

결함 건전성평가를 위한 원자력발전소 통합데이터베이스 관리시스템 개발
Development of an Integrated DataBase Management System
to Evaluate integrity of flawed components of Nuclear Power Plant

문호림 · 최성남 · 장기상 · 홍승열

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

최재봉 · 김영진

성균관대학교 기계공학부
경기도 수원시 장안구 천천동 300

요약

원자력발전소의 가동중 점검시 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI의 허용기준을 초과하는 결함이 발견되면 기기의 건전성을 평가하여야 한다. 이를 위해서는 기기에 따른 형상, 운전조건, 재료물성치, 그리고 응력해석결과 등이 필요하다. 특히 응력 데이터는 파괴역학해석을 위한 기본적인 데이터로써 각 주요기기 별로 작용하는 운전조건에 대해 응력해석을 수행하여 작성하여야 한다. 하지만 국내에는 이러한 데이터베이스가 제대로 구축되어 있지 않다. 이로 인해 결함 건전성평가가 외국 자료와 기술에 의존하게 되어 경제적, 시간적 손실을 초래하게 된다. 따라서, 다양한 국내 원자력발전소의 특성에 맞는 결함 건전성평가의 기술력을 축적하고 국내 가동중인 원자력발전소의 결함 건전성평가를 위해 주요기기의 각 부위에 대한 데이터를 포함한 형상, 치수, 재료물성치, 운전조건, 응력 데이터베이스가 구축되어야 한다. 또한 각 데이터베이스를 종합적으로 관리할 수 있는 통합 데이터베이스 시스템의 구축이 필요하다.

본 연구의 목적은 원자력발전소 주요기기의 결함 건전성평가에 필요한 방대한 양의 데이터를 통합하여 관리할 수 있는 NPP-IDBMS를 개발하는 것이다. 이를 위해 첫째, 결함 건전성평가에 필요한 데이터들의 상호관계를 규정하여 NPP-IDBMS의 관계형 데이터 모델을 제시하였다. 둘째, 본 연구에서 제시한 관계형 데이터 모델을 이용하여 원자력발전소 주요기기의 결함 건전성평가를 위한 NPP-IDBMS를 개발하였다. 총 8기의 국내 가동중인 원자력발전소에 대한 형상, 운전조건, 재료물성치, 응력 데이터베이스를 구축하였고, 특히, 결함 건전성평가에 필요한 응력 데이터를 유한요소해석(finite element analysis)을 통해 추출하고 응력 데이터베이스에 추가하였다.

Abstract

The object of this paper is to develop an NPP-IDBMS(Integrated DataBase Management System for Nuclear Power Plants) for evaluating the integrity of components of nuclear power plant using relational data model. This paper describes the relational data model, structure and development strategy for the proposed NPP-IDBMS. The NPP-IDBMS consists of database, database management system and interface part. The database part consists of plant, shape, operating condition, material properties and stress databases, which are required for the integrity evaluation of each component in nuclear power plants. For the development of stress database, an extensive finite element analysis was performed for various components considering operational transients. The developed NPP-IDBMS will provide efficient and accurate way to evaluate the integrity of flawed components.

1. 서론

국가산업의 기간이 되는 원자력발전소의 주요기기에는 원자로압력용기(reactor pressure vessel), 가압기(pressurizer), 증기발생기(steam generator), 배관(piping) 등이 있다. 이들 주요기기는 원자력발전소의 특성상 고온, 고압의 열악한 환경하에서 가동되며 이로 인해 부식, 기계적 응력 및 진동 등이 지속적으로 작용한다. 이러한 가동중 운전조건으로 인해 주요기기에서의 결함발생 가능성이 있다. 결함발생으로 주요기기가 파손되면 막대한 경제적, 인적, 사회적 피해를 초래할 수 있으며, 보수 및 교체 또한 매우 어렵기 때문에 이들 결함에 대한 신속하고 정확한 건전성평가 체계의 확립은 원자력발전소의 안정적인 운영에 필수적인 조건이라 할 수 있다.

국내 원자력발전소의 설계회사는 미국의 Westinghouse, Combustion Engineering, 캐나다의 AECL과 프랑스의 Framatome 등으로 다양하다. 이로 인해 국내 가동중인 원자력발전소는 제작자에 따라 설계사양이 각각 다르고 이에 따른 설계 데이터 또한 서로 상이하다. 뿐만 아니라, 이들 데이터는 그 양이 방대하고 복잡함에도 불구하고 전산화가 이루어져 있지 않아 체계적인 관리나 효율적인 이용이 어려운 실정이다.

원자력발전소의 가동중 점검시 결함이 발견되면 ASME Sec. XI[1]의 규정된 절차에 따라 결함 건전성평가를 수행한다. 이때 원자력발전소 주요기기의 각 부위에 대한 형상, 운전조건, 재료물성치, 그리고 응력해석 결과 등이 필요하다. 특히, 응력 데이터는 파괴역학해석을 위한 기본적인 데이터로서 각 주요기기 별로 작용하는 운전조건에 대해 응력해석을 수행하여 작성되어야 한다. 선진각국에서는 원자력발전소 설계시에 설계조건을 고려한 응력해석을 수행하고 이를 파괴역학해석시 반영하고 있으나, 국내에서는 가동중인 원자력발전소에 대한 응력 데이터베이스가 구축되어 있지 않다. 현 상황에서의 기술도입은 막대한 자금과 전문인력의 투입이 필요하다. 또한 결함 건전성평가가 필요할 때마다, 이를 외국기관에 의뢰하게 되면, 경제적, 시간적 손실을 초래하게 되는 것은 물론, 기술적 종속관계에서도 벗어날 수 없다. 따라서 다양한 국내 원자력발전소의 특성에 따른 결함 건전성평가의 기술력을 축적하고, 국내 가동중인 원자력발전소의 결함 건전성평가를 위해 해석시 필요한 재료물성치, 운전조건 데이터와 응력해

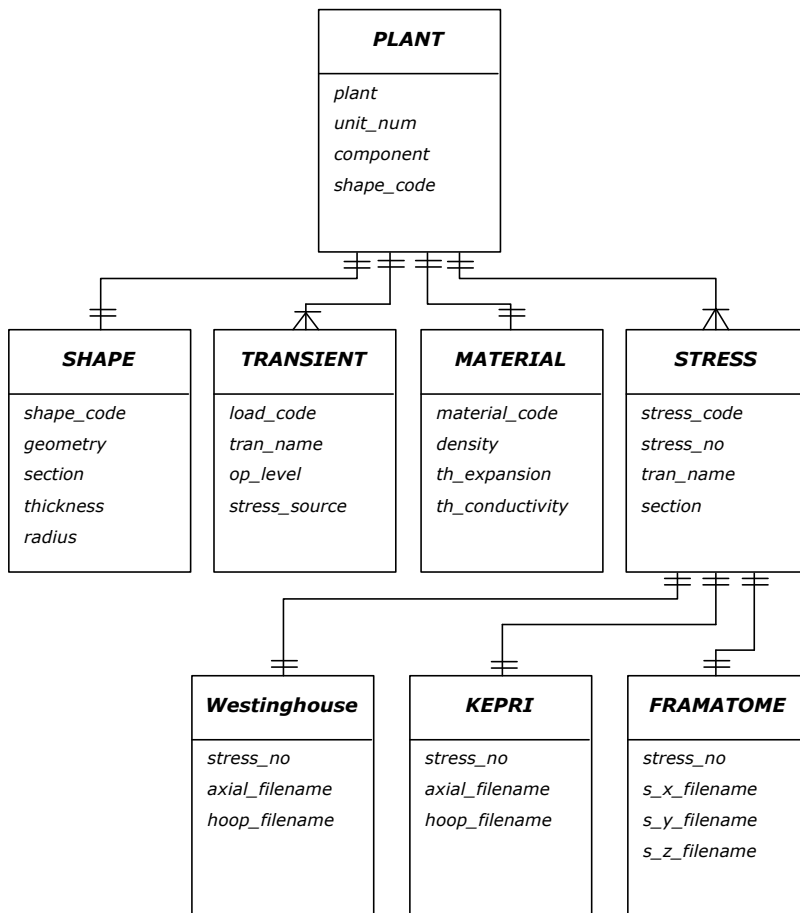


그림 1 Relational data model for NPP-IDBMS

석시 생성되는 응력 데이터 등의 방대한 양의 데이터를 종합적으로 관리할 수 있는 통합 데이터베이스 시스템의 구축이 필요하다.

본 연구의 목적은 원자력발전소 주요기기의 결함 건전성평가에 필요한 방대한 양의 데이터를 통합하여 관리할 수 있는 NPP-IDBMS를 개발하는 것이며, 이를 위해 첫째, 원자력발전소 주요기기에 존재하는 결함의 건전성평가 방법을 분석한 후 결함 건전성평가에 필요한 데이터들의 상호관계를 규정하고 원자력발전소 주요기기의 결함 건전성평가를 위한 NPP-IDBMS의 관계형 데이터 모델을 제시하였다. 둘째, 본 연구에서 제시한 관계형 데이터 모델을 이용하여 원자력발전소 주요기기의 결함 건전성평가를 위한 NPP-IDBMS를 개발하였다. 총 8기의 국내 가동중인 원자력발전소에 대한 형상, 운전조건, 재료물성치, 응력 데이터베이스를 구축하였고, 특히, 결함 건전성평가에 필요한 응력 데이터를 유한요소해석을 통해 추출하고 응력 데이터베이스에 추가하였다.

2. NPP-IDBMS 개발

본 연구에서 구축한 NPP-IDBMS는 원자력발전소 주요기기의 결함 건전성평가와 관련된 형상, 운전조건, 재료물성치 및 응력 데이터의 저장을 위한 데이터베이스부와 이를 효과적으로 관리하기 위한 데이터베이스 관리시스템부로 나누어 구성하였다. Windows 95/98환경하에서 전체 시스템을 개발하였으며 프로그래밍 언어는 Microsoft Visual C++[2]를 사용하여 개발하였다. 데이터베이스는 관계형 데이터베이스인 Microsoft Access[3]를 사용하여 구축하였다.

원자력발전소 주요기기의 결함 건전성평가에 필요한 모든 데이터를 정의하였으며, 각 데이터의 특성을 정확히 파악하여 필요에 따라 분류하였다. 관계형 데이터 모델의 단점인 예측 가능한 질의의 형태에 대한 응답속도 지연을 극복하기 위해 분류된 데이터 즉, 테이블간의 관계를 명확히 규명하여 결함(join) 연산을 최소화하고 색인(index)을 효과적으로 운영하여 데이터 모델을 작성하였다. 그림 1은 본 연구에서 제시한 원자력발전소 주요기기의 결함 건전성평가를 위한 NPP-IDBMS의 관계형 데이터 모델이다.

2.1 데이터베이스 부

2.1.1 발전소 데이터베이스

발전소 데이터베이스는 데이터베이스를 연결하는 핵심적인 역할을 하며, 주요 데이터로 발전소명, 호기, 기기 및 각 부위에 대한 정보를 저장하고 있다.

2.1.2 형상 데이터베이스

형상 데이터베이스에는 원자력발전소 주요기기에 대한 각 부위별 형상 및 치수 데이터를 저장하였으며, 각 데이터는 해당 실물도면을 비트맵 형태의 그림파일로 저장하였다.

2.1.3 운전조건 데이터베이스

운전조건 데이터베이스는 발생빈도가 높은 모든 설계과도 운전조건을 고려하여 구성하였다. 각 주요기기에 작용하는 운전조건에 대해 시간에 따른 온도변화와 내압변화 등을 정상운전조건(Level A, B)과 비상운전조건(Level C, D)으로 분류하여 저장하였다.

2.1.4 재료물성치 데이터베이스

재료물성치 데이터베이스에는 건전성평가에 필요한 항복강도, 인장강도, 포아송 비, 열팽창계수, 밀도, 열전도계수 등의 데이터를 저장하였다[4].

2.1.5 응력 데이터베이스

본 연구에서 구축한 응력 데이터베이스는 Westinghouse, Framatome 및 KEPRI의 3개의 부분으로 구성하였다. Westinghouse와 Framatome 응력 데이터베이스는 배관 및 펌프를 포함한 주요기기에 대해 Westinghouse와 Framatome에서 작성한 응력 보고서[5~6]를 이용하여 구성하였다. KEPRI 응력 데이

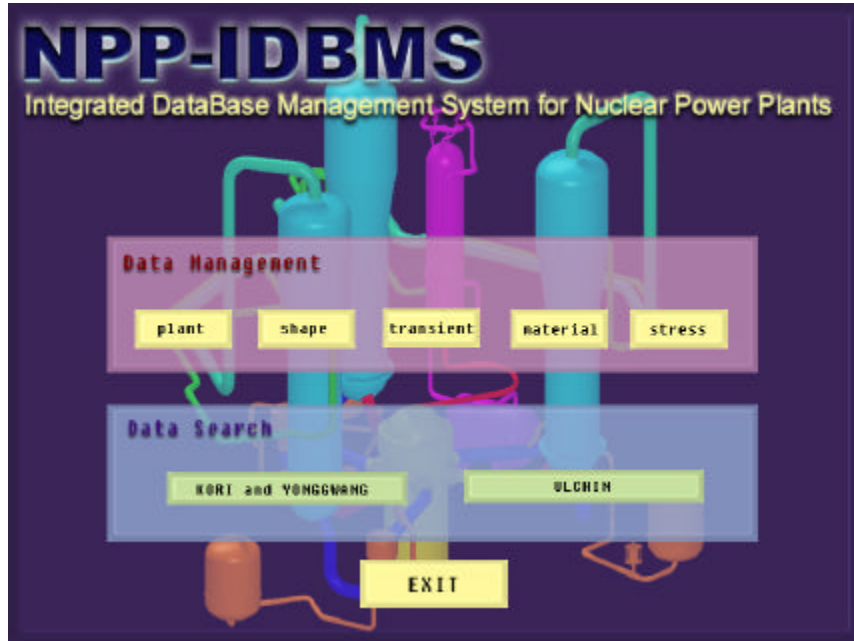


그림 2 Main window for NPP-IDBS

터베이스는 국내 가동중인 원자력발전소 총 6기의 주요기기에 대한 자체적인 유한요소해석을 수행하여 응력 데이터를 생성, 저장하여 구축하였다.

2.2 통합데이터베이스 관리시스템 부

데이터베이스 관리시스템부는 각각의 독립적인 발전소, 형상, 운전조건, 재료물성치, 응력 데이터베이스를 효율적으로 관리할 수 있도록 유기적으로 연결하여 구성하였다. 데이터베이스 관리시스템부는 그림 2와 같이 데이터베이스 관리자가 데이터를 추가, 수정, 삭제할 수 있는 관리모듈과 사용자가 데이터를 검색할 수 있는 검색모듈로 분류하여 구성하였다

3. KEPRI 응력 데이터베이스 구축

응력 데이터는 파괴역학분석을 위한 기본적인 데이터로서 각 주요기기 별로 작용하는 운전조건에 대해 응력해석을 수행하여 작성하여야 한다. 선진각국에서는 원자력발전소 설계시에 설계조건을 고려한 응력해석을 수행하고 이를 파괴역학분석시 반영하고 있다.

본 논문에서는 국내 가동중인 원자로 발전소를 모델로 설정하여 각 주요기기에 대한 응력해석을 수행하고 이를 응력 데이터베이스에 추가하였다. 해석대상은 원자로 압력용기, 증기발생기, 가압기이며 결함 발생 확률이 높은 부위에 대하여 실제 운전조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 응력해석에는 범용 유한해석 프로그램인 ABAQUS[7]를 사용하였으며, 해석결과 출력된 응력 데이터를 축방향, 원주방향 등으로 분류, 저장하여 파괴역학분석시 효율적인 사용이 가능하도록 하였다.

3.1 해석모델

사례연구로서 국내 가동중인 원자로 압력용기 하부 헤드와 벨트라인 부분을 해석모델로 설정하였으며, 해석에 사용한 원자로 압력용기의 기하학적 형상은 그림 3과 같다. 원자로 압력용기 하부 헤드의 재질은 SA533 Grade A Class 1, 벨트라인 영역 재질은 SA533 Grade B Class 1, 클래딩 재질은 309 스테인레스 강이다. 응력해석에 사용된 온도에 따른 재료물성치는 표 1에 수록하였다. 원자로 압력용기의 축대칭을 고려하여 3차원 형상을 2차원 축대칭 모델로 단순화하고, 경계조건은 그림 4와 같이 설정하였다. 해석에 사용한 유한요소모델은 그림 5와 같다. 요소망 작성에는 형상 및 경계조건을 고려하여 2차

표 1 Material properties used for finite element analyses.

Material	Temp. (°F)	Modulus of Elasticity (psi)	Coeff. of Thermal Expansion (in/in/°F)	Poisson's Ratio	Specific Heat (Btu/lb-°F)	Thermal Conductivity (Btu/sec-in-°F)	Density (lb/in ³)
SA533 Grade-A Class1	70	29.9e6	7.02e-6	0.3	0.106	0.000516	0.283
	200	28.5e6	7.49e-6	0.3	0.114	0.000542	0.283
	300	28.0e6	7.74e-6	0.3	0.119	0.000551	0.283
	400	27.4e6	8.01e-6	0.3	0.125	0.000551	0.283
	500	27.0e6	8.25e-6	0.3	0.131	0.000544	0.283
	600	26.4e6	8.46e-6	0.3	0.138	0.000532	0.283
	700	25.3e6	8.63e-6	0.3	0.143	0.000509	0.283
SA533 Grade-B Class1	70	29.2e6	7.02e-6	0.3	0.105	0.000539	0.283
	200	28.5e6	7.49e-6	0.3	0.114	0.000546	0.283
	300	28.0e6	7.74e-6	0.3	0.120	0.000571	0.283
	400	27.4e6	8.01e-6	0.3	0.126	0.000569	0.283
	500	27.0e6	8.25e-6	0.3	0.131	0.000560	0.283
	600	26.4e6	8.46e-6	0.3	0.136	0.000544	0.283
	700	25.3e6	8.63e-6	0.3	0.142	0.000527	0.283

NOTE: THICKNESSES DO NOT INCLUDE INSIDE CLADDING

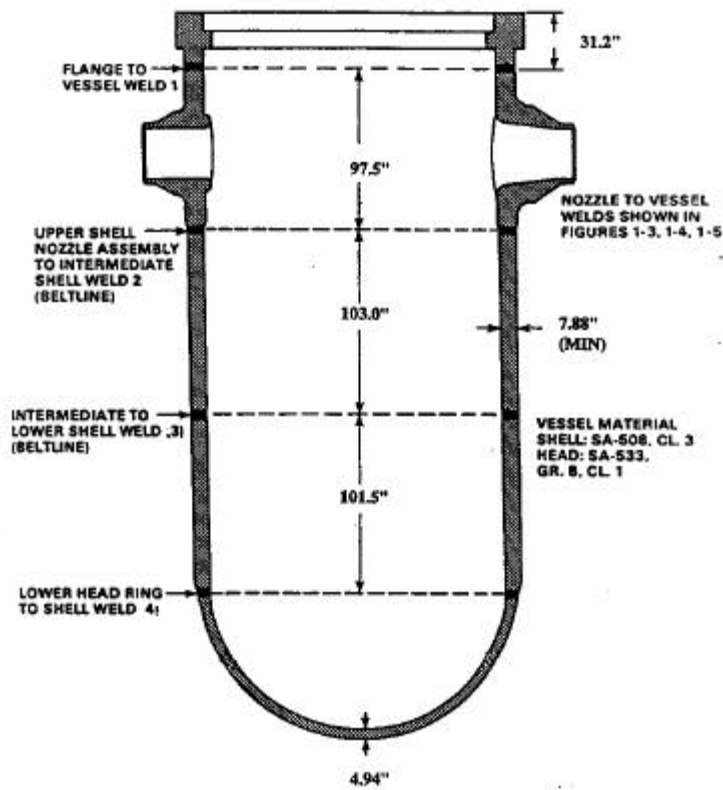


그림 3 RPV used for the analysis.

원 8절점 축대칭요소를 사용하였으며, 요소 수 1,220개, 절점 수 3,925개로 모델링하였다. 해석대상은 총 4부위로 Upper shell transition, Beltline, Bottom head to shell weld, Bottom head to shell transition이다. 이 부위의 요소망은 정확한 해석결과를 위해 조밀하게 구성하였다.

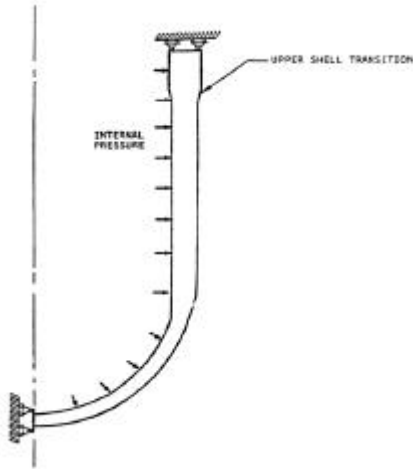


그림 4 Applied boundary conditions.



그림 5 2-D finite element model.

3.2 응력해석

응력해석은 각 운전조건에 따라 내압과 열응력을 동시에 고려하여 수행하였다. ASME Sec. III[15]에서는 클래딩 부위를 구조물의 설계 응력기준 적용시 포함하지 않도록 규정함에 따라 유한요소 모델 구성시에는 클래딩 부위를 제외하였다. 그러나 열응력이 존재하는 경우 클래딩의 열전달 효과를 무시할 수 없으므로 내벽에 존재하는 유체의 막열전달계수와 클래딩의 열저항을 조합하여, 이를 고려하였다. 내벽접촉 유체에 클래딩 효과를 고려하여 수정한 유효열전달계수(H_{eff}) 식은 다음과 같다[8].

$$H_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{H} + \frac{1}{(K_c/T_c)}} \quad (1)$$

여기서,

H = Heat transfer fluid film coefficient

K_c = Cladding material conductivity

T_c = Cladding thickness

이다.

용접부위 중 4부위를 해석부위로 설정하고 총 27가지의 설계과도 운전조건에 대하여 해석을 수행[9]하였다. 그 결과를 개발된 데이터베이스에 저장하여, 총 108가지(운전조건 × 해석 대상부위 = 27 × 4 = 108) 경우에 대한 응력 데이터를 확보하였다.

3.3 해석결과

그림 6과 그림 7은 해석한 4 부위중 Bottom head to shell transition의 응력해석 결과이다. 그림 6은 정상 운전조건 중 Inadvertent RCS depressurization 운전조건에 대한 해석결과이다. 최대응력이 발생하였을 때의 원주방향 응력분포를 살펴보면, 내벽에서는 인장응력이 외벽에서는 약간의 압축응력이 나타났다. 그림 7은 Reactor trip with cooldown and safety injection 운전조건에 대한 해석결과로 내·외벽에서 모두 인장응력이 발생하였다. 본 연구에서 수행한 응력해석 결과의 검증을 위해 동일한 조건으로 웨스팅하우스에서 해석한 결과를 비교하였다. 그 결과 그림 6과 그림 7에서 볼 수 있듯이 전 구간에서 걸쳐 두 값은 거의 일치하는 경향을 나타냈으며 이를 통해 본 응력해석 결과의 타당성을 확인하였다. 이와 같은 방법으로 국내 가동중인 원자력발전소 주요기기에 대한 응력해석을 수행하였으며 이를

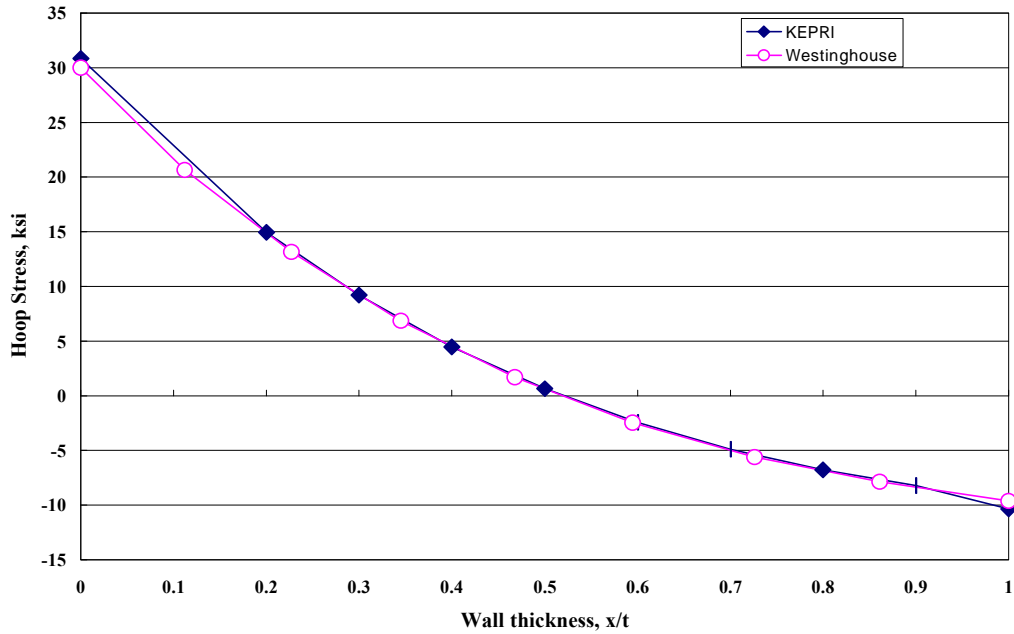


그림 6 Stress distribution for the inadvertent RCS depressurization

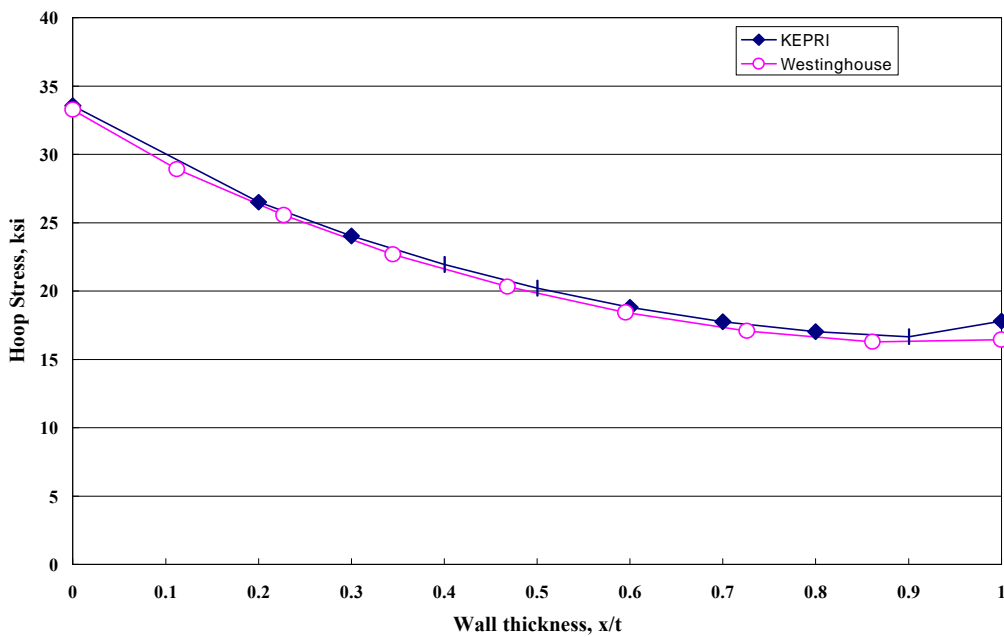


그림 7 Stress distribution for the reactor trip with cooldown and safety injection

통해 얻은 응력 데이터를 KEPRI응력 데이터베이스에 저장하였다.

3.4 응력 데이터베이스 구성

그림 8은 KEPRI 응력 데이터베이스 화면으로 관심부위에 대한 유한요소모델을 볼 수 있는 메뉴와 축 방향응력, 원주방향응력을 볼 수 있는 메뉴로 구성하였다. 응력 데이터베이스에는 결함이 검출된 부위에 대한 응력 데이터를 선택할 수 있도록 검색대상과 운전조건, 관심부위 및 응력 데이터를 저장하였다. 유한요소모델은 비트맵 파일로 저장하였으며, 응력 데이터는 텍스트 파일 형태로 저장하였다.

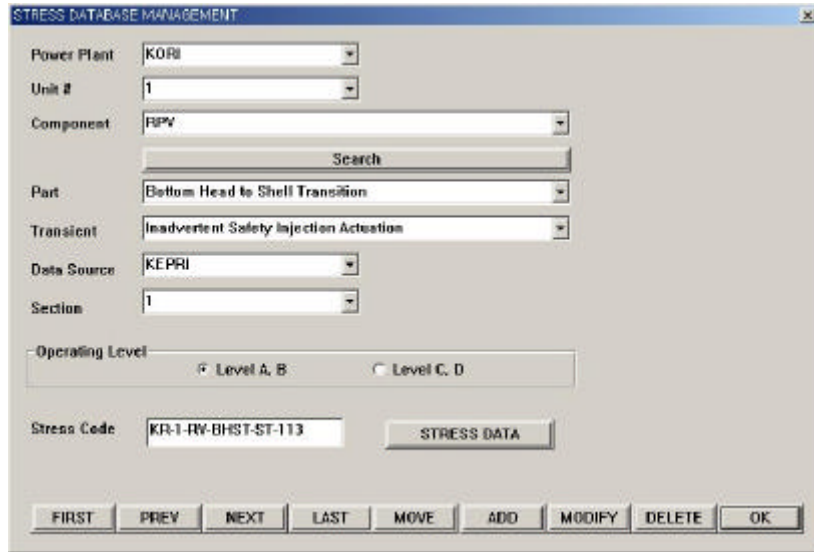


그림 8 Main window for KEPRI stress database

그림 9와 그림 10은 위의 응력해석 결과 중 Inadvertent RCS depressurization 운전조건에 대한 검색 결과로서 벽 두께방향으로의 응력분포를 텍스트와 그래프로 출력한 예이다.

Distances Through the Wall(a)	Max. Stress
0.0000	38.85300
0.2500	34.82500
0.5000	3.18700
0.7500	4.48300
1.0000	8.61500
1.2500	-2.43700
1.5000	-4.90100
1.7500	-6.77300
2.0000	-8.11000
2.2500	-10.38800

그림 9 An example of stress data

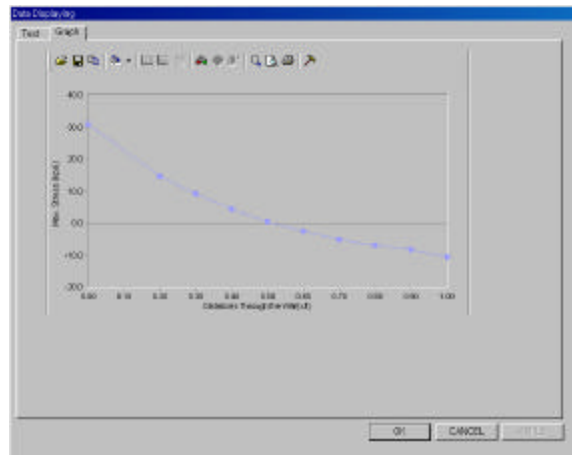


그림 10 An example of graphic display

원자력발전소 가동중 점검시 결함이 발견된 경우, ASME Sec. XI[1]에 규정된 절차에 따라 파괴역학 분석을 수행하게 되는데 이때 저장된 응력 데이터를 직접 이용할 수 있다. ASME Sec. XI에서는 발견된 결함을 내부결함과 표면결함으로 이상화하도록 규정하고, 이상화된 각각의 결함에 대하여 응력확대계수 계산식을 제시하였다. 표면결함의 경우, 응력확대계수 계산에 사용되는 결함위치에서의 응력분포는 3차 다항식 형태로 이상화하여 사용하도록 규정하고 있으며, 이때 응력분포식은 다음과 같다.

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \quad (2)$$

여기서,

x = 내벽으로부터의 거리($0 \leq x/a \leq 1$)

a = 결함깊이

A_0, A_1, A_2, A_3 = 상수

이다.

표면결함에 대한 응력확대계수는 식 (2)의 상수 $A_0 \sim A_3$ 를 이용하여 다음과 같이 결정한다.

$$K_1 = [(A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3] \sqrt{\pi a / Q} \quad (3)$$

여기서,

A_p = 내압

G_0, G_1, G_2, G_3 = 자유표면수정계수

Q = 결함형상계수

이다.

결함형상계수 Q 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q = 1 + 4.593(a/d)^{1.65} - q_y \quad (4)$$

여기서,

l = 결함깊이

a/l = 결함비($0 \leq x/l \leq 0.5$)

q_y = 소성역 보정계수

$$= [(A_0G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3) / \sigma_{ys}]^2 / 6$$

이다.

식 (2)로 정의되는 응력분포는 개발된 응력 데이터베이스로부터 직접 구할 수 있으며, 이를 파괴역학 분석을 위한 프로그램과 연결할 경우, 각 주요기기의 모든 운전조건에 대한 결함건전성평가를 신속, 정확하게 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 가동중인 원자력발전소의 주요기기에 대한 형상, 치수, 운전조건, 재료물성치 및 응력 데이터를 체계적으로 저장, 관리할 수 있는 NPP-IDBMS를 구축하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원자력발전소 주요기기에 존재하는 결함의 건전성평가 방법을 분석한 후 결함 건전성평가에 필요한 데이터들의 상호관계를 규정하였다. 이를 이용하여 원자력발전소 주요기기의 결함 건전성평가를 위한 NPP-IDBMS의 관계형 데이터 모델을 제시하였다.
2. 본 연구에서 제시한 관계형 데이터 모델을 이용하여 원자력발전소 주요기기의 결함 건전성평가를 위한 NPP-IDBMS를 개발하였다. 총 8기의 국내 가동중인 원자력발전소에 대한 발전소, 형상, 운전조건, 재료물성치, 응력 데이터베이스를 각각 구축하였다. 특히, 결함 건전성 평가에 필요한 응력 데이터를 유한요소해석을 통해 추출하고 이를 응력 데이터베이스에 추가하였다.

참고문헌

- [1] American Society of Mechanical Engineers, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI*, 1995.
- [2] Microsoft Visual C++, Ver. 5.0, Microsoft, 1998.
- [3] Access 97, Microsoft, 1998.
- [4] American Society of Mechanical Engineers, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Materials, Part D-Properties, Sec. II*, 1995.
- [5] W. H. Bamford, et al., *Stress Distributions for the Kori Unit 1 and 2 Reactor Vessels, WCAP-14853*, Westinghouse Electric Corporation, 1997.

- [6] J. Vagner, *Uljin Nuclear Power Station Primary System Key Components Stress Information*, MCFNC 1422, Framatome, 1997.
- [7] ABAQUS User's Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1997.
- [8] American Society of Mechanical Engineers, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components*, 1995.
- [9] Westinghouse Electric Corporation, *Westinghouse System Standard 1.3.F Nuclear Steam Supply System, Reactor Coolant System Design Transients for Standard Plants with Model F Steam Generators, Rev. 0*, 1978.