

# 내부 압력을 받는 구조물의 용접 부 설계 검증

박정선<sup>†</sup> · 임종빈<sup>\*</sup>

## Weld Zone Design Verification of Structure which is Receiving Internal Pressure

Jungsun Park, Jongbin Im

**Key Words:** Weld Zone(용접 부), Design Verification(설계검증), Stress Analysis(응력 해석)

### Abstract

In this study, when structure which is combined by welding is receiving internal pressure, finite element analysis to confirm stability of structure and reliability of welding part is achieved. And we analyze the results. Also, if stability of the structure and reliability of the welding part are not defined, research that look for method to change design to receive stability and reliability is achieved.

### 1. 서 론

근대식 용접이 중요한 역할을 하는 분야에 이용된 것은 제 1차 세계대전 당시에 재료의 절약과 노력 삭감의 요구에 따라 신흥 기술로서 등장하여 많은 성과를 거두었기 때문이다. 특히 전기 용접은 20세기의 공업계에 신기원을 만들었다. 즉 전기 용접은 그 작업이 신속하고 간단하며 제품의 강도 재료 및 경상비의 절약등 각 방면에 있어서 대단히 우수한 성적을 내고 있으므로 조선, 항공기, 건축, 기계, 철도, 수도 및 소규모의 공업으로부터 귀금속 공업 등에 이르기까지 광범위하게 이용되는 중요한 것으로 용접은 그 자체가 공업의 일부분으로 되어 있다.

용접의 장점으로는 재료의 절약, 공정수의 절약 성능 및 수명의 향상 등에 유리하므로 경제적이다. 특히 리벳 집합에 비하여 구조가 간단하고 집합 효율이 훨씬 우수하다. 또한 주조와 비교하여 본다면 주형이 필요 없고 강도가 크고 중량을 가볍게 할 수 있고 또 종류가 다른 재료를 집합할 수 있으며 시설비가 적게 들고 보수하기 쉽고 복잡한 형상의 제품도 싸게 제작할 수 있다. 단조와 비교하여 유리한 점은 설비비가 싸고 대형 단조기계와 값비싼 단조형이 필요 없기 때문에 중량을 작게 하고 제작비를 경감할 수 있는 장점이 있다. 용접은 기계 및 구조물을 수리할 때에 대단히 중요한 역할을 하고 있다. 그 중에는 주물 및 단조물의 수리 마모된 부품의 재생 용접에 의한 표면 경화 내식성 또는 내열성의 개선 등에 널리 사용되고 있다.

용접은 간편하고 생산성이 크기 때문에 근대 공업의 중요한 공작 기술로 등장되고 있으며 이것은 세계적으로 공인된 사실이다. 용접 기술의 향상과 신뢰도를 높이기 위하여 용접 부의 시험

---

† 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학  
E-mail : jungsun@mail.hankong.ac.kr  
TEL : (02)300-0283 FAX : (02)3158-3189  
\* 한국항공대학교 대학원

---

과 검사는 대단히 중요한 일이다. 한편 기계 또는 구조물에서 용접 부의 기계적 및 화학적 성질 등이 용접 부에 필요한 각종 조건을 만족시키고 있는가를 확인하기 위한 것이며 또한 사용자에게 안도감을 줄 수 있는 효과가 있기 때문이다. 용접은 짧은 시간에 고온으로 올라가는 금속적 접합이므로 용접된 재료는 모든 조건이 균일하게 될 수 없다. 즉 용접 열에 따른 모재의 변질, 변형, 잔류응력 등의 변화와 화학적 성분 및 조직 등의 변화는 어느 정도까지는 피할 수 없다. 그러나 현재는 용접 기술의 발전과 개선으로 이들 모든 점들에 대하여 대책이 연구되고 각종 불안도 해소되고 있다. 일반적으로 용접 부의 안정도 및 신뢰성을 시험하기 위한 여러 가지 방법을 대별하면 작업 검사와 용접 완성 검사로 분류된다. 작업 검사는 우수한 용접을 하기 위한 검사로서 용접공의 기능, 용접 재료, 용접 설비, 용접 순서, 용접 시공 상태, 용접 후의 열처리 등의 적부를 검사하는 것을 말한다. 그리고 용접 완성 검사는 용접이 완료된 후에 제품이 요구 조건에 만족하고 있는가를 검사한다. 용접 완성 검사의 해석적인 방법은 컴퓨터를 이용한 수치 해석적인 방법, 특히 유한요소법에 의해 발전되어 왔다. 유한요소법을 이용한 용접 완성 검사는 용접비드에서의 요소가 아주 작아야 한다. 따라서 용접비드에 많은 요소가 필요하므로 3차원으로 해석을 하게 되면 많은 해석시간이 소요되고 대형컴퓨터가 요구되므로 주로 2차원 해석이 수행되고 있다.

용접구조물의 파괴는 대부분이 용접부위에 존재하거나 또는 발생하는 균열로 인하여 일어난다. 이런 이유로 이들 용접구조물의 안전 설계, 또는 건전성평가에 선형탄성 파괴역학이 적용되고 있으며, 소성영역을 포함하는 탄소성 파괴역학도 그 적용의 효용성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 용접선 방향으로 존재하는 잔류응력이 피로균열 진전에 미치는 영향과 균열이 진전할 때 발생하는 잔류응력 재 분포에 관한 연구논문이 많이 발표되고 있다. 그러나 용접선 방향으로 균열이 성장할 때 용접선에 직각인 방향의 잔류응력이 피로균열성장에 미치는 영향에 관해서는 아직도 많은 연구가 필요하다.

본 논문에서는 세 부분의 구조가 용접에 의해서 결합되어있는 구조물이 내부 압력을 받고있을 때 이 구조물의 안정성과 용접 부의 신뢰성을 확

인하기 위한 유한요소 해석을 수행하고 그 결과를 분석한다. 또한 구조물의 안정성과 용접 부의 신뢰성이 확보되지 않는다면 안정성과 신뢰성을 확보하기 위한 가장 쉽게 할 수 있는 방안을 모색하는 연구를 수행하였다.

## 2. 용접 부 설계 검증

내부 압력을 받고 있는 구조물이 용접에 의해서 구성되어있다. 이 구조물의 사용에 있어서 어느 정도의 시간이 지나자 용접 부에서 균열이 발생하여 결국에는 구조물이 재 역할을 제대로 수행하지 못하는 문제가 발생하였다. 이러한 문제의 원인을 파악하고 해결하기 위해서 현재의 구조물의 용접 부에 대한 해석을 수행하였다. 그림 1에서는 현재 사용되고 있는 구조물의 일부로 용접 부의 2차원 형상을 나타내고 있다.

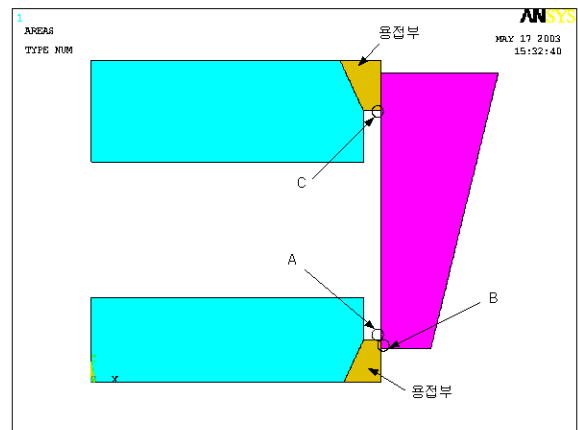


Fig. 1 Weld zone model for design verification

본 용접 부 형상을 2차원과 3차원으로 모델링하여 구조물의 응력 해석을 수행하였다. 이때 사용한 프로그램은 Ansys를 이용하였다. 2차원 모델의 경우 8절점 평면요소 175,906개, 3차원 모델의 경우 10절점 사면체요소 158,066개를 사용하였다. 또한 구조물과 용접 부의 물성은 같다고 가정하였으며 용접 시 발생할 수 있는 잔류응력 등은 무시할 만큼 작다고 가정하였다. 하중조건은 구조물의 내부에  $12 \text{ kg/cm}^2$ 의 압력이 작용하고 있다고 설정하였다. 그림 1에서와 같이 크게 세 부분 (A, B, C)으로 구분하여 압력에 의한 응

력 변화를 살펴보았다. 본 용접 부와 구조물에 사용된 재료는 일반적인 steel로 설정하였다.

Table 1 Stress result

Parts	Stress (Mpa)	
	2 D	3 D
A	268.91	218.93
B	179.27	-
C	149.40	-

본 해석 결과를 살펴보면 2차원, 3차원 모델의 A부분에서 모두 steel의 허용응력인 200 Mpa를 초과함을 알 수 있다. 이 결과를 볼 때, 그림 1의 용접 부는 A위치에서 허용응력을 초과하여 크랙이 발생한다. 이렇게 발생한 크랙은 시간이 지나면서 점점 전이되어 결국에는 용접 부의 파괴를 야기하는 것으로 볼 수 있다.

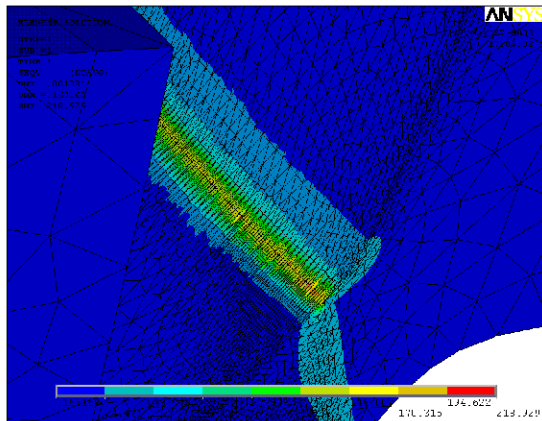


Fig. 2 Stress distribution of 3 D model

### 3. 용접 부 설계 변경 후 검증

그림 1의 처음 설계시의 해석 결과를 보면 용접 부 A에서 허용응력을 2차원의 경우 34.46%, 3차원의 경우 9.47%를 각각 초과하여 크랙이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 전체 구조물의 설계의 변경을 고려하는 것이 아니라, 문제가 발생한 용접 부의 형상을 변화 시키는 방법을 사용하여 용접 부에서의 응력을 허용응력 보다 작게 하며 크랙을 발생시키지 않는 안전한 구조물이 될 수 있는지를 검증하기로 하였다. 그림 1의 용접 부는 구조물과의

접촉면이 접촉면의 반으로 설정되어 있다. 이런 형상을 용접 부를 구조물과의 접촉면 전체로 하여 용접을 수행하였을 때 구조물이 안전하며 용접 부에서 크랙이 발생하지 않는지를 검증하였다. 용접 부 설계변경 후의 형상은 그림 3에서 볼 수 있다.

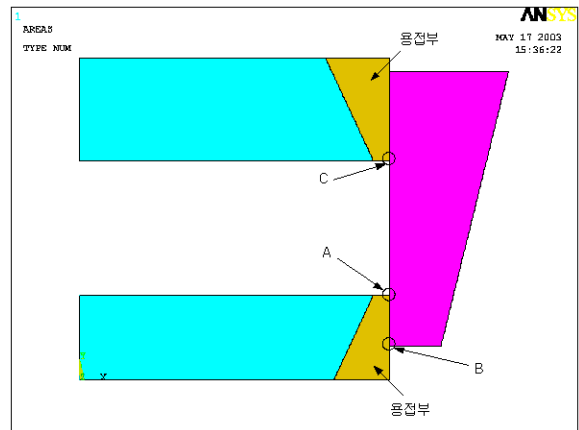


Fig. 3 Design change of the weld zone

변경된 용접 부 형상을 2차원과 3차원으로 모델링 하여 구조물의 응력 해석을 수행하였다. 이때 사용한 프로그램은 Ansys를 이용하였다. 2차원 모델의 경우 8절점 평면요소 180,437개, 3차원 모델의 경우 10절점 사면체요소 160,201개를 사용하였다. 또한 구조물과 용접 부의 물성은 같다고 가정하였으며 용접 시 발생할 수 있는 잔류응력 등은 무시할 만큼 작다고 가정하였다. 하중조건은 구조물의 내부에 12 kg/cm<sup>2</sup>의 압력이 작용하고 있다고 설정하였다. 그림 1에서와 같이 크게 세 부분 (A, B, C)으로 구분하여 압력에 의한 응력 변화를 살펴보았다. 본 용접 부와 구조물에 사용된 재료는 일반적인 steel로 설정하였다. 본 해석 조건은 용접 부 설계변경전과 같이 하였으며 그 결과를 비교하였다.

Table 2 Stress result of changed design

Parts	Stress (Mpa)	
	2 D	3 D
A	117.77	113.32
B	39.260	-
C	78.520	-

용접 부 설계변경 후의 해석 결과를 살펴보면 설계변경전의 2차원, 3차원 모델의 A부분에서 최대 응력이 나타났던 것과 같이 구조물의 최대 응력이 용접 부 A에서 2차원 모델인 경우 117.77 Mpa, 3차원 모델의 경우 113.32 Mpa이 나타났다. 이 최대 응력은 steel의 허용응력인 200 Mpa을 초과하지 않는 안정적인 모습을 보였다.

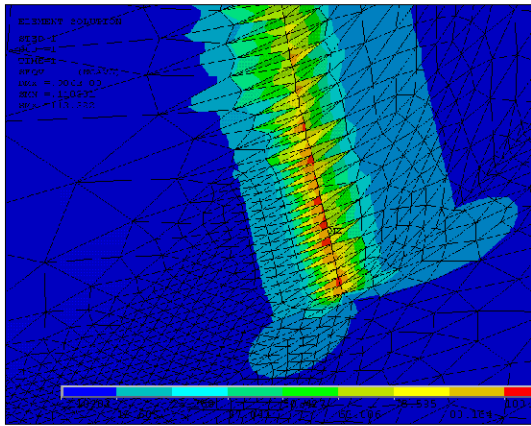


Fig. 4 Stress distribution of 3 D changed model

용접 부 설계변경 후의 응력 결과에 안전계수를 1.5로 하여 다음 식 (1)을 통하여 안전경계계수(margin of safety)를 구하여 그 안정성을 확인해 보았다.

$$M.S. = \frac{\sigma_{yield}}{S.F. \times \sigma_{evaluate}} - 1 \quad (1)$$

여기서 M.S.는 안전경계계수를, S.F.는 안전계수를,  $\sigma_{yield}$ 는 steel의 허용응력을,  $\sigma_{evaluate}$ 는 유한요소 해석을 통해 구한 응력값을 각각 나타낸다.

안전경계계수를 구한 값이 0.132로 “0”보다 큰 값을 보임을 알 수 있다. 안전경계계수가 “0”이하로 떨어지면 구조물이 파괴됨을 비취 볼 때 본 용접 부의 설계를 변경한 구조는 파괴되지 않을 것임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 세 부분의 구조가 용접에 의해 결합되어 있는 구조물이 내부 압력을 받고 있을 때 용접 부의 신뢰성과 구조물의 안정성을 확인

하였다. 기존의 용접 부에 대한 첫 번째 해석에서는 용접 부에서 2차원 해석인 경우 허용응력의 34.46%, 3차원 해석인 경우에는 9.47%를 초과하여 구조물이 파괴에 이르는 것을 알 수 있었다. 두 번째 해석에서는 첫 번째의 문제를 보완하기 위해서 용접 부 구조를 변경하여 해석을 수행하였다. 그 결과 허용응력을 초과하지 않는 117.77 Mpa의 최대응력이 나타남으로 구조물이 안정함을 확인 할 수 있었다.

본 연구에서는 용접에 의해 결합된 구조물이 안정함을 유지하기 위해서는 용접 시에 먼저 용접 부의 해석을 수행함으로써 용접에 대한 신뢰성을 검증해야 함을 확인했고, 또한 용접 부에서 허용응력을 초과하는 응력이 발생하여 구조물이 파괴되는 문제가 발생했을 경우 구조물의 설계변경 없이 용접 부의 설계를 변경함으로써 전체 구조물의 파괴현상을 극복하고 구조물의 안정성을 유지 할 수 있다는 정보를 얻을 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) 석창성, 김수용, 박지홍, 1999, “용접부의 잔류응력 및 피로균열성장 거동 해석,” *대한기계학회논문집*, 제23권, 제9호, pp. 1516~1524.
- (2) 송삼홍, 김현, 1991, “용접잔류응력의 재분포와 피로크랙전파거동,” *대한기계학회, 춘계학술대회*, pp. 27~30.
- (3) Yang, Y.S., Na, S.J., Kim, W.H. and Cho, W.H., 1991, “Effect of Heat Treatments on Welding Residual Stresses of AISI 4130 Steel.” *KSMF*, Vol. 6, pp. 1982~1989.
- (4) Beghini, M. and Bertini, L., 1990, “Residual Stress Modeling by Experimental Measurements and Finite Element Analysis,” *Journal of Strain Analysis*, Vol. 25, No. 2.
- (5) 이송인, 권일현, 이범준, 유효선, 2001, “국부 변형률근사법을 이용한 차체 접용접부의 피로수명 예측에 관한 연구,” *대한기계학회논문집*, 제25권, 제2호, pp. 220~227.
- (6) 박장원, 이태수, 채수원, 2000, “접용접부 최적 설계를 위한 적응적 유한요소망의 구성,” *대한기계학회 논문집 A*, 제24권, 제7호, pp. 1763~1770.
- (7) 이형일, 김남호, 이태수, 2000, “접용접시편의

- 극한하중과 피로특성에 관한 실험적 고찰,” *대한기계학회논문집 A*, 제24권, 제1호, pp. 38~51.
- (8) 이강용, 김옥환, 1998, “혼합형 하중에 있는 판재로 보강된 균열판의 응력세기계수,” *대한기계학회논문집*, Vol. 22, pp. 569~578.
- (9) 손일선, 구재민, 정원석, 배동호, 1998, “인장 전단하중을 받는 IB형 일점 spot 용접이음재의 응력분포와 피로강도 평가,” *한국자동차공학회논문집*, 제6권, 제5호, pp. 20~27.
- (10) Barsom, J.M. and Rolfe, S.T., 1983, *Fracture and Fatigue Control in Structures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 223~249.
- (11) Cahoon, J.R., Broughton, W.H. and Kutzak, A.R., 1971, “The Determination of Yield Strength from Hardness Measurements,” *Metalurgical Transactions*, Vol. 2, pp. 1979~1983.
- (12) Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., 1985, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, 2nd Edition, Paris Production, Inc., St. Louis.
- (13) Melin, S., 1987, “Fracture from a Straight Crack Subjected to Mixed Mode Loading,” *International Journal of Fracture*, Vol. 32, pp. 257~263.