

〈기술보고〉

CANDU형 원자로 주열수송 계통에 대한 Acoustic 해석

이대회 · 김종민 · 엄세윤

한국원자력연구소

(1995. 8. 3 접수)

요 약

1990년 12월 캐나다의 Darlington 2호기에서 발생한 핵연료 다발의 양쪽 지지판에 있는 지지 금속판의 파손은 펌프 날개 통과 압력 충격파가 Acoustic 성격으로 증폭되어 연료봉 지지판의 파손을 일으킨 것으로 추정되었고 이에 따른 주열수송계통에 대한 ABAQUS를 이용한 Acoustic 해석과 수많은 실험을 거쳐 Acoustic 압력 충격파가 핵연료 다발의 연료봉 지지판 파손 원인임이 입증되었다. 이러한 Acoustic 해석과 실험의 결과로써 Darlington 발전소의 열수송 펌프를 5 날개 펌프에서 7 날개 펌프로 교체시키게 되었으며 그 결과 핵연료 스트링의 축방향 진동을 감소시켜 연료봉 지지판의 파손을 방지하게 되었다. 이러한 사례로 인하여 최근 CANDU형 원자로 열수송 계통의 Acoustic 해석에 대한 연구가 AECL의 Chalk River Laboratory와 COG(CANDU Owners Group)에서 활발하게 진행되고 있다. 이 기고문에서는 매우 새로운 분야로써 현재 이루어지고 있는 CANDU형 원자로 열수송 계통의 Acoustic 해석을 위한 해석 이론과 해석 방법을 간단히 요약 정리하였다.

1. 서 론

수력 배관 계통에서 압력 충격파와 이로 인한 Acoustic 진동은 유동의 불연속을 가지게 되는 요소에서의 과도한 유동과 압축기 또는 펌프와 같은 유체 동력 전달부로 인한 유동 장애로부터 기인한다. Acoustic 압력 파동은 충격원의 특성 주파수, 배관계의 전체 형태 그리고 운전 조건에 따라 배관계를 통하여 전파되고 증폭되거나 회석될 수 있다. 압력 충격파를 제어하는 주된 이유는 불안정한 계통 운전을 막고 진동 피로, 과도 부하, 공동 현상으로 인한 손상 또는 부식 마멸 등으로 인한 압력 경계 영역의 손상을 피하고 소음을 인정될 수 있는 수준까지 줄이기 위한 것이다.

CANDU 원자로에서 이러한 Acoustic 압력 충격파로 인한 영향을 평가하기 시작하게 된 것은 1990년 12월 캐나다의 Darlington 2호기에서 핵연료를 교환하는 동안에 핵연료관 N12에서 핵연료 취급기가 이 핵연료관에서 고착된 사고가 발생한 후부터이다. 이 사고는 머지않아 교체되어야 할 핵연료 다발의 양쪽 연료봉 지지판

의 파손에 기인한 것으로 밝혀졌다. Darlington 2호기의 가동을 중지시킨 후 파손된 핵연료 다발의 연료봉 지지판을 조사한 결과 연료봉 지지판의 파손은 펌프 날개 통과 압력충격파가 Acoustic 성격으로 증폭되어 연료봉 지지판의 파손을 일으킨 것으로 추정되었다. 그 이유는 첫째로 파괴 특성이 고주파 피로 현상을 보였고 둘째로 연료봉 지지판의 파손된 연료관에서 연료봉 지지판, 중간 요소 스페이스 패드 그리고 베어링 패드에서 상당한 마모가 있었음을 보여 주었으며 셋째로 비상 냉각수 주입 계통과 여러 개의 냉각재 분배관 그리고 엔드 피팅에서 고주파 진동이 관찰되었기 때문이다. 그리하여 Darlington 발전소에 대한 Acoustic 해석이 시도되었으며 이에 따라 ABAQUS를 이용한 Acoustic 해석과 수많은 실험을 거쳐 Acoustic 압력 충격파가 핵연료 다발의 연료봉 지지판 파손 원인임이 입증되었다. 이러한 Acoustic 해석과 실험의 결과로써 Darlington 발전소의 주열수송 펌프를 5날개 펌프에서 7날개 펌프로 교체시키게 되었으며 그 결과 핵연료 스트링의 축 방향 진동을 감소시켜 연료봉 지지판의 파손을 방지하게 되었다.

이러한 사례로 인하여 최근 CANDU형 원자로 주열수송 계통의 Acoustic 해석에 대한 연구가 캐나다의 AECL과 COG (CANDU Owners Group)에서 활발하게 진행되고 있다.

2. Acoustic 해석 프로그램

복잡한 CANDU 원자로의 주열수송 계통에 대한 Acoustic 해석을 위해 ABAQUS가 사용된다. 이는 ABAQUS가 ANSYS나 NASTRAN에 비교하여 다차원 Acoustic 문제를 처리할 수 있는 1차원, 2차원 그리고 3차원 Acoustic 요소와 Acoustic과 연동된 구조물 Acoustic 문제를 해석할 수 있는 능력을 가지고 있으며 문제의 매개 변수를 쉽게 처리할 수 있기 때문이다. ABAQUS가 CANDU 원자로의 주열수송 기관에 대한 Acoustic 해석에 처음으로 사용되고 난후 1992년 Muzumdar에 의해서 WHAM, 1993년 Tran에 의해서 LINAC이 Acoustic 해석을 위한 해석 코드로 개발되었고, AECL의 Chalk River Laboratory에 의해서 Tara가 Acoustic 해석을 위한 해석 코드로 개발 중에 있다. 그러나 ABAQUS가 아직도 실험으로부터 얻어진 결과와 새로 개발된 해석 코드로 얻어진 결과와 비교해 볼 때 충분한 정확성과 유용성을 보이고 있음을 참고 문헌 [1]에서 보이고 있다.

3. 해석 방법

본 절에서는 ABAQUS가 Acoustic 해석에 충분한 정확성과 유용성을 보이고 있음에 비추어 ABAQUS에서 사용된 해석 이론을 간단히 소개하고 기존에 해석되었던 CANDU 원자로의 주열수송 기관에 대한 Acoustic 해석 방법에 대하여 기술하기로 한다.

3.1. 해석 이론

열 수송 계통 해석에 대한 Acoustic 해석을 위한 평형 방정식을 압력 항으로 나타내면 (1)과 같이 된다 [2].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho_f} \right) - \frac{r}{\rho_f K_f} \dot{p} - \frac{1}{K_f} \ddot{p} = 0 \quad (1)$$

여기서 p : 압력

- ρ_f : 유체의 밀도
- K_f : 유체의 체적 계수
- r : 체적 저항 계수

(1)식을 유한 요소 모델링을 위하여 변분 형태로 나타내면 (2)식과 같이 된다.

$$\int_V \frac{1}{K_f} \delta p \dot{p} dV + \int_V \frac{1}{K_f} \frac{r}{\rho_f} \delta p \dot{p} dV + \int_V \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \delta p}{\partial x} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} dV = \int_{S_f} \delta p \left(-\frac{1}{\rho_f} n \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) dS \quad (2)$$

갤러킨(Galerkin) 법을 사용하여

$$p = H^P p^P ; \quad \delta p = H^P \delta p^P$$

(2)식을 정리하면 (3)식과 같은 선형 동적 구조 해석 문제로 변환시킬 수 있다.

$$M_f^{PQ} \ddot{p}^Q + C_f^{PQ} \dot{p}^Q + K_f^{PQ} p^Q = F_f^P \quad (3)$$

여기서

$$M_f^{PQ} = \int_V \frac{1}{K_f} H^P H^Q dV$$

$$C_f^{PQ} = \int_V \frac{1}{K_f} \frac{r}{\rho_f} H^P H^Q dV$$

$$K_f^{PQ} = \int_V \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial H^P}{\partial x} \cdot \frac{\partial H^Q}{\partial x} dV$$

$$F_f^P = \int_{S_f} H^P \ddot{u}_f^n dS$$

3.2. 해석 모델

그림 1은 CANDU형 원자로 주 열수송 계통에 대한 해석 모델의 한 예를 보여 주고 있다. 해석 모델은 그림 2와 같은 펌프 컷 워터(Pump Cutwater)에서 압력 충격파가 압력원이 되어 이것이 펌프 출구관과 입구 모관을 거쳐 피더를 통해 핵 연료관으로 전달되므로 펌프 컷 워터로부터 시작하여 펌프 입구관, 입구 모관, 입구 피더, 핵 연료관, 출구 피더, 출구 모관, 입구 모관에 연결되어 있는 정지 냉각 계통 배관과 비상 노심 냉각 계통 배관을 포함하여 증기 발생기의 큰 체적으로 인하여

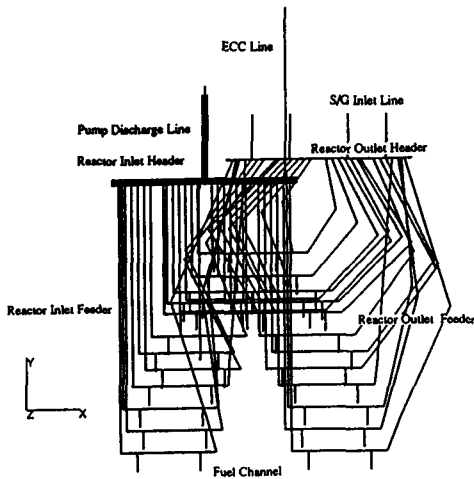


그림 1. ABAQUS Acoustic Model for PHT System

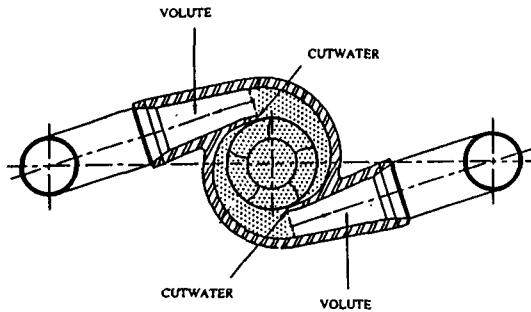


그림 2. Schematic of 5-Vane Impeller PHT Pump

Acoustic 압력 파동에 의한 압력 경계 조건이 0이 되는 중기 발생기 입구관까지로 구성되어 있다. 여기서 정지 냉각 계통 배관과 비상 노심 냉각 계통 배관은 첫 번째 격리 밸브까지 만을 포함한다.

3.3. Acoustic 해석 요소 및 요소 크기

Acoustic 해석을 위한 요소와 요소 크기의 선택은 어떤 주파수 영역에서의 응답을 얻고자 하는가에 따라 달라진다. CANDU형 원자로 열수송 계통에서 사용되었던 펌프는 5날개 펌프로써 회전수가 1800 rpm이다. 이 경우 관심을 가져야할 날개 통과 주파수는 150Hz이다. 그리고 만약 7날개 펌프, 9날개 펌프에 대한 주파수 응답을 얻고자 한다면 주파수 영역을 210Hz(7날개 펌프), 270Hz(9날개 펌프)을 포함할 수 있는 영역까지

해석되어야 한다. 참고 문헌 [3]에 따르면 수많은 수치 실험과 실증 실험을 거쳐 CANDU형 원자로 주열수송 계통에 대한 해석 모델은 펌프 출구관, 원자로 입구 모관, 정지 냉각 계통과 비상 노심 냉각 계통 배관의 입구 모관과의 연결부 1m까지는 2차원 Acoustic 요소로 하고 나머지 주열수송 계통은 1차원 Acoustic 요소로 모델을 구성하는 것이 바람직한 것으로 보고되어 있다. 요소 크기는 ABAQUS에서 $0.2\lambda_{min}$ 보다 작아야 된다는 것을 보여주고 있고 수많은 수치 실험을 거쳐 주파수 300Hz까지의 Acoustic 모드 거동은 최대 0.2m의 요소 크기로 정확하게 모델링될 수 있으나 특별히 관심을 두거나 계통 응답에 중요한 영향을 주는 영역에서는 0.1m 요소 크기를 사용할 것을 추천하고 있다.

3.4. 물성치

Acoustic 해석에 필요한 물성치는 Acoustic 매개체의 밀도, 음속 그리고 체적 계수 등이다. 매개체의 물성치는 온도 변화에 따라 매우 달라지기 때문에 하중 함수의 주파수가 5날개 펌프의 공진 주파수 150Hz, 7날개 펌프의 공진 주파수 210Hz, 9날개 펌프의 공진 주파수 270Hz와 같이 일정하다 하더라도 운전 온도 영역 $60^{\circ} \sim 310^{\circ}C$ 내에서 온도가 변함에 따라 주열수송 계통은 Acoustic 공진 영역을 통과할 수 있다. 따라서 해석되어야할 온도 영역을 선택하여 선택된 온도에서의 물성치를 구하는 것이 필요하다. 어떤 특정한 배관계 요소에서의 체적 계수는 밀도에 해당 배관계에서의 음속의 제곱을 곱한 것으로 정의된다. 서로 다른 배관계에서의 음속은 배관의 내경, 배관의 두께 그리고 고려되는 온도에서의 영(Young)계수의 함수로써 다음과 같이 구해진다.

-배관계에서의 음속

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{1 + \frac{D}{t} \frac{K_B}{E}}}$$

여기서

- C = 배관계 요소에서의 음속
- C_0 = 고려되는 온도에서의 음속
- E = 고려되는 온도에서의 영(Young)계수
- K_B = 고려되는 온도에서의 체적 계수
- D = 배관 내경
- t = 배관 두께

3.5. 체적 저항 계수

ABAQUS에서 Acoustic 감쇠는 체적 저항 계수를 사용함으로써 고려된다. 이것은 Acoustic 에너지 소산에 기여하는 유일한 항이다. 이 Acoustic 에너지 손실을 추정하는데 있어서 정상 유동에 대한 계수의 사용은 적합치 않기 때문에 고려되는 열수력 조건에 알맞은 Acoustic 에너지 손실항을 추정하기 위하여 실험이 수행되어야 한다. 본 글에서 예시되는 해석에 필요한 체적 저항 계수는 Ontario Hydro 펌프 루프 실험과 STERN 실험실 실험 결과로부터 추정된 결과를 사용하였다. [3]

3.6. 하중 조건(출수 날개를 가진 펌프)

압력 충격파는 펌프 날개가 컷 워터를 통과할 때 발생한다. 이때 하중 함수는 최대 압력이 컷 워터에서 $P=+1/-1$ 의 크기를 가진 정현 함수로 적용하고 얻어진 결과에 실험에서 얻어진 컷 워터에서의 압력 값을 곱하여 실제 압력 값을 구할 수 있다. 실제 컷 워터에서의 압력을 알기 위하여 OHRD 펌프 시험 루프에서 실험이 수행되었으며 5 날개 펌프의 경우 21KPa, 7날개 펌프의 경우 14KPa의 압력 값을 보였다.

4. 해석 결과에 대한 분석 방법

Acoustic 해석은 2개의 다른 대상으로 나누어 수행될 수 있다. 그 첫 번째 대상은 원자로 입구 모관이 공진 영역을 일으키는 운전 영역을 예측하고 공진의 크기를 추정하는 것이다. 이것은 계 응답에서 설계 변경의 효과를 평가하는데 이용된다. 두 번째 대상은 핵연료관에서의 압력을 예측하고 핵연료관 내에서 최대 압력을 기초로 하여 핵연료관 내에서의 압력이 큰 순서대로 핵연료관들을 나열하는 것이다. 이 Acoustic 해석의 두 번째 대상은 피더(핵 연료관) 집합체가 압력원(Pressure Source)으로 작용하는 원자로 입구 모관과 압력 침원(Pressure Sink)으로 작용하는 원자로 출구 모관으로부터 디커플된 계(decoupled System)로 간주될 수 있기 때문에 실현 가능하다. 피더와 핵연료관의 디커플링(decoupling)은 원자로 입구 모관에서 실제 측정된 응답에 대해 피더-핵 연료관 주파수를 적절하게 조절할 수 있기 때문에 핵 연료관에서 압력을 추정하는데 있어

좀더 효율적인 방법이다.

그림 3과 그림 4는 Acoustic 해석후 얻어진 원자로 입구 모관에서의 주파수 영역에 따른 최대 정규 압력과 원자로 모관에서의 위치에 따른 최대 정규 압력 분포의 한 예를 보여주고 있다. 공진은 주열수송 계통의 고유진동수가 펌프의 날개 통과 주파수와 같을 때 일어 나므로 그림 3의 주파수 영역에 따른 최대 정규 압력 분포로부터 150 Hz와 270Hz 부근에서 첨두치가 존재하여 5날개 펌프와 9날개 펌프를 사용할 경우 150 Hz와 270Hz에서 공진이 발생하리라는 것을 예측할 수 있다. 이러한 방법으로 공진 주파수는 전 주파수 영역에 걸친 정규 최대 압력 분포도로부터 결정될 수 있으며 이 공진 주파수는 공진 온도로 전환될 수 있다. 이렇게 함으로써 각 펌프 형태에 대하여 정상 운전 온도 영역 내에서 또는 정상

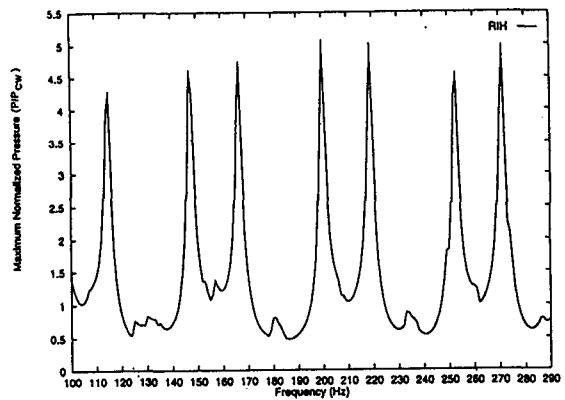


그림 3. Frequency Sweep Of Reactor Inlet Header

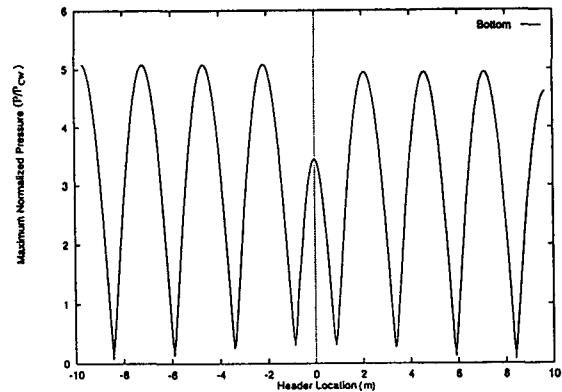


그림 4. Pressure Profile Along Bottom of Reactor Inlet Header

운전 온도 영역 밖에서 공진이 일어나는가를 알 수 있다.

그림 5, 6, 7은 그림 3의 해석 결과(정상 운전 온도 264°C)에 대해 $\pm 15^\circ\text{C}$ 의 온도 영역을 선택하여 온도에 따른 원자로 입구 모관에서의 최대 정규 압력을 도시한 결과를 예로 보여주고 있다. 온도 영역 $264 \pm 15^\circ\text{C}$ 는 150Hz 날개 통과 주파수에 대해 141Hz-161Hz 주파수 영역에 해당하며 210Hz 날개 통과 주파수에 대해서는 198Hz-227Hz 그리고 270Hz 날개 통과 주파수에 대해서는 254Hz-290Hz에 해당한다. 이러한 과정을 통하여 설계 단계에서 펌프 날개 통과 주파수에 따른 펌프출구관, 원자로 입구 모관의 크기 등을 정상 운전시 공진 영역을 피할 수 있도록 결정할 수 있다.

그림 8은 핵 연료관중의 한 개를 선택하여 이 핵연료

관에서의 최대 정규 압력을 도시한 결과를 예로 보여주고 있다. 입구 피더가 연결되어 있는 원자로 입구 모관 각 지점에서의 압력은 입구 피더에 작용하는 압력원이 되므로 피더/핵 연료관 모델을 해석한 후 얻어진 각 핵 연료관에서의 최대 정규 압력을 각 피더가 연결되어 있는 지점에서의 압력을 고려하여 각 핵 연료관에서의 최종 최대 정규 압력을 얻을 수 있다. 이 각 핵 연료 관에서의 최대 정규 압력을 바탕으로 하여 크기순으로 핵 연료관을 나열하고 펌프 컷 워터에서의 실제 압력을 각 핵 연료관에서의 최대 정규 압력에 곱하면 가장 큰 최대 정규 압력을 보이는 핵 연료관으로부터 시작하여 각 핵 연료관에서 핵연료 다발의 손상을 일으킬 가능성이 있는 것을 평가할 수 있다.

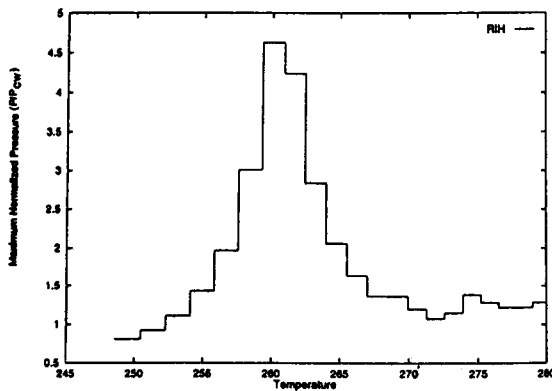


그림 5. Temperature Sweep of Reactor Inlet Header at 150Hz

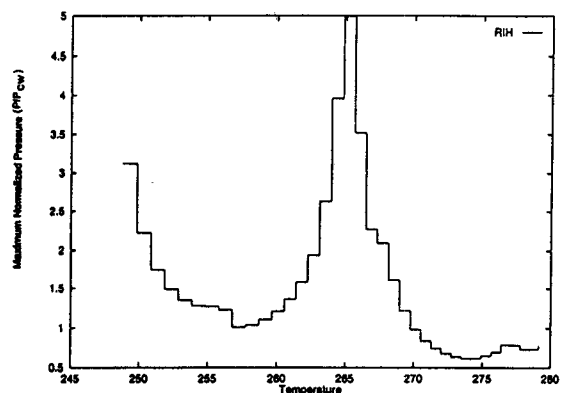


그림 7. Temperature Sweep of Reactor Inlet Header at 270Hz

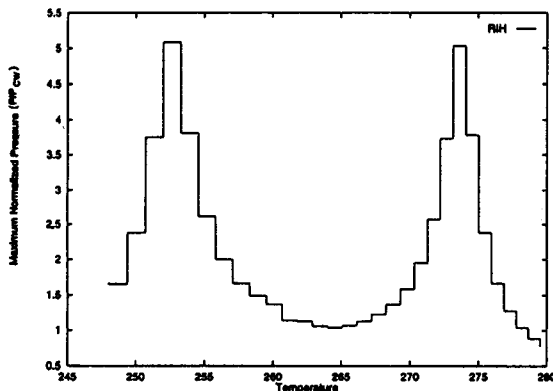


그림 6. Temperature Sweep of Reactor Inlet Header at 210Hz

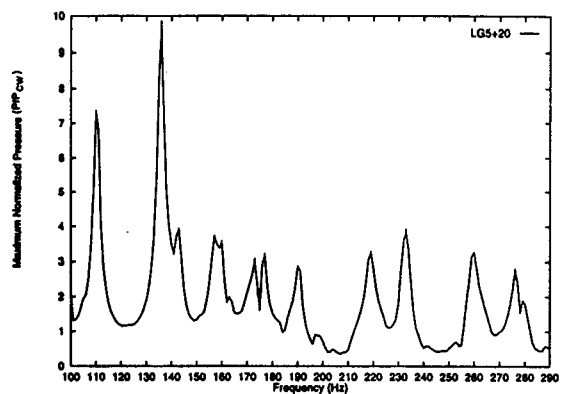


그림 8. Frequency Sweep of Fuel Channel

5. 결 론

이상에서는 최근 매우 새로운 분야로써 압력 충격파에 의한 공진 현상을 파악할 수 있는 Acoustic 해석 방법을 CANDU 원자로의 주열수송 계통을 예로 그 해석 이론 및 해석 방법을 기술하였다. 이 해석 방법은 밸브, 오리피스, 티(Tee)등과 같이 유동의 불연속을 가지거나 압축기 또는 펌프와 같은 유체 동력 전달부로 인한 유동 장애가 발생하는 계에 적용될 수 있으리라 생각된다. 그러나 본 해석 방법은 아직 구조물과의 연동 효과를 고려치 않고 또한 단상 유동 조건에서 이루어지는 것이므로 좀더 정확하게 이러한 효과를 설명하기 위해서는 이와 같은 조건을 고려한 해석 방법에도 노력을 기울일 필요가 있다고 판단된다.

참고 문헌

1. Vijay Chatoorgoon, Michale B. Carver, Glen c. Reesor, Ken Hau, Nim Lee, *Studies of Acoustic Modelling in CANDU Reactors*, p. 73-p. 97, PVP-Vol. 279 (1994)
2. ABAQUS Theory Manual, Version 5.3, Hibbit, Kalsson, and Sorensen, Inc (1993)
3. A. Misra, R.E. Pauls, D.K. Vijay, W. Teper, T.C. Lin, A. Strzelczyk, *Acoustic Modelling in Support of Fuel Failure Investigation in a CANDU Nuclear Generating Station*, p. 99-p. 118., PVP-Vol. 279 (1994)