

## 충돌해석에서의 점용접부 모델링에 따른 하중특성 평가

송 정 한<sup>1)</sup> · 허 훈<sup>\*1)</sup> · 김 흥 기<sup>2)</sup> · 박 성 호<sup>2)</sup>

한국과학기술원 기계공학과<sup>1)</sup> · 포스코 기술연구소<sup>2)</sup>

### Evaluation of the Finite Element Modeling of Spot-Welded Region for Crash Analysis

Junghan Song<sup>1)</sup> · Hoon Huh<sup>\*1)</sup> · Honggee Kim<sup>2)</sup> · Sungho Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

<sup>2)</sup>POSCO Technical Research Laboratories, 699 Cumho-dong, Gwangyang-si, Jeonnam 545-090, Korea

(Received 14 September 2005/ Accepted 14 December 2005)

**Abstract** : The resistance spot-welded region in most current finite element crash models is characterized as a rigid beam at the location of the welded spot. The region is modeled to fail with a failure criterion which is a function of the axial and shear load at the rigid beam. The role of this rigid beam is simply to transfer the load across the welded components. The calculation of the load acting on the rigid beam is important to evaluate the failure of the spot-weld. In this paper, numerical simulation is carried out to evaluate the calculation of the load at the rigid beam. The load calculated from the precise finite element model of the spot-welded region considering the residual stress due to the thermal history during the spot welding procedure is regarded as the reference value and the value of the load is compared with the one obtained from the spot-welded model using the rigid beam with respect to the element size, the element shape and the number of imposed constraints. Analysis results demonstrate that the load acting on the spot-welded element is correctly calculated by the change of the element shape around the welded region and the location of welded constrains. The results provide a guideline for an accurate finite element modeling of the spot-welded region in the crash analysis of vehicles.

**Key words** : Resistance spot weld(저항점용접), Electro-thermal analysis(전열해석), Crash analysis(충돌해석), Failure load(파단하중), Finite element method(유한요소법)

### 1. 서론

점용접은 자동차 기술에 의하여 대량생산에 적합하고 균일한 용접 품질 확보가 용이하므로 자동차, 철도 차량 등에 널리 활용되고 있다. 특히 자동차의 경우 주요 구조의 대부분이 점용접으로 접합되어 있기 때문에 충돌 해석을 수행하는데 있어서 점용접의 파단 거동에 대한 정확한 모사가 필수적

이다.

용접부의 파단은 기하학적 대변형을 포함할 뿐만 아니라, 용접과정에서의 온도 변화에 의하여 용접부 및 인접한 부분의 기계적 성질을 변화하게 되기 때문에 대변형에 의한 연성 파단(ductile failure) 및 열영향부(heat affected zone)에서의 잔류응력 및 재료강도의 분포상태 그리고 변형률속도의 영향 등을 고려해야 하는 복잡한 문제이다.<sup>1,2)</sup> 점용접부의 파단과 관련하여 Zuniga와 Sheppard<sup>3)</sup>는 인장실

\*Corresponding author. E-mail: hhuh@kaist.ac.kr

험 및 유한요소 해석을 통하여 열영향부 주변에서의 파단강도를 계산하였으며, Lin<sup>4,5)</sup> 등과 Langrand<sup>6)</sup> 등은 용접부에 인장 하중 및 전단 하중을 부가하여 용접부의 파단조건식에 관한 연구를 수행하였다.

일반적으로 충돌해석과 같은 구조해석 단계에서 점용접부 주위를 상세하게 모델링하는 것은 시간 및 비용 관점에서 그 효용성이 매우 떨어지기 때문에 Fig. 1과 같이 용접점을 쉘요소로 구성된 요소망에서 하나의 절점으로 대체하여 정의하고, 두 개의 판재 연결을 모사하기 위하여 절점을 연결하는 강제 요소를 용접부로 취급하며, 강제요소에 걸리는 조합하중이 설정된 파단 조건에 도달하면 점용접부가 파단 된 것으로 간주하여 강제 요소의 판재 연결 기능을 해제한다.<sup>7)</sup> 이와 같은 거시적 접근 방법은 각 점용접점 근처에서 상세모델링을 생략하기 때문에 충돌 해석과 같은 거대한 문제에 있어서 매우 효율적인 접근 방법이다. 그러나 용접부의 파단을 강제요소에 걸리는 조합하중의 함수로 모사하기 때문에 간략화된 용접점이 실제의 하중특성을 정확히 예측하여야 한다.

본 논문에서는 강제요소로 모사하는 점용접부 모델링의 정확성 및 효용성을 검토하기 위하여 강제요소로 대체된 용접부의 모델링 기법에 따른 하중특성을 조사하였다. 우선 유한요소 전열해석을 통하여 열영향부에서의 잔류응력을 계산하고 이를 고려한 상세모델에 대하여 인장하중 및 전단하중을 부가하여 용접부에 작용하는 하중을 계산하였다. 이러한 상세모델에서의 하중값을 기준으로 강제요소를 이용한 대체모델링에 대하여 용접부 주변 유한요소의 크기, 요소망의 형태 및 절점을 연결하는 강제 요소의 부가조건에 따른 용접부의 하중특성을 비교·분석하였다.

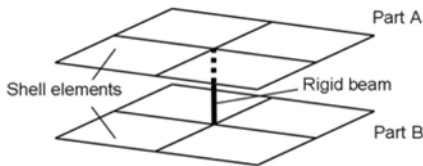


Fig. 1 FE modeling of the spot welded region in crash analysis

## 2. 점용접과정의 대전류 전열해석 및 잔류응력 계산

### 2.1 점용접과정의 대전류 전열해석

점용접부의 변형특성 및 작용하중 계산을 위한 전 단계로서 점용접과정의 대전류 전열해석을 수행하고 잔류응력을 계산하였다. 저항점용접의 경우 열원은 접촉부에서 발생하는 전기 저항에 의한 발열이므로 전기장해석과 열전달해석을 연계하여 수행하였다. 전열해석을 위한 유한요소 모델링을 Fig. 2에 도시하였다. 판재는 차체 구조용 강판인 두께 1.0 mm의 SPRC35R로 가정하였으며, 전극은 반구(dome) 형태로 가정하였다. 대칭성을 고려하여 1/2 모델을 사용하였고, 전극과 판재는 각각 7319개와 10432개의 8절점 육면체요소를 사용하여 모델링하였으며, 판재의 정확한 온도분포 예측을 위하여 전극의 접촉부와 판재의 중앙부를 조밀하게 모사하였다. 그리고 점용접과정에서 판재와 전극의 접촉부 및 판재 사이의 접촉부에 간극요소(gap element)를 이용하여 접촉저항을 고려하였다.

전극에 2.5 kN의 하중을 부가한 상태에서 15 사이클 동안 12000 A의 전류를 통전하여 전열해석을 수행하였다. 해석에 사용된 점용접 조건을 Table 1에 제시하였다. 전열해석을 수행하는데 있어서 전극

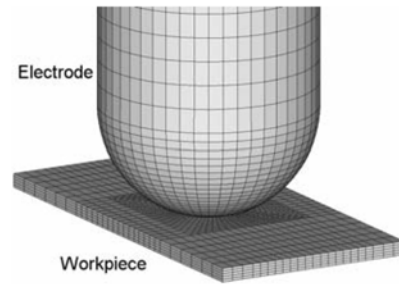


Fig. 2 Finite element model for the electro-thermal analysis of the spot welding procedure

Table 1 Condition of spot welding procedure

Condition	Two layer sheet (1.0 t)
Electrode diameter	6.0 mm
Current	12000 A
Welding time	15 cycle
Pressure	2.5 kN

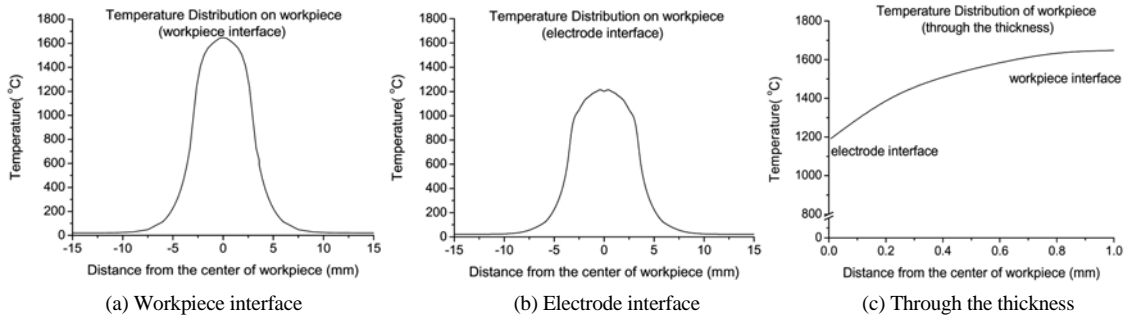


Fig. 3 Temperature distribution in a workpiece at the end of the weld process

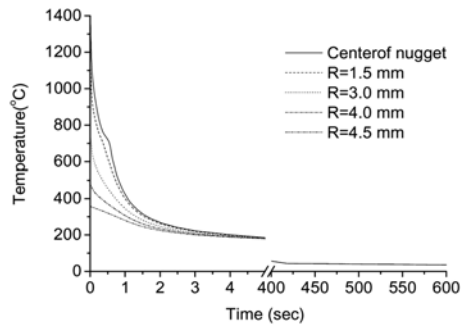
과 판재의 전기저항, 비열, 열전도 계수 등은 온도에 따라 변화하는 값을 적용하였다.<sup>8)</sup> 유한요소 해석은 ABAQUS/Standard를 사용하였다.<sup>9)</sup>

점용접 과정의 유한요소 해석결과로 얻은 15 사이클의 통전시간 후 판재의 온도분포를 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3의 (a)와 (b)를 살펴보면, 판재의 중앙부를 기준으로 반경 7.5 mm 범위에서 온도 구배가 크게 발생한다. 그리고 판재 사이의 접촉부에서는 1600°C까지 온도가 상승하는 반면 전극과의 접촉부에서는 1200°C까지 올라간다. 이는 판재사이의 접촉저항이 판재와 전극사이의 접촉저항보다 크기 때문이다. 판재의 중앙부에서 두께방향의 온도분포는 Fig. 3의 (c)와 같다.

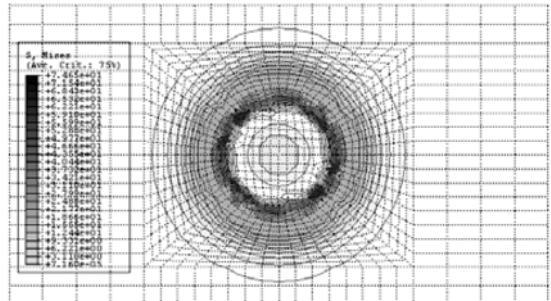
### 2.2 잔류응력의 계산

점용접부의 잔류응력을 구하기 위하여, 전열해석을 통하여 얻은 열이력을 바탕으로 판재의 탄소성해석을 수행하였다. 해석 시 사용되는 탄성계수와 항복강도, 포아송비 등과 같은 기계적 물성치 또한 온도에 따른 값들을 사용하였다.<sup>10)</sup> 잔류응력의 계산은 전열해석에서 얻은 온도분포를 초기조건으로 하여 대기로의 대류 열전달에 의한 온도 변화 및 이에 따른 열응력을 연계하여 계산하였다.

점용접 과정 후 대류에 의한 판재의 시간에 따른 온도 변화를 Fig. 4의 (a)에 도시하였다. 판재의 중앙부에서 초기에 1000 °C/sec의 높은 온도 구배를 보이고 있으며 중앙부에서 멀어질수록 온도구배는 감소하고 있다. 이상의 시간에 따른 온도분포의 변화에 의한 잔류응력 분포는 Fig. 4의 (b)와 같다. 너겟부 근처에서 온도 구배의 심한 변화로 인하여 잔류응



(a) Temperature distribution



(b) Residual stress in a workpiece (von-Mises stress)

Fig. 4 Results of thermo-mechanical analysis of spot welding process

응력이 집중되고 있다. 점용접 과정 후 판재의 두께 분포를 Fig. 5에 도시하였다. 점용접 과정에서 2.5 kN의 부가 하중에 의하여 판재의 전극 접촉부에서 약 10%의 두께가 감소함을 살펴볼 수 있다.

### 3. 열영향부를 고려한 기준모델의 하중계산

본 논문에서는 충돌해석에서 강제요소로 모사하는 점용접부 모델링의 정확성 및 효율성을 검토하



Fig. 5 Thickness distribution in a workpiece

기 위하여 강체 요소로 대체된 용접부 모델링 기법에 따른 하중 특성을 조사하였다. 이를 위한 기준모델로 2장에서 구한 용접부의 잔류응력을 고려한 상세모델에 대하여 용접부의 작용하중을 계산하였다.

점용접부의 대체모델에서 용접부의 파단을 강체 요소에 걸리는 수직하중과 전단하중의 함수로 모사하기 때문에<sup>11)</sup> Fig. 6에 도시한 인장-전단시편과 인장-수직시편에 대하여 점용접부에 작용하는 하중을 계산하였다. 유한요소 해석은 충돌해석에 널리 사용되는 외연적 상용프로그램인 LS-DYNA3D를 사용하였다. 해석에 사용된 판재는 두께 1.0 mm의 구조용 강판인 SPRC35R이며, 변형률 속도에 따른 강판의 동적 거동을 모사하기 위하여 Johnson-Cook 모델을 사용하였다. SPRC35R의 Johnson-Cook 모델은 식 (1)과 같이 표현된다.<sup>12,13)</sup>

$$\bar{\sigma} = [264.8 + 641.6\bar{\epsilon}^{0.59}] \left[ 1 + 0.105 \ln \frac{\bar{\dot{\epsilon}}}{\bar{\dot{\epsilon}}_0} \right] \left[ 1 - T^{*0.23} \right] \quad (1)$$

여기서  $T^*$ 는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}, \quad \bar{\dot{\epsilon}}_0 = 1 / \text{sec} \quad (2)$$

두 종류의 점용접시편에 대하여 1 m/sec의 속도 경계조건을 부가하여 대변형 해석을 하였고 시편의 점용접부위는 두 판재의 접합면에 해당하는 요소에 249개의 강체요소를 사용하여 연결하고 점용접의 파단은 고려하지 않았다. 열영향부(HAZ)에서의 강도는 판재의 강도보다 1.5배에서 2배 증가된다는 연구결과에 근거하여 1.7배로 가정하였다.<sup>14)</sup> 5 mm의 변형 후 각 시편의 유효응력 분포는 Fig. 7과 같다.

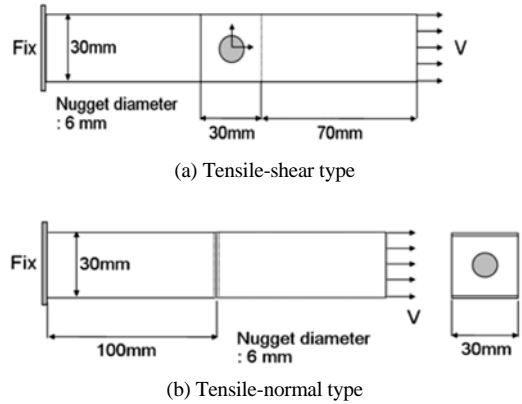


Fig. 6 Schematic description of the analysis model

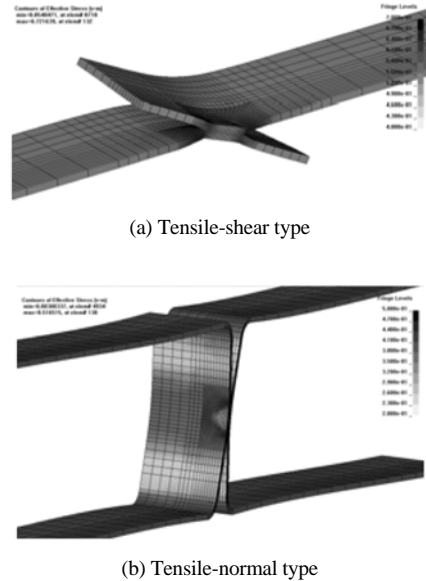


Fig. 7 Distribution of the von-Mises stress in the precise model

인장-전단시편과 인장-수직시편에 대하여 인장 변위에 따른 점용접부의 하중변화를 Fig. 8에 도시하였다. 인장-전단시편의 경우 변형 초기에 하중이 급격히 증가하다 1 mm 인장 후 일정한 하중이 용접부에 작용한다. 이와 비교하여 인장-수직시편은 변형량이 증가할수록 용접부에 작용하는 하중도 비례적으로 증가한다. 실제 Langrand<sup>6)</sup>의 실험결과인장-전단시편은 변형 초기에 하중이 급격히 증가하다 일정해진 후 파단에 의하여 하중이 감소하며, 인장-수직시편에서는 하중이 비례적으로 증가하다

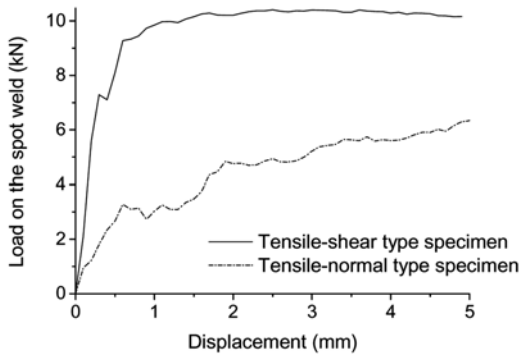


Fig. 8 Load acting on the spot weld in the precise model

파단이 발생한다. 본 논문에서는 점용접의 파단을 고려하지 않았기 때문에 각 시편의 최대하중을 파단하중으로 가정하고 강제 요소로 대체된 용접부 모델링에 따른 하중 특성을 조사하였다.

#### 4. 충돌해석에서의 점용접부 모델링에 따른 하중평가

용접점의 파단은 구조해석과정에서 도출되는 용접점에 작용하는 인장력 및 전단력에 의하여 결정된다. 따라서 용접부의 유한요소모델링 오류로 인하여 용접점에 작용하는 인장 및 전단력이 부정확하다면 구조해석의 효용성은 크게 줄어든다고 볼 수 있다. 물론 용접부 주변에 미세한 요소망을 배치해 해석한다면 근사한 결과를 얻을 수 있겠지만, 실제 충돌해석에서 시간 및 비용에 있어서 현실성이 떨어진다. 따라서 본 장에서는 충돌해석에서 강제 요소로 모사하는 점용접부의 모델링에 따른 하중 특성을 조사하여 최적의 용접부 모델링 기법을 조사하였다. 이를 위하여 3장에서 계산한 상세모델에서 용접부에 작용하는 하중값을 기준으로 강제요소를 이용한 대체모델링에 대하여 용접부 주변 유한 요소의 크기, 요소망의 형태 및 절점을 연결하는 강제 요소의 부가조건에 따른 용접부의 하중특성을 비교·분석하였다. 강제 요소를 사용한 인장-전단 시편 및 인장-수직시편을 Fig. 9에 도시하였다.

##### 4.1 용접부 주변 요소망 크기의 영향

일반적으로 차체 부재의 충돌해석을 위한 유한요소 모델은 주로 10.0 mm에서 5.0 mm 사이의 사각형

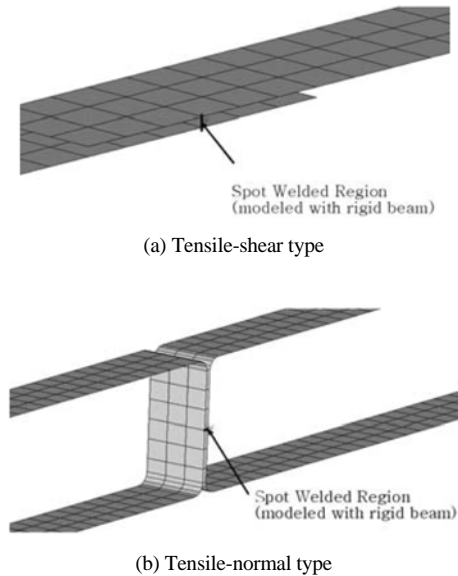
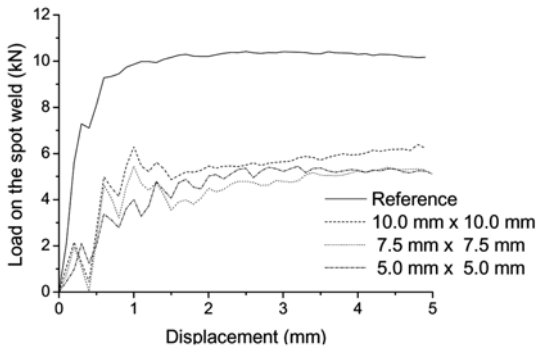


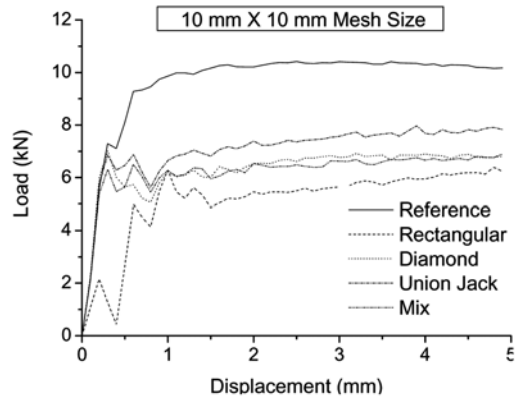
Fig. 9 Finite element model of a specimen in which the spot-welded region is modeled with a rigid beam

웰요소로 구성된다. 이를 고려하여 본 논문에서는 용접부와 주변 사각형 요소 격자의 크기를 각각 10.0 mm × 10.0 mm, 7.5 mm × 7.5 mm, 5.0 mm × 5.0 mm로 변화하여 요소 크기에 따른 강제요소로 대체된 용접부에서의 하중 특성을 조사하였다.

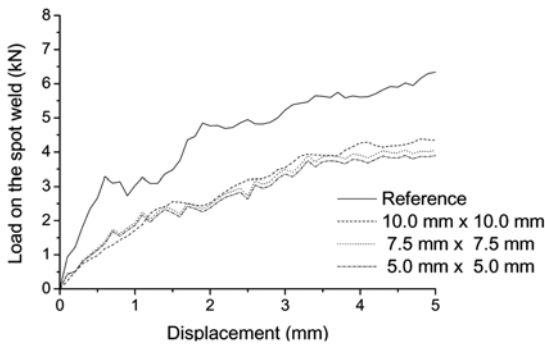
Fig. 10에 용접점의 상세 모델링에서의 작용하중과 비교하여, 용접부 대체 모델링에서 주변 요소망의 크기에 따른 용접부에 작용하는 하중을 도시하였다. 용접점을 하나의 강제 요소로 대체하는 경우, 기준 상세 모델의 용접점 하중과 큰 차이가 발생하는 것을 살펴 볼 수 있다. 그리고 이러한 차이는 인장-전단시편에서 더 크게 발생한다. 이러한 오차의 원인으로 실제 용접부의 경우에 너겟의 크기가 6.0 mm 인데 반해, 하나의 강제 요소로 용접부를 모델링하는 경우 실제 판재에 구속력을 충분히 추가하고 있지 못하기 때문으로 판단된다. 특히 요소의 크기가 작아질수록, 하나의 강제 요소에 의하여 부가되는 구속 조건의 범위가 실제 용접부와 비교하여 작기 때문에 오차가 더 크게 나타나고 있다. 따라서 이러한 대체 모델링의 경우 충돌해석에서 용접부의 파단이 실제 파단보다 지연되는 등의 문제점이 발생할 수 있다.



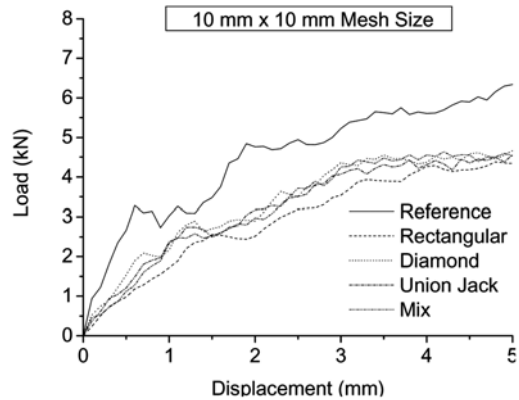
(a) Tensile-shear type



(a) Tensile-shear type



(b) Tensile-normal type



(b) Tensile-normal type

Fig. 10 Comparison of the load on the spot-welded region with respect to the element size

Fig. 12 Load acting on the spot-welded region with respect to the element shape

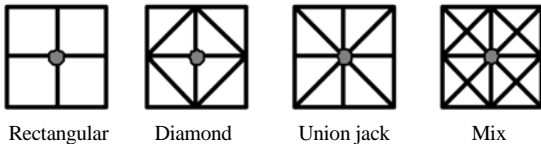


Fig. 11 Four types of element used in the modeling of spot-welded region

#### 4.2 용접부 요소망 형태의 영향

4.1 절에서 요소망의 크기에 따라 하나의 강체 요소에 의하여 용접부를 모델링하는 경우, 용접부 주변 요소의 크기를 변화하여도 용접부에 작용하는 인장력 및 전단력이 부정확하게 계산됨을 확인하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 본 절에서는 용접부 주변 요소망의 형태를 달리하여 강체요소로 대체된 용접부에서의 하중 특성을 조사하였다. Fig. 5와 같이 기존의 사각형 요소망(rectangular type)을 기준으로 마름모형 요소망(diamond type), 방사형 요소망(union jack type) 및 혼합형 요소망(mix type)

을 이용하여 용접부 주변을 모델링하고 하나의 강체요소로 용접부를 모사하였다.

인장 - 전단시편 및 인장 - 수직시편에 대하여 기준 사각 요소의 크기를 각각 10.0 mm × 10.0 mm, 5.0 mm × 5.0 mm로 하여 용접부 주변 요소망에 따른 용접부에서의 하중 특성을 조사하였다. 기준 사각 요소의 크기가 10.0 mm × 10.0 mm인 경우, 용접부 주변 요소망에 따른 용접부의 하중을 Fig. 12에 도시하였다. 3장의 상세모델과 비교하여 사각형 요소망보다 삼각 요소를 포함하여 용접부 주변을 모델링한 경우에 하중 크기가 증가하나 아직도 약 30 % 이상의 오차를 보이고 있다.

인장 - 전단시편 및 인장 - 수직시편에서 기준 요소 크기에 대하여 용접부 주변 요소망 형상에 따른 정량적 비교를 위하여 용접부에 작용하는 최대하중

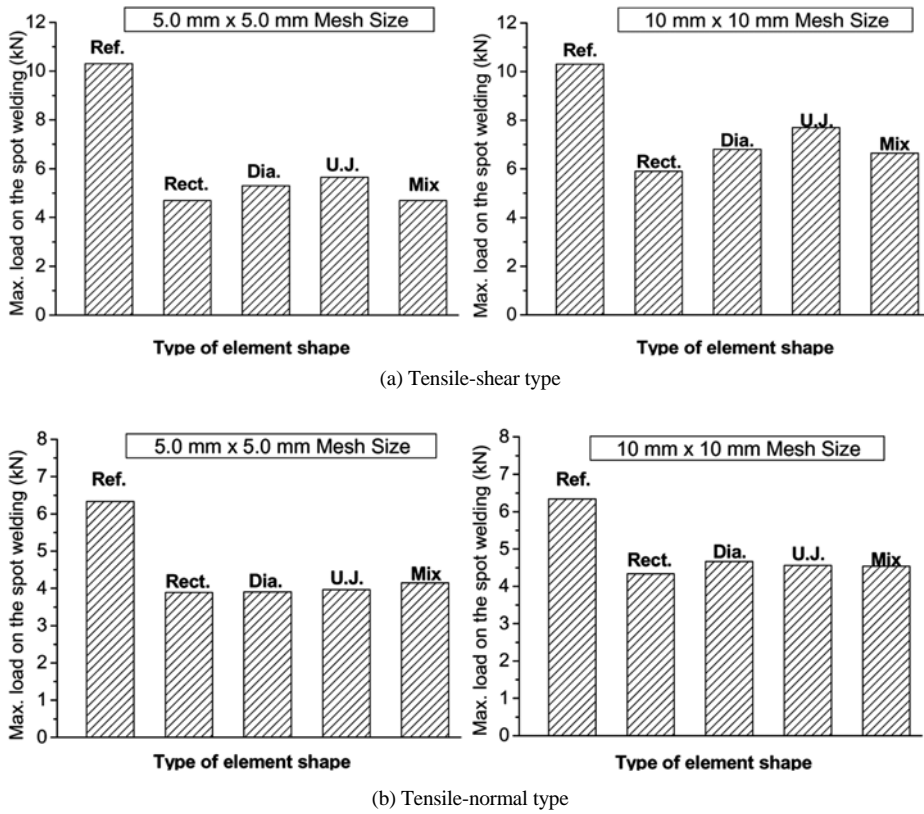


Fig. 13 Comparison of the maximum load on the spot-welded region with respect to the element shape

의 크기를 Fig. 13에 도시하였다. 인장 - 전단시편에서는 용접부 주변 요소망에 따라 최대하중이 달라지며 방사형 요소망을 사용하여 용접부를 모델링한 경우가 오차가 감소한다. 이와 비교하여 인장 - 수직시편에서는 용접부에 작용하는 최대하중이 용접부 주변 요소망의 변화에 덜 민감한 경향을 보이고 있다. 그리고 두 시편 모두 기준 사각요소의 크기가 10.0 mm × 10.0 mm인 경우가 5.0 mm × 5.0 mm 크기의 요소를 사용한 경우보다 오차가 감소한다. 이는 용접부 주변 하중특성이 용접부 주변 요소망의 형태보다는 주변 요소의 크기 및 이에 따른 상대적 구속력에 따라 결정됨을 의미한다.

### 4.3 용접부 구속조건에의 영향

하나의 절점을 강체요소로 연결한 용접부 모델링에 대하여 용접부 주변 요소망의 크기 및 요소망의 형태를 변화하여도 기준 상세모델과 비교하여 하중특성에 큰 오차가 발생하였다. 이러한 오차의 원인

이 실제 너겟의 크기와 비교하여 하나의 절점으로 판재에 충분한 구속력을 부가하지 못하기 때문이다. 따라서 본 절에서는 강체요소를 이용한 용접부 구속조건을 Fig. 14와 같이 부가하고 전체를 하나의 용접부로 가정하였다. 사각형, 마름모형, 방사형 및 혼합형 요소망에 대하여 강체 구속조건을 마름모형으로 부가하여 해석을 수행하였다.

10.0 mm × 10.0 mm의 요소크기에 대하여 강체 구속조건을 마름모형으로 부가한 경우 용접부 주변 요소망에 따른 용접부의 하중을 Fig. 15에 도시하였다. 인장 - 전단시편 및 인장 - 수직시편에 대하여 오차

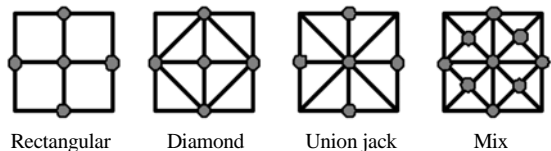


Fig. 14 Shape of imposed constraints in the modeling of spot-welded region

소크기 및 요소망 형태에 따른 정량적인 비교를 위하여 용접부에 작용하는 최대하중의 크기를 Fig. 15에 도시하였다. 두 시편 모두 강체 구속조건을 마름모형으로 부가한 경우에 기준이 되는 상세모델과 비교하여 용접부에 거의 동일한 하중이 부가됨을 살펴볼 수 있다. 이는 실제 너겟의 크기를 고려하여

구속조건을 마름모 형태로 표현함으로써 구속력이 부가되는 영역이 적절하게 고려되었기 때문이다.

이상의 해석결과 용접부 구속조건을 마름모의 형태로 부가한 경우, 10.0 mm × 10.0 mm 및 5.0 mm × 5.0 mm의 요소 크기에 대하여 용접부 주변 요소망의 형태와 큰 상관없이 용접부에 작용하는 전단력

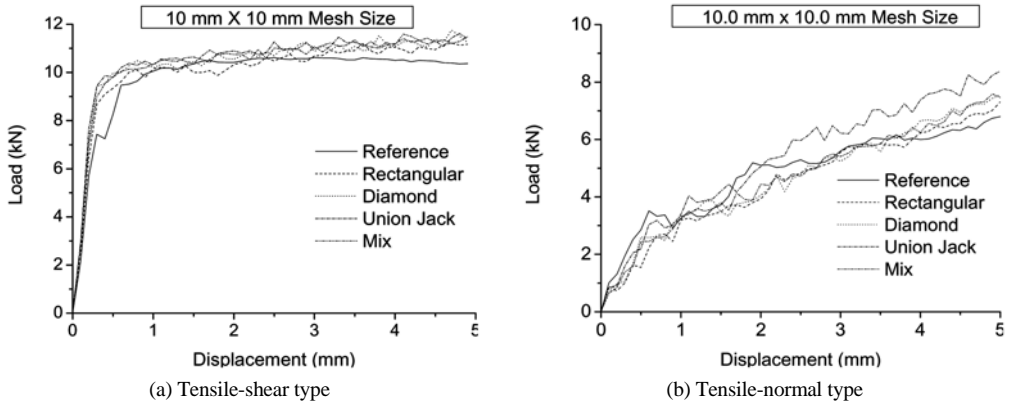


Fig. 15 Load acting on the spot welded region with respect to rigid constraints

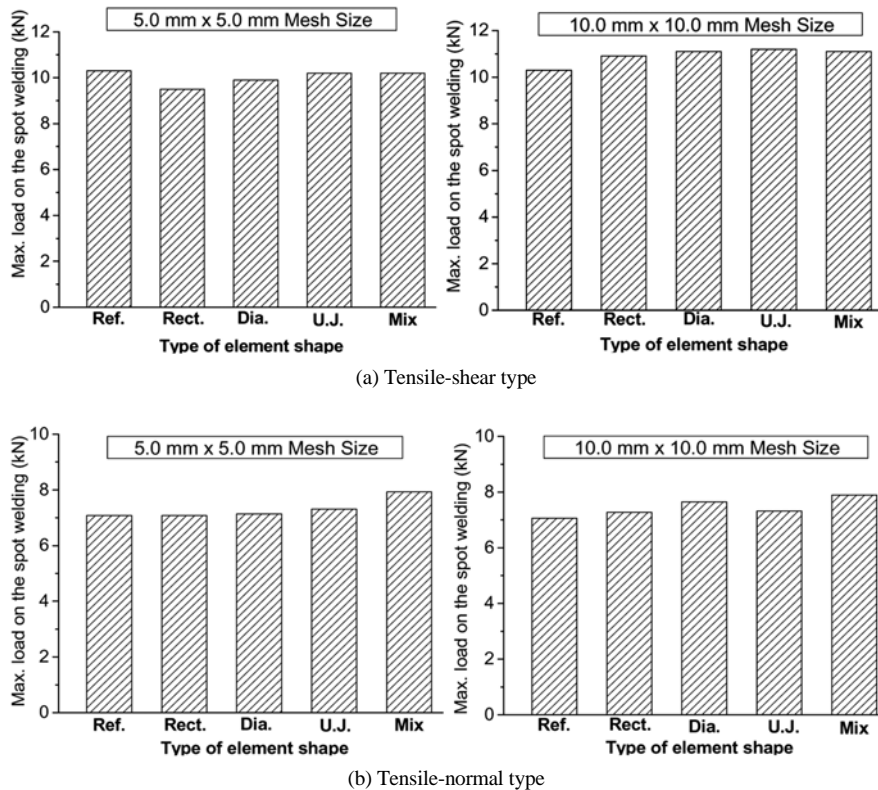


Fig. 16 Comparison of the maximum load on the spot welded region with respect to rigid constraints



과 인장력을 정확히 계산하였다. 이를 충돌해석에 적용할 경우, 사용되는 요소의 크기 및 형상에 관계 없이 용접부 작용하중을 정확하게 계산하여 용접부 파단의 신뢰성을 높이고 충돌해석의 효율성을 향상시킬 것으로 예측된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 충돌 해석을 위한 용접부의 효과적인 모사를 위한 용접부 모델링 기법에 관한 기술을 확보하기 위하여 거시적 관점에서의 용접부 모델링 기법에 관한 연구를 수행하였다. 충돌해석에서 강제요소로 모사하는 점용접부 모델링의 정확성 및 효율성을 검토하기 위하여 우선 유효요소 전열 해석을 통하여 열영향부에서의 잔류응력을 계산하고 이를 고려한 상세모델에 대하여 인장하중 및 전단하중을 부가하여 용접부에 작용하는 하중을 계산하였다. 이를 기준으로 하여 강제요소를 사용한 충돌해석용 용접부 모델에서 요소의 크기 및 요소망의 형태, 용접부 구속조건을 변화하여 기존 모델링에 대한 검증을 수행하였다.

그 결과 기존의 충돌해석에 사용되는 용접부 모델링은 판재에 충분한 구속력을 부가하지 못하여 용접부의 하중을 정확하게 계산하지 못하며, 이로 인하여 하중 조건에 의하여 파단이 결정되는 현재의 파단 조건식에도 오차를 포함하게 된다. 이를 개선하기 위하여 구속 조건을 방사형으로 부가한 결과 요소의 크기, 요소망의 형태, 용접부에 작용하는 하중 조건을 변화 하여도 실제 용접부에 작용하는 하중을 대체 모델링이 정확하게 예측하고 있음을 확인하였다. 이상의 결과를 충돌해석에 적용할 경우 용접부의 작용하중을 정확하게 계산하여 용접부 파단의 신뢰성을 높이고 충돌해석의 효율성을 향상시킬 것으로 예측된다.

### References

- 1) T. S. Lee, H. Y. Lee and S. J. Shin, "An Estimative Model of Spot Weld Failure - 1. Failure Criteria," Transactions of KSAE, Vol.6, No.8, pp.40-52, 1998.
- 2) J. H. Song, C. H. Yang, H. Huh, H. G. Kim and

- S. H. Park, "Fracture Analysis of Spot-Welds with Edge Cracks using 2-D Hybrid Special Finite Element," Trans. of Materials Processing, Vol.13, No.6, pp.484-489, 2004.
- 3) S. M. Zuniga and S. D. Sheppard, "Determining the Constitutive Properties of the Heat-affected Zone in a Resistance Spot Weld," Modeling Simul. Mater. Sci. Eng., Vol.3, pp. 391-416, 1995.
- 4) S.-H. Lin, J. Pan, S.-R. Wu, T. Tyan and P. Wung, "Failure Loads of Spot Welds under Combined Opening and Shear Static Loading Conditions," Int. J. Solids Struct., Vol.39, pp.19-39, 2002.
- 5) S.-H. Lin, J. Pan, T. Tyan and P. Prasad, "A General Failure Criterion for Spot Welds under Combined Loading Conditions," Int. J. Solids Struct., Vol.40, pp.5539-5564, 2003.
- 6) B. Langrand and A. Combescure, "Non-linear and Failure Behavior of Spotwelds: A Global Finite Element and Experiments in Pure and Mixed Modes I/II," Int. J. Solids Struct., Vol. 41, pp.6631-6646, 2004.
- 7) X. Deng, W. Chen and G. Shi, "Three Dimensional Finite Element Analysis of the Mechanical Behavior of Spot Welds," Finite Elem. Anal. Des., Vol.35, pp.17-39, 2000.
- 8) H. Huh and W. J. Kang, "Electrothermal Analysis of Electric Resistance Spot Welding Procedures by a 3-D Finite Element Method," J. Mater. Process. Techno., Vol.63, pp.672-677, 1997.
- 9) ABAQUS/Standard User's Manual, HKS Inc., 2004.
- 10) J. R. Newby et al., Metals Handbook, 9th Edn., Vol.1, American Society for Metals, 1991.
- 11) LS-DYNA 3D Keyword Manual Ver. 970, LSTC, 2003.
- 12) H. Huh, J. H. Lim, J. H. Song, K. S. Lee, H. W. Lee and S. S. Han, "Crashworthiness Assessment of Side Impact of an Auto-body with 60 TRIP Steel for Side Member," Int. J. Automotive Technology, Vol.4, No. 3, pp.149-156, 2003.
- 13) G. R. Johnson and W. H. Cook, "A Constitutive

- Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," Proc. of 7th International Symposium on Ballistics, pp.541-547, 1983.
- 14) R. N. Yancey, "Impact Modeling of Spot Welds," Proc. of NUMIFORM 2004, pp.1215-1218, 2004.
- 15) Y. S. Yang, K. J. Son, S. K. Cho, S. G. Hong, S. K. Kim and K. H. Mo, "Effect of Residual Stress on Fatigue Strength in Resistance Spot Weldment," Trans. of KSME (A), Vol.25, No.11, pp.1713-1719, 2001.