

# 원전 주요기기에 대한 Aging Mechanism을 고려한 웹기반 전문가 감시시스템 개발

## Development of web-based Monitoring system based on the Aging Mechanism for the Standard Nuclear Power Plants

\*염승원<sup>1</sup>, 고한옥<sup>2</sup>, #최재봉<sup>3</sup>, 김흥기<sup>4</sup>, 최영환<sup>5</sup>

\*S. W. Yeum<sup>1</sup>, H. O. Kim<sup>2</sup>, #J.B. Choi<sup>3</sup>(Boong33@skku.edu), H.K. Kim<sup>4</sup>, Y.H. Choi<sup>5</sup>  
<sup>1,2,3</sup>성균관대학교 기계공학과, <sup>4,5</sup>한국원자력안전기술원 규제기술연구부

Key words : Aging Mechanism, Aging Factor, Mechanical Integrity, Aging Monitor

### 1. 서론

세계적으로 원자력발전소 주요기기의 효율적 유지 관리를 위한 기술 개발 분야는 개별 특성에 대한 데이터베이스 개발, 파손 메커니즘별 평가 프로그램 개발 분야에 치중되어 있으며, 모든 데이터베이스와 평가 프로그램 통합 운영, 전문가 협업 시스템 구축, 관련 지식의 순환 등을 목적으로 하고 있다.

국내 원자력발전소의 가동률이나 안전관리 체계는 기술적인 측면에서 세계 최고의 수준으로 평가받고 있으나 이에 대한 국민적인 이해는 훨씬 못 미치고 있는 실정이다. 따라서 일반 국민들의 원자력에 대한 불신을 감소시키고 원자력발전소 안전성 증진을 위한 규제 요구에 적극적으로 대응하는 것이 필요하며 웹을 통하여 경년열화 상태 정보를 제공함으로써 일반 대중에 대한 원자력 안전운용에 대한 신뢰도를 높일 수 있다.

이를 위해 먼저 표준 원자력발전소 주요기기에 대한 손상 메커니즘의 분석이 필요하다. 안전등급 설비인 원자로 압력용기, 가압기, 증기발생기, 등급 1 배관 등에 필요한 데이터와 피로, 균열, 부식, 조사취화 등과 같은 손상기구를 결정하였다. 또한 이들을 인터넷 기반으로 연결하고 통합된 데이터베이스 시스템을 연계할 수 있는 시스템 통합(System Integration, SI) 기술의 개발이 필요하다.[1,2]

본 논문에서는 경년열화 메커니즘 분석 및 손상기구, 손상값(Aging Value, AV) 결정에 따른 손상 예측과 경보에 대한 기술적 근거를 바탕으로 하여 복잡한 계산절차가 요구되는 열화평가코드 알고리즘을 개발하였다.[3] 또한 가동중 발생하는 열화 및 손상에 관한 정보를 통합적으로 관리하고 연계할 수 있는 데이터베이스 설계 및 주요기기에 대한 웹기반 설계, 규제, 인허가 문서, 검사 및 감시결과와 열화평가코드의 연계를 통한 웹기반 경년열화 예측/경보 시스템을 구축하였다. Fig. 1은 개발하고자 하는 웹기반 경년열화 감시 시스템의 개요도이다.

### 2. 웹기반 열화평가코드 분석 및 개발

웹기반 열화평가코드 분석 및 개발을 위해 먼저 열화손상기구로 [3]에서 연구되었던 피로, 균열, 조사취화, 가압열충격, 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking, SCC) 이외에 감육, 증기발생기 세관 결함 등을 추가로 열화손상기구로 선정하였으며 이에 대한 손상값으로는 길이 및 크기, 응력확대계수(Stress Integrity Factor, K), 에너지방출률(Energy Release Rate, G or J), 임계값두께(Critical Wall Thickness)로 결정하였다.[4]

먼저 열화평가코드 분석한 결과는 다음과 같다. 감육손상을 판단하는 평가 절차로는 ASME Code Sec. XI, Div. 1에 기초한 ASME Method와 국부응력을 이용한 평가법인 Local Stress Method를 사용하였다. 특히 감육현상은 가압중수로형의 2차측 배관과 가압중수로형의 1차측 공급수관에서 흔히 발생한다.[5]

피로균열손상은 가동중검사를 통하여 검출된 결함부위에 대하여 ASME Sec.XI IWA-300 및 IWB-3610에 따라 결함을 단순화(Idealization)한 후 그 크기가 IWB-3500에 주어진 허용기준을 만족하는지를 판단한다. 허용기준을 만족하면 계속하여 원자력발전소를 가동할 수 있으며, 만족하지 못하는 경우 Appendix A의 결함평가절차에 따라 파괴역학분석을 수행하여 결함 안전성 평가를 수행한다. Appendix A는 두께가 4inch 이상이고 항복강도가 50ksi 이하인 페라이트 재료에 대하여 적용할 수 있다.

조사취화는 원자력발전소 압력용기의 중성자조사로 인해 강화, 경화되어 취화됨으로써 파괴저항성이 감소하는 현상이다. 조사로 인한 취화의 정도를 나타내는 양으로는 샤르피 충격시험의 최대흡수에너지와 기준무연성전이온도를 사용한다. 조사취화에 의한 원자로 압력용기의 파괴인성 변화를 파악하기 위해서는 원자로 설치 시 원자로와 동일한 재질의 시편을 제작하여 원자로 내에 보존하고 일정 운전기간이 경과한 후 실험을 통해 취화량을 측정해야 한다. 조사취화가 진행되면 최대흡수에너지는 감소하고 기준무연성전이온도는 증가한다. 재료가 취화되면 연성이 줄고 취성이 증가하여, 취성파괴가 일어날 확률이 높아지기 때문에 이를 감시할 필요가 있다.[6-8]

이와 같이 분석한 결과를 토대로 개발되어진 열화평가코드는 원자로 압력용기, 증기발생기 세관 결함, 배관 감육 결함, 배관 결함, 응력부식균열이며 각 코드의 운영환경은 원도우 운영체제를 기반으로 데이터베이스 관리 시스템을 사용하였다. 프로그래밍 언어로는 C#과 Java를 사용하여 기존의 시스템(PHP 사용)과 완벽한 호환이 가능하도록 하였다. 각각의 열화평가코드는 관계형 데이터베이스를 통하여 입력 및 결과값을 공유할 수 있으며 이는 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEM) 및 전문가에 의한 상세해석 데이터로 사용된다.

### 3. 웹기반 감시시스템 디자인

웹기반 감시시스템을 구축하기 위해서 주요기기에 대한 손상기구별 운전시간에 따른 손상값을 결정하였다. 설계 손상값(Design AV), 측정 손상값(Monitored AV), 예측 손상값(Predicted AV)을 계산하였으며 설계 손상값은 초기 설계 응력보고서의

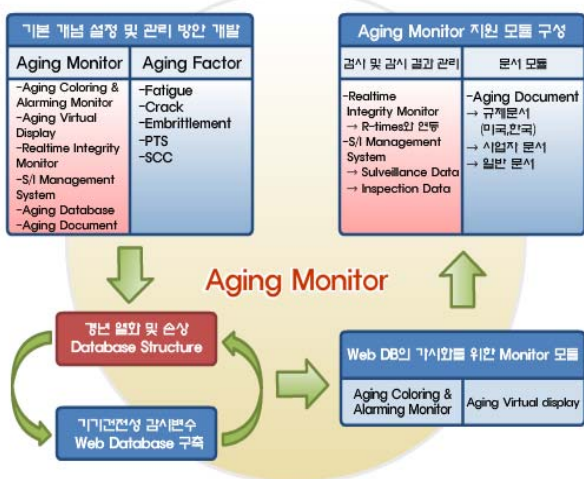


Fig. 1 The configuration of aging monitoring system

값을 이용하였으며, 측정 손상값은 관련 측정 및 검사 실험 등의 결과값을 사용하였고, 마지막으로 예측 손상값은 열화평가코드를 이용한 계산값을 사용한다. 이러한 일련의 과정을 통해 얻어진 손상값은 경년열화현상의 지표로 사용하기 위해 본 논문에서는 손상계수(Aging Factor, AF)를 제시하고자 한다. 손상계수는 최대 허용 손상값을 기준으로 결정하며 각 손상기구별 측정 손상값을 최대 허용 손상값으로 나누어 계산한다. 계산결과는 0과 1사이의 값으로 표현되며 손상계수 값이 1이면 해당 기기는 사용할 수 없다는 것을 의미하고 손상계수 값이 0이면 경년열화현상이 발생하지 않았다는 것을 의미한다. 따라서 손상계수는 기기의 경년열화정도를 정량적으로 나타낼 수 있으며 효과적인 손상계수 계산을 수행하기 위하여 손상기구와 관련된 데이터베이스를 구축하였다. Table 1과 Fig. 2는 손상기구별 손상계수 평가 식과 데이터베이스의 구조이다.

Table 1 Equations to calculate AFs for Aging Mechanism

Aging Mechanism	Aging Parameter	Acceptance Criteria	Relevant Equations of AF
Fatigue	CUF	1	$AF(F) = CUF$
Crack	a	$a \leq a_c$	$AF(C) = a/a_c$
Embrittl.	USE	Initial over 75lb-ft During operation over 50lb-ft	$AF(U) = 3 - (USE/25)$ $(50 \leq USE \leq 75)$
PTS	RTPTS	$RTPTS \leq 300^\circ F$ (circum. weld) $RTPTS \leq 270^\circ F$ (plates, forgings, axial weld)	$AF(P) = RTPTS / (300 - \text{Init. value}) + (1 - 300) / (300 - \text{Init. value})$
SCC	a	$a \leq a_c$	$AF(S) = a/a_c$
S/G Tube	Wear Rate	Stay Cylinder: 30% Other Area: 36%	$AF(TW) = \text{Wear Tube No.} / 8241$
	Plugging Rate	8% of Total S/G tubes	$AF(PT) = \text{Plugging Tube No.} / 8241 \times 0.08$

서로 연계되어 감시시스템이 경년열화를 예측하고 경보하는 기능을 제공할 있게 하였다. Fig. 3은 감시시스템의 6가지 모듈에 대한 기본 개념도이다.

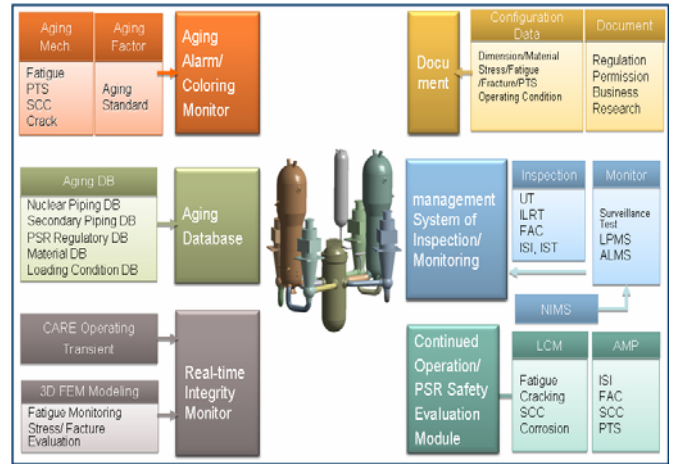


Fig. 3 Basic Concept of Aging Expert Monitoring System

4. 결론

본 논문은 한국표준형 원자력발전소의 주요기기에 대한 정량적 수명관리를 위하여 주요 안전등급 설비에 발생하는 경년열화 메커니즘을 분석하였다. 이를 바탕으로 웹상에서 기기의 건전성을 평가할 수 있는 코드를 개발하였다. 또한 기기 설계에 관련된 정보와 건전성 평가결과를 효과적으로 다룰 수 있는 데이터베이스를 개발하고 이를 이용하여 웹기반 감시시스템을 구축하였다.

- (1) 원자력 발전소 주요기기에 대한 경년열화 메커니즘 분석 및 웹기반 열화평가 코드 개발
- (2) 원자력 발전소 주요기기에 대한 경년열화 데이터베이스 구축
- (3) 원자력 발전소에 대한 웹기반 감시시스템 디자인

5. 후기

본 논문은 교육과학기술부의 원자력연구개발 중장기 계획 사업과 성균관대학교 기계공학부 Post BK21 사업의 일환으로 수행된 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

6. 참고 문헌

1. 박운원, "산업설비의 수명평가 기술, II. 원자력 설비 분야", 기술 분석보고서, 산업설비 안전성평가 연구센터, 1997.
2. 한국원자력안전기술원, "원자력 안전 규제기술 개발: 원전 수명 관리 규제기술 개발," KINS/GR-243, 2002.
3. 고한옥, 2007, "원전 주요기기의 열화현상을 고려한 웹기반 감시 시스템 개발", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집.
4. Pipe Crack Study Group, "Investigation and Evaluation of Stress-Corrosion Cracking in Piping of Light Water Reactor Plants", USNRC, NUREG-0531, 1979.
5. Benabdallah, C., 1993, "Evaluating the Remaining Strength of Corroded Pipelines," Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Canada.
6. 이택진, 2001, "원자로용기의 정상/비상 운전조건시 건전성평가 법에 관한 연구," 성균관 대학교 박사학위 논문
7. 김영진, 정해동, "원자력발전소 압력용기 및 배관계통의 건전성 평가", 대한기계학회지, 31(3), 244-250, 1991.
8. ASME, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components", ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI Appendix A, "Analysis of Flaw", 1998.

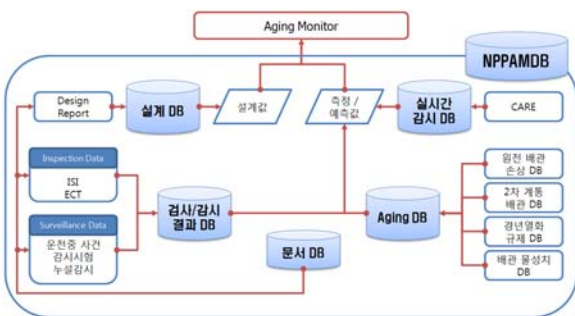


Fig. 3 The schematic diagram of the NPPAMDB

웹기반 감시시스템은 경년열화를 예측/경보하기 위해 크게 6가지의 모듈로 구성되어 있다. 원자력발전소의 기기별 경년열화 상태를 한눈에 확인할수 있는 Aging Coloring & Alarming Monitor 모듈, 원자력 발전소의 3차원 가시화를 위한 Aging Virtual Display 모듈, 실시간으로 원자력 발전소 운전 조건을 확인하고 그 데이터를 바탕으로 평가프로그램과 연동 가능한 Realtime Integrity Monitor 모듈, 가동중 발생한 사건과 검사결과를 입력할 수 있는 S(Surveillance)/I(Inspection) Management System 모듈, 원자력 발전소 배관손상 데이터베이스, 경년열화 규제 데이터베이스, 2차계통 배관 데이터베이스, 배관 물성치 데이터베이스 등으로 구성된 Aging Database 모듈 이상으로 총 6가지의 모듈이