

## CANDU 압력관에 대한 건전성 평가 시스템 개발

곽상록\* · 이준성\*\* · 김영진\*\*\* · 박윤원\*\*\*\*

### Development of Integrity Evaluation System for CANDU Pressure Tube

Sang-Log Kwak, Joon-Seong Lee, Young-Jin Kim and Youn-Won Park

**Key Words:** Pressure Tube(압력관), Integrity Evaluation(건전성평가), Sharp Flaw(예리한 결함), Blunt Notch(둔한 노치), Blister(블리스터), Delayed Hydride Cracking(지체수소균열), Stress Intensity Factor(응력확대계수)

#### Abstract

The pressure tube is a major component of the CANDU reactor, which supports nuclear fuel bundle and its containment vessel. If a flaw is found during the periodic inspection from the pressure tubes, the integrity evaluation must be carried out, and the safety requirements must be satisfied for continued service. In order to complete the integrity evaluation, complicated and iterative calculation procedures are required. Besides, a lot of data and knowledge for the evaluation are required for the entire integrity evaluation process. For this reason, an integrity evaluation system, which provides efficient way of evaluation with the help of attached databases, was developed. The developed system was built on the basis of ASME Sec. XI and FFSG(Fitness For Service Guidelines for zirconium alloy pressure tubes in operating CANDU reactors) issued by the AECL, and covers the delayed hydride cracking(DHC). Various analysis methods are provided for the integrity evaluation of pressure tube. In order to verify the developed system, several case studies have been performed and the results were compared with those from AECL. A good agreement was observed between those two results.

#### 1. 서 론

캐나다에서 개발한 CANDU형 원자로는 냉각재 및 감속재로 중수를 사용하며, 천연우라늄을 핵연료로 사용한다. CANDU 압력관은 연료로 사용

되는 핵연료 다발을 지지하기 위해 원자로 내에 수평으로 설치되어 연료 무게로 인한 처짐, 핵연료 인출시의 마모, 외부와의 온도차로 인한 결함이 발생할 확률이 높다. CANDU 압력관의 재질은 냉간 가공된 Zr-2.5%Nb 합금으로 국내 원자로에는 380개의 핵연료 압력관이 설치되어 있다.

캐나다에서는 73년 이후 CANDU 압력관의 건전성 저하로 인한 잦은 사고로 큰 손실을 입은 바 있으며, 국내에서도 정기 검사시 기준 초과 결함 및 외부관과 접촉한 압력관이 발견되어 일부 압력관을 교체한 바 있다. 이러한 CANDU 압

\* 성균관대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 경기대학교 전자기계공학부  
\*\*\* 성균관대학교 기계공학부  
\*\*\*\* 한국원자력안전기술원



력관은 원자로의 1차기기로 건전성확보가 매우 중요하며, 결함 및 외부관과 접촉이 발견된 경우 국내 및 원자로 개발국가인 캐나다의 법규에 의해 건전성을 확보하여야 한다.<sup>(1-3)</sup> 캐나다의 AECL<sup>(4)</sup> 및 COG(CANDU Owner's Group)를 중심으로 CANDU 압력관의 건전성 확보에 관한 연구가 진행중이며, AECL에서는 압력관 건전성평가를 위한 평가절차서(FMSG)를 92년과 96년에 발간하였다.<sup>(5-6)</sup> 이 절차서에는 압력관에 존재하는 예리한 결함(sharp flaw), 둔한 노치(blunt notch) 및 블리스터(blisters)에 대한 건전성 평가 방법이 제시되어 있다.

CANDU 압력관의 건전성 평가에는 결함의 파괴역학적 평가에 추가적으로 재료내 수소농도 증가에 따른 수소화물(hydride) 석출 및 중성자 조사의 영향을 고려한 건전성평가를 수행하여야 한다. 그러나 이러한 평가를 위해서는 많은 설계자료의 수집, 가동중 검사 자료의 분석, 평가변수 계산을 위한 반복계산 및 다양한 수식 적용에 따른 전문 지식이 요구되어 현장에서의 신속한 평가가 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 압력관의 건전성을 다양한 방법으로 신속하게 평가할 수 있는 건전성평가 시스템을 개발하여, 사용자의 기준에 따른 평가는 물론 평가절차서에 따른 평가를 가능하게 하였다. 또한 가동기간 증가에 따라 누적되는 많은 평가 자료의 효율적인 관리 및 평가자료의 활용을 위한 데이터베이스를 구성하여 평가시 이를 활용할 수 있도록 하였다.

## 2. CANDU 압력관 데이터베이스

평가시스템을 이용한 사례연구 수행결과 수소농도는 지체수소균열(Delayed Hydride Cracking : DHC)의 주요 인자로 압력관 수명평가에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 평가를 위해서는 가동기간에 따른 수소농도의 분석이 요구되어 이들 자료 및 결함평가에 필요한 자료를 데이터베이스 및 데이터베이스 관리시스템(DBMS)으로 구성하였다.

데이터베이스의 구성은 CANDU 압력관의 각 데이터 특성을 파악하여 10개의 데이터테이블로 구분하였으며, 구성된 데이터베이스는 압력관의 이름과 검사일자를 인덱스(index)로 하는 관계형 데이터베이스(relational database)로 각각의 자료가

연관되어 있다. 본 연구에서 개발된 평가시스템은 활용도를 높이기 위해 일반 상용프로그램인 MS-Access<sup>(8)</sup>와 호환이 가능하도록 구성하였다. 구성된 데이터베이스의 항목가운데 주요내용은 다음과 같다.

### 2.1 제작 관련자료

수소농도 분석을 위해 압력관 제작시 사용된 강괴(ingot)의 특성, 압력관 설치 후 측정된 위치에 따른 내경/두께 등의 형상 자료, 인장시험 및 경도시험 자료가 포함된다. 이들 항목은 정기 검사시 측정되는 항목과 비교하여 중성자 조사 및 가동기간에 따른 영향의 분석에 사용한다.

### 2.2 CIGAR 검사자료

압력관검사 전용장비인 CIGAR(Channel Inspection and Gauging Apparatus for Reactors)를 사용하여 압력관의 결함 및 외부 관과의 접촉여부를 검사한다. 이 장비는 압력관내에 냉각수가 충수되어 있는 상태에서의 검사가 가능하며, 검사항목은 다음과 같다.

- 1) 결함의 형상, 위치, 종류
- 2) 압력관 위치 별 두께, 반지름
- 3) 스페이서 위치, 위치에 따른 관의 처짐량

이들 자료는 파괴역학적 평가 또는 응력해석의 기초자료로 활용되며, 한 개의 압력관에서 여러 개의 결함이 동시에 검출될 수 있다.

### 2.3 Elongation 측정자료

압력관의 기본 형상은 103.4mm(내경) × 4.19mm(두께) × 6,400mm(길이)로 중성자조사에 의해 관의 길이 및 내경이 증가한다. 설계시 길이에 대해 5%(320mm)의 여유를 두고 설계하였으나, 길이 증가로 인한 지지물의 간섭을 방지하기 위해 정기적으로 길이 증가량을 확인하여 이를 보정하는 작업이 필요하다. 반면 관의 내경 증가로 인해 냉각수가 압력관의 일부 면만을 통과하는 현상(by-pass)을 유발한다. 원자로의 안전운전을 위한 보정작업 이력과 연신량 측정 자료가 데이터베이스에 포함된다.

### 2.4 Scrape Sampling 자료



전술한 바와 같이 수소농도는 건전성평가 결과에 매우 큰 영향을 미치는 주요 인자로 정기적으로 측정하여야 정확한 건전성 평가가 가능하다. 압력관의 설치시 측정된 자료와 정기 검사이 측정된 자료(압력관의 일부를 긁어낸 scratch sample의 수소농도 분석)를 비교하면 가동중 흡수한 중수소량을 구할 수 있다. 중수소 흡수량은 DHC 성장 속도를 결정하며, 이 성장속도는 피로성장량보다 수배 큰 값으로 압력관의 수명을 결정한다. 데이터베이스에는 압력관의 축방향 및 원주방향 위치에 따른 수소농도 및 중수소 농도, 측정일자가 있어 향후 원전 가동에 따른 수소농도의 분석이 가능하도록 하였다.

### 3. 건전성 평가

CANDU 압력관의 건전성평가는 ASME Sec. XI<sup>(9)</sup>의 결함평가 항목 외에 추가적으로 DHC와 블리스터 거동에 관한 평가를 수행한다.

#### 3.1 예리한 결함의 평가

평가기간 중 반복적으로 발생하는 과도상태를 고려한 피로균열 및 지체수소 균열성장량 계산, 불안정 파괴평가, 소성붕괴평가, 파단전누설(LBB) 평가가 있으며, 이들의 평가 파라미터는 가동기간 증가에 따라 계산하였다. 평가절차서<sup>(6)</sup>에서 제시하는 기준을 적용할 경우 응력확대계수와 파괴인성치로 얻어지는 불안정파괴에 대한 안전여유가 가장 작아 전체 수명을 지배하는 것으로 나타났다.<sup>(7,10~13)</sup>

#### 3.2 둔한 노치의 평가

평가기간 중 발생하는 과도상태를 고려한 균열 발생평가, DHC 발생평가, 소성붕괴 평가, 파단전누설 평가가 있다. 선행된 연구에서는 평가기간이 증가하면 균열 발생평가가 지배적이며, 수소농도가 증가하는 경우 DHC 발생 평가가 전체 평가를 지배하는 것으로 나타났다.<sup>(7,10~13)</sup>

#### 3.3 블리스터의 평가

블리스터의 발생 및 성장과정을 Fig. 1에 나타내었다. 압력관(PT)과 외부관(CT)과의 접촉부에는 온도차로 인해 수소화물이 집중되어 상변태가 일어난다. 이때 변화된 상이 부풀어 오른 모양이라

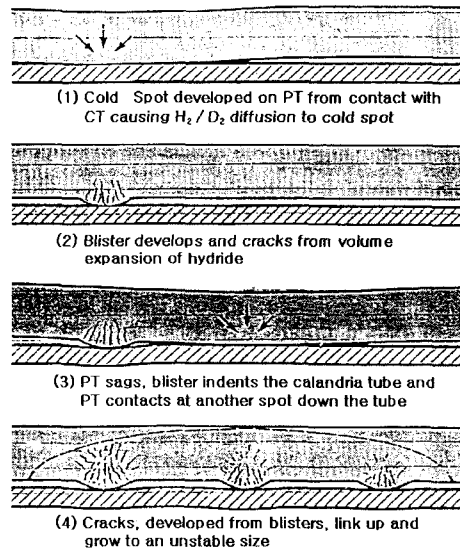


Fig. 1 Blister formation process

하여 블리스터라 하며, 이 변화된 상(phase)의 파괴인성값은 원재료의 값보다 매우 낮아 압력관 파손의 주된 원인이 된다. 이러한 블리스터 평가에는 블리스터 발생 평가 및 발생된 블리스터의 성장량 계산이 있다. 접촉부의 수소농도가 블리스터발생 수소농도(Blister Formation Threshold : BFT)를 초과하면 블리스터 발생이 예상된다. BFT는 해당원자로의 PHTS(Primary Heat Transport System) 온도와 감속재의 포화온도를 사용하여 결정하며, 원자로에 따라 다른 BFT 값을 갖는다. 블리스터가 발생하면 블리스터 성장량을 수치적분으로 구하며, 이 값이 허용블리스터 깊이를 초과하지 않아야 지속적인 사용이 가능하다.

### 4. 건전성평가 시스템

개발된 건전성평가 시스템은 입력모듈, 데이터베이스 및 관리모듈, 계산모듈, 결과 출력모듈로 구성되어 있다. 평가 프로그램은 객체지향형 프로그래밍 방식 지원이 용이한 C++언어<sup>(14)</sup>를 사용하여 개발하였으며, 사용이 용이하도록 Graphic User Interface(GUI), 도움말 및 파일 입출력이 지원된다.

개발된 평가시스템은 평가절차서에서 제시하는



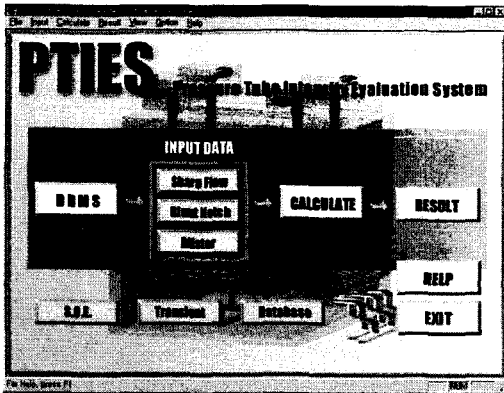


Fig. 2 Main screen of evaluation system

기준 이외에 사용자의 기준에 따른 평가가 가능하도록 평가에 요구되는 주요 파라미터를 사용자에게 제시한다. 평가시스템의 초기화면을 Fig. 2에 나타내었다.

#### 4.1 자료 입력모듈

데이터베이스에서 언급했던 건전성평가에 필요한 항목을 입력하는 모듈로 블리스터에 대한 입력화면은 Fig. 3과 같다. 입력 자료는 결함의 종류에 따라 다르며 다음의 항목을 설정할 수 있다.

- 압력관 자료 : 압력관 이름, 관두께, 내부 반지름, 관두께 및 반지름 변화량, 외부와의 접촉여부, 접촉 기간, 최대 처짐량 및 위치, 가터스프링 위치
- 결함 자료 : 결함의 종류 및 방향, 결함 길이, 결함 깊이, 결함 폭, 결함 위치, 노치 반경
- 재료물성치 : 초기수소농도, 받아들인 중수소량, 극한응력
- 운전조건 자료 : 평가기간, 누설시 원자로 냉각시간, 누설감지 반응시간
- 과도상태 자료 : 과도상태별 최대/최소응력, 발생빈도, 원자로 및 압력관의 입출구 온도-압력
- 실험자료 : 블리스터 발생농도, 블리스터 성장량, 유한요소 해석결과 등의 테이블로 구성된 자료

이러한 많은 자료의 효율적인 입력을 위해 데이터베이스 또는 파일형태로 저장된 내용을 이용할 수 있도록 구성하였다.

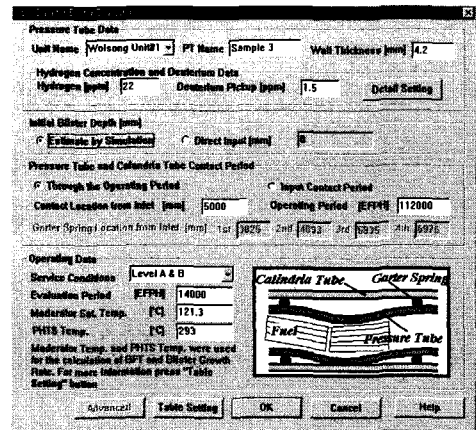


Fig. 3 Data input screen for blister evaluation

#### 4.2 계산 모듈

계산 모듈에서는 건전성 평가파라미터의 계산은 물론 허용기준을 적용하여 평가 대상 압력관의 건전성 확보여부 및 건전성 평가 중 발생한 오류에 대한 정보를 기록하여 사용자에게 제공한다.

블리스터의 평가절차는 Fig. 4와 같다. 사용자로부터 자료를 입력받아 상당수소농도와 BFT와의 비교, 블리스터 성장량을 계산하여 허용조건 만족여부를 판별하도록 구성하였다.

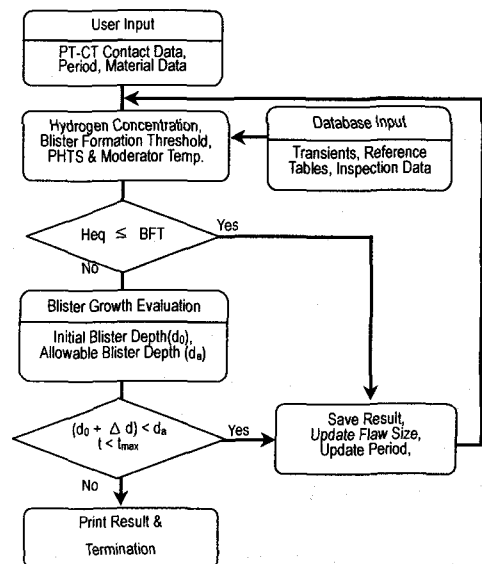


Fig. 4 Flow chart for blister evaluation



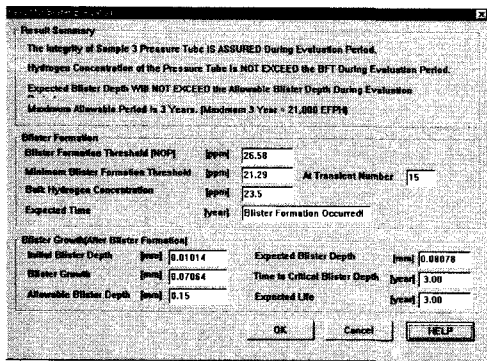


Fig. 5 Result output screen for blister evaluation

#### 4.3 결과출력 모듈

입력자료를 이용하여 계산된 결과를 출력하는 모듈로 평가기준, 평가파라미터, 건전성 확보여부, 잔여수명, 및 계산된 안전여유를 그래프와 수치로 출력하도록 구성하였다. 한 예로 블리스터의 평가결과 출력화면을 Fig. 5에 나타내었다.

### 5. 사례연구

평가시스템의 효용성을 검증하기 위하여 국내 원자로의 정기검사 시 검출된 기준 초과 결함과 외부관과 접촉된 압력관에 대하여 개발된 평가시스템을 이용한 결과와 AECL의 평가 결과를 비교하였다.<sup>(10-13)</sup> 원자로 냉각질차 및 과도상태 자료는 국내 CANDU원자로의 설계시 고려된 값<sup>(4)</sup>을 사용하였다.

#### 5.1 예리한 결함 및 둔한 노치

운전조건 Level A & B의 과도상태에 따른 하중조건과 Table 1과 같은 입력자료를 사용하였으며, 평가기간은 10,500 EFPH (1.5 year, 1 year = 7,000 EFPH)로 설정하여 평가를 수행하였다.

건전성평가의 주요 파라미터에 대한 비교 결과를 AECL의 결과와 함께 Table 2, 3에 수록하였으며, 서로 잘 일치하였다.

예리한 결함에 대하여 평가시스템을 이용하여 평가한 결과, 불안정파괴에 대한 안전여유가 가장 작아 전체 평가수명을 지배하는 것으로 나타났다.

평가기간중 발생할 수 있는 원자로의 shutdown은 13회이나, 3회의 shutdown이후 불안정파괴에

Table 1 Details of Data Input

	Sharp Flaw	Blunt Notch
Wall Thickness [mm]	4.23	4.22
Inner Radius [mm]	52.95	53.08
Flaw/Notch Depth [mm]	1.20	1.27
Flaw/Notch Length [mm]	5.00	4.30
Notch Radius [mm]	N.A.	0.36
Initial Hydrogen[ppm]	9.00	11.00
Deuterium [ppm]	11.30	26.40

Table 2 Comparison of evaluation parameter for sharp flaw.

	AECL	Evaluation System
Crack Extension (mm)	0.085	0.083
Margin on S.I.F.	3.16	3.20
Margin on Stress	4.43	4.38
Allowable Shutdown	3	3
Continued Operation ?	No	No

Table 3 Comparison of evaluation parameter for blunt notch.

	AECL	Evaluation System
DHC Initiation	No	No
Fatigue Crack Initiation	No	No
Margin on Stress	4.13	4.22
Continued Operation ?	Yes	Yes

대한 안전여유를 만족시키지 못하여, 향후 3회의 shutdown이 발생하기 전 압력관 교체가 요구된다.

둔한 노치에 대한 평가결과도 AECL의 결과와 잘 일치하였으며, 절차서에서 제시하는 조건을 모두 만족하여 지속적인 사용이 가능하였다. 평가의 입력을 변화시키면서 평가를 수행한 결과가 동기간이 작은 경우 DHC 발생평가가 결과를 지배하는 항목으로 나타났으며, 가동기간이 증가할수록 피로균열발생 평가가 결과를 지배하는 항목으로 나타났다.

#### 5.2 블리스터

블리스터의 발생평가는 실험을 통하여 얻어진



블리스터 발생 한계수소농도(BFT)와 측정을 통해 얻어진 수소농도, 두 판의 접촉시점을 이용한다. 그러나 가동중 검사가 표본검사인 관계로 정확한 접촉 시점을 알 수 없다. 본 사례 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 원자로의 가동 초기부터 두 판이 접촉하였다는 가정하에 원자로 가동시부터 현재까지 블리스터의 발생 및 성장에 관한 평가를 수행하였다.

블리스터발생 수소농도 및 블리스터 성장량과 관련된 자료는 국내 원전과 출력이 동일한 캐나다 원전의 자료를 사용하였으며, 주요 입력자료는 다음과 같다.

- 접촉부 위치 : 5,000 mm
- 설치시 수소농도 : 9.00 ppm
- 초기수소농도 : 22.00 ppm
- 중수소 흡수량 : 1.25 ppm/yr
- 가동 기간 : 112,000 EFPH
- 평가 기간 : 14,000 EFPH
- PHTS 온도 : 293 °C
- 감속재 포화온도 : 121.3 °C

평가결과 평가 말기의 상당수소농도는 23.5ppm으로 정상운전상태에 대한 BFT인 26.58ppm보다 작아 블리스터가 발생하지 않으나, 운전조건 Level A & B의 모든 과도상태를 고려하여 해석하면 블리스터가 발생하는 것으로 평가되었다. 또한 원자로 가동초기부터 접촉이 발생하였다고 가정하여, 원자로 가동기간인 112,000 EFPH에 대해 블리스터의 발생시점 및 성장량을 계산해 보았다. 그 결과 15.2년이 지난 후에 블리스터가 발생하여 성장량은 0.01mm로 계산되었고, 향후 2년까지의 블리스터 성장량은 0.07mm로 절차서에서 제시하는 허용 값인 0.1mm를 초과하지 않았다. 따라서 평가기간중 지속적인 사용이 가능한 것으로 판명되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 CANDU형 압력관의 건전성을 신속하고 정확하게 평가할 수 있는 건전성평가 시스템을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ASME Sec. XI 및 AECL의 FFSG 절차서를

기준으로 예리한 결함, 둔한 노치 및 블리스터에 대한 건전성평가를 수행할 수 있는 모듈 및 데이터베이스를 개발하였다.

(2) 시스템의 효용성을 확인하기 위해 개발한 평가시스템의 결과와 AECL의 평가결과를 서로 비교하였으며 잘 일치하였다.

## 참고문헌

- (1) CSA, 1994, "Periodic Inspection of CANDU Nuclear Power Plant Components," CAN/CSA-N285.4.
- (2) CSA, 1991, "Requirements for Class 1, 2, and 3 Pressure-Retaining Systems and Components in CANDU Nuclear Power Plants," CAN/CSA-N285.2-M89.
- (3) 한국원자력안전기술원, 1992, "월성원자력 2호기 예비안전성분석보고서 심사보고서," KINS /AR-152.
- (4) AECL, 1992, "Service Loadings for Stress Analysis of the PHTS End of Fuel Strings."
- (5) AECL, 1992, "Fitness-for-Service Guide lines for Zirconium Alloy Pressure Tubes in Operating CANDU Reactors," COG-91-66.
- (6) AECL, 1996, "Fitness-for-Service Guide lines for Zirconium Alloy Pressure Tubes in Operating CANDU Reactors," COG-91-66.
- (7) 박상록, 이준성, 김영진, 박운원, 2000, "CANDU 압력관에 대한 건전성평가 시스템 개발 : 예리한결함 및 둔한 노치에의 적용," 대한기계학회논문집 A권, 제 24호, pp. 206~214.
- (8) Microsoft, 1997, "Microsoft Access97."
- (9) ASME, 1995 "ASME Boiler and Pressure Vessel Code," Section XI.
- (10) Scarth, D. A., 1990, "Assessment of Flaw Indications in Wolsong NGS Unit 1 Fuel Channels H-06 and M-11," OHRD Report No. 90-189-P, Ontario Hydro.
- (11) AECL, 1992, "The Case for Continued Operation of Wolsong-1 without Removal of Pressure Tubes in Channels M11 and O08."
- (12) AECL, 1996, "Pressure Tube Blister Susceptibility Assessment."
- (13) Moan, G. D. Coleman, C. E. Price, E. G., 1990, "LBB in the Pressure Tubes of CANDU Reactors," International Journal of PVP, Vol. 43.
- (14) Microsoft, 1998, "Microsoft Visual C++ 5.0 Enterprise Edition Ver. 5.0."