

# 중수로 압력관의 크리프 처짐 해석 기법 및 프로그램 개발

심도준\* · 허남수\* · 박보규\* · 장윤석\* · 김윤재† · 김영진\* · 정현규\*\*

## Development of Creep Deflection Analysis Method and Program for CANDU Pressure Tube

Do-Jun Shim, Nam-Su Huh, Bo-Kyu Park, Yoon-Suk Chang, Yun-Jae Kim, Young-Jin Kim and Hyun-Kyu Jung

**Key Words :** Pressure Tube (압력관), Calandria Tube (칼란드리아관), Creep Deflection (크리프 처짐), Finite Element Analysis (유한요소해석)

### Abstract

Estimation of the CANDU pressure tube deflection is important since the deflection may cause significant structural failure due to hydrogen diffusion and blister. However, there is no appropriate engineering model to estimate it exactly. The purpose of this paper is to propose a new analysis method and program to resolve this issue. For development of proper analysis method, a series of finite element analyses has been carried under elastic-creep condition. In addition, for effective estimation of the creep deflection, an analysis program named PC-DAS was developed based on the proposed method. Comparison of simple case study results with corresponding reference ones showed good agreement. Therefore, the proposed method and program can be utilized as one of valuable toolkit for integrity assessment of CANDU pressure tube.

### 1. 서 론

CANDU형 원자로는 냉각재로 중수를 사용하며, 천연 우라늄을 핵연료로 사용한다. 중수로 원자로의 핵심 기기인 압력관(Pressure Tube: 이하 PT로 약칭)은 연료로 사용되는 핵연료 다발을 지지하기 위해 원자로 내에 수평으로 설치되며 Fig. 1에 나타난 바와 같이 칼란드리아관(Calandria Tube: 이하 CT로 약칭)에 삽입되어 핵연료채널을 이룬다<sup>(1)</sup>. PT와 CT는 일정 간격을 유지하여야 하며, 이를 위하여 이들 사이에는 가터스프링(garter spring)이 설치된다. 원자력 발전소의 운전이력이 늘어남에 따라 PT와 CT는 열이나 방사선 조사에 의한 크리프(creep)등으로 인해 처짐(sagging) 현상이 발생하고, 이로 인해 하부 원자로정지물질 주입관(Liquid Poison Injection Nozzle Tube: 이하 LIN이라 약칭)과의 접촉 가능성으로 발전소 안전성 유지에 매우 위험한 요소가 된다. 또한 가터스프링의 위치 변

화로 인해서도 처짐 현상이 발생할 수 있다. 만약 고온의 CANDU 압력관과 저온의 칼란드리아관 사이에 접촉이 발생할 경우에는 온도구배로 인한 수소 확산과 블리스터(blister)가 형성될 수 있으며 이는 압력관의 균열 및 파손을 야기하여 압력관의 건전성에 심각한 문제를 발생시킬 수 있다<sup>(2)</sup>. 따라서 가동중 압력관의 처짐상태를 측정하는 것은 CANDU형 원자로의 안전운전을 위해 매우 중요하며, 가동중검사시 PT와 CT의 유격 및 가터스프링의 위치변화 등을 측정하고 있다<sup>(3)</sup>.

본 논문에서는 PT와 CT 사이의 간극변화를 예측하기 위해 3차원 유한요소해석에 입각한 해석기법을 제시하고자 한다. 유한요소해석을 이용한 해석기법에서는 핵연료채널의 처짐을 계산하기 위해 지르코늄 합금의 이방성, 중성자 속의 축방향 분포를 반영하는 비균일 크리프 변형률 및 핵연료채널에 작용하는 하중 등이 고려되었다. 특히 핵연료 채널에 대한 크리프 방정식을 유한요소해석에 적용하기 위해 압력관과 칼란드리아관에 대한 크리프 서브루틴(subroutine)을 개발하였다. 유한요소해석 기법을 개발하고 검증하기 위해 Pickering 3/4 호기<sup>(4)</sup>를 해석대상으로 선정하고 이에 대한 2차원 및 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 또한 효율

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과  
E-mail: kimy0308@korea.ac.kr  
TEL: (02)3290-3372 FAX: (02)926-9290

\* 회원, 성균관대학교 기계공학과

\*\* 회원, 한국원자력연구소 원자력로봇팀

적인 해석을 수행하기 위하여 PT와 CT의 간극변화 예측 시스템(PT-CT Deflection Analysis System; PC-DAS)을 개발하였다.

## 2. 중수로 압력관의 크리프 처짐 해석 기법 개발

### 2.1 해석대상

본 연구에서는 3차원 유한요소해석에 입각한 핵연료채널의 처짐예측 기법을 개발하기 위해 Pickering 3/4호기를 해석 대상으로 선정하고 이에 대한 핵연료채널 데이터를 사용하였다. Fig. 2는 Pickering 3/4호기에 대한 형상 및 경계조건을 도시한 것이고, 핵연료채널을 구성하고 있는 압력관(PT) 및 칼란드리아관(CT)에 대한 기하학적 형상 및 재료물성은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

압력관의 자중, 핵연료 하중 및 냉각수 무게로부터 압력관에는 분포하중이 가해지고 칼란드리아관의 자중 및 부력으로부터 칼란드리아관에도 분포하중이 작용한다. 또한, Fig. 2에 도시한 바와 같이 압력관에는 피팅(end fitting), 냉각재공급배관 및 벨로우즈(bellows) 등 다른 부품으로부터 축방향 압축하중이 작용한다. 또한 압력관 및 칼란드리아관의 온도 및 최대 고속 중성자속(neutron flux)은 축방향 길이에 따라 일정하다고 가정하였다. 각각의 값은 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Fig. 2에 도시한 바와 같이 압력관과 칼란드리아관 사이에는 가터스프링(garter spring)이 존재한다. 본 논문에서 고려한 해석 대상에 대한 가터스프링의 위치는 각각  $L_{G1}=2197.1$  mm,  $L_{G2}=1828.8$  mm이다.

### 2.2 핵연료채널에 대한 크리프 서브루틴 개발

핵연료채널에 대한 크리프 처짐을 계산하기 위해서는 압력관과 칼란드리아관에 대한 크리프 방정식을 사용해야 한다. 본 논문에서는 핵연료채널에 대한 크리프 방정식을 유한요소해석에 적용하기 위하여 크리프 서브루틴을 개발하였다.

#### - 일반적인 크리프 방정식

지르코늄 합금에 대한 일반적인 크리프 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon}_c = C_1 t^{E_1} \bar{\sigma}^{E_2} e^{(-Q_1/T)} + C_3 \left( e^{(-Q_2/T)} + C_5 \right) \bar{\sigma}^{E_3} \phi + C_6(x) \bar{\sigma}^{E_4} e^{(-Q_3/T)} \quad (1)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}$  은 크리프변형률,  $\bar{\sigma}$  는 실제 응력,  $t$ 는 시간,  $T$ 는 절대온도,  $\phi$ 는 중성자속,  $E_1, E_2, E_3, E_4$ 는 크리프 지수,  $C_1, C_2, C_3$ 는 크리프 상수,  $Q_1, Q_2, Q_3$ 는 작동온도,  $C_6(x)$ 는 재료의 상수이다.

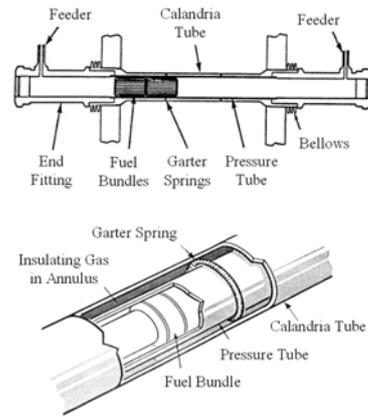


Fig. 1 A schematic illustration of CANDU pressure tube

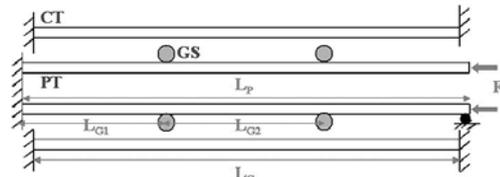


Fig. 2 A typical shape and boundary condition for Pickering Unit 3/4 Fuel channel

#### - 압력관에 대한 크리프 방정식

압력관에 대한 크리프 방정식에서는 열크리프(thermal creep)와 조사크리프(irradiation creep)에 의한 크리프율이 고려된다.

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon}_{thermal} + \dot{\epsilon}_{irradiation} = C_1 t^{E_1} \bar{\sigma}^{E_2} e^{(-Q_1/T)} + (F + H) C_3 \left( e^{(-Q_2/T)} + C_5 \right) \bar{\sigma}^{E_3} \phi \quad (2)$$

여기서,  $F$ 와  $H$ 는 재료의 이방성 계수이며, 본 연구에서 고려한 Pickering 3/4호기 압력관에 대한 각각의 상수는 Table 3에 나타내었다.

#### - 칼란드리아관에 대한 크리프 방정식

칼란드리아관에 대한 크리프 방정식에서는 조사크리프에 의한 크리프율만 고려된다.

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon}_{irradiation} = (F + H) C_3 \bar{\sigma}^{E_3} \phi \quad (3)$$

본 연구에서 고려한 Pickering 3/4호기 칼란드리아관에 대한 각각의 상수는 Table 4에 나타내었다.

### 2.3 크리프 서브루틴의 검증

본 논문에서 개발한 크리프 서브루틴을 검증하기 위하여 핵연료채널(Pickering 3/4호기)에 대한 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 2차원 유한요소해석을 위해서는 기존방법들(CDEPTH<sup>(5)</sup>, CTSAG<sup>(6)</sup>)과 동일하게 빔(beam)요소를 사용하였다. 유한요소해석을 통해 압력관과 칼란드리아관의 처짐을

**Table 1** Summary of geometry and material property for the present work

	P/T	C/T
Unsupported Length (mm)	6070.6(Lp)	5943.6(Lc)
Outer radius (mm)	55.753	66.954
Mean radius (mm)	53.7210	66.1795
Thickness (mm)	4.064	1.549
Elastic modulus (MPa)	75.8E3	90.67E3
Poisson's ratio	0.4	0.4

**Table 2** Summary of load, temperature and neutron flux

	PT	CT
Wt.of P/T+Fuel+D <sub>2</sub> O (N/mm)	0.6419	-
Wt.of C/T+Buoyancy (N/mm)	-	-0.1006
Axial end load (N)	2225	-
Temp. (K)	573.15	323.15
Neutron flux (n/(mm <sup>2</sup> h))	1.242E15	1.0055E15

계산하였으며, 압력관과 칼란드리아관이 접촉하는 시간을 예측하였다.

#### - 2차원 유한요소해석

Fig. 3은 본 논문에서 사용한 2차원 유한요소모델을 나타낸다. 유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(7)</sup>를 사용하였다. 압력관과 칼란드리아관은 빔요소를 사용하여 모델링을 하였으며 가터스프링은 ABAQUS에서 지원하는 스프링(spring)요소를 사용하였다. 유한요소모델에 사용된 절점과 요소의 수는 각각 82개였다.

핵연료채널에 대한 처짐을 예측하기 위해 탄성-크리프 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 필요한 재료물성과 경계/하중조건은 2.1절에서 기술한 조건을 모델에 적용하였다. 압력관 및 칼란드리아관에 분포하중 및 축방향하중을 작용시킨 후 먼저 탄성해석을 수행하고, 하중을 그대로 유지한 상태에서 크리프 해석을 수행하였다. 크리프 해석을 위해서는 본 논문에서 개발한 크리프 서브루틴을 사용하였다. 해석을 통해 Fig. 3에 도시한 바와 같이 모델의 중앙절점에서의 처짐을 시간에 따라 측정하였다.

#### - 해석결과

Fig. 4는 2차원 유한요소해석으로부터 얻은 결과로서, 시간에 따른 압력관과 칼란드리아관의 중앙절점에서의 처짐을 나타낸 것이다. 크리프 시간이 0인 경우의 처짐은 분포하중과 축방향하중에 의한 탄성처짐을 의미한다. 2차원 유한요소해석을 수행한 결과 압력관과 칼란드리아관이 접촉하는 시간은 166000 hr로 나타났다. 본 해석에서 얻은 결과를 검증하기 위해 동일한 경우에 대해서 Ontario Hydro에서 CDEPTH를 이용해 얻은 결과와 비교하였다. Fig. 5는 두 결과를 비교한 것으로서 두 결과

**Table 3** Constant of pressure tube

$C_1$	$2.07 \times 10^{-6}$	$H$	0.81
$E_1$	-0.666	$C_3$	$2.345 \times 10^{-18}$
$E_2$	1	$C_5$	$1.1 \times 10^{-7}$
$Q_1$	4700 K	$E_3$	1
$T$	385.15 K	$Q_2$	9000 K
$F$	0.55	$\phi$	$1.242 \times 10^{15} \text{ n/(mm}^2\text{h)}$

**Table 4** Constant of calandria tube

$F$	0.90	$E_3$	1
$H$	0.45	$\phi$	$1.055 \times 10^{15} \text{ n/(mm}^2\text{h)}$
$C_3$	$1.083 \times 10^{-25}$		

가 잘 일치함을 볼 수 있다. 이를 통해 본 논문에서 개발한 크리프 서브루틴의 타당성을 검증하였다.

#### 2.4 3차원 유한요소해석기법 개발

핵연료채널에 대한 2차원 유한요소해석을 바탕으로 본 연구에서는 핵연료채널에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

#### - 3차원 유한요소모델

3차원 유한요소해석을 위해서는 셸(shell)요소를 사용하였다. Fig. 6은 본 논문에서 사용한 Pickering 3/4호기에 대한 3차원 유한요소모델로서 대칭성을 고려하여 1/2모델링을 하였다. 압력관과 칼란드리아관을 모델링하기 위해서는 셸요소를 사용하였으며, 가터 스프링을 모델링하기 위해서는 ABAQUS에서 지원하는 스프링요소를 사용하였다. 유한요소모델에 사용된 절점과 요소의 수는 각각 22208개와 7004개였다.

해석방법은 2차원 해석과 동일하게 탄성-크리프 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료물성과 경계/하중조건은 2차원 모델과 동일하며, 크리프 서브루틴도 동일하게 사용되었다.

#### - 해석결과

Fig. 7은 Pickering 3/4호기 핵연료채널에 대한 해석결과를 나타낸 것으로, 압력관과 칼란드리아관 중앙위치에서의 처짐을 시간에 따라 나타낸 것이다. 3차원 해석결과를 통해 얻은 접촉시간은 172000 hr로 2차원 해석 결과보다 약 3.5% 크게 나타났다. 한편, 접촉시점에서의 압력관과 칼란드리아관의 처짐은 3차원 결과가 약 9% 작게 나타났다. 2차원 해석에서는 빔요소를 사용하였기 때문에 결과가 더 보수적으로 나타난 것으로 판단된다.

3차원 유한요소해석을 통해서는 중앙위치에서의 처짐뿐만 아니라 압력관 및 칼란드리아관의 전체적인 변형을 파악할 수 있다. Fig. 8(a)는 압력관 및 칼란드리아관의 축방향 단면에서의 탄성변형을

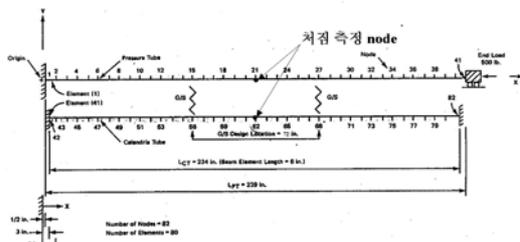


Fig. 3 A typical 2-D FE model for Pickering Unit 3/4, employed in the present elastic-creep FE analysis

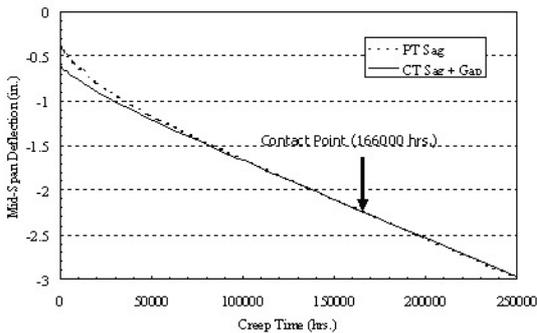


Fig. 4 Variation of deflection with changing time

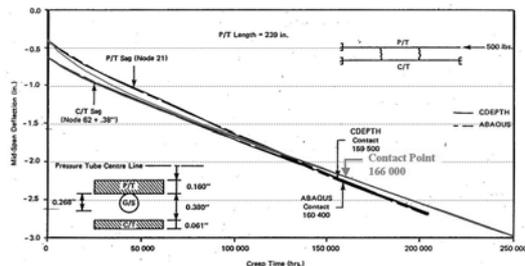


Fig. 5 Comparison with CDEPTH result

나타낸 것이며, Fig. 8(b)는 접촉이 발생하는 시점에서의 형상을 나타낸 것이다. 이와 같이 3차원 유한요소해석에서는 축방향 단면에서의 형상변화뿐만 아니라 원주방향에 따른 형상변화 또는 축방향 길이변화등을 예측할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서 개발한 핵연료채널에 대한 3차원 유한요소해석기법을 바탕으로 핵연료채널의 처짐 예측 프로그램을 개발하였다.

### 3. 간극변화 예측 프로그램 개발

핵연료 채널과 LIN의 간극변화를 예측하기 위한 기존의 프로그램들은 2차원 빔 요소를 사용하여 해석을 수행하므로 해석 결과가 부정확하며, 사용 환경도 불편하다는 문제가 있다. 정확한 처짐 예측을 위해서는 3차원 유한요소해석을 수행하는 것이 바람직하지만, 해석에 필요한 입력파일의 작성이 어렵고 후처리 작업에도 많은 시간이 소요된다. 따라서 본 논문에서는 앞에서 확립한 해석 기법을

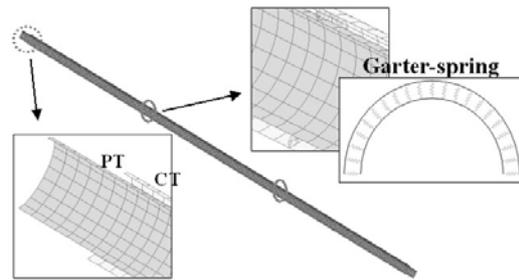


Fig. 6 A typical 3-D FE model for Pickering Unit 3/4, employed in the present elastic-creep FE analysis

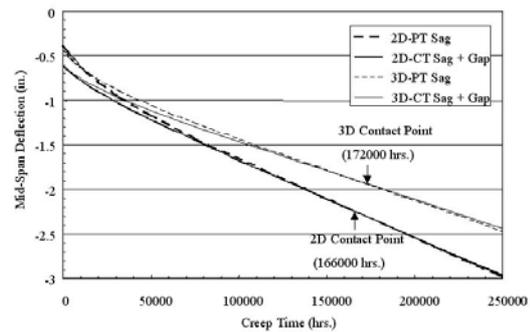
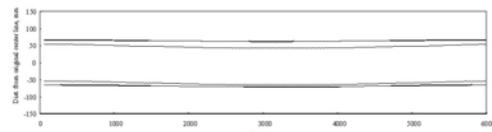
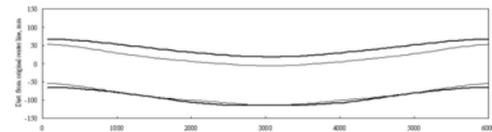


Fig. 7 Comparison of 2-D analysis result and 3-D analysis result



(a) Creep time = 0 hr



(b) Creep time = 172000 hr

Fig. 8 Deformation shape of PT and CT

적용하여 3차원 유한요소해석을 기반으로 쉽고 정확하게 핵연료 채널과 LIN 사이의 간극 변화를 예측할 수 있는 서버-클라이언트 개념 기반의 프로그램을 개발하였다.

PC-DAS 프로그램은 PT와 CT의 간극변화 예측을 위한 3차원 자동 유한요소망 생성 프로그램, 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 기반으로 한 해석부, 그리고 PT와 CT의 간격을 계산하는 후처리 프로그램으로 구성되어 있다. 본 논문에서

개발한 PC-DAS 프로그램의 구성과 흐름은 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 10은 본 논문에서 개발한 PC-DAS프로그램의 주화면으로 사용자가 쉽게 프로그램을 구동할 수 있도록 해석 절차를 주화면으로 구성하였다. Fig. 11은 PC-DAS 프로그램의 모듈들을 나타낸 것이다. PC-DAS 프로그램은 Visual

C++<sup>(8,9)</sup>을 이용하여 Microsoft사의 Windows XP환경에서 개발되었으며 Windows 98, NT에서도 호환이 가능하다. 또한 GUI(Graphic User Interface)환경으로 개발되어 사용자가 쉽게 데이터를 입력하고 수정할 수 있게 구성하였다.

3.1 3차원 자동 요소망 생성 프로그램

핵연료 채널과 LIN의 간극변화 예측을 위한 유한요소해석을 수행하기 위해서는 3차원 유한요소망을 구성해야 한다. 핵연료 채널은 PT, CT 그리고 가터 스프링으로 구성된다. 따라서 PT나 CT의 형상, 가터 스프링의 위치, 하중조건 등이 바뀌면 요소망을 새로 구성해야 한다. 이를 상용 프로그램을 이용하여 수작업으로 수행하면 많은 시간과 노력이 소요되며, 최적화된 요소망의 생성이 어렵기 때문에 해석 결과의 신뢰성 확보에 많은 문제가 있다.

따라서 본 논문에서는 유한요소망과 해석에 필요한 입력데이터를 자동으로 생성할 수 있는 3차원 자동 요소망 생성프로그램을 ABAQUS를 기반으로 개발하였다.

- 형상조건 입력부

형상조건 입력부에서는 PT와 CT의 내경 및 두께, 가터 스프링의 위치, 하중조건을 입력한다. 사용자는 화면상의 형상 그림을 보면서 쉽고 정확하게 데이터를 입력할 수 있다.

- 재료물성치 입력부

재료물성치 입력부에서는 해석에 필요한 재료물성치를 입력한다. 재료물성치 입력부에서는 PT와 CT의 탄성계수(Young's modulus), 포아송비(Poisson's ratio), 밀도(Density), 이방성계수(Anisotropic coefficients), 가동 온도와 중성자 속도를 입력한다.

- 입력파일 생성부

입력파일 생성부에서는 앞에서 입력한 형상 정보, 하중 조건 그리고 재료물성치를 이용하여 해석에 필요한 최종 ABAQUS 입력파일을 생성한다. 유한요소모델은 대칭성을 고려하여 전체의 1/2만이 모델링 되며 각 대칭면에 맞게 경계조건이 설정된다. 생성된 입력파일은 프로그램 상에서 직접 확인할 수 있다.

3.2 ABAQUS 프로그램을 기반으로 한 해석부

ABAQUS 프로그램을 기반으로 한 해석부는 Client/Sever 개념을 이용하여 개발하였다. 일반적으로 상용 유한요소해석 프로그램은 sever인 공학용 워크스테이션(engineering workstation)에서 구동되기 때문에 자동 유한요소망 생성 프로그램으로

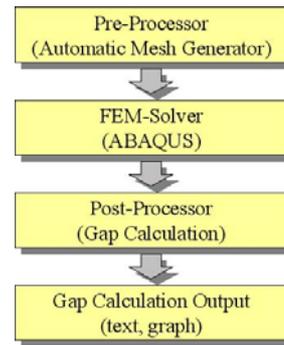


Fig. 9 A Schematic illustration of PC-DAS program



Fig. 10 Main window for PC-DAS program



Fig. 11 Modules of PC-DAS program

생성한 입력 파일을 FTP(File Transfer Protocol)를 이용하여 sever인 워크스테이션으로 전송한다. 입력 파일의 전송이 완료되면 자동으로 sever에 접속되고 ABAQUS 프로그램을 이용한 해석이 수행된다.

3.3 간극 예측을 위한 후처리부

후처리부는 간극 계산 모듈, 파일 전송 모듈, 그리고 계산 결과를 출력하는 모듈로 구성되어 있다. 간극 계산 모듈에서는 ABAQUS 해석결과로부터 자동으로 간극을 계산하는 서브프로그램이 자동으로 수행이 되며, 파일 전송 모듈에서 서브프로그램으로부터 계산한 결과를 사용자의 PC로 전송한다. 이와 같이 간극의 계산 및 전송이 완료되면 텍스트 형식과 그래프 형식으로 그래프 형식으로 가동 시간에 따른 간극의 변화를 검토할 수 있으며 최종적으로 접촉이 발생하는 시간을 예측할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 PT와 CT의 간격을 예측할 수 있는 유한요소해석 기법을 개발하였으며, 이를 바탕으로 현장 적용을 위한 프로그램을 개발하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 3차원 유한요소해석에 입각한 핵연료채널의 처짐예측 기법 및 크리프 서브루틴을 개발하였다.
- (2) 제시한 기법으로 2차원 유한요소해석을 수행한 결과가 CDEPTH의 결과와 잘 일치하여 기법의 타당성을 입증하였다.
- (3) 제시한 크리프 서브루틴을 기반으로 현장에서도 쉽게 처짐량을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다.
- (4) 본 논문에서 제시한 처짐예측 기법은 향후 처짐에 의한 압력관과 칼란드리아관 사이의 간격 변화 예측등의 CANDU 압력관의 건전성 평가를 위해 널리 적용될 수 있다.
- (5) 본 논문에서 개발한 프로그램을 이용하면 쉽고 빠르게 압력관과 칼란드리아관 사이의 간격 변화를 예측할 수 있다.

#### 후 기

본 논문은 한국원자력연구소(KAERI)의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분

들께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Kim, Y.J., Kwak, S.L., Lee, J.S. and Park, Y.W., 2003, "Integrity Evaluation System of CANDU Reactor Pressure Tube," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 7, pp. 947~957.
- (2) Domizzi, G., Enrique, R.A., Ovejero-Garcia, J. and Buscaglia, G.C., 1996, "Blister Growth in Zirconium Alloys: Experimentation and Modeling," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 229, pp. 36~47.
- (3) CSA, 1994, "Periodic Inspection of CANDU Nuclear Power Plant Components," CAN/CSA-N285.4.
- (4) Sauve, R.G., "Predicting Creep Response of CANDU Fuel Channel Assemblies," Ontario Hydro Report.
- (5) Sauve, R.G., "Creep Response of Fuel Channels in CANDU Nuclear Reactors: Computer Code CDEPTH," Ontario Hydro Report, No. 85394, 1985.
- (6) 나복균, 남궁인, "칼란드리아관 처짐도 예측코드 개발," 한전기술(주), 한전 전력연구원, 2001.
- (7) "ABAQUS User's manual," Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1999.
- (8) "Visual C++ Programming Bible", 이상엽, 영진출판사, 1998.
- (9) "Visual C++ 완벽가이드", 김용성, (주)영진닷컴, 1998.