

파괴역학분석 시스템 개발

신진호

한전 전력연구원

jinho@kepri.re.kr

Development of Fracture Mechanics Analysis System

Jin-Ho Shin

Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

요 약

원자력발전소 1차계통 주요기기와 2차계통 주요기기들에 대한 가동 중 검사시 발견된 결함은 ASME Sec. XI, IWB와 IWC에 근거하여 허용여부를 결정한다. 이때, 결함 크기가 허용기준을 초과하는 경우에는, 기기의 안전성 확보를 위해 ASME Sec. XI에 규정된 절차에 따라 파괴역학분석(Fracture Mechanics Analysis: FMA)을 수행하고, 그 결과에 따라 운전중지 후 보수 또는 계속운전의 판단을 한다. 따라서, 원자력발전소 주요기기에 대한 FMA기술은 안전성평가의 핵심이 되는 부분이다. 원자력발전소의 안전성평가에는 결함의 형상 정보, 환경 정보, 재료 물성치, 응력 데이터 등 방대한 양의 데이터가 필요할 뿐 아니라 파괴역학적 분석절차도 매우 복잡하여 전문가도 많은 시간과 노력이 요구된다. 이러한 문제점을 해결하고자 일부 평가절차를 컴퓨터 프로그램화하여 효율적인 안전성평가가 이루어지도록 노력하고 있다. 본 논문에서는 파괴역학적 분석에 필요한 응력 데이터를 관리하는 응력 데이터베이스를 구축하고, 응력확대계수 계산 프로그램(KEVA)과 결함허용여부를 결정하는 프로그램(Acceptance Standard)과 결함성장률 계산 프로그램(FLEVA)을 Web 기반으로 개발하고 구현결과를 소개한다.

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 늘어나는 전력 수요로 현재 우리 나라에는 다수의 원자력 발전소가 가동중이다. 전체 전력 공급량의 다수를 차지하고있는 원자력 발전은 나날이 그 중요성과 관심이 높아지고 있다. 원자력발전소 가동중검사(In-Service Inspection; ISI) 결과 결함이 발견되면, 결함에 대한 보수 또는 계속운전의 정확한 판단이 요구된다. 가동중지 후 결함보수 결정이 내려질 경우, 가동중지로 인한 손실과 막대한 보수비용으로 원자력발전소의 경제성에 심각한 타격을 줄 수 있다. 반면, 계속운전의 판단이 내려질 경우에는, 판단의 기술적 근거에 오류가 있을 경우 엄청난 재앙을 초래할 수 있다는 위험성이 존재한다. 따라서, 원자력발전소의 안전성을 확인할 필요가 있고, 또한 규제기관으로부터 안전성에 대한 승인을 받을 의무가 있는 원전사업자로서, 결함에 대한 안전성평가를 위한 확실한 기술력의 확보가 필수적이다.

현재 개발된 여러 원자력발전소의 주요기기들에 대한 파괴역학적 분석 프로그램들은 개인용 컴퓨터에서 실행되는 소프트웨어로 필요에 따라 프로그램을 설치하고 이를 사용하게 된다. 이러한 프로그램은 서로 다른 운영체제(Operating System; OS)에서는 사용할 수 없으며, 데이터의 공유도 어렵다. 그러나 최근 컴퓨터 하드웨어와 네트워크의 발전에 힘입어 인터넷에서 프로그램을 사용할 수 있는 어플리케이션 서비스 프로바이더(Application Service Provider; ASP)를 이용하면 이러한 문제들을 해결할 수 있다. 원자력발전소의 안전성평가 프로그램에 ASP개념을 도입하면 사용자의 OS와 상관없이 별도의 프로그램을 설치하지 않고 네트워크가 가능한 곳에서는 언제든지 서버에 저장된 평가프로그램을 사용할 수 있으며 모든 사용자에게 동일한 정보와 결과를 제공할 수 있다. 또한 서버에 저장되어 있는 평가프로그램의 검증을 통하여 모든 사용자는 신뢰성 있는 정보를 공유할 수 있다. 따라서 다자간 협업을 요구하는 안전성평가시스템에 ASP개념의 프로그램을 사용한다면 효과적이고 체계적인 시스템을 구축할 수 있다. 본 연구에서는 ASP개념을 이

용하여 파괴역학적 분석에 필요한 응력 데이터를 관리하는 응력 데이터베이스(FMA DB), 응력확대계수 계산 프로그램(KEVA)과 결함허용여부를 판정하는 프로그램(Acceptance Standard)과 결함성장률 계산 프로그램(FLEVA)을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 결함성장률 프로그램은 ASME Sec. XI의 파괴역학분석 절차에 기초하여 결함성장률 계산 및 안전성 평가를 수행하는 프로그램이다. ASME Sec. XI의 파괴역학분석 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 1차계통 주요기기인 원자로 압력용기, 가압기, 증기발생기, 배관에 대한 적용이 가능하도록 구성하였다.

2. 본 론

2.1 시스템 개발 환경

웹기반의 파괴역학분석 시스템을 개발하기 위해서는 우선 적절한 웹서버(Web server)의 구축이 선행되어야 한다. 이를 위해 아파치 웹서버(Apache web server)를 사용하고, 서블릿 엔진(Servlet engine)은 Jrun 3.0을 사용하였다. 프로그래밍언어는 플랫폼에 독립적인 객체지향언어 자바(Java)를 사용하여 어떠한 환경의 컴퓨터에서도 사용이 가능하며, 그래픽 유저 인터페이스(Graphic user interface : GUI)로 사용자의 편의성을 높였다. 또한 기존 웹데이터베이스와의 효율적인 연계를 위해 오라클 8i를 이용하여 데이터베이스관리시스템(Database management system)을 구성하였다.

2.2 FMA 데이터베이스 구축

본 연구에서 개발하고자 하는 응력 데이터베이스(Fracture Mechanics Analysis Database; FMA DB) 프

로그래밍은 가동중 검사(ISI)시에 발견되는 결함에 대한 FMA(Fracture Mechanics Analysis) 수행에 필요한 자료 데이터베이스이다. 입력되어 있는 주요 데이터는 응력 데이터(Stress Data), 형상 데이터(Shape Data), 물성치 데이터(Material data), 과도운전상태 데이터(Transient Data)로 이루어져 있다. FMA DB는 복잡하고 다양한 파괴역학분석 절차에 필요한 각종 데이터를 효율적으로 관리하고 파괴역학분석 프로그램인 KEVA, FLEVA와 연계되어 사용자가 쉽게 데이터를 이용할 수 있도록 하는 것이다. FMA DB는 Stress Database부, Shape Database부, Material Database부, Transient Database부로 구성되어 있으며, 풀다운 방식을 채택하여 사용자가 쉽게 데이터에 접근할 수 있도록 구성되어 있다.

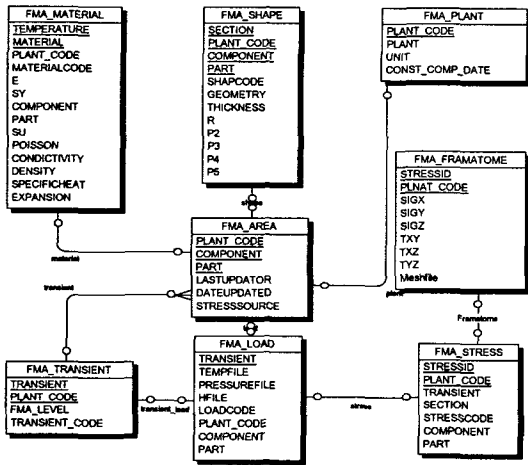


그림.1 FMA DB Physical Model

2.3 결함성장률 계산 프로그램(FLEVA)

사용자가 결함 형상 및 위치를 입력하면 응력 데이터베이스(Stress DB)로부터 결함 위치에 해당하는 응력분포 및 온도분포를 출력한다.

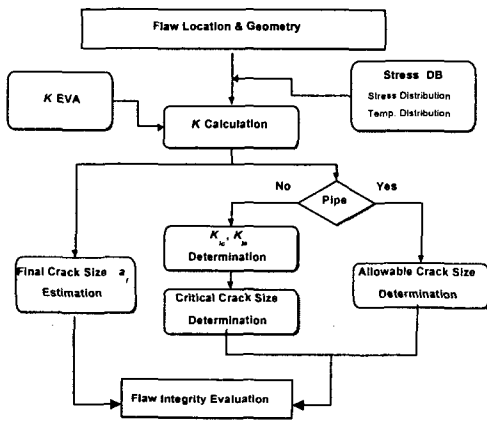


그림.2 결함 성장률 계산 프로그램의 평가절차 순서도

이후 결함 안전성 평가에 필요한 응력확대계수 계산은 K_I 계산 프로그램인 응력확대계수 계산 프로그램을 통해 수행되며, 계산된 응력확대계수로부터 최종 결함 크기 a_f 를 예측한다. 최종결함크기 a_f 는 ASME Sec. XI, Appendix A에 기초하여 계산한다. 결함 안전성 평가는 최종 결함 크기를 각종 임계 파라미터와 비교함으로써 이루어진다. 결함이 원자로, 가압기, 증기발생기에 존재하는 경우, 임계 파라미터는 결함정지 파괴인성치 K_{Ia} 및 최소임계 결함크기이며, 이 값들은 Appendix A의 절차에 준하여 결정한다. 결함이 배관에 존재하는 경우의 임계 파라미터는 허용결함크기이며 배관재료에 따라 Appendix C 및 H의 절차에 준하여 결정한다.

본 프로그램은 균열 성장률을 평가하기 위하여 평가 설정부, 입력부, 계산부, 결과 출력부로 구성되어 있다. 출력부는 계산부를 통해 계산한 임계균열 길이, 최종결함길이 및 결함의 안전성 여부 등을 화면상에 출력한다. 일반적인 1차계통 기기의 경우 출력부는 Evaluation Result, Critical Crack Size, Crack Growth, Analysis Report로 이루어지며 아래 그림들과 같이 탭 대화상자를 구성하였다.

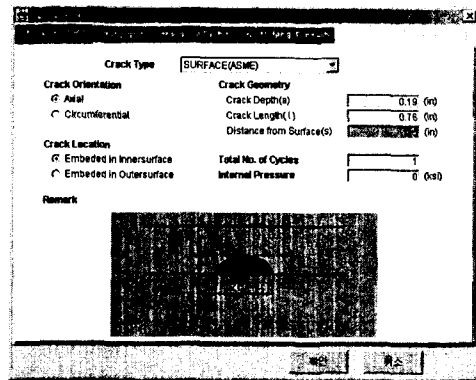


그림.3 Crack Geometry 출력부

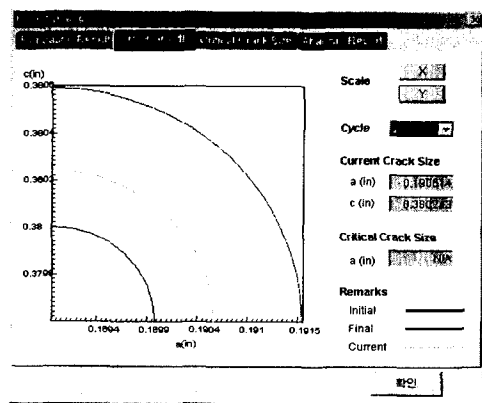


그림.4 Crack Growth 출력부

2.4 결함허용 판정 프로그램(Acceptance Standard)

본 연구에서 개발하는 Acceptance Standard 프로그램은 ASME Sec. XI의 파괴역학분석으로 제시된 표의 값을 보간법을 이용하여, 복잡한 수식들로 이루어진

FMA(Fracture Mechanics Analysis)를 수행하기 전, 원자력발전소 주요기기에 대하여 표를 이용하여 안전성 평가를 수행하여 주는 프로그램이다. 원자력 발전소의 1차 계통 기기들에 대한 안전성 평가법은 IWB의 주요 기기에 따른 표를 이용하여, 2차 계통 기기들에 대한 안전성 평가법은 IWC의 주요 기기에 따른 표를 이용하여 보간법을 이용하여 프로그램을 개발하였다. 따라서 ASME Sec. XI의 IWB, IWC에서 제시하고 있는 모든 기기들에 대한 안전성 평가를 수행할 수 있다. 또한, 기존의 결함의 형상과 검사부위에 따른 복잡한 표를 찾아보면서 수행하였던 안전성 평가를 현장 검사자가 신속하고, 간편한 안전성 평가를 할 수 있도록 하는 것이 이 프로그램의 목적이다.

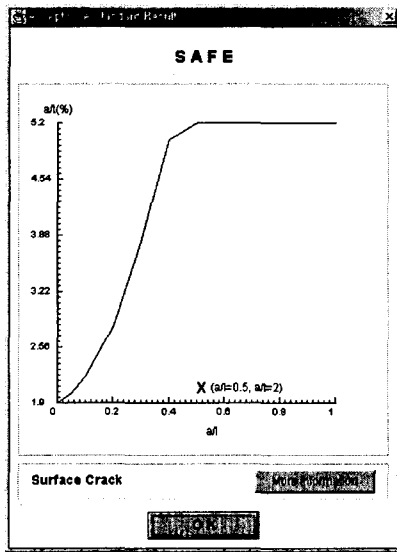


그림.5 그래프 상세 출력창

2.5 응력확대계수 계산 프로그램(KEVA)

응력확대계수 계산 프로그램인 KEVA는 파괴역학적 분석에 중요 파라미터인 응력확대계수인 K_I 를 간단한 입력으로 계산해주는 프로그램이다. 다양한 결함 형상(표면 결함, 내부결함, 연속결함, 볼트결함, 홀결함)에 대해 응력확대계수(Stress Intensity Factor; K_I) 및 수압시험을 계산하는 프로그램으로 비상조건시 결함에 대한 안전성 평가가 가능하다.

본 프로그램은 표면 결함(Surface Crack), 내부 결함(Subsurface Crack), 연속 결함(Continuous Crack), 볼트 결함(Bolt Crack), 홀 엣지 결함(Hole Edge Crack), 노즐 코너 결함(Nozzle Corner Crack)에 대해서 계산을 할 수 있는 총 6개의 모듈로 구성되어 있으며, 각각의 모듈은 응력 데이터 검색부, 응력확대계수 계산부, 결과 출력부로 구성되어 있다. 또한 각 모듈은 FMA DB와 연결되어 응력확대계수를 구하는데에 필요한 응력 데이터(stress data)를 입력받아 사용할 수 있다. 다음의 그림들은 FMA DB의 응력 데이터를 이용하여 응력확대계수 계산에 이용하는 것을 보여준다. 그림5.은 응력확대계수 계산 프로그램인 KEVA의 각 모듈의 입력부이며, 그림.6은 K Calculation 출력부를 나타낸다.

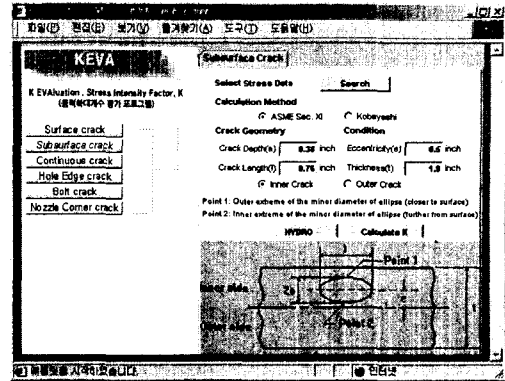


그림.6 Subsurface Crack 입력부

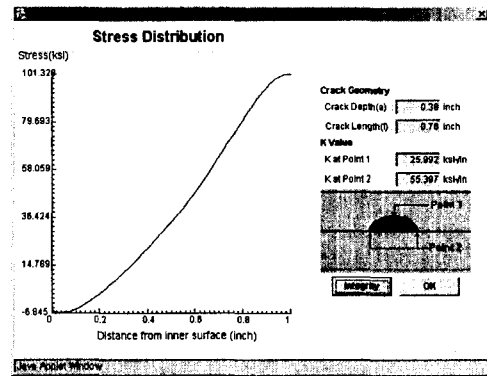


그림.7 K Calculation 출력부

3. 결 론

본 논문에서는 원자력발전소 설비의 건전성평가를 위한 파괴역학분석 시스템의 개략적인 구성과 주요 화면을 소개하였다. ASP개념을 이용하여 파괴역학적 분석에 필요한 응력 데이터를 관리하는 응력 데이터베이스(FMA DB), 응력확대계수 계산 프로그램(KEVA)과 결함허용여부를 판정하는 프로그램(Acceptance Standard)과 결함성장률 계산 프로그램(FLEVA)을 개발하였으며, 가동중검사(ISI) 데이터베이스와 FMA 데이터베이스의 통합을 위한 연계작업을 진행하고 있다. 데이터베이스가 통합되면 검사에서 입력된 Data를 바로 파괴역학분석 업무를 수행할 수 있게 됨으로써, 원자력발전소의 계획예방정비 기간을 단축하게 되고 가동을 향상에 크게 기여할 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] ASME, "ASME Section XI, IWB, IWC", 1996
- [2] 한전전력연구원, "파괴역학분석시스템 개발보고서", 2002.6
- [3] 한국전력공사, "울진 원자력발전소 1호기 제2주기 장기가동중검사계획서", 2001.11