



기계적 응력 완화법에 의한 용접구조물의 비선형 거동에 관한 연구

김정현* · 장경복** · 윤훈성*** · 강성수* · 조상명****

*부산대학교 기계기술 연구소,

**부경대학교 산업과학기술 연구소

***부경대학교 대학원 생산가공공학과,

****부경대학교 재료공학부 생산가공공학 전공

A Study on Non-linear Behavior in Welded Structures by Mechanical Stress Release Method

Jung-Hyun Kim*, Gyung-Bok Jang**, Hun-Sung Yun***, Sung-Soo Kang* and Sang-Myung Cho***

*Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Pusan 609-735 Korea

**Research Institute of Industry Science Technology, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

***Division of Materials Science & Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

Abstract

The release of residual stress by mechanical loading and unloading is often performed in the fabrication of box structure for steel bridge. The proper degree of loading and unloading is significant at release method of residual stress by mechanical loading because that degree is changed by material and geometric shape of welded structure. Therefore, the simulation model that could exactly analyze the release of residual stress by mechanical loading is to be necessary.

In this study, the non-linear behavior of weldments under external loading and unloading, such as the decrease and increase of structure stiffness, was investigated by monitoring of nominal stress and strain. Tensile loading and unloading test and the proper degree of stress relaxation was measured by sectioning technique using strain gauge. Analysis model that is indispensable for the effective application of MSR method was established on the basis of test and measurement result.

(Received June 27, 2002)

Key Words : Mechanical stress release method, Residual stress, Non-linear behavior, FEM

1. 서 론

현대과학문명의 발달과 함께 사회적 환경이 급속도로 변화함에 따라 신뢰성 있고 안전한 구조물들이 요구되고 있는 실정이며 이를 위해서는 정밀 구조물 제작이 필수적이다. 그러나 강구조물의 경우 필연적으로 용접공정을 거치게되며, 용접공정은 국부적인 급열과 급냉과정으로 인해 잔류응력 및 변형을 유발시켜 구조물의 강도적 신뢰성을 저하시키게 된다. 특히, 용접공정으로 인해 발생된 잔류응력이 구조물에 작용하는 외부하중과 중첩되면, 허용응력 이하에서도 소성변형되고 이로 인해 구조물 전체 형상이 변화할 수 있어 구조물의 강도

적 신뢰성이 떨어질 수 있다. 따라서, 높은 안정성과 고정밀도를 요구하는 강구조물일 경우에는 반드시 용접 잔류응력의 완화가 필요하다.

용접 잔류응력 완화 방법에는 대표적으로 후열처리법(Post Weld Heat Treatment, PWHT), 기계적 응력 완화법(Mechanical Stress Relief Method, MSR)¹⁻⁷⁾ 등이 있으며, PWHT의 경우에는 비용문제와 구조물의 크기제한 등으로 인해 대형 강구조물에는 적용하기가 어렵다⁸⁾. 따라서, 현장에서는 MSR방법을 이용하여 용접구조물에 잔류응력을 완화시키려 하고있으나, 구조물의 재질 및 형상에 따라 적용되어야 하는 하중의 크기 및 방향 등이 다르기 때문에 현장에서 효율적으로 적용하기가 쉽지않다.

실질적으로 MSR법이 현장에서 제대로 사용되기 위해서는, 용접구조물에 외부하중이 가해졌을 때 일어나는 비선형거동 즉, 잔류응력으로 인한 용접구조물의 강성 저하현상과 MSR법으로 인한 강성회복 현상을 면밀히 고찰할 필요가 있으며, 현장에서의 적용성을 높이기 위해서는 이러한 현상을 정성적 및 정량적으로 해석할 수 있는 시뮬레이션 모델의 정립이 필요하다.

이에 본 연구에서는 강구조물에 많이 사용되고 있는 일반 구조용 열간 압연 강재인 SS400을 이용하여 판재형으로 용접시편을 제작 후, 용접부에 스트레인 게이지를 부착하고, 재료의 허용응력 및 항복응력의 수준으로 부하 및 제하(Load and Unloading)시 용접구조물에 나타나는 비선형거동을 고찰하였다. MSR전·후 시편의 잔류응력 측정은 절단법을 이용하였으며, 실험결과를 토대로 외부 하중 작용 시 용접구조물에 나타나는 비선형 거동을 상용 유한요소 소프트웨어 (MARC)를 이용하여 해석하였으며, 용접구조물에 나타나는 비선형거동 현상을 해석할 수 있는 시뮬레이션 모델을 정립하고자하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 재료는 SS400 판재로서 화학적 조성 및 기계적 특성을 Table 1, 2에 나타내었다. 시편의 치수는 두께 6mm, 폭 70mm, 길이 500mm이며, Table 3과 같은 용접조건으로 동일한 크기에 두개의 시편을 제작하였다. 용접 시편은 개선각 90도, 루트 갭 0.6mm로서 단층 완전 용입으로 GMAW 용접하여

제작하였다. 두 개의 시편중 첫 번째 시편은 용접 후 잔류응력 측정을 위한 것이며, 두 번째 시편은 MSR시편 후 잔류응력 측정을 위한 것이다.

기계적 응력완화법 적용시 나타나는 Nominal strain 값을 측정하기위해 Fig. 1과 같이 시편 양 사이트의 두께부에 용접선 방향으로 스트레인 게이지를 부착하였다. 이때 사용한 하중조건은 Fig. 2와 같으며, 조건 A는 재료의 허용응력에 준하는 하중(항복응력/1.7)이고, 조건 B는 재료의 항복응력에 준하는 수준이다. 용접 후와 기계적 응력완화법 적용 후에 잔류응력 계측은 용착 금속 중앙, 열영향부 및 모재부(용착금속에서 10mm, 25mm 떨어진 곳)에 스트레인 게이지를 부착하여 절단법을 이용하여 계측하였다.

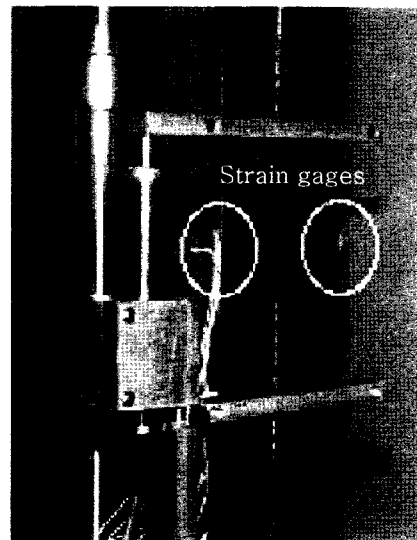


Fig. 1 Schematic of tensile test

Table 1 Chemical composition (%)

C	Si	Mn	P	S
0.143	0.00693	0.6565	0.015	0.00898

Table 2 Mechanical properties

Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
417	292	39

Table 3 Welding conditions

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

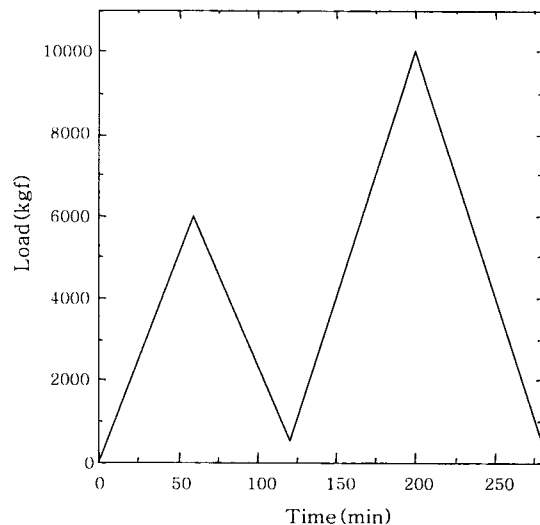


Fig. 2 Conditions of mechanical stress release

3. 유한요소해석

3.1 요소 분할 및 열전달 해석

해석 모델은 열전달해석, 기계적해석, MSR 해석 과정으로 크게 3가지 부분으로 구성하였다. 열전달해석과 기계적해석은 일반 용접공정 해석에 많이 사용되는 non-coupled 해석을 수행하였으며, as-welded 상태의 잔류응력을 지닌 상태에서 기계적 응력 완화과정 해석을 수행하기 위해서는 기계적 해석 결과를 저장해놓은 상태에서 MSR 과정이 수행되어야 해석 시간을 절감할 수 있으므로, 본 연구에서는 용접 공정 해석 후 as-welded 상태의 잔류응력 해석 결과가 MSR 해석시 초기 조건으로 설정 되도록 하였다.

우선 정확한 시뮬레이션 모델을 정립하기 위하여 3차원 모델링 작업을 하였으며, 시편 치수를 고려하여 두께6mm, 폭70mm, 길이500mm인 모델을 만들어 길이방향으로 10mm씩 요소를 분할하였다. 3차원 모델링시 실제 스트레인 게이지 부착위치를 고려하였으며, 용접시 지그 클램핑부와, MSR시 지그 구속부분을 고려해 실거동과 동일조건을 부여할 수 있게 하였다. 이와같은 3차원 FEM 모델을 Fig. 3에 나타내었으며, 총 요소 수는 6800개이며, 절점의수는 8109개이다.

초기 조건은 모든 절점의 온도를 주위 온도 20도로 하였으며 재료의 열적, 기계적 물성치는 온도의 함수로 고려하였다. 용접중 발생하는 열손실은 용착금속의 상하부를 포함한 전 경계면에 자연대류에 의한 경계조건을 적용하였다. 이때, 용접시 아크에 의한 열 손실이나 복사에 의한 열 손실은 그 정도가 매우 미비하므로 이에 대한 효과는 배제하였다⁹⁾. 용접에 의한 입열은 3차원 용접 공정에서 널리 사용되는 체적입열(body flux)로 고려하여 용접동안 용접부 요소는 활성화 요소로, 그 외의 용접부 요소는 비활성화 요소로 고려하여 이동 열원을 구현하였다. Fig. 4는 열전달 해석 결과로서 용접 열원이 시편의 중앙을 지날 때의 온도 분포를 나타낸다.

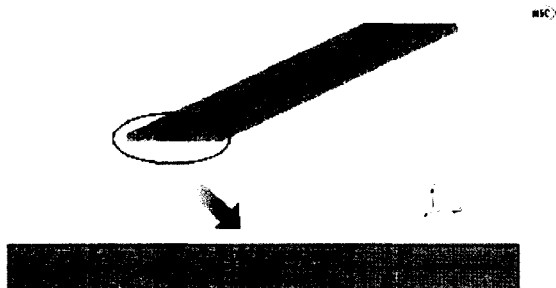


Fig. 3 Mesh generation

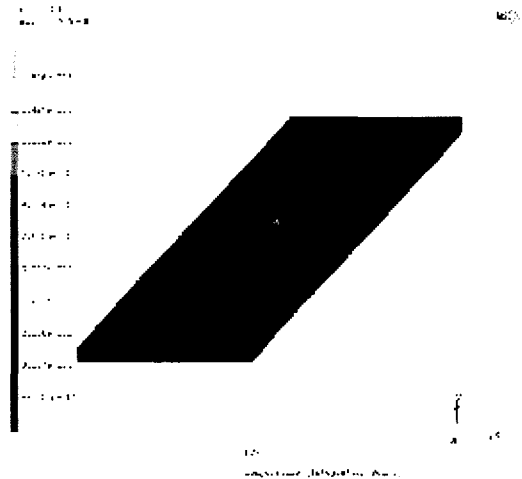


Fig. 4 Temperature distribution and deformation shape(x5) during welding

3.2 기계적 해석 및 MSR 해석

열전달 해석을 통하여 얻어진 각 절점의 온도 프로파일은 기계적 해석에서 열하중(Thermal load)으로 변환되어 기계적 해석시 외부하중(External load)으로 작용되었다.

Fig. 5은 기계적 해석시 구속조건을 나타내며, 용접시 시편에 변형방지를 위해 사용한 클램핑을 고려하기 위해 실험과 동일하게 클램핑되는 6개 지점에 절점들을 해석수행동안 시편 두께방향으로 구속하였다. 또한 Rigid body motion을 제거하기 위해 최소 절점만을 구속하여 해석을 수행하였다.

MSR과정의 해석은 Fig. 6과 같이 실제 MSR시험시 지그에 맞물리게 되어 변형이 발생하지 않는 시편 상부 50mm 영역을 해석상에 고려하기 위해 해석 수행동안 상부 50mm영역의 변위를 구속시켰으며, 지그에 맞물려 하중이 가해지는 하부 50mm 영역은 실험과 동일하게 허용응력수준(항복응력/1.7)-항복응력수준으로 하중을 부여하여 해석을 수행하였다.

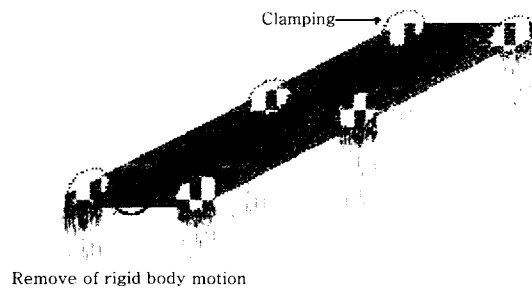


Fig. 5 Boundary condition for welding

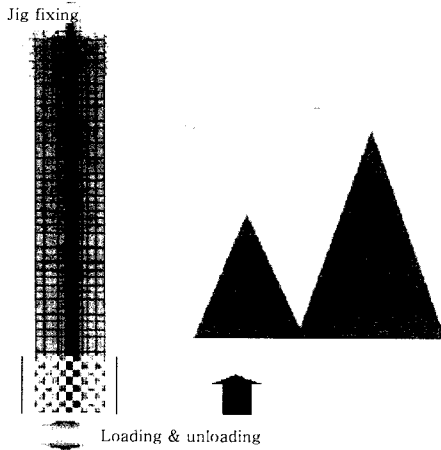


Fig. 6 Boundary condition for loading & unloading

4. 결과 및 고찰

Fig. 7은 용접된 시편 양사이드의 두께부에 용접선 길이방향으로 스트레인 게이지를 부착하고 MSR 처리 동안 부가하중에 대한 변형률의 거동 변화를 나타낸 것이다. 1차 사이클에서 허용응력수준에 하중을 시편에 가했을 때, 시편의 거동은 초기에는 탄성거동을 보이다가 약 75MPa에서 점진적으로 소성변형이 일어나는 비선형 거동을 보이고 있다. 이는 재료의 항복응력인 292 MPa보다 훨씬 낮은 응력 상태로써 용접에 의해 발생된 잔류응력으로 인해 시편의 강성이 저하되어 있다는 것을 보여주고 있다.

1차 하중의 부하 및 제하 후 2차 사이클에서 재료의 항복응력에 달하는 하중을 가했을 때, 시편은 첫 사이클의 부하에 의해서 잔류응력이 완화되어 최초 비선형

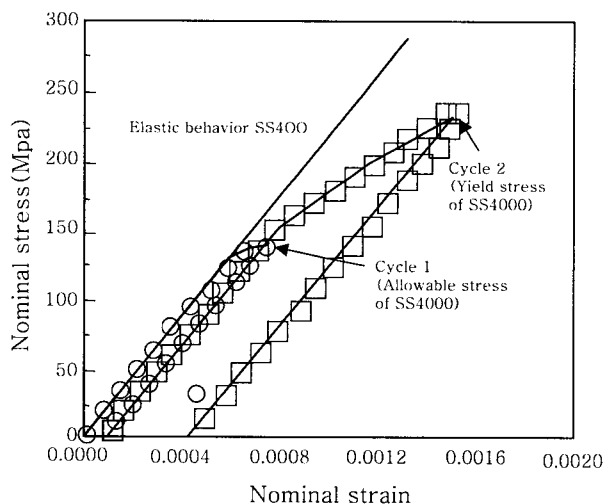


Fig. 7 Stress-strain behavior by mechanical stress release (Experiment)

거동을 보인 75MPa보다 높은 약 150MPa에서부터 비선형거동을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 용접공정으로 인해 저하되었던 강성이 기계적 응력 완화 과정에 의해 회복되는 현상을 확인할 수 있다. 또한 허용응력수준의 하중보다 항복응력수준의 하중으로 부하 및 제하 하였을 때 잔류응력의 완화 정도가 더 큼을 제하시 나타나는 잔류변위값으로 확인할 수 있다.

실험결과 용접시 발생하는 잔류응력으로 인해 재료의 허용응력에 준하는 하중 이하에서도 비선형거동을 나타내어 용접구조물에서 큰 문제가 발생할 수 있음을 알 수있으며, 반드시 용접 후 잔류응력 완화처리가 필요하다는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 8은 용접 후와 MSR 후 용접선 방향의 잔류응력을 계측한것으로써 용접 후 용접부에는 재료의 항복응력에 달하는 인장잔류응력이 존재하며 모재부로 갈수록 이에 상응하는 압축잔류응력이 남아있는 것을 확인할 수 있다. 이와같은 상태에서 외부로부터 하중을 가하는 MSR과정을 적용한 후에는 용접부에 인장잔류응력이 외부하중과 중첩되어 완화되고 그에 상응해 모재부도 압축잔류응력이 완화되는 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 유한요소해석에서 얻어진 용접선 방향의 잔류응력 분포 양상을 나타내며, (a)는 용접과정의 해석 최종 상태로 용접부를 따라 높은 인장잔류응력이 분포하며 모재부로 갈수록 압축잔류응력이 커지는 현상이 해석상에서도 동일하게 구현되고 있음을 확인할 수 있다.

용접과정의 해석으로 얻어진 결과를 초기상태로 지닌 상태에서 MSR과정의 해석을 수행한 후에는 (b)와 같이 용접부에 인장잔류응력이 완화되면서 전체적으로 잔류응력이 많이 완화되는 것을 확인할 수 있다.

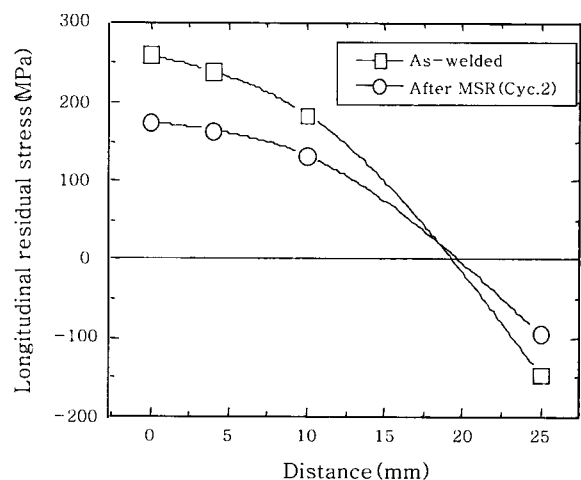
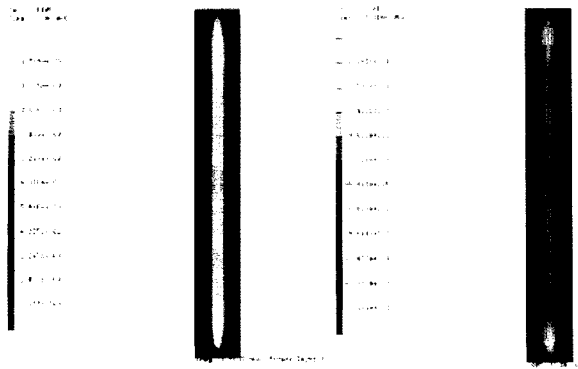


Fig. 8 Longitudinal residual stress before and after MSR in welded specimen



(a) After welding (b) After MSR

Fig. 9 Distribution of welding residual stress

Fig. 10은 용접후 실험과 해석을 통해 얻어진 용접선 방향에 대한 잔류응력 계측결과로 잔류응력 분포양상이 거의 동일하게 나타남을 알수있으며 이는 용접구조물에 나타나는 강성저하현상을 정확한 해석모델정립으로 재현할 수 있음을 나타낸다.

Fig. 11은 MSR과정의 기계적해석 후 실험과 동일한 위치에서 얻어진 응력-변형을 그래프로 실험결과와 유사한 경향을 보여주고 있다.

또한, 실험에서와 동일한 위치의 노드에서 잔류응력 완화정도를 검토한 결과 Fig. 12와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 실험의 경우는 기계적 응력 완화법 적용후 약 30%정도에 잔류응력이 완화 되었으며, 해석에서는 그보다 많은 양에 잔류응력이 완화되는 것을 알 수 있었다.

실험과 해석에서 완화되는 잔류응력의 양이 차이가 나는것은, MSR시행시 용접된 시편을 지그에 구속시키

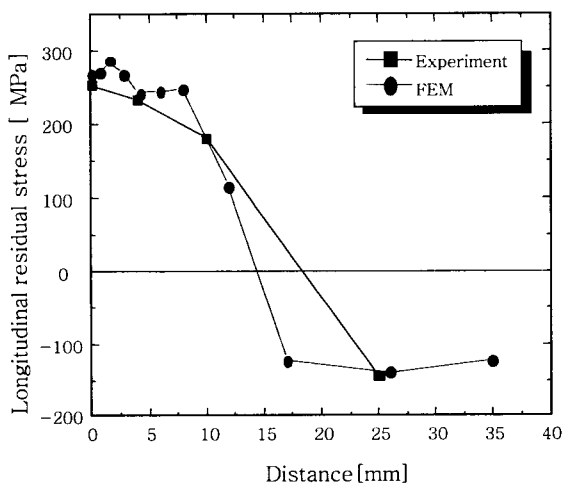


Fig. 10 Comparison with residual stress according to the result of experiment and FEM (after welding)

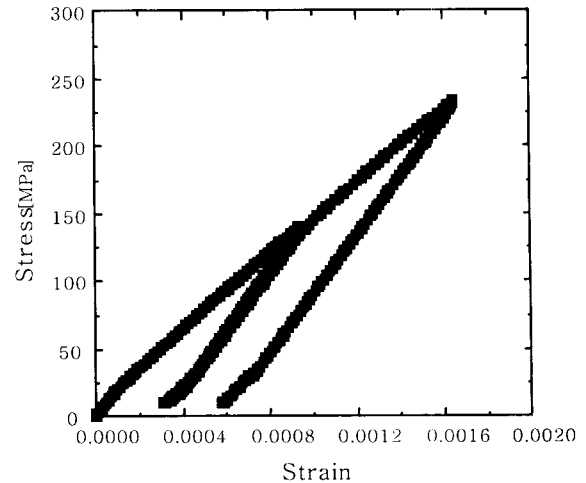


Fig. 11 Stress-strain behavior by mechanical stress release (FEM)

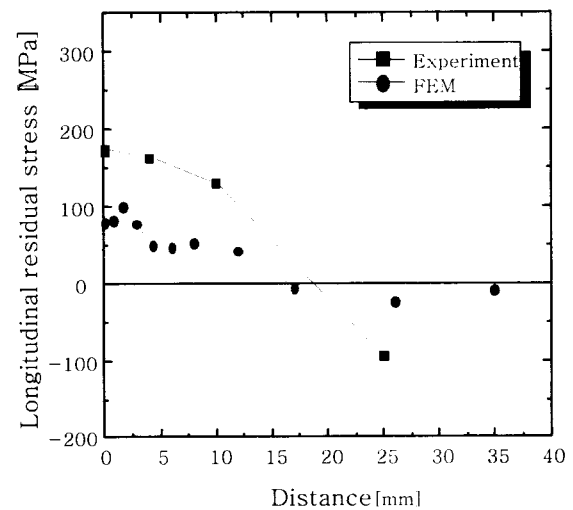


Fig. 11 Stress-strain behavior by mechanical stress release (FEM)

기 위해서는 불균일한 용접비드면을 평탄하게 연마하는 과정이 필요하게 된다. 그러나 이과정에서 연마면이 고르지 못하여 MSR적용시 시편 전체에 균일한 하중이 가해지지 않은 것으로 생각된다. 그리고 해석상에서 용접 후 나타나는 용접부 및 열영향부 경화 현상을 본 연구에서는 고려하지 않아 실험계측치보다 완화량이 크게 나타나는 것으로 생각된다. 따라서 향후 연구에서는 이런 현상들을 고려한 정밀한 실험 및 해석 모델의 수정이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

일반 구조용 열간 압연 강재인 SS400을 맞대기 용접한 후 재료의 허용응력 및 항복응력의 수준으로 부하

및 제하 과정을 실시하였을 때 용접구조물에 나타나는 비선형 거동을 고찰하고, as weld재 및 MSR재에 대하여 잔류응력을 측정하였다. 그리고 MSR과정을 유한 요소법을 이용하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 잔류응력이 존재하고 있는 용접 구조물은 잔류응력이 없는 일반 구조물에 비해 항복응력 이하인 상태에서도 비선형 거동이 발생하는 강성 저하 현상을 실험으로 확인 할 수 있었다. 그러므로, 정밀 구조물 제작을 위해선 용접 잔류응력의 완화는 반드시 필요함을 알 수 있다.

2) 잔류응력으로 인해 강성이 저하되었던 용접시편이 기계적 응력 완화과정을 통해 강성이 회복되는 현상을 실험으로 확인 할 수 있었다.

3) 실험 결과를 바탕으로 해석을 용접 공정과 하중의 부하 및 제하 구간의 두 구간으로 해석하여 잔류응력을 지닌 구조물이 MSR법 적용시 나타나는 비선형 거동과 잔류응력 완화 현상 그리고 MSR 법 적용후 강성이 회복되는 현상을 해석할 수 있는 시뮬레이션 모델을 정립 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 佐藤邦彦 : 溶接構造要覽, 黒木出版社, 188, 1988 (in Japanese)
2. M. Takanashi and K. Iida : Relaxation of Welding Residual Stresses by Reversed and Repeated Loadings, Journal of the JWS, 19-1 (2001), 129 (in Japanese)
3. Kunihiko Satoh, Toshio Terasaki : Effect of Welding conditions on Residual stresses Distributions in Welded Structures Materials, Journal of the JWS, 45-5 (1976), 150-156 (in Japanese)
4. Kunihiko Satoh, Toshio Terasaki : Effect of Transformation Expansion on Welded Residual Stresses Distributions and Welding Deformations, Journal of the JWS, 45-7 (1976), 560-566 (in Japanese)
5. J. B. Rolens, F. Maltrud and J. Lu : Determination of residual stress in submerged arc multi-pass welds by means of numerical simulation and Comparison with experimental measurements, IIW, 33-3 (1994), 152-159
6. Y. S. Yang : A Study on mechanical stress relieving in a butt-welded pipe, Journal of the KWS, 14-1 (1996), 75-81 (in Korean)
7. G. B. Jang, K. Y. Son : N.M for the Effect of P.T on Residual Stress Relaxation, Journal of the KWS, 17-6 (1999), 84-89 (in Korean)
8. J. S. Park, M. S. Han : Mechanical Stress Relief Technology and its Application, Journal of the KWS, 15-3 (1997), 9-35 (in Korean)
9. S. B. Shin, J. G. Youn : Analysis of Restraint Stress Acting on the Weldment, Journal of the KWS, 15-1 (1997), 9-14 (in Korean)