

주조 프레임을 강 구조물로 대체에 관한 연구

홍민성*, 신근하*, 정웅**

A Study on Substitution of Steel Structure for Casting Frame

Minsung Hong*, Keunha Shin*, Woong Chung**

Abstract

A machine frame has been manufactured by casting. However, due to the development of the industrial society, 3-D duties was refused. Especially, the declination of the casting industry makes it difficult to produce the frame. Many companies still manufacture the small casting products. The large casting products are extremely limited and manufactured for their own use. Therefore, it is difficult to keep the term of order.

In this study, the characteristics of steel structure which is produced by welding were identified in the view of mechanical strength to substitute steel structure for casting frame. But welding structure has the residual stress, HAZ and welding deformation. Residual stress and HAZ especially cause crack growth. The proposed steel structure, based on the simulation and experiment(tensile curve and S-N curve), can reduce not only the producing term but also the weight of the frame.

Keywords : welding residual stress (용접잔류응력), HAZ (열영향부), S-N curve (S-N 곡선), welding deformation (용접변형), crack growth (균열성장)

1. 서론

최근 3D 업종을 기피하는 현상으로 인하여 주조 산업이 쇠퇴하게 되었다. 특히 볼트 성형기의 프레임과 같은 큰 주물을 제작할 수 있는 곳은 극히 제한되어 있기 때문에, 납품 기한을 맞추기 어렵고 생산성이 떨어진다. 이러한 이유로 본 논문에서는 용접을 이용하여 주조프레임을

강 구조물로 대체하고자 한다.

단조나 리벳이음 등 다른 접합 방법에 비하여 용접시의 재료 및 경비의 절감, 높은 이음 효율, 공수의 감소, 뛰어난 유밀성, 기밀성, 수밀성 등의 많은 장점을 가지고 있다.¹⁾ 그러나, 단시간의 국부적인 가열에 따른 열응력, 냉각시의 수축으로 인한 잔류응력 및 뒤틀림의 발생등이 주된 문제가 되고 있다.²⁾ 특히 용접으로 인하여 발생한 균

* 아주대학교 공과대학 기계 및 산업공학부

** 아주대학교 기계공학과 대학원

열은 반복하중에 의하여 쉽게 성장하여 결국 구조물의 파괴를 야기시키기도 한다. 잔류응력은 이런 피로 균열의 성장 거동에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문에, 이에 대한 많은 연구가 활발히 진행되어 왔다.^{3)~7)} 또한, 이러한 잔류응력으로 인하여 용접 구조물은 뒤틀림으로 인한 변형을 가져오게 된다.

따라서, 본 논문에서는 주조 프레임을 대체할 강판의 재질을 선정하고, 수치 해석을 통한 모델링으로 구조해석을 하였다. 또한 이에 따른 용접방법과 변형과 강도적인 측면에서의 최적 조건을 찾아 주조 프레임을 강 구조로 바꾸어 기계적 강도 향상을 도모하였으며, 그 특성을 분석하였다.

2. 볼트성형기 프레임의 구조 및 모델링

본 논문에서는 볼트성형기의 프레임을 대상으로 하였으며, 그 구조는 Fig. 1에서 나타내었고, 프레임에 사용되는 주강(SC46)의 물성치는 Table 1과 같다.⁸⁾ 그리고 안전 계수는 3으로 설정하였다.

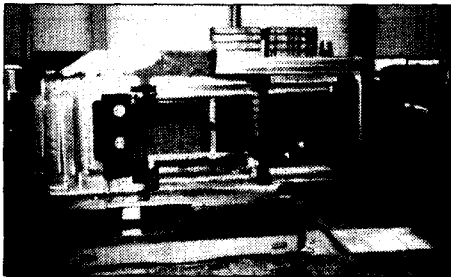


Fig. 1 Shape of frame

Table 1 Properties of SC46

Component	Properties
Component	$C \leq 0.35$ $P \leq 0.040$ $S \leq 0.040$
Young's Modulus	21108.2 kgf/mm^2
Poisson's ratio	0.3
Tensile strength	46 kgf/mm^2
Yield strength	23 kgf/mm^2
Density	7.825×10^3 kgf/mm^3
Safety ratio	3

충격을 가장 많이 받는 금형부분과 프레임에서 가장 두꺼운 구동부를 분리하여 역학적 FEM(Finite Element Method)해석을 실시하였고, 골조 부분은 전체적인 해석을 실시하였다. FEM해석 소프트웨어는 LUSAS^{9),10)}를

사용하였다.

2.1 프레임 모델링

경계조건은 프레임이 기계에 고정되는 부분을 모든 방향에 대해서 고정을 하였으며, 하중 조건으로는 충격 순간의 200ton의 하중을 균일한 압력으로 가한 후 정적 해석을 실시하였다.

볼트성형기에 장착되는 프레임은 정적 및 동적 해석을 위해서 프레임을 3차원 solid element로 모델링 하였고, 유한 요소 모델에 대한 자료들은 Table 2와 같으며 Fig. 2에 모델을 나타내었다.

Table 2 FEM data for frame

Number of Node	2945
Number of Element	520

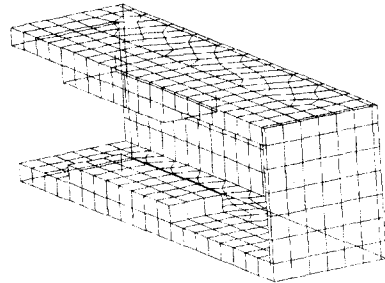


Fig. 2 FEM model for frame

2.1.1 정적 응력 해석

정적 응력 해석을 수행한 결과 회전축이 작용하는 곳의 응력은 $1.89056 kgf/mm^2$ 로 나타났고, 전체적인 정적해석의 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 이 응력값은 안전계수를 만족시킨다.

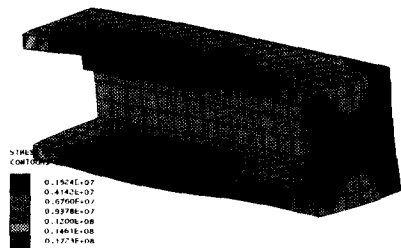


Fig. 3 Stress distribution of frame

2.1.2 동적 응력 해석

동적응력해석을 위해 다음과 같은 식들을 적용하였다.

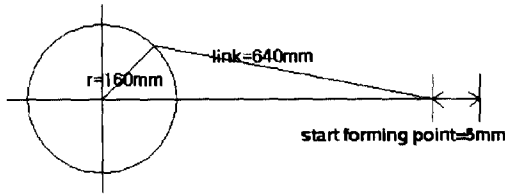


Fig. 4 Cam driving device

$$\omega = 2\pi \times \omega_{rpm} / 60 \quad (1)$$

$$\cos \theta = \frac{r^2 \times d_i^2 - l^2}{2 \times r \times d_i} \quad (2)$$

$$t_{impact} = \omega / \theta \quad (3)$$

여기서, ω 는 각속도, ω_{rpm} 은 축의 분당 회전 속도, θ 는 충격시 축의 회전각, r 은 축의 반지름, d_i 는 충격의 시작점을 나타내고, l 은 링크의 길이이며, t_{impact} 는 충격시간을 나타낸다.

충격시간은 위의 식들로부터 0.016434sec로 계산되었고, 이 값을 모델에 적용하였다. 그리고 프레임에 적용된 구속 조건과 힘의 양은 정적 해석과 같이 수행되었다.

해석의 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 마찬가지로 허브에 걸리는 응력은 1.47kg/mm²로 나타났다. 이 수치는 최고 응력값이며 이 값 역시 안전계수를 만족시켰다.

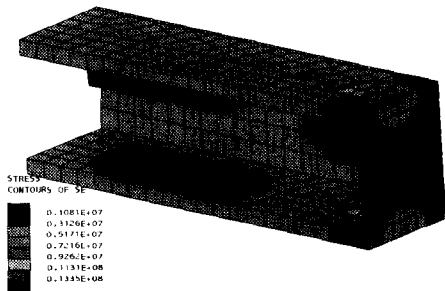


Fig. 5 Stress distribution of frame

2.1.3 모달 해석

공진현상을 예측하기 위하여 모달 해석을 통하여 기계의 고유진동수를 구하였다. 본 연구에서 가진 현상을 일으키는 주파수는 1.67Hz이기 때문에 8개의 고유진동수만을

알아보았고, 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 Natural frequency

	natural frequency (Hz)
1차 mode	27.73
2차 mode	34.37
3차 mode	89.36
4차 mode	101.07
5차 mode	115.16
6차 mode	124.69
7차 mode	124.77
8차 mode	149.09

위의 결과에서 보듯이 고유진동수의 값과 가진진동수와 의 값은 큰 차이를 나타내고 있어 기계는 진동에 대해서 안정하다는 것을 알 수 있다.

전체적인 프레임의 해석에서 정적 해석과 동적 해석 값의 차이는 아주 미소한 것으로 나타났으므로, 이 후의 해석에서는 정적인 해석만을 수행하였다.

2.2 금형부 해석

경계조건은 금형이 프레임에 고정되는 부분을 모든 방향에 대해서 구속하였으며, 하중 조건으로는 충격하중 200ton을 단면적으로 균일하게 가하였다.

이 부분의 모델링은 3차원 Solid Element로 모델링 하였다. 유한 요소 모델에 대한 자료들은 Table 4와 같고, 해석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Table 4 FEM data for die

Number of Node	112291
Number of Element	944

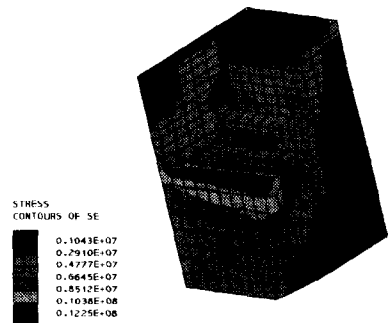


Fig. 6 Result of static analysis for die

위의 결과에서 최고 응력값은 13.44kgf/mm^2 로 나타났다.

2.3 구동부 해석

이 부분도 역시 3차원 Solid Element를 사용하여 Fig. 7과 같이 모델링을 하였다.

하중은 프레임이 강체라는 가정 하에서 충격힘이 모두 골조 부분으로 전달된다고 가정하였다. 그러므로 이 부분에 작용되는 힘은 역시 200ton의 균일분포 하중을 모델에 적용하였고, 모델에 대한 자료는 Table 5에 나타내었다. 해석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 최고 응력점은 노치부분으로, 결과값이 8.85kgf/mm^2 로 나타났다.

Table 5 FEM data for driving part

Number of Node	2945
Number of Element	520

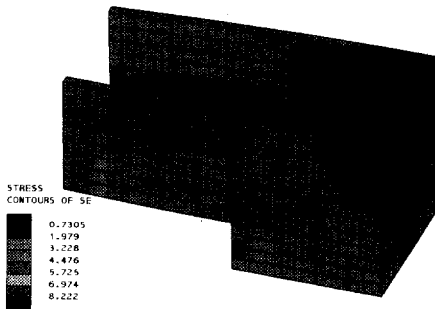


Fig. 7 Result of static analysis for driving part

3. 실험 및 결과

3.1 시험편의 준비

본 실험에서 사용한 용접재료는 일반 연강으로서 가격이 싸고 열영향이 적으며 SC46과 비슷한 기계적 성질을 가진 SS41를 사용하였으며, 용접용 와이어는 모재와 같은 SS41를 사용하였다. 용접 방법은 서브머지드(submerged) 용접과 CO_2 용접을 사용하였고, 강판의 실제 두께로 용접할 경우 실험하기에는 너무 어려우므로

$t=13\text{mm}$ 를 사용하여 축소 실험을 실행하였다. 시험편은 KS B 0801 14A호 비례시험편을 사용하였다. 용접 설계와 시험편의 형상은 Fig. 8에 나타내었고, SS41의 물성치는 Table 6에 나타내었다.⁸⁾

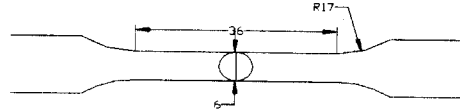


Fig. 8 Welding design and specimen

Table 6 Properties of SS41 ($t>40$)

Component	Properties
Component	$P \leq 0.05, S \leq 0.05$
Young's Modulus	20700.3 kgf/mm^2
Poisson's ratio	0.3
Tensile strength	41 kgf/mm^2
Yield strength	22 kgf/mm^2
Density	$7.72 \times 10^3 \text{ kgf/mm}^3$

3.2 서브머지드 용접

서브머지드 용접^{11),12)}은 Table 7에 나타난 것과 같이 3가지 조건으로 실시하였다.

Table 7 Submerged welding condition

Class	1 pass			2 pass		
	voltage	current	speed	voltage	current	speed
case 1	40V	650A	75cm/min	42V	680A	50cm/min
case 2	27V	500A	60cm/min	30V	500A	40cm/min
case 3	40V	600A	70cm/min	43V	600A	50cm/min

3.2.1 인장 실험

본 실험을 수행하기 위하여 사용한 시험기와 실험 조건은 다음과 같다.¹³⁾

Work : Instron Corporation Canton
Massachusetts Model 1350
Load Cell : 10000 lb(Max)

Stroke : 1 inch (Max)
 Temperature : Room Temp.
 Control : Stroke Control

실험은 시편 별로 각각 3번씩 수행하였고, 그 결과는 Fig. 9~11에 나타내었다.

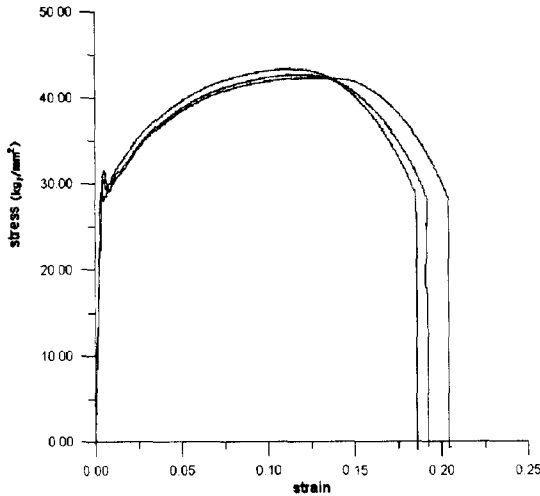


Fig. 9 Tensile testing curve (case 1)

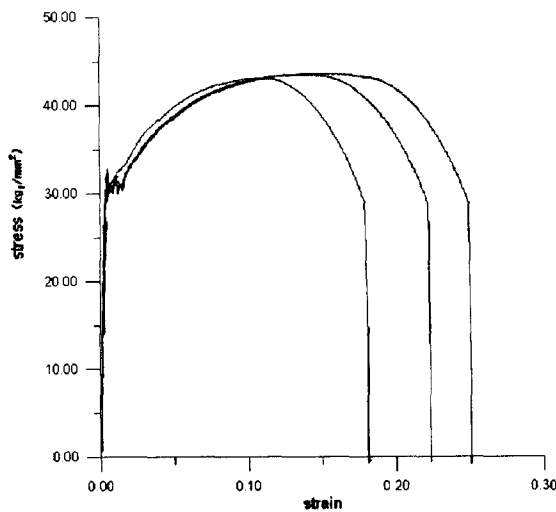


Fig. 10 Tensile testing curve (case 2)

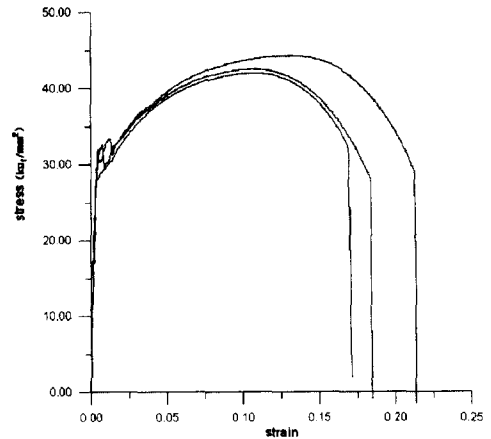


Fig. 11 Tensile testing curve (case 3)

3.2.2 피로 실험

피로 시험편은 인장시험편과 동일한 시험편으로 하였으며, 실험조건과 시험기는 다음과 같다.^{13),14)}

Work : Instron Corporation Canton
 Massachusetts Model 1350
 Load Cell : 10000 lb(Max)
 Temperature : Room Temp.
 Control : Load Control
 Stress ratio : 0.1
 Test : Tension-Tension
 Frequency in Use : 20 Hz

얻어진 결과는 Fig. 12~14에 나타내었다.

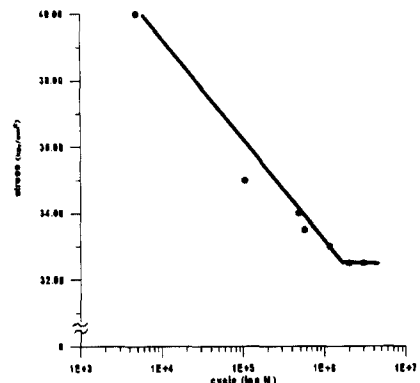


Fig. 12 S-N curve (case 1)

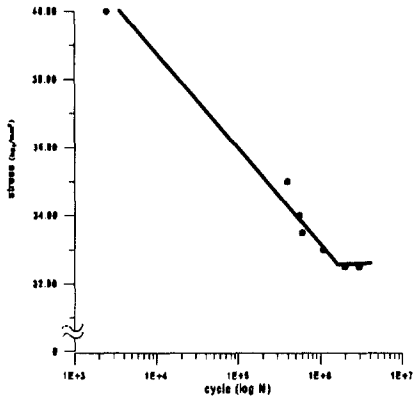


Fig. 13 S-N curve (case 2)

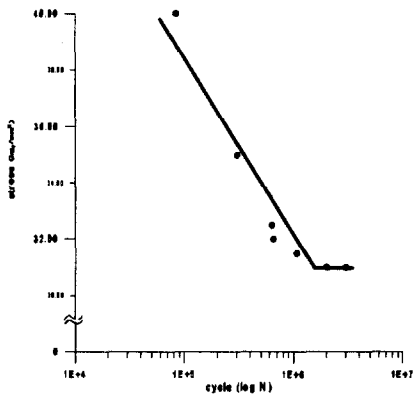


Fig. 14 S-N curve (case 3)

3.2.3 고찰

Fig. 9~11의 그래프에서 나타내는 인장강도가 모두 41~43kg/mm² 사이에 있는 것을 볼 수 있다. 그러나, 각각의 그래프에서 인장곡선의 분포 경향을 보면, case 1이 case 2나 3 보다 인장곡선들이 흩어지지 않고 비교적 일정한 경향을 보이고 있다.

Fig. 12~14는 각각의 case에 대한 응력비 0.1인 S-N 곡선을 나타내며, 각각의 S-N 곡선 모두 일정한 특성을 보인다는 것을 알 수 있다.

인장 곡선과 S-N 곡선이 일정한 특성을 나타내면, 열영향부와 용착부의 폭이 일정하다고 볼 수 있다. 이것은 용접 변형과 조직변화등이 적다는 것을 나타낸다. 따라서, 강도적으로는 큰 변화가 없으나 용접후 변형이 적은 case 1의 조건이 서브머지드 용접에서 가장 최적임을 알 수 있다.

3.3 CO₂ 용접

CO₂ 용접^{11),12)}도 서브머지드 용접과 마찬가지로 3가지 조건으로 실시하였고, 용접 조건은 Table 8과 같다.

Table 8 CO₂ welding condition

Class	voltage	current
case 1	28V	250A
case 2	32V	300A
case 3	35V	350A

3.3.1 인장 실험

본 실험을 수행하기 위하여 사용한 시험기와 실험 조건은 서브머지드 용접의 경우와 동일하다.

실험은 시편 별로 각각 3번씩 수행하였고, 그 결과는 Fig. 15~17에 나타내었다.

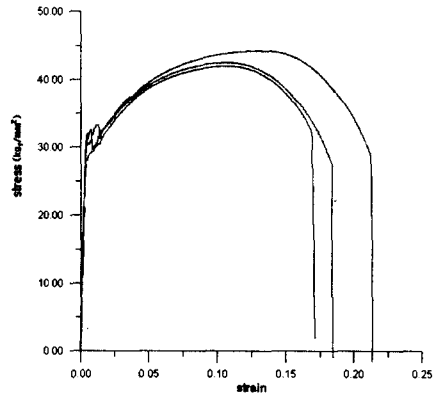


Fig. 15 Tensile testing curve (case 1)

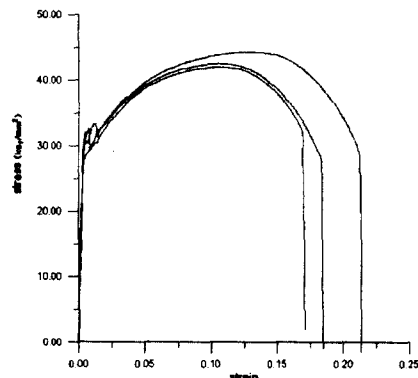


Fig. 16 Tensile testing curve (case 2)

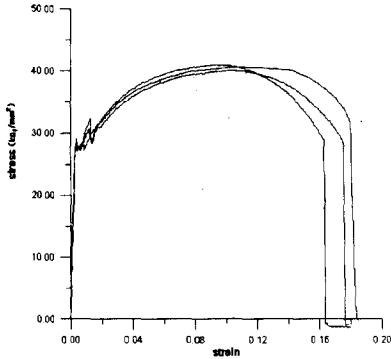


Fig. 17 Tensile testing curve (case 3)

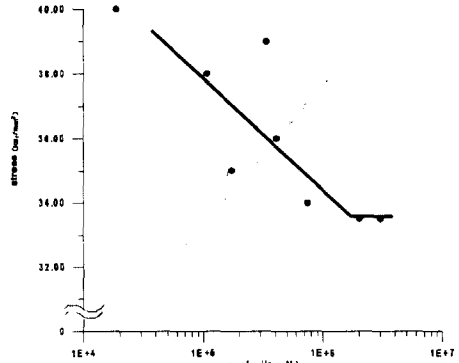


Fig. 20 S-N curve (case 3)

3.3.2 피로시험

피로 시험편은 인장시험편과 동일한 시험편으로 하였으며, 서브머지드 용접과 동일하다. 얻어진 결과는 Fig. 18~20에 나타내었다.

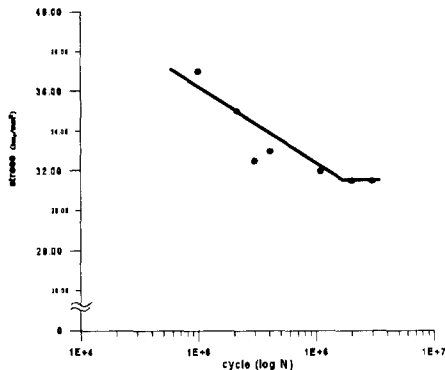


Fig. 18 S-N curve (case 1)

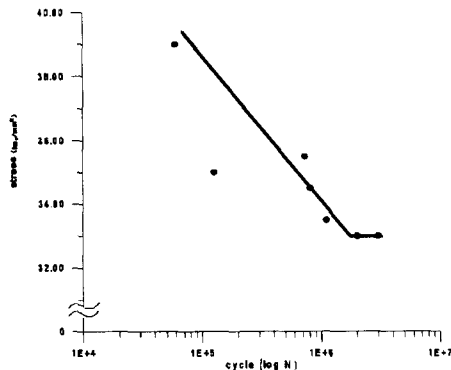


Fig. 19 S-N curve (case 2)

3.3.3 고찰

Fig. 15~17의 인장 곡선들을 보면, 인장 강도는 모두 40~43kg/mm² 사이에 분포하는 것을 볼 수 있다. 인장 강도는 모두 비슷하지만, 인장 곡선들이 분포해 있는 경향을 보면, case 1에서 나타내는 인장곡선의 분포가 case 2와 case 3에서 나타내는 인장곡선보다 산재해 있지 않고 비교적 일정한 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다.

Fig. 18~20은 Table 8의 각 조건에 대한 용력비 0.1인 상태의 S-N 곡선을 나타내며, 두드러지게 벗어나 있는 점을 발견할 수 있다. 특히 Fig. 20과 같은 경우에는 열영향부가 균일하지 않다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 case 1의 조건이 CO₂ 용접에서 가장 최적임을 알 수 있다.

서브머지드 용접의 인장 곡선과 CO₂ 용접의 인장곡선을 비교하여 보면, 인장강도적인 측면에서 큰 차이를 나타내지 않지만, S-N 곡선을 비교하면, 전체적으로 서브머지드 용접재의 S-N곡선이 CO₂ 용접재의 S-N 곡선보다 결함이 적고, 신뢰성이 있다는 것을 알 수 있다.

서브머지드 용접은 자동화 용접으로써 아크(arc)길이와 이송 속도를 최적으로 조절할 수 있으나, CO₂ 용접은 수동 용접으로써 작업자의 숙련도, 작업 당일의 심리상태, 건강상태의 영향을 받기 때문에, 서브머지드 용접보다는 편홀이나 기공과 같은 용접 결함이 많고, 열영향부와 용착부의 폭이 일정하지 못하다. 그러므로 인장곡선에서는 비슷한 특성을 나타내지만, 피로 실험에서는 큰 차이를 나타낸다.

그러나 서브머지드 용접은 아래보기 자세 용접만이 가능하므로, 프레임 제작에 많은 제약을 받는다. 그러므로

CO₂ 용접과의 적절한 혼용이 필요하다.

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 기존의 주조 프레임용 FEM 해석한 결과 강 구조물로 대체할 경우 구동부와 전체적인 골조부분은 안전계수 3 한도 내에서 재설계를 통하여 경량화가 가능하다.
2. 서브머지드 용접과 CO₂ 용접의 최적 조건을 알 수 있었다.
3. CO₂ 용접과 서브머지드 용접의 인장 강도는 큰 차이가 없으나, 피로실험 결과 서브머지드 용접이 CO₂ 용접보다 신뢰도가 높다는 것을 알 수 있었다.
4. 주조 프레임을 용접에 의한 강구조물로 대체하므로 제작 시간을 단축할 수 있다.

5. 참고 문헌

1. 차용훈, 김덕중, "알루미늄 합금 용접부의 疲勞龜裂 成長舉動에 關한 破壞力學的 研究", 한국 공작기계 기술 학회지 Vol. 5, No. 3, pp. 31~39, 1996.
2. 이광주, "疲勞強度에 미치는 鎔接缺陷의 影響", 宇宙造船工業株式會社 技術紙(大宇造船 技術), Vol. 3, No. 10, pp.1~5, 1980.
3. R. J. Bucci, "Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Rate Measurement", ASTM STP 743, pp.28~47, 1981.
4. A. P. Parker, "Stress Intensity Factor, Crack Profiles, and Fatigue Crack Growth Rate in Residual Stress Fields", ASTM STP 766, pp.13~31, 1982.
5. D. V. Nelson, "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation", ASTM STP 766, pp.172~194, 1982.
6. 車龍勳, CT形 變厚鎔接板材에서의 疲勞龜裂成長舉動에 미치는 殘留應力の 影響에 關한 破壞力學的 研究, 成均館大學校 碩士學位 論文, 1991.
7. W. H. Kearns, Welding Handbook, American Welding Society, Seventh edition, 1984.
8. 일본규격협회, 金屬材料ゲータブック 2版, 일본규격협회, 1985.
9. LUSAS Element Library, FEA LTD.
10. LUSAS Theory Manual, FEA LTD.
11. 엄동석, 용접공학, 문운당, 1994.
12. W. Messler Jr., Joining of advanced materials, Butterworth-Heinemann, 1993.
13. 오길환, 채두병, 김학윤, 연운모, 송건, 박종건, 재료 시험법, 기전연구소, pp.17~221, 1997.
14. A. Bannantine, J. J. Comer, J. L. Handrock, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, 1990.