

研 究 論 文

大韓熔接學會誌  
第9卷第3號 1991年 9月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol.9, No.3, Sep., 1991

## 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 저항용접에 관한 연구

함 원 국\*

### A Study on the Stress Distribution and Nugget Formation in Resistance Welding Process Using Computer Simulation

W. K. Ham\*

**Key Words :** Thermomechanical Coupling(열 — 기계적 접합), Resistance Spot Welding (저항점용접), Welding Process(용접과정 또는 용접공정) Weld Nugget(용접 너겟), ANSYS Commercial Package(ANSYS 상용 프로그램 패키지), Squeeze, Weld, Hold Stage(가압, 통전, 냉각 단계)

#### Abstract

The thermomechanical coupling phenomena in the resistance welding process is complicated due to interactions of mechanical, thermal and electrical factors.

Although experimental investigations of resistance spot welding have been carried out, but there are a few by computer simulation. so the purpose of this research is to decrease the time and cost much required in experimental investigation by carrying out the analysis of the resistance spot welding process through computer simulation based on the finite element method.

The tool used in the computer simulation is the commercial ANSYS program package. A two dimensional axisymmetric model is used to simulate the resistance spot welding for two stainless steel sheets of equal thickness and parametric study is carried out for variable welding current, workpieces of unequal thickness and dissimilar materials.

The results from the computer simulation are in good agreement with the experimental one. Through these results, such items as stress distribution, temperature profiles, thermal expansion and weld nugget formation are predicted.

Reliability and applicability of finite element models have been demonstrated to simulate and to analyze the resistance spot welding process.

\* 정희원, 울산대학교 조선 및 해양공학과

## 1. 서 론

### 1.1. 연구의 필요성

저항점용접에 있어서의 열-기계적 접합은 역학적이거나 전기적, 열적 및 금속학적인 인자들을 포함하는 복잡한 현상이다. 이 인자들은 전체적으로 응력의 상태와 용접 너겟의 형성 및 용접과정중 최종 너겟의 기하학적 형상에 영향을 끼친다. 물론 저항점용접에 있어서 응력분포와 너겟 형성을 해석하는데 실험적 방법이 사용될 수 있다. 하지만 실험적 방법으로는 포함된 많은 인자들을 쉽게 이해하기 어려울 뿐 아니라 관련된 과정의 복잡한 거동을 정확하게 예측하기 어렵다. 더 나아가 실험적인 방법은 종종 많은 시간과 비용을 요구한다.

저항용접과정을 해석하는데 적절한 수학적인 모델이 사용될 수 있으며 물리적 법칙에 따른 용접과정을 시뮬레이션 하기위하여 유한요소법을 적용, 해석코자 하였다.

유한차분법과 유한요소법의 적용은 정적인 경우와 동적인 경우는 물론 선형 및 비선형의 문제를 해결하는 강력한 도구임이 증명되어 왔다. 그러므로 저항 점용접의 용접 과정을 시뮬레이션하기 위하여는 용접 과정에 대한 열-기계적 접합 거동의 해석은 물론 응력 분포 및 너겟의 성장에 대한 연구에 사용될 수 있는 수치적인 모델이 요구된다.

### 1.2. 연구의 배경

저항점용접의 시뮬레이션에 관심이 있었음에도 불구하고, 초기 수학적인 모델은 많은 인자가 관련된 복잡성 때문에 용접과정의 만족한 해석을 얻는 것이 불가능하였고, 수학적이며 이론적 모델을 통한 이들 대부분의 시도는 열-기계적 응답을 무시하는 반면 주로 열전달 문제나 가시적 현상만을 다루는 쪽으로 치우쳤다.

1958년 Bowden과 Williamson<sup>1)</sup>은 전도체 간의 전류의 흐름으로 인한 접촉저항의 이론적 거동에 대해 보고한 바 있고, 그 뒤 Greenwood와 Williamson<sup>2)</sup>은 접촉중인 반무한체 사이에서 작은 점점 중위에 분포한 전류치를 결정하기 위해서 실험적이며 이론적 연구를 실행했다.

1960년에 Archer<sup>3)</sup>는 용접과정의 제어관점에서 점

용접에 있어서의 온도응답의 수치적인 연구결과를 발표했다.

1961년 Greenwood<sup>4)</sup>는 저항점용접 과정을 시뮬레이션하기 위하여 유한차분법을 사용한 최초의 열전달 모델을 소개했고, 그 뒤에 Greenwood와 Bently<sup>5)</sup>는 연강 시편에서 점용접이 진행되는 동안 서로 다른 용접 시간대에서의 온도분포에 따른 접촉저항의 영향을 이론적이며 실험적으로 연구했다.

1967년 Rice와 Funk<sup>6)</sup>는 합성재료의 저항점용접중 온도분포를 해석적으로 조사했으며 전용접 시간대에 걸쳐 접촉저항의 영향을 온도분포에 결부시켰다.

1977년 Houchens<sup>7)</sup>는 연강 박판간의 저항점용접중 열응답과 용접 너겟의 용입깊이를 조사하기 위하여 저항점용접 과정의 시뮬레이션을 가능케할 유한차분법을 사용한 두개의 해석모델을 개발했다.

최초로 Gould<sup>8)</sup>는 세 개의 두께가 서로다른 연강 박판을 사용하여 점용접중의 실험적 및 해석적인 기법을 사용하여 용접 너겟의 진전과정을 조사한 바 있다.

1984년에 Nied<sup>9)</sup>는 열-기계적인 관점이 고려된 저항점용접 과정을 시뮬레이션할 수 있는 유한요소 모델을 개발하였음을 보고했다. 축대칭 모델은 전극과 시편의 형상은 물론 온도변화에 따른 재료의 특성, 용융 및 '줄'열등이 고려되어 있다. 하지만 접촉저항과 열-기계적 접합은 명확하게 설명되어 있지는 않다.

### 1.3. 연구목적과 범위

앞에 설명된바와 같이 이론적이며 실험적인 방법으로 저항용접 과정을 해석하는대는 방대한 노력과 시간, 비용이 필요하며 용접과정의 관련된 인자들에 대한 만족한 결과를 얻는데 어려움이 있어 본 논문에서는 장시간에 걸친 해석 프로그램을 작성하는 노력을 지양하고 시중에 다양하게 소개된 상용 프로그램 패키지를 이용하여 저항용접과정을 시뮬레이션하고 모델링하는데 사용하였다. ANSYS Package도 이들중의 하나이다. 열-탄소성 해석방법으로는 초기강성법, 절선강성법, 단계법 및 고우변형도법 등이 있으나 본 논문에서 사용된 ANSYS Package에서 사용한 방법은 수정절선강성법(Modified Tangential Stiffness Method)이며 이 방법의 채택은 수렴속도가 빠르고 (경험에 의하면)문제의 성격에 따라 적합하게 해법의 조정이 가능하기 때문이다. 대부분의 상용 패키지자가 그러하듯이 ANSYS Package도 3단계 구조 즉

Preprocessing, Solution, Postprocessing으로 되어 있어 순간순간의 응력의 분포와 온도의 분포 및 용접 너겟의 성장등의 가시적 관찰이 가능하다.

Parametric Study에서 자세히 논의 되겠으나 시편으로는 스테인레스강 347, 0.04인치(1.0mm)박판과 판 두께가 서로 다른경우 그리고 탄소강 1045와 같은 두께의 스테인레스강 347의 경우, 너겟의 성장 과정을 검토하여 가장 적합한 용접을 얻을 수 있는 통전시간과 가압의 정도 및 용접으로인한 변형등을 살펴보고자 한다.

## 2. 모델의 개발과 용접과정의 시뮬레이션

### 2.1. 모델의 개발

여기서는 용접과정에서의 중요한 인자들을 다루고 실제적인 접근에 있어서의 이들의 영향이 시뮬레이션 되는 모델화 과정이 논의될 것이다.

전극과 시편에 대한 2차원 축대칭 모델을 개발하는데 유한요소법을 사용했으며 이들에 대한 유효한 경계조건이 고려되었다. 또한 내부의 '줄'열과 용융 잠열은 물론 온도에 따른 재료의 물성치(Young 계수, Poisson's ratio, 열전도계수, 열팽창계수, 탄성한도, 소성경화지수 등)도 고려되었다. 특히 ANSYS Package를 택한 것은 온도의 변화에따른 이러한 재료의 물성치를 편리하게 고려할 수 있도록 되어있기 때문이다. (Appendix A참조)

시중에는 유한요소해석법을 사용하는 서로다른 많은 컴퓨터 프로그램이 있으나 여기에서는 저항점용접 과정을 모델화하고 해석을 수행하는 데 상용ANSYS 프로그램이 이용되었다. ANSYS프로그램은 Swanson Analysis System Inc.에서 개발한 범용성 유한요소 프로그램이다. 더 자세한 점들에 대하여는 ANSYS Version 4.4의 User's Manual을 참조할 수 있다.

Fig. 1에서 음영된 부분은 상하 서로 같은 형상의 전극과 같은 두께의 시편을 2차원 축대칭 모델로 형상을 단순화한 것이다. 단순화된 도형은 재료의 표면과 내부에 있는 절점을 갖는 요소들의 배열로 대체하였다.

Fig. 2에는 요소들로 대체된 축대칭의 모델을 나타 낸 것이다. 이 모델에서는 열-기계적 정식화를 위하여 서로 다른 세 가지의 요소들이 고려된다. 이들 요

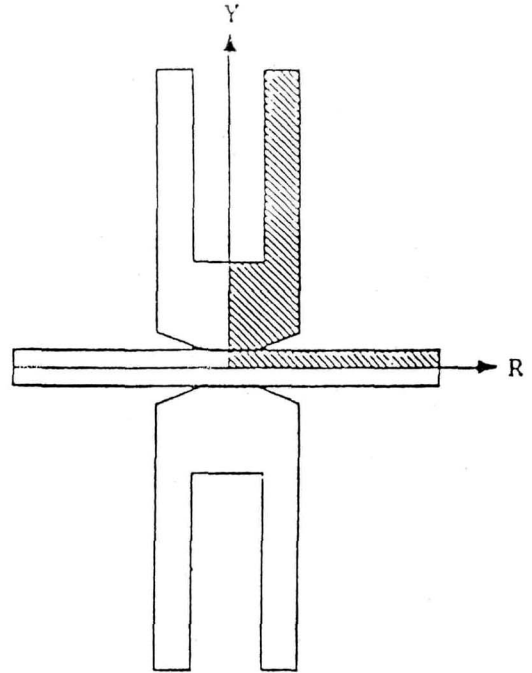


Fig. 1 Geometry of axisymmetric model

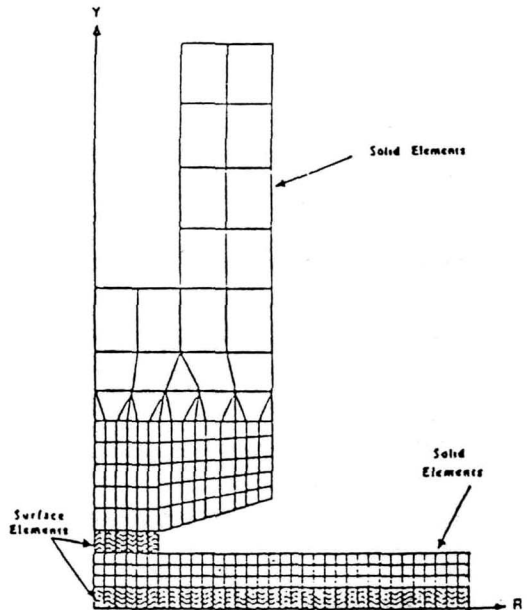


Fig. 2 Finite element model identifying element types

소들과 그 대표적인 용도는 아래와 같다.

- 1) 2-D, Isoparametric Solid Element for stress analysis.
- 2) 2-D, Thermo-Electric Solid Element for thermal analysis.
- 3) 2-D, Interface Element(surface element)for coupling.

저항용접의 Squeeze, Hold단계에서의 구조 및 응력해석을 위하여는 4-절감, 2-자유도계 ( $U_x, U_y$ )의 2차원 Isoparametric Solid Element를 사용하였다. 특히 Hold단계에서의 용접 너갓이 받는 응력은 복합적인 서로다른 응력으로, Squeeze단계에서 부과된 가압력으로 인한 응력과 Weld 및 Hold단계에서의 열팽창 수축으로 유발된 응력의 복합적인 것이다.

줄 열로 부터 온도가 얻어지는 열해석에는 2차원 Thermo-Electric Solid Element가 사용되었다. 점용접 과정은 저항용접이라기 보다는 오히려 저항으로부터 전류의 흐름까지, 얻어진 열에의해 금속의 접합이 이루어 진다고 보아야 한다. 그러므로 Thermo-Electric Element는 이런형태의 문제해석에 대단히 적합한 요소이다. 이 요소는 2차원 (Plane 또는 Axisymetry)정적 및 순간 열해석에 적용할 수도 있고, 4-절점 2-자유도계 (Voltage, Temperature)의 요소이다. 그리고 Interface Element는 열-기계적 현상의 접합 효과를 시뮬레이션하는데 매력적인 특수 형태의 요소임을 알 수 있다. 이 요소는 접합면의 기계적 변형과 같은 표면상태를 시뮬레이션하는데 사용될 수 있다. 그러나 이 요소는 압축응력은 지지할 수 있으나 인장응력은 지지하지 못하며 접촉면적의 결정에 대단히 중요한 역할을 하는 요소이다. 물체의 접촉면은 사실 알 수 없는데 이것은 가압력에따라 변하기 때문이다. 또한 전극과 시편이 서로다른 열팽창계수를 가지고 있으므로 Interface Element는 접촉면에서 상호 미끄러짐이 일어날 수 있다. Fig. 2에서 물결 형태를 나타낸 부분이 Interface Element이다. 하지만 실제로는 Line Element에 더 가깝다. Interface Element의 길이는 약 0.002인치 (0.05mm)의 산화피막의 두께와 같다고 생각된다.

## 2.2. 경계조건

아래와 같은 경계조건과 가정들을 Fig. 3에 도식적으로 나타내었다.

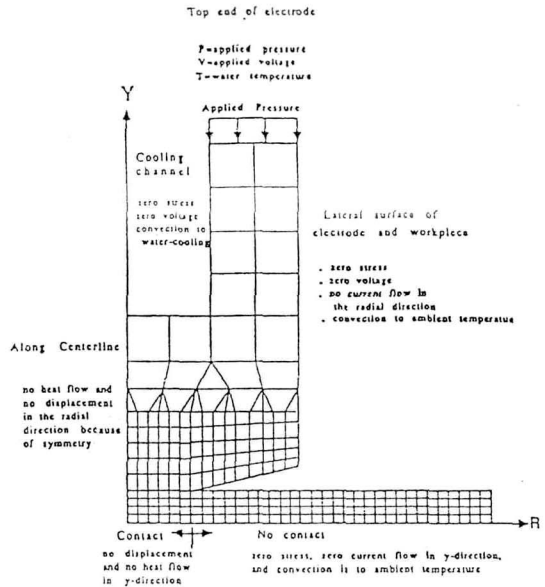


Fig. 3 Boundary conditions imposed on the model

가. 구조해석

- 1) 전극의 정상부: 전극의 링형태의 정상부 표면에는 하중 P의 압력분포를 가정한다.
- 2) 모재의 측면: 경계면 접촉부위의 y방향의 변위  $U_y$ 는 축대칭 조건으로 구속된다.
- 3) 중심선: 반경방향의 변위  $U_r$ 도 위와 같은 조건으로 구속된다.
- 4) 모재는 표면처리가 훌륭하다.

나. 열 해석

- 1) 전기적 경계조건은 전극의 정상부로부터 모재의 경계면 사이에서의 전압 강하를 가정한다.
- 2) 전극과 모재의 접촉면을 통하여 전류의 흐름은 가능하나 측면이나 중심선을 따른 전류의 흐름은 없다고 본다.
- 3) 주위온도에 대한 열전달은 전극과 시편의 측면에서만 일어나며 접촉면이나 중심선을 따라서는 일어나지 않는 것으로 가정한다.
- 4) 냉각 채널로의 열전달은 전극의 냉각채널 안에서만 일어난다고 가정한다.
- 5) 모재의 접촉면이나 중심선을 따른 열유동은 축대칭이므로 없다고 가정한다.

## 2.3. 용접과정의 시뮬레이션

용접과정의 시뮬레이션은 Squeeze, Weld, Hold

Stage 등 세 개의 순서적인 단계들을 따라 진행될 것이다.

### Squeeze Stage

Squeeze Stage 동안 두 개의 전극은 시편에 압력을 가하여 시편의 접촉을 유발한다.

그러므로 여기서는 시편과 전극에 발생하는 응력 해석이 될 것이다. 이를 위하여 2차원 Isoparametric Solid Element(STIF42)가 사용 될 것이다. 그리고 접촉면에는 Interface Element(STIF 12,2D - Interface element for structural analysis)가 사용된다.

이 해석에서 요구되는 재료특성으로는 Young's modulus(E)와 Poisson's ratio( $\mu$ )이다. 전극에 하중이 가해지기 전 Squeeze Stage 시초에 아래와 같은 초기조건을 가정한다.

- 1) 시편의 상호접촉은 평면접촉이며 마찰계수는 영이다.
- 2) 역학적으로 응력은 영이다.
- 3) 전기적으로는 전위차는 영이다.
- 4) 온도는 대기온도와 같다.

### Weld Stage

여기에 사용된 요소는 앞에서 언급된 바와 같이 2차원의 Thermo-Electrical Solid Element(STIF67)와 Interface Element(STIF69, Interface element for heat convection)가 사용된다.

여기서 요구되는 재료특성은 온도변화에 따른 열특성치로서 실내온도로부터 용융온도에 걸친 온도변화에 따른 값들이 된다. 예를 들면, 열전도도, 전기저항치, 비열 및 밀도등이다.

이 단계가 진행되는 동안 Squeeze 단계에서 부과된 전극의 압력은 유지되는 것으로 간주한다. Weld 단계의 초기조건은 아래와 같다.

- 1) Squeeze 단계의 결과로 이루어진 새로운 접촉면
- 2) Squeeze 단계에서 진전된 응력의 형성과 상태
- 3) 전기적으로는 접촉면에서의 전위차와 접촉저항은 없는 상태
- 4) 모재와 전극의 온도는 주위온도로 한다.

통전시간에 상당한 전위값을 적용 함으로 용접관계가 시뮬레이션된다. 임의의 사이클(Cycle time)에서 온도와 등전위 분포는 물론 용접너겟을 나타내는 등온곡선을 얻을 수 있다. 이 결과를 통하여 초기용융단계로부터 끌어 넘치는 단계(Expulsion stage)까지의 너겟의 성장을 추적하는 데 사용될 수 있다.

### Hold Stage

열-기계적 해석을 수행 함으로 Squeeze 단계의 영향이 Hold 단계에서 함께 복합되어 사용된다. 이 해석과정에서 요구되는 부가적 재료특성은 온도에 따라 변하는 기계적 특성들로 탄성계수(E)와 열팽창계수등이다. 초기조건은 다음과 같다.

- 1) 구조적으로 모재의 접촉면에 형성된 용접너겟
- 2) 초기에 전극에 가해진 압력과 열로 인해 발생된 응력
- 3) 전기적으로는 적용된 전압
- 4) Weld 단계 동안 발생된 '줄'열로부터 얻어진 최종 온도분포

Hold 단계는 최초로 전극에 가해진 압력을 유지하고 부하전압을 단전함으로 수행된다. 가해진 압력과 열응력의 새로운 단계가 얻어질 수 있으며 시편과 전극 어느 부분이든 분포된 응력의 윤곽이 얻어질 수 있다.

ANSYS 프로그램은 아래의 3단계 즉,

- 1) Data들을 입력하는 Preprocessing 단계
- 2) Matrix를 형성하고 해를 구하여 변위, 응력온도 등이 얻어지고 얻어진 값들을 뒤에 필요를 위해 저장하는 Solution 단계
- 3) Solution 단계에서 저장된 Data로, 필요한 자료를 인쇄, 그래픽, Plot, 또는 검출하는 Post-processing 단계로 구성된다.

또한 입력 데이터의 구성은 Squeeze, Weld 및 Hold 단계등 3부분으로 나뉘어 진다.

## 3. 해석결과 및 검토

### 3.1. 해석결과

앞에서 모델의 형상, 경계조건의 가정 및 용접 과정의 시뮬레이션을 위한 절차등 유한요소 컴퓨터 프로그램의 형태와 능력에 대하여 참고적으로 논의하였다.

여기서는 해석을 위한, 모델로부터 얻어진 결과들을 기존의 스테인레스강에 대한 저항점용접 자료와 비교검토할 것이다.

실험적 해석에 사용된 데이터들은 미국 저항용접기 생산협회(RWMA)<sup>10)</sup>의 스테인레스강에 대한 저항점용접 표준으로 추천된 것에 기초한 것이다. 여기서 얻어진 결과들은 스테인레스강 347, 0.04인치(1.0mm) 두께 1.0인치(25.4mm)길이의 시편을 사용하여 얻어진 것이며 1000파운드(453.6kg)의 가압력과 전류값

은 8000암페어가 시뮬레이션 과정에서 가정되었다. 통전시간은 2-사이클에서 9-사이클까지 변하는 것으로 하였다. (1-cycle=1/60초)또한 냉각은 Hold Stage에 상당한 시간(10-cycle)으로 선택하였다.

3.1.1. Squeeze Stage

1000파운드(453.6kg)의 접촉하중을 가하자 용접전극과 시편의 변형이 발생되었다. 전극 끝단의 외주가 시편안으로 파고들어가는 변위가 발생했으며 그 크기는 4.1E-5 인치(1.04E-3mm) 정도이다. 그리고 시편의 끝부분이 상하로 격리되는 극부적인 변형을 일으켰다. 이 결과는 Civelek에 의한 초기 해석결과와 Nied의 유한요소모델에서 얻어진 결과를 잘 확증한다.

또한 전극과 시편의 접촉면과 시편간의 접합면에 분포된 응력은 Fig. 4에 그래프로 나타내바와 같다.

전극과 시편의 접촉면의 외륜부에서 최대 응력치는 35ksi (2463ks/cm<sup>2</sup>), 시편의 적합면에서의 최대응력치는 31.5ksi (2216.7kg/cm<sup>2</sup>)로 나타난다. 이 결과는 접촉면 주위에 분포된 응력은 균일하지 않음을 나타내었으며 중앙부의 낮은 값으로부터 반경방향으로 증가됨을 보이고 있는데 이와같은 응력분포의 변화는 전극재료가 Rigid 하지 않기때문이라 생각된다. 이와 같이 전극 끝단 외륜부의 응력집중은 용융금속의 뭍어 넘침(Expulsion)을 방지하는 Pinching효과가 있는 반면 반복적인 부하가걸림으로 인하여 전극의 손상과 버섯모양의 변형을 일으키게 된다.

Nied의 결과에서도 이같은 현상이 관찰되었다.

압축응력 하에서 전극과 시편과의 접촉면의 직경은 전극의 직경과 동일한 0.18인치(4.57mm)였고 시편간의 접촉면의 직경은 0.20인치(5.1mm)로 나타났다. 그러므로 시편간의 접촉면의 직경이 전극의 단부 직경과 같을 것으로 가정하는 것은 잘못된 것이다.

3.1.2. Weld Stage

실험적으로 두 전극을 지나 통전하는 데, 전류값 8000암페어에서 1.0볼트의 전압강하가 일어난다는 사실에 근거하여 모델이 축대칭 이기때문에 전극 상면으로부터 모재 접촉면까지의 전압강하를 용접초기에 0.5볼트로 가정하는 것이 가능하다.

대기의 온도는 70°F(21°C)전극의 냉각채널 내의 냉각수 온도는 50°F(10°C)전극 측면과 대기와의 열전달율은 9E-6 Btu/in<sup>2</sup>, sec°F (6.3E-4 Cal/cm<sup>2</sup>, sec°C)이다. 용접중에는 가압력의 변화는 없으며 용접 너겟

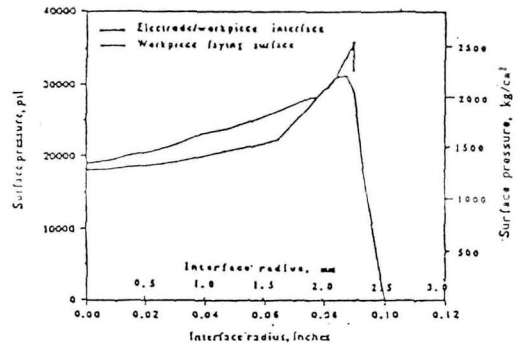


Fig. 4 Stress distribution along electrode/workpiece interface and workpiece faying surface (Applied load=1000 lbs)

의 진전은 각각의 용접 사이클에 대한 너겟 윤곽선을 plotting함으로 추적된다.

스테인레스강 347의 용융온도는 2550°F(1399°C)에서 2600°F(1466.7°C)사이이다. 그러므로 Fig. 5에서와 같이 2.75 사이클에서의 초기용융은 모재의 중심부가 아니라 중심부에서 약간 외측으로 처진 위치에서 발견된다. 그리고 6.0사이클에서의 너겟의 윤곽선과 시편의 변형을 나타낸것이 Fig. 6이다.

시편간의 접촉면을 따른 온도의 분포는 온도에 따라 변화하는 재료의 특성의 물리적 응답을 나타낸다. 이 결과에 기초하여 어느 순간의 용접 사이클에서 중심선 주변에 토로이드 형태로 용융 너겟이 형성되리라는 것을 예측할 수 있다. 이같은 현상은 전류밀도와 전극의 기하학적형태에 기인된 것이라 생기되나 정확한 확증을 위하여는 더많은 연구가 필요하다.

Fig. 7, 8은 8,000암페어에서 2.75 사이클 이후 시편간의 온도분포와 전극과 시편 접촉면의 온도분포를 나타낸 것이다. 현존하는 실험적 데이터와 비교한 용

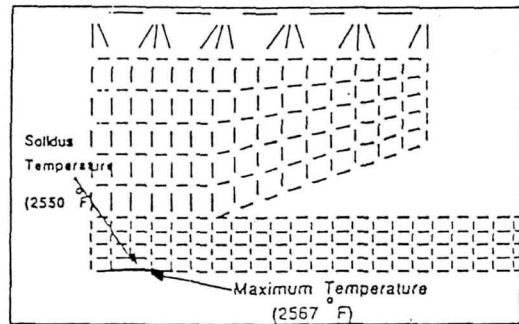


Fig. 5 Initial nugget formation offset from center (Welding time=2.75 cycles, Current=8000 amps)

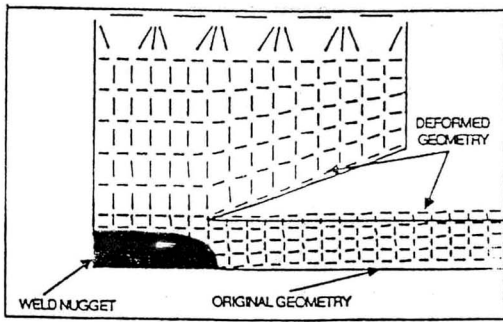


Fig. 6 A well developed weld nugget at 6 cycles (Current=8000 amps)

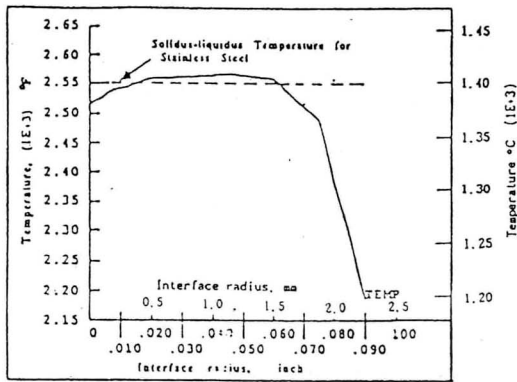


Fig. 7 Temperature distribution along workpiece faying surface after 2.75 cycles (Current=8000 amps)

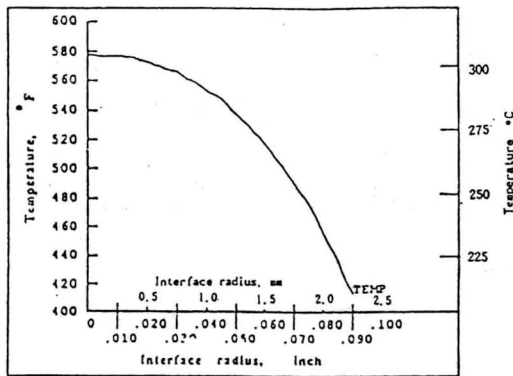


Fig. 8 Temperature distribution along electrode/workpiece interface after 2.75 cycles (Current=8000 amps)

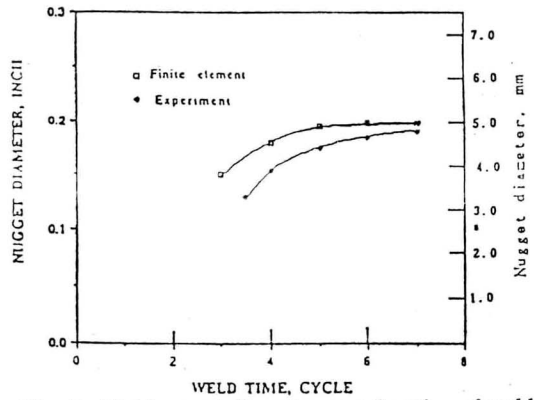


Fig. 9 Weld nugget diameter as a function of weld time

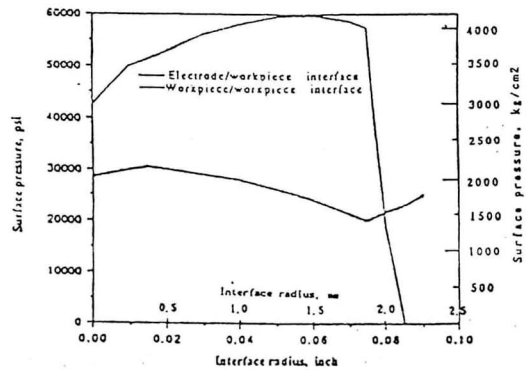


Fig. 10 Stress distribution along electrode/workpiece interface and workpiece faying surface at the end of 10 hold cycles (Current=8000 amps)

용 너겟의 성장 거동을 Fig. 9에서 나타내었다.

너겟의 직경을 용접 사이클에 대하여 나타내었다. 표시된 점들은 너겟의 생성시점부터 너겟이 과대히 형성될 때까지 여러가지 용접 사이클에서 얻어진 것이다.

### 3. 1. 3. Hold Stage

Hold Stage중에 얻어진 결과는 용접과정에 있어서 열-기계적 응답의 대표적인 예이다. 여기서 얻어진 결과들은 초기하중으로 인한 응력에 부가하여 용융 및 응고과정에서 진전되는 열응력을 예견하는 데 도움이 될 수 있다. Fig. 10은 10-hold cycle 종료시의 전극과 모재의 접촉면과 시편간에 접촉면을 따라 분포하는 열

응력치를 나타낸다.

시편간의 접촉면을 따른 열응력치는 Squeeze Stage 중에 발생하는 응력분포와 같은 경향을 나타내고 있으나 그 크기는 거의 2배가 됨을 알 수 있다. 그 이유는 너겟의 열팽창과 관련된 열응력이 이 접촉면을 따른 응력증가에 주된 영향을 끼친다고 생각된다. 전극이 시편으로 압입된 정도는  $2.38E-4$  인치 ( $6.03E-3$  mm)였고 접촉면 주위의 시편의 각변형은 열팽창으로 인한 기계적 응답을 나타낸것이다.

3.2. 파라메타의 변화에 따른 연구와 해석에

앞에서 개발한 모델을 통하여 주어진 해석결과들은 저항점용접 과정의 초기이론인 열, 전기적 거동의 이론들과 잘 부합되며 이 모델은 실험적으로 얻어진 자료들과도 잘 부합되는 결과를 제공한다. 또한 용접과정에 대한 열-기계적 응답을 예측할 수 있는 믿음만한 도구임이 증명된다 더 나아가서 시편의 두께를 상호 변화시켜보고 또한 이종재료의 용접에 대한 결과도 검토하였다.

여기서는 서로 두께가 다른 시편의 용접결과와 이종금속의 용접에 대한 너겟형성과 시편의 형상이 미치는 영향을 논의코자 한다. 시편의 두께와 관련하여 용입된 너겟의 백분율이 파라메타로 선택되며 용접전류치는 6000암페어로 부터 10,000암페어에 이르는 범위가 선택 되었다. 각각의 용접 전류치에 대하여 25%, 50% 그리고 75%의 열점 너겟이 형성되는 데 요구되는 시간(cycle time)이 얻어졌고, 그에 대한 그래프를 Fig. 11에 나타내었다.

두께가 서로다른 시편[상부 시편의 두께 : 0.04인치 (1.0mm), 하부 0.06인치 (1.5mm)]과 이종금속의 시편 [동일두께 : 0.04인치 (1.0mm), 상부시편 : 1045 탄소강, 하부시편 : 347스테인레스강]에 대하여도 응력 및 열해석이 동일한 방법으로 수행되었고 첫번째 시험에서 발견되었던 응력분포와 동일한 결과를 얻게 되어 여기서는 열해석 결과만 제시코자 한다. 모든 경우에 하중은 1000파운드 (453.6kg)였고, 전류치는 8,000암페어로 하였다.

Fig. 12, 13 은 상이한 두께의 시편과 동일 두께의 이종금속 시편의 모델 및 등온선으로 너겟의 윤곽을 나타낸다. 그림 12의 너겟 윤곽선은 스테인레스강의 고상-액상 2550°F (1399°C)와 용접 통전시간대에서 얻어지는 최대온도 3290°F (1810°C)사이로 선택된 곡선이다.

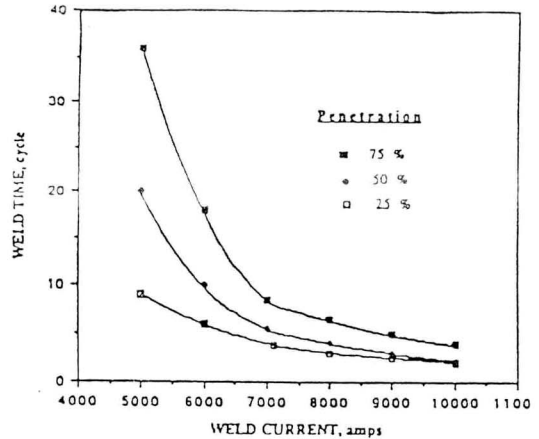


Fig. 11 The relationship between weld time and weld current for three different nugget penetration (% of Sheet Thickness)

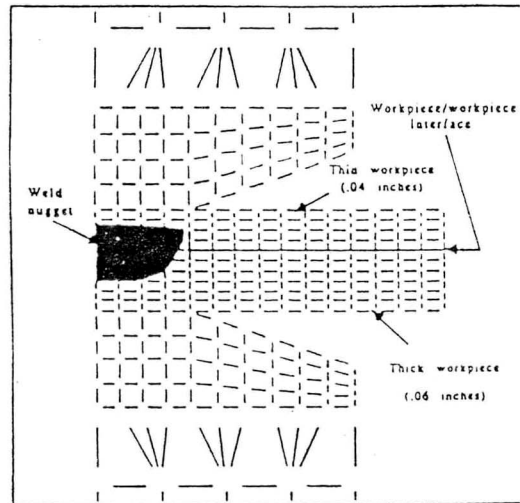


Fig. 12 Weld nugget geometry obtained for unequal thickness workpiece after 7 weld cycles (Current = 8000 ampss)

Fig. 13에서 용용 너겟의 윤곽을 나타내는 등온선은 고상-액상온도와 통전 시간대에서 얻어지는 최대온도 3977°F (2192°C)사이에서 선택되었다. 하지만 스테인레스강 347은 고상-액상온도가 2550°F (1399°C)이며 탄소강은 2650°F (1454°C)이다. 그러므로 이종 금속의 경우는 너겟의 윤곽선인 등온선은 고상-액상온도가 높은 쪽의 재료를 기준으로 선택하였다. 이때의 온도는 2650°F (1494°C)이다. Fig. 12, 13의 너겟의 모양이 다른것은 재료특성이 상이하기 때문이다.



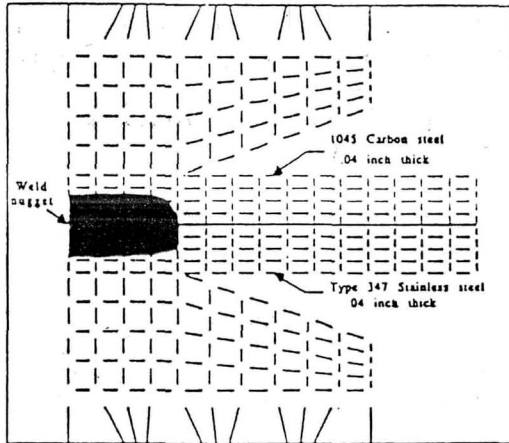


Fig. 13 Weld nugget geometry obtained for equal thickness workpieces after 7 weld cycles (Current=8000 amps)

#### 4. 결 론

유한요소모델의 해석을 통하여 다음의 결론을 얻었다.

1) Squeeze Stage 동안 전극과 시편의 접촉면과 시편간의 접촉면 외륜부에 응력집중을 나타내며 이에 대한 응력상태의 자세한 자료를 제공한다. 그리고 두 시편의 접촉직경은 전극의 접촉면의 직경보다 더 커진다는 사실을 알게 되었다.

2) 링 형태(토로이드형)의 용접 너겟이 전극의 중심으로 부터 좀 떨어진 위치에서 시작되며 Weld Stage 동안 내부와 외부로 확장됨을 알 수 있다.

3) Hold Stage의 종료점에서는 용접 너겟은 서로 다른 응력하중을 받게 된다. 이 과정에서의 응력들은 Squeeze Stage 동안 전극에 의해 부과된 압력과 Weld Stage과 Hold Stage에 의해 유발된 열팽창 수축으로 인한 응력들이다.

4) 최종 너겟의 형태는 Hold Stage 종료점에서 얻어진다. 현존한 실험적 데이터와 본 논문의 결과의 비교는 훌륭한 질적 일치율을 나타낸다. 하지만 여기서는 저항점용접과 관련된 더 많은 인자들과 현상은 검토되지 못하였다.

5) 앞으로 접촉면의 접촉저항, 접촉면의 마찰계수, Hold Stage 종료점에서의 응력분포, 과대용접(weld expulsion)의 역할, 아연 및 다른 재료로 도포된 강판의 용접 및 용접전극의 흔벌과 끝부분의 형상등에

대한 것이 검토되어야 할 중요한 파라메타(parameters)라 생각된다.

#### 5. 후 기

본연구는 1989년도 문교부 특성학과 해외과건 연구 조성비 지원에 의해 수행된 것으로 연구를 지원하여 주신 문교당국과 이 연구 수행에 조언과 협조를 아끼지 않으신 미국 오하이오 주립대학 용접공학과 Dickinson 교수, 용접 설계실의 김동섭 동분 그리고 울산대학 조선 및 해양공학과 교수 와 대학당국에 감사드립니다.

#### Reference

- 1) Bowden, F.P., and Williamson, J.B.P.: Electrical conduction in solids- I. Influence of the passage of current on the contact between solids, Proceeding of the Royal Society of London(Aug. 1958), pp. 1-12
- 2) Greenwood, J.A and Williamson, J.B.P.: Electrical conduction in solids-II. Theory of temperature-dependent conductors, Proceeding of the Royal Society of London (Aug. 1960), pp. 13-31.
- 3) Archer, G.R.: Calculations for temperature response in spot welds, Welding Journal(Aug. 1960), pp. 327s-330s.
- 4) Greenwood, J.A.: Temperatures in spot welding, British Welding Journal,(June. 1961). pp. 316-322.
- 5) Bently, K.P., Greenwood, J.A., Knowlson, P. Mck., and Baker, R...: Temperature distributions in spot welds, British Welding Journal(1963), pp. 613-619.
- 6) Rice, W., and Funk, E.J.: An analytical investigation of the temperature distributions during resistance welding, Welding Journal(April 1967), pp. 175s-186s.
- 7) Houchens, A.F., Page,R.E., and Yang, W.h.: Numerical modeling of resistance spot welding, numerical modeling of manufacturing processes, Presented at the Winter Meeting of

- ASME, November 27-December 2, 1977, pp. 117-129.
- 8) Gould, J.E.: An Examination of Nugget development during resistance spot welding using both experimental and analytical techniques, Welding Journal,(Jan. 1987), pp. 1s-10s.
- 9) Nied, H.A.: The finite element modeling of the resistance spot welding process, Welding Journal(1984), pp. 123s-132s.
- 10) Resistance Welding Manual, Vol.I & II, Resistance manufacturers Association, Philadelphia, Pennsylvania.

**Appendix A.**  
**Physical and Mechanical Properties for Class III Copper Electrode**

Temp°F	Specific Heat BTU/lb °F	Thermal Conductivity 10 <sup>-3</sup> BTU/sec.in.°F	Resistivity Micro Ohm-in	Young's Modulus 10 <sup>-6</sup> , psi	Coef. of Thermal Expansion 10 <sup>-6</sup> in/in. °F
70	.095	5.22	.98	18	9.3
200	.096	5.09	1.18		
400	.10	4.95	1.57		
600	.103	4.75	1.97		
800	.105	4.62	2.36		
1000	.108	4.48	2.76		
1200	.111	4.28	3.15		
1400	.114	4.22	3.54		
1600	.116	4.15	3.74		
1800	.117	4.08	3.94		
2000	.118	4.02	3.94*		
2200	.12	4.02*	3.94*		
2400	.12*	4.02*	3.94*		
2600	.12*	4.02*	3.94*		
Density=0.323 lb/in <sup>3</sup>					

\* values are extrapolated

**Physical and Mechanical Properties for Type 347 Stainless Steel**

Temp°F	Specific Heat BTU/lb °F	Thermal Conductivity 10 <sup>-4</sup> BTU/sec.in.°F	Resistivity Micro Ohm-in	Young's Modulus 10 <sup>-6</sup> , psi	Coef. of Thermal Expansion 10 <sup>-6</sup> in/in. °F
70	.105	1.97	28.3	29	8.8
200	.108	2.15	30.3	28	9.2
600	.118	2.55	37.4	25	9.7
800	.125	2.73	39.4	22.5	9.9
1000	.132	2.89	41.7	21	10.2
1200	.140	3.13	44.5	20	10.4
1400	.145	3.31	46.0	18.5	10.6
1600	.150	3.47	48.0	17.5	10.7
1800	.155	3.70	49.2	16	10.9
2000	.160	3.94	50.0	14.5	11.0
2200	.165	3.94	50.4	*	*
2400	.170	*	*	*	*
2550	.175	*	*	*	*
2550	.500	*	*	*	*
2600	.500	*	*	*	*
2600	.170	*	*	*	*
2800	.170	*	*	*	*
Density=0.29 lb/in <sup>3</sup>					

\* Not available

Physical and Mechanical Properties for 1045 Carbon Steel

Temp°F	Specific Heat BTU/lb °F	Thermal Conductivity 10 <sup>-4</sup> BTU/sec.in.°F	Resistivity Micro Ohm-in	Young's Modulus 10 <sup>-6</sup> , psi	Coef. of Thermal Expansion 10 <sup>-6</sup> in/in. °F
70	.106	6.98	2.9	29	
200	.108	6.69	3.1		6.2
400	.117	6.02	5.1		
600	.13	5.75	6.5	26	6.7
800	.143	5.08	8.5		
1000	.165	4.41	11.6	24	7.9
1200	.179	4.01	14.3		
1300	.466	3.97	*		
1400	.143	3.88	17.8	16.5	6.3
1472	.146	*	*		
1800	.155	3.34	*	13.5	7.4
2000	.163	3.61	*		
2550	.167	3.75	*		7.9
2650	.17	4.28	*		
2650	.813	2.01	*		
2882	.189	2.27	*		
2912	.191	*	*		
Density = 0.2836 lb/in <sup>3</sup>					

\* Values are not available