

저항 점 용접의 너깃 형상 및 잔류응력 예측을 위한 유한 요소 모델링

Finite Element Modeling for Prediction of Nugget Shape and Residual Stress in Resistance Spot Welding

김기순*, 장경복*, 강성수**

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계기술연구소

1. 서론

저항 점 용접은 압력을 가한 상태에서 금속의 고유저항열과 금속끼리의 접촉면에서 발생하는 접촉저항열에 의해서 열을 얻고 이로 인하여 금속이 가열 또는 용융하게 되면 가해진 압력에 의하여 접합되도록 하는 과정을 거친다. 따라서, 저항 점 용접은 전기적, 열적, 기계적, 야금학적 인자들의 상호 작용을 포함하는 매우 복잡한 공정이다. 또한, 이러한 인자들은 전체적인 응력의 상태와 용접 너깃의 형성 및 용접 과정 중 최종 너깃의 기하학적 형상에 영향을 미친다. 이러한 저항 점 용접 공정의 수치적인 모델링은 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔는데, 주로 열전달 반응에 초점이 맞추어졌었고 nonlinear thermomechanical coupling은 고려되지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 상용 nonlinear finite element code인 Marc를 이용하여 저항 점 용접 공정을 해석하였다. 해석에서 정확한 해를 얻기 위하여 접촉저항을 고려한 열전달현상을 해석하였으며 재료의 물리적, 기계적 성질은 온도의 함수로서 입력하였다. 또한, 재료의 변형경화 곡선을 입력하여 변형경화 효과를 고려하였다.

본 연구의 결과로서는 용접부 강도에 가장 큰 영향을 미치는 너깃의 형상을 예측하여 실험치와 비교하였으며 저항 점 용접 후에 용접부에 발생하는 잔류응력을 예측하였다.

2. 유한요소 모델링

본 연구에서는 저항 점 용접 공정을 해석하

기 위하여 2차원 축대칭 유한요소 모델을 사용하였으며 유한요소 해석은 상용 비선형 유한요소코드인 Marc를 이용하여 수행하였다. 유한요소 해석은 정확한 온도 분포를 예측하기 위하여 줄 발열(Joule Heating)을 이용하여 과도 열전달 해석(transient thermal transfer analysis)을 수행하였으며 기계적 거동을 커플링 하기 위하여 thermal load를 이용하였다.

2.1 요소형성

열전달 해석을 위한 줄발열에서 가장 큰 영향을 미치는 요소는 저항과 전류이다. 특히, 저항은 고유저항과 접촉저항으로 구성되는데 모재/모재 사이와 전극/모재 사이에서 발생하는 접촉저항을 고려하기 위하여 Surface Element를 사용하였다. 그리고, 전극과 모재는 2차원 축대칭 형태의 Solid Element를 사용하였다. 해석의 단순화를 위해서 1/4모델을 사용하였으며 요소의 총수는 316개이며 절점의 총수는 371개이다. 이러한 해석을 위한 전극과 모재의 치수, 그리고 요소의 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 용접재료

용접하기 위한 전극은 점 용접에서 가장 많이 사용하고 있는 RWMA(Resistance Welding Manufacturers Association) Class II (flat end)를 적용하였으며 모재로는 연강을 적용하였다. Table 1.은 열전달 해석을 위해 사용된 재료의 전기적, 열적 물성치를 나타내었다. 특히, 모재/모재, 전극/모재 사이에서 발생하는 접촉저항은 접촉압력, 온도, 접촉재료의 평균 항복강도에

의해서 결정되는데 Tsai가 계산한 상당접촉저항(equivalent contact resistivity)값을 입력하였다. 상당접촉저항은 White 등에 의해 측정된 접촉저항값을 이용한 실험식으로 계산된 것이다. 전기적, 열적 물성치 중 열전도도, 비열, 고유저항, 접촉저항값은 온도의 함수로 입력하였다. Table 2.는 온도의 함수로 입력된 재료의 기계적 성질을 나타내며 Fig. 2는 재료의 변형경화 효과를 고려하기 위해 입력된 변형경화 곡선을 나타낸다.

2.3 경계조건

해석에서 적용된 경계조건을 Fig. 3에 나타내었다. 열전달 해석을 위한 전기적 경계조건은 전극과 모재의 접촉부 사이의 전압강하를 가정하였으며 전류는 모재의 접촉부를 통해서 흐른다. 반면에, 전극의 측면과 중심을 따라서 흐르는 전류는 없다. 주위온도로의 대류 열전달은 전극과 시편의 측면에서 발생하고 중심을 따라서 일어나지 않으며 냉각채널 안에서의 대류 열전달을 가정하였다. 그리고 응력 해석을 위한 경계조건으로서 요소에 적용되는 압력은 전극의 끝 모양에 의해 적용되며 모재의 접촉부에서의 Y방향의 변위와 중심선에서 반경방향의 변위는 축대칭 조건으로서 구속된다.

2.4 용접조건

용접공정은 squeeze cycle, weld cycle, hold cycle로 구성되며, 해석에서 사용된 용접조건은 Fig. 4에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 5에 용접부의 온도가 가장 높게 나타나는 16cycle에서의 등온선을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 모재의 중심부에서 온도가 가장 높게 나타나며 환상형으로 분포되어 있다. 이것은 모재에서 발생한 열에 의해 전극쪽으로는 빠른 열전도에 의해 온도가 크게 상승하지 못하고 모재 방향으로만 온도가 크게 상승하기 때문이다. Fig. 6은 용접시간에 따른 너깃 형상의 변화를 나타내었다. 그림에서 1482℃의 등온선이상의 온도를 가진 부분이 용접부에서 너깃

을 형성한 부분이다. 시간이 지남에 따라 너깃의 형상은 점점 커지며 weld cycle의 거의 마지막인 16cycle에서 최종의 너깃형상을 나타낸다. Fig. 6(f)에 너깃직경의 예측치와 실험치를 비교하였는데 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 7은 용접부 중심에서의 두께방향의 온도변화를 나타낸다. 그림에서 표시한 (a)부분은 모재의 접촉부에서의 잠열효과로 기인한 thermal arrest를 나타낸다. 그리고 (b)는 전극과 모재의 접촉부 온도변화인데 weld cycle의 초반에는 온도가 상승하다가 온도의 구배가 완만하게 되는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 초반에는 모재와 전극 사이에 발생한 접촉저항에 의해서 온도가 상승하다가 모재의 온도가 점점 상승함에 따라 재료의 고유저항이 커져서 모재의 온도가 크게 상승하고 접촉저항은 소멸하며, 또한, 전극의 열전도가 매우 큼으로 인해서 열이 빠르게 빠져나가기 때문이다.

Fig. 8은 접합면 너깃 중심과 용융지 바깥 경계에서의 용접과정 중의 응력 변화를 나타낸다.

4. 결론

저항 점 용접 공정의 유한요소 해석을 비선형 유한요소 코드로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전극/모재, 모재/모재 사이에 발생하는 접촉저항을 고려하여 열전달 해석을 수행한 결과 실험치와 거의 일치하는 너깃 형상을 얻을 수 있었다.
- 2) 온도에 의한 thermal load를 고려한 응력해석을 수행한 결과 용접의 종료 후 재료에 존재하는 잔류응력을 예측할 수 있었다.

5. 참고문헌

- 1) C.L.TSAI, W.L.DAI, D.W.DICKINSON, J.C.PAPRITAN, Analysis and Development of a Real-Time Control Methodology in Resistance Spot Welding, Welding Journal, 1991(12), pp. 339-351
- 2) H.S.CHO, Y.J.CHO, A Study of the

Thermal Behavior in Resistance Spot Welds, Welding Journal, 1989(6), pp. 236-244

3) C.L.TSAI, O.A.JAMMAL, J.C.PAPRITAN, D.W.DICKINSON, Modeling of Resistance Spot Weld Nugget Growth, Welding Journal, 1992(2), pp. 47-54

4) H.A.NIED, The Finite Element Modeling of the Resistance Spot Welding Process, Welding Journal, 1984(4), pp. 123-132

5) 조상명, 저항용접의 기초원리와 모니터링 결과의 분석, 대한용접학회지, Vol. 15, No. 2, 1997(4), pp. 1-10

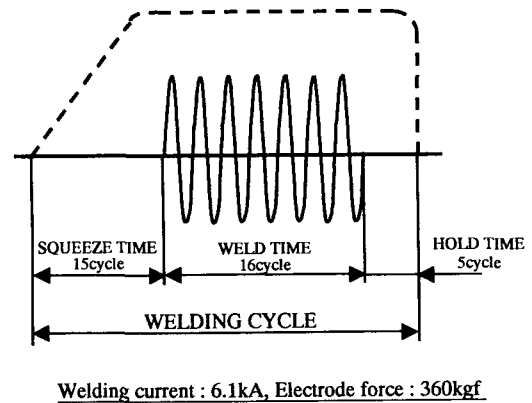


Fig. 4 Welding condition

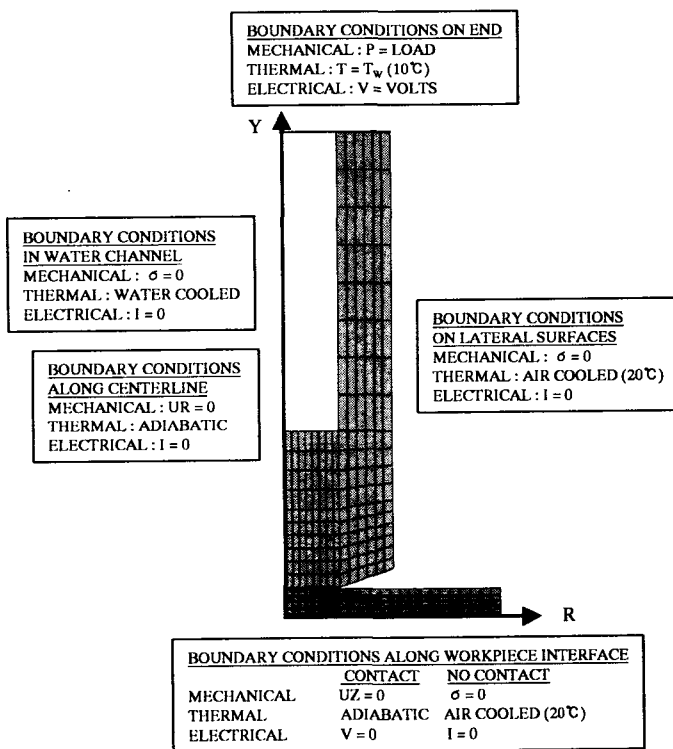


Fig. 3 Boundary condition

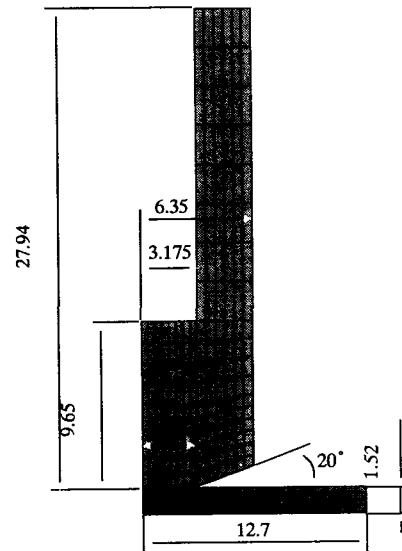


Fig. 1 Electrode and workpiece setup and mesh generation

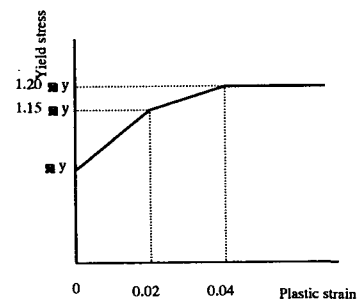


Fig. 2 Strain hardening effect used for mild steel

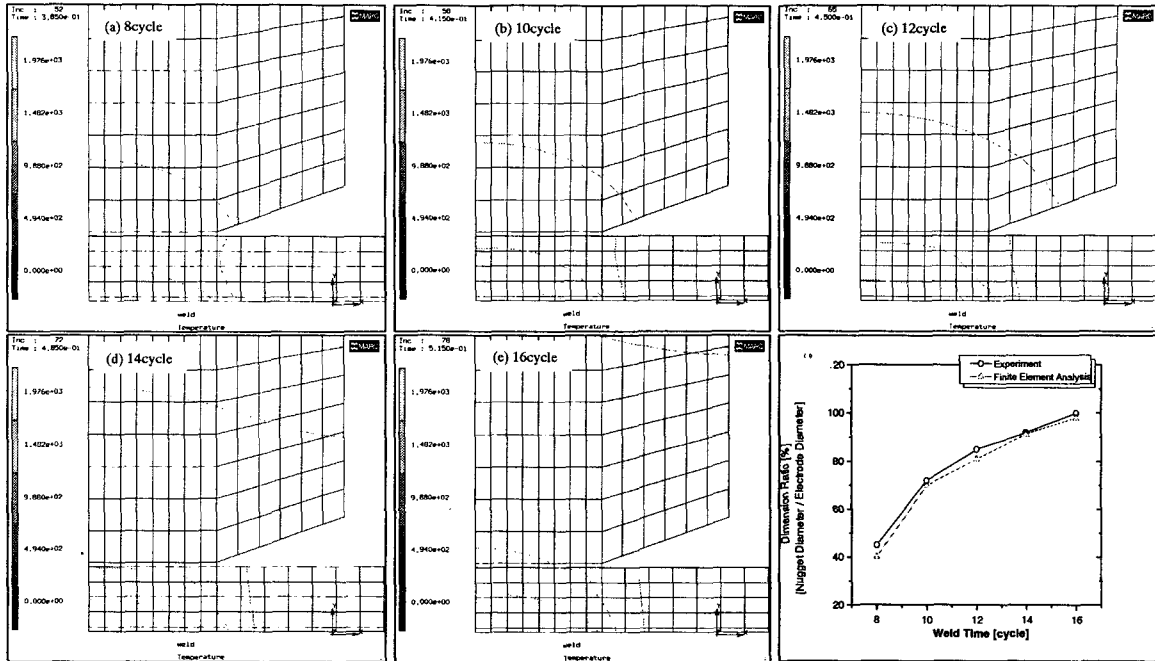


Fig. 6 Variation of weld nugget geometry with weld time

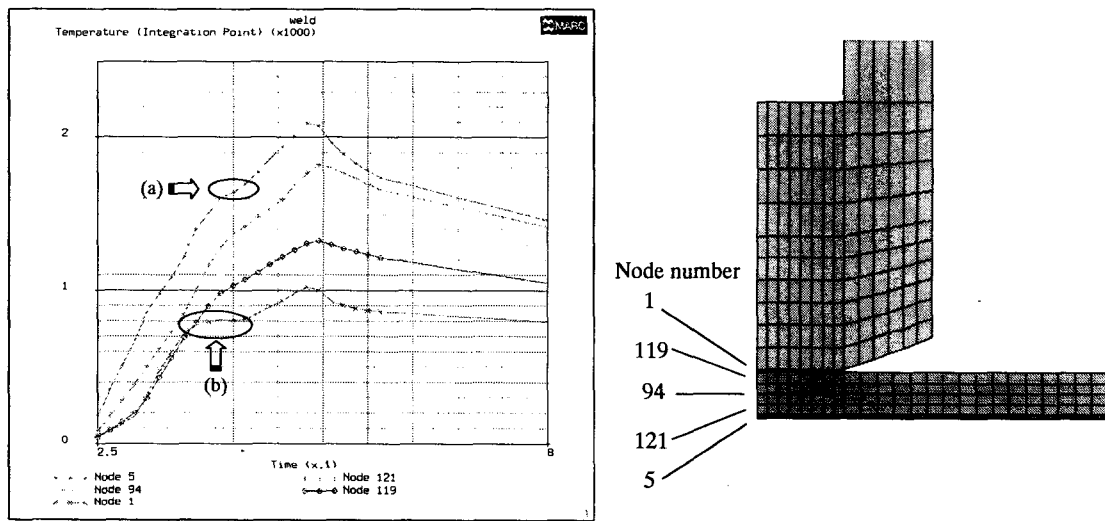


Fig. 7 Predicted temperature through the thickness of workpiece in the center of the weldment during welding