< 기술논문 >

용접 순서의 변화에 따른 자동차용 Frame의 변형과 잔류 응력 분석

박 태 원¹⁾ · 김 기 주^{*2)} · 원 시 태³⁾ · 한 창 평⁴⁾

쌍용자동차 선행해석팀¹⁾ · 서정대학교 자동차과²⁾ · 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과³⁾ · 상지영서대학교 자동차과⁴⁾

Deformation and Residual Stress Analysis of Automotive Frame Following as Welding Sequency Variation

Tae Won Park¹⁾ · Kee Joo Kim^{*2)} · Si-Tae Won³⁾ · Chang-Pyung Han⁴⁾

¹⁾CAE Team, Ssangyong Motor Co., 150-3 Chilgoe-dong, Pyeongtaek-si, Gyeonggi 459-050, Korea

²⁾Department of Automobile Engineering, Sejeong College, Gyeonggi 482-777, Korea

³⁾Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 139-743, Korea

⁴⁾Department of Automobile Engineering, Sangjiyoungseo College, Gangwon 220-713, Korea

(Received 16 May 2012 / Revised 4 September 2012 / Accepted 18 September 2012)

Abstract : The high temperature thermal attacks in welding can affect the residual stress of a frame for automotive assembly accompanying frame deformation. Also the residual stress can induce the negative effect on durability performance of the automobile. In order to analyze the frame deformation, the simplified test frame which had the similar shape (form) of the real automotive frame was fabricated. The contactless optical 3D scanner was used for the shape difference measurement of the frame between before and after the welding. The FE-model of the test frame was composed and the deformation and residual stress simulation were performed. The simulated results were compared with the measured results for the reference of the frame design following as the variation of welding sequency. The deformation shape of the frame by simulation was in good agreement with that by the experimental measurement. In addition, the optimized welding sequency with reduced deformation after welding could be achieved through these analyses.

Key words : Residual stress(잔류응력), welding sequency(용접순서), Automotive frame(자동차 프레임), CAE (Computer Aided Engineering, 컴퓨터응용공학)

1. 서론

용접에 의한 접합은 장점도 있으나 용접에 의해 발생하는 높은 열에 의하여 프레임(frame)이 변형되고 높은 잔류응력이 발생하는 단점도 있다. 용접시 발생하는 열에 의한 프레임의 변형은 조립공차를 넘어서는 형태의 프레임으로 변형하여 종종 차체와의 조립에 문제를 발생시킨다. 또한, 이 때 발생하는 잔류응력은 차량의 내구성능을 저하시켜 안전성에

부정적인 영향을 미치기도 한다.^{1,6)} 용접에 의한 프레임의 변형을 조립공차 내의 형상으로 유지하기 위하여 지그를 사용하여 프레임을 고정하고 용접을 하거나 용접 후 프레임을 조립공차 내의 형상으로 변형시키는 방법을 사용한다. 지그의 변경으로 프레임의 변형을 줄이는 방법은 프레임의 크기가 커질 경우 지그도 함께 커져야 하고 프레임의 변형이 큰 경우 프레임을 보다 더 강하게 고정시켜야 하기 때문에 지그가 물리는 위치에 국부적으로 변형이 발생할 수도 있다. 더욱이 프레임의 변형을 조립공

*Corresponding author, E-mail: kjkim@sejeong.ac.kr

차 내에 들어오게 하기 위하여 지그를 조절하는 데 많은 시간이 소요된다. 또한, 용접 후 강제변형을 가하여 프레임을 조립공차 내로 만드는 방법은 소량 생산에선 효과를 볼 수 있으나 대량생산엔 적합하지 않은 단점이 있다.⁶⁾

그러므로, 본 연구에서는 프레임에 있어서 용접에 의한 변형과 잔류응력에 대하여 실험과 해석을¹⁾ 통해 고찰해보고자 한다. 또한, 검증된 해석결과를 이용하여 용접 순서에 따른 프레임의 변형과 잔류응력을 분석하여 최적의 (변형이 작은) 프레임 용접 순서를 도출하고자 한다.

2. 프레임 용접실험 및 해석방법

2.1 용접 실험방법

개발 차종의 프레임은 형상이 매우 복잡하기 때문에 본 연구에서는 보다 단순화 시킨 프레임을 제작하여 용접 전, 후 용접 변형에 관한 치수변화 측정실험을 실시하였으며, Fig. 1에 그 형상을 나타내었다.

프레임 구성 파이프는 Table 1의 기계적특성을 갖는 SAPH440 소재를 사용하였으며 지름×두께×길이 $\Phi 76.6 \times 3.2 \times 1,000$ mm의 원형 파이프를 이용하여 개발 차종의 프레임과 유사한 형태의 단순화된 프레임을 제작하였다.

각 조인트 연결 부분의 코너에 2-포인트 가접을

Fig. 1 Initial frame after 2-points temporary welding

Table 1 Mechanical properties of SAPH pipe material

Pipe 외경, mm	Pipe 두께, mm	Yield strength, MPa	Tensile strength, MPa	Tensile elongation, %
76.6	3.2	370.0	491.0	47.4

(a) Temporary welding

(b) Seam welding

Fig. 2 Comparison between (a) Temporary welding and (b) Seam welding

하여 초기 프레임을 구성하였으며 용접 속도는 평균 6.5 mm/sec로 하였다. 용접을 하고 24시간이 지난 후 프레임의 변화를 관찰하였다. 초기 프레임과 용접 후 프레임의 변형 차이를 측정하기 위하여 Accretech사의 3차원 비접촉식 광학 측정기(Optigo200)를 이용하였으며, 이 시스템의 측정 오차는 평균 0.1mm 이내이다.

Fig. 2에 가접과 본 용접 후 프레임의 용접상태 차이를 비교하는 사진을 나타내었으며 가접의 경우는 용접선이 연결되는 본 용접과 달리 포인트 용접임을 알 수 있다.

Fig. 3에 나타난 본 용접(가접과 대별되는)한 프레임을 24시간이 지난 후 3차원 비접촉식 광학 스캐너로 측정하였다. 본 용접 시 각 부위 용접 속도는

Fig. 3 Frame after final welding

10.4mm/s이었다. 가접상태의 초기 프레임의 형상 데이터와 본 용접 후 프레임의 형상 데이터를 비교하였다.

2.2 용접 해석방법

용접 해석은 상용 소프트웨어인 Abaqus를 이용하여 용접 시 발생하는 프레임의 변형과 잔류응력을 분석하였다. Element(요소) 종류는 프레임의 두께를 감안하여 Shell Element가 아닌 Solid Element를 사용하였으며 크기는 Fig. 4와 같이 1mm 이하의 Element를 사용하였다. 열에 의한 영향이 적은 부분은 요소의 크기를 크게 구성하여 모델의 Node(절점)는 74,428개, Element는 54,112개로 구성하였다.

열전달 해석에서는 Fig. 5(a)와 같이 벽면에 10.0 (W/mm²)의 대류 열전달 조건을 주었으며, 용접비드에 1.3E+08 (Cal/mm³*s)의 열원을 0.66 s 동안 가하였다. 열응력해석에선 Fig. 5(b)와 같이 끝단 부분을 X, Y, Z를 고정(Fix)하고 열전달해석에서 얻은 시간에 따른 온도조건을 가하였다.

Cp(Specific Heat)의 경우 Material data는 Fig. 6의 Real data와 같으나 이와 같은 조건으로 해석을 수행할 경우 해석 시간이 많이 소요되어 현장에서 적용하는 데는 많은 어려움이 있다. 그러므로 현장적용을 원활히 하여 해석 결과는 정확치 않더라도 빠른 **경향 판단**을 위하여 Analysis data와 같이 변경할 경우 시간에 따라 약 10%의 온도차이를 나타내며 해석 시간은 약 1/3로 줄어든다. 따라서 Analysis data와 같이 Cp값을 단순화 하여 해석을 수행하였다.⁶⁾

(a) FE-model of the simplified frame

(b) Magnified FE-model in the welding region

Fig. 4 FE-model of the frame for analysis

(a) Heat input conditions

(b) Boundary conditions

Fig. 5 Boundary conditions of heat transfer simulation

Fig. 6 Specific heat data following as temperature⁹⁾

고상온도는 1,440°C로 하였으며, 액상온도는 철의 용융점을 감안하여 1,510°C로 하였다. Latent heat은 273,790 (J/kgK)로 하였다. 초기 온도조건은 20°C로 하였다. 또한 프레임의 모든 면에 대류 열전달계수는 10W/mm²로 조건을 부여하여 해석을 수행하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 용접 실험결과 및 고찰

프레임을 차량의 차체에 조립할 때 마운팅부는 상·하 횡방향 파이프의 좌·우 끝단 4점이다. 끝단의 경우 측정치가 부정확한 경향이 있어 끝단에서 10 mm안쪽 부위 X축에 수직인 단면의 중심을 측정을 위한 기준점으로 하였다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 횡방향 파이프의 좌측 상, 하 거리 LV(Left vertical)의 거리변화와 횡방향 파이프의 우측 상, 하 거리의 RV(Right vertical)의 거리변화를 측정하였다. 또한, 주변 부품이 프레임에 마운팅되는 주요 부위인 횡방향 파이프 상·하 중간부위 거리 CV(Center vertical)의 거리변화와 종방향 파이프 좌·우 중간부위 거리 CH(Center horizontal)의 거리변화를 측정하였다. 측정결과 Table 2와 같이 나타났으며, 프레임이 전체적으로 수축되었음을 알 수 있다. 표로부터 단순화된 프레임을 용접 후 3차원 광학 측정 결과 상단과 하단 파이프 양쪽 끝의 변형이 컸다. 또한 상단과 하

Table 2 Deformation degree after final welding test

	LV	RV	CV	CH
가접 상태(mm)	399.44	400.12	399.95	599.84
본용접 후 상태(mm)	396.20	396.98	398.75	599.19
변형 양(mm)	3.24	3.14	1.20	0.65
변형률(%)	-0.81	-0.78	-0.30	-0.11

단의 파이프를 연결하는 중간 파이프의 변형은 미미함을 알 수 있다.

프레임의 LV, RV는 약 3 mm의 변형이 발생하였으며, 실험 전에 예상했던 수준보다 더 많은 변형이 발생을 했다. 실제 프레임의 경우 횡방향 파이프 상·하의 끝단에 차체와의 마운팅을 위한 브라켓(Bracket)가 접합되어 섹션의 끝이 막혀지는 형상이 된다. 그러나 단순화된 본 프레임의 경우 이런 조건을 부여하지 않아 강성이 실제 프레임에 비하여 떨어진 것과 지그를 적용하지 않은 상태로 용접을 하여 큰 변형이 발생했다고 판단된다.⁶⁾

3.2 용접 해석 결과 및 고찰

열전달 해석결과 초기엔 높은 온도가 집중되어있는 용접 부위의 면적이 작고 상대적으로 대류에 의한 열전달보다 전도에 의한 열전달이 매우 커서 전도에 의한 열의 확산이 주로 발생하였다. 이어 긴 시간을 두고 대류 열전달에 의하여 프레임이 20°C로 냉각되었다.

용접 비드와 횡방향 Pipe가 만나는 Frame의 상면의 중간 부분 Point A와 비드로부터 떨어진 Point B, Point B보다 더 먼 위치의 Point C 그리고 가장 먼 거리에 있는 Point D에서 시간에 따른 온도변화를 Fig. 7에 나타내었다. 초기온도 20도에서 14.4s동안 열원이 가해지면 급격하게 온도가 상승한다. 열원에서 떨어진 Point 일수록 열전달에 의하여 시간을 두고 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 초기엔 열전달에 의하여 열의 확산이 주로 일어나고 시간이 흐름에 따라 열이 분포하는 체적과 면적이 넓어진다. 또한 열의 확산에 따른 열이 분포하는 체적과 면적이 증가함에 따라 대기와 상온 이상의 열의 입출입이 일어난다는 면적이 넓어짐으로 대류열전달 효과가 두드러지게 나타나 전체적으로 온도가 낮아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 7 Variation of frame temperature following as time

Fig. 8 Residual stress analysis results by thermal stress simulation

Table 3 Deformation degree after final welding simulation

	LV	RV	CV	CH
초기 상태(mm)	400.00	400.00	400.00	600.00
해석 후 상태(mm)	397.13	397.44	398.99	599.60
변형 양(mm)	2.87	2.56	1.01	0.40
변형률(%)	-0.72	-0.64	-0.25	-0.07

Fig. 8에 잔류응력의 기준값인 최대 von-Mises 응력값을 나타내었는데 최대 von-Mises 응력값은 438.8 MPa이었으며, 이는 차량의 횡방향 하중에 응력이 높게 나타날 수 있는 부위이다.

Table 3에 나타난 것과 같이 실험결과와 해석결과를 비교하면 전체적으로 해석의 변형이 실험결과에서의 변형에 비하여 다소 작게 발생하였다. 시험과 해석 모두 주요 부위인 LV와 RV에서 최대 변형이

발생하였다. 해석결과와 실험결과를 비교할 경우 변형양은 차이가 있으나 전체적으로 변형의 형태가 유사하다. 변형의 양이 차이를 보이는 이유는 해석에 사용된 재료의 물성치가 단순화되어 차이를 나타냈다고 사료된다. 또한, 실험과 해석의 프레임 형상이 같고 변형의 형태가 유사함으로 프레임 내부의 잔류응력은 유사한 형태라고 판단된다.⁶⁾

3.3 용접 순서에 따른 Frame의 변형과 잔류응력 고찰

Fig. 9에 프레임의 용접 순서를 설명하는 그림을 나타내었다.

Fig. 9 Explanation of welding sequence

용접에 의한 프레임의 변형에 관하여 시험 결과와 검증한 FE-model(finite element)을 이용하여 용접 순서에 따른 프레임의 변형과 잔류응력 해석을 수행하였다. 용접 순서에 따른 프레임 해석 Case 경우의 수는 Table 4와 같다. 프레임의 상·하와 좌·우가 대칭이기 때문에 상부(Top)면의 경우의 수는 6가지 하부면(Bottom)의 경우 상부면의 조합이 하부면에 영향을 미침으로 하부면의 경우 총 36가지의 경우의 수로 조합된다. 또한, 상면과 하면의 용접 순서의 조합에 의하여 총 144가지의 해석 Case로 분류된다. 여기서 Top1과 B1_1의 용접 순서가 합쳐져 하나의 해석 Case가 된다.

Table 4 Frame cases following as welding sequency

Top1 (T1-T4-T3-T2)	Top2 (T1-T3-T4-T2)	Top3 (T1-T2-T3-T4)
B1_1 (B1-B4-B3-B2)	B1_2 (B1-B3-B4-B2)	B1_3 (B1-B2-B3-B4)
B2_1 (B2-B3-B4-B1)	B2_2 (B2-B4-B3-B1)	B2_3 (B2-B1-B4-B3)
B3_1 (B4-B1-B3-B2)	B3_2 (B4-B3-B1-B2)	B3_3 (B4-B2-B3-B1)
B4_1 (B3-B2-B1-B4)	B4_2 (B3-B1-B2-B4)	B4_3 (B3-B4-B1-B2)
Top4 (T1-T3-T2-T4)	Top5 (T1-T2-T4-T3)	Top6 (T1-T4-T2-T3)
B1_4 (B1-B3-B2-B4)	B1_5 (B1-B2-B4-B3)	B1_6 (B1-B4-B2-B3)
B2_4 (B2-B4-B1-B3)	B2_5 (B2-B1-B3-B4)	B2_6 (B2-B3-B1-B4)
B3_4 (B4-B3-B2-B1)	B3_5 (B4-B2-B1-B3)	B3_6 (B4-B1-B2-B3)
B4_4 (B3-B1-B4-B2)	B4_5 (B3-B4-B2-B1)	B4_6 (B3-B2-B4-B1)

모든 경우에 수에 따라 해석을 할 경우 많은 시간이 소요되므로 현장에서 관심이 있는 용접 순서에 따른 Case에 대하여 해석을 수행하였다. 수행한 해석 Case는 Top6_B1_2, Top6_B2_1, Top6_B3_2, Top6_B4_1, Top6_B4_4, Top6_B4_5이다. 해석결과 주요 부위인 LV, RV, CV, CH의 변형양은 Table 5와 같다.

용접부 T1, B1 부분에서 횡방향 Pipe와 만나는 비드는 Joint1_1, 종방향 Pipe와 만나는 비드는 Joint1_2, T2, B2 부분에서 횡방향 Pipe와 만나는 비드는 Joint2_1, 종방향 Pipe와 만나는 비드는 Joint2_2, T3, B3 부분에서 횡방향 Pipe와 만나는 비드는 Join3_1, 종방향 Pipe와 만나는 비드는 Joint3_2, T4, B4 부분에서 횡방향 Pipe와 만나는 비드는 Joint 4_1, 종방향 Pipe와 만나는 비드는 Joint4_2이다.

Table 5 Displacement following as welding sequency (mm)

	LV	RV	CV	CH
Top6_B1_2	1.58	2.19	0.73	0.55
Top6_B2_1	1.93	1.98	0.78	1.08
Top6_B3_2	1.88	1.92	0.75	0.58
Top6_B4_1	1.97	2.04	0.80	1.10
Top6_B4_4	1.71	2.24	0.77	0.67
Top6_B4_5	1.98	1.95	0.78	0.81

Fig. 10 Pre-welding points and maximum stress points

Joint1_1, Joint2_1, Joint3_1, Joint4_1, Joint1_2, Joint2_2, Joint3_2, Joint4_2에서의 von-Mises stress 대부분 가접 위치에서 최대 응력이 발생한다. 가접부 위 응력값의 위치를 Fig. 10과 같다. 가접 부위 중 LH 상단인 LHU와 하단인 LHD의 von-Mises stress를 평균한 응력 Avg_LH와 RH 상단인 RHU와 하단인 RHD의 von-Mises stress를 평균한 응력 Avg_RH의 값을 변형 값인 LV, RV와 비교하였다.

LHU, LHD, RHU, RHD의 von-Mises stress는 Table 6과 같다.

LHU, LHD 응력은 LH의 변위와 직접적인 관계가 있는 부분의 응력이며, RHD, RHU 응력은 RH의 변위와 직접적인 관계가 있는 부분의 응력이다. 따라서 용접시 Frame의 변형과 응력의 관계를 비교하기 위하여 LHU와 LHD의 von-Mises stress를 평균한 Avg_LH와 변위 LV의 관계를 비교하고 RHU와 RHD의 von-Mises stress 평균한 Avg_RH를 변위 RV를 비교하기 위하여 Avg_LH와 Avg_RH를 Table 7과 같이 구하였다.

LV, RV의 변형을 평균한 Avg_LV_RV의 값을 변형이 큰 순으로 해석 Case를 정리하면 B4_1, B4_4, B4_5, B2_1, B3_2, B1_2와 같다. 이 순서에 따라 LV, RV의 변형의 양을 Fig. 11에 나타내었다. 또한 같은 순서대로 응력값 Avg_LH, Avg_RH의 값을 Fig. 11에 비교가 용이하도록 나타내었다. LV, RV, Avg_LH,

Table 6 Von-Mises stress at LHU, LHD, RHU, RHD points (unit : MPa)

	LHU	LHD	RHU	RHD
Top6_B1_2	497.4	499.1	389.4	388.7
Top6_B2_1	407.2	376.3	480.1	462.4
Top6_B3_2	519.0	481.0	346.1	330.7
Top6_B4_1	449.4	468.3	350.6	336.9
Top6_B4_4	428.8	406.3	371.0	428.3
Top6_B4_5	345.0	334.8	479.3	482.8

Table 7 Avg_LH, Avg_RH von-mises stress (MPa)

	Avg_LH	Avg_RH
Top6_B1_2	473.2	389.1
Top6_B2_1	391.8	471.3
Top6_B3_2	500.0	338.4
Top6_B4_1	458.9	343.8
Top6_B4_4	417.6	399.7
Top6_B4_5	339.9	481.1

Avg_RH의 추세선을 보면 LV의 변형이 줄어들면 Avg_LH의 잔류응력이 증가하는 것을 볼 수 있으며 RV의 변형이 줄어들면 Avg_RH의 잔류응력이 증가하는 것을 알 수 있다.

LV의 추세선 기울기가 RV의 추세선 기울기에 비해 더 큰 경향을 나타내며, Avg_LH도 추세선의 기울기가 Avg_RH의 추세선 기울기에 비해 더 큰 경향을 나타낸다. 해석 Case에 따라 LV, RV의 변형이 변하는 것을 알 수 있으며, Avg_LH, Avg_RH의 잔류응력이 변하는 것을 알 수 있다. 해석 Case 중 주요부위의 평균변형이 가장 작은 경우는 B1_2이며 평균 잔류응력이 가장 작은 경우 B4_1이다. 용접 순서에

따라 Frame의 변형과 잔류응력이 변한다.

4. 결 론

실제의 차량 프레임을 단순화 시켜 파이프를 용접실험 하였으며 용접 후의 변형량을 실험으로 구하였다. 용접 시 프레임에 발생하는 변형 양의 정도와 변형 양상을 실험과 해석을 통하여 검증하였다. 실험결과와 용접 후 변형률이 $-0.11 \sim -0.81\%$ 로 나타났으며 주로 파이프 양 끝단에서 더 높은 변형률을 나타냈다. 해석결과와 용접 후 변형률이 $-0.07 \sim -0.72\%$ 로 변화함을 알 수 있었으며 역시 파이프 양 끝단에서 용접 후 더 높은 변형률을 나타내었다. 최대응력이 발생하는 위치는 용접 시작점 근처이며 이는 차량의 횡방향 하중으로 응력이 높게 나타나는 부위이니 차량 내구성 측면에서 주의 깊게 설계할 부위이다. 용접 순서에 따른 프레임의 변형에 관한 연구를 통하여 용접순서에 따른 프레임의 변형을 감소시킬 수 있는 방안을 연구하였다. 변형이 줄어들면 잔류응력이 증가하는 것을 알 수 있었으며 이러한 분석을 통하여 용접 후 변형량을 줄일

Fig. 11 Comparison between LV, RV deformation and Avg_LH, Avg_RH stress

수 있는 용접순서를 결정할 수 있었다.

후 기

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연공동기술개발사업(NO. C0024203)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- 1) K. H. Chang, J. H. Lee and Y. E. Shin, "A Study on the High Temperature Tensile Property and the Characteristics of Residual Stress in Welds of High Strength Steels," Proceedings of Korea Welding Society, Vol.22, No.4, pp.346-354, 2004.
- 2) Y. Cho, "A Study of Predicting Method of Residual Stress Using Artificial Neural Network in CO₂ Arc Welding," Korea Welding Society, Vol.1, No.2, pp.53-59, 2001.
- 3) S. R. Rajesh, "The Effect of Welding Residual Stress on Whole Structure with T-joint RHS," Korea Welding Society, Vol.5, No.1, pp.62-70, 2005.
- 4) H. S. Bang, "The Weldability and Mechanical Behavior of Medium Carbon Steel in CW Nd:YANG Laser Welding," Korea Welding Society, Vol.2, No.1, pp.18-25, 2002.
- 5) J. S. Kim, "Finite Element Analysis and Development of Interim Consolidated S-N Curve for Fatigue Design of Welded Structure," Proceedings of KSME, Vol.27, No.5, pp.724-733, 2003.
- 6) T. W. Park, K. J. Kim, C. P. Han, Y. S. Lee and J. H. Lim, "Deformation and Residual Stress of Automotive Frame by Welding," Transactions of KSAE, Vol.19, No.5, pp.113-117, 2011.