

# 기계적 응력 완화법에 의한 용접부 비선형 거동에 관한 연구(I)

## - 실험적 검토 -

### A Study on Non-linear Behavior in Weldments by Mechanical Stress Release Method ( I )

#### - Experimental Inspection -

윤훈성\*, 장경복\*\*, 김정현\*\*\*, 강성수\*\*\*, 조상명\*\*\*\*

\* 부경대학교 대학원 생산가공공학과, \*\* 부경대학교 산업과학기술 연구소

\*\*\* 부산대학교 기계기술 연구소

\*\*\*\* 부경대학교 재료공학부 생산가공공학 전공

## 1. 서 론

일반적으로 강을 용접하는 과정에서 용접부는 용융점 이상으로 급격히 가열되어 체적이 팽창된 상태에서 열전달 등에 의해 급격히 냉각되는 과정을 거친다. 이 때 용접부가 아닌 다른 모재 부분은 거의 온도변화가 없기 때문에 체적의 변화는 없지만, 용접부는 체적이 팽창했다가 급격히 냉각되는 과정에서 용접 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력은 재료의 항복강도와 비슷한 수준으로 존재하게 되고 이는 용접부가 외부하중 즉, 인장응력을 받을 시 쉽게 비선형 거동을 하게 되어 재료의 강성저하 현상이 나타난다.

이러한 잔류응력을 완화시키기 위해서는 일반적으로 PWHT(Post Weld Heat Treatment)가 사용되지만, 교량과 같은 거대 강구조물인 경우에는 적용하기 어렵기 때문에 대부분 기계적 응력 완화법(Mechanical Stress Release Method)이 사용되고 있다. 이러한 기계적 응력 완화법 적용시 중요한 것은 재료 및 기하학적 형상에 따라 적용되는 하중이 달라진다는 것이다. 그러므로, 용접 구조물에 기계적 응력 완화법이 현장에서 제대로 적용되기 위해서는 용접부에서 나타나는 비선형 거동을 제대로 파악하여 이를 바탕으로 정확한 시뮬레이션 모델을 정립할 필요가 있다.

본 연구에서는 기계적 응력 완화법 적용시 용접 구조물에 나타나는 비선형 거동(용접구조물의 강성저하)을 고찰하기 위해 연강 용접 시편을 재료의 허용응력 및 항복응력 수준의 하중으로 기계적 응력 완화법을 적용시키면서 그 비선형 거동을 검토하였고, 이 때의 잔류응력을 계측하였다.

## 2. 실험 방법

실험에 사용된 강재는 SS400 판재이며 시편의 형상은 Fig. 1과 같이 두께 6mm, 폭 70mm, 길이 500mm로 하였고, 공정 설계에 의한 Table 1과 같은 용접조건으로 용접한 두 개의 시편을 제작하였다. 이 때 용접은 시편을 구속시킨 후 행하였다. 이와 같이 제작된 시편 양면의 두께부에 용접선 방향으로 스트레인 게이지를 부착하여 용접 시편의 Loading - Unloading(용접선 방향)에 따른 공칭 스트레인을 계측하였다. 이 때의 기계적 응력 완화법 적용을 위한 Loading - Unloading 조건은 Fig. 2와 같다. Cycle 1은 재료의 허용 응력(항복강도/1.7)에 준하는 하중이고, Cycle 2는 재료의 항복 응력에 준하는 하중이다.

또한 기계적 응력 완화법 적용 전후의 잔류응력 변화를 확인하기 위해 용접 비드 중앙, HAZ부 및 모재부(비드 중심에서 10mm, 25mm 떨어진 곳)에 스트레인 게이지를 두 개의 시편에 동일하게 부착한 후 절단법으로 잔류응력을 계측하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 잔류응력을 내포하고 있는 용접시편의 일반적인 응력-변형률 거동을 보여주는 것으로서 (a)와 같이 용접시편이 용접선방향으로 하중을 받는 경우 초기에는 (b)곡선 a와 같은 잔류응력이 존재한다. 이 용접시편을 당기면 처음에는 전체적으로 응력이 증가하지만 인장 잔류응력이 존재하는 부분은 바로 재료의 항복응력에 달해 응력분포는 곡선 b처럼 된다. 즉, 겉보기 항복응력이 저하하고 있는 용접부 부근은 항복해서 소성변형을 일으켜 이 부분의 응력은 재료의 항복응력  $\sigma_{ys}$  정도로 유지된다. 하중을 증가시키면 항복한 부분은 A에서 B로 넓어져 응력분포는 곡선 c와 같이 된다. 그리고 용접시편의 공칭응력(하중/단면적)-변형률 곡선은 그림(c)의 a-b-c와 같이 되어 용접시편의 강성은

잔류응력이 없는 경우보다 저하된다. 이 상태에서 용접시편 전체에서 큰 변형을 일으키는 것은 횡단면 전 영역에 있어서의 응력이 항복점에 달할 때, 즉 응력분포가 곡선 d가 될 때이다. 이 때 용접시편의 전단면 항복강도는 잔류응력에 관계없이 횡단면상의 각점의 재료 항복응력의 평균치와 같다. 또 잔류응력이 존재해도 용접시편의 인장강도는 잔류응력이 없는 경우와 대부분 다르지않는 것이 확인된다.

Fig. 4는 SS400 용접시편에 대하여 재료의 허용응력 및 항복응력 수준의 하중으로 기계적 응력 이완법을 적용하였을 때의 공칭응력-변형을 곡선을 보여주는 것이다. 허용응력 수준(150MPa)의 하중으로 인장하였을 경우(Cycle 1)에는 허용응력에 미치지 못하는 약 80MPa에서 비선형 거동을 시작하고 있으며, 이는 용접부의 인장 잔류응력에 의해 용접시편의 강성이 저하하였기 때문이다. 또한 규격상의 재료 항복응력 수준의 하중으로 인장하였을 경우(Cycle 2)에는 재료의 허용응력을 넘어선 150MPa 정도에서 비선형 거동이 시작됨을 알 수 있다. 이는 Cycle 1에서 어느정도 잔류응력이 완화되었기 때문이다. 하지만 SS400 재료의 항복응력 수준에서는 용접시편이 이미 소성거동을 하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, Cycle 2 적용 후  $\epsilon_A$ 만큼의 영구 변형률이 발생했다는 것을 알 수 있는데 이는 용접시편의 전체 거동을 확인할 수 있는 주요한 인자가 된다. 즉,  $\epsilon_A$ 가 커질수록 이완되는 잔류응력이 커지고, 이에 따른 시편 전체의 변형량도 커지게 된다. 따라서 일반 용접 구조물에 있어서도 본 연구에서의 영구 변형률  $\epsilon_A$ 에 해당되는 변형량을 사전에 시뮬레이션으로 평가하는 것이 중요하다고 판단된다. Fig. 5는 기계적 응력 이완법 적용 전(As-welded)과 후(Cycle 2)의 잔류응력 분포를 비교한 것으로서 기계적 응력 이완법 적용시 잔류응력이 약 30%이상 제거된다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이상과 같이 기계적 응력 이완법에 의한 용접부의 비선형 거동에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 잔류응력이 존재하고 있는 용접 구조물은 잔류응력이 없는 일반 구조물에 비해 강성이 저하하여 인장하중을 받으면 비선형 거동이 허용응력 이하의 수준에서 발생함을 확인하였다.
- 2) 모재의 항복강도에 해당하는 공칭응력으로 인장하는 기계적 응력 이완법을 적용한 후 허용응력 수준의 외부하중이 작용하면 선형거동하게 된다.
- 3) 용접부의 비선형 거동 특성 중 잔류응력 이완 정도 및 용접 구조물의 전체 거동에 영향을 미치는 영구 변형률  $\epsilon_A$ 를 정밀하게 제어하기 위해서는 사전에 시뮬레이션로 평가하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 佐藤邦彦 : 熔接構造要覽, 黒木出版社, p.188, 1988
2. M. Takanashi and K. Iida : "Relaxation of Welding Residual Stresses by Reversed and Repeated Loadings", Journal of the Japan welding society, Vol. 19, No. 1, p. 129, 2001

Table 1 Welding conditions

Mode	Current(A)	Voltage(V)	Speed(cm/min)	Pass(layer)
MAG	260	23~24	50	1

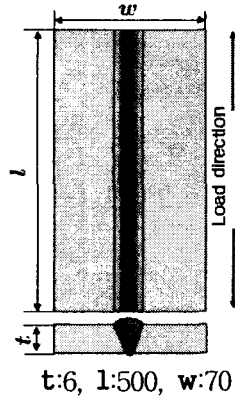


Fig. 1 Geometry of specimen

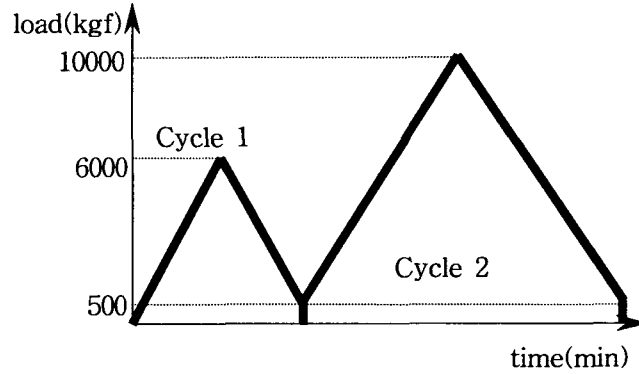


Fig. 2 Conditions of mechanical stress release

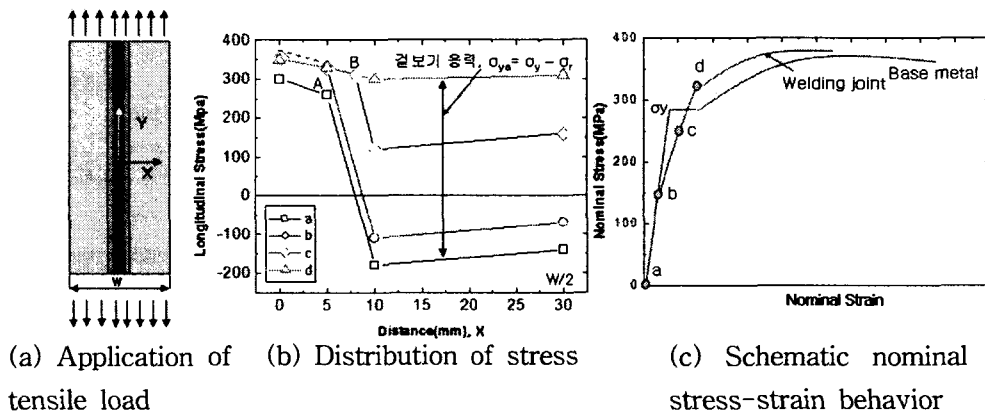


Fig. 3 Stress-strain behavior on welded specimen with stress<sup>1)</sup>

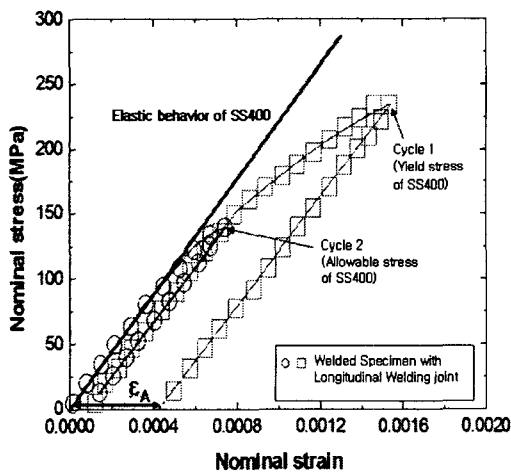


Fig. 4 Stress-strain behavior by mechanical stress release

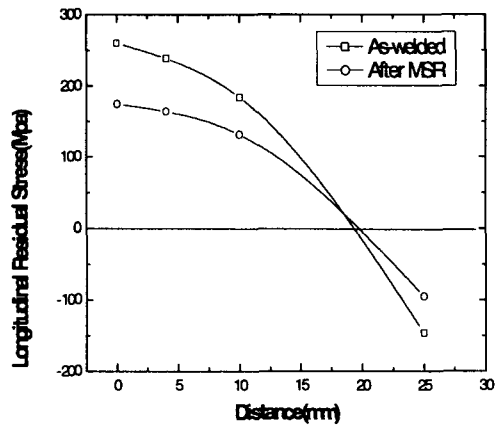


Fig. 5 Longitudinal residual stress before and after MSR in welded specimen