

# 기계적 응력 완화법에 의한 용접부 비선형 거동에 관한 연구(II)

## - 유한요소 해석모델 정립 -

### A Study on Non-linear Behavior in Weldments by Mechanical Stress Release Method (II) -Finite Element Analysis-

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

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

\*\*\* 부산대학교 기계기술 연구소

\*\*\*\* 부경대학교 재료공학부 생산가공공학 전공

#### 1. 서 론

사회적 환경이 변함에 따라 강구조물의 성능도 점차 고성능화 되고 있어 높은 신뢰성을 지니는 강구조물이 요구되고 있는 실정이다. 그런데, 강구조물 제작에서 반드시 필요한 용접 공정은 국부적인 급열 및 급랭 과정을 거치기 때문에 구조물에는 잔류응력 및 변형이 필연적으로 발생하게 되고 이로 인해 구조물의 강도적 신뢰성이 떨어지게 된다.

즉, 용접 구조물에 존재하는 국부적인 잔류응력은 사용 조건의 실 하중과 중첩되면, 특히 실 하중이 반복 하중일 경우, 용접 구조물 전체의 형상이 변하게 되는 현상이 나타나게 되는 것이다. 그 이유는 용접 구조물의 경우 잔류응력으로 인해 전체 강성이 저하되어 실 하중 조건에서 비선형 거동을 나타내기 때문이다. 이런 경우 설계 시 고려한 변형 보다 더 큰 변형이 발생할 수 있어 구조물의 신뢰성이 떨어지게 된다. 그러므로, 높은 신뢰성의 강구조물을 위해서는 제작 및 시공 과정에서 용접부 잔류응력의 완화가 반드시 필요하다.

그런데, 아직까지 대형의 강구조물은 용접 잔류응력을 제거하지 않은 상태에서 제작 사용되는 경우가 많다. 현실적으로 강구조물 제작에서 용접 조립 및 잔류응력 처리과정이 그다지 정밀하지 못하거나 무시되고 있는 실정이기 때문이다. 이러한 대형 강구조물의 경우 잔류응력을 완화시키기 위한 효과적인 방법으로 기계적 응력 완화법(Mechanical Stress Release, MSR)이 있으나 구조물의 재질 및 형상에 따라 적용되어야 하는 하중의 크기 방향 등이 다르기 때문에 현장에서 정밀하고 효율적으로 적용하기가 어려운 실정이다. 그러므로, 기계적 응력 완화법이 현장에서 제대로 적용되기 위해서는 용접부에서 나타나는 비선형 거동을 제대로 파악하여 이를 바탕으로 정확한 시뮬레이션 모델을 정립할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 전보에서 이루어진 실험적 고찰을 바탕으로 기계적 응력 완화법 적용 시 나타나는 용접 구조물의 비선형 거동(강성 저하 및 회복)과 잔류응력 완화 현상을 해석할 수 있는 시뮬레이션 모델을 정립하여 강구조물 제작 현장에서 기계적 응력 완화법의 적용성을 높이는 데 기여하고자 하였다.

#### 2. 유한요소 모델 정립

Fig.1은 전보의 맞대기 용접 시험편에 대한 유한요소 모델을 나타낸다. 여기서, 요소의 수는 6800개, 절점의 수는 8109개이다. 시험편 길이가 500mm인데, 용접선 방향으로 10mm마다 하나씩 총 50개의 요소를 구성하여 용접 공정에 의한 3차원 열탄소성 해석이 이루어질 수 있도록 하였다.

해석은 크게 두 가지 영역으로 구분하여 수행되었다. 우선 용접 후 존재하는 잔류응력을 계산하기 위해 용접 공정을 3차원 열탄소성 해석하여 용접 후 잔류응력 분포를 구하였고, 그 다음에 MSR법에 의한 Loading 및 Unloading 과정을 실험과 동일하게 부여하였다. 용접 공정 해석은 열전달 해석을 먼저 수행하고 그 결과를 Thermal Load로 받아들여 기계적 해석을 수행하는 Non-couple 해석으로 수행하였다.

Fig.2는 용접 공정 해석 구간에서의 경계조건을 나타낸다. 시험편 제작 시 총 6군데를 클램핑하였는데 동일한 영역에 클램핑 방향으로의 변위만 구속하였다. Fig.3은 Loading-Unloading 과정 구간의

경계조건을 나타낸 것이다. 지그로서 완전 고정되는 상부의 절점은 완전 구속하였고, 잡아당기는 하부 지그 부분의 영역은 시험시 각 하중(6ton 및 10ton) 부여시 늘어나는 길이를 계산하여 변위 제어함으로서 해석을 수행하였다.

### 3. 유한요소 해석 결과

Fig.4는 용접 공정 해석시 아크 열원이 시험편의 중앙을 지날 때의 온도 분포 및 용접선 방향의 응력 분포를 나타낸 것이다. 용접 금속 주위로는 팽창이 구속되어 압축응력이 형성되고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig.5는 용접 공정 해석 후 형성된 잔류응력을 실제 절단법으로 구한 실험 결과와 함께 나타낸 것이다. 게이지 부착위치 ①, ②, ③번 지점에서는 아주 좋은 일치성을 보여주고 있으나 ④번 위치에서는 다소 차이를 나타내고 있다. 그 이유는 클램핑 위치에서의 경계조건, 가접공정의 생략 등 실제 용접 시 조건과 해석상의 경계조건이 다소의 차이가 있기 때문이다.

Fig.6은 용접 후 MSR에 의한 Loading-Unloading 후의 잔류응력의 완화 정도를 해석 결과와 실험 결과를 함께 나타낸 것이다. 해석상의 결과가 실험 보다 잔류응력의 완화정도가 크게 나타나고 있는데, 그 이유는 실제 실험 시 지그 접촉 부위에서의 표면 정도가 다소 떨어져 하중 부여시 슬립이 다소 발생하는 등 실험상의 오차가 있기 때문으로 여겨진다. 그러므로, 향후 더 정밀한 실험이 요구되어진다.

Fig.7은 Loading-Unloading 시 스트레인 게이지 부착 위치에서의 용접선 방향 응력과 스트레인과 관계를 나타낸 것이다. 처음 6ton의 Loading시 각 절점은 얼마 후 바로 비선형 거동을 하고 있는 것을 알 수 있는데 이는 구조물에 잔류응력이 존재하면 실 하중 작용시 강성이 저하되어 비선형 거동이 나타날 수 있다는 것을 보여주는 부분이다. 그리고, Unloading시 상당량의 잔류응력이 완화되는 것을 확인할 수 있다.

이렇게 6ton의 Loading&Unloading 후 잔류응력이 완화된 후에는 강성이 회복되었으므로 10ton이 Loading될 경우 비선형 거동이 높은 응력에서부터 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 그리고, 6ton보다 10ton의 Unloading 후 잔류응력의 완화 정도가 더 큼을 알 수 있다.

### 4. 결론

전보에서 얻어진 실험 결과를 바탕으로 해석을 용접 공정과 하중의 Loading 및 Unloading 구간의 두단계로 해석하여 잔류응력을 지닌 구조물이 MSR법 적용시 나타나는 비선형 거동과 잔류응력 완화 현상 그리고 MSR 법 적용후 강성이 회복되는 현상을 해석할 수 있는 시뮬레이션 모델을 정립할 수 있었다.

### 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
3. 박지선, 한명수, 한종만 : "MSR을 이용한 용접잔류응력의 제거와 그 적용성 검토", 대한용접학회지, 제15권, 제 3호, 1997, pp29-35

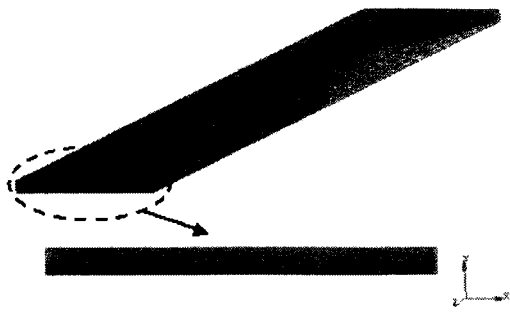


Fig.1 Mesh Generation

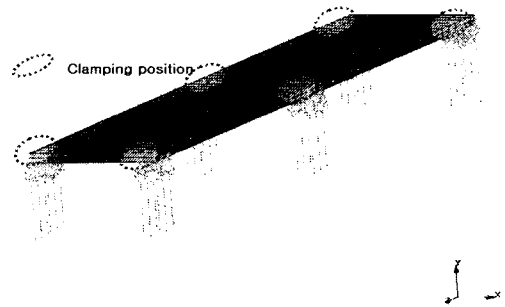


Fig.2 Boundary condition for welding

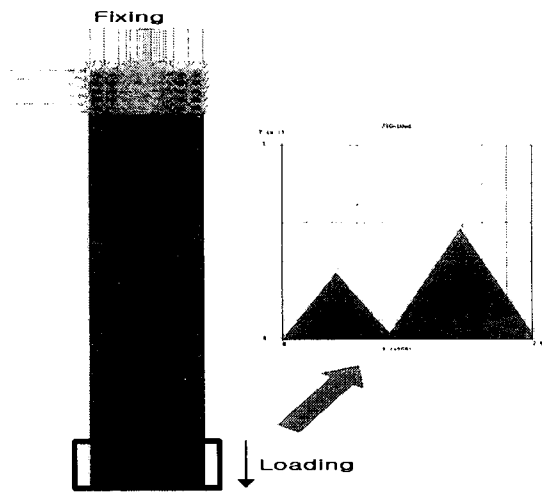


Fig.3 Boundary condition for loading & unloading

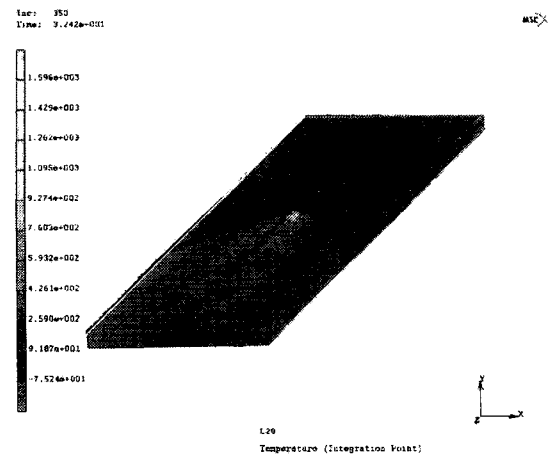


Fig.4 Temperature distribution and deformation shape(×5) during welding

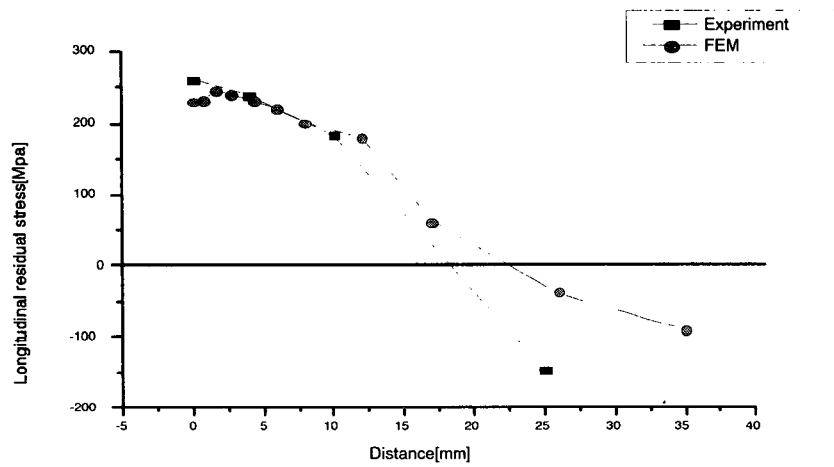


Fig.5 Comparison between analysis and experiment result for longitudinal residual stress after welding

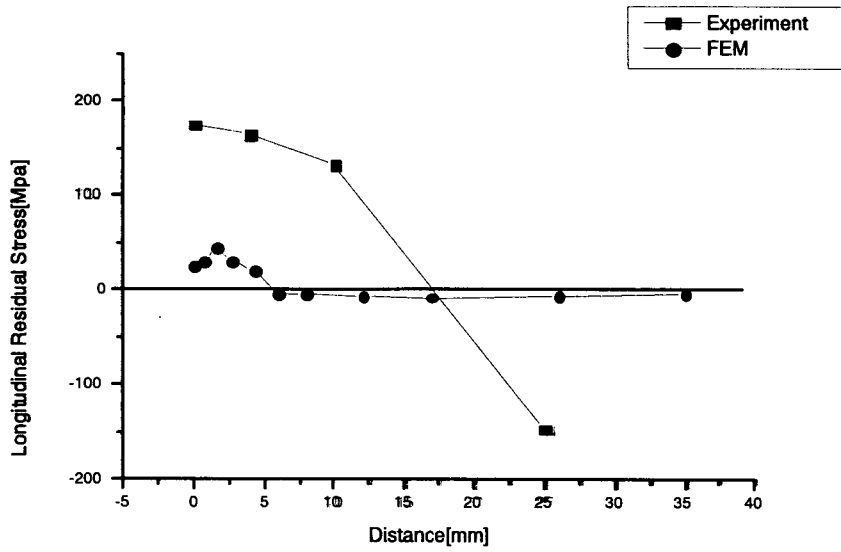


Fig.6 Comparison between analysis and experiment result for longitudinal residual stress after loading & unloading

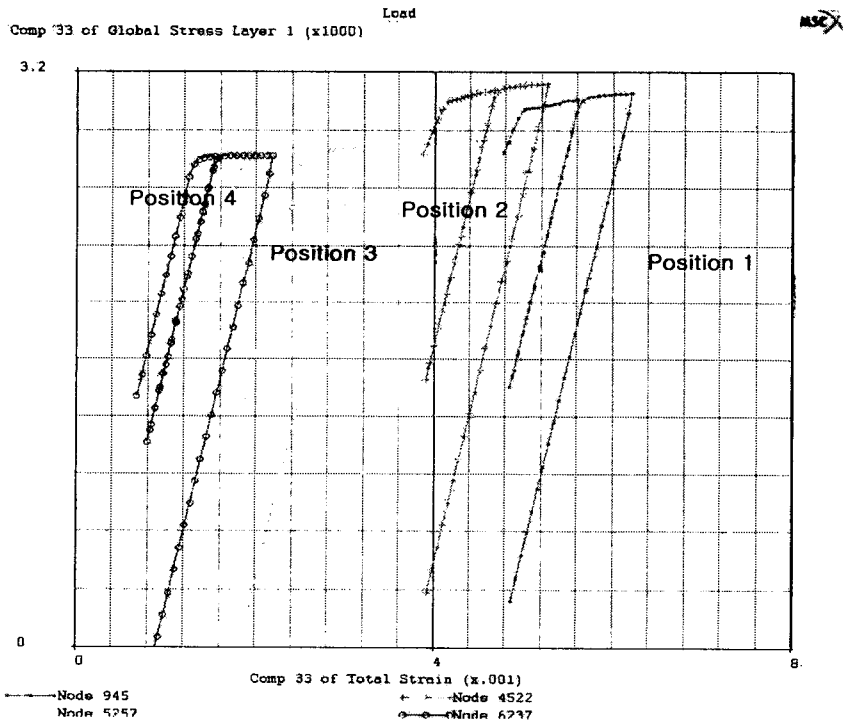


Fig.7 Stress strain behavior during loading and unloading