

수치 Simulation에 의한 저항점용접부의 역학적 거동에 관한 연구

A study of the mechanical behavior in resistance spot welding
using numerical simulation

방한서*, 주성민**

* 조선대학교, 선박해양공학과

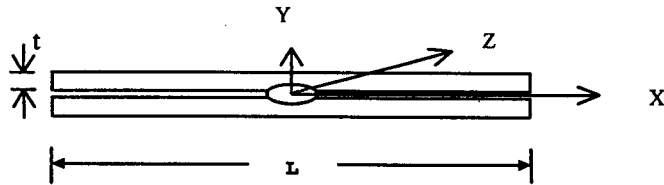
** 조선대학교, 선박해양공학과 대학원

1. 서론

점용접은 발열에 관계하는 인자가 많고, 실험으로 이러한 인자들을 정확히 제어하여 너깃(nugget)생성과정이나 용접부에서의 응력생성과정을 면밀히 계측하여 밝히기에는 곤란한 점이 많으므로 본 연구에서는 일타점 저항점용접부를 모델링하여 유한요소해석을 시도하였다. 점용접부의 유한요소해석을 비롯한 수치해석은 그 대부분이 너깃생성과정분석등의 열전도 해석에 그치고 있으므로, 점용접시의 역학적거동에 대하여 단편적이지 않고 일관되게 해석할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 점용접현상을 시뮬레이션할 수 있는 2차원 열전도 및 열탄소성해석 프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 점용접부의 열전도현상뿐 아니라 응력분포, 변형상태등의 점용접시의 제반 역학적특성을 일관되게 해석하고자 하였다. 해석은 정도 높은 해를 얻을 수 있는 증분법을 이용하였으며, 해석의 전과정에서 재료의 온도변화에 의한 물성치(비저항, 열전도율, 비열, 밀도, 항복응력, 탄성계수, 열팽창계수)변화를 반영하여 계산하였다.

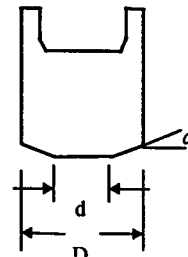
2. 해석모델 및 해석방법

점용접법부의 유한요소해석모델은 Fig.1 및 Fig.2와 같고 재료는 연강(SWS490B)을 사용하였으며 그 화학적조성은 Table.1와 같다. 또한 두께에 따른 점용접조건은 Table.2와 같이 AWS규격을 적용하였으며 가압력은 가압-통전-가압력유지단계까지 크기의 변화가 없도록 하였다.



$L=150\text{ mm}$, $t=1\text{ mm}$

(a) specimen



$d=5.5\text{ mm}$, $D=12.5\text{ mm}$, $\alpha=20^\circ$

(b) electrode

Fig.1 Configuration of spot welded specimen and coordinate

Chemical Composition	C	Mn	Si	P	S	Cu	Al
Base Metal	0.13	1.36	0.35	0.24	0.11	-	0.31

Table 1 Chemical compositions of specimen (SWS490B)

판두께	가압력	용접전류	가압시간	통전시간	유지시간	nugget직경
1mm	220kgf	9,400A	10cycle	10cycle	10cycle	4.8mm

Table 2 Resistance spot welding condition of mild steel plate

점용접은 공통적으로 가압-통전-유지-냉각의 단계를 거치며, 통전시 모재의 저항발열은 온도의 함수이므로 결과적으로 열원은 용접과정중에 일정하지 않고 시간과 거리의 함수가 된다. 따라서 본 해석에서는 미소시간증분마다 통전부의 온도에 따른 비저항을 계산하여 발열량을 계산하였다. 즉 통전요소의 입열량은 $q(r,t) = 0.24 \cdot V_e \cdot i^2 \cdot r(T) \cdot dt$ (cal)로 주어지고 r은 모재의 비저항(resistivity), t는 시간, V_e 는 요소의 체적, T는 온도, i는 전류밀도이다.

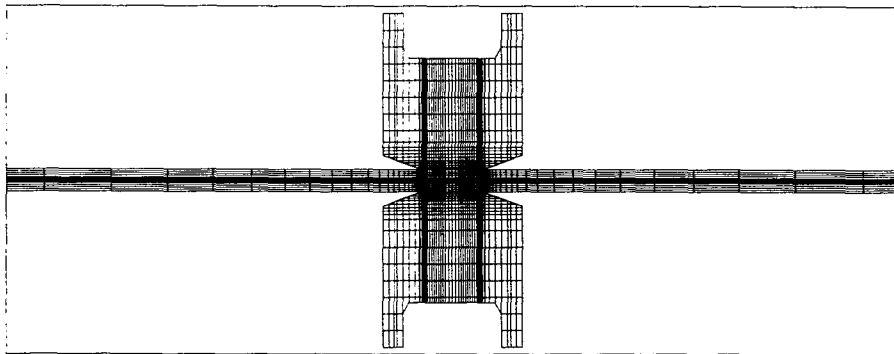


Fig. 2 Finite-element mesh for numerical analysis

3. 해석결과

3.1 온도분포해석결과

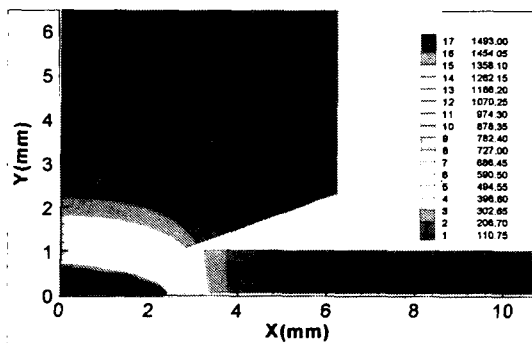


Fig. 3 Temperature fields at 21cycle

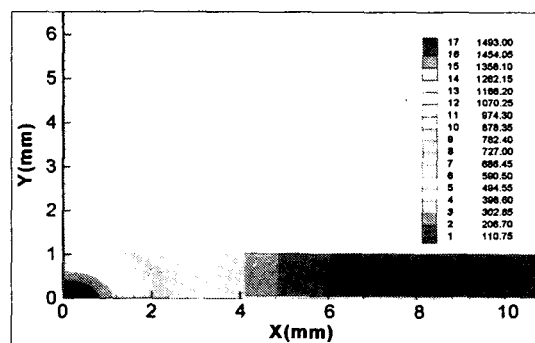


Fig. 4 Temperature fields at 31cycle

Fig. 3은 접용접시작후 21cycle때의 온도분포이다. 20cycle에서 통전은 끝나지만 최대너깃직경은 통전이 끝난후에 21cycle에서 나타났다. 30cycle까지 전극에 의해 가압력이 유지되면서 냉각되다가 가압력 유지단계(holding stage)가 종료된 후, Fig 4.와같은 모습으로 전극이 분리되어 냉각된다. Fig. 3에 비해 Fig. 4에서 10cycle 동안 냉각이 상당히 빠르게 진행됨을 알 수 있으며 열영향부가 매우 작게 나타났다. 또한 용융지부근에서 급격한 온도구배가 있음을 알 수 있다.

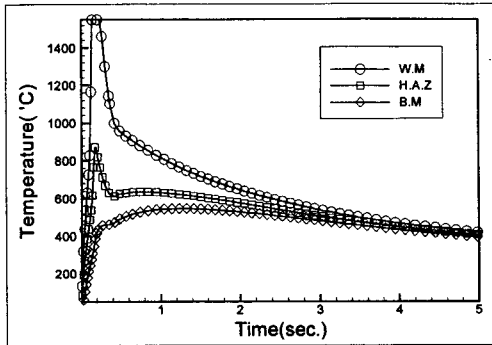


Fig. 5 Temperature history along time

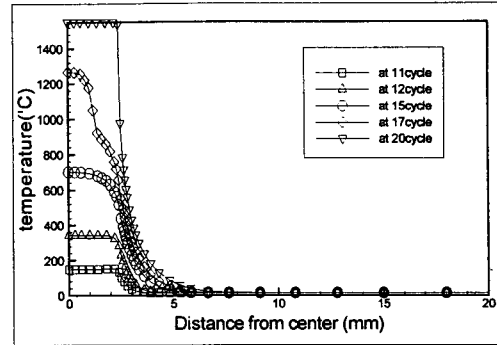
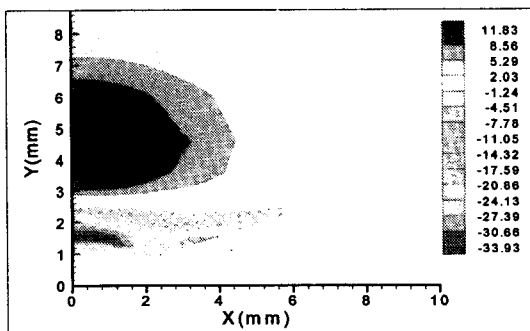


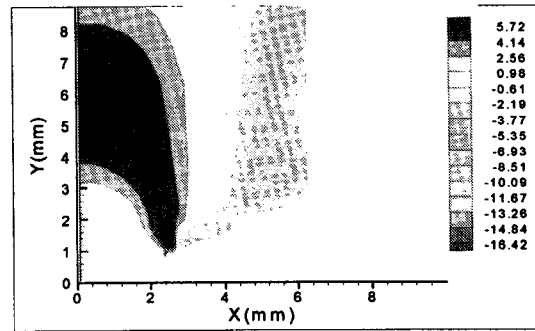
Fig. 6 Temperature distribution along time at 0.05mm surface in y-direction (inner surface)

Fig. 5에서는 용착금속(W.M), 열영향부(H.A.Z.) 그리고 모재(B.M.)요소의 시간경과에 따른 온도값을 각각 중앙으로부터 x방향으로 1.6mm, 2.6mm, 3.2mm에 위치한 요소들의 온도를 추적하여 도시하였으며, 이 구간에서는 대략 5초이후에는 구배가 동일한 상태로 냉각됨을 알 수 있다. Fig. 6 은 통전단계(weld stage)동안 시편의 안쪽표면의 온도분포상태를 도시한 것이며 온도가 급격히 상승하고 구배 또한 매우 큼을 알 수 있다.

3.2 용접응력해석결과



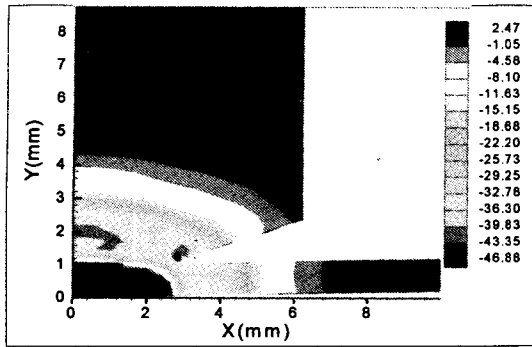
(a) σ_x



(b) σ_y

Fig. 7 Stress fields at 21cycle

열영력문제해석을 위해 열전도해석의 결과를 입력데이터로하고 경계조건으로는 무한판의 구속조건을 부여하기 위해 x방향의 양단을 고정시켜 해석을 수행하였다. Fig.7은 너깃크기가 최대를 보이는 21cycle에서의 응력분포도이며 용융지바깥경계에서 압축응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 너깃부분은 응력이 0에 가까우며 이것은 고온에서 재료의 영율이 0에



(c) σ_z

Fig. 7 Stress fields at 21 cycle

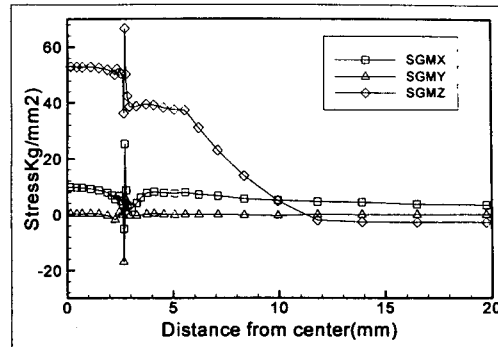


Fig. 8 Residual stress distribution

가깝게 감소하기 때문이며 냉각이 진행되면서 온도가 역학적 용융온도이하로 하강하면 강성을 회복하면서 인장응력이 발생되기 시작한다. Fig. 8은 모재안쪽면의 용접잔류응력분포이며 응력의 최대값이 너깃의주부근에서 발생함을 알 수 있다.

3.3 전단인장하중작용시의 응력해석결과

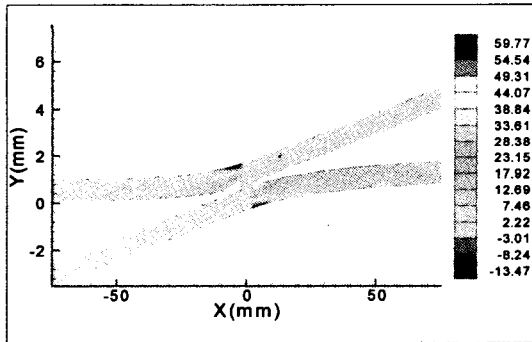


Fig. 9 Stress, σ_x fields and deformed shape under tensile shear load.
(X to Y ratio is 0.1)

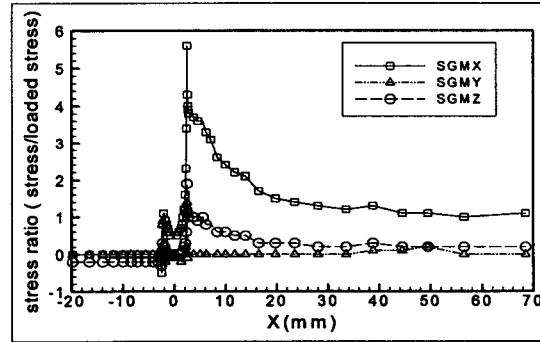


Fig. 10 Stress distribution under tensile shear load
< residual stresses are not considered >

Fig.9는 잔류응력을 고려하지 않은 상태에서 전단인장하중을 가하였을때의 응력장 및 변형된 모습을 보여주는 그림이며 변형량이 미소하므로 y축상의 간격을 x간격의 10배로하여 도시하였다.

Fig.10은 잔류응력을 고려하지 않고 전단-인장하중을 가했을때의 모재안쪽면에서의 응력분포도이며 횡축은 각방향응력과 가해진 응력과의 비로 나타내었다. 응력은 너깃중심부를 기점으로 하중작용쪽이 인장으로, 반대쪽은 압축으로 작용하며 최대값은 하중작용쪽의 너깃의 주부근에서 발생한다. 또한 너깃부에서 멀어짐에 따라 x방향응력비는 1에 가까운 값을 보인다.

Fig.11은 잔류응력을 고려한 상태에서 전단-인장하중을 작용하였을때의 응력분포상태를 도시하였으며, 하중작용쪽의 인장응력의 최대점이 상승하였다. 또한 압축응력쪽의 최대점이 감소하였으며 전체적으로 인장응력이 지배하고 있음을 알 수 있다.

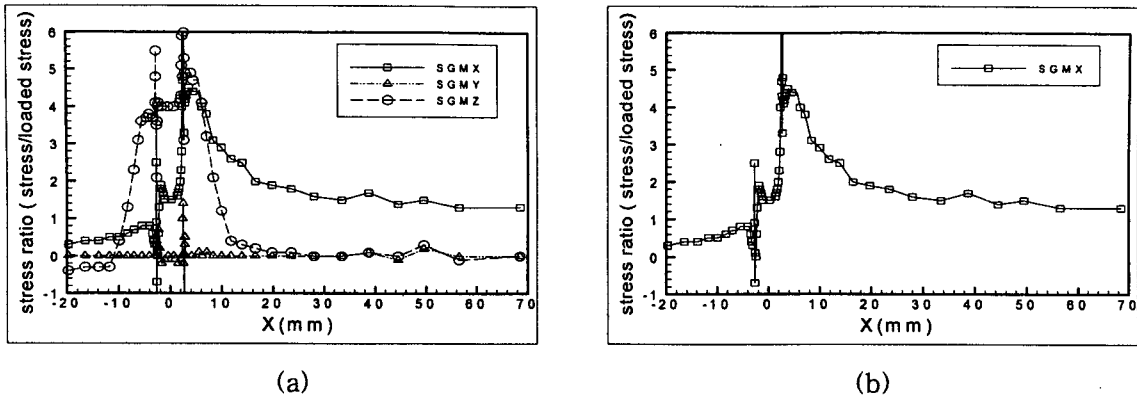


Fig 10. Stress distribution under tensile shear load
< residual stresses are considered >

4. 결론

이상과 같은 점용접부의 열전도 및 응력해석을 한 결과는 다음과 같다.

- 1) 점용접시의 역학적거동을 모의시험할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 이것으로 점용접부의 열전도해석과 열탄소성해석을 용접의 전과정에 대해 해석할 수 있었다.
- 2) 점용접시의 온도상승 및 냉각속도가 매우 빠르며 열영향부도 작다.
- 3) 최대응력은 너깃외주부근에서 발생하였다.
- 4) 전단-인장하중작용시의 응력분포는 잔류응력을 고려하였을때와 잔류응력을 고려하지 않았을 때 모두 최대응력발생지점은 너깃외주부근이며, 단순히 최대값의 변화에만 주목하면 그 차이는 무시해도 무방하다.

5. 참고문헌

- 1) 房漢瑞 : “有限要素法에 의한 薄板熔接의 2次元非定常熱傳導解析”, 大韓造船學會誌, 第27卷 第4號, pp.44~50, 1990.
- 2) 방한서 : “후판용접부의 역학적 특성”. 대한용접학회지, Vol.10, No.4, pp.250~258, 1992. 27卷 第4號, pp.44~50, 1990.
- 3) 失川元基 外1人 : “有限要素法による熱應力・クリープ・熱傳導解析”. (株)サイエンス, 1985.
- 4) 房漢瑞, 金裕哲 : “有限要素法에 의한 厚板熔接時의 3次元 非定常 熱傳導解析”, 大韓熔接學會誌, 9-2(1991), 37-43
- 5) 佐藤, 向井, 豊田 : “溶接工學”, 理工學社(第1版), 1979
- 6) Z. Han, J. Orzoco : “Resistance spot welding: A heat transfer study”, Journal of welding research,(1989), pp.363s-371s
- 7) Bowers, R. J., Sorensen, C. D. and Eagar, T. W. : Electrode geometry in resistance spot welding, Welding Journal,(February 1990), pp. 45s-51s.
- 8) Bae, D. H., Niisawa, J. and Koiso, A. : “On stress distribution and Fatigue Strength of single Elliptical spot-welded lap joint under Tension-shear load”, JSAW Review Vol.9, No.4 (October 1988), pp. 86-91
- 9) 澤井善三郎 : “抵抗熔接”, 株式會社 産報 (第8版), 1973