

연료탱크 제작시 시뮬레이션을 통한 용접변형 해석

양영수*, 김덕윤**, 배강열***,#

*전남대학교 기계공학과, **(주)명진기업, ***경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과

Analysis of Welding Distortion during the Production of Fuel Tanks for Excavators

Young-Soo Yang*, Duck-Youn Kim**, Kang-Yul Bae***,#

*Department of Mechanical Engineering, CN UNIV., **Myungjin Co. LTD., ***Department of Mechatronics Engineering, GNUST

(Received 24 August 2016; received in revised form 12 September 2016; accepted 13 September 2016)

ABSTRACT

To attach a fuel tank to an excavator, two sets of mounting plates on which three bosses are attached are welded onto the tank. In this study, the welding process of a fuel tank for an excavator was modeled using a finite element numerical method. The tank was modeled as a simple plate to which the mounting plate or bosses were attached by fillet welding. Thermal and thermo-elasto-plastic analyses of the welding process were carried out to predict the temperature distribution and material distortion during welding, respectively. Three different welding sequences for the tank were also modelled to compare the deformation that occurred due to each welding sequence. The results of the analysis predicted that changing the welding sequence around the mounting plate could not position the boss within the allowable dimensional range. The results also revealed the sequence in which the maximum distortion of the bosses welded onto the tank was 30% less than the maximum distortion due to the other sequences.

Key Words : Fuel Tank(연료탱크), Welding Deformation(용접 변형), Thermo-elasto-plastic Analysis (열변형 해석), Finite Element Method(유한요소법), Welding Sequence(용접 순서)

1. 서 론

굴삭기에 탑재되는 연료탱크는 강제 절단, 판재 성형, 용접, 도장 등의 공정으로 제작된다. 연료탱

크를 중장비에 탑재하기 위해서는 체결부가 필요하여, 연료탱크의 상부에는 좌우 양 쪽에 체결 구멍을 가진 보스(boss)와 이를 지지하는 마운팅 플레이트(mounting plate)가 부가적으로 부착된다. 제작의 효율을 위해 보스는 별도의 위치에서 마운팅 플레이트에 용접되고, 연료탱크에는 보스를 가진 마운팅 플레이트가 용접에 의해 조립된다. 중장비 본체와의 조립을 위해, 연료탱크의 좌우 보스 홀

Corresponding Author : kybae@gntech.ac.kr
Tel: +82-55-751-3384, Fax: +82-55-751-3389

(hole) 간의 거리는 허용 치수를 유지해야 하나, 용접에 의한 변형으로 인하여 홀 간의 치수를 정확하게 유지하여 제작하기가 어렵다. 용접에 의한 변형 문제를 해소하기 위하여는 변형을 감안한 설계와 생산이 필요하고, 이를 위해서는 다양한 용접 순서와 조립 순서에 따른 변형의 발생 형태 및 크기의 파악이 이뤄져야 한다. 따라서 굴삭기의 제작과정에서 발생하는 변형을 예측하여 이를 설계에 반영하고자 하였고^[1], 굴삭기의 용접변형을 용이하게 측정하기 위한 계측시스템을 개발하여, 변형 방지를 위한 제어시스템에 적용하고자 하였다^[2]. 한편, 실질적인 제작과 측정의 방법은 비용과 시간의 관점 그리고 결과 해석의 측면에서 매우 어려운 변형 접근 방법이다. 그러므로 제작 공정을 모델화하고 이론적 또는 수치적인 방법으로 변형을 해석하는 방법을 적용하고 이를 실험을 통해 검증하는 과정이 효율적인 방법이 된다. 용접 구조물의 변형해석을 위해서는 용접에 의한 열전달 그리고 이로 인한 열변형을 고려하여야 하며, 이에 대한 수치해석적 연구가 지속되고 있다^[3~6]. 중장비 제작에서 용접 변형을 감안하여 설계를 개선하고자, 굴삭기 선회부품의 용접에서 열변형의 해석을 유한요소해석 방법으로 수행한 사례가 있다^[7]. 한편, 굴삭기의 연료탱크 제작에서 발생하는 변형의 측정이나 해석에 관한 자료가 부족하여, 변형을 저감하기 위한 제작이나 변형을 감안한 설계의 적용이 어려운 실정이다.

본 연구에서는 연료탱크에 보스를 가진 마운팅 플레이트를 용접하는 공정을 유한요소법을 이용한 수치해석 방법을 활용하여 모사하고, 3차원 열변형 해석을 수행하여 용접에 의한 변형을 예측하고자 하였다. 실제의 연료 탱크를 적합한 경계조건을 가진 강판 모델로 대체하고, 탱크의 대칭 구조를 고려하여, 반 폭의 모델을 설정하고 이에 대칭면을 두어 실제 탱크의 크기 효과를 얻고자 하였다. 가스메탈아크 용접은 가우스 분포를 가진 이동 열원으로 모델링하였다. 제안된 해석 모델을 이용하여, 보스가 용접된 마운팅 플레이트를 연료 탱크에 용접하는 경우에 대한 해석, 그리고 이때의 용접 순서를 변경한 경우에 대한 해석을 수행하였다. 해석에 의한 결과는 탱크의 제작에서 실

제 예측한 치수와 비교하였다. 또한, 용접 변형을 저감할 수 있는 방안으로, 마운팅 플레이트를 연료 탱크에 미리 용접 조립하고, 허용 치수가 실질적으로 중요한 보스를 마운팅 플레이트의 정확한 위치에 취부한 다음 직접 용접하는, 조립 순서를 변경하는 방법을 제안하였다. 제안된 방안에 대한 열변형 해석을 수행하여, 용접 순서의 변경과 조립 순서의 변경에 따른 용접변형의 크기를 비교하고자 하였다.

2. 용접공정 해석

굴삭기에 탑재되는 연료탱크를 Fig. 1에서 보여주고 있다. 강판을 성형하여 탱크의 상하 형태를 제작한 후 좌우 측면에 별도의 강판을 용접으로 조립하여 제작한다. 이에 더하여 연료탱크로서의 기능을 위한 제반 구성품이 조립되고, 특히 중장비에 탑재를 위해, 마운팅 플레이트 두 세트를 대칭으로 본체에 용접하게 된다. 한편, 보스는 다른 위치에서 마운팅 플레이트 위에 미리 용접 조립되며, 중앙에 보스 홀이 위치하고 있다. 보스 홀의 위치가 허용오차범위 내에 있도록 하는 것이 탑재를 위한 치수 관리에 있어 매우 중요하다. 탱크의 필렛 용접은 6축 로봇을 이용한 가스메탈아크 용접(GMAW)으로 수행한다.

탱크의 윗면을 기준으로 탱크의 평면도를 나타내면 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다. 여기서 탱크의 주요 치수와 구성품의 치수 그리고 상대적 위치 등을 보이고 있다. 크기가 가로 788 mm, 세로 427 mm, 두께 3 mm인 평판에, 두께 12 mm의 보

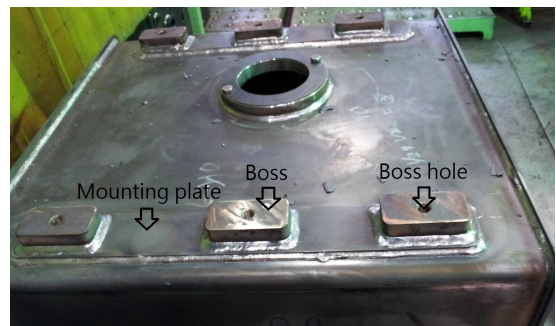


Fig. 1 Fuel tank for excavator and its components

스 부를 표면에 가진 두께 5 mm의 마운팅 플레이트가 부착된 형상이다. 필렛 용접부의 각장은 3 mm로 설정하였다. 탑재를 위해 설정된 각 보스 홀의 허용 위치오차는 ±0.5 mm이다. 한편, Fig. 2는, 마운팅 플레이트와 보스 구조의 구성품이 대칭적으로 놓인 사실을 고려하여, 대칭이 되는 면을 중심으로 탱크 윗면의 1/2 만을 보이고 있다. 대칭을 고려한 이 모델은, 대칭 위치는 용접이 동시에 수행된다고 가정하여, 해석에서도 동일하게 활용하였다. 해석을 위한 XYZ 좌표계의 원점은 평판의 윗면 아래 모서리에 두었다. 제시된 모델은 6개의 벽면을 가진 탱크에서 윗면 만이 대상이 된다. 바닥 면 등 나머지 면은 용접 변형에 영향을 미치지 않을 것으로 가정하여 제외하되, 변형에 영향을 미칠 수 있는 면은 경계 조건을 활용하여 간접적으로 그 효과를 고려하고자 하였다.

연료탱크에 대한 용접공정의 해석은, Fig. 2에서 제시한 모델로써, 마운팅 플레이트를 평판에 또는, 변형 저감을 위한 대안으로, 보스를 마운팅 플레이트를 가진 평판에 필렛용접으로 조립하는 공정을 대상으로 하였다. 변형 해석은 열전달 해석과 열변형 해석으로 구성되고, 열전달 해석의 시간 단계별 결과를 활용하여, 각 단계에 해당하는 열 변형 해석을 수행한다.

필렛 용접의 열전달 해석에서는 먼저 특히 열원이 되는 용접 아크의 모델이 필요하다.

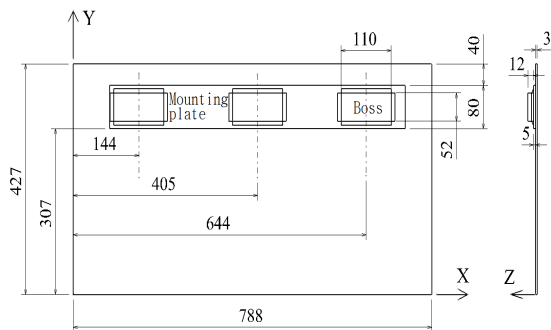


Fig. 2 Dimensions of tank and its components and their relative distances

아크 열원은 정규분포 형태를 가진다고 가정하면, r 의 위치에 있는 입열량은 다음과 같다^[8].

$$q(r) = \frac{3\eta VI}{\pi r^2} e^{-\frac{3r^2}{r^2}} \quad (1)$$

여기서, η 는 공정의 열효율, V 는 전압, I 는 전류, \bar{r} 는 유효 아크 반경이다. Y 방향을 따르는 필렛 용접은 이동열원의 위치(\acute{Y})에서 아크 중심이 상하 각장(h)의 1/2 위치인 ($h/2, \acute{Y}, h/2$)에 놓이고, 용접 와이어와 X 축과 Z 축이 이루는 각도를 각각 45° 라고 두면, 즉 45° 기울어진 형태로 입열이 되어, 비드 면에 수직으로 입열이 된다. 여기서 $\acute{Y} = Y - vt$ 로, 이동열원 중심으로부터의 Y 방향 상대 거리이다. 비드가 없는 모재부에는 식 (1)과 같이 아크 중심으로부터의 거리를 감안하여 입열량의 크기가 정해지되, X, Z 각각에 수직으로 인가되고, 필렛 용접부 표면과 $X > h$ 이고 $Z = 0$, 그리고 $Z > h$ 이고 $X = 0$ 인 모재 부분에 아크 열이 인가되도록 하였다. 열원 중심으로부터의 용접 방향에 직각 방향으로 거리는 다음과 같다.

$$\acute{X} = \sqrt{X_c^2 + Z_c^2} \quad (2)$$

여기서, $X_c = X - h/2, Z_c = Z - h/2$ 이다. 따라서 열원 중심으로부터의 필렛 용접부 또는 주위 모재의 임의 위치까지 거리 r 은 다음과 같이 산출된다.

$$r = \sqrt{\acute{X}^2 + \acute{Y}^2} \quad (3)$$

용접부 내의 열전달 현상을 나타내는 지배방정식에서, 전도와 대류 효과만을 고려하여, 유한요소정식화 과정을 통하여 다음과 같은 유한요소방정식을 얻게 된다^[9].

$$[C] \left[\frac{dT}{dt} \right] + ([K_c] + [K_h])[T] = [R_q] + [R_h] \quad (4)$$

여기서, $[C]$ 는 열용량을 포함하는 매트릭스, $[K_c]$ 와 $[K_h]$ 는 각각 전도와 대류 계수를 포함하는 매트릭스, $[R_q]$ 는 입열 벡터, $[R_h]$ 는 대류 항을 포함하는 벡터이다. 이를 통해 Δt 시간 경과 후 각 절점에서의 온도 증분 ΔT 를 계산할 수 있게 된다.

용접 열변형 해석을 위한 지배방정식은 평형방정식을 이용하고, 이를 유한요소방정식으로 나타내면 다음과 같다^[10].

$$[K][U] = [F] \quad (5)$$

$$[K] = \int_V [B]^T [C] [B] dV \quad (6)$$

$$[F] = \int_V [B]^T [C] ([\epsilon]_p + [\epsilon]_{th}) dV \quad (7)$$

여기서 $[U]$ 는 변위 벡터이고, $[B]$ 는 변형률과 변위 관계 매트릭스, $[C]$ 는 응력과 변형률 관계 매트릭스이다. 전변형률(ϵ)은 다음과 같이 탄성변형률(ϵ_e), 소성변형률(ϵ_p) 그리고 열변형률(ϵ_{th})의 합이다.

$$[\epsilon] = [\epsilon]_e + [\epsilon]_p + [\epsilon]_{th} \quad (8)$$

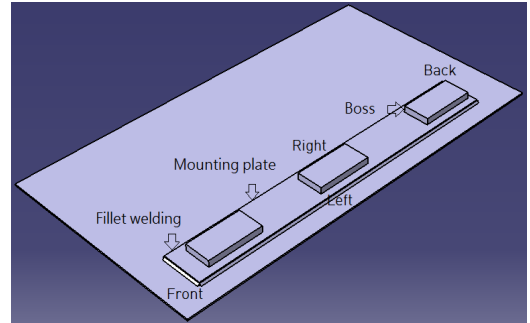
여기서 열변형률은 열팽창계수와 온도증분의 곱이 되고, 변위와 변형률의 관계, 그리고 탄성변형률과 응력의 관계는 다음과 같다.

$$[\epsilon] = [B][U] \quad (9)$$

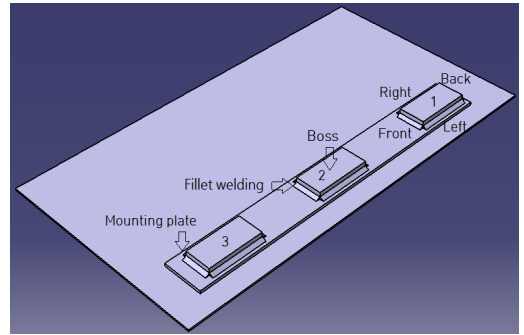
$$[\sigma] = [C][\epsilon]_e \quad (10)$$

식 (7)의 우변에서 $[\epsilon]_{th}$ 의 값은 온도 분포 해석 결과를 이용하여 계산할 수 있으나, $[\epsilon]_p$ 는 변위 $[U]$ 의 크기와 종속적 관계에 있기 때문에, 다음과 같이 소성변형률 가정하여, 변위를 구하게 된다.

$$[\epsilon]_p^{i+1} = [\epsilon]_p^i + [d\epsilon]_p \quad (11)$$



(a) for path sequence



(b) for assembly sequence

Fig. 3 Analysis model of fuel tank

계산된 변위를 이용하여 새로운 소성변형률을 구하고, 이와 같은 과정을 반복적으로 수행하게 된다. 반복 과정에서 연속된 두 변위 차이가 허용한도 내에 있게 되면, 수렴이 완료된 것으로 판단한다.

본 연구에서는 위에 나타난 유한요소방정식의 계산을 포함한 연료탱크 용접공정의 열전달과 열변형 모델의 해석에 상용 소프트웨어인 ABAQUS를 사용하였다^[11]. 용접공정에 대한 해석은 3가지로 수행하였다. 해석을 위한 모델은 Fig. 3에 보이고 있다. 첫째는, Fig. 3(a)에 보인 바와 같이, 실제 제작에서 수행하고 있는 방법으로, 3개의 보스별도의 위치에서 마운팅 플레이트에 용접을 하고, 이 마운팅 플레이트 주위를 탱크 위에서 필렛용접으로 조립하는 방법이다. 여기서 용접을 Back, Left, Front, Right 순서로 수행한 다음 냉각을 할

때, 시계방향(CW) 순서라고 한다. 둘째는 Back, Right, Front, Left 순서로 용접을 하고 생각하는 경우를 반시계방향(CCW) 순서라고 한다. 셋째는, Fig. 3(b)에서 보인 바와 같이, 보스 홀의 변형을 저감하기 위해 제안하는 방법으로, 마운팅 플레이트를 탱크 위 해당 위치에서 이미 용접한 상태에서, 보스의 홀을 설계 위치에 정확히 취부한 다음, 보스 주위를 필렛 용접하는 과정을 모사한 조립 순서 변화에 대한 해석이다.

해석에서는 3가지 용접 방법에서의 용접 진행 시간에 따른 온도 분포, 변형 분포를 계산하고, 용접 종료 후 상온 상태에서 얻어진 최종 변형 형태 및 크기를 비교하였다. 이로써 용접 방법에 따른 변형 정도의 변화를 비교하고자 하였다. 특히, 현재 사용되는 용접 방법에 의한 변형의 실 계측치와 동일한 방법을 모델화한 해석에 의한 예측 결과를 3개의 보스 홀을 기준으로 비교하였다.

유한요소해석을 위하여 각각의 탱크 모델을 유한요소로 분할하였다. 대표적으로, 보스 용접을 대상으로 하는 모델을 Fig. 4에 나타내었다. 탱크 윗면과 마운팅 플레이트 그리고 보스 등이 유한요소로 분할된 상태를 보여 주고 있다.

해석에서는 약 17,000개의 선형 4면체 요소를 사용하였고, 필렛 용접부 주위에서는 절점 간격을 작게, 열의 영향을 작게 받는 탱크 모재에는 요소를 크게 나누었고, 최소 절점 간격은 1.5 mm이었다.

용접에 의한 온도 분포 및 열이력 해석을 위해 대칭면($Y=0$)에서는 단일 조건을 적용하고, 필렛 용접부를 따라서 열원이 이동하면서 입열을 하도록 하였다. 나머지 면에서는 대기로 대류에 의한

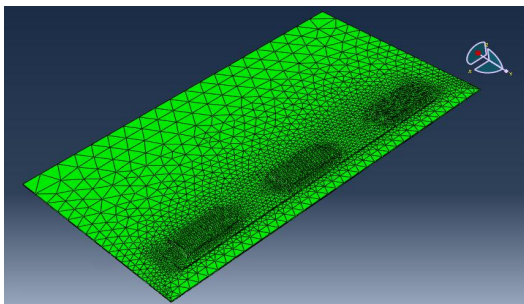


Fig. 4 Finite element mesh for tank model

Table 1 Welding parameters for fillet welding of fuel tank

Welding current (A)	Welding voltage (V)	Efficiency [14]	Effective arc radius (mm)	speed (mm/s)
240	25	0.7	8	10

열전달이 발생하도록 하였다. 열원이 마운팅 플레이트와 보스의 주위 필렛부를 정확히 추적할 수 있도록, 용접 시간, 용접 속도, 용접부 위치를 활용하여, 포트란 언어로써 별도의 사용자 프로그램을 작성하고 활용하였다. Fig. 3에서 보인, Left와 Right 용접에서는 X 방향을 따라 열원이 이동되게 하고, Back과 Front 용접에서는 Y 방향을 따라 열원이 이동되게 하였다. 이를 이용하여, 용접 순서의 변경, 용접 요소의 변경 등에 대응하여 적합한 경로를 따라 입열 위치의 순차적 이동이 가능하게 하였다. 필렛 용접부는 미리 상온 상태로 생성해 둔 후, 표면에 가열하여 용융되는 것으로 가정하였다. 마운팅 플레이트와 각 보스의 네 모서리 용접 후는 상온까지 냉각하는 동안의 온도분포를 해석하였다. 보스 필렛 용접의 경우는, 각 보스 주위에 Back, Left, Front, Right 순서로, 시계방향으로 용접이 이뤄지게 하였고, Fig. 3에서 보인 보스 1, 2, 3의 순서로 용접이 진행되게 프로그램을 작성하였다. 해석 영역인 용접 부재의 초기 온도는 20°C , 대류계수는 $15 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 설정하였다[12]. 온도해석에서 시간 간격은 최대 온도 증분이 50°C 가 넘지 않도록 설정하였다.

응력 및 변형 해석에서는 온도분포 해석의 결과를 각 시간 단계별로 활용하여 각 단계에서의 해석을 수행하였다. 열에 의한 응력 및 변형의 해석에서, 대칭면($Y=0$)에서는 Y 방향 변위를 구속하고, Fig. 2에서 보인 좌표계에서, X 가 0인 (0, 0, 0)과 (0, 427, 0)의 두 위치에서는 X 방향의 변위를 구속하였다. Y 가 427 mm인 (0, 427, 0), (394, 427, 0), 그리고 (788, 427, 0)의 세 위치에서 Z 방향 변위를 구속하였다. 이와 같은 구속으로 해석

영역의 강체 변형을 방지하게 하였고, 특히 Y가 427 mm인 위치에서 Z 방향 변위의 구속은 탱크를 구성하는 세로 벽의 효과를 인가하고자 한 것이다.

탱크의 재질은 연강으로, 열전달 및 변형 해석에 필요한 재질의 열적, 기계적 성질은 연강의 것을 활용하였고, 온도의 변화에 따라 재질의 성질 변화를 고려하였다^[13].

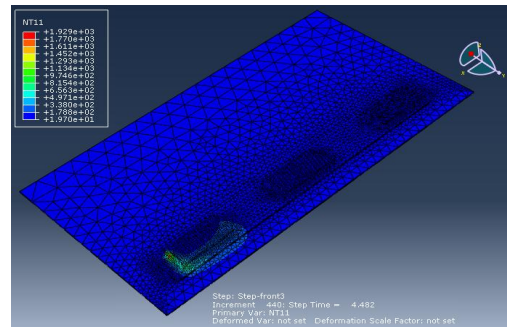
탱크의 필렛 용접에 사용되는 가스메탈아크 필렛 용접 조건은 Table 1과 같고, 이와 같은 조건을 해석에서도 동일하게 적용하였다.

3. 실험

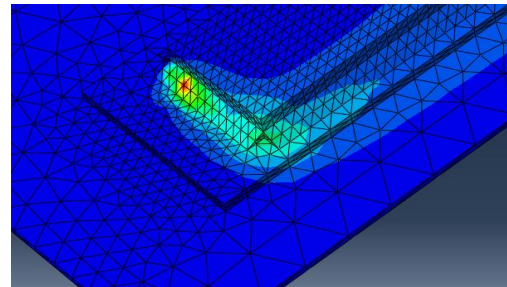
연강 재질로 제작된 연료탱크에 보스를 가진 마운팅 플레이트의 용접을 실시하고 변형을 측정하기 위한 실험을 실시하였다. 실험에서의 용접은, 보스가 미리 용접된 마운팅 플레이트를 탱크 위에 용접하는 경우였고, 시계방향으로 용접하는 순서를 채용하였다. Fig. 2에 보인 치수를 가진 연료탱크와 마운팅 플레이트를 로봇을 이용하여 가스메탈아크 용접하였다. 용접 조건에서 전류, 전압, 용접속력은 해석에 나타난 크기와 동일하였고, Fig. 1에 용접된 결과를 보여주고 있다. 용접과 변형계측은 동일한 조건으로 4개 탱크에 대하여 실시하였고, 변형의 계측은 3차원 측정기인 레이아웃 머신을 이용하여, 용접 후 각 보스 구멍의 중앙이 설계치로부터의 편이된 직선 거리를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

제안된 연료탱크 모델을 이용한 열전달 해석은 용접의 시작에서 종료까지의 시간 전체에 대해 단계별로 수행되었으며, 후처리 과정을 통해 모델 전체의 온도 이력을 파악할 수 있었다. Fig. 5는 단계 별로 얻어지는 전형적인 온도해석의 결과로, 보스 조립을 적용하는 경우의 해석에서 3번째 보스 Front 부분의 용접 종료 직전에 나타나는 온도 분포를 보여 주고 있다. Fig. 5(a)는 해석영역 전체에 나타나는 온도분포이고, Fig. 5(b)는 용접이 진



(a) overall view

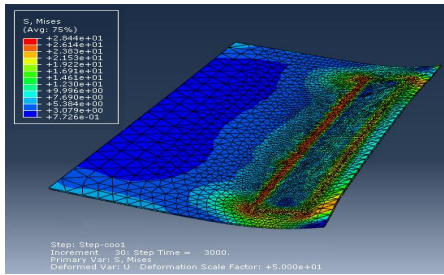


(b) close-up view

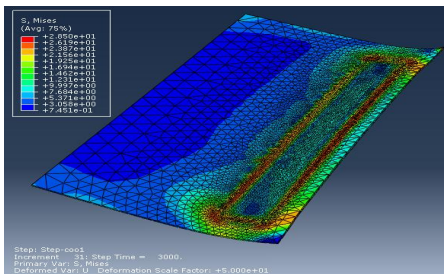
Fig. 5 Temperature distribution during fillet welding for front of boss

행되고 있는 보스의 Front 부분을 근접해서 보여 주고 있다. 용접 토치가 놓이는 위치에서 용융점이상으로 가열되고, 이 위치를 기준으로 필렛 용접부에 정확히 가열이 진행되고 있음을 알 수 있다.

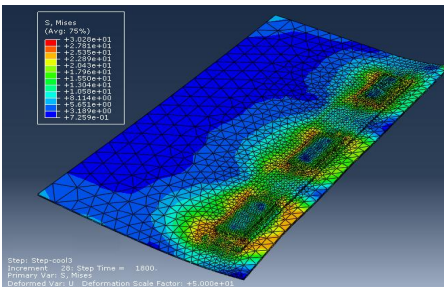
각 시간 단계 별로 저장된 탱크 모델에 대한 열전달 해석 결과를 이용하여 열응력과 변형해석을 수행하였다. Fig. 6은 탱크 모델의 상당응력으로 나타난 잔류 응력과 50배로 확대된 잔류 변형을 보여 주고 있다. Fig. 6(a)는 마운팅 플레이트 용접에서 시계방향 순서로 용접한 결과로, 용접부 주위에 항복응력 수준의 잔류응력이 나타나고 있고, 용접부 주위에 굽힘 변형이 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 마운팅 플레이트를 반시계 방향으로 용접한 경우에 대한 해석 결과로, 잔류응력의 크기나 변형의 형상은 크게 차이가 나타나지 않는 것으로 판단된다. Fig. 6(c)는 마운팅 플레



(a) Clockwise welding of mounting plate



(b) Counterclockwise welding of mounting plate



(c) Boss welding

Fig. 6 Residual stress and deformation of fuel-tank model for different welding sequences or different assembly positions

트 위에 3개의 보스를 각각 용접한 후에 나타난 잔류응력의 크기 분포와 변형의 형상을 보여 주고 있다. 용접부 주위에서 여전히 응력의 크기가 크게 나타나나, 잔류 응력의 분포 형태나 변형의 형상이 마운팅 플레이트 용접의 경우와 다소 다르게 나타나고 있다.

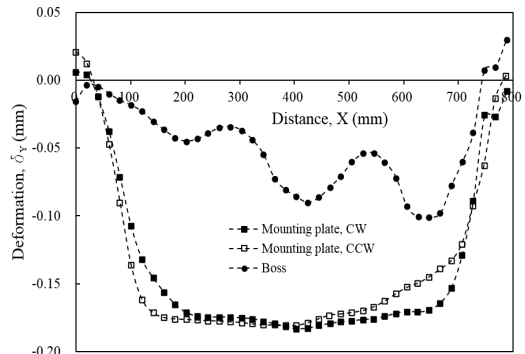


Fig. 7 Lateral deformation of model at Y=427 mm along X direction

해석결과에서는 모델 각 절점의 변형 이력 및 잔류 변형의 크기가 산출되므로, 이를 활용하여 용접 방법에 따른 탱크의 변형 크기를 비교할 수 있다. Fig. 7은 탱크 모델의 폭 방향 끝 위치($Y=427$ mm)에서, 길이 방향(X 방향)에 따른 Y 방향 변형, 즉 용접에 의한 횡 수축량을 나타내고 있다. 마운팅 플레이트를 용접하는 경우에는 중앙에서 최대 약 0.18 mm 수축되는 것으로 예측되었고, 길이가 약 150에서 700 mm 구간에서는 균일한 크기의 변형을 보이고 있으며, 시계 방향과 반시계 방향에 의한 용접 순서 차이는 크지 않은 것으로 판단할 수 있다. 세 개의 보스를 각각 용접한 결과, 횡방향으로 최대 0.1 mm의 수축 변형을 야기하는 것으로 예측되었다. 수축되는 형태는 길이 방향에 따라 균일하지 않게 나타나고 있다. 이는, 3개의 보스로 구성되어, 용접이 단속적으로 이루어진 결과로 파악된다. 한편, 보스 용접의 경우, 기존 마운팅 플레이트의 경우에 비하여, 평균 횡 수축 변형이 약 50% 정도 줄어들 것으로 예측할 수 있다.

용접에 의한 Z 방향 변형은 처짐량을 이용할 수 있다. 경계조건에서 Y 가 427 mm 위치에서 일부 Z 방향 변위를 구속하였으므로, 길이 방향에 따른 상하방향 최대 처짐량은 Y 가 0 mm인 대칭면에서 나타날 것으로 기대할 수 있고, Fig. 8은

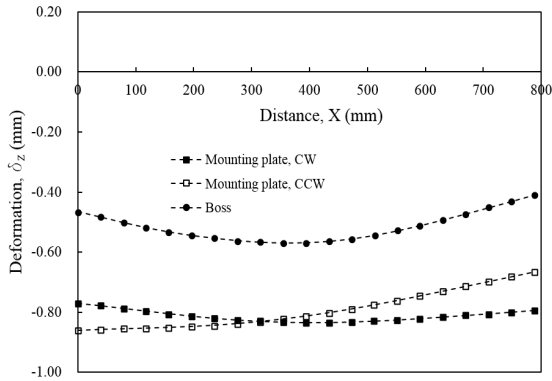
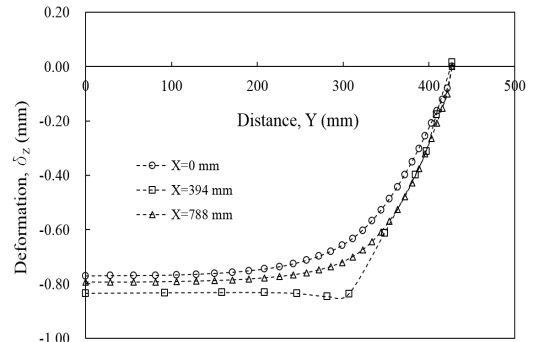


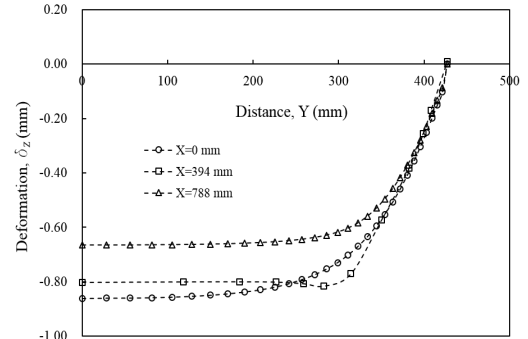
Fig. 8 Deflection of model at Y=0 mm along X direction

대칭면에서 나타나는 처짐량을 보이고 있다. 길이 방향에 따라 전체적으로 아래 방향으로 처짐이 발생한 것을 알 수 있고, 마운팅 플레이트의 경우는 최대 약 0.85 mm, 보스의 용접인 경우에는 최대 약 0.6 mm 정도의 처짐량이 발생하는 것으로 예측되었다. 마운팅 플레이트의 용접 순서에 의한 차이는 변형 형상의 차이는 있으나, 절대 크기는 큰 차이가 없었다.

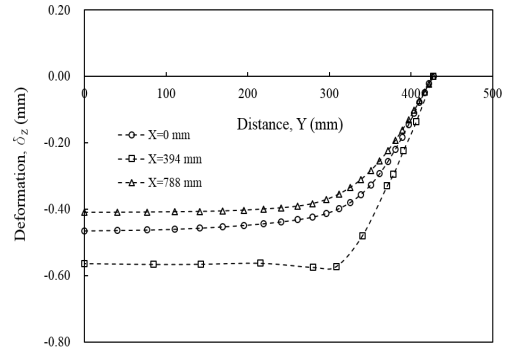
Fig. 9는 폭 방향에 따라 나타나는 상하방향 처짐 형태를 길이 방향 세 위치에서 보여 주고 있다. Fig. 9(a)는 마운팅 플레이트를 시계방향 용접한 경우의 변형 형태이고, Fig. 9(b)는 반시계 방향 용접의 경우에 예측되는 변형 형태이다. Fig. 9(c)는 보스 용접에 의한 처짐의 형태를 보여 주고 있다. 시계 방향 용접의 경우, 상하 처짐이 길이 방향에 따라 큰 차이가 없으나, 반시계 방향의 경우, 길이 방향 양단의 경우 처짐이 줄어들고 있고, 상하 처짐을 다소 축소할 수 있음을 보여 주고 있다. 용접부 주위에서 급격한 처짐이 발생하게 되는 것을 알 수 있다. 이는 X가 394 mm의 위치에서 보여 주듯, 마운팅 플레이트가 놓이는 경우에는 더 급하게 발생하고 있다. 보스 용접의 경우는, 이미 마운팅 플레이트가 평판에 부착되어 있는 상태이기 때문에, 모델 자체의 강성이 더 높기 때문에 더 작은 변형이 발생하였다고 판단된다.



(a) Clockwise welding of mounting plate



(b) Counterclockwise welding of mounting plate



(c) Boss welding

Fig. 9 Deflection of model along Y direction for different welding sequences or different welding assemblies

Fig. 10은 모델의 길이 방향 끝(X=788 mm)에서의 폭에 따른 길이 방향 수축량을 나타내고 있다. 폭 방향에 따라 수축량이 증가되며, 특히 용접부

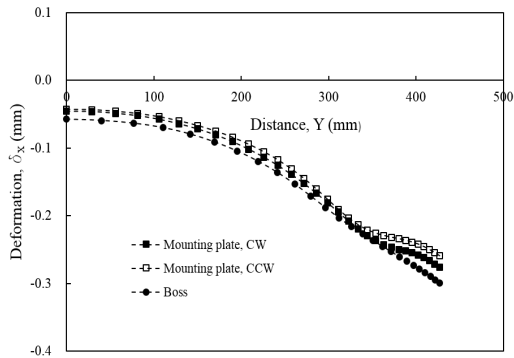
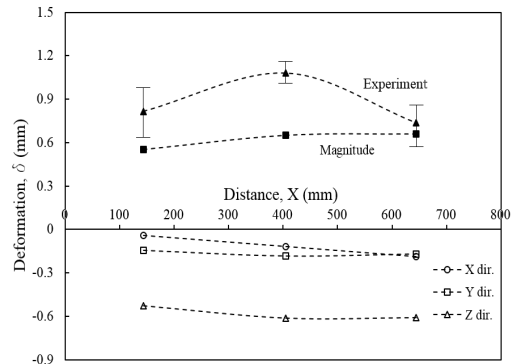


Fig. 10 Longitudinal deformation of model at X=788 mm along Y direction

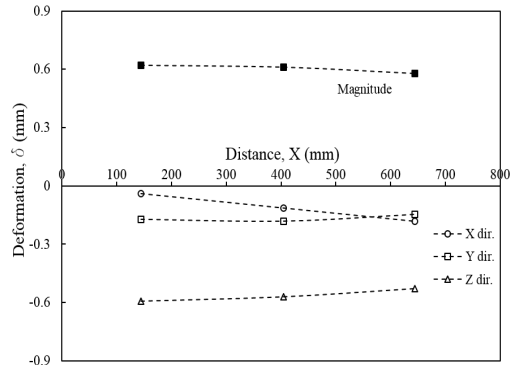
주위에서는 최대 약 0.3 mm의 수축이 예측된다. 길이 방향 수축에서는 보스 용접의 경우가, 용접부 근방에서 양상이 다소 다르고, 다소 크게 나타나고 있다.

폭, 길이, 상하 등의 세 방향 변형을 벡터 합성 형태로 합치면, 변형의 절대 크기를 산출할 수 있다. 마운팅 플레이트 용접 순서 변경에 따른 변형의 크기와 보스 용접에 의한 변형의 크기를, 세계의 보스 홀이 놓이는 위치(Y=347 mm)에서, 성분별 그리고 절대 크기로 나타내고자 하였다. Fig. 11은 각 방법에 대한 변형 예측 결과로, 가로 축의 위치는 보스 홀의 X 방향 위치이고, 세로 축은 성분별 변형의 크기와 합성된 변형의 크기를 각각 나타내고 있다.

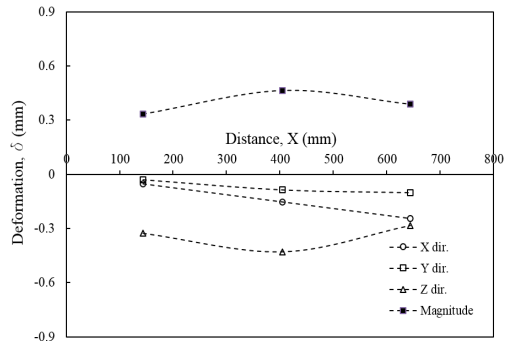
Fig. 11(a)는 시계 방향 용접의 경우로, 변형은 최대 0.66 mm의 크기로 수축될 것으로 예측되었다. 이는 탱크의 탑재를 위해 보스에 허용하고 있는 위치오차범위를 벗어나고 있다. 한편, 실제 4개의 탱크 용접 후 3개의 보스 홀에서 각각 측정된 결과, 1번 보스는 평균 0.8 mm, 2번 보스는 평균 1.08 mm, 3번 보스는 0.73 mm의 변형이 발생하였다. 따라서 측정 결과보다는 변형 예측 결과가 작게 나타났다. 이는 실제 구조물과 모델의 차이에 기인한 것으로, 실제 구조물의 벽면이 가진 더 낮은 강성으로 인하여 변형이 더 크게 발생한 것으로 판단된다. 반시계 방향 용접의 경우는, Fig. 11(b)와 같이, 최대 0.62 mm로 다소 작게 변형이



(a) Clockwise welding



(b) Counterclockwise welding



(c) Boss welding

Fig. 11 Components and magnitude of deformation at positions of boss holes for different welding sequences or different assemblies

발생할 것으로 예측되었고, 특히 보스 용접의 경우, Fig. 11(c)와 같이, 최대 변형이 0.46 mm로 약 30% 정도 축소되어, 허용오차범위 내의 변형이 유발될 것으로 예측되었다.

5. 결 론

굴삭기 연료탱크의 탑재부 용접 공정에 대한 수치해석 모델을 제시하고, 용접 및 조립 순서에 변화에 따른 용접 변형의 크기를 수치해석 방법으로 예측하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수치해석을 통해 연료탱크 용접에서 열응력 및 변형의 크기를 예측할 수 있었고, 또 용접 순서의 변경이나 조립 순서의 변경에 대하여 용이하게 그 효과를 판단할 수 있었다.
2. 보스를 가진 마운팅 플레이트를 시계 방향으로 용접하는 경우는 최대 변형이 0.66 mm, 반시계 방향으로 용접하는 경우는 0.62 mm의 크기로 발생하는 것으로 예측되어, 용접 순서의 변경에 의한 변형 저감 효과는 크게 나타나지 않는 것으로 예측되었다.
3. 마운팅 플레이트가 용접된 상태에서 보스를 용접하는 조립 순서의 경우에는, 보스 홀의 변형이 0.46 mm 발생하는 것으로 예측되어, 약 30%정도 변형이 저감될 수 있었다. 이는 보스 변형의 허용오차 이내인 정도로, 변형 저감의 측면에서는 조립 순서를 변경하는 것이 타당함을 알 수 있었다.
4. 제안된 모델 및 해석 방법을 적용함으로써, 탱크의 크기 변화, 용접 부의 크기 및 조건의 변화, 그리고 용접 부재의 위치 변화 등에 따른 변형의 예측이 가능하며, 변형을 감안한 설계와 변형을 저감하기 위한 다른 방안의 검토에 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

후 기

“이 논문은 2015년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Han, S. H., “A study on the welding distortion for the upper plate of excavator”, MS. thesis, Chonnam National Univ., 1996.
2. Lee, J. H., Kim, I. S., Jang, H. K., Kim, H. J., Kwak, S. K. and Ryoo, H. S., “A study on measurement system for welding distortion on light weight material of 30-ton excavator”, Proceedings of Annual Spring Conference of KWJS, pp. 119, 2010.
3. Zhen, C., Zhechao, C. and Ajit, S. R., “Influence of welding sequence on welding deformation and residual stress of a stiffened plate structure”, Ocean Engineering, Vol. 106, pp. 271-280, 2015.
4. Pandey, C., Giri, A. and Mahapatra, M. M., “On the prediction of effect of direction of welding on bead geometry and residual deformation of double-sided fillet welds”, International journal of steel structures, Vol. 16, No. 2, pp. 333-345, 2016.
5. Eslampanah, A. H., Aalami-aleagha, M. E., Feli, S. and Ghaderi, M. R., “3-D numerical evaluation of residual stress and deformation due welding process using simplified heat source models”, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 29, No. 1, pp. 341-348, 2015.
6. Lee, D. Y., Park, K. D. and Kang, D. M., “A study on the finite element analysis in friction stir welding of Al alloy”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 5, pp. 81-87, 2015.
7. Kim, D. E., Hea, D. E., Han, G. N., Hwang, Y. J., Lee, S. S. and Ahn, J. J., “A study on thermal deformation by welding heat imposed at assembly of excavator rotation part body”, Proceedings of Annual Autumn Conference of KSME, pp. 37-41, 2006.
8. Kala, S. R., Prasad N. S. and Phanikumar, G., “Studies on multipass welding with trailing heat sink considering phase transformation”, Journal of

- Materials Processing Technology, Vol. 214, pp. 1228-1235, 2014.
9. Yang Y. S. and Kim, J.-W., "Analysis of weldment by using finite element method(1) - Heat flow in weldment", Journal of Welding and Joining, Vol. 29, No. 2, pp. 138-140, 2011.
 10. Yang Y. S. and Kim, J.-W., "Analysis of weldment by using finite element method(3) - Residual stress and distortion in weldment", Journal of Welding and Joining, Vol. 29, No. 4, pp. 363-364, 2011.
 11. ABAQUS, ABAQU Suser's manual, version. 5.5. Pawtucket, RI: Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., 1995.
 12. Ghosh, A., Kumar, P. and Kumar, A., "Numerical analysis of heat transfer of arc welded plate", 5th Int. Manufacturing Technology, Design and Research Conference, pp.273-293, Dec., 2014.
 13. Bae, K. Y., Yang, Y. S., Hyun, C. M. and Cho, S. H., "Simplified mathematical formulas for the prediction of deformations in the plate bending process using an oxy-propane gas flame", Proc. IMechE Vol. 223 Part B: Jorunal of Engineering Manufacture, pp. 155-161, 2009.
 14. Jung, K. N., Lee, J. H., Lee, J. Y., and Yoo, C. D., "Heat Source modeling of GMAW considering metal transfer", Journal of KWJS, Vol. 22, No. 2, pp. 69-77, 2004.