

유한요소법에 의한 저항 점용접부의 역학적 특성에 관한 연구

방한서* · 주성민** · 방희선** · 차용훈*** · 최병기****

A Study on the Mechanical Behavior of Resistance Spot Welding by Finite Element Method

H. S. Bang*, S. M. Joo**, H. S. Bang**, Y. H. Cha*** and B. K. Choi****

Key Words : Resistance spot welding(저항점용접), Finite element method(유한요소법), Heat conduction(열전도), Thermal elasto-plastic analysis(열탄소성해석), Welding residual stresses(용접잔류응력)

Abstract

Resistance spot welding process is completed in very short time and there are many factors affecting on the generation of heat. It is difficult to control these experimental factors and monitor distributions of the temperature and stresses in the experimental analysis case. And too much time and expense are required for the experimental trials to find proper welding condition. So numerical analyses have been attempted steadily, but most numerical analyses on the resistance spot welding are mainly focused on thermal behavior.

Therefore, in this paper, the numerical analysis of mechanical behavior as well as heat conduction is carried out for the spot welding process.

For this numerical analysis, axial symmetric computer program for the spot welding analysis by F.E.M. has been developed considering heat conduction and thermal elastic-plastic theory. Material properties depending on temperature such as density, heat conductivity, heat expansion coefficient, specific heat, yield stress, elastic modulus, and specific resistance are considered.

Using the results of temperature distribution obtained from heat conduction analysis, the thermal elastic-plastic analysis is carried out to clarify mechanical behavior of spot welded specimen.

In order to evaluate the effect of residual stresses, numerical analyses are carried out under tension-shear load in two cases respectively : one with residual stress, the other without residual stresses.

※ 1999년 6월 26일 접수

* 정회원, 조선대학교 선박해양공학과

** 학생회원, 조선대학교 대학원 기계공학과

*** 정회원, 조선대학교 기계공학부

**** 비회원, 조선대학교 기계공학부

방희선 : heeyungi@hanmail.net

1. 서 론

저항 점용접(resistance spot welding)은 자동화가 용이한 저항용접의 대표적인 용접법으로, 피용접물을 접친후 전극부로 가압한 후에 대단위의 전류를 짧은 시간에 통전시켜 이때 발생된 저항발열에 의해 접합하게 된다. 점용접은 발열에 변수로 작용하는 인자가 많고, 실험으로 이러한 인자들을 정확히 제어하여 너깃(nugget) 생성과정이나 용접부에서의 응력생성 과정을 면밀히 계측하여 밝히기에는 곤란한 점이 많다. 그러므로 점용접부 해석시 유한요소법을 비롯한 수치해석적 방법이 사용되나 그 대부분이 너깃생성과정 분석 등의 열전도해석에 그치고 있으므로, 점용접시의 역학적거동에 대하여 단편적이지 않고 일관된 해석이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 일타점 저항 점용접부를 모델링하여 유한요소해석(Finite Element Anaysis)을 시도하였는데, 먼저 열전도 및 열탄소성해석 이론을 정식화 한 후에 점용접현상을 시뮬레이션할 수 있는 축대칭(axial symmetric)해석 프로그램을 개인용컴퓨터 및 워크스테이션 환경에서 구동 될 수 있도록 개발하고, 이를 이용하여 점용접부의 열전도현상뿐 아니라 응력분포, 변형상태 등의 점용접시의 제반 역학적 특성을 일관되게 해석하고자 하였다. 해석은 정도(精度) 높은 해를 얻을 수 있는 증분법을 이용하였으며, 해석의 전과정에서 재료의 온도변화에 의한 물성치(비저항, 열전도율, 비열, 밀도, 항복응력, 탄성계수, 열팽창계수)변화를 반영하여 계산하였다.

2. F.E.M.에 의한 열전도 및 열탄소성 해석 이론 정식화

2.1 열전도 해석의 이론의 정식화

축대칭체의 非定常 熱傳導 支配基礎方程式은 다음과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\gamma} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \gamma \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \gamma \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} + Q \quad (1)$$

재료를 등방성이라 하면 열전도율은 $\lambda_y = \lambda_z = \lambda$ (정수)이므로 식(1)은 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\gamma} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \gamma \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \gamma \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} + Q \quad (2)$$

c : 비열(cal/g °C), T : 온도(°C), ρ : 밀도(g/cm³), t : 시간(sec), Q : 단위 시간당 입열량, r : 반경방향

식(2)을 Green-Gauss정리를 이용하여 부분적분한 후 Fourier법칙의 경계조건을 대입하여 Matrix화하면 다음과 같다.

$$\Sigma [K] \{\theta\} + \Sigma [C] \frac{\partial \theta}{\partial t} = \Sigma \{F\} \quad (3)$$

$\{\theta\}$: 온도의 함수, $[K]$: 열전도 Matrix, $[C]$: 열용량 Matrix, $\{F\}$: 열유속 Vector

2.2 열탄소성 이론적 정식화

용접응력해석을 위하여 재료는 등방성임을 가정하였고, 탄성 및 소성 전 영역에서 재료의 기계적 성질(항복응력, 탄성계수, 열팽창계수, 비저항)의 온도 의존성을 고려하였다.

소성역에서는 항복조건으로 선형등방경화법칙을 고려한 폰-미세스(Von-Mises)의 조건을 사용하였다.

전변형률(ϵ)는 탄성 변형률(ϵ')와 열변형률(ϵ'')의 합

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon'\} + \{\epsilon''\} \quad (4)$$

가 되고, 여기서 $\{\alpha\}T$: ϵ'' : 열변형률(thermal strain) 응력과 변형률은 훅의 법칙(Hook's law)으로부터 쓸수있다.

$$\{\sigma\} = [D^*] + \{\epsilon'\} \quad (5)$$

여기서, $[D^*]$: 탄성 응력-변형률 매트릭스

또, 식(5)에 식(4)를 대입하면

$$\{\sigma\} = [D^*] (\{\epsilon\} - \{\epsilon''\}) \quad (6)$$

이때, 재료의 역학적 성질의 온도의존성을 고려하여, 응력증분의 영향을 $[C]dT$ 라고 하고, 증분형으로 쓰면

$$d\{\sigma\} = [D^*] (d\{\epsilon\} - [C]dT) \quad (7)$$

재료가 탄성거동을 하는 경우에는 식(4)와(5)을 이용하여 증분형으로 쓰면

$$d\{\epsilon\} = d\{\epsilon'\} + d\{\epsilon''\} \quad (8)$$

$$d\{\sigma\} = [D^*] + d\{\epsilon'\} \quad (9)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 탄성변형률 $\{\epsilon\}$ 는 응력 $\{\sigma\}$ 및 온도 T 의 함수이므로, 탄성변형률의 증분은

$$\{d\epsilon\} = [D]^{-1} \{d\sigma\} + \frac{\partial [D]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} dT \quad (10)$$

$$\{d\epsilon\} = [D]^{-1} \{d\sigma\} + \frac{\partial [D]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} dT + \{\alpha\} dT \quad (11)$$

탄성역에서의 응력증분에 대한 구성방정식은 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D'] \{d\epsilon\} - [C] dT \quad (12)$$

그리고 소성상태에서의 전변형률 증분 $\{d\epsilon\}$ 은 탄·소성 및 열변형률의 $\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} + \{d\epsilon^t\}$ 합이며, 소성역에서의 응력증분에 대한 구성식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D'] \{d\epsilon\} - [D'] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \lambda - [D'] \{\alpha\} dT + \frac{[D']}{dT} [D']^{-1} \{d\sigma\} dT \quad (13)$$

여기서, $\frac{\partial f}{\partial \sigma}$: 편차응력, λ : 양(+)·스칼라량
용접에 의한 열응력 해석에서는 각 요소에 관한 평형 방정식은 다음과 같다.

$$\Sigma [K] \{dU_i\} - \Sigma \{dL_i\} = \Sigma \{dF_i\} \quad (14)$$

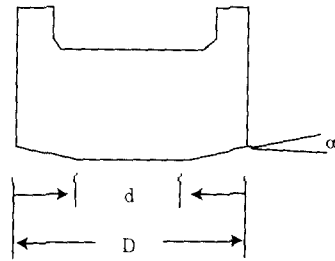
여기서, $\{dU_i\}$: 변위벡터, $\{dL_i\}$: 열에 의한 등가 절점력 이상과 같이 연구를 위하여 수행한 수치 시뮬레이션의 용접 잔류응력은 식(14)에 의거하여 해석하였다.

3. 해석모델 및 해석방법

점용접부의 유한요소해석모델은 Fig. 1 및 Fig. 2와 같고,

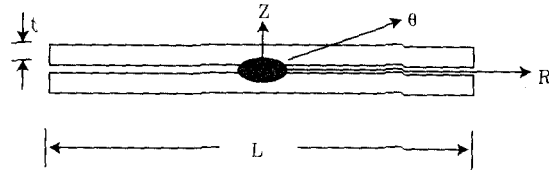
재료의 화학적조성은 Table 1.과 같다. 용접은 두께 1mm의 박판 두장을 겹쳐서 10cycle의 가압단계 (squeeze stage) 후에 10cycle동안 통전(weld stage) 하였으며, 통전이 끝난후에 10cycle동안 가압력을 유지(hold stage)한 후에 전극은 시편에서 분리되어 실온까지 온도가 냉각되게 하였다.

가압력은 가압을 개시하고나서 30cycle동안 일정하게 하였으며 Table 2.에 AWS규격을 적용한 용접조건을 나타내었다.



d=5.5mm, D=12.5mm, α=20°

(a) electrode



L=150mm, t=1mm

(b) specimen

Fig. 1 Configuration of spot welded specimen and coordinate

Table 1 Chemical compositions of specimen (SWS490B)

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

Table 2 Resistance spot welding condition of mild steel plate

Plate thickness	Electrode force	Welding current	Squeeze time	Weld time	Hold time	Nugget dia.
1mm	220kgf	9,400A	10cycle	10cycle	10cycle	4.8mm

저항 점용접은 공통적으로 가압-통전-유지-냉각의 단계를 거치게 되며, 가압과 유지 및 냉각단계에서는 발열이 일어나지 않고, 용접에 필요한 발열은 가압단계 종료직후인 통전시에 발생하게 된다. 통전시 발열에 관계하는 모재의 비저항은 온도의 함수이므로, 결과적으로 열원은 통전과정중에 일정하지 않고 시간과 거리의 함수가 된다. 따라서 본 해석에는 통전단계에서 프로그램 해석시의 미소 시간증분마다 통전부 요소들의 온도를 계산한 후, 그에 따른 비저항 $R(T) = R_0(1 + \alpha T)$ 을 계산하여 발열량을 계산하였다.

여기서 R_0 : 상온에서의 비저항, α : 저항의 온도계수 즉 통전요소의 입열량은 $q(x,t) = 0.24 \cdot V_e \cdot i^2 \cdot R(T) \cdot dt$ (cal)로 주어지고 V_e : 요소의 체적, i : 전류 밀도(current density), R : 모재의 비저항(resistivity), T : 온도, t : 시간,

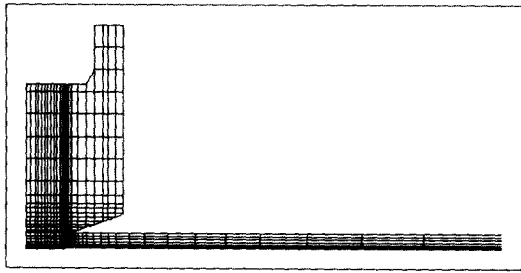


Fig. 2 Finite-element mesh for numerical analysis

점용접부의 유한요소해석을 위해 Fig. 2와 같이 점용접되는 시편의 단면을 모델링하였으며 해석시 물리량(온도, 응력 등)의 구배가 큰 곳은 요소분할을 세분화하였다.

4. 해석 결과

4.1 온도분포 해석결과

Fig. 3은 점용접 시작후 21cycle때의 온도분포도이다. 용접단계에서 발열은 점차 증가하다가 더욱 가속화되고 20cycle에서 통전은 끝나지만 최대 너깃직경은 통전이 끝난직후인 21cycle에서 나타났다. 이는 온도가 상승함에 따라 모재의 비저항이 증가하여 결과적으로 저항발열이 증가되는 요인이 크다고 생각된다.

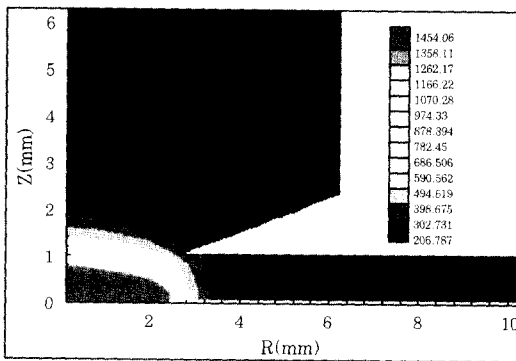


Fig. 3 Temperature(°C) fields at 21cycles

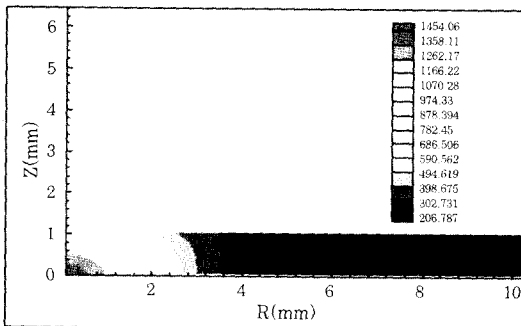


Fig.4 Temperature(°C) fields at 31cycles

30cycle까지 전극에 의해 가압력이 유지되면서 냉각되다가 가압력 유지단계가 종료된 후, Fig. 4와 같은 모습으로 전극이 분리되어 냉각된다. Fig. 3에서 Fig. 4까지 10cycle이라는 짧은 시간이 경과하는 동안에도 냉각이 상당히 빠르게 진행되며 열영향부가 매우 작은 범위로 나타났다. 또한 용융지부근에서 보통의 아크용접시보다 급격한 온도구배가 형성됨을 알 수 있는데 이는 저항 점용접 경우 대단위의 전류를 짧은 시간에 통전시켜 접합함에 기인된다고 사료된다.

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, 열은 중심부의 고온에서 바깥면쪽으로 시간의 경과와 함께 전도되므로 이 구간에서는 대략 3초 이후에는 구배가 동일한 상태로 냉각됨을 알 수 있다.

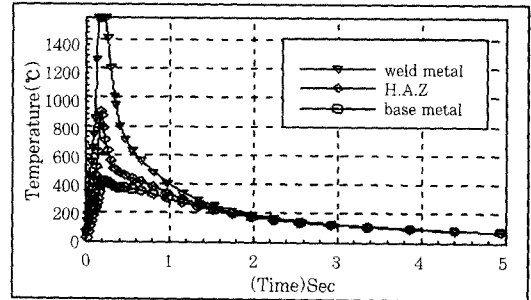


Fig. 5 Temperature history with time

Fig. 6은 통전단계(weld stage)동안 시편의 안쪽 표면의 온도분포상태를 도시한 것이며, 시간이 경과함에 따라 중심부에서 온도가 상승하며 특히 17cycle이후에는 온도가 높은 중심부와 상대적으로 낮은 바로 바깥 부분과의 발열이 차이가 두드러지게 보이는데, 이것은 발열량과 모재 및 전극으로의 열전달량과의 차가 중심부가 상대적으로 적게 되어 중심부의 온도는 다소 높아지게 되고, 더욱이 이 온도차로 인해 중심부의 비저항이 증가되어 그 부분에서의 발열을 더욱 크게 하기 때문이라고 사료된다. 기존의 온도 분포 해석결과¹⁰⁾와

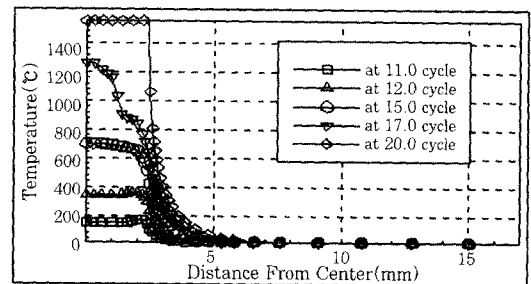
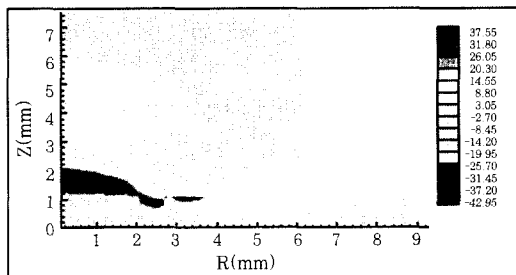


Fig. 6 Temperature distribution with time at 0.05mm

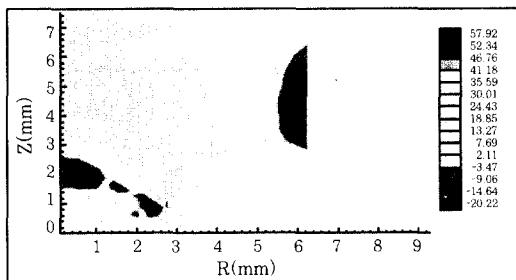
비교해볼 때 같은 양상을 띄고 있음을 알 수 있다.

4.2 용접응력 해석결과

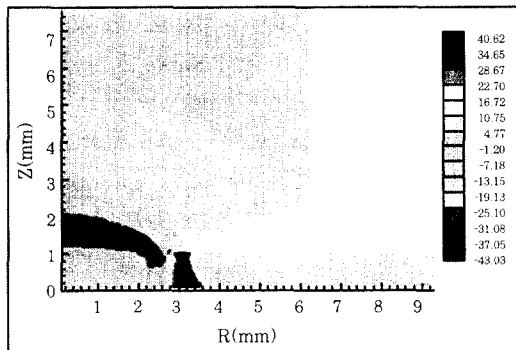
열전도해석 전 과정의 결과를 입력데이터로 하여 열응력문제 해석을 수행하였다. Fig. 7은 너깃크기가 최대를 보이는 21cycle에서의 응력분포도이며 너깃 바깥 경계에서 압축응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 너깃부분은 응력이 0에 가까운데 이는 발열부의 온도 증가에 따라 재료의 탄성계수 즉, 시편의 강성이 저하되고 온도가 역학적 용융온도를 넘게됨을 뜻하며 역학적 용융온도 이상임을 알 수 있다. 또한 냉각이 진행되면서 온도가 역학적 용융온도이하로 하강하면 그에 따라 강성을 점차 회복하면서 중심부의 온도 하강과 함께 수축하려는 경향에 대해 주위의 모재에서 구속력으로 작용하여 인장응력이 점점 발달하게 된다. Fig. 8은 모재 안쪽면의 용접잔류응력 분포도이며 너깃 중심부에서



(a) σ_r



(a) σ_z



(c) σ_θ

Fig. 7 Stress fields at 21cycle

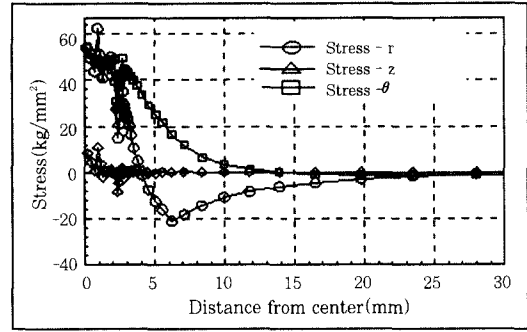


Fig. 8 Residual stress distribution

그 바깥으로 인장응력이 잔류하고 있음을 알 수 있다.

4.3 전단인장하중 작용시의 응력해석 결과

Fig. 10은 잔류응력을 고려하지 않은 상태에서 전단인장하중 10Kgf/mm²을 Fig. 9와 같이 가하였을 때의 응력장 및 변형된 시편의 모습을 보여주는 그림이며 변형량이 미소하므로 y축상의 간격을 x간격의 10 배로 하여 도시하였다

Fig. 11은 잔류응력을 고려하지 않고 단지 전단-인장하중만을 모재 한쪽 끝 부분에 가했을 때의 모재 안쪽면에서의 응력분포도이며 횡축은 각 방향응력과 가해진 응력과의 비로 무차원화하였다. 응력은 너깃중심부를 기점으로 하중작용쪽이 인장으로, 반대쪽은 압축으로 작용하며 모든 응력성분에 있어서 최대값은 하중작용쪽의 너깃외주 부근에서 발생한다. 또한 너깃부에서 멀어짐에 따라 x방향 응력비는 1에 가까운 값을 보인다.

Fig. 12은 잔류응력을 고려한 상태에서 전단-인장하중을 작용하였을 때의 응력분포 상태를 도시하였다.

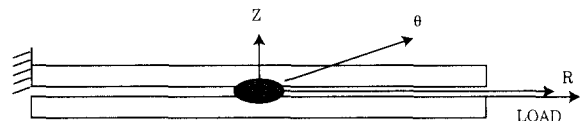


Fig. 9 loading condition of spot welded specimen

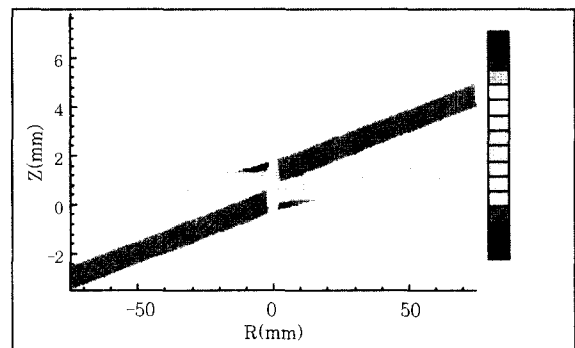


Fig. 10 Stress(σ_r) fields and deformed shape under tensile shear load

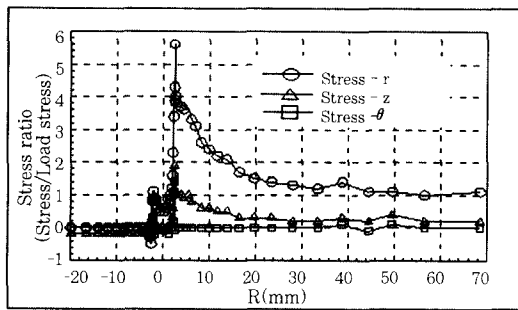
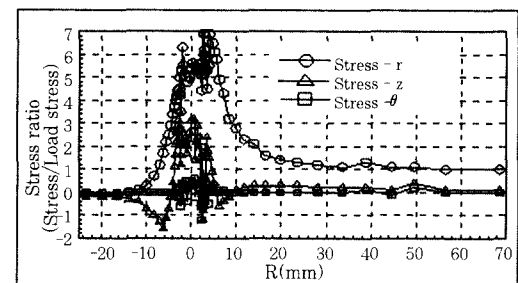
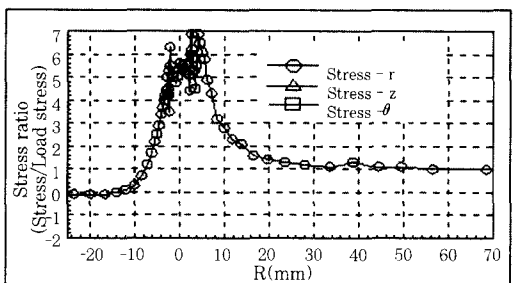


Fig. 11 Stress distribution under tensile shear load (X to Y ratio is 0.1)
(residual stresses are not considered)

하중작용쪽의 인장응력의 최대점은 잔류응력의 인장성분이 고려되므로 상승하며 또한 압축응력쪽의 최대점의 경우 잔류응력의 인장성분이 고려되어 감소하여 전체적으로 인장응력이 지배하게 된다.



(a)



(b)

Fig 12. Stress distribution under tensile shear load
(residual stresses are considered)

5. 결 론

이상과 같은 점용접부의 열전도 및 응력해석을 한 결과의 다음과 같다.

- 1) 점용접시의 역학적 거동을 모의 시험할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 이것으로 점용접부의 열전도 해석과 열탄소성 해석을 용접의 전과정에 대해 해석할 수 있었다.
- 2) 점용접시의 온도상승 및 냉각속도가 매우 빠르며 열영향부의 범위가 매우 적게 나타났다.
- 3) 최대응력은 인장으로 너깃부를 포함한 중심부에서

발생하였다.

4) 전단-인장하중작용시의 응력분포는 잔류응력을 고려하였을 때와 잔류응력을 고려하지 않았을 때 모두 최대응력 발생지점은 너깃외주부근이며, 단순히 최대값의 변화에만 주목하면 그 차이는 무시해도 무방하다. 참고문헌¹⁰⁾과 비교해볼 때 열전도 분포가 같은 양상을 가지며, 또한 기 발표된 참고문헌의^{1,2,4)}의 검증된 프로그램을 토대로 열전도, 열탄소성 해석을 수행하였고, 본 연구는 1단계로 저항 점용접부 역학적 거동의 수치 해석용 프로그램을 개발하였으며, 차후 실험을 수행할 예정입니다.

후 기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 지역협력 연구센터인 조선대학교 수송기계부품자동화 연구센터 지원으로 수행되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

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, (1990) pp.44~50
2. 방한서 : "후판용접부의 역학적 특성", 대한용접학회지, Vol.10, No.4, pp.250~258, 1992. 27卷 第4號, (1990) pp.44~50
3. 矢川元基 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
10. H. Hur and W.J.Kang : "Electrothermal Analysis of Electro resistance Spot welding Processes by a 3-D F.E.M.", Journal of Materials processing Technology 63(1997)