

교차점 용접 개수에 따른 부분 지지격자의 충격특성 해석

Impact Behavior Analysis of a Partial Spacer Grid  
on the Number of Points of Cross-point Welding

윤경호, 강홍석, 김형규, 송기남, 정연호

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

지지격자 동적 충격특성 해석의 목적은 고유모형의 지지격자를 개발함에 있어서 그 기계/구조적 특성을 해석을 통해 예측함으로써 모든 후보모형의 기계/구조적 충격특성을 시험을 통하지 않고도 상대적으로 우수한 구조적 특성을 갖는 지지격자 형상을 선택하기 위한 것이다. 본 논문에서는 이중관노즐형 지지격자의 교차점 용접 개수에 따른 충격특성을 해석하여 기계/구조적 특성이 우수한 지지격자를 개발하기 위한 해석에 관한 것이다. 지지격자는 박판간의 교차부 용접, 내부관과 외부관간의 시임용접 및 외부관간의 모서리플 레이저 용접을 시행하여 제조한다. 여기서는 이 교차점의 연결을 교차점에서만 용접을 시행한 것과 이 교차점간의 중앙에 용접을 추가로 시행한 것의 충격해석을 수행하여 교차점 용접 개수에 따른 지지격자의 충격특성 변화를 기술하였다.

Abstract

The objective of this research is to propose the methodology that could predict the dynamic failure behavior on the grid structure for the PWR fuel assembly. To perform this objective, the two kinds of approach are used in this work. First, in order to obtain the test data on the dynamic failure behavior of the spacer grid, the impact test is performed with the  $5 \times 5$  cell size partial grid specimen, which is made of Zircaloy-4 thin plate. Second, a finite element analysis method for predicting the buckling behavior on the spacer grid structure is established by a commercial finite element code ABAQUS/Explicit. In this FE analysis method, appropriate boundary conditions and impact loading conditions are applied to simulate the actual test conditions. From the impact test, the dynamic failure phenomenon depends on the weakest layer cell, which is so called local buckling of the metal structure. In addition, the finite element analysis model is in good agreement with the impact test results, therefore this finite element model and the analysis procedure will be used as a good tool for predicting the dynamic buckling behavior of the grid structure.

## 1. 서론

지지격자 충격시험은 일종의 동적 충격시험으로 이 시험의 목적은 지지격자의 충격강성, 충격강도 및 복원인자(restitution factor)를 결정하는데 있다<sup>1)</sup>. 본 연구에서는 고성능지지격자 구조기술개발과제에서 적용한 낙하식 충격시험방법<sup>2)</sup>에 의한 이중관노즐형 부분지지격자(Fig. 1참조)의 충격특성시험 결과에 대해 기술하고 이 시험결과를 모사할 수 있는 유한요소 해석모델의 신뢰성을 검증하고자 하였다. 또한 교차점의 용접을 단일 셀 기준으로 교차부의 4개소만 용접을 한 경우와 교차부 4개소에 이들 교차부의 중앙에 추가로 4개소에 용접을 수행한 격자체의 충격특성을 고찰하였다. 이를 통해 얻은 해석방법 및 모델은 기계/구조적 특성이 우수한 지지격자 개발<sup>3)</sup>에 적용하고자 한다. 지지격자의 충격특성은 지지격자가 핵연료집합체내에서 직립으로 장전되어 지진 및 냉각계상실사고 시 측면에서 충격하중을 받게 되므로 지지격자에 측면 충격하중을 가하고 이 충격에 대한 가속도, 속도 및 충격력을 격자체 시편 내에 좌굴이 발생할 때까지의 데이터를 취득하여 지지격자의 충격특성을 파악하였다. 본 논문에서는 해석에 대해 주로 기술하였으며, 따라서 시험을 통해 얻은 결과들은 참고문헌 4를 인용하였다. 즉, 충격시험을 통해 얻은 부분격자체의 충격특성을 Table 1 및 Fig. 2에 나타내었다.

## 2. 지지격자에 대한 동적 충격특성해석

### 2.1 격자체의 기하학적 형상 및 재질

충격시험에 사용된 격자체 형상에 대하여 동적 충격해석을 수행하였다. 셀의 외형 치수는  $64 \times 64 \times 35$  mm이고, 관체의 두께는 0.38/0.46 mm이다. 관체의 재질은 지르칼로이-4를 사용하였으며, 이 재질의 탄성계수는 108.3 GPa, 항복응력은 344.3 MPa, 밀도는  $6550 \text{ kg/m}^3$ , 그리고 포아송비는 0.294으로 하였다. 본 논문에서 다룰 내용은 구조물 좌굴에 대한 고유치 문제가 아닌 구조물의 과도한 변형에 의한 소성좌굴이라 할 수 있으므로 해석을 탄성영역 뿐 아니라 소성영역에까지 확장하여야 한다. 따라서 재질의 탄·소성 물성을 구하기 위해 ASTM<sup>4)</sup>에 따른 인장시편을 제조하여 이 규격에서 정하는 인장시험 절차에 따라 시험한 항복응력 이후의 응력-변형률 선도 데이터를 해석에 사용하였다. 격자체 시편은 재료의 물링방향으로 제조하였으므로 인장시편 역시 이 방향과 일치하도록 규격에 따른 치수로 가공하였고, 인장시험을 통해 얻은 지르칼로이의 물성을 Fig. 3에 나타내었다.

인장시험은 상온에서 행하였으며, 하부 크로스 헤드의 이송속도는 3 mm/min으로

하였고, 100%의 신장계(extensometer)를 사용하였다. 시험은 동일한 시편 4개를 시험하여 이의 평균값을 해석에 적용하였다.

## 2.2 유한요소 모델 및 경계조건

이중관노즐형 5×5셀 부분격자체의 동적 충격해석을 위한 유한요소 모델은 I-DEAS<sup>5)</sup>를 사용하여 작성하였다. 구조물은 유한 막 변형률과 임의방향의 대회전을 고려하여 대변형 해석에 유효하다고 알려진 4절점 쉘요소를 사용하였고, 충격해머 및 시편이 고정된 베이스는 강제요소를 사용하였고, 해머로 모델링한 상부 강제요소에 해머의 질량과 동일한 상수를 갖는 질량요소를 정의<sup>6)</sup>하였다. 이렇게 작성한 유한요소 모델을 Fig. 4에 나타내었다. 해석을 위한 모델은 해석시간의 단축을 위해 각 단일 셀의 형상을 비교적 단순화하여 작성하였다. Fig. 4의 유한요소 모델에 사용된 절점 수는 23758개이고, 요소의 수는 19603개이다.

이중관노즐형 격자체는 박판을 이중으로 덧대고 이들의 상하 교차부, 내부판과 외부판간의 연결 및 외부판간의 연결부들을 레이저 용접하여 제조된다. 또한 내부판들간의 연결은 각 셀의 피치에 해당하는 에지들을 각각 절반에 슬릿을 형성하도록 하여 이들을 서로 수직판 및 수평판으로 끼워지게 된다(Fig. 5 참조). 따라서 내부판들 간의 연결을 위한 상·하 교차부의 용접점을 제외한 에지들은 각각의 자유도를 갖고 거동을 하게 되며, 외부의 하중에 대해 변위(displacement)나 변형(deformation)을 하게 된다. 이러한 각 박판들의 거동은 Fig. 6(a) 및 (b)에 나타낸 바와 같이 구조물 전반부의 수직판은 수평판에 의해 외부 충격하중에 대해 수직방향으로는 변위가 구속되게 되나 횡방향으로는 자유로운 거동을 할 수 있다. 또한 후반부의 수평판은 전반부와는 반대로 횡방향으로는 수직판에 의해 구속되나 하중이 작용하는 방향으로는 자유로운 거동을 할 수 있다. 그래서 이들 전반부의 수직판 및 후반부의 수평판에는 인접 셀에 의해 갖게 되는 다중 구속조건(multi-points constraints)을 정의<sup>7)</sup>하였다.

내부판들 간의 교차부 및 이들 교차부의 중간에 행한 용접부는 용접비드 크기에 해당하는 절점들을 서로 강제요소로 모델링하여 이들이 용접에 의해 강제거동(rigid motion)을 하게 하였다. 내부판들간의 교차부 용접비드의 크기는 약 2 mm 내외이며, 이에 대한 개략을 Fig. 7에 나타내었다<sup>8)</sup>.

구조물에 정의한 경계조건은 Fig. 4(b)에 나타낸 바와 같이 단순지지 경계조건을 모사할 수 있도록 격자체 하부면 아래에 강제면을 모델링하고, 이 강제면의 모든 자유도를 구속하였다. 또한 외부의 충격에 의해 이 하부의 강제면이 격자체의 쉘을 통과하지 못하도록 강제면과 구조물 하부면 간의 접촉을 정의하였다. 그리고 충격하중에 의해 구

조물이 회전운동(rotation)을 하지 않도록 격자체 하부 모서리에 위치한 두 개의 절점에 최소한의 자유도를 정의하였다. 해석은 시험에서의 충돌 및 반발을 모두 모사할 수 있도록 해석시간을 10 msec로 하였고, 해석결과는 매 1 msec마다 결과를 저장할 수 있게 하였다. 이것은 충격시험에서와 마찬가지로 해석에 있어서도 충격에 의한 고주파 노이즈를 제거하기 위해 필터링을 수행해야 하므로 시간증분을 작게 하였고, 필터는 ABAQUS<sup>9)</sup>에서 제공하는 SAE 필터를 사용하였다.

## 2.3 해석결과

### 2.3.1 단순모델의 충격특성 결과

격자체 구조물의 측면충격에 의한 소성좌굴 거동을 파악하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 충격시험을 통해 얻은 결과가 가속도 데이터이므로 해석에서도 충격해머로 모델링한 상부 강체면 중앙 절점에서의 가속도 결과를 추출하였다. 해석에서는 시험에서와 달리 반복충격에 의해 구조물의 강성저하 거동을 얻을 수 없다. 왜냐하면 이 상부 강체면에 정의한 단일 충돌속도에 대한 구조물의 응답을 얻기 때문에 구조물은 초기 충돌속도가 증가함에 따라 가속도 결과가 작아지지 않고 구조물에 좌굴이 발생한 후에도 여전히 약간의 증가하는 가속도 결과를 얻거나 좌굴이 발생한 임계 충격가속도와 거의 동일한 결과를 얻을 수밖에 없다. 따라서 구조물 내부에 좌굴 발생 여부를 판단하기 위해 강체면의 초기 충돌속도에 따른 충격력의 결과로부터 좌굴 발생을 판단하였다.

Fig. 8에는 강체면의 초기 충돌속도에 따른 최대 가속도의 결과를 도시하였다. 앞서 기술한 바와 같이 초기 충돌속도 대 가속도 결과만으로는 구조물 내의 좌굴 발생을 판단하기가 어렵다. 이로부터 초기 충돌속도 대 최대 충격력의 결과를 살펴보면 구조물에 좌굴이 발생하기 전과 발생한 후의 충격력이 그 기울기가 달라지는 변곡점을 발견할 수 있다. 물론 해석에서 얻는 가속도 신호에 해머의 질량을 곱한 결과가 충격력이 되기 때문에 가속도나 충격력이 유사한 결과를 나타내기는 하나 본 연구에서는 좀더 좌굴을 쉽게 발견하기 위해 충돌속도 대 충격력 결과로써 좌굴 발생 여부를 판단하였다. 이와 같은 변곡점이 발생하는 것은 구조물 내부에 외부의 충돌에 의해 좌굴이 발생할 시 국부적 좌굴이 전체적 좌굴로 변화하는 시작점이라 판단하였다.

내부관들 및 내부/외부관들 간의 연결을 동일한 위치에 존재하는 하나의 절점을 서로 공유하도록 한 단순모델의 해석결과는 초기 충돌속도 0.5 m/sec에서 좌굴이 발생하는 것으로 보았고, 이때의 최대 충격가속도는 597.5 m/sec<sup>2</sup>이고 충격력은 14041 N이었다. 또한 충격 유지시간은 4 msec인 것으로 나타났다.

이는 단순모델의 경우 구조물의 강성이 실제에 비해 과도하게 크게 모델링되어 가

속도나 충격력은 과다한 값을 예측하며, 구조물의 강성이 크므로 충격 유지시간은 당연히 시험을 통해 얻은 결과보다 짧은 것으로 나타났다.

### 2.3.2 다중구속조건 모델의 충격특성 결과

다중구속조건을 사용한 모델의 경우 앞서 기술한 바와 같이 구조물의 강성이 실제 시편에 좀더 근접한 것을 알 수 있다. 왜냐하면 실제 시편의 내관들간의 연결은 수직관과 수직관에 절반씩 판들을 끼우기 위한 슬릿이 존재하게 되며, 이것은 각 판들의 자유도가 서로 다르게 거동할 수 있게 한다. 또한 판들을 서로 끼우기 위해서 가공한 슬릿은 관의 두께보다는 크게 되므로 판들간의 갭(gap)이 존재하게 된다.

이러한 상세모델의 해석결과를 내관들의 교차부만 용접한, 즉 하나의 셀에서 상·하 각 4개소의 용접을 행한(Fig. 9 참조), 경우는 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 초기 충돌 속도 0.5 m/sec에서 좌굴이 발생하는 것은 단순모델 경우와 유사하나 그 값은  $361.8 \text{ m/sec}^2$ 로 다른 결과를 얻게 되었다. 또한 최대 충격력은 8502 N이었고, 충격 유지시간은 좌굴이 발생하는 임계 충돌속도 0.5m/sec에서의 충격이력인 Fig. 11에서와 같이 약 6 msec이었다. 이것을 살펴보면 충격 가속도 신호가 전체적으로는 반사인파에 가까우나 좌굴이 발생하게 되면 충격과 신호의 후반부에서 작은 크기의 피크들이 여러 개 발생하고 있다. 이 결과는 실제 시편을 낙하식 충격시험을 수행한 결과보다 작은 것을 알 수 있는데, 이것은 실제 시편이 내관들간의 교차부 용접을 하나의 셀만을 살펴본 경우 그 교차부 4개소와 교차부간의 중심점에 각각 1개소씩 용접을 수행함으로써 인한 구조물의 강성 제고를 고려하지 않은 결과라 판단된다.

## 3. 5×5셀 부분격자체에 대한 충격해석 결과

### 3.1 교차부 용접을 4개소한 경우

내부관간의 연결을 위해 교차부 상부 용접을 4개소 실시한 경우는 종래의 용접절차와 동일하다. 이중관노즐형 격자체는 종래의 격자체와는 달리 두께가 상대적으로 더 작은 박판을 이중으로 겹치게 하여 단일관을 형성하게 되므로 이 박판간의 연결이 엄밀하지 못할 경우 국부적 좌굴발생으로 그 기계적 강도가 종래의 격자체에 비해 현저하게 작은 결과를 나타낼 수 있다.

Fig. 10에는 해머의 초기 충돌속도를 0.3m/sec에서 0.7m/sec까지 변화시켜 해석을 수행한 결과를 나타내고 있다. 해석에서도 시험과 마찬가지로 초기 충돌속도에 따라 충

격가속도가 증가하게 되나 좌굴이 발생하게 되면 이 최대 충격가속도는 감소하게 된다. 그러나 본 해석에서는 충격에 의해 구조물 내에 잔류하게 되는 잔류응력에 의한 영향을 고려하지 않아 구조물 내에 좌굴이 발생하였음에도 충격가속도는 좌굴발생 시점의 가속도 값과 유사하거나 약간 증가하게 된다. 그래서 본 해석에서는 충격력에 의한 결과와 초기 충돌속도에 의한 충격 유지시간의 변화 및 강제면 중앙절점에서의 속도변화 등을 판단하여 임계시점을 판단하고 있다. 따라서 본 해석에서는 Fig.에서 초기 충돌속도 0.5m/sec에서 좌굴이 발생하는 것으로 판단하였으며, 최대 충격가속도는  $361.83\text{m/sec}^2$ 이었고, 이때의 충격력은 8503N이었다. 이들 값은 충격시험을 통해 얻은 결과에 비해 약간 작게 나타났으며, 이것은 해석모델의 기하학적 형상 차이, 경계조건의 차이도 있으나 가장 크게 영향을 미친 것은 실제 이중판노즐형 부분격자체의 교차부 용접은 교차부 4개소에 이들 교차부의 중간에 4개소 용접을 추가로 수행한 데 기인한 것으로 보인다.

### 3.2 교차부 용접을 8개소한 경우

상기와 같은 차이를 통해 각 교차부 용접을 교차부의 4개소에 이들 교차부간의 중간에 추가 4개소의 용접을 고려하여 박판간의 용접부 모델을 수정하였다. 본 해석모델에서는 용접요소를 사용하지는 않았으며, 박판간의 연결을 강제요소를 사용하여 박판간의 거동을 용접부와 유사한 거동을 보이도록 작성하였다.

교차부 용접을 4개소 실시한 모델과 마찬가지로, Fig. 12에는 해머의 초기 충돌속도를 0.3m/sec에서 0.7m/sec까지 변화시켜 교차부 용접을 4개소만 모델한 경우와 8개소를 모델한 경우를 충격시험 결과와 비교하여 도시하였다. 해석에서도 시험과 마찬가지로 초기 충돌속도에 따라 충격가속도가 증가하게 되나 좌굴이 발생하게 되면 이 최대 충격가속도는 감소하게 된다. 그러나 본 해석에서는 충격에 의해 구조물 내에 잔류하게 되는 잔류응력에 의한 영향을 고려하지 않아 구조물 내에 좌굴이 발생하였음에도 충격가속도는 좌굴발생 시점의 가속도 값과 유사하거나 약간 증가하게 된다. 그래서 본 해석에서는 충격력에 의한 결과와 초기 충돌속도에 의한 충격 유지시간의 변화 및 강제면 중앙절점에서의 속도변화 등을 판단하여 임계시점을 판단하고 있다. 따라서 본 해석에서는 Fig.에서 초기 충돌속도 0.5m/sec에서 좌굴이 발생하는 것으로 판단하였으며, 최대 충격가속도는  $379.08\text{m/sec}^2$ 이었고, 이때의 충격력은 8908N이었다. 이들 값은 충격시험을 통해 얻은 결과가 시편에 따른 시험오차를 고려하면 충격가속도의 평균값에 비해서는 약간 작게 나타났으나, 교차부 용접을 4개소로 모델한 경우에 비해서는 더욱 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 Fig. 13에는 이들 교차부 용접개수에 따른 충격이력을 시험을 통해 얻은 결과와 비교하였다. 물론 이 충격이력이 시험결과와 완전히 일치하지는 않으나 전체적으로

최대 충격가속도와 충격 유지시간의 율박이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 다중구속조건을 적용하여 작성한 격자체 상세 유한요소 해석모델은 충격특성을 신뢰할만한 범위로 예측함을 검증할 수 있었다.

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구를 통해서 얻고자 한 것은 내부관이 단일 관으로 구성되지 않고 더욱 얇은 두께를 가진 박관을 이중으로 덧대어 이들이 단일 관으로 구성되는 격자체의 경우 국부적 좌굴에 의해 구조물의 기계/구조적 강도가 취약해지는 것을 방지할 수 있는 용접위치 및 개소를 도출하기 위함이다. 이를 통해 이중관노즐형 격자체와 같이 박관을 이중으로 덧대어 격자체를 구성하는 지지격자는 해석을 통해서 기계/구조적 강도를 제고할 수 있는 방안을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 격자체를 구성하기 위한 교차부 용접은 이 용접개소에 따라 충격특성이 달라지는 것을 확인하였으며, 본 해석모델에 의해 충격해석을 수행한 결과 충격시험과 근접한 결과를 얻을 수 있어 해석모델의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

#### 5. 결론

박관들을 서로 끼워 조립하고 이들의 교차부 및 연결부를 용접하여 격자체를 구성하는 지지격자의 충격을 다중구속조건(MPC)을 사용하여 해석을 수행하면 모델을 단순화한 결과에 비해 신뢰성이 제고된 결과를 얻을 수 있었다. 또한 용접부에 대한 모델을 용접요소를 사용하지 않고 용접비드에 해당하는 절점들에 대해 적절한 강제요소들로 정의하여서도 비교적 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 충격시험과 같이 반복충격에 의해 달라질 수 있는 구조물의 충격특성을 해석하기 위해서는 반복충격에 의한 잔류응력 영향을 고려할 수 있는 모델의 개선 및 해석절차의 수립에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업 중 “경수로용 신형핵연료개발”(대과제) “고성능지지격자 구조기술개발”(세부과제)에서 과제업무의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. 강홍석 외 4인, "핵연료집합체 지지격자에 대한 기계적 시험", KAERI/TR-868/97, 한국원자력연구소, 1997.
2. 윤경호 외 3인, "지지격자체의 기계/구조적 성능시험 기술개발", KAERI/TR-1598/00, 한국원자력연구소, 2000.
3. 송기남 외 4인, "핵연료 핵심구조부품의 개발현황 및 연구방향", KAERI/TR-865/97, 한국원자력연구소, 1997.
4. ASTM E8M-99, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", 1999.
5. "T-DEAS Master Series", Ver. 8m3, Structural Dynamics Research Corporation, 2000.
6. K. H. Yoon and K. N. Song, "Analysis on the Buckling Behavior of the Spacer Grid Structure for the PWR Fuel Assembly", SMiRT-16, Paper No. 1538, 2001.
7. 윤경호 외 4인, "추진충격하중 상태에서 격자구조물의 좌굴거동 해석모델 개선", 대한기계학회 2002년도 제2회 재료 및 파괴부분 학술대회 논문집, pp. 57-64, 2002.
8. K. H. Yoon et al., "Analysis on the Dynamic Failure Behaviour of the Grid Structure by Lateral Impact Load", Proceedings of the 6th International Conference on Computational Structures Technology, Paper No. 40, 2002.
9. H. D. Hibbit et al., "ABAQUS/Explicit User's Manual Vol. I&II", Ver. 6.2, HKS Inc., 2001.

Table 1 5×5셀 이중관격자체의 최대 충격가속도, 충격속도 및 충격력

Doublet	$a_{max}(m/sec^2)$	$v(m/s)$	$P_{cr}(N)$
No. 1	389.7	0.58	9157
No. 2	379.5	0.66	8917
No. 3	451.1	0.71	10601
No. 4	387.6	0.63	9108
Average	<b>402.0</b>	<b>0.64</b>	<b>9445</b>



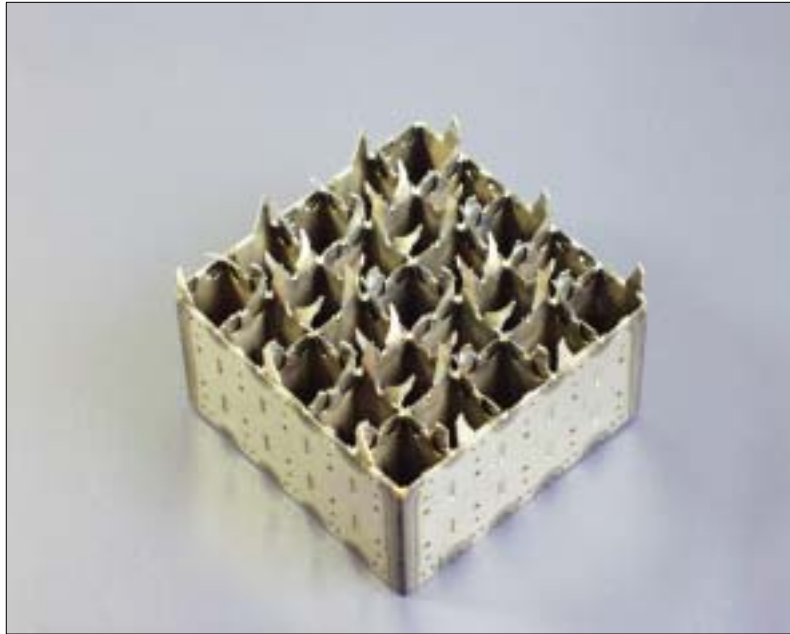


Fig. 1 지르칼로이-4로 제조한 5×5셀 부분격자체 시편

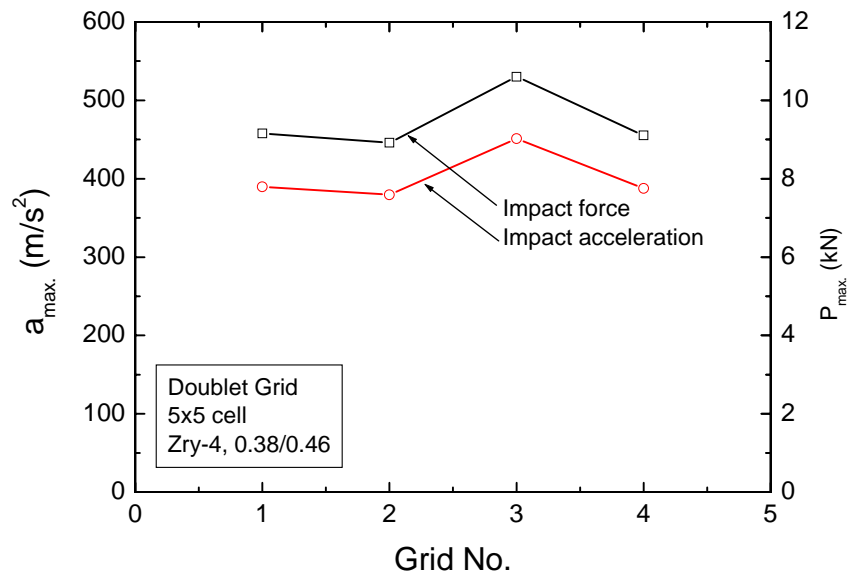


Fig. 2 5×5셀 이중관격자체의 최대 충격가속도 및 충격력

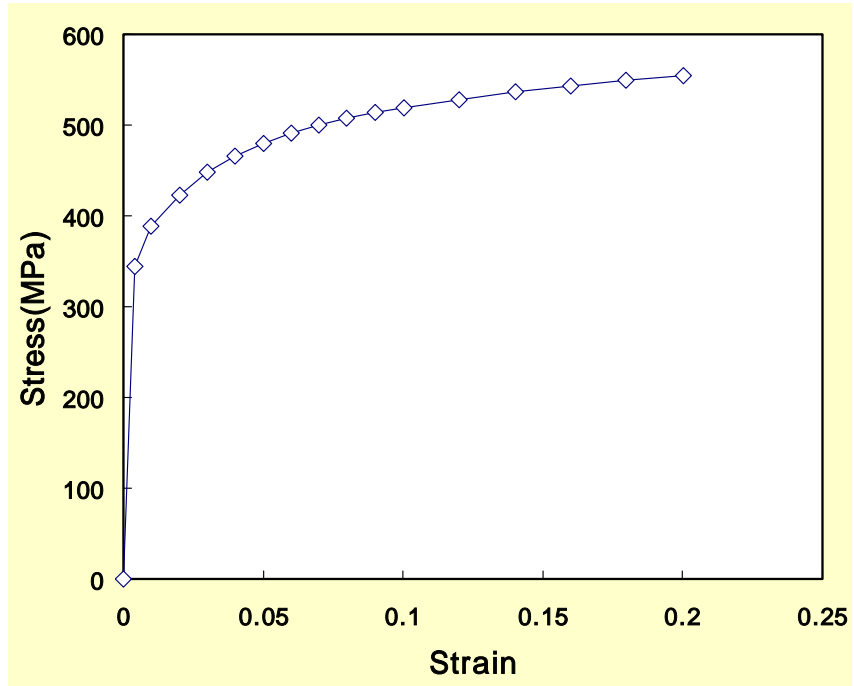
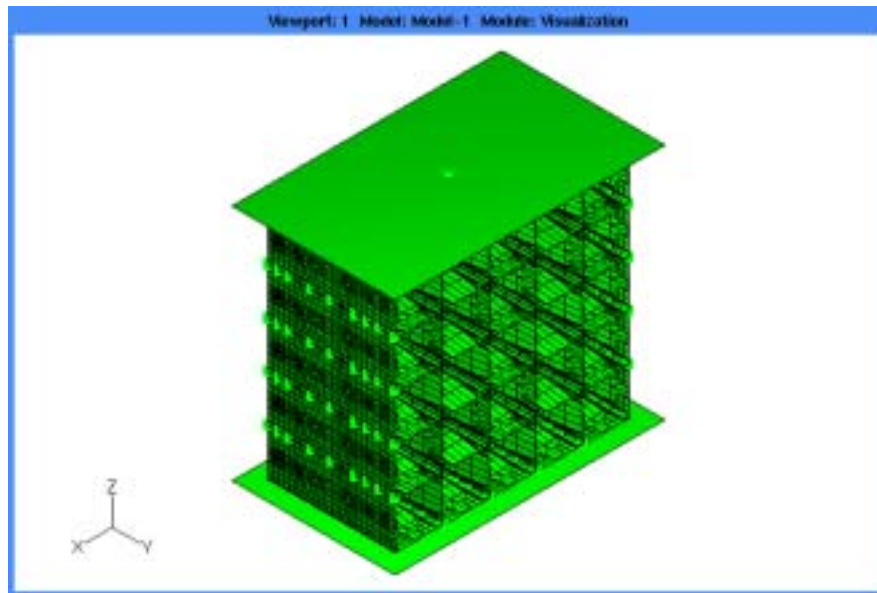
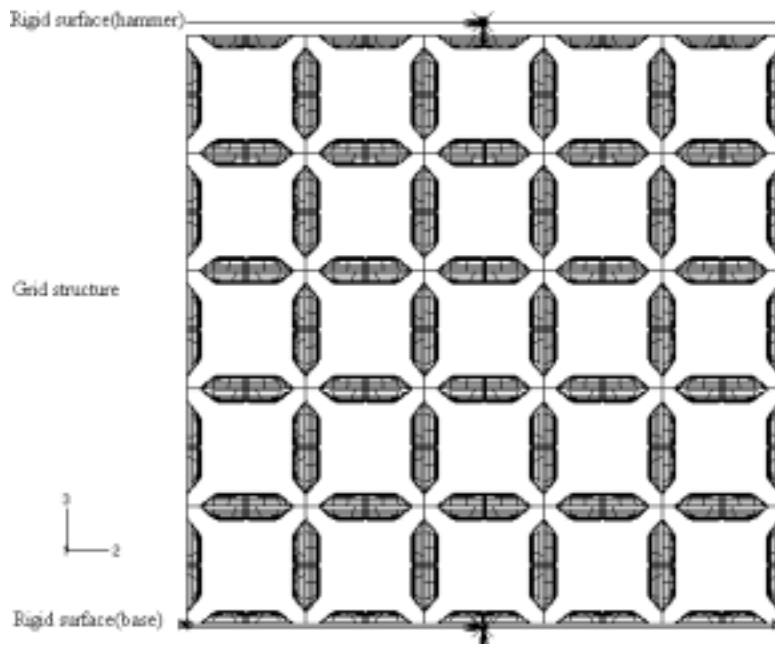


Fig. 3 지르칼로이-4의 응력 대 변형률 선도<sup>4)</sup>



(a) 사시도



(b) 정면도

Fig. 4 이중관노즐형 5×5셀 부분격자체의 유한요소 모델

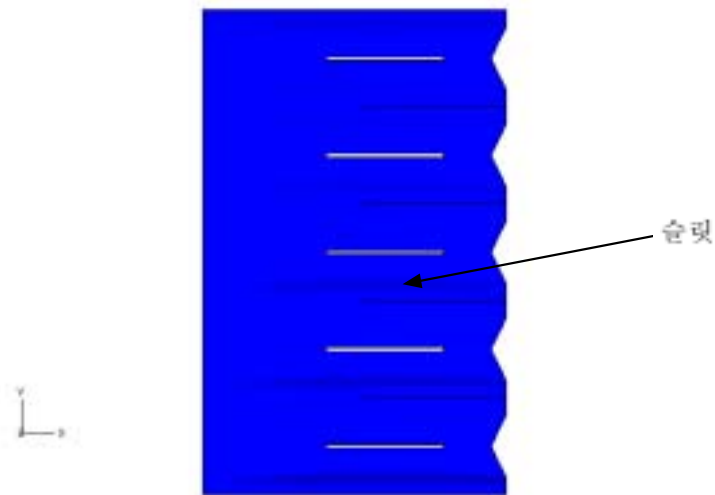


Fig. 5 내부관간 조립을 위한 슬릿

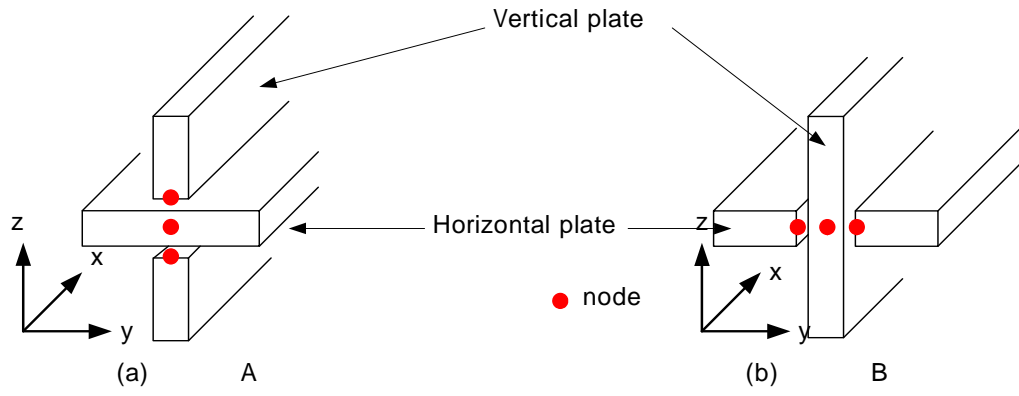


Fig. 6 수직판과 수평판간 연결부의 구속조건

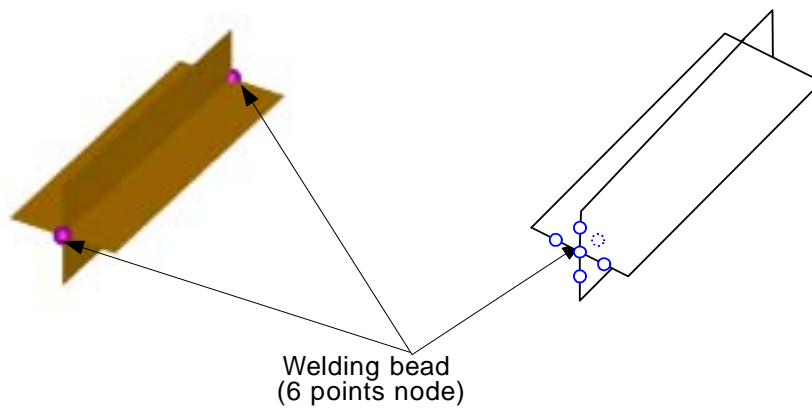


Fig. 7 내부판간 연결을 위한 용접부의 개략 및 용접요소 모델

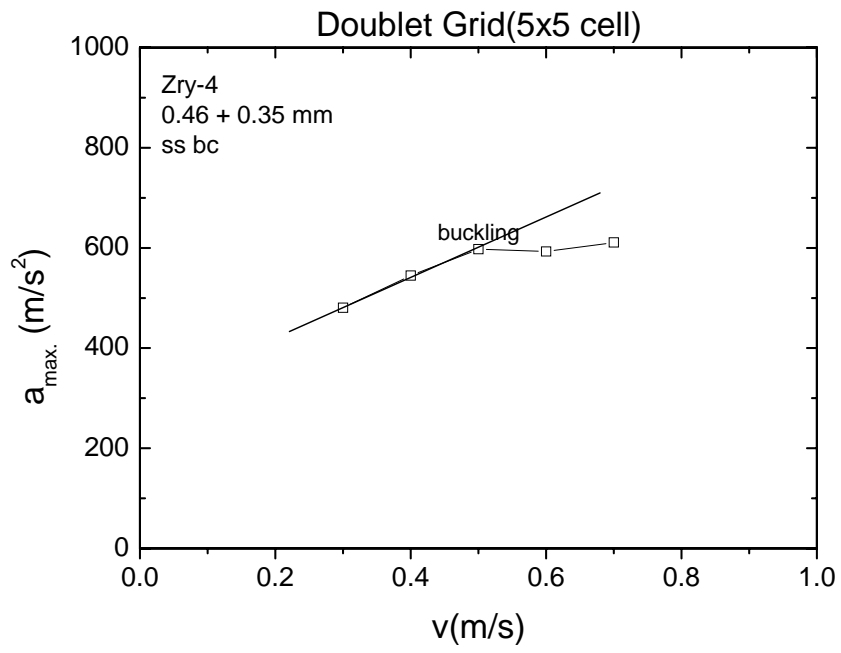


Fig. 8 단순모델을 사용한 5×5셀 부분격자체의 초기 충돌속도에 따른 최대 충격가속도

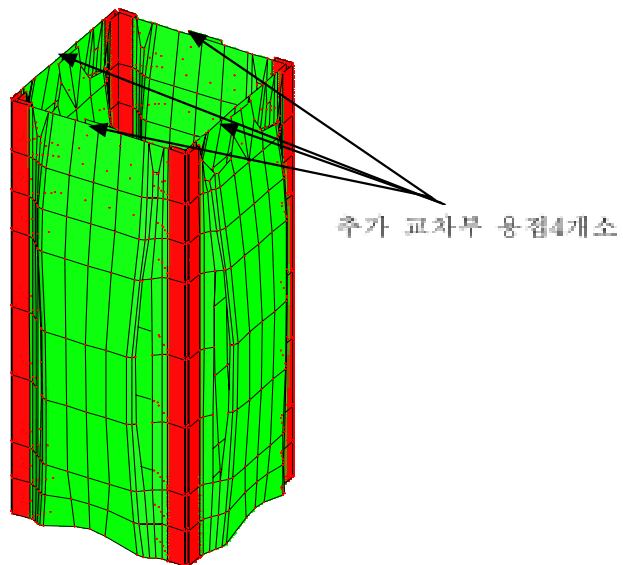


Fig. 9 교차부 용접위치 개략도

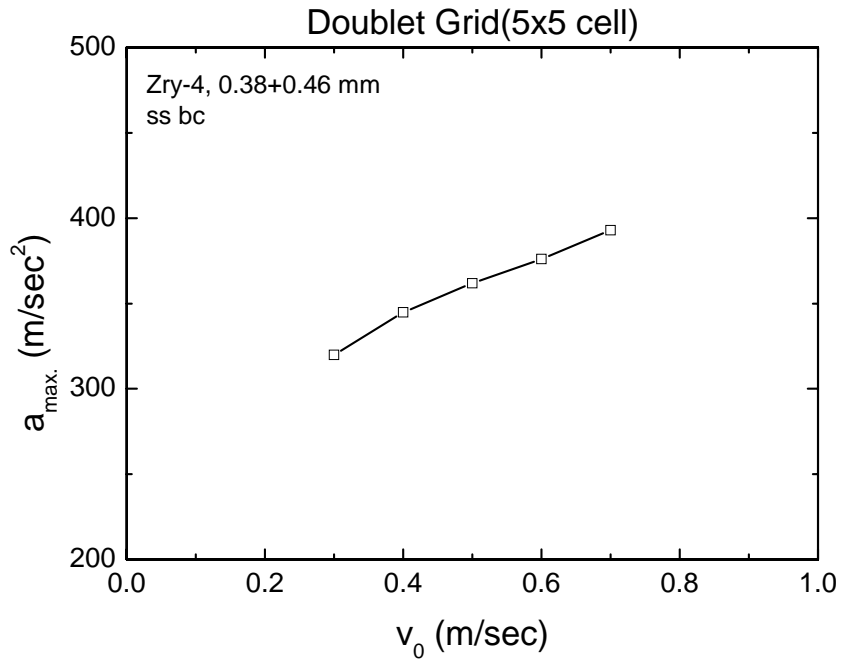


Fig. 10 교차부 용접 4개소인 5×5셀 부분격자체의 초기 충돌속도에 따른 최대 충격가속도

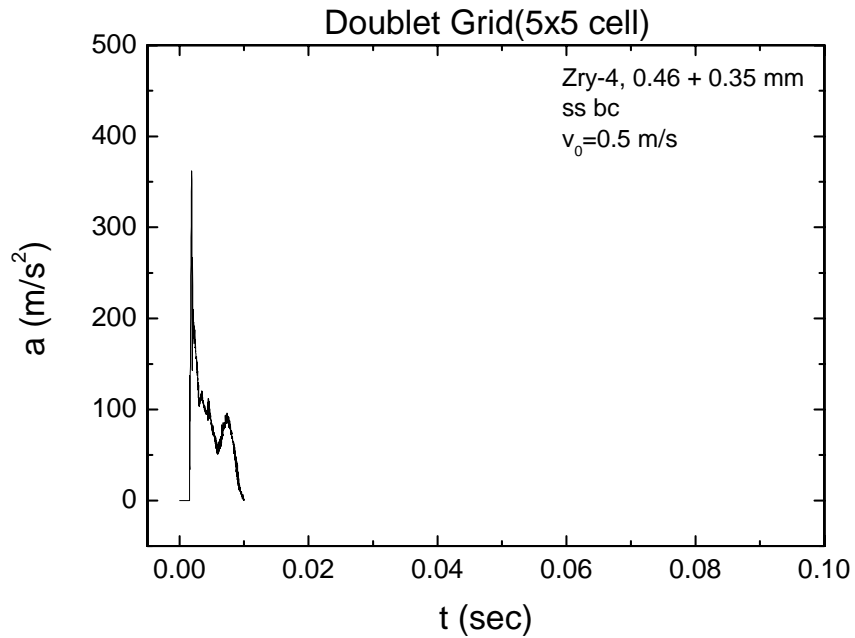


Fig. 11 교차부 용접 4개소인 5×5셀 부분격자체의 초기 충돌속도  $v_0=0.5$ m/sec에서의 최대 충격가속도 이력

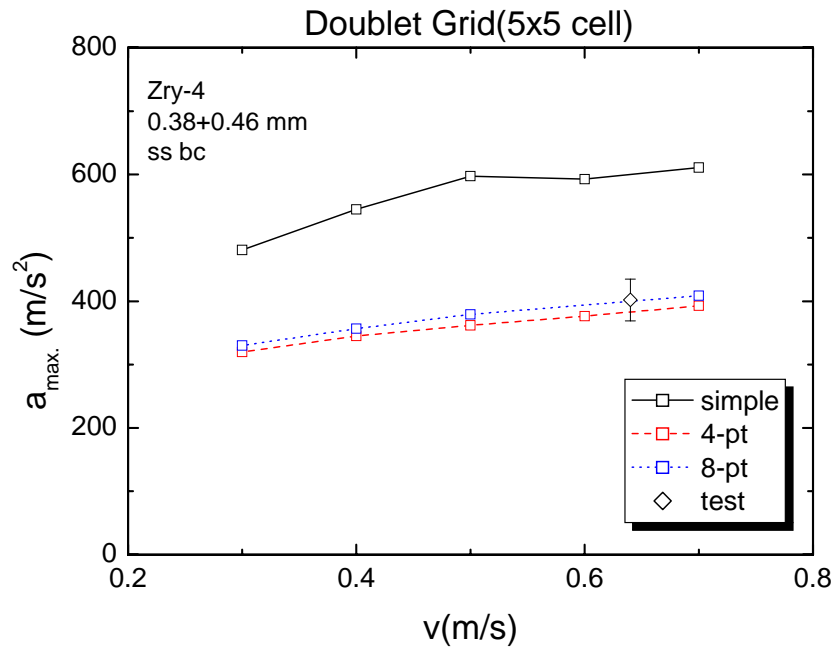


Fig. 12 5×5셀 부분격자체의 교차부 용접개수에 따른 해석결과와 시험결과와의 비교(최대 충격가속도)

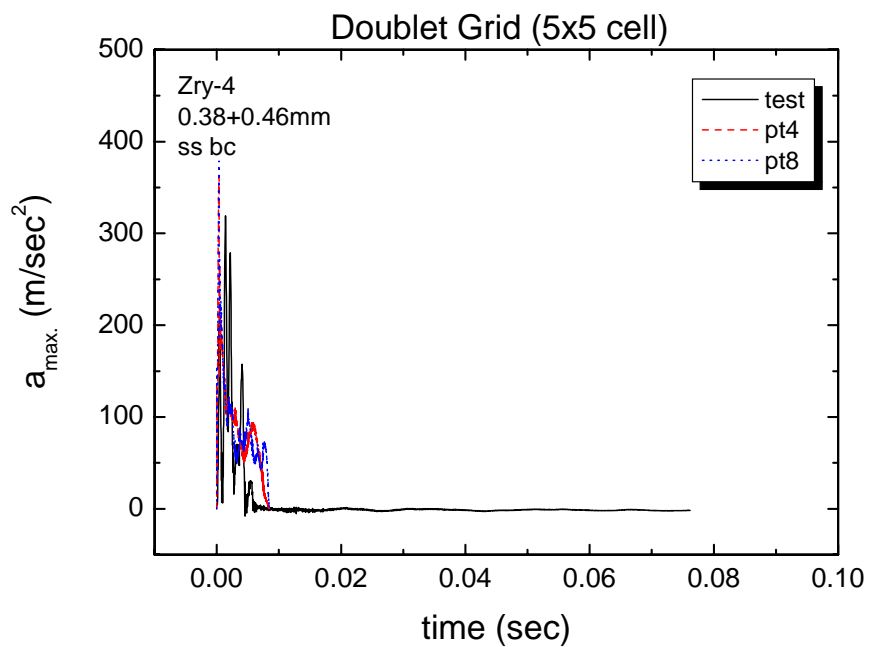


Fig. 13 5×5셀 부분격자체의 교차부 용접개수에 따른 해석결과와 시험결과와의 비교(가속도 이력)