

CANFLEX 핵연료 집합체의 장전 충격 해석

조문성, 석호천

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

상용 구조해석 소프트웨어인 ABAQUS를 이용하여 노외 핵연료 장전 충격 강도시험을 시뮬레이션하기 위한 유한요소 해석모델을 개발하였다. 본 유한요소 모델은 핵연료 재장전시 장전 다발이 냉각수 흐름에 의해 채널 속으로 유입되면서 채널내 정지 다발에 부딪힐 때 발생하는 핵연료 다발의 변형과 응력 등을 계산하기 위한 것이다. CANFLEX 43-연료봉 핵연료에 대해 수행된 노외 강도시험의 하중 조건 및 경계조건을 근거로 해석을 수행하였으며 해석결과를 시험결과 측정치와 비교하여 유한요소 모델의 정확도와 보수성을 확인하였다. 개발된 유한요소 모델을 이용하여 핵연료 장전에 따른 핵연료 다발열의 충격 거동을 파악하였으며, 핵연료 다발에 발생하는 최대응력강도를 계산하여 핵연료 다발의 구조적 안전성을 평가하였다.

Abstract

A dynamic analysis, finite-element (FE) model was developed to simulate out-reactor fuel string impact tests with use of the structural analysis computer code ABAQUS. The FE model takes into account the deflection of fuel elements, and stress and displacement in endplates subject to the normal refueling impact in CANDU-6 reactor. It was adapted to the conditions of the out-reactor impact tests performed with CANFLEX 43-element bundles. In overall judgment, the three dimensional analysis results are well agreed with the test results. With use of the FE model, dynamic behavior of the fuel bundle string impacted by the moving bundle was investigated and the overall integrity of the fuel bundles was assessed based on the calculation results of maximum stress intensities on each part of the fuel bundles. According to these investigation and assessment, it was found that the fuel bundle would maintain the integrity during the normal refueling service.

1. 서론

CANDU-6 원자로에는 380개의 핵연료 채널이 있으며, 각 핵연료 채널마다 12개의 핵연료집합체가 장전된다. 핵연료로부터 발생하는 열을 제거하기 위해 중수로 냉각재가 핵연료 집합체열을 통과하는데, 칼란드리아 중심부의 채널에서는 이러한 냉각재 흐름을 이용하여 핵연료를 장전하게 된다.

핵연료는 핵연료 장전기를 통해 한번에 두 다발씩 채널로 장전되며, 이들 중 첫 번째 장전되는 핵연료 다발은 채널 상류의 Liner Hole Region을 지나면서 냉각재 유동에 의해 일정거리에 걸쳐 가속되어 채널 내에 있는 정지 핵연료 다발열에 부딪히게 된다. 운동 다발 및 정지 다발열은 심각한 변형 혹은 성능의 저하 없이 이러한 핵연료 장전 충격을 견딜 수 있어야 한다.

CANFLEX 43봉 핵연료 집합체가 이러한 요구조건을 만족시킨다는 것을 입증하기 위해 노외충격시험이 수행되었다[1]. 정상상태 최대하중의 1.4배에 달하는 하중조건에서 시험이 실시되었으며, 시험 결과 핵연료의 강도는 우수한 것으로 나타났다.

재장전중 발생하는 충격을 핵연료가 충분히 견딜 수 있음은 시험을 통해 입증될 수 있다. 그러나 재장전 과정 중에 발생하는 다양한 현상들을 조사하기 위해 시험을 반복 수행하는 것은 많은 비용을 필요로 하며, 시험을 통해 관측될 수 없는 물리적 변수들 즉, 핵연료 다발열을 통한 응력의 전파, 시간에 따른 에너지 이력 등을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 알 수 있다. 뿐만 아니라 이와 같이 개발 검증된 모델을 이용하여 차후 LOCA 조건에서 핵연료 다발열에 미치는 충격력을 예측할 수도 있을 것이다. 이런 점에서, 컴퓨터를 이용하여 노외 강도시험을 시뮬레이션하기 위한 기법을 개발코자 하였다.

컴퓨터 구조해석 소프트웨어인 ABAQUS[2]를 이용하여 핵연료 노외충격시험을 시뮬레이션하기 위한 유한요소해석 모델을 개발하였다. 이 유한요소해석 모델에서는 충격력을 받는 연료봉의 힘과 양단접합판의 응력 및 변위 분포를 고려하였다. 본 논문에서는, 전술한 물리적 변수들의 관점에서 충격시험 결과를 분석하기 위해, CANFLEX 43봉 핵연료 대해 수행된 충격시험 조건에 맞추어 유한요소해석 모델을 개발하였다.

2. 유한요소 모델

2.1 핵연료 집합체의 모델링

43봉 CANFLEX 핵연료 다발은 8개의 부품으로 구성된다. 각 연료봉은 지르칼로이 피복관 내에 일정한 길이로 맞춰진 이산화우라늄 소결체를 포함하고 있다. 피복관 내면에는 흑연이 얇게 도포되어 있어서 피복관과 소결체를 분리시키며 둘간의 상호간섭을 감소시킨다. 피복관의 양단에 봉단마개가 저항용접 방식으로 접합되어 연료봉 내부를 밀폐시킨다. 43개 봉단마개 끝에 양단 접합판이 용접되어 연료봉들을 집합체의 형태로 유지시킨다. 연료봉간 거리를 최소 간격으로 적절히 유지하기 위해 집합체 중앙면을 따라 봉간 인접 위치에 간격체를 접합시킨다. 집합체 외곽 연료봉의 양단 및 중간 지점에는 지지체가 접합되며, 따라서 집합체는 압력관과의 사이에 지지체 두께만큼의 간격을 갖게된다. 또 다른 부품 즉, 버튼은 CANFLEX 핵연료만을 위해 고안된 것으로서 임계

열유속을 증대시키기 위해 모든 연료봉에 접합된 것이다.

핵연료 집합체의 유한요소 모델은 Shell, Beam 및 Truss 요소로 구성된다.[2] 즉, 양단접합판은 셸, 피복관은 빔 그리고 간격체는 트러스 요소로 만들어졌다. 버튼은 해석결과에 영향을 미치지 않으므로 유한요소 모델에 포함시키지 않았다. 압력관과 지지체 역시 모델링되지 않았으나 적절한 경계조건을 대신 설정함으로써 동일한 효과를 갖도록 하였다. Figure 1은 핵연료 집합체의 유한요소 모델을 보여주고 있다. 각 부품의 유한요소해석 모델에 대한 설명은 Table 1과 같다.

노외시험이 266°C에서 수행되었으므로, 재료의 물성치는 266°C 상태에서의 값을 이용하였다 (Table 2 참조).

2.2 핵연료 집합체열의 유한요소 모델링

핵연료 집합체열의 유한요소 모델은 시험장치에서의 실제 배열을 근거로 만들어졌다[1]. 인접한 집합체들의 양단접합판은 서로 완전한 접촉 상태를 유지한다고 가정하였으며 접합판의 요철은 무시하였다. 접합판 표면의 접선 방향 운동에 저항하는, 접합판사이의 전단력은 없는 것으로 가정하였다.

핵연료 집합체열은 실험에서와 같이, 10개의 정지 핵연료와 1개의 운동 핵연료가 일렬로 늘어서 있는 것으로 모델링하였으며, 1번 및 2번 다발 그리고 10번 및 11번 다발은 서로 75°의 회전각 (Misalignment)을 갖도록 하였다. 이것은 충격시 접합판의 웹에 가장최악의 조건을 부과하기 위함이다[1].

10개의 정지 핵연료는 최하류측 다발(1번 다발)과 접촉하는 고정된 Shield Plug에 의해 지지되며, 한 개의 운동 다발이 10개의 정지 핵연료 중 가장 상류에 위치한 2번 다발에 충격을 가하게 된다. 운동 다발의 충격시 속도는, 실험에서의 충격 속도인 2.8 m/sec로 가정하였다[1].

냉각재로 인한 감쇠효과는 적절한 감쇠계수를 설정함으로써 유한요소의 질량 매트릭스에 비례하여 감쇠력이 작용하도록 모사하였다. 따라서, 모델 질점의 절대 속도에 따라서 감쇠력이 작용하게 되며, 그 결과로 모델은 점성을 가진 에테르 속에 잠긴 것과 같은 효과를 발휘함으로써, 모델의 임의 질점에서의 어떠한 운동도 감쇠력을 유발시키게 된다[2].

3. 노외검증시험에의 적용

3.1 노외 검증시험[1]

충격시험을 위한 장치는 그림 2에 보이는 바와 같이 압력관과 11개의 핵연료 다발, 그리고 냉각재 하류의 Shield Plug 시뮬레이터로 구성된다. 열 개의 정지 다발과 한 개의 운동 다발로 구성되는 집합체열을 핵연료 채널에 장전한 후, 채널 내 유량을 정해진 조건에 부합되도록 조절한다. 운동 다발(1번 다발)을 채널 상류의 Liner Hole Region으로 밀어 넣는다. 운동다발은 냉각재 유동에 의해 하류로 흘러가면서 열 개 정지 다발의 최상류에 위치한 다발(2번 다발)에 부딪힌다. 충격시 재장전 다발의 속도는 2.8 m/sec 였다. 각각의 시험에 있어서 냉각수 온도와 입구 측 압력은 266° 및 10.2MPa로 설정되었다. 시험 완료 후, 시험 다발의 변형량을 알아내기 위해 정밀 측정을

실시하였다. 충격력 측정을 위해 Force Sensor를 설치하였으나 고온의 냉각수에 장시간 노출되어 손상됨에 따라 적절한 데이터를 얻는데 실패하였다.

3.2 유한요소 모델의 검증

Figure 3은 충돌이 발생한 1번 및 2번 다발의 두 접합판과 Shield Plug와 맞닿은 11번 다발 접합판의 Waviness를 보여준다. 1번 및 2번 다발의 경우 해석결과는 측정치와 비교적 일치한다. 그러나 Shield Plug에 의해 지지되는 1번 다발에서는 해석결과가 측정치에 비해 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 경계조건이나 감쇠효과와 모사가 불완전함에 기인한 것으로 보인다. 그러나 세 개 다발 공히 해석결과가 보수적임을 확인하였다.

Figure 4는 Shield Plug와 맞닿은 접합판의 축방향 변위를 보여준다. 시험결과는 특정 연료봉의 축방향 변위를 기준으로 한 상대변위 값이다. 음의 값을 보이는 부분은 Shield Plug와 접촉하는 부분인데, 집합체 쪽으로 밀려들어갔음을 뜻한다. 변위량에 있어서는 해석 결과와 측정치가 상당히 큰 차이를 보이고 있으나 그 경향은 매우 유사함을 알 수 있다.

3.3 재장전 충격에 따른 핵연료 집합체열의 거동 분석

Figure 5는 전체 모델의 에너지-시간 이력을 보여준다. 집합체열이 찌그러지면서 운동에너지가 내부에너지로 전환된다. 운동 에너지가 감소하면서 내부 에너지가 증가함을 알 수 있다. 그러나 냉각수에 의한 감쇠의 영향으로 인해 운동 에너지의 많은 부분이 소산된다. 그림에 보여진 바와 같이 내부 에너지는 가역 탄성에너지와 소성변형에 의한 에너지 소산의 합이다. 탄성에너지는 최고점에 도달한 후 탄성변형이 회복되면서 감소한다. 그러나 소성변형에 의한 에너지 소산은 핵연료 다발열이 영구변형되면서 지속적으로 증가한다. 5.3 ms 부근에서 나타난 내부에너지의 돌연 증가 또는 운동에너지의 돌연 감소는 Shield Plug 와의 2차 충격에 의한 것이다. 이것은 다음에 보여지는 가속도-시간 이력이나 집합체열의 응력-시간 이력에서도 확인된다.

Figure 6은 2번, 6번, 10번 다발 외환봉 중간 지점에서의 축방향 가속도를 시간의 함수로 보여준다. 2번 다발이 약 0.33 ms에서 최대가속도에 도달하고 그 크기는 707g 이다. 다발이 하류에 위치할수록 최대가속도의 크기가 감소하고 충격력 또한 감소한다. 이 그림으로부터, 각 다발들은 5.3 ms를 중심으로 한 대칭 시점에서 제 2의 충격을 받는다는 것을 알 수 있다. 2번 다발의 경우 초기에 장전 다발에 의한 1차 충격을 받고 10.3 ms에서 2차 충격을 받는다. 6번 다발의 경우에는 2.3 ms 에 1차 충격을 받은 후 8.3 ms에 2차 충격을 받는다. 운동 다발에 의한 충격이 최하류의 11번 다발로 전해져서 약 5.3 ms에 11번 다발과 Shield Plug 간에 충격이 발생하며, 핵연료 다발에 비해 훨씬 Rigid하고 고정된 Shield Plug와의 충돌로 인한 충격력이 거꾸로 상류로 전달됨을 알 수 있다.

Figure 7은 정지 집합체열 전 길이에 걸친 6개 지점에서 Von-Mises 응력의 시간 이력을 보여준다. 응력 데이터는 2번, 6번 및 10번 다발의 외환봉 중간 지점에 대해 계산한 값이다. 운동 다발의 충격에 의해 발생한 응력이 집합체열을 따라 전파된다. 다발의 임의 지점에 응력이 전파되면 그 지점의 응력이 증가했다가 통과후에는 그 지점에서의 응력은 영점 주위에서 진동한다. 급격한 응

력증가 곡선간의 시간차를 살펴보면 인접 다발에 충격력이 전달되는데 소요되는 시간이 1 ms 임을 알 수 있다. 충격에너지의 일부를 상류에 위치한 다발들이 찌그러지면서 흡수하거나 혹은 냉각수 감쇠효과를 통해 흡수되므로 다발이 하류에 위치할수록 응력의 크기가 감소한다. 여기서도 Shield Plug 와의 2차 충격에 의한 응력의 역류현상을 볼 수 있다.

3.4 재장전 충격에 대한 핵연료의 기계적 건전성 평가

Figure 8은 1 ms 에서의 1번 다발, 충돌 접합판의 응력분포를 보여준다. 내환에서 응력이 높게 나타난다. 이것은 다발의 외환 및 중환 만을 지지하도록 설계된 Shield Plug의 형상에서 비롯된 것으로 판단되나, 1번과 2번 다발간의 정렬각도에 의한 영향도 있을 것으로 예상된다.

Figure 9는 1번 다발의 접합판과 연료봉에서의 Von-Mises 응력을 시간의 함수로 보여준다. 3 ms 에서 최대 응력이 발생하고 그 크기는 244 MPa에 이르며, 이후에도 비슷한 크기를 유지한다. 이와 같은 최대응력의 크기는 재료의 항복강도와 비교할 때 매우 높은 값이긴 하나 접합판의 파단을 근거로 판단할 때에는 여유가 있는 것으로 사료된다. 핵연료봉의 경우에는 충돌 초기, 즉 0.67 ms에서 최대응력이 발생하며, 그 크기는 125 MPa로서 재료의 항복강도에 비해 매우 낮은 값을 보인다.

Figure 10은 1 ms 에서의 2번 다발 충돌 접합판의 응력분포를 보여준다. 1번 다발과 같은 이유로 접합판의 내환에서 응력이 높게 나타난다.

Figure 11은 2번 다발의 접합판과 연료봉에서의 Von-Mises 응력을 시간의 함수로 보여준다. 접합판의 경우 1 ms 에서 최대 응력이 발생하고 그 크기는 262 MPa에 이르며, 이후에도 비슷한 크기를 유지한다. 1번 다발에 비해 최대응력값이 큰 것은, 충돌 시 두 다발의 경계조건 차이에 기인한 것으로 사료된다. 재료의 항복강도와 비교할 때 매우 높은 값이긴 하나 접합판의 파단을 근거로 판단할 때에는 어느 정도 여유가 있는 것으로 사료된다. 핵연료봉의 경우에는 충돌 초기, 즉 0.67 ms에서 최대응력이 발생하며, 그 크기는 111 MPa로서 재료의 항복강도에 비해 매우 낮은 값을 보인다.

4. 결론

- (1) 상용 구조해석 소프트웨어인 ABAQUS를 이용하여 노외 핵연료 충격시험을 시뮬레이션하기 위한 유한요소 모델을 개발하였다. 핵연료 접합판의 변위와 Waviness에 대한 해석 결과를 CANFLEX 42봉 핵연료에 대한 충격시험결과와 비교함으로써 개발된 모델의 정확성 및 보수성을 확인하였다.
- (2) 다발 재장전으로 인한 집합체열의 충격거동을 고찰하였다. 10개의 정지다발은 재장전 다발에 의해 1차 충격을 받은 후 Shield Plug와의 상호 작용에 의해 역방향의 2차 충격을 받는다는 것을 알았다. 재장전 다발과의 충돌로 인해 집합체열이 찌그러지면서 운동에너지가 내부에너지로 전환되지만, 냉각수에 의한 감쇠의 영향으로 인해 운동 에너지의 많은 부분이 소산됨을 알았다. 정지다발에 대한 충격력의 크기는 다발이 하류에 위치할수록 감소하였으며, 응력의 크기 또한 감소함을 알 수 있었다.

(3) 두 개 총돌 다발 (1번 및 2번 다발)이 부딪힐 때 최대응력은 2번 다발에서 발생하며 그 크기는 262 MPa이었다. 재료의 항복강도에 비해 매우 큰 값이나, 접합판의 파단을 근거로 판단할 때에는 어느 정도 여유가 있는 것으로 사료된다. 핵연료봉의 최대응력은 125 MPa로서 재장전 충격이 연료봉에 미치는 영향은 접합판에 비해 훨씬 작음을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 과학기술부의 재정적 지원을 받아 수행된 것이다.

참고문헌

- [1] Chung, C. H., Chang, S. K., Suk, H. C., Alavi, P., Oldaker, I. E., Performance of the CANFLEX fuel bundle under mechanical flow testing, Proceedings of the 5th International Conference on CANDU Fuel, Vol.1, pp.10-69, September 21-25 1997, Toronto, CANADA
- [2] Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc., ABAQUS/Standard Users Manual, Ver. 5.8, 1998

Table 1. Description of FE model for each component

Component	ABAQUS element type	Element description	Remark
Endplate	S4R	4-Node, 3D Shell 6 DOF	422 elements per plate
Fuel sheath	PIPE31	2-Node, 3D Pipe 6 DOF	6 elements per rod
Spacer pad	T3D2	2-Node, 3D Truss 3 DOF	

Table 2. Material properties at 266 C^a

Component	Young's modulus	Yield strength	Ultimate tensile strength	Poissons ratio
Endplate	79,706 MPa	165 MPa	281 MPa	0.4
Cladding tube	83,882 Mpa	314 MPa	421 MPa	0.4
Spacer	83,882 MPa	–	–	0.4

^aEngineering Manual, DE-13(5.3-1), Zirconium Alloys Mechanical Properties and Corrosion Resistance, Chalk River Nuclear Laboratories Engineering Manual, 1969

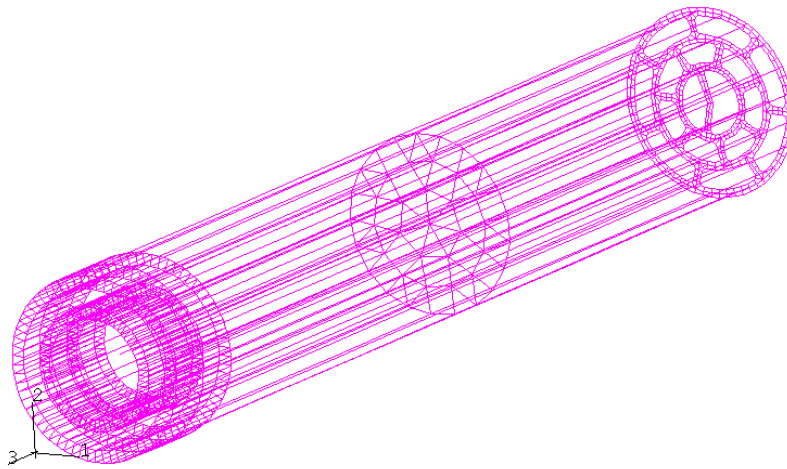


Figure 1. FEM model for CANFLEX fuel bundle and shield plug

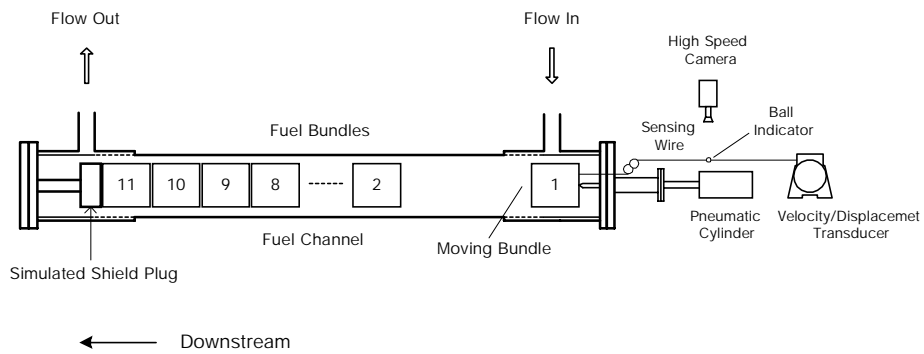


Figure 2. Schematic diagram of fuel string impact to the inlet shield plug

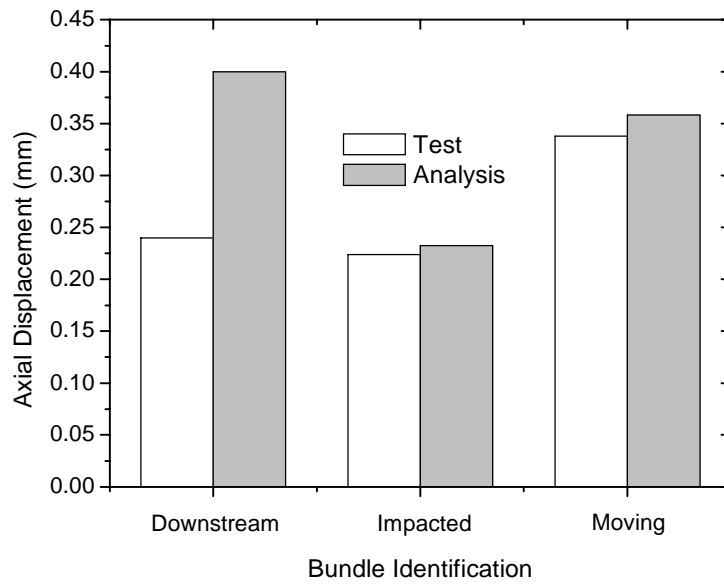


Figure 3. Predicted vs. measured waviness in downstream endplates of three test bundles

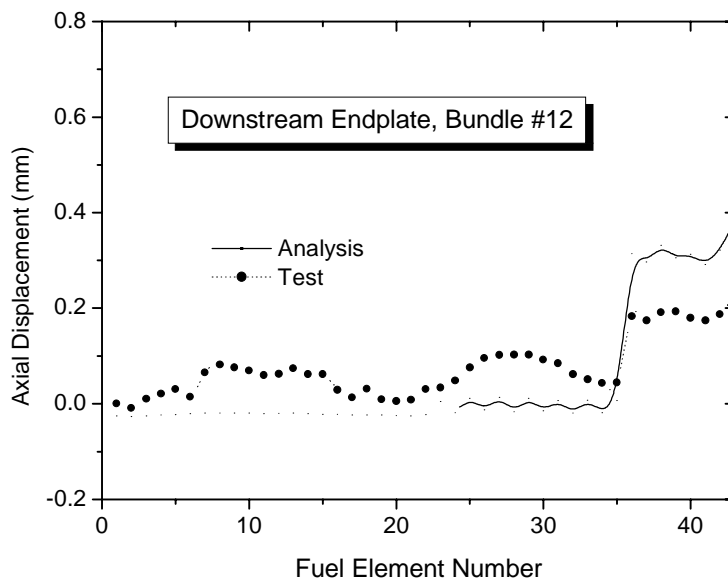


Figure 4. Predicted vs. measured axial displacement in endplate supported by shield plug

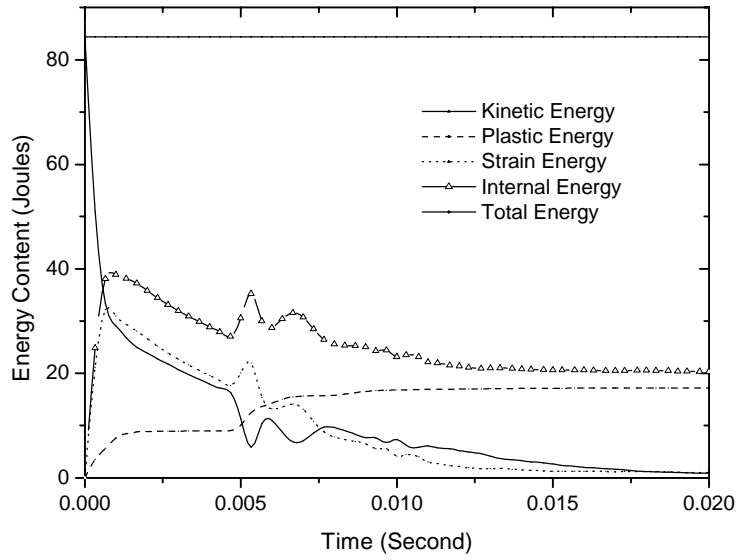


Figure 5. Energy terms as a function of time

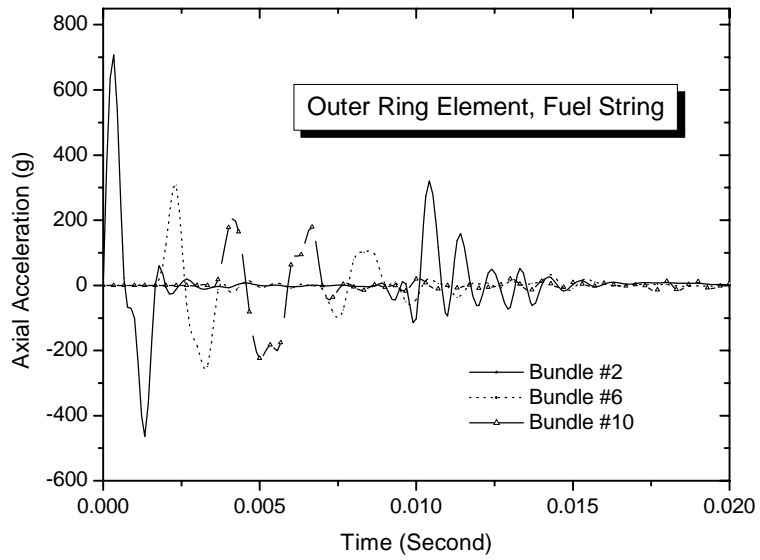


Figure 6. Axial acceleration histories of bundle #2, #6 and #10

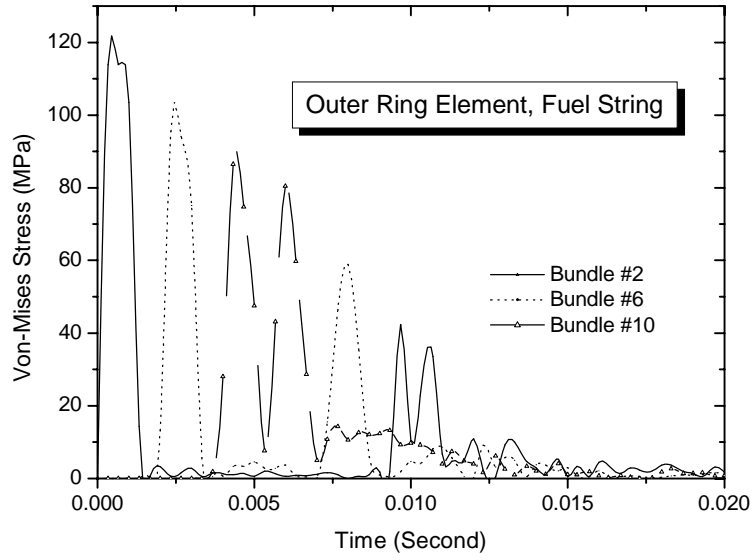


Figure 7. Time histories of stress at three points along the fuel string

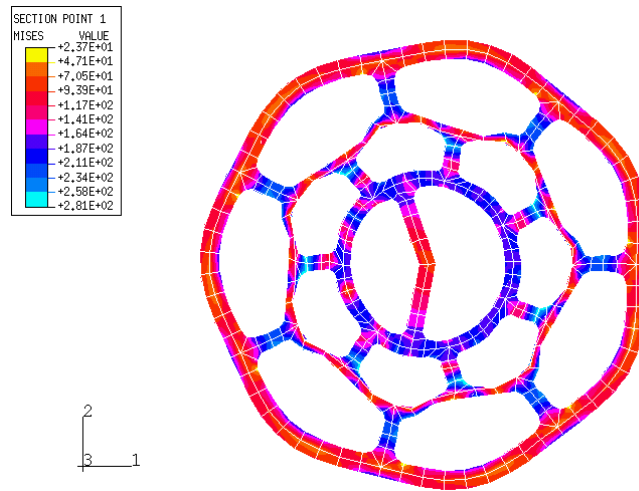


Figure 8. Stress contour of bundle #1 downstream endplate

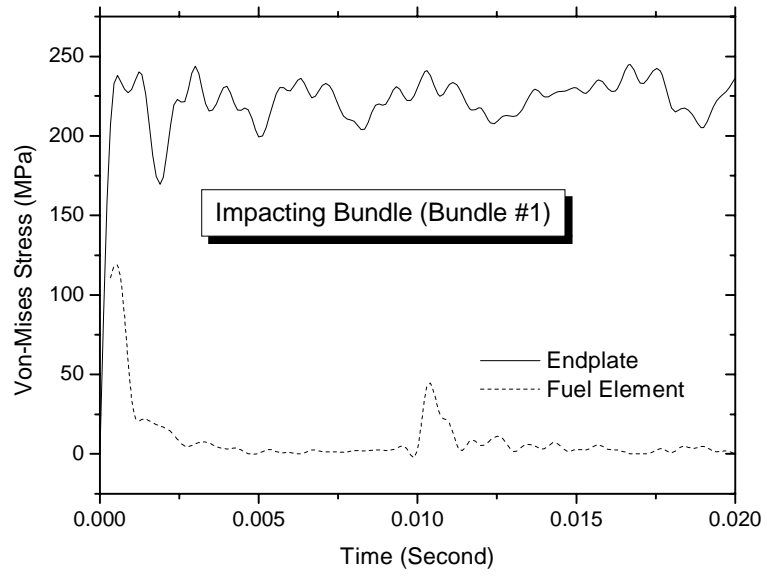


Figure 9. Time history of Von-Mises stress on endplate and fuel element of bundle #1

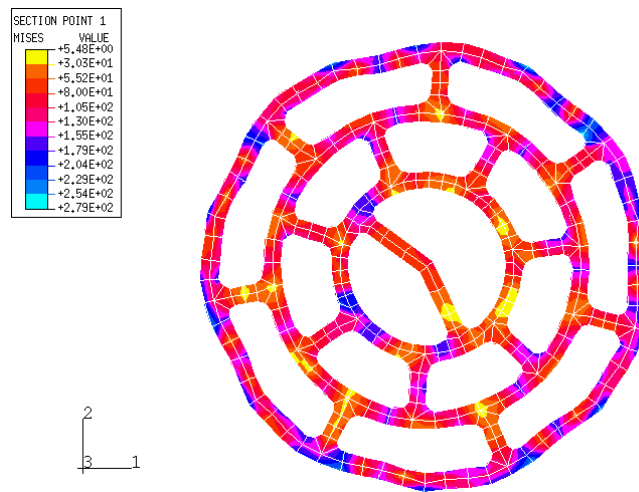


Figure 10. Stress contour of bundle #2 upstream endplate

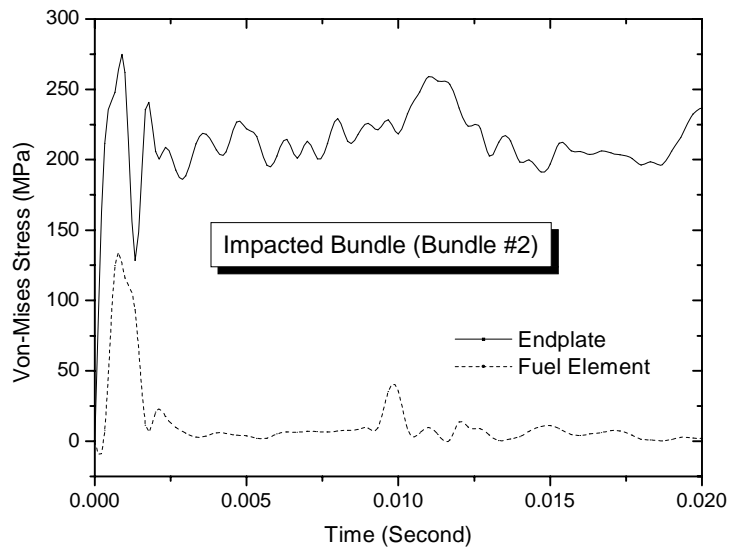


Figure 11. Time history of Von-Mises stress on endplate and fuel element of bundle #2