

금속 샌드위치 판재 대면적 롤 프로젝션 용접에 관한 연구 : Part 2 - 수치 해석

김종화* · 안준수** · 나석주**†

*STX 조선 생산기술연구팀

**한국과학기술원 기계공학과

A Study on Large Area Roll Projection Welding for Metallic Sandwich Plate : Part 2 - Numerical Analysis

Jong-Hwa Kim*, Junsu Ahn** and Suck-Joo Na**†

*Production Technology Research Team, STX Shipbuilding, Changwon 641-839, Korea

**Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

†Corresponding author : sjna@kaist.ac.kr

(Received March 3, 2009 ; Revised March 30, 2009 ; Accepted June 2, 2009)

Abstract

Metallic sandwich plate has many good properties such as high specific stiffness, high specific strength, good impact absorptivity, effective thermal insulation and soundproofing. In our study, a new bonding method, 3-layer roll projection welding, is introduced to fabricate the metallic sandwich plate. The new method uses a pair of roll electrodes like the seam welding, and projection welding is made at two internal interfaces of the 3-layer weldment consisting of a structured inner sheet and a pair of skin sheets. During the welding process, skin sheet temperature are measured to produce metallic sandwich plate with uniform and good quality. But it is difficult to observe or measure the temperature at the welding points during welding process because the welding points exist at the internal interfaces. Therefore FEM numerical analysis using ABAQUS is conducted to estimate the generated heat at the welding points with different welding conditions.

Key Words : Metallic sandwich plate, Resistance welding, Structured inner sheet, Rolling electrode, Numerical analysis

1. 서 론

내부에 3차원 형상의 구조를 가지고 있어 부피의 대부분이 비어있는 금속 샌드위치 판재는 비강성, 비강도가 뛰어날 뿐만 아니라, 단열, 방음, 내충격성 등에도 뛰어난 성능을 보이는 것으로 알려져 있다¹⁾. 이러한 장점을 살리면서 생산성 또한 높이고자 롤 전극을 이용한 연속 저항 용접으로 판재를 제작하는 연구를 수행하였다²⁾. 일반적인 저항 용접 공정에서 접합부에서의 압력 또는 온도 분포를 예측하고 분석하는 연구는 선행 연구

자들에 의해 많은 부분이 행하여 졌으나³⁻⁵⁾, 본 연구와 같은 대면적 금속 샌드위치 판재의 제작 공정은 일반적인 저항 점용접과는 달리 1회 용접시 수백개의 여러 접점이 동시에 용접되는 차이가 있다.

한편, Part 1에서는 균일하고 양호한 용접 품질을 지니는 금속 샌드위치 판재의 제작을 위해 기존의 저항 용접에 널리 사용되는 동저항 측정과 함께 외판 표면 온도 측정을 새로운 모니터링 기법으로 도입하였다. 그러나 주발열원이 외판재와 내부 구조재간의 계면에 존재하는 관계로, 용접 공정중에 열 발생부의 거동을 관측 또는 실측하는 데에는 많은 어려움이 있다. 이에 본 연

구에서는 FEM 수치 해석을 통하여 각 용접 조건에 따른 용접부에서의 온도를 예측하고, 외판 표면으로의 열 전달 해석을 통하여 외판 표면 온도 측정법의 타당성 및 가치를 확인하고자 하였다.

2. 해석 방법 및 모델링

본 해석은 범용 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였고, 시편 형상의 대칭성 및 주기성을 고려한 3D모델을 이용하였다. 돌기(projection)부의 형상은 실제 실험에서 사용한 내부재 돌기의 형상을 토대로 하여 돌기 패턴 간격은 2.4mm, 돌기의 밑면에서 정상부까지의 높이는 0.75mm로 모델링하였다. Fig. 1에 내부 구조재, Fig. 2에 외판재와 전극부를 포함한 전체 모델을 나타내었다.

한편, 실제와 같은 조건을 부여하기 위해서는 열-전기-응력해석이 커플링된 해석을 수행하여야 하나, 본 해석에서 사용한 모델은 3차원 형상이며 매우 복잡하기 때문에 위와 같은 해석을 수행하는 데에는 해석시간 및 수렴성 측면에서 많은 어려움이 있다. 이에 먼저 가압을 하고, 이로부터 접촉면적과 접촉압력 등 접촉저항의 계산에 필요한 값들을 추출하고, 이를 이용해 열-전기 해석을 수행함으로써 용접부에서의 발열량을 모사하였다.

해석에 있어서 기본적으로 모든 물성치는 상온에서부터 100℃ 간격으로 온도에 따라 측정된 값과 그 중간 값들은 선형 보간법으로 구한 값을 이용하였다. 내부 구

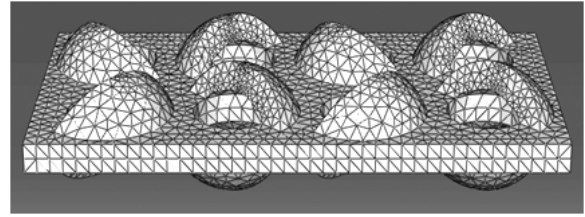


Fig. 1 Model shape of structured inner sheet

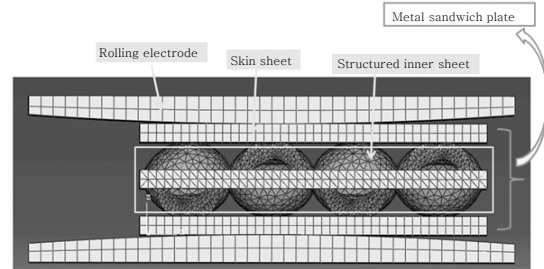


Fig. 2 Whole model shape

조재의 경우 일반 연강(mild steel)의 물성치, 외판재는 자동차용 고장력강인 DP590의 물성치, 전극은 저항 용접용 구리 전극의 물성치를 이용하였다.

2.1 응력 해석

실험에서와 같이 가압전의 금속 샌드위치 판재의 두께는 3mm로 하였고, 전극에 변위를 부여하여 각각 2.82mm, 2.84mm, 2.86mm, 2.88mm, 2.90mm가 되도록 가압하였다. 이때 가압중에 각 계면에서의 마찰에 의한

Table 1 Material properties table (mild steel)

| Temp. (°C) | Young's modulus (GPa) | Poisson's ratio | Density (kg/m ³) | Thermal expansion coefficient (*10 ⁻⁵ /°C) | Specific heat (J/kg · °C) | Thermal conductivity (J/m · sec · °C) | Convec-tion coefficient (J/m ² · sec · °C) | Electrical conductivity (*10 ⁵ S/m) | Yield stress (MPa) |
|------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|---|---------------------------|---------------------------------------|---|--|--------------------|
| 0 | 206 | 0.29 | 7830 | 1.16 | 435.83 | 52.7 | 0.50 | 70.423 | 247 |
| 200 | 198 | 0.33 | 7740 | 1.27 | 491.74 | 51.1 | 1.50 | 38.023 | 232 |
| 400 | 181 | 0.37 | 7710 | 1.35 | 557.81 | 44.4 | 1.70 | 21.834 | 201 |
| 600 | 163 | 0.41 | 7650 | 1.44 | 667.09 | 39.4 | 1.86 | 13.624 | 145 |
| 800 | 80.3 | 0.44 | 7620 | 1.26 | 1108.0 | 31.8 | 1.98 | 9.2507 | 44.5 |
| 1000 | 19.6 | 0.48 | 7580 | 1.34 | 626.43 | 26.4 | 2.09 | 8.5837 | 3.92 |
| 1200 | 15.0 | 0.48 | 7540 | 1.48 | 622.62 | 28.5 | 2.18 | 8.2237 | 2.49 |
| 1400 | 13.4 | 0.48 | 7200 | 1.61 | 645.49 | 30.5 | 2.26 | 8.2237 | 2.22 |
| 1482 | 13.2 | 0.48 | 7200 | 1.66 | 645.49 | 105 | 2.29 | 8.2237 | 2.18 |
| 2227 | 11.1 | 0.48 | 7200 | 2.16 | 645.49 | 105 | 2.32 | 8.2237 | 1.84 |

Table 2 Material properties table (electrode)

| Temperature (°C) | Young's modulus (GPa) | Poisson's ratio | Density (kg/m ³) | Electrical conductivity (*10 ⁵ S/m) | Yield stress (MPa) |
|------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|--|--------------------|
| 100 | 130 | 0.30 | 8890 | 350 | 295 |

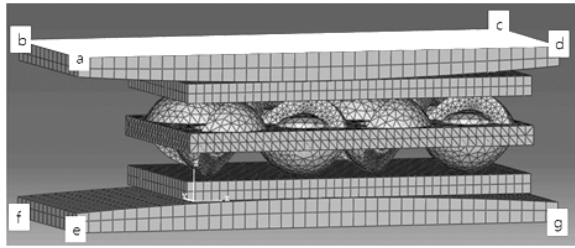


Fig. 3 Symmetric condition on intersection

발열은 무시하였다. 그리고 Fig. 3에서 aegd 및 bfc로 이루어진 면, 즉 대칭성을 고려하여 모델링하는 과정에서 생긴 단면부에는 대칭조건을 부여하였다.

2.2 열-전기 해석

전기 해석은 자기장의 영향이 없고, 내부 전류원이 없다고 가정하여 식(1)과 같이 맥스웰 방정식을 이용하였다.

$$\int_V \frac{\partial \delta \phi}{\partial X} \cdot \sigma^E \cdot \frac{\partial \phi}{\partial X} dV = \int_{S_p} \delta \phi J dS + \int_{S_s} \delta \phi J dS \quad (1)$$

ϕ : electrical potential
 J : current density
 σ^E : electrical conductance

Fig. 3에서 abcd로 이루어진 면, 즉 상부 전극의 위쪽 단면부에 전위를 0으로 주고, 하부 전극의 아래쪽 단면부 efg에 양의 전류값을 주어, 실험과 같이 하부 전극에서부터 상부 전극으로 전류가 흐르도록 하였다.

통전 전류량은 실제 실험에서와 같이 최대 70kA를 부여하였다. 전류 파형은 Fig. 4에서 실선으로 나타낸 실제 실험에서의 모니터링 결과를 이용하여, 점선 파형과 같이 대입하였다.

열 해석은 식(2)와 같이 줄열에 의한 발열과 전도, 대류, 복사를 고려한 열평형 방정식을 이용하였다.

$$\int_V \rho \dot{U} \delta \theta dV + \int_V \frac{\partial \delta \theta}{\partial X} \cdot k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial X} dV = \int_V \delta \theta \eta_v P_{ec} dV + \int_{S_i} \delta \theta (q_c + q_r + q_{ec}) dS \quad (2)$$

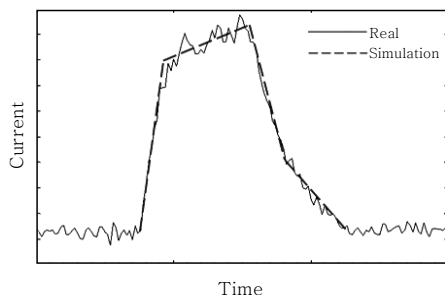


Fig. 4 Current waveform

K : heat transfer coefficient
 ρ : density
 U : internal energy
 η_v : transform efficiency electric to heat
 q : heat flux

실제 실험중에 전극의 내부로는 냉각수가 흐르고 있어 용접중에 전극은 약 100°C를 유지하게 된다. 이에 전극의 온도는 100°C로 하였고, 대류현상은 27°C 대기의 자연 대류를, 복사에 있어서 방사율은 600°C 산화조건에서의 강재(steel)의 값 0.79를 이용하였다.

2.3 접촉 저항 모델

접촉 저항은 저항 용접시 발열의 주원인이므로 저항 용접을 해석함에 있어 접촉 저항의 모델은 매우 중요하다. J. A. Khan⁽⁶⁾이 제시한 모델은 초기 가압에 의한 접촉저항과 고상선(solidus)에서의 접촉저항도 측정해야만 하는 단점을 가지고 있다. 기존에 이루어진 저항 점용접시 초기 가압에 의한 접촉저항에 대한 대부분의 연구에서는 초기 접촉저항을 측정하여 그 평균치를 계산에 사용하였으나, 본 연구에서는 가압에 의한 접촉면이 여러 개가 존재하고 각각의 접촉면에서의 압력에 차이가 있기 때문에 위의 결과들을 적용시키기에는 어려움이 있다.

한편, J. A. Greenwood⁽⁷⁾는 단위 면적당 접촉 저항을 미세적 관점에서 두 접촉면에서의 미세 돌기에 의한 실질 접촉면적의 감소가 접촉 저항의 주원인이라는 식(3)을 제안하였다.

$$R_c = (\rho_1 + \rho_2) \left(\frac{1}{4na} + \frac{3\pi}{32nl} \right) \quad (3)$$

ρ_1, ρ_2 : specific resistance
 n : number of asperities
 a : average radius of asperities
 $2l$: average distance of asperities

그러나 본 연구에서는 이 모델에서 필요로 하는 접촉면에서의 미세 돌기의 개수, 미세 돌기의 평균 반지름, 접촉한 미세 돌기 사이의 평균 거리에 대한 정보를 얻을 수 없기에, 2001년 S. S. Babu⁽⁸⁾가 Greenwood의 식을 변형시킨 식(4)를 이용하였다.

$$R_{CA} = (\rho_1 + \rho_2) \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\pi \sigma_{YS}}{\eta P} \right)^{1/2} + \frac{3\pi}{16\eta^{1/2}} \right] \quad (4)$$

$\rho = f(P, T), \quad \sigma_{YS} = f(T), \quad \eta = f(P, T)$

η : density of contacting asperities
 P : pressure

3. 해석 결과 및 고찰

본 연구의 Part 1에서 외판 표면 온도를 측정된 결과를 각각의 가압 조건에 따라 Table 3에 정리하였다. 이와 함께, 본 해석을 통해 얻어진 외판 표면 온도 결과도 함께 나타내었다. 실험값보다는 해석값이 100~150°C 가량 낮은 것을 알 수 있다. 이는 본 해석에서는 통전이 이루어지기 전의 초기 조건으로 27°C를 부여하였으나, 실제 실험에서는 이미 용접이 이루어진 앞쪽 돌기부에서의 발열량중 일부가 미용접 상태인 뒤쪽 부분으로 열전달이 일어나 27°C보다는 가열되어 있기 때문이라 생각된다. 이는 Table 4에 나타낸, 초기 조건을 27°C가 아닌 100°C와 200°C, 300°C를 부여하고 해석한 결과로부터 확인할 수 있다. 이러한 해석 결과로부터 판재 두께가 2.84mm가 되도록 가압하고 통전하는 조건에서는 기용접부로부터의 열전달에 의해 용접이 이루어지려고 하는 부분에서의 온도가 약 200°C까지, 판재 두께가 2.88mm가 되도록 가압하고 통전하는 조건에서는 약 300°C까지 가열되어 있을 것임을 역으로 예측할 수 있다.

한편, 본 연구의 주목적인, 실제 용접에서 접합이 이루어지는 내부 계면에서의 통전 직후 발열량 및 온도 예측에 관한 해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 해석 결

과를 나타내는 그림에서는 시각적인 측면을 고려하여 외판재와 전극부는 제외하고 내부재의 형상만을 나타내었다. 이 결과를 정리하여 각각의 가압 조건에 따른 용접부에서의 최고온도를 Table 5에 나타내었다. 실험 결과와 유사하게 판재 두께 2.82mm의 가압 조건에서는

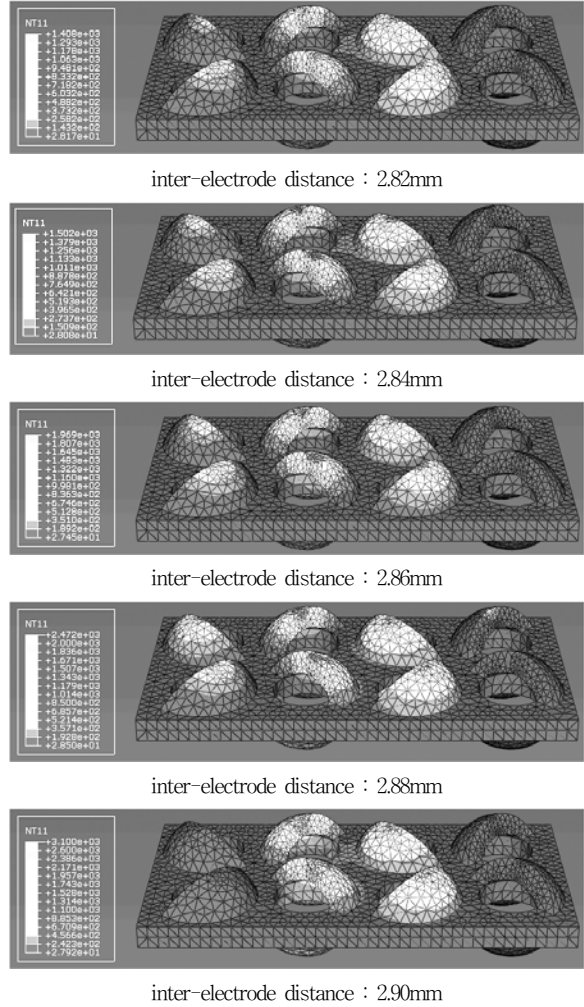


Fig. 5 Thermal-electric analysis result

Table 3 Skin sheet temperature comparison for initial temperature of 27°C in simulations

| Inter-electrode distance | Experiment results | Numerical analysis results |
|--------------------------|--------------------|----------------------------|
| 2.82mm | 250°C | 155°C |
| 2.84mm | 300°C | 179°C |
| 2.86mm | 450°C | 281°C |
| 2.88mm | 500°C | 352°C |
| 2.90mm | 700°C | 561°C |

Table 4 Skin sheet temperature comparison for different initial temperatures in simulations

| Inter-electrode distance | Experiment results | Numerical analysis results | | | |
|--------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | Init. temp. 27°C | Init. temp. 100°C | Init. temp. 200°C | Init. temp. 300°C |
| 2.84mm | 300°C | 179°C | 239°C | 317°C | 397°C |
| 2.88mm | 500°C | 352°C | 393°C | 445°C | 495°C |

Table 5 Max. temperature at welding points

| Inter-electrode distance | Interface location | Max.temp. |
|--------------------------|------------------------|-----------|
| 2.82mm | electrode & skin sheet | 197°C |
| | skin & inner sheet | 1408°C |
| 2.84mm | electrode & skin sheet | 228°C |
| | skin & inner sheet | 1502°C |
| 2.86mm | electrode & skin sheet | 468°C |
| | skin & inner sheet | 1969°C |
| 2.88mm | electrode & skin sheet | 820°C |
| | skin & inner sheet | 2472°C |
| 2.90mm | electrode & skin sheet | 1716°C |
| | skin & inner sheet | 3100°C |

지나친 가압으로 실 접촉 면적이 증가하고 그에 따른 전류 밀도의 감소 및 접촉 저항의 감소로 인해 용접부가 용융점까지 상승하지 못하여 냉접이 일어나는 것을 유추할 수 있다. 판재 두께 2.86mm이상의 가압 조건에서는 실 접촉 면적의 감소로 인한 전류 밀도의 증가 및 접촉 저항의 상승으로 인해 용접부가 과열되어 날림(spatter)이 발생하고 이로 인한 용융 금속의 소실이 점차 심해지는 것을 알 수 있다. 판재 두께 2.90mm의 가압 조건에서 3000℃를 넘어서는 해석 결과에 대해서는, 숫자 그 자체로서의 의미보다는 통전중 과도한 온도 상승으로 다량의 날림이 발생하여 그전에 통전경로가 소멸되었을 것이라는 예상을 할 수 있다.

4. 결 론

Part 1에서는 롤 전극을 이용한 연속 저항 용접 장치를 이용하여 전단형 딴플(sheared dimple) 형상의 내부 구조재를 가지는 금속 샌드위치 판재를 생산하였다. 본 연구에서는, 용접부가 내부 계면에 존재하여 실험에서는 알 수 없었던 용접중 용접부에서의 발열량 및 온도를 알아보기 위하여 ABAQUS를 이용한 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 판재 두께 2.82mm의 가압 조건에서는 발열량이 부족하여 용접부가 용융점까지 상승하지 못하고, 2.86mm의 가압 조건에서는 용융점이상 상승하며, 2.90mm의 가압 조건에서는 다량의 날림이 발생하는 것을 확인하였다.

2) 용접중에 기용접부에서 미용접부로 열전달이 일어나, 가압 조건에 따라 미용접부의 용접전 초기 온도가 다름을 확인하였다. 2.84mm의 가압 조건에서는 약 200℃, 2.88mm의 가압 조건에서는 약 300℃까지 예열되어 있음을 확인하였다.

3) 본 해석 결과와 Part 1에서의 외관 표면 온도 모니터링 결과와의 비교를 통해 외관 온도 측정법이 용접 품질을 예측하는 데에 있어서 가치있는 모니터링 방식을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 중장기산업기술개발사업 및 BK21 사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. A.G. Evans, J.W. Hutchinson, M.F. Ashby : Multifunctionality of Cellular Metal Systems, Progress in materials Science, Vol. 43 (1999), 171-221
2. S.J. Na, J.S. Ahn, J.H. Kim : A study on 3-layer roll projection welding of large area, IIW Document III-1491-08, 2008
3. X. Sun, P. Dong : Analysis of Aluminum Resistance Spot Welding Processes Using Coupled Finite Element Procedures, Welding Journal, 79 (2000), 215/s-221/s
4. Z. Feng, S. S. Babu, M. L. Santella, B. W. Riemer, H. E. Gould : An Incrementally Coupled Electrical-thermal-mechanical Model for Resistance Spot Welding, 5th International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA, June (1998), 1-5
5. D. Richard, M. Fafard, R. Lacroix, P. Clery, Y. Maltais : Carbon to Cast Iron Electrical Contact Resistance Constitutive Model for Finite Element Analysis, Journal of Materials Processing Technology, **132** (2003), 119-131
6. J.A. Khan, L. Xu, Y.J. Chao : Prediction of nugget development during resistance spot welding using coupled thermal-electrical-mechanical model, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 4 (1999), 201-207
7. J.A. Greenwood : Br. J. Appl. Phys., 17 (1966), 1621-1632
8. S.S. Babu, M.L. Santella, Z. Feng, B.W. Riemer, J.W. Cochran : Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metals, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 6 (2001), 126-132