한국정밀공학회지 제19권 제11호 (2002년 11월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 11, November 2002.

CANDU 압력관에 대한 건전성평가 시스템 개발 - 지체수소균열 및 블리스터 평가에의 적용

곽상록*, 이준성**, 김영진***, 박윤원****

Development of CANDU Pressure Tube Integrity Evaluation System : Its Application to Delayed Hydride Cracking and Blister

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

ABSTRACT

The integrity evaluation of pressure tube is essential for the safety of CANDU reactor, and integrity must be assured when flaws or contacts between pressure tube and surrounding calandria tube are found. In order to complete the integrity evaluation, not only complicated and iterative calculation procedures but also a lot of data and knowledge are required. For this reason, an integrity evaluation system, which provides an efficient way of the evaluation with the help of attached databases, was developed. The developed system was built on the basis of ASME Sec. XI and FFSG issued by the AECL, and applicable for the evaluation of blister, sharp flaw and blunt notch. Delayed hydride cracking and blister evaluation modules are included in the general flaw and notch evaluation module. 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.

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)

1. 서론

캐나다에서 개발한 CANDU형 원자로는 냉각재 및 감속재로 중수를 사용하며, 천연우라늄을 핵연료로 사용한다. CANDU 압력관은 약 290kg에 달하는 핵연료의 지지를 위해 원자로 내에 수평으로 설치되어 있으며, 핵연료 인출시의 마모, 외부와의 온도차, 중성자 조사로 인한 길이 증가, 처짐 등으로 인하여 각종 응력 집중 및 결함이 발생할 확률이 높다. 압력관의 재질은 냉간 가공된 Zr-2.5%Nb 합금으로 국내 원자로에는 호기당 380개의 핵연료 압력관이 설치되어 있다. 캐나다에서는 73년 이후 압력관의 건전성 저하로 인한 잦은 사고로 큰 손실을 입은 바 있으며, 국내에서도 정기 검사시 기준 초

☞ 2002년 3월 25일 접수
* 성균관대학교 대학원 기계공학과
** 경기대학교 전자·기계공학부
*** 성균관대학교 기계공학부
**** 한국원자력안전기술원 규제기술연구부

과결함 및 외부관과 접촉한 압력관이 발견되어 일부 압력관을 교체한 바 있다. 이러한 압력관은 원자로의 1차기기로 건전성확보가 매우 중요하며, 결함 및 외부관과 접촉이 발견된 경우 국내 및 원자로 개발국가인 캐나다의 법규에 의해 건전성을 확보하여야 한다[1~3]. 캐나다의 AECL[4] 및 COG (CANDU Owner's Group)를 중심으로 CANDU 압력관의 건전성 확보에 관한 연구가 진행중이며, AECL에서는 압력관 건전성평가를 위한 평가절차서(FFSG)를 92년과 96년에 발간하였다[4,5]. CANDU 압력관을 포함한 핵연료 채널의 간략화된 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

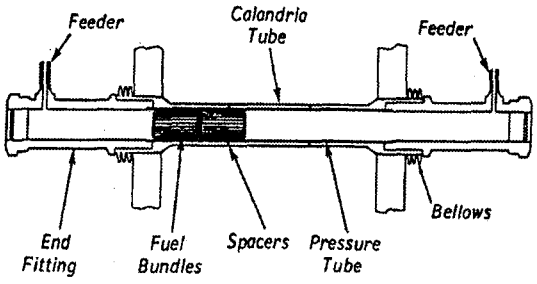

Fig. 1 Schematic diagram of CANDU fuel channel[5]

CANDU 압력관의 건전성 평가에는 일반적인 결함 및 노치의 평가 외에 수소화물(hydride) 석출 및 중성자 조사의 영향을 고려한 평가를 추가적으로 수행하여야 한다. 그러나 이를 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 건전성평가시스템을 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 이를 평가시 활용할 수 있도록 하였다.

2. 건전성평가

CANDU 압력관의 결함검출에는 초음파 탐상과 와전류(eddy current) 탐상을 이용하며, 결함의 형상, 위치, 외부관과의 접촉여부, 압력관의 체적 변화, 처짐 등을 측정한다. 발견된 결함은 ASME Sec. XI[6]의 절차를 이용하여 평가에 용이한 형상으로 이상화하여 건전성 평가에 사용한다. 압력관에 존재하는 결함은 예리한 결함(sharp flaw), 둔한 노치(blunt notch) 및 블리스터(blister)로 분류되며 각각 다른 평가절차를 거친다. 이러한 CANDU 압력관 건전성평가의 특징으로는 지체수소균열(delayed hydride cracking, DHC) 및 블리스터 평가가 포함되며, 예리한 결함 및 둔한 노치의 건전성 평가에 대해서는 선행연구[7,8]에서 일부 다루고 있어 본 연구에서는 DHC 및 블리스터에 대한 평가를 수행하였다.

2.1 DHC 발생 및 성장량

압력관의 제작시에 포함된 결함외에 가동중 발생하는 결함으로는 냉각수에 포함된 입자의 유동으로 인한 결함(debris damage), 핵연료 인출시의 마찰로 인한 결함(fuel fretting) 등이 있다. 가동중 검사를 통하여 결함이 검출되면 ASME Section XI[6]의 IWA-3000 및 IWA-3300의 절차에 따라 하나의 반타원 표면 결함으로 형상을 이상화한다. 결함이 발생되면 결함부위에서의 응력집중, 반복적으로 발생하는 과도상태(transient)에 의한 피로균열성장, 수소화물 생성에 의한 DHC가 발생하여 압력관의 건전성을 저하시킨다. 수소화물에 의한 결함의 성장은 가열시 보다는 냉각시에 피로균열 성장의 수에서 수십배의 속도로 급격하게 진전하며, 압력관 파손사고의 주요 원인으로 알려져있다.

재료내의 수소화물 석출에 따른 DHC의 성장량 계산은 해당 원자로 냉각곡선과 온도의 함수로 주어진 95% 상한값(upper-bound)을 나타내는 식[7]을 이용하여 DHC 성장속도(V)를 구한 후, 이를 식 (1)과 같이 수치적분하여 계산할 수 있다[5].

$$\Delta a = \left[\sum_{j=1} V \times t_j \right] N \qquad (1)$$

여기서, 속도(V)의 단위는 m/s이고 R은 기체상수, T는 절대온도, t_j는 수치적분 구간의 시간간격이며 N은 평가기간 동안의 냉각사이클(cooldown cycle) 수이다.

2.2 불안정파괴 및 소성붕괴 평가

불안정파괴평가에는 재료의 파괴인성치(fracture toughness, K_{IC})와 응력확대계수(stress intensity factor, K_I)를 이용하며, 응력확대계수는 ASME Sec. XI[6], Raju-Newman 식[9], 유한요소해석결과 및 Handbook[10]을 이용하여 구할 수 있다. 냉간가공된 Zr-2.5%Nb 압력관 재료의 파괴인성은 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$K_{IC} = 26.3+0.022T \ [MPa\sqrt{m}] \qquad (2)$$

식 (2)는 20~300℃의 온도범위, 0.18×10^{25}~9.8×10^{25} n/m^{2}범위의 중성자 조사량, 35 ppm의 상당 수소농도에 대하여 얻어진 값이다. 불안정파괴에 대한 안전여유는 Level A & B의 운전조건인 경우 $\sqrt{10}$, Level C & D의 경우 $\sqrt{2}$보다 커야한다.

축방향 결함에 대해서는 소성붕괴응력(plastic collapse stress)과 원주방향응력(hoop stress)을, 원주방향 결함에 대해서는 소성붕괴응력과 막응력(membrane stress)을 이용하여 소성붕괴 안전여유를 계산한다. 여기서 계산된 안전여유가 운전조건 Level A & B에 대해 3.0, 운전조건 Level C & D에 대해 1.5 이상이면 허용조건을 만족한다.

2.3 블리스터 평가

가동중 연료무게와 고온환경으로 인한 압력관의 처짐, 스페이서(spacer)의 위치이동으로 외부를 둘러싸고 있는 칼란드리아관(calandria tube)과 CANDU 압력관의 접촉이 발생한다. 두관의 접촉부에서는 온도차로 인한 수소화물의 집중에 의해 상(phase) 변태가 발생하며, 이 변화된 상의 형상이 부풀어 오른 모양이라 하여 블리스터(blister)라 한다. 이 변화된 상의 파괴인성치(fracture toughness)는 변화전 재료의 값보다 매우 낮아 압력관 파손의 주된 원인이 된다. 국내원전의 검사결과에서도 많은 압력관이 외부관과 접촉하고 있었으며, 이를 해결하기 위한 작업이 진행중이다. 블리스터 평가에는 블리스터 발생평가 및 발생된 블리스터의 성장량 계산이 있으며, 블리스터의 발생 및 성장과정을 Fig. 2에 나타내었다.

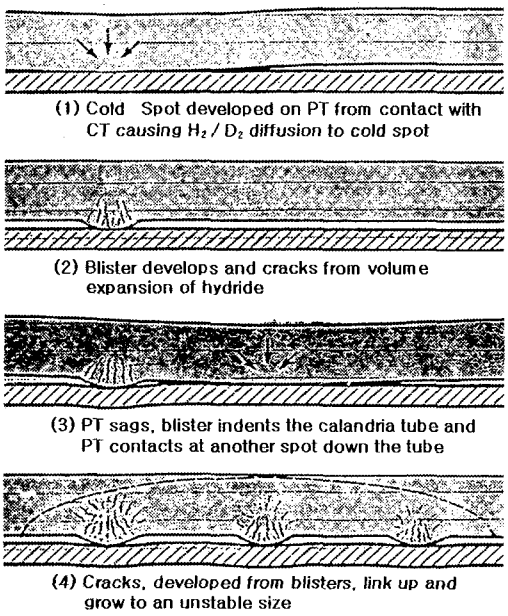

Fig. 2 Blister formation process[11]

블리스터의 발생은 접촉부의 수소농도와 가동중 중수소 흡수량 분석을 통하여 얻어지는 상당수소농도(equivalent hydrogen concentration)가 블리스터발생 수소농도(blister formation threshold, BFT)를 초과하면 발생한다. 블리스터발생 수소농도는 해당 원자로의 PHTS(primary heat transport system) 온도와 감속재의 포화온도에 따라 상이한 값을 갖으며, 본 연구에서는 국내원전과 출력이 동일한 캐나다원전의 값을 사용하였다. 블리스터가 발생하면 블리스터 성장량을 수치적분으로 구하며, 이 값이 허용 블리스터 깊이를 초과하지 않아야 지속적인 사용이 가능하다. 블리스터의 정확한 평가를 위해서는 두 관의 접촉기간, 접촉부의 수소농도, 냉각재 및 감속재의 온도, 과도상태 자료가 필요하다. 그러나 전수검사가 아닌 표본검사를 수행하고 있으므로 일반적으로 접촉시점(또는 접촉기간) 및 접촉시의 수소농도를 알 수 없어 블리스터의 발생시점을 예측하기 위해서는 접촉시점을 가정하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 사용자가 보수적인 가정을 할 수 있도록 하여 압력관이 원자로 가동 초기부터 접촉을 가정한 경우로 분리하여 해석을 수행하도록 하였다. 가동 초기부터 접촉을 가정한 해석은 설치시 수소농도와 평가시점의 수소농도차이를 이용하여 설치 후부터 선형적으로 수소농도를 증가시키면서 블리스터 발생시기 및 블리스터 발생 후 현재까지의 성장량을 계산하였다. 접촉시

점을 가정한 경우는 접촉한 기간에 대하여 블리스터의 발생 및 성장량을 계산하였다. 현재까지의 블리스터 발생여부 또는 성장량이 계산되면 허용 블리스터 깊이까지 블리스터가 성장하는 시간의 계산이 가능하다.

3. 데이터베이스

평가시스템을 이용한 사례연구 수행결과 수소농도는 DHC의 주요 인자로 압력관 수명평가에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 평가를 위해서는 가동기간에 따른 수소농도의 분석이 요구되어 이들 자료 및 결함 평가에 필요한 자료를 데이터베이스 및 데이터베이스 관리시스템(database management system, DBMS)으로 구성하였다.

데이터베이스의 구성은 CANDU 압력관의 각 데이터 특성을 파악하여 10개의 데이터테이블로 구분하였으며, 구성된 데이터베이스는 압력관의 이름과 검사일자를 식별자(index)로 하는 관계형 데이터베이스로* 각각의 자료가 연관되어 있다. 본 연구에서 개발된 평가시스템은 활용도를 높이기 위해 일반 상용프로그램인 MS-Access[12]와 및 국내 CANDU형 원자력 발전소의 현장에서 사용하는 데이터베이스 관리시스템과 호환되도록 구성하여 그 효용성을 높였다. 구성된 데이터베이스의 주요 항목은 다음과 같다.

3.1 제작관련 자료

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 사용된다.

3.2 CIGAR 검사자료

검사전용장비인 CIGAR(channel inspection and gauging apparatus for reactors)를 사용하여 압력관의 결함 및 외부관과의 접촉여부를 검사한다. 이 장비는 압력관내에 냉각수가 충수되어 있는 상태에서 다음 항목의 검사가 가능하다.

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

파괴역학적 평가 또는 응력해석의 기초자료로 활용되는 이러한 자료는 동일 압력관에 대해 여러 개의 결함이 존재하거나, 검사 시점에 따라 자료가 누적될 수 있다.

3.3 연신량 측정자료

중성자조사에 의해 관의 길이 및 내경이 증가한다. 설계시 길이 증가에 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 일부만을 통과하는 현상(by-pass)을 유발한다. 원자로의 안전운전을 위한 보정작업 이력과 연신량 측정자료가 본 데이터베이스에 포함된다.

3.4 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 검사시 측정된 자료(압력관의 일부를 긁어낸 scratch sample의 수소농도 분석)를 비교하면 가동중 흡수한 중수소 흡수량을 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.

3.5 스페이서 위치 보정작업 자료

스페이서의 위치 이동으로 인한 압력관과 외부관과의 접촉을 방지하기 위해 스페이서의 위치 측정 및 설계위치에서 많이 벗어난 스페이서의 위치 이동 작업과 관련된 자료를 수록하였다.

4. 건전성평가 시스템

PTIES(Pressure Tube Integrity Evaluation System)

으로 명명된 CANDU 압력관 건전성 평가시스템은 전 절에서 설명한 예리한 결함, 둔한 노치 및 블리스터의 평가 모듈 및 평가자료의 관리를 위한 데이터베이스모듈과 데이터베이스 변환모듈로 구성되어 있다. 평가 모듈에는 자료 입력모듈, 결과 출력모듈, 계산모듈로 세분화되며, 그 구성을 Fig. 3에 나타내었다. 평가 프로그램은 객체지향형 프로그램 방식 지원이 용이한 C++언어[13]를 사용하여 개발하였으며, 사용이 용이한 Graphic User Interface (GUI), 도움말 및 파일 입출력이 지원된다. 개발된 평가시스템은 평가절차서에서 제시하는 기준 이외에 사용자의 기준에 따른 평가가 가능하도록 평가에 요구되는 주요 파라미터를 사용자에게 제시한다. 평가시스템의 초기화면을 Fig. 4에 나타내었다.

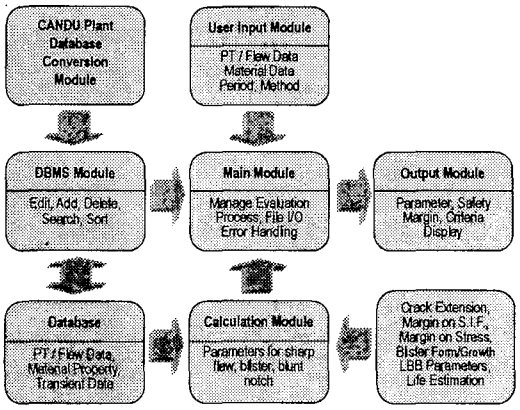

Fig. 3 Structure for the evaluation system

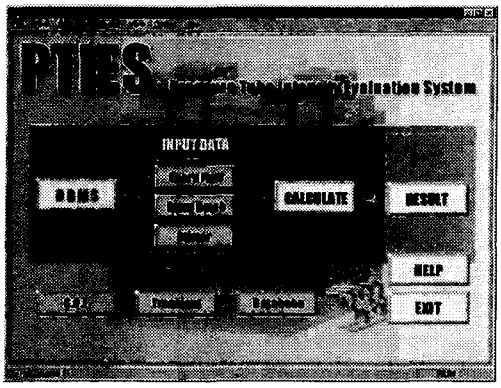

Fig. 4 Main screen of evaluation system

4.1 자료입력 모듈

CANDU 압력관 데이터베이스에서 언급했던 건전성평가에 필요한 항목을 입력하는 모듈로 결함과 블리스터에 대한 입력화면을 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 입력자료는 평가대상에 따라 다르며 다음과 같은 항목을 설정할 수 있다.

- 압력관 자료 : 압력관 이름, 관두께, 내부 반지름, 관두께 및 반지름 변화량, 외부관과의 접촉여부, 접촉 기간, 최대 처짐량 및 위치, 스페이서 위치
- 결함 자료 : 결함의 종류 및 방향, 결함 길이, 결함 깊이, 결함 폭, 결함 위치, 노치 반경, 초기 블리스터 깊이
- 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
- 실험 자료 : 블리스터발생 수소농도, 블리스터 성장량, 유한요소 해석결과 등의 테이블로 구성된 자료

이러한 많은 자료의 효율적인 입력을 위해 데이터베이스 또는 파일형태로 저장된 내용을 이용할 수 있도록 구성하였으며, 자료 입력중 도움말을 이용할 수 있도록 구성하였다.

4.2 계산모듈

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

결함의 경우 계산되는 파라미터로는 결함평가 필요여부, 응력확대계수, 파괴인성치, 피로균열 성장량, DHC 성장량, 평가 단계별 균열길이, 최종고용도, 파단전누설 평가변수, 소성붕괴응력 등이 있다. 결함의 평가절차는 Fig. 7과 같다. 사용자로부터 자료를 입력받아 균열성장량을 고려하여 최종균열길이를 계산한다. 최종균열길이가 계산되면 건전성 평가에 필요한 파라미터를 계산하여 허용조건을 적용하여 안정성 확보 여부를 판별하도록 평가시스템을 구성하였다.

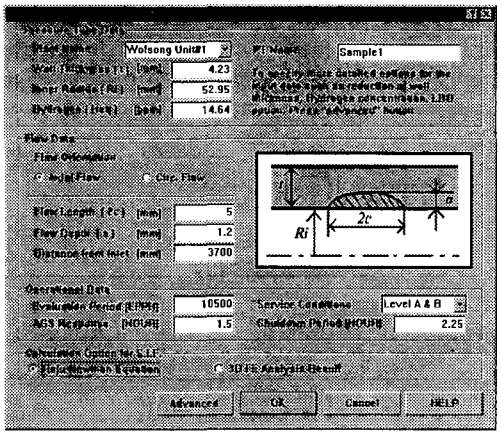

Fig. 5 Data input screen for flaw evaluation

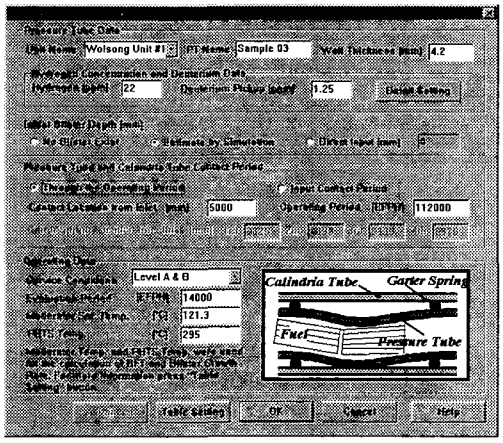

Fig. 6 Data input screen for blister evaluation

블리스터의 평가절차는 Fig. 8과 같다. 즉 사용자로부터 자료를 입력받아 상당수소농도와 블리스터발생 수소농도의 비교, 블리스터 성장량 계산, 허용조건의 만족여부를 판단 및 잔여수명 예측의 순으로 계산하도록 구성하였다. 블리스터 평가에 중요한 영향을 미치나 실제자료가 없는 압력관과 외부관과의 접촉시점에 대한 고려를 하기 위해 다음의 두가지 경우로 구분하여 해석하였다.

Case 1) 압력관 설치시의 초기 수소농도와 현재수소농도가 주어진 경우, 상당수소농도(H_{eq})의 변화가 Fig. 9와 같이 선형적으로 변화한다 가정하여 블리

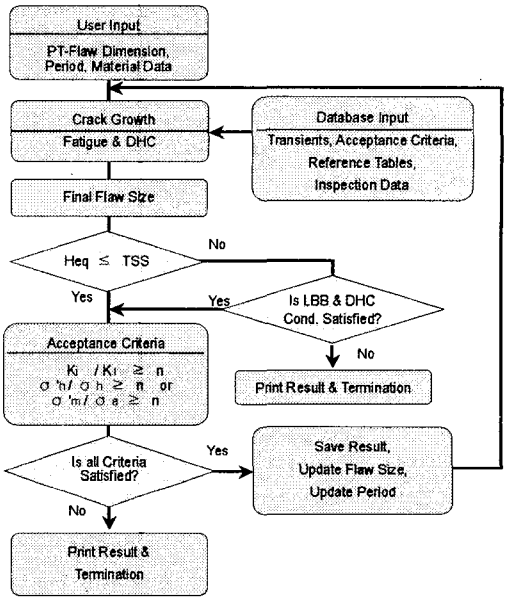

Fig. 7 Flow chart for flaw evaluation

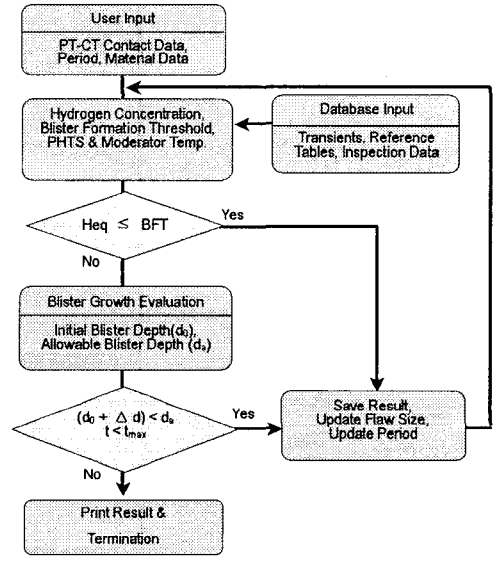

Fig. 8 Flow chart for blister evaluation

스터의 발생 및 성장량을 계산하였다. 즉 가동 초기부터 수소농도를 선형적으로 증가시키면서 블리스터 발생수소농도를 초과하는 시점을 블리스터 발생 시점으로, 발생 후부터는 블리스터 성장량을 계

산하여 이를 현 시점의 초기 블리스터 깊이로 고려하여 잔여수명을 계산하였다.

Case 2) 현시점의 수소농도와 중수소 흡수량만 주어진 경우, 가동기간을 이용하여 설치시의 수소농도를 외삽(extrapolation)하여 블리스터발생 시점 및 성장량을 계산하였다.

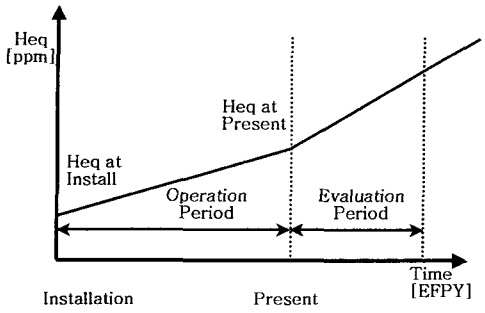

Fig. 9 Change of equivalent hydrogen concentration by operation period

블리스터의 발생 및 성장을 계산하기 위해서는 설계문서에 제시된 다양한 과도상태를 모두 고려하여야 한다. 그러나 실제 계산시 특정 과도상태의 가혹한 조건으로 인해 비교적 낮은 상당수소농도 영역에서 블리스터가 발생하는 문제점을 보완하기 위해 블리스터 발생 및 성장량 계산시 사용자가 지정한 일부 과도상태조건에 한하여 계산이 가능하도록 평가시스템을 구성하였다.

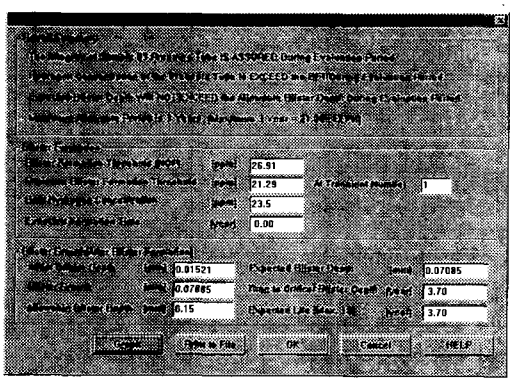

Fig. 10 Result output screen for blister evaluation

4.3 출력모듈

입력자료를 이용하여 평가한 결과를 출력하는 모듈로 평가기준, 평가파라미터, 건전성 확보여부, 잔여수명, 및 계산된 안전여유를 그래프와 수치로 출력하도록 구성하였다. 한 예로 블리스터의 평가결과 출력화면을 Fig. 10에 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[11,14,15]. 원자로 냉각절차 및 과도상태 자료는 국내 CANDU원자로의 설계시 고려된 값[16]을 사용하였다.

5.1 결함 평가

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.

Table 1 Input data of flaw

Item	Flaw
Wall Thickness [mm]	4.23
Inner Radius [mm]	52.95
Flaw Depth [mm]	1.20
Flaw Length [mm]	5.00
Initial Hydrogen[ppm]	9.00
Deuterium [ppm]	11.30

건전성평가의 주요 파라미터에 대한 비교 결과를 AECL의 결과와 함께 Table 2에 수록하였으며, 서로 잘 일치하였다. 결함에 대하여 평가시스템을 이용하여 평가한 결과, 불안정파괴에 대한 안전여유가 가장 작아 전체 평가수명을 지배하는 것으로 나타났다. 평가결과 3회의 shutdown이후 불안정파괴 안전여유를 만족시키지 못하여, 향후 3회의 shutdown 발생 전 해당 압력관의 교체가 요구된다.

Table 2 Comparison of evaluation parameter for flaw

	AECL	PTIES
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

5.2 블리스터 평가

블리스터의 발생평가시 두관의 접촉시점을 알 수 없어 가동초기부터 두관의 접촉을 가정한 해석을 **Case 1**로, 접촉시점을 아는 경우(또는 접촉시점을 가정한 경우)를 **Case 2**로 하여 Table 3에 입력조건을 나타내었다. **Case 1**의 해석은 국내원전의 가동기간, 설계시 고려된 과도상태 자료, 대표적인 가동중 검사자료를 조합하여 사용하였다. **Case 2**의 해석은 94년 국내원전의 정기검사시 접촉이 확인된 압력관중 가장 보수적인 결과를 보이는 수소농도 자료를 기준으로 하였으며, 반면 블리스터 발생 수소농도 및 성장량과 관련된 자료는 조사된 바 없어 국내원전과 출력이 동일한 캐나다 원전의 자료를 사용하였다. 해석 결과는 Table 4와 같으며, 초기블리스터 깊이는 가동초기 또는 접촉시점부터 평가시점까지 계산된 블리스터 성장량으로 평가시스템에서 계산된 값이다.

평가결과에 큰 영향을 미치는 과도상태의 발생빈도는 설계시 고려된 값을 사용하여 평가결과는 실제의 발생 빈도를 고려한 경우보다 매우 보수적으로 계산되었다. **Case 1**의 해석에서 평가말기의 상당수소농도는 23.3ppm으로 정상운전상태에 대한 블리스터 발생 수소농도인 26.9 ppm보다 작아 블리스터가 발생하지 않으나, 운전조건 Level A&B의 모든 과도상태를 고려하여 해석하면 블리스터가 발생하는 것으로 평가되었다. 두 경우 모두 허용 블리스터 깊이보다 작은 블리스터 깊이가 예측되어 평가기간중 사용이 가능한 것으로 나타났다. 블리스터 성장을 고려하여 허용 블리스터 깊이까지 성장하는 시간을 계산하면 3년을 초과하나 건전성평가 절차서에서 제시하는 기준에서는 3년 이내의 기간에 대한 평가만 허용하여 본 해석결과에는 3년으로 나타내었다. 그러나 평가시스템에서는 블리스터

Table 3 Details of blister data input

	Case 1	Case 2
H_{eq} at Installation[ppm]	9.00	7.0
Initial Hydrogen[ppm]	22.00	19.00
Deuterium Uptake[ppm/yr]	1.25	2.0
Contact Period[EFPH]	112,000	21,000
Evaluation Period[EFPH]	14,000	21,000
PHTS Temperature[℃]	293	293
Moderator Temperature[℃]	121.3	121.3

Table 4 Details of blister evaluation results

	Case 1	Case 2
H_{eq} (end of evaluation)[ppm]	23.3	22.0
BFT for N.O.P.[ppm]	26.9	26.9
BFT for Level A&B[ppm]	21.3	21.3
Initial blister depth[mm]	0.01	0.00
Blister growth[mm]	0.07	0.01
Allowable blister depth[mm]	0.15	0.15
Blister formation time[yr]	15.2	2.3

Table 5 Comparison of evaluation parameter for Case 2 analysis

	KINS	PTIES
H_{eq} [ppm]	22.0	22.0
BFT for N.O.P.[ppm]	27.00	26.9
BFT for Level A&B[ppm]	N.A.	21.3
Blister formation time[yr]	2.3	2.3

허용블리스터 깊이까지 성장하는 시간을 10년 이내의 기간에서 사용자에게 제공된다. 또한, Table 5는 **Case 2**의 해석에 대한 입력조건을 이용하여 국내 타기관[1]에서 수행한 블리스터 발생에 대한 검토내용과 본 평가시스템의 해석결과를 비교한 것으로, 서로 일치함을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 CANDU 압력관의 건전성을 신

속하고 정확하게 평가할 수 있는 건전성평가시스템을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 결함이 검출된 압력관의 건전성평가를 위해 ASME Sec. XI 및 AECL의 FFSG 절차서를 기준으로 지체수소균열 및 블리스터에 대한 건전성평가를 수행할 수 있는 모듈을 개발하였다.

(2) 결함평가에 필요한 입력자료 및 가동기간에 따른 검사자료를 효율적으로 관리하기 위한 데이터베이스 관리시스템을 개발하였다.

(2) 시스템의 효용성을 확인하기 위해 동일한 입력자료에 대하여 해석을 수행한 평가시스템의 결과와 타기관의 평가결과를 서로 비교하였으며 잘 일치하였다.

후 기

본 논문은 한국원자력안전기술원과 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국원자력안전기술원, "월성원자력 2호기 예비안전성분석보고서 심사보고서," KINS/AR-152, 1992.
2. CSA, "Periodic Inspection of CANDU Nuclear Power Plant Components," CAN/CSA-N285.4, 1994.
3. CSA, "Requirements for Class 1, 2, and 3 Pressure-Retaining Systems and Components in CANDU Nuclear Power Plants," CAN/CSA-N285.2-M89, 1991.
4. AECL, "Fitness-for-Service Guide lines for Zirconium Alloy Pressure Tubes in Operating CANDU Reactors," COG-91-66, 1992.
5. AECL, "Fitness-for-Service Guide lines for Zirconium Alloy Pressure Tubes in Operating CANDU Reactors," COG-91-66, 1996.
6. ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code," Section XI, A-3000 & A-3300, 1992.
7. 곽상록, 이준성, 김영진, 박윤원, "CANDU 압력관에 대한 건전성 평가시스템 개발 : 예리한결함 및 둔한 노치에의 적용," 대한기계학회논문집 A권, 제24호, pp. 206-214, 2000.
8. 김영진, 석창석, 이진석, 박윤원, "CANDU 압력관 결함 평가를 위한 결함해석," 대한기계학회 논문집, 제19권, 제3호, pp. 731-740, 1995.
9. Newman, J. C. and Raju, I. S., "Stress Intensity Factors for Internal Surface Cracks in Cylindrical Pressure Vessels," Transaction of the ASME, Vol. 102, pp. 293-297, 1982.
10. Zahoor, A., "Ductile Fracture Handbook, Vol. I, II, III," EPRI Report NP-6301-D, Electric Power Research Institute, 1989.
11. AECL, "Pressure Tube Blister Susceptibility Assessment,." Internal report, 1996.
12. Microsoft, "Microsoft Access 2000," 2000.
13. Microsoft, "Microsoft Visual C++ 6.0 Enterprise Edition Ver. 6.0," 2000.
14. Scarth, D. A., "Assessment of Flaw Indications in Wolsong NGS Unit 1 Fuel Channels H-06 and M-11," OHRD Report No. 90-189-P, Ontario Hydro, 1990.
15. AECL, "The Case for Continued Operation of Wolsong-1 without Removal of Pressure Tubes in Channels M11 and O08.," Internal report, 1992.
16. AECL, "Service Loadings for Stress Analysis of the PHTS End of Fuel Strings," 1992.