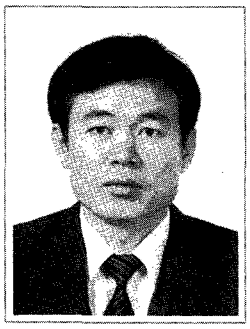
가압경수로 파괴 역학 평가 체계

홍승렬
한전 전력연구원 원자력설비지원그룹장



원자력발전소는 ASME B&PV Code Sec., 「Rules for In-Service Inspection of Nuclear Power Plant Components」 기술기준에 따라 기기의 건전성 확인을 위해 일정 기간마다 가동중 점검을 실시하여야 한다.

가동중 점검은 비파괴 검사 방법으로 구조물의 용접부에 대하여 실시하며, 이 때 발견된 결함은 먼저 ASME Sec.의 기준에 따라 결함의 허용 여부를 평가하여야 한다.

ASME Sec.의 안전성 허용 기준보다 작은 결함은 정비(Repair)없이 사용이 가능하나, 허용 기준을 초과하는 결함은 정비하거나 해당 기기를 교체하여야 한다.

그러나 파괴 역학 분석(Fracture Mechancis Analysis)으로 결함의 안전성이 입증되면 정비 또는 기기 교체없이 해당 기기를 기술기준에 따라 계속 운전할 수 있다.

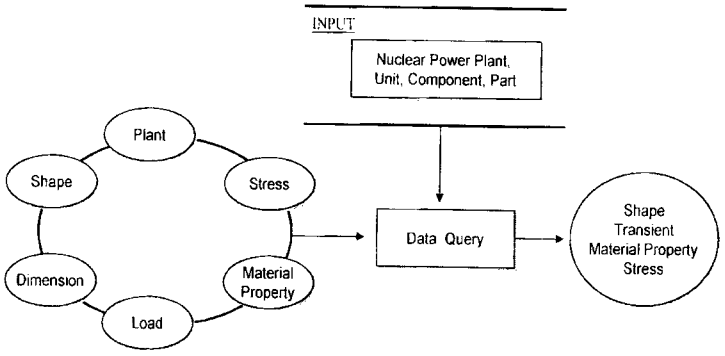
파괴 역학 분석 프로그램

원자력발전소 기기에 대한 파괴 역학 분석 수행을 위해서는 용접부에 대한 응력 데이터와 발견된 결함 형상에 따른 응력 확대 계수 K를 구하는 프로그램이 필요하다.

또한 결함에 대한 안전성 해석을 외국에 의존하는 경우, 가동중 점검 일정이 지연되거나 인허가시 규제기관의 조치 사항에 대한 능동적 대처가 곤란하다.

전력연구원에서는 원전 가동중 점검시 결함이 발견된 부위의 정비 또는 계속 운전 여부에 대하여 신속한 결정을 할 수 있도록, 결함 크기만을 입력하면 최종 안전성 평가가 이루어지도록 사용자 편이성이 고려된 통합 파괴 역학 분석 프로그램 IPSIE(Intergrated Program for Structural Integrity Evaluation)을 개발하였다.

IPSIE는 국내 가압형 경수로의 원자로 · 가압기 · 증기발생기 및 원자로 냉각재 배관 용접부의 응력 데이터, 재료 물성, 형상, 운전 조건 데이터 베이스 프로그램 NPP-IDBMS(Integrated Database Management System for Nuclear Power Plant), 결함 형상에 대한 응력 확대 계수 K계산 프로그램 KEVA(K-EVALuation)와 결함 성장량 및 안전성 평가 프로그램 FLEVA(Fatigue Life EVAluation)를 통합한 프로그램이다.



〈그림 1〉 NPP IDBMS의 구성

통합 데이터 베이스 관리 시스템 개발

가압경수로 1차 계통 주요 기기에 대한 치수 · 형상 · 재료 물성치 · 운전 조건 · 응력 데이터 등의 정보를 데이터 베이스로 구축하고 이를 효율적으로 관리하는 통합 데이터 베이스 관리 시스템(Integrated DataBase Management System for the integrity evaluation of Nuclear Power Plant: NPP-IDBMS)을 개발하였다.

NPP-IDBMS는 파괴 역학 분석에 필요한 각 원자력발전소별 주요 기기의 형상, 재료 물성치, 운전 조건, 응력 데이터 등을 통합하여 관리할 수 있는 통합 데이터 베이스 관리 시스템으로 그 구성은 〈그림 1〉과 같다.

데이터 베이스의 검색을 위해서 사용자는 발전소 · 호기 · 대상 기기 · 부위에 대한 정보를 입력한다. NPP-IDBMS에서는 이러한 입력 자료를 기초로 각 데이터 베이스 내 관련 자료를 추적(Query)하며, 이를 통해 해당 부위의 형상(Shape) · 운전 조건(Transient) · 재료 물성치(Material Property) · 응력 분포(Stress) 등을 출력한다.

프로그램 구성

NPP-IDBMS의 초기 화면은 〈그림 2〉와 같으며, 발전소 데이터 베이스, 형상 데이터 베이스 · 운전 조건 데이터 베이스 · 재료 물성치 데이터 베이스 및 응력 데이터 베이스를 관리하는 관리 모듈과 구축된 데이터 베이스를 검색할 수 있는 검색 모듈로 이루어져 있다.

고리 1 · 2 · 3 · 4호기, 영광 1 · 2호기 및 울진 1 · 2호기에 대해 Framatome과 Westinghouse로부터 확보한 방대한 양의 응력 데이터를 파괴 역학 분석에 신속 · 정확하게 적용할 수 있도록 Framatome 응력 데이터 베이스부와 Westinghouse 응력 데이터 베이스부로 데이터 베이스화하였다.

파괴 역학 분석 프로그램 개발

1. 응력 확대 계수 K 계산 프로그램 개발

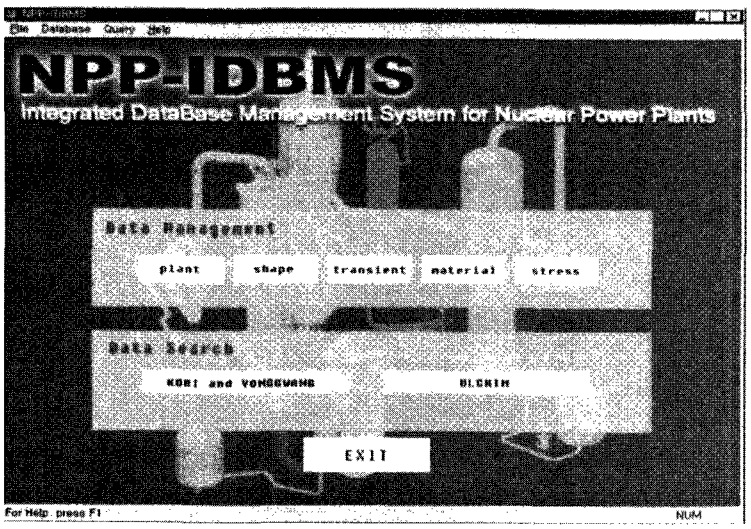
KEVA(K-EVAluation) 프로그램은 원자력 발전소 1차 계통 주요 기기에서 검출되는 다양한 결함 형상에 대한 응력 확대 계수 KI 계산 프로그램이다. KEVA를 통해 해석 가능한 결함 형상은 다음과 같다.

- 표면 결함(Surface Crack)
- 내부 결함(Subsurface Crack)
- 연속 결함(Continuous Crack)
- 볼트 결함(Bolt Crack)
- 홀 결함(Hole Crack)

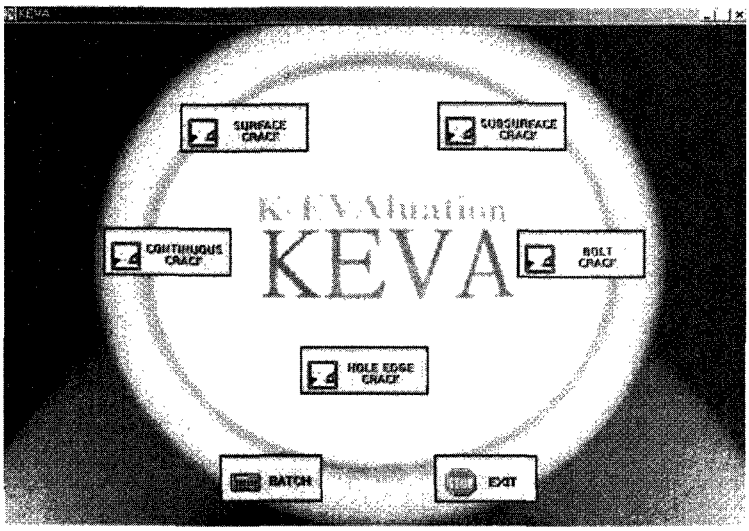
표면 결함에 대한 응력 확대 계수 계산 모듈은 원통형 압력 용기의 형상비(t/R)를 고려하여 작성한 Raju-Newman식과 t/R의 영향을 무시하고 보다 보수적으로 수정한 ASME Sec. XI식으로 구성되어 있다.

ASME Sec. XI식은 1995년 개정판을 기준으로 하였으며, 기존 식을 이용한 결과와 비교할 수 있도록 1992년도 개정판 식을 추가하였다.

내부 결함에 대한 응력 확대 계수 계산 모듈은 응력 분포를 선형화하여 사용하는 ASME Sec. XI식과 3차 다항식화하여 사용하는 Kobayashi식으로 구성하였다. 따



〈그림 2〉 NPP IDBMS의 초기 화면



〈그림 3〉 KEVA의 초기 화면

라서 KEVA에서는 총8가지 결함 형상에 대한 안전성 평가가 가능하다.

2. 결함 성장률 계산 프로그램 개발

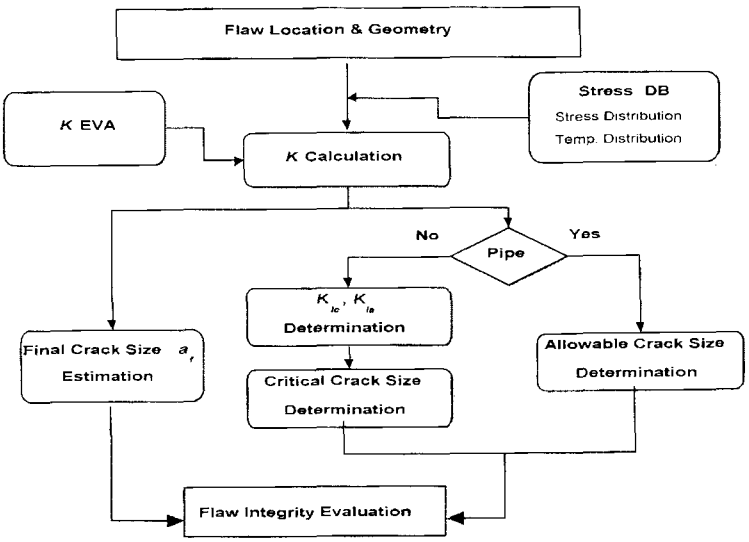
원자력발전소의 주요 기기는 고온·고압의 가동 조건하에서 안전성을 유지할 수 있도록 ASME B&PV Code(ASME) Sec. Ⅲ에 준하여 설계되었다.

이렇게 설계한 원자력발전소 주요 기기에는 재질의 불균일성이나 용접 과정상의 문제 등의 이유로 미소 균열이 존재할 수 있으며, 이러한 미소 균열 중 일부는 가동시 계속적인 반복 하중을 받음으로써 기기 건전성에 영향을 미칠 수 있는 크기의 결함으로 성장할 수도 있다.

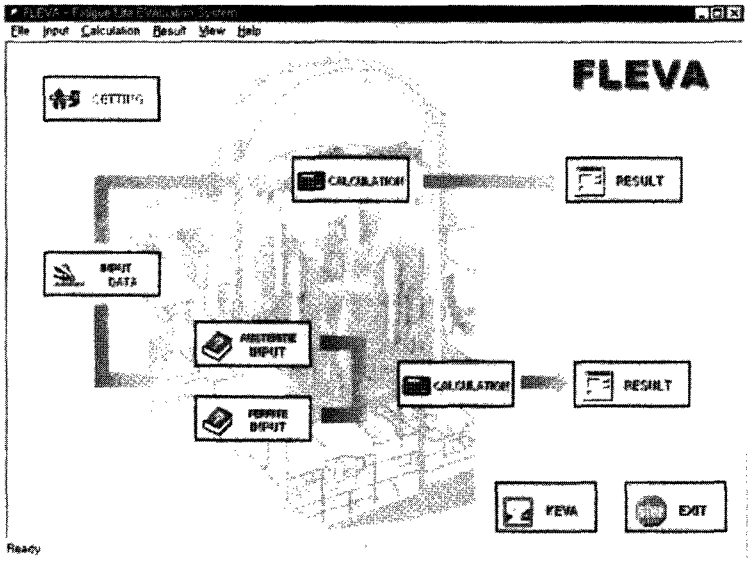
FLEVA 프로그램은 ASME Sec. XI의 파괴 역학 분석 절차에 기초하여 결함 성장량 계산 및 안전성 평가를 수행하는 통합 파괴 역학 분석 프로그램 IPSIE의 핵심 모듈이다.

ASME Sec. XI의 파괴 역학 분석 절차는 Appendix A, C, H에 제시되어 있다. Appendix A에서는 페라이트계 재료에 대한 안전성 평가 방법을 명시하고 있으며, Appendix C 및 H에서는 각각 오스테나이트계 배관과 페라이트계 배관에 대한 안전성 평가 절차를 명시하고 있다.

본 프로그램은 이러한 안전성 평가 절차에 준하여 개발하였으며, 따라서 원자력발전소 1차 계통 주요 기기인 원자로 압력 용기·가압기·증기발생기·배관에 대한 적용이 가능하도록 구성하였다. 원전 가동중 점검시 발견된 결함에 대한 안전성 평가 절차는 〈그림 4〉와 같다.



〈그림 4〉 원전 가동중 점검시 발견된 결함에 대한 안전성 평가 절차



〈그림 5〉 FLEVA의 초기 화면

사용자가 결함 형상 및 위치를 입력하면 응력 데이터 베이스(Stress DB)로부터 결함 위치에 해당하는 응력 분포 및 온도 분포를 선택한다.

선택된 응력 분포로부터 응력 확대 계수를 계산하게 되는데 이때 계산은 KI 계산 프로그램인 KEVA를 통해 수행되며, FLEVA 프로그램에서는 계산된 응력 확대 계수로부터 최종 결함 크기 af를 평가한다. 최종 결함 크기 af는 ASME Sec. XI, Appendix A에 기초하여 계산되며, 결함 안전성 평가는 최종 결함 크기를 임계 파라미터와 비교함으로써 이루어진다.

결함이 원자로 · 가압기 · 증기발생기에 존재하는 경우, 임계 파라미터는 결함 정지 파괴 인성치 KIa 및 최소 임계 결함 크기이며, 이 값들은 Appendix A의 절차에 준하여 결정한다.

결함이 배관에 존재하는 경우의 임계 파라미터는 허용 결함 크기이며, 배관 재료에 따라 Appendix C 및 H의 절차에 준하여 결정한다.

FLEVA는 크게 다음과 같은 3가지 부분으로 구성되어 있다.

- 피로 결함 성장량 계산부
- 임계 파라미터 계산부
- 안전성 평가부

FLEVA의 초기 화면은 〈그림 5〉와 같다. 전체 시스템은 해석 대상 발전소에 대한 재료 물성치, 결함 형상 및 크기, 온도 분포, 압력 분포 등의 운전 조건 데이터 등을 입력받아 해석을 수행하며, 해석 결과를 통해 결함의 안전성 평가 및 임계 결함 길이를 구할 수 있다.

해석에 사용된 데이터들은 추후 사용이 용이하도록 파일 형태로 저장이 가능하도록 구성하였으며, 프

로그램은 풀다운 방식의 메뉴와 초기 화면의 버튼을 사용하여 구동할 수 있도록 하였다.

통합 파괴 역학 분석 시스템 개발

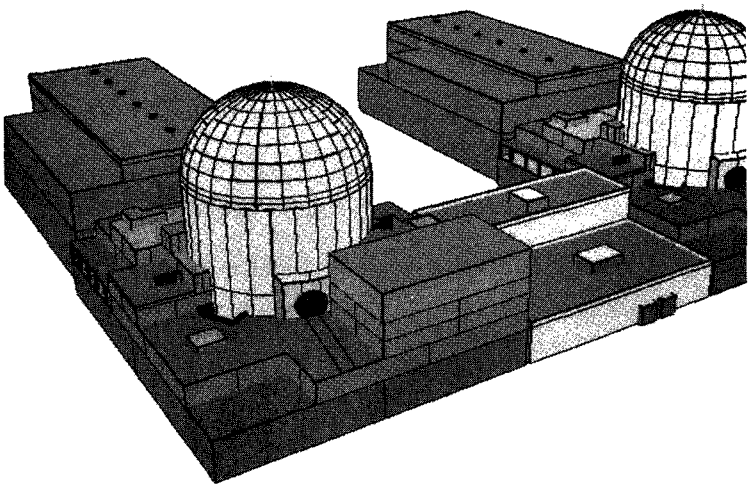
결함 평가를 위해서는 재료 물성치를 찾는 단계, 필요한 응력 데이터를 확보하는 단계 등을 거쳐야 하며, 또한 각 원자로 호기별로 완전히 다른 형상과 물성치 · 운전 조건 등을 고려해야 하므로 신속하고 정확한 결함 평가를 위해서는 통합 파괴 역학 프로그램의 개발은 필수적이다.

원자력발전소 가동중 점검시 다양한 부위에서 검출된 결함 크기만으로 파괴 역학 분석을 수행할 수 있는 통합 파괴 역학 분석 프로그램인 IPSIE(Integrated Program for Structural Integrity Evaluation)를 개발하였다.

가동중 점검시 발견된 결함에 대한 안전성 평가를 수행하는 FLEVA 프로그램과 안전성 평가에 필요한 각종 데이터를 관리하는 NPP-IDBMS 프로그램을 유기적으로 연결하여 IPSIE 프로그램은 3개의 단위 프로그램으로 구성된다.

가. KEVA(K-EVAluation)

다양한 결함 형상에 대해 응력 확대 계수를 계산하는 KI 계산 프로그램



신형 경수로 1400(APR-1400) 1 · 2호기 조감도

나. FLEVA(Fatigue Life EVAluation)

발견된 결함에 대하여 결함 성장량 계산 및 안전성 평가를 수행하는 파괴 역학 분석 프로그램

다. NPP-IDBMS(Integrated Database Management System for Nuclear Power Plant)

파괴 역학 분석에 필요한 응력 데이터 및 형상 · 치수 데이터를 관리하는 데이터 베이스 관리 프로그램

결 어

ASME Sec. XI의 요건에 따라 분석적인 방법으로 원자력발전소 가동중 점검시 발견된 결함의 안전성을 평가를 위하여 통합 파괴 역학 분석 프로그램 IPSIE(Integrated Program for Structural Integrity Evaluation)를 개발하였다.

본 프로그램은 국내 원전 8기에 대한 주요 기기의 형상 · 치수 · 재료 물성치 · 운전 조건 및 응력 데이터 관리 프로그램 NPP-IDBMS, 원자력발전소 가동중 점검중 발견되는 표면 결함 · 내부 결함 · 연속 결함 · 볼트 결함 · 홀 결함에 대해 적용 가능한 응력 확대 계수 K 계산 프로그램 KEVA 및 ASME Sec. XI, Appendix A, C 및 H 평가 절차를 기반으로 결함 성장량 계산 및 안전성 평가 프로그램 FLEVA로 구성되어 있다.

통합 파괴 역학 분석 프로그램 개발은 원자력발전소 가동중 점검시 발생 결함에 대한 신속한 평가 및 정확한 판단으로 원자력발전소 운영의 안전성을 확보할 수 있으며, 외국 용역비를 절감하고, 불필요한 기기 정비를 방지함으로써 원전 이용률을 증가시킬 수 있다.