

충돌해석에서 레이저 용접부 모델링 기법에 관한 연구

하지웅^{*1)}·허 훈¹⁾·박창욱²⁾·안용덕²⁾

한국과학기술원 기계항공시스템공학부¹⁾ ·현대자동차 연구개발총괄본부²⁾

Investigation of Modeling technique for Laser Welds in Crash Analyses

Jiwoong Ha^{*1)} · Hoon Huh¹⁾ · Changuk Park²⁾ · Yong-Dok An²⁾

^{*1)} School of Mechanical, Aerospace & System Engineering, Korea Advanced Institute of Science Technology, 335, Gwahangno, Deadoek Science Town, Daejeon, 305-701 Korea

²⁾ Hyundai & Kia motors, 772-1, Jangduk-Dong, Hwaseong-Si, Gyeonggi-Do, 445-706, Korea

Abstract : Recently, interest in the laser welding to assemble components of the auto-body has increased in the automotive industry due to its productivity, efficiency and reliability. When car crash occurs, crash performance and deformation mode of the auto-body are changed according to the location and shape of laser welds. In order to understand the crash behavior of auto-body through the FE analysis, the laser welded parts should be modeled physically compatibly and simply. This paper evaluates the compatible FE modeling technique for laser welds in crash analyses. A single laser welded part in a stitch shape is modeled by a group of numerous beam elements or hexahedron elements. FE analyses of cross tension test and lap-shear test under the quasi-static condition were carried out according to the number of elements, panel mesh size, and the relative position of the laser weld to the panel mesh. From the comparison between experiment and analysis results which are load and displacement curve, suitable modeling technique, which has hardly influence on analysis results, for laser welds in crash analyses is suggested.

Key words : Laser welding(레이저 용접), Stich laser weld(일자 레이저 용접), Beam element(보요소), Hexahedron element(육면체요소), Cross tension test(십자 인장 시험), Lap-shear test(전단 인장 시험)

1. 서론

레이저 용접은 로봇기술과 레이저 빔 기술의 발전에 의하여 생산성, 효율성과 신뢰성이 향상되어 자동차 산업에서 자동차 구조물의 접합에 적용빈도가 높아지고 있다. 특히, 생산성과 신뢰성에 의해서 현재 고급차량의 생산에 널리 활용되고 있다. 자동차 구조 부재의 접합을 위하여 레이저 용접의

사용 빈도가 높아지고 있기 때문에 레이저 용접의 파단 거동에 대한 이해가 구조물의 강도나 충돌 해석을 수행하는데 있어서 필수적이다.

차체 구조용 강판의 경우, 용접부의 파단은 기하학적 대변형을 포함할 뿐만 아니라, 용접과정에서의 온도 변화에 의하여 용접부 및 인접한 부분의 기계적 특성이 변하게 된다. 따라서 레이저 용접부의 파단은 점용접부의 파단과 유사하게 기하학적 대변형에 의한 연성 파단(ductile failure) 및 열영향부(heat affected zone)에서의 재료 강도의 분포상태와 변형경화 그리고 변형률 속도의 영향등을 고려해야 하는

* 하지웅, E-mail: hajiwoong@kaist.ac.kr

복잡한 문제이다.

재료 조직학적 접근 및 균열 성장에 의한 미시적 접근 이외에도 전체적인 구조물의 구조 및 충돌해석을 위하여는 용접부의 파단을 거시적인 관점에서 검토해야 한다. 충돌해석과 같은 전체 구조 해석에서 레이저 용접부 및 그 주변부를 상세하게 모델링하는 것은 시간 및 비용 관점에서 효율성이 매우 떨어진다. 따라서 단순하면서도 레이저 용접부를 가지는 구조물의 실제 거동을 유사하게 모사할 수 있는 레이저 용접부 모델링 기법에 대한 고찰이 필요하다. 이미 점용접부의 단순화 모델링 기법은 많은 연구가 이루어져 왔다. 용접점을 쉘 요소로 구성된 요소망에어 하나의 절점(node)으로 대체하여 정의하고, 두 개의 판재 연결을 모사하기 위하여 절점을 연결하는 강체 요소(rigid beam element)를 용접부로 취급한다. 하지만 이러한 방법은 용접부 주변 요소망의 크기의 영향을 크게 받는다는 단점으로 인하여 쉘 요소의 중앙부에 절점을 생성하여 용접점으로 정의하고, 두 개의 판재의 연결을 보요소(beam element)로 연결하였다. 하지만 최근에는 이러한 방법 또한 요소망의 크기, 용접부와 쉘 요소망 간의 상대적 위치가 해석결과에 영향을 미친다는 단점이 있어 점용접부를 하나 또는 다수의 육면체요소(hexahedron element)를 이용하여 모사하는 연구가 이루어지고 있다¹⁾. 레이저 용접부의 단순화 모델링 기법은 점용접부의 모델링 기법을 바탕으로 연구가 이루어지고 있다²⁾. 하지만 명확한 모델링 기법이 제안되어 있지는 않다.

본 논문에서는 점용접부의 단순화 모델링 기법을 바탕으로 레이저 용접부 단순화 모델링 기법을 제안하고, 이를 십자인장시험, 전단인장시험과 비교하여 모델링 기법의 타당성을 검증하였다.

2. 단순화 레이저 모델링 기법

2.1 용접부의 파단기구

레이저 용접부에는 Fig. 1과 같이 다양한 하중이 작용하며, 복합하중이 용접부의 임계하중에 도달하면 용접부는 파단이 일어나고 그 기능을 상실하게 된다. 복합하중에 의한 파단 기구는 Fig. 2, Fig. 3과 같이 3가지 형태로 나눌 수 있다. Fig. 2 (a)와 같이 용접부의 비드면에 순수 인장하중(F_N)이 작용하면 용접부는 버튼 파단이 발생하거나 계면 파단이 발

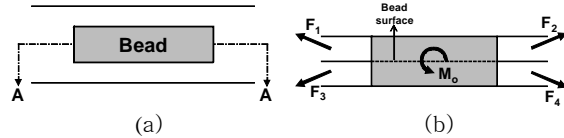


Fig. 1 Load characteristics acted by combined external forces on the laser welded parts: (a) top view; (b) cross-section of the bead under the general combined external forces.

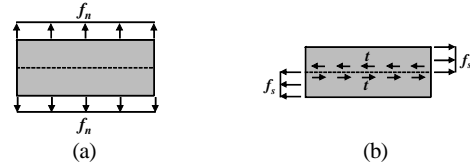


Fig. 2 Failure mode I and II: (a) Failure mode I by normal force acting on the bead surface; (b) Failure mode II by shear force acting on the bead surface.

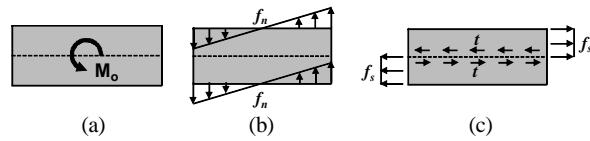


Fig. 3 Failure mode III by pure moment acting on the bead surface: (a) schematic diagram of pure moment acting on the bead surface; (b) decomposed normal force; (c) decomposed shear force.

생한다. 용접부에 인장하중이 작용하면 비드 주변의 모재는 소성 변형되며, 인장하중이 모재 또는 계면의 임계하중에 도달하면 모재 또는 계면에 균열이 발생한다. 균열이 진전하여 최종적으로 용접부는 파단이 되며, 두 모재를 구속하는 용접부로서의 역할을 상실한다. Fig. 2 (b)와 같이 용접부의 비드면에 순수 전단하중(F_S)이 작용하면 계면파단이 발생한다. 용접부에 전단하중이 작용할 때 용접부의 파단 기구는 인장하중이 작용하는 경우와 유사하다. Fig. 3 (a)와 같이 비드면에 순수 모멘트가 작용하면 용접부 주변부의 모재가 찢어지면서 용접부의 파단이 발생한다. 순수 모멘트는 Fig. 3 (b), (c)와 같이 인장하중과 전단하중으로 나누어지며, 최대 하중이 작용하는 지점에서 균열이 발생하여 균열이 진전하고, 모재를 찢으면서 용접부가 파단된다. 즉, 순수 모멘트는 인장하중과 전단하중의 조합에 의하여 발생한다. 용접부의 3가지 파단 기구로부터 복합하중이 용접부에 작용할 때, 용접부에 작용하는 하중은 인장하중과 전단하중으로 표현이 가능하다. 레이저 용접부의 파단은 용접부에 작용하는 인장하중과 전단하중에 의하여 발생하며, 용접부에 작용하는 인장하중과 전단하중으로 용접부의 파단을 모사할 수 있다.

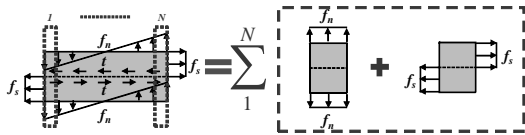


Fig. 4 Simplified modeling concept for the laser welded part.

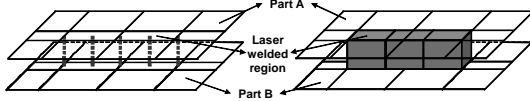


Fig. 5 FE modeling method of the laser welded part: (a) simplified laser welding model with a number of beam elements; (b) simplified laser welding model with a number of hexahedron elements.

2.2 레이저 용접부의 단순화 모델

2.1장에서 레이저 용접부에 작용하는 하중은 인장하중과 전단하중이며, 인장하중과 전단하중의 조합에 의해서 용접부에 작용하는 하중이 용접부 주변 모재의 임계하중 또는 계면의 임계하중에 도달하면 용접부 파단이 발생한다는 것을 알았다. 이러한 레이저 용접부에 작용하는 하중의 특성으로부터 유한요소 모델에서 레이저 용접부를 효과적으로 모사할 수 있는 레이저 용접부의 단순화 모델을 제안하였다.

레이저 용접부의 단순화 모델은 실제 레이저 용접이 적용된 부재 또는 시편의 변형 거동을 유사하게 모사할 수 있어야 하며, 인장하중과 전단하중의 향으로 모사되는 레이저 용접부 파단 모델을 유한요소해석에서 단순화 모델에 적용할 수 있어야 한다. 또한, 복합하중에 모재의 찢어짐에 의하여 파단이 발생하는 파단 기구를 유한요소해석에서 모사할 수 있어야 한다. 이러한 요구 조건을 만족 시키기 위하여 Fig. 4와 같이 레이저 용접부를 \$N\$개의 불연속 요소의 합으로 구분하고, 구분된 \$N\$개의 부분에 작용하는 인장하중과 전단하중의 조합으로 레이저 용접부를 모사할 수 있다고 가정하였다. \$N\$개의 불연속 요소는 유한요소 모델에서 Fig. 5와 같이 보요소 또는 육면체요소로 모사하였다. 레이저 용접으로 연결된 두 모재는 쉘요소로 모델링하고, 두 모재의 쉘요소에 레이저 용접부와 동일한 크기의 요소를 생성하였다. 비드에 해당하는 부분은 크기가 동일한 다수의 보요소 또는 육면체요소를 동일 간격으로 일렬로 배열하였다. 유한요소 해석에서 모재의 찢어짐 현상을 모사하기 위하여 홀수의 보요소 또는 육면체 요소를 사용하였다.

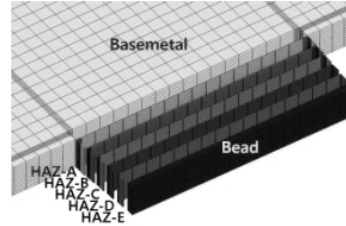


Fig. 6 FE modeling method of the laser welded part using precise solid elements.

3. 단순화 모델링에 관한 유한요소해석

레이저 용접부 주변에 미세한 요소격자를 배치하여 모델링하여 유한요소해석을 수행한다면 실제 현상과 근사한 결과를 얻을 수 있으나, 이는 실제 구조해석에서 시간 및 비용에 있어서 현실성이 떨어진다. 따라서 본 논문에서는 레이저 용접부 모델링 기법에 따른 하중특성을 비교함으로써 제안된 단순화 모델링 기법의 유효성을 확인하였다.

3.1 유한요소해석 모델

Fig. 5에 도시한 모델링 기법으로 SPRC340R 1.2t의 레이저 용접부를 모델링하고 십자인장시험과 전단인장시험의 하중 특성을 평가하였다. 두 종류의 시편에 대하여 레이저 용접부 주변을 3차원 연속체 요소를 세분화하여 해석한 결과 및 실험결과를 본 연구에서 제안한 층돌해석에서의 레이저 용접부 단순화 모델링 기법인 다수의 보요소 및 육면체 요소의 쉘요소 연결법의 결과와 레이저 용접부에 작용하는 하중특성을 비교하였다. Fig. 6은 레이저 용접부를 3차원 연속체요소를 사용하여 모델링하는 방법으로 비드의 길이는 17.5mm, 폭은 1.3mm, 열영향부의 폭은 0.4mm로 가정하였다. 폭 0.4mm의 열영향부를 0.08mm 간격으로 요소를 세분화하였으며, 1.2mm의 두께를 6층으로 나누어 열영향부와 그 주변 용접모재를 세분화하였다. 그리고 열영향부의 물성치는 Ha³의 연구결과를 참조하여 열영향부를 다섯 영역으로 구분하고 경도에 비례하여 대입하였다. 본 연구에서 제안한 Fig. 5 (a)는 레이저 용접부의 비드를 다수의 보요소로 가정하고 쉘요소의 각 면을 접촉조건을 이용하여 연결한 방법이다. 또한 본 연구에서 제안한 Fig. 5 (b)는 레이저 용접부의 비드를 다수의 육면체 요소로 가정하고 쉘요소의 각 면을 접촉조건을 이용하여 연결한 방법이다.

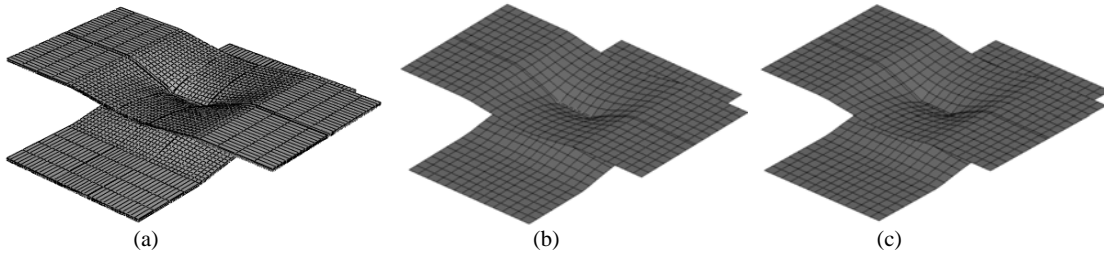


Fig. 7 Deformed shape of the specimen for the cross-tension test with different modeling of the laser welded part: (a) precise solid elements; (b) simplified laser welding model with a number of beam elements; (c) simplified laser welding model with a number of hexahedron elements.

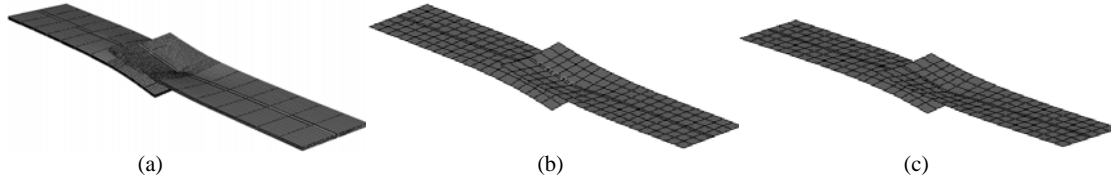


Fig. 8 Deformed shape of the specimen for the lap-shear test with different modeling of the laser welded part: (a) precise solid elements; (b) simplified laser welding model with a number of beam elements; (c) simplified laser welding model with a number of hexahedron elements.

3.2 레이저 용접부 모사를 위한 요소 종류

Fig. 7과 Fig. 8은 레이저 용접부를 모델링 하는 방법에 따른 십자인장시험과 인장전단시험의 변형 형상을 보여준다. 십자인장시험에서 레이저 용접부를 5개의 보요소 또는 육면체 요소를 사용하여 단순화한 제안된 레이저 용접부 모델링 기법은 3차원 연속체 요소를 사용한 상세 모델링과 유사한 변형형상을 보인다. 인장전단시험의 경우에도 동일한 경향성이 관찰된다. 레이저 용접부 모델링 방법에 따른 하중특성을 비교하기 위하여 Fig. 9에 십자인장시험 및 인장전단시험의 하중-변위 선도를 도시하였다. Fig. 9 (a)의 십자인장시험에 대하여 제안된 레이저 용접부 단순화 모델링 기법의 보요소 및 육면체 요소는 3차원 연속체 요소의 레이저 용접부 하중과 각각 약 6%, 8%의 오차를 보인다. Fig. 9 (b)의 인장전단시험에 대해서는 각각 약 1.6%, 3.7%의 오차를 보인다. 또한, 시험결과와 비슷한 변형양상을 보인다. 이로부터 유한요소해석에서 제안된 레이저 용접부 단순화 모델링 기법이 유효함을 알 수 있다.

3.3 레이저 용접부 모사를 위한 요소 수

Fig. 10과 Fig. 11은 유한요소해석에서 레이저 용접부를 모사하기 위하여 사용한 보요소 및 육면체 요소의 수가 용접부에 작용하는 하중 특성을 확인하기 위하여, 정적 인장조건으로 요소 수를 5, 9, 13

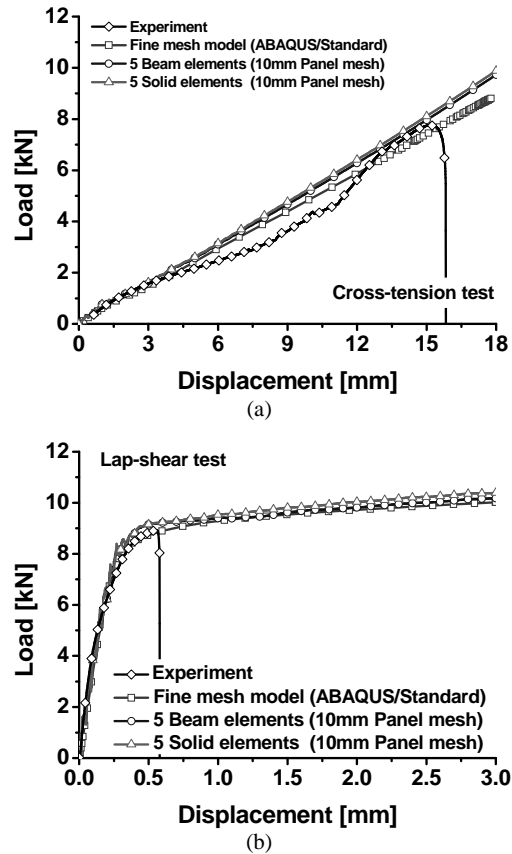


Fig. 9 Comparison of load-displacement curves with different modeling of the laser welded part: (a) cross-tension test; (b) lap-shear test.

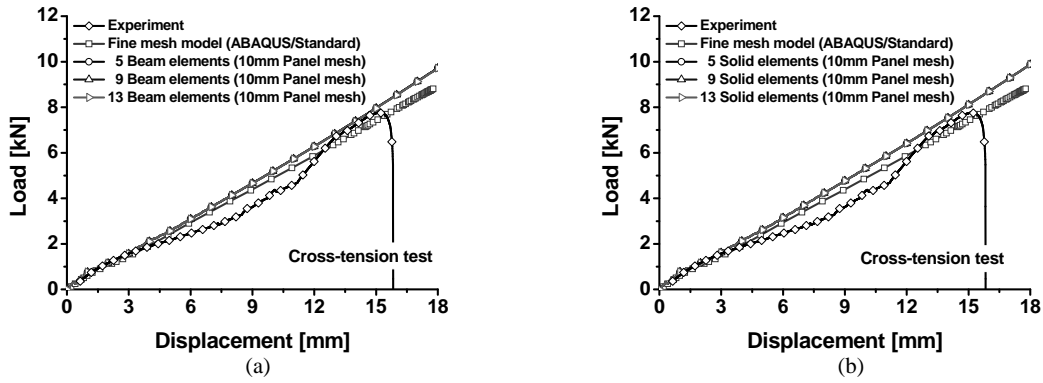


Fig. 10 Comparison of load-displacement curves with different number of elements to model the laser welded part in the cross-tension test: (a) beam elements; (b) hexahedron elements.

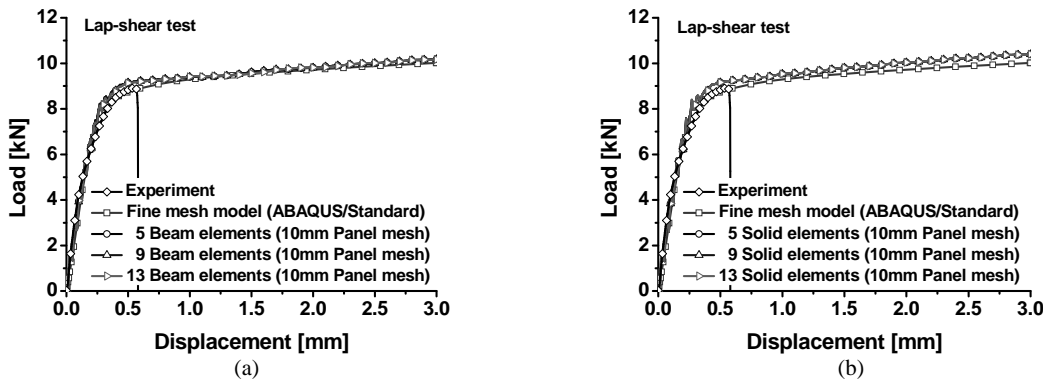


Fig. 11 Comparison of load-displacement curves with different number of elements to model the laser welded part in the lap-shear test: (a) beam elements; (b) hexahedron elements.

개 사용하여 십자인장시험 및 인장전단시험의 인장해석을 수행하였다. Fig. 10과 Fig. 11로부터 레이저 용접부를 모사하기 위하여 사용한 보요소 및 육면체 요소의 수는 용접부에 작용하는 하중에 영향이 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 레이저 용접부로 모사된 셀요소를 충분히 구속할 수 있는 요소가 사용된다면 실제 용접부의 거동을 정확하게 모사할 수 있음을 의미한다.

3.4 레이저 용접부와 셀요소의 상대적 관계

앞서 다수의 보요소 또는 육면체 요소를 레이저 용접부를 모사하기 위하여 사용하였다. 셀요소에서 용접부의 비드에 해당하는 부분의 요소 크기를 실제 레이저 용접부와 동일한 크기로 모델링 하였다. 하지만, 일반적으로 자동차의 충돌해석에서는 5mm에서 15mm사이의 요소를 사용하여 판넬요소를 구성하고, 용접부에 해당하는 부분을 단순화 모델링 기법으로 용접부를 모사한다. 이는 단순화 용접부 모델

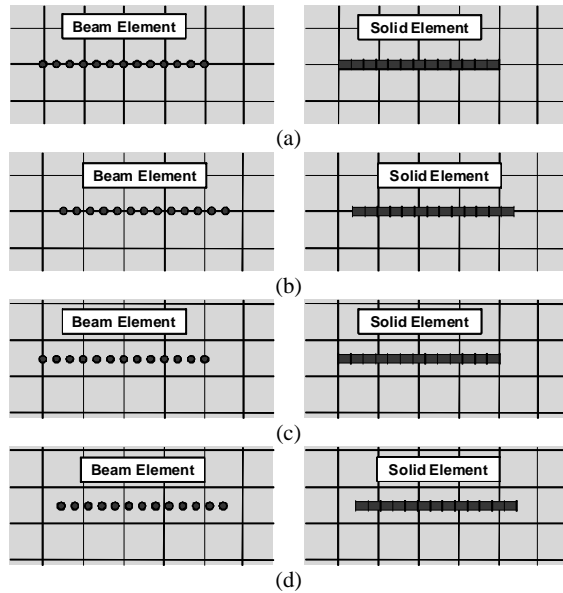


Fig. 12 Positional cases evaluating mesh dependence for simplified laser weld assemblies: (a) Node & On line; (b) Edge & On line; (c) Edge; (d) Center.

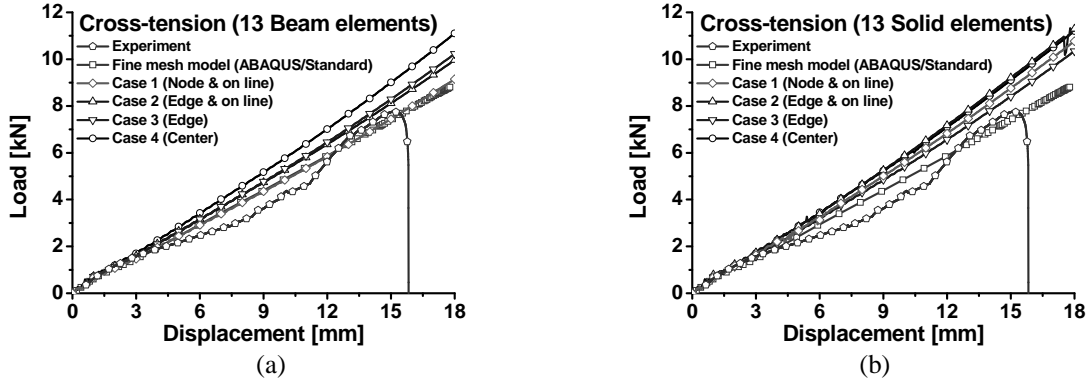


Fig. 13 Comparison of load-displacement curves with different positional cases between the simplified laser weld and shell element in the cross-tension test: (a) beam elements; (b) hexahedron elements.

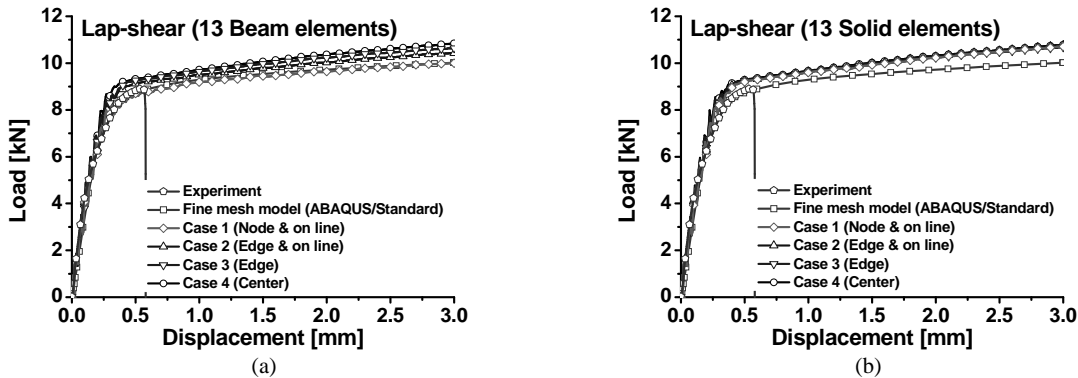


Fig. 14 Comparison of load-displacement curves with different positional cases between the simplified laser weld and shell element in the lap-shear test: (a) beam elements; (b) hexahedron elements.

과 셸요소간의 상대적 위치관계에 의하여 해석결과에 영향을 미친다. 본 논문에서는 Fig. 12와 같이 셸요소와 레이저 용접부의 상대적 위치관계가 해석결과에 미치는 영향을 분석하고, 레이저 용접부 모델링 기법으로 적합한 모델링 기법을 제안하였다. Fig. 13과 Fig. 14의 해석결과로부터 레이저 용접부와 셸요소간의 상대적 위치관계에 의해서 결과의 편차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 레이저 용접부를 육면체 요소를 이용하여 모델링하면 이러한 오차를 줄일 수 있으며, 셸요소와의 위치관계에 의한 민감도가 감소한다는 것을 알 수 있다. 이로부터 레이저 용접부는 육면체 요소로 모델링하는 것이 타당하다.

4. 결론

본 연구를 통하여 레이저 용접부의 단순화 모델링 기법으로 적합한 방법을 제안하였다.

- 1) 다수의 보요소 또는 육면체 요소로 레이저

용접부 단순화 모델링 기법이 적합하다.

- 2) 해석결과는 레이저 용접부를 모델링하는 요소의 수에 둔감하다.
- 3) 단순화 레이저 용접부 모델과 셸요소의 상대적 위치관계에 의하여 해석결과의 편차가 발생하며, 육면체 요소를 이용하여 모델링하는 이러한 편차는 감소한다.

References

- 1) Malcolm, S., Nutwell, E., "Spotweld Failure Prediction using Solid Element Assemblies", 6 th. European. LS-Dyna Users' Conference, Gothenburg, 2007.
- 2) Kuppaswamy, N. Schmidt, R. Seeger, F. Zhang, S., "Finite Element Modeling of Impact Strength of Laser Welds for Automotive Applications", Safety and Security Engineering II, Vol. 94, pp. 375-384, 2007.
- 3) J. W. Ha, "Dynamic Material Properties of the Heat-affected Zone(HAZ) in a Resistance Spot Weld", Master Thesis, KAIST, 2008.