부터 원자로 압력용기 벽 내부의 온도분포가 구해지면 이후에 수행될 응력해석 및 응력확대계수 계산을 위하여 온도분포를 아래와 같이 4차 다항식의 형태로 근사하여 표시한다.

$$T(a,t) = B_0(t) + B_1(t) \cdot a + B_2(t) \cdot a^2 + B_3(t) \cdot a^3 + B_4(t) \cdot a^4 \qquad (3)$$

여기서, a = normalized flaw size, 균열깊이/두께

이와는 달리 FAVOR 코드[5]에서는 유한요소법(FEM, finite element method)을 이용하여 원통에 대한 열전달/열전도해석을 수행한다. 또한 유체온도, 압력, 열전달계수 등과 같은 열수력조건을 시간에 대한 임의의 데이터 쌍으로 입력할 수 있어 보다 정확한 해석이 가능하여 뛰어난 열전달/열전도해석 능력을 가지고 있다.

2.2 응력해석

원자로 압력용기에 작용하는 응력은 온도분포에 따른 열응력(σ_T)과 압력에 의한 응력(σ_P)으로 구분된다. 이 중 열응력은 원자로 압력용기내의 온도분포로 인한 응력성분(σ_t)과 클래딩과 모재간의 열팽창계수 차이로 인한 응력성분(σ_{clad})으로 편의상 구분될 수 있다. 즉,

$$\sigma_{total} = \sigma_t + \sigma_{clad} + \sigma_P \qquad (4)$$

VISA-II 코드에서는 이들 각각의 응력성분을 별도로 계산하여 그 총합으로 원자로 압력용기에 주어지는 응력을 구하는 중첩기법(superposition method)을 사용한다. 모재에 발생하는 열응력은 식 3)의 온도분포로부터 아래와 같은 4차 다항식 형태로 구해진다. 열전달/열전도 해석의 경우와

마찬가지로 일차원 slab geometry를 적용하였다. 이러한 방법으로 구한 응력분포는 온도분포와 같이 4차 다항식으로 표시된다.

$$s_t(t,a) = C_0(t) + C_1(t)\cdot a + C_2(t)\cdot a^2 + C_3(t)\cdot a^3 + C_4(t)\cdot a^4 \quad (5)$$

또한 클래딩과 모재의 열전도도 및 열팽창계수 차이로 인한 응력성분(σ_{clad})도 다항식의 형태로 근사하여 별도로 계산하였다.

무한 원통 내면에 가해지는 압력 P에 의해 원통 벽 내부에 작용하는 응력, σ_P는 해석적으로 간단히 구할 수 있으며 시간에 따른 압력의 변화는 4차 다항식으로 근사하여 사용한다. 압력변화를 다항식으로 근사되기 어려운 경우에는 보수적으로 입력하므로 과다한 보수성이 내재될 가능성이 높아진다.

FAVOR 코드도 기본적으로 각 응력성분을 우선적으로 구한 후 그 합으로 전체 응력을 계산하는 유사한 방법을 택하고 있다. 가장 큰 차이는 해석적인 다항식 형태의 해를 이용하는 VISA-II 코드와 달리 FAVOR는 FEM을 이용하므로 열응력과 압력에 의한 응력을 구하기 위해 입력을 지수함수나 다항식의 형태로 제한할 필요가 없다. 또한 응력 계산에 무한 원통을 사용하므로 무한 판재를 가정하는 VISA-II 코드에 비해 계산결과의 정확도면에서 뛰어나다.

2.3 응력확대계수 계산

응력분포의 계산이 완료되면 그 결과를 이용하여 특정한 크기의 균열선단에 작용하는 응력확대계수(SIF, stress intensity factor)를 구한다. VISA-II와 FAVOR 코드는 응력확대계수를 계산하는 과정에서는 다소 다른 접근방법을 택하고 있다. VISA-II에서는 응력과 마찬가지로 각 응력성분에 의한 응력확대계수 성분을 독립적으로 계산한 후 이들의 총합으로 균열선단에 작용하는 총 응력확대계수(K_{app}, applied SIF)를 구하지만, FAVOR에서는 전체 응력분포로부터 점하중에 대한 그린함수(Green's function)를 구하여 이를 균열선단까지 적분하여 총 응력확대계수를 구한다.

즉, VISA-II 코드에서는 아래와 같이 다항식의 형태로 주어진 응력성분에 의한 응력확대계수를 식 7)로부터 구한다[6].

$$s(x) = \sum_{n=0}^{N} S_n x^n \quad (6)$$

$$K = \sqrt{paW}\cdot \sum_{n=0}^{N} S_n F_n a^n \quad (7)$$

위 식의 S_n은 앞 절에서 계산된 각 응력성분의 다항식 계수이며 F_n은 영향계수(influence coefficient)로써 반경/두께비가 약 10인 원통에 대하여 3차 다항식의 형태로 주어져 있다. 위와 같이 각각의 응력성분에 대해 구한 응력확대계수, K_t, K_P, K_{clad}를 중첩하여 균열선단에 작용하는 총 응력확대계수 K_{app}를 구한다.

$$K_{app} = K_t + K_{clad} + K_P \quad (8)$$

이와는 달리 FAVOR에서는 각각의 응력성분에 대한 응력확대계수를 별도로 구하지 않고 균열선상에 작용하는 총 응력을 점하중으로 취급하여 각각의 점하중에 의해 균열선단에 작용하는 응력확대계수를 구하여 그 합으로 균열선단에 작용하는 총 응력확대계수 K_{app}를 구한다. 즉 균열선단에 작용하는 K_{app}는 아래 식 9)와 같이 구할 수 있다.

$$K = \sum_{i=0}^{N} s_i \cdot \Delta a_i \cdot K_i^*(a', a) \quad (9)$$

위 식에서 a는 균열깊이, a'는 점하중 σ_i가 작용하는 위치이다. 위의 $K^*(a,a')$은 원자로 압력용기의 형상(반경/두께비), 균열방향(축방향 혹은 원주방향), 균열형상(균열길이/깊이비) 그리고 a, a'

에 대하여 FEM 코드로 계산된 값들이 제공되어 있어야 한다[7]. 따라서 응력분포가 함수의 형태로 제한될 필요가 없는 대신 다양한 조건에서의 $K^*(a,a')$를 계산하는데 상당한 노력이 필요하다.

2.4 코드간 장단점 요약

앞에서 비교 검토한 두 코드간의 결정론적 파괴역학 해석의 특징을 표 1에 정리하였다. 열전달/열전도 해석의 경우 무한원통에 대한 해를 유한요소법으로 구하는 FAVOR 코드가 정확도면에서 뛰어나지만 클래딩/모재의 경계면이 명확히 구분되지 않는 단점을 가지고 있다. 열수력 입력조건을 처리함에 있어서도 FAVOR 코드는 상당히 신축적이어서 VISA-II 코드가 가지는 여러 제한조건에 구애받지 않고 자유로이 정확한 열수력조건을 입력할 수 있어 열전달/열전도 해석의 오차를 최소화할 수 있다.

응력해석 측면에서는 VISA-II 가 각각의 응력성분을 별도로 계산하여 각 응력성분들이 미치는 영향을 직접적으로 평가할 수 있는 장점을 가지고 있으나 열응력성분을 무한판재로 가정하여 구함으로써 다소의 오차가 생길 수 있고, 압력에 의한 응력성분을 구하기 위해 압력을 시간에 대한 다항식의 형태로 입력하여야 하는 단점을 가지고 있다.

응력확대계수를 계산하는 측면에서는 VISA-II 와 FAVOR 모두 무한원통을 가정하고 있으며 중첩의 원리를 이용한다는 측면에서 기본적으로는 큰 차이가 없다. 단지 VISA-II 코드는 다항식의 형태로 주어지는 영향계수를 사용하여 각 응력성분 별로 응력확대계수를 구한 후 그 합으로 균열선단에 작용하는 응력확대계수를 구하는데 비해 FAVOR 코드는 균열선상 각 위치에 작용하는 점하중으로 인해 균열선단에 작용하는 응력확대계수 성분들을 전체 균열길이에 대해 합을 구하여 균열선단에 작용하는 총 응력확대계수를 구한다는 차이가 있다.

표 1. 결정론적 파괴해석 각 모듈별로 VISA-II 코드와 FAVOR 코드의 특성 비교

Analysis Module		VISA-II	FAVOR
Thermal analysis	geometry	infinite slab	infinite cylinder
	temperature input	exponential or 4-th order polynomial (T(t))	exponential, linear, or time vs. T pairs
	solution method	analytical	FEM
	temperature output	4-th order poly. (T(a)) at each time step	point-wise values at each time step
	treatment of cladding	compensate difference in conductivity after thermal analysis	implicit in FEM analysis
	heat transfer coef.	constant	time vs. h pairs
Stress analysis	geometry	infinite slab except pressure stress which uses infinite cylinder	infinite cylinder
	total stress	superposition of each components	superposition of each components
	solution methods	analytical	FEM
	thermal stress	4-th order polynomial	- thermal stress and clad stress treated simultaneously - analytical solution of pressure stress is added - unable to handle residual stress
	pressure stress	analytical	
	residual stress	treatment module exist but not complete	
	clad stress	linear in clad and base, solution for axial flaw also applies for circ. flaw	
	pressure input	4-th order polynomial	t vs. P pairs
Stress intensity factor solution	geometry	infinite cylinder	infinite cylinder
	total SIF	superposition of SIFs from each stress components	superposition of each SIF from stresses acting on crack line
	solution methods	influence coefficient provided in 3-rd order polynomial	weight function as function of geometry and a′ & a
	thermal SIF output	4-th order poly. with influence coefficient	single SIF component
	pressure SIF output	hoop stress approx. as 4-th order poly.	
	residual SIF	treatment module exist but not complete	
	clad SIF output	linear in clad and base, solution for axial flaw also applies for circ. flaw	

3. 해석대상 PTS 과도상태

VISA-II와 FAVOR 코드간의 결정론적 및 확률론적 파괴역학 해석 방법의 차이로 인하여 해석 결과에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 대표적인 가압열충격 과도상태 조건에 대하여 코드간 해석 결과를 비교 분석할 목적으로 다음과 같은 2가지 과도상태조건을 선정하였다.

3.1 Extended HPI

Extended HPI 과도상태는 소형냉각재 상실사고 발생시 고압안전주입수가 장기간 주입되는 가상사고이며 SECY 82-465의 해석 결과에 의하면 이 단일 과도상태가 심사기준온도가 결정에 가장 큰 영향을 미친다[1]. 이 과도상태 기간동안 원자로 압력용기 벽면에서의 열전달계수는 300 BTU/hr-ft^2-°F, 압력은 2,25ksi로 일정하게 유지되면서 유체온도는 운전온도인 550°F로부터 $T_{coolant}$ = 125 + 425 × exp(-0,05 × time)에 따라 지수함수적으로 감소하는 사건이다. 이 때 사용된 원자로 압력용기의 재료물성치는 표 2에 간략히 정리되어 있으며, 기타 자세한 입력변수들은 참고문헌에 잘 정리되어 있다[1,8].

표 2 Extended HPI 사고에 대한 확률론적 파괴역학 해석시 사용된 입력변수

Material Property	Carbon Steel (Base & Weld)	Stainless Steel Cladding
Thermal Conductivity, BTU/hr-ft-°F	24,0	10,0
Specific Heat, BTU/lb-°F	0,12	0,12
Density, lb/ft3	489	489
Modulus of Elasticity, ksi	28000	28000
Thermal Expansion Coefficient, in/in-°F	8,5E-6	8,5E-6
Poisson's Ratio	0,3	0,3

이 과도상태의 특징은 1) 급속한 냉각으로 인한 큰 열응력 발생하고 고압이 지속적으로 유지되며, 2) 클래딩과 모재의 열팽창계수를 동일하게 적용함으로써 응력해석 및 응력확대계수 계산에 클래딩의 영향을 고려하지 않았다.

이에 따라 VISA-II와 FAVOR 코드간의 다음 특성을 비교할 수 있다.

1. 열수력조건이 상수 혹은 지수함수로 입력되어 입력상의 제한으로 인한 코드간 차이는 배제되므로 열전달/열전도해석시 두 코드간의 순수하게 해석방법상의 차이에 의한 결과를 비교할 수 있음.
2. 클래딩에 의한 추가적인 응력발생이 거의 없으므로 작용응력은 모재의 온도분포에 대한 열응력과 압력에 의한 응력만 존재하고 응력확대계수 계산에도 클래딩의 효과가 거의 없어 두 코드간의 순수하게 해석방법상의 차이에 의한 결과를 비교할 수 있음.

3.2 Rancho Seco Transient

이 과도상태는 1980년대초 가압열충격 현상에 대한 종합적인 안전성 평가를 수행하게된 근본적인 동기를 부여한 과도상태로 2차측의 주급수가 과잉 공급되면서 비상노심냉각수가 주입된 사건이다. 이 과도상태의 열수력조건은 그림 2에 나타난 바와 같다. 그림 2에서 보듯이 전체 과도상태 기간동안 압력은 최대 2,15ksi로부터 불규칙하게 진동하며 온도는 초기에 소폭 상승한 후 급속히 감소되는 사건이다. SECY 82-465 해석시에는 그림 2의 실제 압력-온도변화 대신 그림 3에 나타난 다항식의 형태로 변환하여 사용되었다[1]. 이 때 사용된 원자로 압력용기의 재료물성치는 Extended HPI 해석의 경우(표 2)와 유사하나 클래딩과 모재의 열팽창계수 차이를 고려하였다. 기타 입력변수들은 다른 곳에 정리되어 있다[1,8].

이 과도상태의 특징은 1) 중간정도의 냉각속도를 가지며 압력의 변화가 불규칙하여 다항식으로 근사되기 어려우며, 2) 클래딩과 모재의 열팽창계수를 달리 적용하여 응력해석 및 응력확대계수 계산시 클래딩이 영향을 미친다.

이에 따라 VISA-II와 FAVOR 코드간의 다음 특성을 비교할 수 있다.

1. FAVOR에는 실제 열수력조건이 정확히 사용되나 입력조건의 제한으로 인해 VISA-II 코드에서는 보수적인 열수력조건이 사용되므로 열수력입력조건의 결정론적 및 확률론적 해석에 미치는 영향을 비교할 수 있다.
2. 응력 및 응력확대계수 계산에 클래딩의 효과가 반영되므로 두 코드간의 클래딩 효과를 해석하는 방법상의 차이에 의한 결과를 비교할 수 있음.

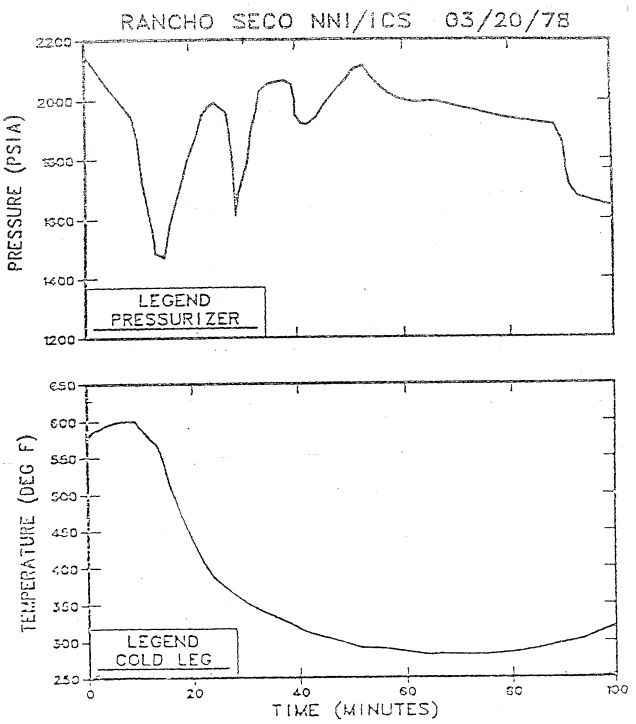

그림 2 Rancho Seco 원전에서 발생한 가압열충격 과도상태의 압력 및 온도변화

4. 결정론적 파괴역학 해석 결과

4.1 Extended HPI

그림 4 와 5에는 Extended HPI 과도상태 발생시 원자로 압력용기 벽 내부에서의 온도, 원주방향응력의 분포를 나타내었다. 그림 4에서 보듯이 30분에서 60분까지 VISA-II가 다소 낮은 온도분포(즉, 빠른 열전달/열전도)를 예측하였다. 그림 5에 나타난 응력분포를 보면 원자로 압력용기 내벽면 부근 특히 클래딩에서 VISA-II가 응력을 다소 낮게 계산하였다. 이는 VISA-II에서는 클래딩에 의한 응력계산시 열팽창계수의 차이에 의한 효과만을 고려하며 FAVOR에서는 열전도도 차이로 인한 효과까지 고려하기 때문이다. 실제 가상균열의 진전 및 파괴는 중성자조사량 및 온도에 의존하는 파괴저항(K_{IC})과 응력확대계수(K_{app})간의 관계에 의해 결정되므로 응력확대계수의 분포 대신 K_{app}를 K_{IC}와 비교한 결과를 그림 6과 7에 나타내었다. 이 때 재료의 중성자 조사취화 정도가 가압열충격 심사기준온도에 도달한 것으로 가정하고 그림 4의 온도분포로부터 파괴인성, K_{ICmean}(최대 200 ksi√in로 제한)을 계산하였다. 그림 6에 나타난 축방향균열의 경우 과도상태 발생 40분 이후에는 균열진전의 driving force인 K_{app} - K_{ICmean}이 약 0.25인치 부근에서 0보다 커진다. 균열크기 0.25인치 이하에서는 FAVOR가, 그리고 약 2인치까지는 VISA-II가 다소 큰 K_{app} - K_{ICmean}을 나타낸다.

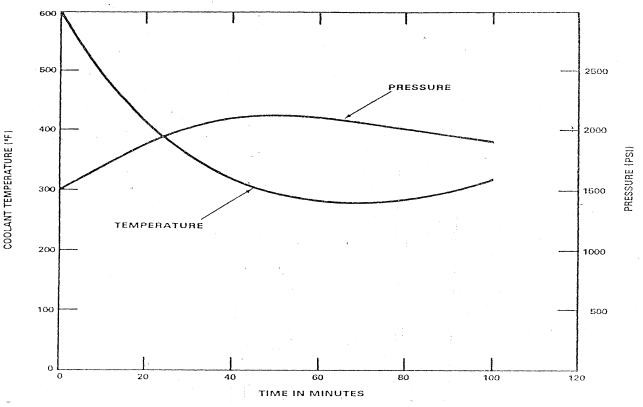

그림 3 SECY 82-465의 민감도 분석에 사용된 Rancho Seco 과도상태의 근사적인 온도-압력변화

원주방향균열에 대한 해석결과(그림 7)도 위와 유사한 결과를 보이나 40분 이후에 K_{app} - K_{ICmean}이 0보다 커지는 균열크기가 약 0.4인치로 축방향균열의 0.25인치에 비해 크게 증가한다. 이는 원

주방향 균열의 심사기준온도가 축방향균열에 비해 보수적으로 결정되었음을 간접적으로 시사하는 것이다[9]. 그림 6과 7을 비교하면 Extended HPI 과도상태 발생시 균열깊이 0.5인치 이전에 K_{app} - K_{IOmean}이 0보다 커져 상대적으로 분포확률이 높은 소형균열들이 원자로 압력용기의 파손에 기여할 가능성이 높아지며, 결과적으로 높은 파손빈도를 예상할 수 있다. 또한 원주방향 균열의 경우 VISA-II가 FAVOR 에 비해 큰 K_{app} - K_{IOmean}을 보이는 균열구간이 축방향균열에 비해 크게 나타나므로 두 코드간 파손확률의 차이가 원주방향균열에서 크게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

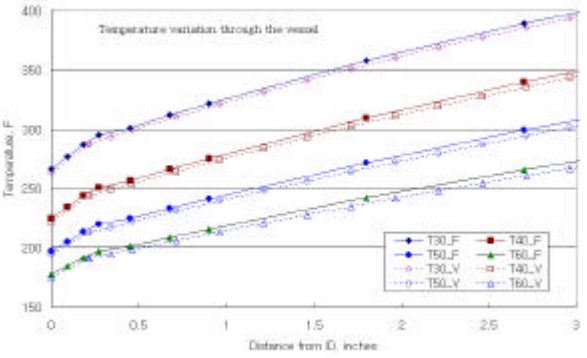

그림 4 Extended HPI 과도상태 발생시 온도분포

4.2 Rancho Seco Transient

그림 8과 9에는 Rancho Seco 과도상태 발생시 원자로 압력용기 벽 내부에서의 온도 및 원주방향응력 분포를 나타내었다. 그림 8에서 보듯이 30분에서 60분까지 VISA-II가 낮은 온도분포를 예측하였으며 그림 4에 나타난 Extended HPI 과도상태에 비해 코드간 차이가 크게 나타났다. 이는 열전달/열전도 해석상의 차이 이외에도 그림 2의 실제 온도조건대신 그림 3의 온도조건이 VISA-II의 입력으로 사용되었기 때문이다. 그림 9에 나타난 응력분포를 보면 원자로 압력용기 내벽면 부근에서 FAVOR가 응력을 크게 계산하였으며 Extended HPI 과도상태에 비해 그 차이가 증가하였다. 또한 두 코드의 해석결과 차이는 원자로 압력용기 내벽면에 가까울수록, 특히 클래딩 부위에서 더욱 크게 나타났다. 이는 VISA-II에서 클래딩에 의한 응력계산시 열전도도 차이에 의한 효과를 고려하지 않은 점과 온도구배가 FAVOR 해석에서 크게 나타나 열응력이 크게 계산되는 효과가 더해진 것이다. Extended HPI 과도상태의 경우와 같이 K_{app} - K_{IOmean}을 계산한 결과를 그림 10과 11에 나타내었다. 그림 10을 보면 균열진전의 driving force인 K_{app} - K_{IOmean}은 매우 큰 균열깊이까지 -50 ksi√in이하로 유지되며 균열진전이 일어나는 50 - 60분 경에는 VISA-II 코드가 크게 계산한다. 원주방향균열에 대한 해석결과(그림 11)도 위와 유사한 결과를 보이나, 대부분의 균열깊이에 대해 K_{app} - K_{IOmean}이 0보다 작아 균열진전의 가능성이 매우 낮을 것으로 예측할 수 있다.

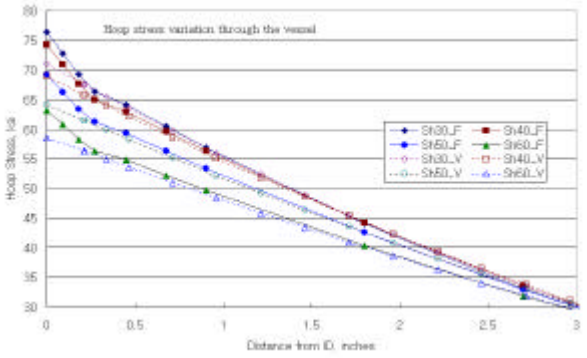

그림 5 Extended HPI 과도상태 발생시 원주방향 응력분포의 시간에 따른 변화

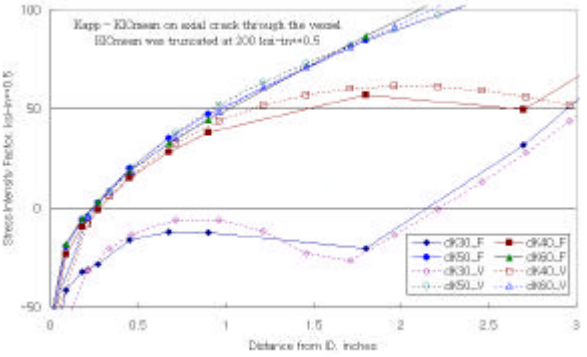

그림 6 Extended HPI 과도상태시 균열진전 driving force의 변화(축방향 무한균열, mean RT_{NDT} = 210 °F)

그림 10, 11을 비교하면 50 - 60분 경에 VISA-II에 의한 K_{app} - K_{IOmean}이 FAVOR에 의한 결과

보다 큰 균열영역이 원주방향균열의 경우에 더욱 크게 나타나므로 두 코드간의 계산된 파손확률의 차이가 축방향균열에 비해 원주방향균열에서 증가할 것으로 예상할 수 있다.

5. 확률론적 파괴역학 해석 결과

5.1 Extended HPI

Extended HPI 과도상태에 대한 확률론적 파괴역학 해석에 사용된 변수는 기본적으로 SECY 82-465 해석에 사용된 변수와 동일하게 사용하였으나 중성자 조사량의 감쇄계수는 SECY 82-465 해석에 사용된 0.33 대신 0.24를 사용하였고 무연성 천이기준온도 증가식은 Reg. Guide 1.99 Rev.2[10]에 제시된 식을 사용하였다.

그림 12에는 Extended HPI 과도상태 발생시 축방향균열에 대한 균열진전확률, P(I/E)와 파손확률, P(F/E)를 계산한 결과를 비교하였다. 우선 해석코드에 상관없이 균열진전확률과 파손확률이 거의 동일하게 계산되어 일단 진전된 균열은 정지되지 않고 최종 관통균열로 진행된다는 점을 두 코드에서 모두 예측하였다. 평균 무연성 천이기준온도, mean RT_{NDT}에 따른 파손확률의 변화는 해석 코드에 따라 조금씩 차이를 보이고 있다. Mean RT_{NDT} = 260°F를 경계로 그 이하에서는 VISA-II, 그리고 그 이상에서는 FAVOR 코드가 다소 큰 파손확률을 계산하였다. 그러나 가압열충격 심사기준온도에 해당하는 mean RT_{NDT} = 210°F 부근에서는 VISA-II 코드가 보수적인 결과를 제시하고 있다.

그림 13에는 Extended HPI 과도상태 발생시의 원주방향균열에 대한 균열진전확률과 파손확률을 계산한 결과를 비교하였다. Mean RT_{NDT}가 증가함에 따라 균열진전확률과 파손확률의 차이가 서서히 감소하여 약 260°F 부근에서는 그 차이가 없어지는 경향을 보인다. Mean RT_{NDT}에 따른 파손확률은 VISA-II 코드가 전 범위에 걸쳐 FAVOR보다 최소 1.5배 이상 크게 계산하였다. 이는 결정론적 해석결과 중 그림 8에 나타낸 K_{app} - K_{ICmean}을 비교한 것과 일치하는 결과이다. 즉, K_{app} - K_{ICmean} = 0이 되는 균열깊이 이상에서 VISA-II 코드가 지속적으로 큰 K_{app} - K_{ICmean} 을 계산하므로 결과적으로 파손확률을 크게 계산하게 되는 것이다. 축방향균열의 경우와 마찬가지로 가압열충격 심사기준온도에 해당하는 mean RT_{NDT} 부근에서는 VISA-II 코드가 보수적인 결과를 제시하

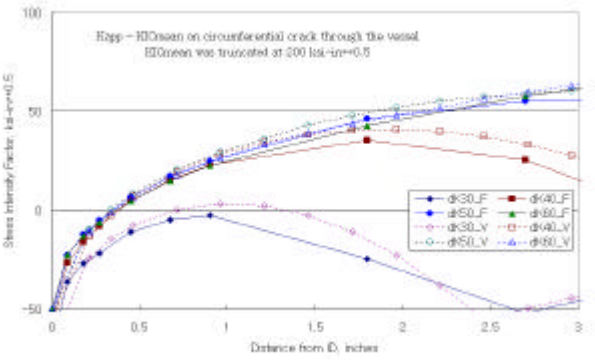

그림 7 Extended HPI 과도상태시 균열진전 driving force의 변화(원주방향 무한균열, mean RT_{NDT} = 240°F)

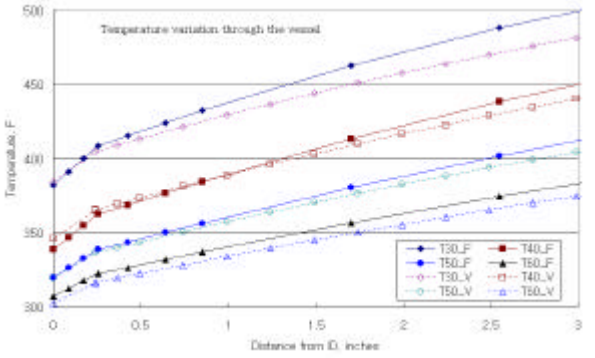

그림 8 Rancho Seco 과도상태시 원자로 압력용기 내부 온도분포의 시간에 따른 변화

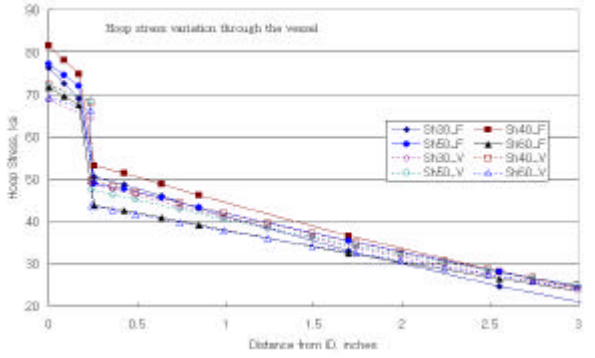

그림 9 Rancho Seco 과도상태시 원주방향 응력의 시간에 따른 변화

고 있다.

그림 12와 13의 결과를 비교하면 균열방향에 따른 파손확률 5×10^{-2}/Rx-yr에 해당하는 mean RT_{NDT} 의 차이가 VISA-II 코드를 이용한 경우에는 약 50°F, 그리고 FAVOR 코드를 이용한 경우에는 약 60°F로 계산되었다. 이는 균열방향에 따른 심사기준온도가 가압열충격 규정에 제시된 30°F보다 큰 50°F 이상이라는 최근의 연구 결과와 일치한 결과이다[9].

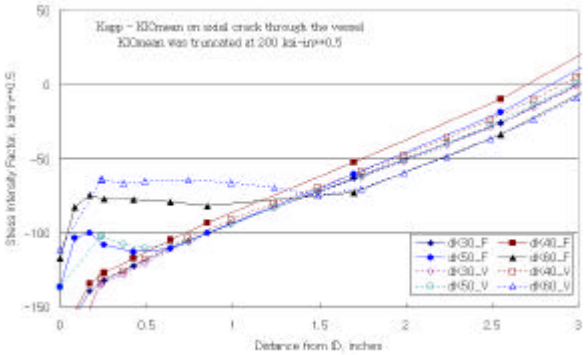

그림 10 Rancho Seco 과도상태시 균열진전 driving force 의 변화(축방향 무한균열, mean RT_{NDT} = 210°F)

5.2 Rancho Seco Transient

그림 14에는 Rancho Seco 과도상태 발생시 축방향 균열에 대한 균열진전확률과 파손확률을 계산한 결과를 비교하였다. VISA-II 코드는 균열진전확률과 파손확률이 거의 동일한 것으로 계산하였으나 FAVOR 코드에 의한 해석에서는 일부 균열 정지가 발생하는 것으로 계산되었다. Mean RT_{NDT}에 따른 파손확률은 VISA-II 코드가 일관되게 큰 값을 보였으며 이는 파손이 발생하는 시간대인 50 - 60분 경에는 균열크기 0.25 - 1.5인치 범위에서 VISA-II 코드에 의해 계산된 K_{app} - K_{ICmean}이 큰 것으로 설명될 수 있다.(그림 10 참조) 또한 그림 15에서 보듯이 원주방향균열에 대한 해석 결과의 차이가 축방향 균열에 대한 해석에 비해 크게 나타났으며 그 차이는 Extended HPI에 비해 증가하여 두 코드간의 파손빈도는 10배 이상으로 평가되었다. 이는 그림 10에 비해 그림 11에서 넓은 균열범위에서 VISA-II 코드가 K_{app} - K_{ICmean}을 크게 계산한 것과 일치하는 결과이다. 따라서 정확한 열수력조건을 입력으로 사용하는지 여부가 결정론적 해석에 큰 영향을 미치고 최종적으로는 확률론적 해석에도 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

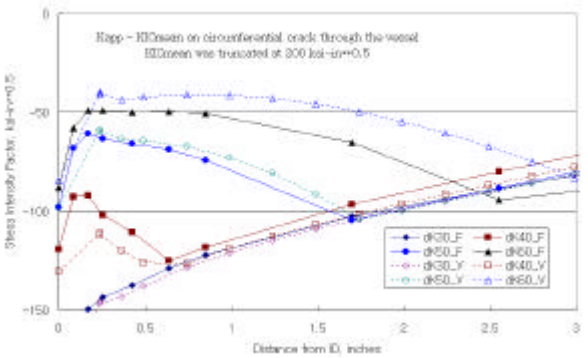

그림 11 Rancho Seco 과도상태시 균열진전 driving force 의 변화(원주방향 무한균열, mean RT_{NDT} =240°F)

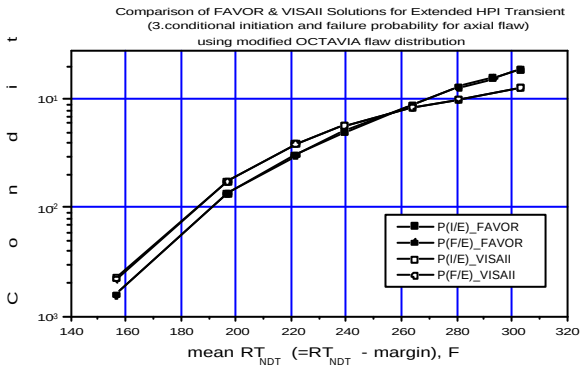

그림 12 Extended HPI 과도상태의 PFM 해석 중 축방향 균열의 파손확률

6. 요약 및 결론

확률론적 파괴역학 해석코드인 VISA-II와 FAVOR의 해석방법 및 결과를 비교 검토한 결과 다음과 같은 특성을 알 수 있었다.

1. 정확한 열수력조건을 입력으로 사용하는 것이 결정론적 해석에 중요하며 이러한 점에서 FAVOR 코드가 강점을 가지고 있다.
2. 동일한 열수력조건이 사용되는 경우 VISA-II 코드가 낮은 온도 및 응력분포를 보이나 균열

진전의 driving force인 K_{app} - K_{ICmean}은 대부분의 균열깊이에 대해 다소 크게 계산한다.

3. 동일한 열수력조건이 사용되는 경우 계산된 균열진전 driving force 차이는 원주방향균열에서 더 크게 나타났다.
4. 열수력조건이 다항식으로 근사되기 어려워 온도 및 압력변화를 보수적으로 적용하는 경우 VISA-II는 FAVOR에 비해 매우 큰 균열진전의 driving force를 계산한다.
5. 클래딩의 열팽창계수 차이가 고려되는 경우 두 코드간의 해석 결과의 차이는 더욱 증가하였다.
6. 가장 단순한 열수력 입력조건 및 재료물성치 조건이 적용된 Extended HPI 과도상태를 해석한 결과를 비교하면 가압열충격 심사기준온도에 해당하는 mean RT_{NDT} 부근에서는 VISA-II 코드가 약 1.5 내지 2 배정도 큰 파손확률을 계산하였다.
7. 열수력 입력조건 및 재료물성치 조건이 복잡해질수록 VISA-II코드가 더욱 보수적이었으며, 동일한 조건에서는 원주방향균열에 대한 해석에서 차이가 더 크게 나타났다.

위와 같은 결과를 바탕으로 PFM 코드의 개선을 위해서는 다음과 같은 사항들이 고려되어야 할 것으로 판단되었다.

1. 결정론적 파괴역학 해석 수행시 제한조건이 많은 해석적인 방법보다는 유한요소법을 사용하는 것이 바람직하다.
2. FAVOR에서 응력확대계수를 계산하는 방법은 많은 데이터베이스를 요구하므로 코드 개선시 고려하기 어려운 점이 있다.
3. 결정론적 해석시 클래딩과 모재의 열전도도 및 열팽창계수의 차이가 충분히 고려되도록 하여야 한다.

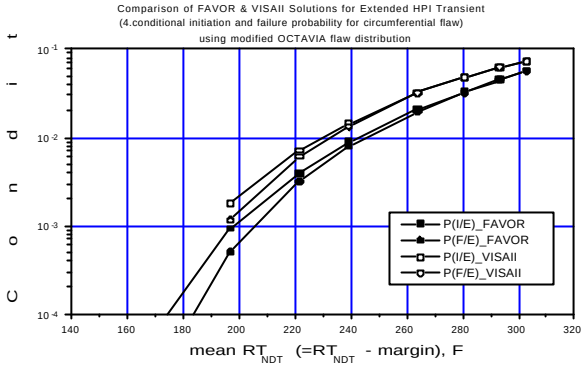

그림 13 Extended HPI 과도상태의 PFM 해석 중 원주방향 균열의 파손확률

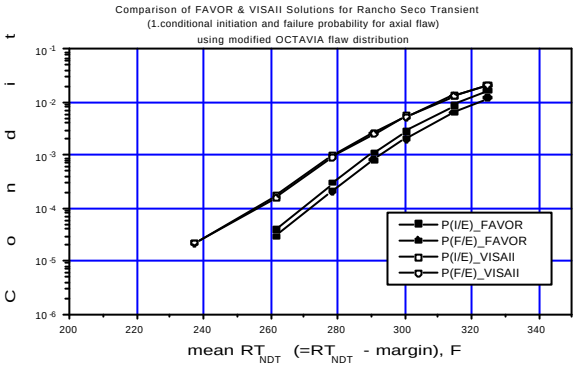

그림 14 Rancho Seco 과도상태의 PFM 해석 중 축방향 균열의 파손확률

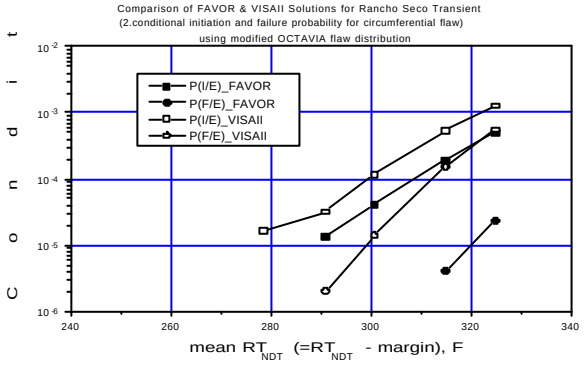

그림 15 Rancho Seco 과도상태의 PFM 해석 중 원주방향 균열의 파손확률

참고문헌

1. USNRC, *NRC Staff Evaluation of Pressurized Thermal Shock*, SECY 82-465, 1982.
2. USNRC, Code of Federal Regulation 10CFR50.61, *Fracture Toughness Requirements For Protection Against Pressurized Thermal Shock Events*, 1985, 1991 and 1995.

3. USNRC, Regulatory Guide 1.154, *Format And Content Of Plant-Specific Pressurized Thermal Shock Safety Analysis Reports For Pressurized Water Reactors*, Jan. 1987.
4. F. A. Simonen et al. *VISA-II, A Computer Code for Predicting the Probability of Reactor Vessel Failure*, Battelle Pacific Northwest Laboratories, USNRC Report NUREG/CR-4486, April 1986.
5. T. L. Dickson, *FAVOR: A Fracture Analysis Code for Nuclear Reactor Pressure Vessels, Release 9401*, ORNL/NRC/LTR/94/1, 1994.
6. X. R. Wu and A. J. Carlsson, *Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions, Pergamon Press*, New York, 1991.
7. D. G. Ball et al., *OCA-II, A Code for Calculating the Behavior of 2-D and 3-D Surface Flaws in a Pressure Vessel Subjected to Temperature and Pressure Transient*, Oak Ridge National Laboratory, USNRC Report NUREG/CR-3491, Feb. 1984.
8. 장 창희, *확률론적 파괴역학해석 전산코드간 비교분석: FAVOR와 VISA-II 코드*, KEPRI TM[96NJ12.R1998.575, 1998.
9. 장 창희, 정 일석, "원자로 압력용기 원주방향 용접부의 가압열충격 심사기준온도의 적정성 평가," '98 한국원자력학회 춘계학술대회 논문집, pp. 369 - 376, 수원, 1998. 5 .29 - 30.
10. USNRC, Regulatory Guide 1.99 Rev. 2, *Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials*, May 1988.