

CANDU압력관에 대한 건전성평가 시스템 개발

- 예리한 결함 및 둔한결함의 적용 -

곽상록, 김영진

성균관대학교

이준성

경기대학교

박윤원

한국원자력안전기술원

요 약

국내에서 상업운전중인 월성 원자로는 캐나다에서 개발한 CANDU형 원자로로 핵연료를 지지하는 핵연료 압력관이 사용되며, 핵연료 압력관은 원자로의 1차기기로 건전성확보가 매우 중요하다. 가동중 검사시 압력관에서 결함이 검출되면, 지속적인 사용을 위해서 결함의 건전성을 확보하여야 하나, 그 평가절차가 매우 복잡하다. 본 연구에서는 핵연료 압력관 평가를 보다 신속하고 효율적으로 수행하기 위한 건전성 평가시스템을 개발하였다. 개발된 평가시스템은 예리한 결함 및 둔한 결함에 대한 평가를 수행할 수 있으며, 피로균열평가, 지체수소균열평가, 불안정파괴평가, 파단전 누설평가, 소성붕괴평가모듈을 수록하고 있다. 또한 개발된 시스템을 검증하기 위하여 캐나다 AECL에서 제시한 평가결과와 비교함으로써 본 시스템의 효용성을 검증하였다.

1. 서론

국내에서 상업운전 중에 있는 월성 원자로는 CANDU형 원자로를 사용하고 있다. 초창기 캐나다에 건설된 CANDU형 원자로는 설계수명이 40년이었으나 가동기간 25년이 지난 97년말 원자로의 폐쇄가 결정된바 있다[1]. 핵연료 압력관은 원자로의 가동기간 증가함에 따라 중성자조사, Hydride 석출 및 고온 운전환경에 따른 기계적성질의 취화가 발생하며, 지속적인 사용을 위해서는 건전성 평가기술의 확보가 매우 중요하다. 국내에서도 1992년 월성 원자력발전소 1호기에 대한 정기 검사시 10개의 압력관에서 14개의 기준이내 결함과 2개의 기준초과 결함 및 7개의 압력관에서 칼란드리아관과의 접촉이 발견되었다. 핵연료 압력관의 건전성 평가는 지체수소영향으로 원자력 배관평가에 사용되는 ASME Section XII[2]의 평가법과 차이가 존재하며, 캐나다의 AECL(Atomic Energy of Canada Limited)[3]에서는 이에 대한 지속적인 연구를 수행하여 압력관 평가 절차서인 FFSG[4]를 발간하였다. 그러나 건전성평가 수행에는 많은 초기 입력자료 및 설계자료가 요구됨은 물론 다양한 해석법이 존재하여 그 평가가 용이하지 않다.

본 연구에서는 결함이 검출된 압력관의 건전성평가를 신속하고 효율적으로 수행할 수 있는 평가시스템을 개발하였다. 평가 모듈로는 피로 및 지체수소에 의한 균열성장평가, 불안정파괴평가, 소성붕괴평가, 파단전누설평가 모듈 등이 있다.

2. 건전성 평가

2.1 결함성장량의 계산

압력관의 결함은 예리한 결함(Sharp Flaw), 둔한 결함(Blunt Notch) 및 블리스터(Blister)로 분류되며, 각각 다른 절차에 따라 평가를 수행한다. 본 연구에서는 파괴역학적 평가절차를 수행하는 예리한 결함과 고체역학적 평가를 수행하는 둔한 결함의 평가에 대해서 다루었으며, 추후 블리스터 평가에 대한 연구를 수행할 예정이다. 파괴역학적인 평가는 구조물의 극한적 파괴형태인 불안정파괴 및 소성붕괴에 대하여 충분한 안전여유를 갖고 있는지 해석하는 것으로서 피로에 의한 균열성장과 지체수소균열(Delayed Hydride Cracking :DHC)에 의한 균열성장을 고려한다. 피로에 의한 균열성장량의 계산에는 Paris 식을 사용하며, 본 연구에서는 FFSG에서 제시된 재료 물성치를 사용하였다[4].

$$\frac{da}{dN} = 3.438 \times 10^{-10} (\Delta K)^{3.439} \quad (1)$$

또한 DHC에 의한 균열성장속도는 다음과 같이 계산되며, 이 값을 구간적분하면 균열성장량을 계산할 수 있다.

$$V = \begin{cases} 13.9 \times 10^{-2} \exp(-56120/RT) & \text{(원주방향 95\% 상한값)} & (2a) \\ 5.2 \times 10^{-3} \exp(-41445/RT) & \text{(축방향 95\% 상한값)} & (2b) \end{cases}$$

$$\Delta a = \left[\sum_{j=1}^N V \times t_j \right] N \quad (3)$$

여기서, N은 반복횟수, R은 기체상수, T는 온도, t_j 는 수치적분 구간의 시간간격이다.

2.2 핵연료 압력관 평가

결함의 건전성평가는 FFSG 절차서에서 제시하는 평가기준을 적용하여 지속적인 사용여부를 결정한다. 평가 파라미터로는 응력확대계수, 파괴인성치(Fracture Toughness), 소성붕괴응력, 막응력(Membrane Stress), 피로개시응력, 상당수소농도(Hydrogen Equivalent Concentration : H_{eq}) 및 최종고용도가 있으며, 추가적으로 파단전누설 평가를 수행하기 위한 파라미터 등이 있다. 이러한 평가 파라미터는 균열증가에 따라 계산된 후 평가기준에 적용된다. 예리한 결함 및 둔한결함에 대한 평가절차는 그림 1, 2와 같으며, 평가 절차도는 자료의 입력, 평가 파라미터의 계산, 결과 출력 및 반복적인 계산으로 구성되어 있다.

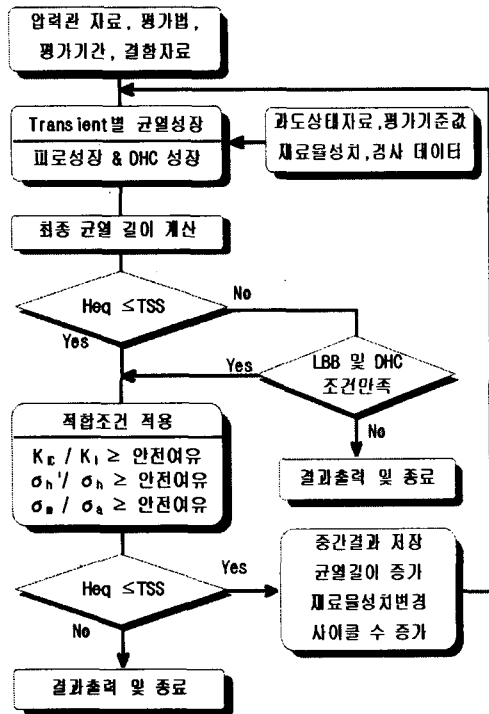


그림 1. 예리한 결함의 평가 절차도

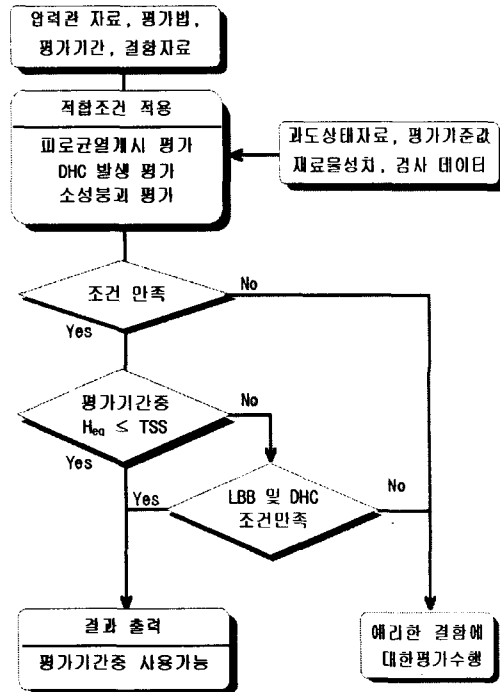


그림 2. 둔한 결함의 평가 절차도

3. 건전성평가 시스템

본 연구에서 개발한 건전성평가 시스템은 입력모듈, 데이터베이스 및 관리모듈, 계산모듈, 결과출력모듈 및 프로그램 관리모듈로 구성되어 있다. 사용자의 편의를 위하여 Windows 95 및 Windows NT에서 동작하도록 개발하였으며, 풀다운 메뉴, 프린터, 단축키, 마우스를 지원한다. 향후 지속적인 프로그램의 확장을 위하여 객체지향형 프로그램 방식(Object Oriented Programming : OOP) 지원이 용이한 C++ 언어를 사용하여, 기존에 개발된 프로그램 또는 향후 개발될 프로그램과의 연결을 통하여 통합된 건전성 평가시스템의 구성이 용이하도록 구성하였다.

3.1 입력 모듈

핵연료 압력관의 건전성평가를 위해서는 압력관의 형상, 결함의 형상, 재료물성치 및 운전조건 데이터가 필요하며, 입력시의 오류를 줄이기 위해 입력항목이 제한된 자료는 미리 설정된 항목에서 선택하도록 하였다. 허용 범위를 초과하는 자료를 입력하면 경고 메시지를 화면에 출력하도록 구성하였다. 또한 입력 작업중 압력관 데이터베이스를 이용할 수 있도록 구성하여, 효율적인 평가를 수행할 수 있도록 하였다.

3.2 데이터베이스 모듈

본 시스템에서는 입력시 발생하는 오류를 줄이고 효율적인 자료 관리를 위해 파일형태로 저장된 데이터베이스를 입력자료로 사용할 수 있도록 구성하였다. 입력화면은 그림 3과 같으며, 자료의 추가, 수정, 삭제 등의 데이터베이스 관리는 상용 데이터베이스 프로그램을 이용하거나 평가시스템에 내장되어 있는 데이터베이스관리 모듈을 이용하여 작업할 수 있도록 구성하였다.

3.3 계산 모듈

계산모듈에서는 예리한 결함과 둔한 결함에 대한 평가를 수행할 수 있도록 구성하였다. 예리한 결함에 대해서는 평가기준길이 계산, 응력확대계수 계산, 파괴인성치 계산, 피로균열성장량 계산, 지체수소균열성장량 계산, 평가단계별 균열길이 계산, 최종고용도 계산, 파단전누설 평가, 소성붕괴 등의 평가가 있다. 또한 둔한 결함에 대해서는 평가기준길이 계산, 피로파괴 개시평가, DHC 발생평가, 최종고용도 계산, 파단전누설 평가, 소성붕괴 등의 평가가 있다.

3.4 결과 출력 모듈

결과 출력 모듈은 평가 수행후 계산된 결과 및 평가파라미터를 출력하는 모듈로 평가기준 적용시의 기준값 및 균열 길이에 따른 평가 파라미터의 변화를 사용자에게 제시하기 위해 여러 가지 사용자 편의 도구를 구성하였다. 또한 파단전누설 평가 수행시 요구되는 파라미터인 임계균열길이, DHC 성장속도 및 관통균열의 길이를 주어진 운전절차에 따라 시간에 대하여 출력하도록 구성하였으며, 파라미터 출력 화면구성은 그림 4와 같다.

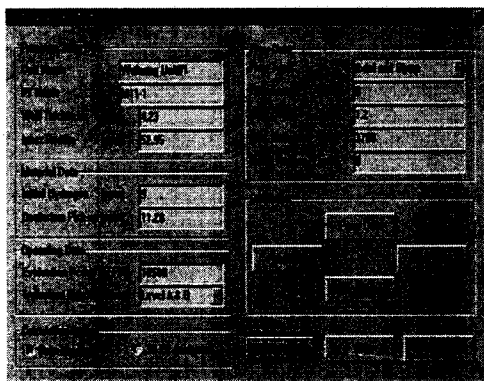


그림 3. 평가 시스템의 입력화면

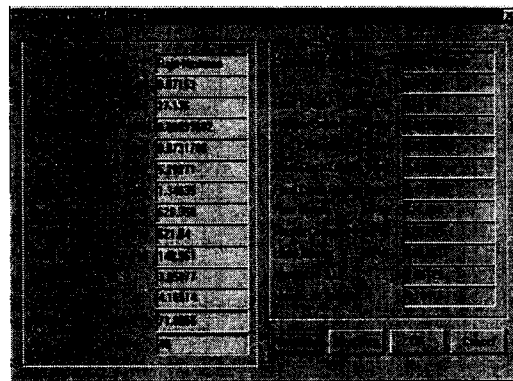


그림 4. 평가 시스템의 평가 파라미터 출력화면

4. 사례연구

개발된 평가시스템의 효용성을 검증하기 위하여 월성 1호기 핵연료 압력관의 정기 검사시 검출된 2개의 기준 초과 결함인 M-11 및 O-08 결함에 대한 사례연구를 수행하였다.[5]

4.1 예리한 결함에 대한 평가수행

축방향의 예리한 결함에 대하여 계산된 주요평가 결과를 표1에 나타내었다.

표 1. 평가시스템의 자료입력 및 출력

자료의 입력		계산된 평가 파라미터		평가 결과	
관두께	4.2 mm	피로균열성장량	0.010 mm	TSS 초과여부	초과하지않음
내부반지름	52.9 mm	DHC균열성장량	0.073 mm	불안정파괴여유	3.17
결함 깊이	1.20 mm	응력확대계수	8.6 MPa√m	소성붕괴여유	4.96
결함 길이	5.00 mm	파괴인성치	27.1 MPa√m	LBB 만족여부	만족
초기수소농도	9.0 ppm	원주방향응력	130.2 MPa	허용Cooldown	3회
중수소흡수량	11.3 ppm	소성붕괴응력	646.4 MPa		

평가파라미터의 계산 값은 운전조건 및 균열성장량에 따라 변경되며, 여기서는 초기균열 및 정상운전조건에 대한 값을 나타낸 것이다. 평가시스템에서는 각각의 균열길이 및 Level A & B의 운전조건에 대하여 위의 내용을 계산하여 사용자에게 제공한다.

계산된 파라미터를 이용하여 평가기준을 적용하면, 불안정파괴에 대한 여유가 가장 작아 전체 수명을 지배하는 것으로 나타났으며, 3회의 Cooldown 이후 조건을 만족하지 못하여 그 이전에 보수 요구된다. 파단전누설 평가는 상당수소농도가 최종고용도를 초과하는 경우에 대하여 수행하나, 입력자료 부족으로 평가말기의 수소농도를 예측할 수 없는 경우에 평가를 수행하게 되며, 원자로 운전절차에 따른 평가를 수행하면 조건을 만족한다.

4.2 축방향의 둔한결함

축방향의 둔한 결함에 대하여 계산된 주요평가 결과를 표2에 나타내었다.

표 2. 평가시스템의 자료입력 및 출력

자료의 입력		계산된 평가 파라미터		평가 결과	
관두께	4.2 mm	최대응력(S_{max})	272.4 MPa	TSS 초과여부	초과하지않음
내부반지름	53.1 mm	피로개시응력	417.0 MPa	피로균열발생여부	발생하지않음
결함 깊이	1.27 mm	균열선단응력(σ_{max})	593.0 MPa	DHC 발생여부	발생하지않음
결함 길이	4.30 mm	DHC개시응력(σ_{th})	620.0 MPa	소성붕괴여유	4.77
노치반경	0.36 mm	원주방향응력	130.8 MPa	LBB 만족여부	만족
초기수소농도	11.0 ppm	소성붕괴응력	623.3 MPa	안정성 여부	안정
중수소흡수량	26.4 ppm				

계산된 평가 파라미터를 이용하여, 평가기준을 적용하면, 주어진 적합조건을 모두 만족하여 평가기간중 건전성을 확보하였다. 그러나, 보수성 확보를 위해 예리한 결함으로 간주하여 평가를 수행하면, 4회의 Cooldown시 안전여유를 만족시키지 못하여, 장기적인 사용이 허용되지 않아 정기 보수기간중 교체가 예상된다[5]. 이상과 같은 예리한 결함 및 둔함결함의 평가는 AECL의 연구결과[5]와 일치하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 CANDU 압력관에 대한 건전성평가 시스템을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) AECL에서 발간한 FFSG 절차서를 기준으로 예리한 결함 및 둔한 결함에 대한 건전성평가 모듈을 개발하였다.
- 2) 통합시스템의 개발을 위하여 파괴역학적 파라미터 계산모듈, 지체수소균열 및 피로균열성장 계산모듈, 소성붕괴 평가모듈, LBB 평가모듈 등을 개발하였다.
- 3) 시스템의 효용성을 확인하기 위해, 월성 1호기의 정기 검사시 발견된 결함에 대한 AECL의 해석결과와 본 평가 시스템을 이용한 해석결과를 비교한 결과 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

- [1] WEB SITE, "Nuclear Awareness Project News", <http://www.cnp.ca/media/oh-closure>. 1997.
- [2] ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code", Section XI, Appendix A-1000. 1992.
- [3] G.W. Newman, "Assesment of Flaws Found in Wolsong Unit 1 during the 1992 Fuel Channel CIGAR Inspection Campaign", AECL Report, October 1992.
- [4] CANDU Owner's Group, "Fitness-For Service Guideline for Zirconium Alloy Pressure Tubes in Operating CANDU Reactors", Issued for trial use, COG Report No. 91-66, 1996.
- [5] D.A. Scarth, "Assesment of Flaw Indications in Wolsong NGS Unit 1 Fuel Channels H-06 and M-11", OHRD Report No. 90-189-P, Ontario Hydro, 1990.