

# 원전 주요기기의 열화현상을 고려한 웹기반 감시시스템 개발

## Development of a Web-based Monitoring System of Primary Components for Nuclear Power Plant Considering Aging Degradation

\*고한옥<sup>1</sup>, 장혁수<sup>1</sup>, 최재봉<sup>1</sup>, #김영진<sup>1</sup>, 김흥기<sup>2</sup>, 최영환<sup>2</sup>, 이준성<sup>3</sup>

\*H.O. Ko<sup>1</sup>, H.S. Chang<sup>1</sup>, J.B. Choi<sup>1</sup>, #Y.J. Kim(yjkim50@skku.edu)<sup>1</sup>, H.K. Kim<sup>2</sup>, Y.H. Choi<sup>2</sup>, J.S. Lee<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> 성균관대학교 기계공학부, <sup>2</sup> 한국원자력안전기술원 규제기술연구부, <sup>3</sup> 경기대학교 기계시스템디자인공학부

Key words : Aging Monitor, Mechanical Integrity, Continued Operation, Periodic Safety Review

### 1. 서론

원전의 가동시간이 경과함에 따라 중성자조사, 반복적 과도상태, 고온 및 고압 또는 부식환경등과 같은 특수한 가동조건에 영향을 받아 원전의 기기, 계통 및 구조물에서는 성능저하와 물성변화 현상이 나타나게 된다. 이와 같은 현상을 경년열화 현상이라고 하며 경년열화가 심화되면 궁극적으로 기기의 기능상실과 안전성 저해의 요인이 되므로 설계개선, 운전조건개선 및 보수 활동 등을 통하여 기기, 계통 및 구조물의 열화현상을 안전여유도가 허용하는 범위 안에서 유지되도록 관리하여야 한다.

원전 주요기기의 경우 초기설계시에 경년열화 현상에 대비한 설계여유가 반영되어 있으나 운전년수가 증가함에 따라 경년열화 현상이 가속화되는 경우 설계여유가 감소하여 원전의 안전성 및 운전성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 원전 주요기기에 대한 지속적인 감시를 통하여 기기의 건전성을 확보하여야 한다. 정부는 '99년말 국내 모든 전문가가 참여한 종합적인 원전 안전점검을 실시하고 여러 단계적 조치와 아울러 안전성 점검과 증진에 대한 중장기적 계획을 발표한 바 있다. 이 계획에는 가동중인 원전의 안전성을 주기적으로 종합, 검토함으로써 체계적인 평가와 철저한 예방관리 체계를 구축하여 원전의 안전성을 지속적으로 증진시키려는 계획도 포함되었다. 이에 따라 가동원전에 대한 주기적안전성평가(PSR: Periodic Safety Review)가 법제화되어 현재 고리 1호기 및 월성 1호기를 대상으로 수행 중이다. PSR을 통해 원전 안전성 평가를 종합적이고 체계적으로 수행함에 따라 원전운영기술을 증진하고, 각종 평가에 따른 기술 근거와 배경을 확보할 수 있다[1-5].

경년열화 평가는 상기 PSR의 주요 수행항목이며 가동년수 증가에 따른 발전소 안전성 확인 중 가장 중요한 요소이다. 경년열화 평가의 목적은 운전 중인 원전 주요기기의 정확한 경년열화 원인을 분석하고, 경년열화 정도를 평가하며, 경년열화로 인한 손상을 완화 혹은 적절히 관리하는 것이다. 이를 위해서는 각 기기 및 설비의 노화기구에 대한 이해를 바탕으로 원전 재료의 노화특성 및 결합의 생성/성장을 측정, 평가하는 기술 및 노화의 진전을 완화하는 기술이 필요하며, 또한 충분한 운영 데이터가 확보되어야 한다 [6-9]. 그러나 현재 우리나라 전체 원자력 발전소의 경우 운영 데이터가 충분히 확보되어 있지 않으며, 국내의 원자력 발전소 설계, 검사, 운영, 규제, 연구인력 자원도 제한되어 있다. 따라서 정확한 평가를 위한 복잡한 계산을 수행하고 국내 기관이 보유 중인 원전 주요기기 관련 정보의 공유 및 종합적인 관리를 함으로써 제한된 국내 자원의 효율성을 제고할 수 있는 시스템 개발이 필수적이다.

이에 본 논문에서는 원전 주요기기에 대하여 웹을 기반으로 지속적으로 경년열화 정도를 감시할 수 있고 각종 데이터베이스, 문서와 같은 자원을 관리할 수 있는 웹기반 경년열화 감시시스템을 개발하였다.

### 2. 경년열화 손상에 대한 정량화

원자로 압력용기, 가압기, 증기발생기 및 등급1 배관의 손상에 영향을 미치는 피로, 조사취화, SCC, 결함, FAC 등은 기기건전성에 직접적인 영향을 미치므로, 각각의 손상기구와 관련된 누적사용계수(Cumulative Usage Factor: CUF), 상단쉘에너지(Upper Shelf Energy: USE), 응력확대계수(Stress Intensity Factor: K) 또는 에너지 방출률(Energy Release Rate: G or J), 임계벽두께(Critical Wall Thickness) 등을 손상변수(Aging Parameter; AP)로 설정하여 실시

간으로 정량적인 수치를 감시할 필요가 있다. 또한 주요기기에 대하여 실시간 기기건전성 감시를 수행하기 위해서는 각각의 손상변수별로 운전시간에 따른 압력, 온도, 중성자조사량 등의 변화에 따른 손상값(Aging Value; AV)을 결정해야 한다. 본 논문에서는 기기의 건전성에 가장 큰 영향을 미치는 열화 손상기구로 피로, 균열, 조사취화, 가압열충격, SCC를 선정하였으며 이에 대한 손상값으로 CUF, K, USE, 임계벽두께 등을 손상값으로 결정하였다.

주요기기에 대한 각각의 손상기구에 따른 기기건전성평가를 수행하여 설계 손상값(Design AV), 감시 손상값(Monitored AV), 예측 손상값(Predicted AV)을 계산하였다. 계산된 값들은 설계 손상값을 기준으로 나누어 손상계수(Aging Factor; AF)로 환산하여 기기의 안전여유도를 정량화 하였다. 특히 실시간 기기건전성평가를 위해서 손상변수에 대한 감시 데이터를 데이터베이스로 구축하였으며 이를 Web 기반으로 관리하여 주요기기에 대한 설계·규제·인허가 문서, 검사 및 감시결과 관리, 건전성평가 부분과 상호 연계될 수 있도록 개발하였다.

예를 들어 피로손상의 경우 손상값은 CUF이며 설계 CUF, 감시 CUF, 예측 CUF를 이용하여 손상계수를 계산하였다. Fig. 1은 원자로압력용기의 closure head and vessel flange 부분에 대한 손상계수의 변화를 보여준다. 원자로압력용기의 피로손상에 대한 현재 상태, 소진된 CUF의 크기, 앞으로의 경향 등을 한눈에 알 수 있다.

설계 CUF는 원전 설계 시 고려하였던 설계하중과 과도상태 발생빈도를 이용하여 계산하며 시간에 따라 일정하게 증가하는 것으로 가정하였다. 감시 CUF는 설계하중과 실시간 모니터링 시스템을 통해 구한 과도상태 발생빈도를 이용하여 계산하였다. 설계 시 계산된 CUF와 과도상태 발생빈도를 이용하여 특정 과도상태 1회 발생 시 소모되는 CUF를 구한다. 감시 CUF는 계산된 소모 CUF와 실제 과도상태 발생빈도의 곱으로 계산할 수 있으며 계산된 결과는 Fig. 2와 같이 DB를 구축하여 자동적으로 축적하였다. 예측 CUF는 감시 CUF값들을 최소자승법을 이용하여 일차식으로 근사화하였으며 연장 운전 했을 경우 각 기기들의 CUF값을 예측할 수 있다.

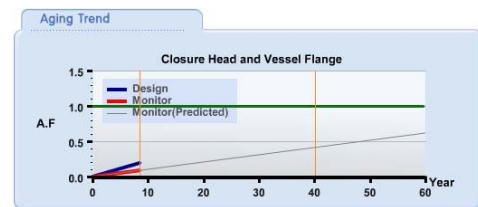


Fig. 1 The aging trend at a RPV

### 3. 웹기반 경년열화 감시시스템 개발

본 논문에서는 원전 주요기기에 대한 정량적 수명관리를 위하여 가동중 발생하는 열화손상에 관한 정보를 효과적으로 다룰 수 있는 웹기반 감시시스템을 구축하였다.

프로그램의 운영 환경은 윈도우 운영체제(Operating System: OS)를 기반으로 아파치 웹 서버(Apache web server), MySQL 데이터베이스 관리 시스템(Database Management System: DBMS)을 사용하였다. 또한 프로그램 개발을 위한 언어는 PHP(Professional HTML Preprocessor)를 사용하여 다른 시스템 요소들과의 완벽한 호환성을 바탕으로 프로그램 성능을 최적화하였다.

←T→	time	adcufl	dcufl	rcufl
<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
<input type="checkbox"/>	0.083333333	0.001875	0.001875	0.000626281
<input type="checkbox"/>	0.166666667	0.00375	0.00375	0.000648414
<input type="checkbox"/>	0.25	0.005625	0.005625	0.000669999
<input type="checkbox"/>	0.333333333	0.0075	0.0075	0.000719984
<input type="checkbox"/>	0.416666667	0.009375	0.009375	0.000776884
<input type="checkbox"/>	0.5	0.01125	0.01125	0.000874006
<input type="checkbox"/>	0.583333333	0.013125	0.013125	0.00096175
<input type="checkbox"/>	0.666666667	0.015	0.015	0.001032615
<input type="checkbox"/>	0.75	0.016875	0.016875	0.001156528
<input type="checkbox"/>	0.833333333	0.01875	0.01875	0.001292911
<input type="checkbox"/>	0.916666667	0.020625	0.020625	0.001460308

Fig. 2 The database of aging value for a RPV

#### 4. 결론

본 논문에서는 원전 주요기기에 대한 정량적 수명관리를 위하여 가동중 발생하는 열화손상에 관한 정보를 효과적으로 다룰 수 있는 웹기반 감시시스템을 구축하였으며, 이와 관련하여 도출된 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 원전 주요기기에 대한 기기별, 기구별 손상변수를 선정하였으며 이를 이용하여 원전의 경년열화 정도를 정량적으로 평가하였다.

(2) 원전에 대한 웹기반 경년열화 감시시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템을 향후 국내 운용중인 원전 20호기에 대하여 확장 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2004-000-10469-0) 지원으로 수행된 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 홍승열, "원자력발전소 수명관리," 대한기계학회지, 33(5), 384-392, 1993.
2. 박인규, "원자력발전소 기기의 노화손상 평가," 대한기계학회, 33(5), 414-420, 1993.
3. 한국원자력안전기술원, "원자력 안전 규제기술 개발: 원전 수명관리 규제기술 개발," KINS/GR-243, 2002.
4. 한국과학기술재단, "원자력발전소의 수명연장에 관한 기초 연구," KOSEF 89-06-11-06, 1992.
5. 한국원자력안전기술원, "원전 장수명 운전에 대비한 압력기기의 피로현안에 대한 연구," KINS/RR-130, 2002.
6. 김영진, 정해동, "원자력발전소 압력용기 및 배관계통의 건전성 평가," 대한기계학회지, 31(3), 244-250, 1991.
7. 홍준화, "원자로 압력용기에서의 중성자조사효과 및 건전성," 대한기계학회지, 33(5), 393-404, 1993.
8. 김일, 최석남, 박성호, "원자로용기의 압력-온도 운전한계곡선에 대한 작성절차," 대한기계학회지, 33(5), 405-413, 1993.
9. 정명조, 박윤원, 이정배, "Rancho Seco Transient에 대한 고리 1호기 원자로용기의 건전성 평가," 대한기계학회논문집, 21(7), 1089-1096, 1997.

웹기반 경년열화 감시시스템은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 크게 7개의 모듈로 구성하였다.

Aging Coloring & Alarming Monitor 모듈은 손상변수와 손상값을 이용하여 원전의 기기별, 기구별 경년열화 상태 및 손상경향 정보를 제공해 주는 모듈이며, Aging Virtual Display 모듈은 원전의 3차원 가상현실 환경에서 손상정도나 위치와 같은 열화손상 정보를 제공해 주는 모듈이다. 또한, Realtime Integrity Monitor 모듈은 실시간으로 원전 운전 정보를 제공해 주며, S/I Management System 모듈은 가동중 검사를 통해 얻은 정보를 경년열화 감시시스템에 입력하는 모듈이다. Aging Database / Aging Document 모듈은 원전 배관손상 데이터베이스, 경년열화 규제 데이터베이스, 2차계통 배관 데이터베이스, 배관 물성치 데이터베이스 등의 데이터베이스와 경년열화와 관련된 문서들을 제공해 준다. 마지막으로 Safety Evaluation 모듈은 각 기구별 기기건전성 평가 프로그램을 제공하고 하며 이를 통하여 원전 주요기기에 발생하는 열화손상을 평가하고 평가 결과는 데이터베이스에 저장한다.

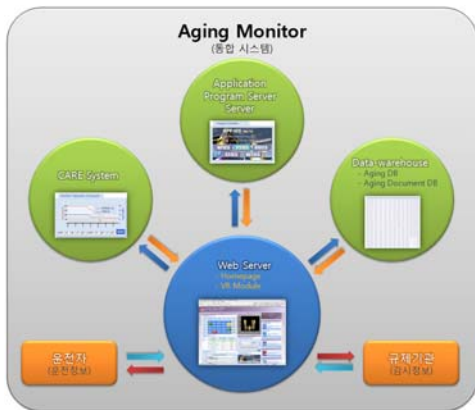


Fig. 3 The concept of a web-based monitoring system



Fig. 4 The web-based aging management system