

解 說

大韓熔接學會誌
第5卷, 第2號, 1987年 6月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 5, No. 2, Jun., 1987

기계적인 잔류응력 이완방법의 원리와 기계적 성질에 미치는 영향

김 용 완* · 김 희 진*

1. 서 론

용접시에 발생하는 잔류응력은 구조물이 작동중이거나 가공될 때에 응력이 부분적으로 이완되어 치수의 변화와 변형을 유발하는 원인이 된다. 더구나 국부적으로 남아있는 높은 인장잔류응력은 구조물이 받는 하중과 중첩되어 취성파괴의 원인이 되기도 하며, 피로저동에도 영향을 미친다. 또한, 부식분위기 하에서는 응력부식균열(stress corrosion cracking)의 주된 원인이 되며 박판에서의 압축잔류응력은 좌굴강도(buckling strength)의 감소를 가져온다. 때문에 대부분의 용접구조물에 대해서 잔류응력을 이완시킬 수 있는 처리를 행하여 주는 것이 바람직하며, 경우에 따라서는 필히 행하여지도록 되어 있다.^{1,2)}

잔류응력을 이완하는 방법에는 후열처리에 의한 방법(post weld heat treatment, PWHT)과 기계적인 잔류응력이완법(mechanical stress relieving, MSR)이 있다. 후열처리에 대해서는 많은 연구결과가 진행되었을 뿐만 아니라, 그 효과 또한 확실하여 현재 가장 널리 사용되어 지고 있는 방법이다. 그러나 MSR(mechanical stress relieving) 처리는 이에 대한 연구가 미약할 뿐만 아니라 신빙성의 결여로 인하여 그 적용에 있어서도 활발치 못한 실정이다. 그러나 대형압력용기의 경우는 열처리로의 크기제한 등으로 불가능하거나, 또는 PWHT에 비해 MSR이 무척 경제적이란 이유 등으로 MSR처리등을 추천하게 되고 이의 승인과 함께 가끔 적용되어지고 있는 형편이다.

순수한 의미의 MSR처리를 분류하여 보면 (1) 정적인 하중을 가하는 방법인 과부하법(over loading method 혹은 pre-loading method)과 (2) 동적인 하

중을 가하는 방법인 진동응력이완법(vibrational stress relieving, VSR) 그리고 (3) 용접을 하면서 용접사가 용접구조물에 적당한 충격을 주는 peening방법 등이 있다. 이중에서도 MSR 처리를 대표하는 과부하법은(이하 이를 MSR이라 칭함) 용접구조물에 정적인 하중을 가하여 잔류응력을 이완시키는 방법인데, 이에대한 자세한 원리는 다음절에 기술되어있다. 그러나 이와 같은 MSR 방법을 어떠한 구조물이나 적용할 수 있는 것은 아니다. MSR을 적용하기 위해서는 구조물에 정적하중을 용이하게 가할 수 있어야 하므로 압력용기나 pipe등과 같이 밀폐된 구조물에 아주 적합한 방법이다. 특히, 대형 압력용기와 같이 크기로 인하여 PWHT가 불가능할 경우에 MSR처리는 극히 유용할 뿐만 아니라 거의 필수적이라 해도 과언은 아니다. 그럼에도 불구하고 현재까지 행해진 연구를 살펴보면 대다수가 MSR의 원리 및 이론적인 측면에 치우쳐 있어서 실제 산업용 구조물에 적용하고자 할 때에는 실질적으로 필요한, 즉 engineering적인 실제적 data가 극히 부족한 형편이다. 예를 들면, 현재까지도 MSR 처리에 대한 test specification이 마련되어 있지 못할 뿐만 아니라, MSR처리후, 이의 적합성 여부의 판단도 표준화되어 있지 않다. 더구나 MSR처리후 어느정도 잔류응력이 감소되었는지 그리고 기계적 성질은 어떻게 변했는지에 대한 연구는 극히 미미한 실정이다. 단지 기계적 성질에 대해서는 Hiroshi등⁵⁾이 CO₂용접을 행한 시편에 대해 bead에 수직인 방향과 평행한 방향으로 인장하중을 가하여 MSR 처리를 행한뒤에 충격치의 변화에 대해 보고한 바가 있다. 그 결과에 의하면 하중과 충격치의 감소는 비례한다고 했다.^{3,4,5)}

* 현대중공업 용접기술연구소(HW&MRI)

그러나 그들이 적용한 MSR 하중은 도재의 항복응력보다 훨씬 높은 응력상태로써 실제 구조물에 적용되는 MSR 하중, 즉 도재의 항복응력보다 낮거나 도재의 항복응력전후의 하중, 과는 차이가 많아서 실용성이 부족하다고 생각된다.

실제 fabricator 측면에서 MSR을 PWHT와 비교하면 경제적인 면이나 공정적인 면에서 훨씬 유리하므로 잔류응력의 감소정도와 기계적 성질의 변화에 대한 평가만 긍정적이라면 되도록 확대 적용하고자 할 것이다. 이를 위해서는 앞에서 언급했듯이 이들에 대한 평가가 우선되어야 한다고 생각하여 본 연구를 수행하게 되었다. 6,7) 본 연구에서는 실험적으로 MSR 처리를 하고 MSR 전후의 잔류응력을 측정하여 잔류응력 감소량을 정량적으로 평가해 보고자 하였으며, MSR 처리를 하는 동안 strain의 변화양상을 측정하여 보고자 했다. 또한, MSR 처리에 의해 국부적으로 인장잔류응력이 높은 부위에서는 소성변형이 발생하므로, 이로 인한 toughness의 감소가 우려되어서 이들 부위에 대해서는 Charpy 충격실험을 행하여 MSR 처리의 영향을 조사하였다.

II. MSR의 원리

잔류응력이 남아 있는 구조물에 열을 가하면 항복

응력이 낮아져 높은잔류응력 부터 점차 항복응력을 넘어 소성변형을 일으키고, 이로 인하여 잔류응력이 이완되는 것이 후열처리의 원리다. 철의 경우에는 650°C 근방이 되면 재료의 항복응력이 거의 0이 되므로 구조물에 존재하던 잔류응력의 거의 모두가 이완되게 된다. 이에 비해 MSR처리는, 재료의 항복응력은 변하지 않는 상태에서, 외부로 부터 하중을 가하여 이를 잔류응력과 중첩시켜서 항복응력을 넘게 함으로써 소성변형을 유도하여 잔류응력을 이완시키는 것이다.

Fig. 1은 stress-strain 관계에서 잔류응력이 이완되는 원리를 설명한 것이다. A는 용착금속 부위로 인장잔류응력이 가장 높게 나타나는 부위를 나타내고, A'는 용착금속에서 멀리 떨어져서 인장잔류응력이 낮게 나타나는 부위를 표시한다. A에서의 인장잔류응력은 σ_A 이고 그때의 strain은 ϵ_A 이다. 또한 A'에서의 인장잔류응력은 σ'_A 이고 strain은 ϵ'_A 이다. 여기서 용접 진행방향으로 인장하중을 가하면 stress-strain curve 상의 A는 항복점을 넘어서 소성변형이 일어난 B의 상태가 된다. 그러나 A'은 아직 탄성영역내인 B'의 상태에 도달하게 된다. 인장하중을 가하는 동안, 즉 A'는 B'으로 가는 동안, strain은 두 위치에서 같은 양만큼 증가하지만 (eq. 1), 응력은

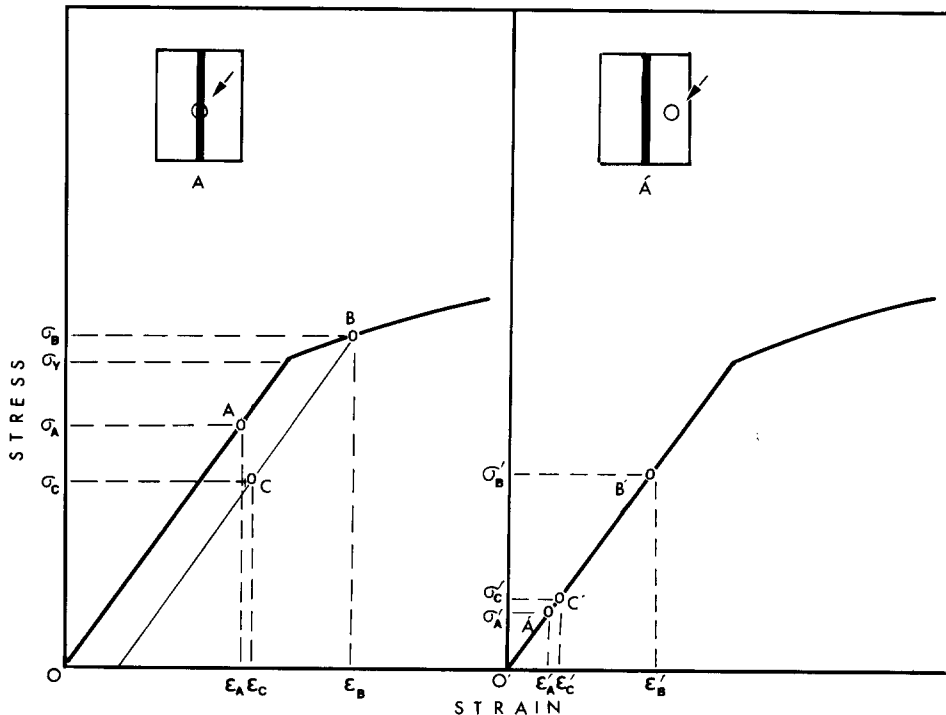


Fig. 1. Schematic drawing of stress-strain behaviors during MSR treatment.

A에서 B로 가는 것이 소성변형으로 인해 적게 증가하여 다음의 관계가 성립한다.

$$\epsilon_B - \epsilon_A = \epsilon'_B - \epsilon'_A \quad (1)$$

$$\sigma_B - \sigma_A < \sigma'_B - \sigma'_A \quad (2)$$

반면에 하중을 제거하는 동안에는 모두 탄성거동을 하므로 응력과 strain이 모두 같은 양만큼 감소하여 다음의 관계가 성립한다.

$$\epsilon_C - \epsilon_B = \epsilon'_C - \epsilon'_B \quad (3)$$

$$\sigma_C - \sigma_B = \sigma'_C - \sigma'_B \quad (4)$$

따라서 용접구조물에 외부하중을 가하게 되면, 인장 잔류응력이 최대로 존재하는 부위부터 소성변형을 일으켜 하중을 제거한 후에는 잔류응력의 감소를 보여주게 된다.

그리고 Fig.1에서 감지할 수 있듯이 가공경화지수 (strain hardening coefficient)가 큰 재료는 외부에서 큰 하중을 가해도 많은 일이 가공경화하는데 사용되므로 잔류응력의 이완정도가 적게 나타난다. 또한, 재료의 인성은 재료가 파단될 때까지 가해진 일로써 나타내지므로 MSR 처리를 행함에 따라 수반되는 소성변형으로 인해 재료의 인성이 감소할 수 있게 된다. 이에 대해서는 본 보고의 결과에 서술하였다.

III. 실험

A. 시편준비 및 MSR 방법

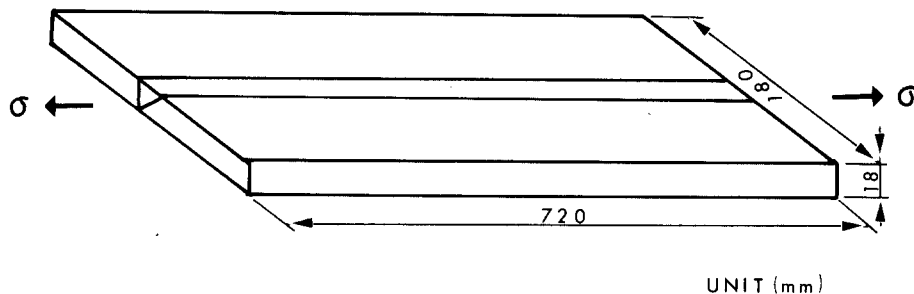
시편은 폭 180mm, 길이 720mm, 그리고 두께가 18mm인 연강판을 SAW(submerged arc welding)로써

- WELDING PROCESS - SAW
- BASE METAL - M. S.

1 pass 맞대기 용접(butt welding)을 하여 잔류응력을 발생시킨 것으로 Fig.2에 잘 나타나 있다. MSR 처리는 100톤 인장시험기를 사용하여 14, 20, 28kg/mm²의 하중을 load-control로써 각각의 시편에 용접 진행방향에 평행하게 가함으로써 행하였다. MSR처리를 하는동안 단축 스트레인 게이지를 용착금속위에 하중을 가하는 방향으로 부착하여 하중과 strain과의 관계에 대해 조사하였다. 하중을 가한 순서는 Fig. 3에 나타나 있는 것과 같은데, 먼저 MSR 하중(14, 20, 28kg/mm²)의 5%씩 증가시키면서 매 단계마다 그때의 스트레인을 측정하고, 같은 방법으로 하중을 단계별로 제거하면서 스트레인을 측정하였다. 그리고 더 이상의 소성변형이 발생하는가를 보기위해 다시한번 앞의 순서와 같이 하중을 가한후 제거시키면서 strain을 측정하였다.

B. 잔류응력의 측정

As-welded 상태에서 그리고 MSR 후에 잔류응력을 hole drilling method로써 측정하여 비교했다. 잔류응력의 측정은 3축 스트레인게이지를 측정하고자 하는 위치에 붙인 다음, 구멍을 뚫어 자유면을 만들고 이때 이완되는 잔류응력을 스트레인게이지로부터 측정하였다. 그런데 측정값의 정확도는 구멍을 뚫는 위치에 따라 영향을 많이 받으므로 구멍의 중심을 정확히 맞출 수 있는 milling guide를 사용했다. Strain으로 부터 잔류응력은 다음식으로 계산하였다.⁸⁾



$\sigma : 14, 20, 28 \text{ KG/mm}^2$

Fig. 2. Configuration of MSR specimen for welding.

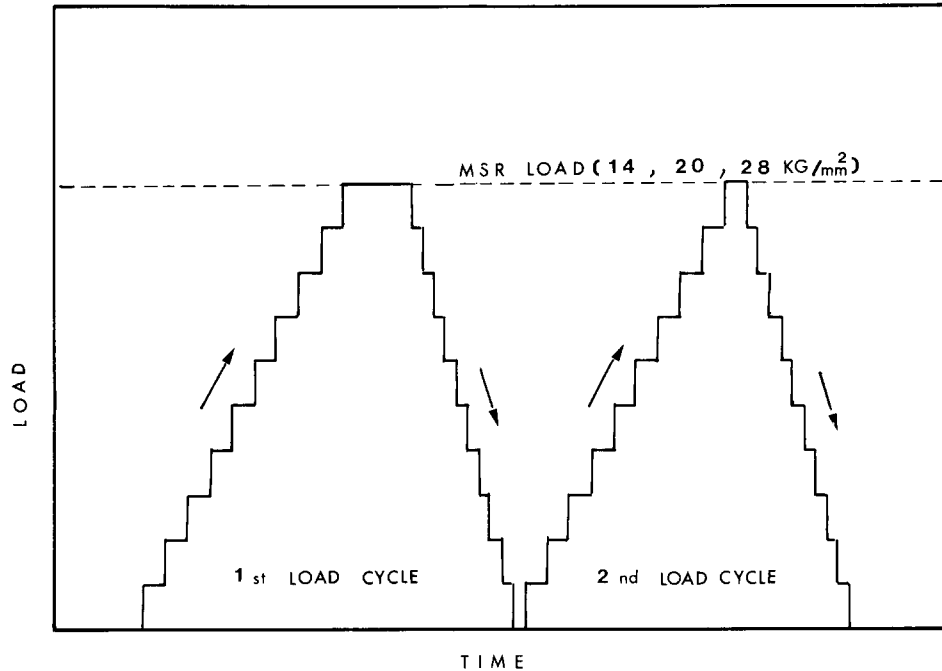


Fig. 3. Procedure of MSR (load vs. time) treatment.

$$\sigma_x, \sigma_y = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} \pm \frac{\sqrt{2} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2}}{4B} \quad (5)$$

여기서

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \cdot \frac{1}{r^2}$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{4}{1+\nu} \cdot \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right)$$

$$r = D/D_0$$

D = 구멍의 중심으로부터 strain gauge 중심까지의 거리

D_0 = 구멍의 지름

E = Young's modulus

ν = Poisson's ratio

$\sigma_{x,y}$ = principal stresses

$\epsilon_{1,2,3}$ = measured strains

C. 충격시험

상온에서 as-welded 상태의 시편에 대해 모재와 용착금속의 충격치를 조사하였다. 그리고 14, 20, 28 kg/mm²의 하중으로 MSR을 실시한 시편에 대해서도 모재와 용착금속의 충격치를 측정하여 as-welded 상태의 충격치와 비교하였다.

IV. 결과 및 토론

A. 잔류응력의 감소

As-welded 상태에서 모재의 항복응력은 27kg/mm²이었고 용착금속의 항복응력은 38kg/mm²이었는데, 잔류응력을 측정해 본 결과 용착금속에서는 항복응력보다 조금 낮은 36kg/mm²의 인장잔류응력이 존재했고 용접 비이드로부터 점차 멀어짐에 따라 감소하여 압축잔류응력으로 바뀌었다. Fig.4는 시편에 용접을 한 상태와 14kg/mm²의 하중을 가하여 MSR 처리를 한 후의 잔류응력을 측정하여 비교한 것이다.

여기서 보여주는 응력은 최대 주응력을 나타낸다. 이 결과에서 알 수 있듯이 MSR 처리후에는 약 8kg/mm²의 잔류응력이 감소한 28kg/mm²이 남아 있었는데 이는 용접직후 잔류응력의 23%정도가 감소했음을 나타낸다. 용착금속에서 멀리 떨어진곳에서는 14kg/mm²의 외부하중과 잔류응력이 중첩되어도 항복응력을 넘지 못하여 MSR에 의한 잔류응력의 감소는 예상할 수 없지만, 전체적인 잔류응력의 재분포에 따라 변화가 있게 되는데, 이러한 변화를 Fig.4에서 보여주고 있다. 이는 잔류응력이 구조물내에서 항상 평형을 이루고 있어야 하므로 용착금속에서의 잔류응력의 이완으로 인해 힘의 평형을 이루기 위해 건

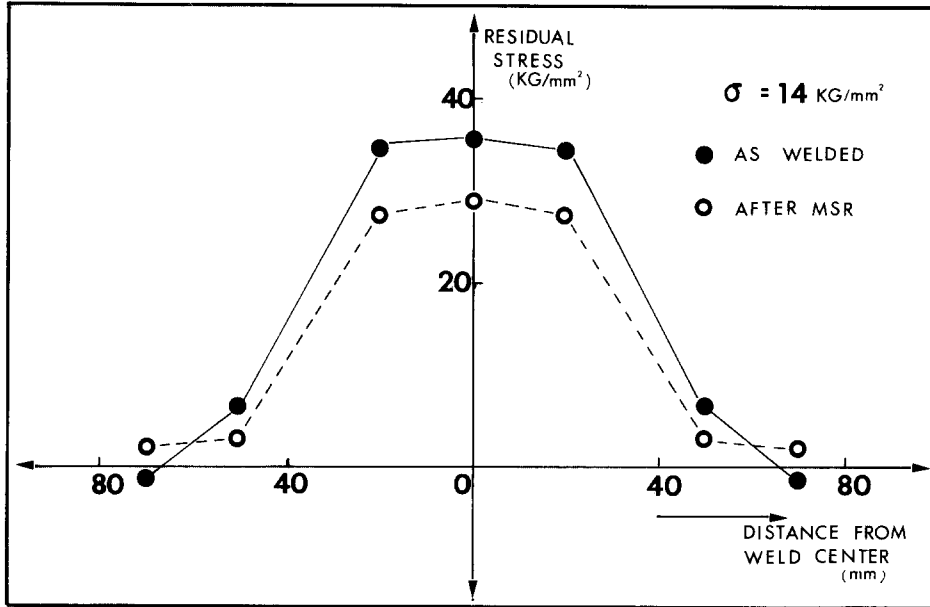


Fig. 4. Distribution of residual stress before and after MSR treatment.

체적으로 재분포를 하기 때문이다. 이로 인하여 MSR의 효과가 없는 부위(즉 잔류응력이 낮거나 압축 잔류응력이 존재하는 부위)에서도 MSR 전후의 잔류응력값은 다르게 된다.

MSR 처리를 각각 14, 20, 28kg/mm²로 행하였을

때 용착금속에서의 잔류응력변화를 Fig.5에 나타내었다. MSR하중의 증가와 더불어 잔류응력의 감소는 더욱 커지는데 모재의 항복응력인 27kg/mm²보다 조금 높은 28kg/mm²의 MSR하중을 가했을 때는 잔류응력이 처음보다 33% 감소했음을 알 수 있었다. 그

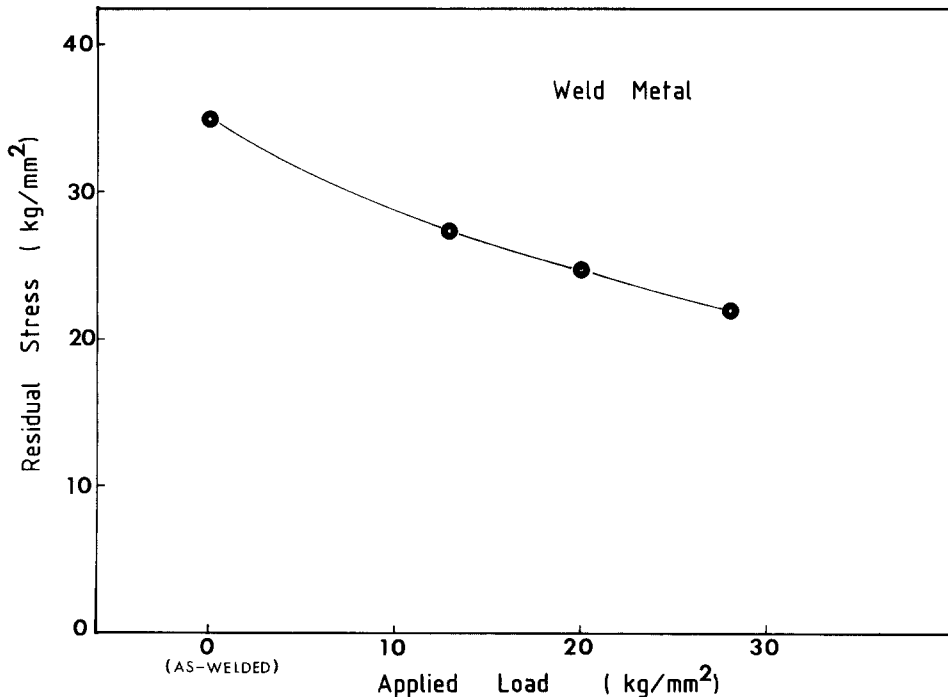


Fig. 5. Effect of MSR load on the residual stress remained after MSR

리나 MSR 하중과 잔류응력의 이완정도는 모재와 용착금속의 항복응력의 차이 그리고 소성상태의 응력-스트레인 관계의 두가지 인자로부터 직접적으로 영향을 받으므로 재료에 따라 다르게 된다.

무엇보다도, Fig.5에서 보듯이, MSR 처리로는 잔류응력을 완전히 제거할 수 없으며, 상당량의 잔류응력이 잔존하게 되므로 어느정도의 잔류응력이 존재하여도 문제가 되지 않는 경우에 적합하다.

B. 인성의 변화

MSR 처리는 상온에서 소성변형을 일으켜 잔류응력을 이완시키는 것이므로 소성변형으로 인해 재료의 인성이 감소할 것으로 예상된다. 이와 같은 감소 경향은 Fig.6과 7에서 보여주고 있다. 모재에서는 모재의 항복응력인 27kg/mm^2 보다 약간 높은 28kg/mm^2 의 하중으로 MSR을 실시한 후에도 충격치의 감소는 아주 적음을 알 수 있다(Fig.6). 이에 비해 용착금속에서는 20kg/mm^2 의 하중으로 MSR을 했을 때까지 충격치의 감소가 아주 적지만 모재의 항복응력보다 높은 28kg/mm^2 으로 MSR 처리를 했을때는 급격히 감소함을 알 수 있다(Fig.7).

본 실험의 결과에서 보듯이 MSR 하중을 높이면 잔류응력의 감소도 커지고 충격치의 감소도 커지므로 잔류응력의 감소와 충격치의 감소를 다음과

같이 비교할 수 있다. 14kg/mm^2 의 하중으로 MSR을 했을 때는 잔류응력의 감소가 23% 였고 충격치의 감소는 없었다. 이에 비해 모재의 항복응력보다 높은 28kg/mm^2 을 가했을 때는 잔류응력은 33% 감소한 반면 충격치는 43% 감소했다. 따라서 MSR 하중은 잔류응력 감소 측면과 인성 감소 측면을 동시에 고찰하여 설정하여야 함을 알 수 있다. 실제 구조물에 MSR 처리를 할 경우에는 안정성문제로 인해 MSR 하중을 항복응력의 90% 이상 가하는 것을 설계적인 측면에서 허용을 하지 않으므로 MSR 처리에 의한 인성저하는 미약하다고 할 수 있다.

C. Stress-Strain 이력

Fig.8은 20kg/mm^2 의 하중으로 MSR 처리를 행하는 동안 용착금속에서의 strain의 변화를 조사한 것이다. 첫번째하중을 가함에 따라 용착금속부는 약 0.05% 정도의 strain에서 이미 비선형 거동이 나타나 소성변형이 일어나고 있음을 알 수 있는데, 이 사실로 미루어 보아 인장잔류응력이 높게 남아 있었음을 짐작할 수 있다. 이후 두번째하중에서는 소성변형이 없는 탄성거동을 보여주고 있다. 따라서 MSR 처리를 행한후의 구속물은 높은 응력까지 탄성거동을 할 것이다. 이렇게 항복응력이 높아지면 구조물의 비선형거동이 없어지고 응력과 스트레인이 선형

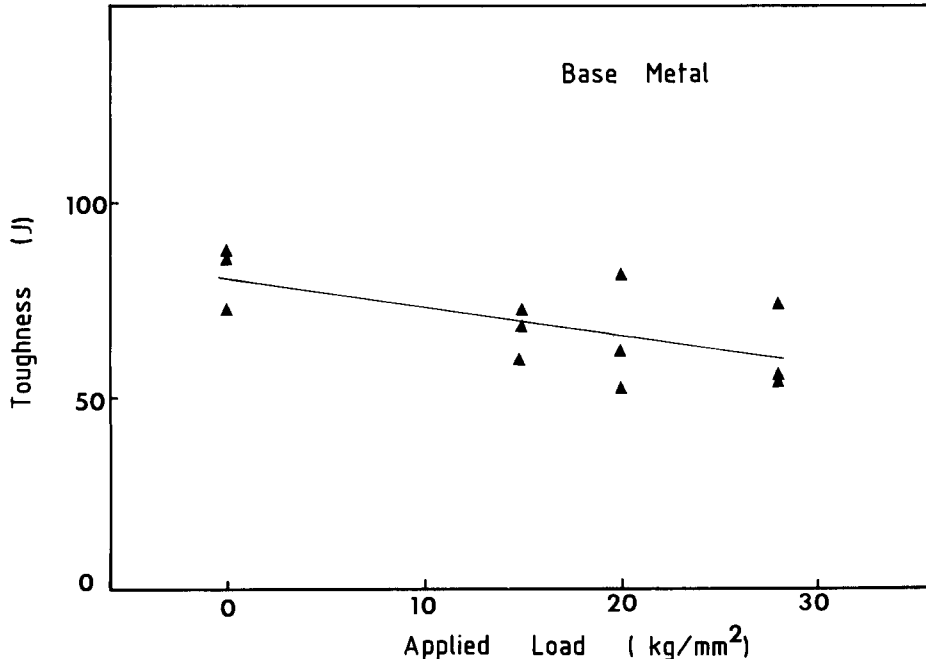


Fig. 6. Effect of MSR load on the base metal toughness

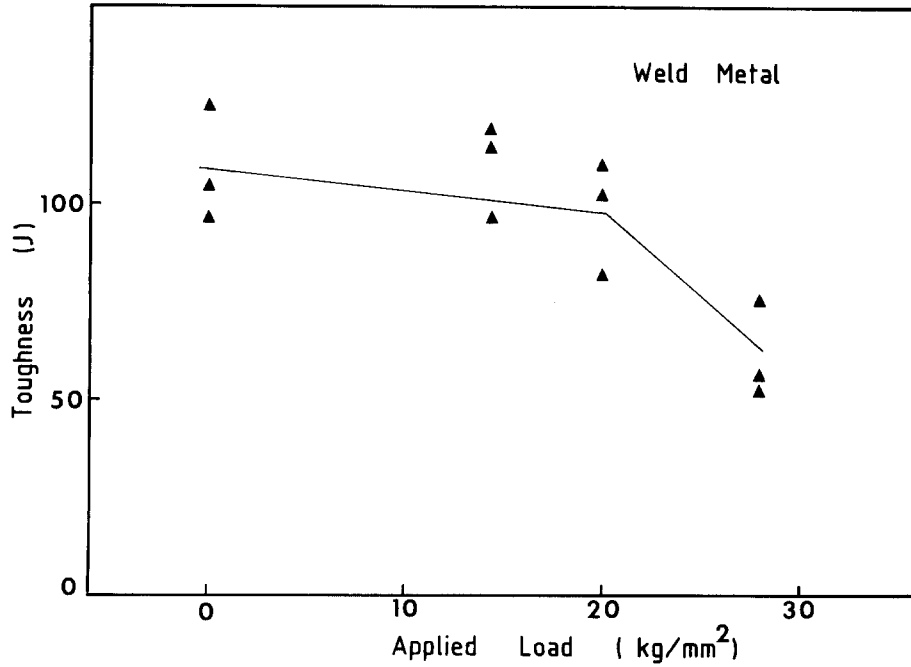


Fig. 7. Effect of MSR load on the weld metal toughness.

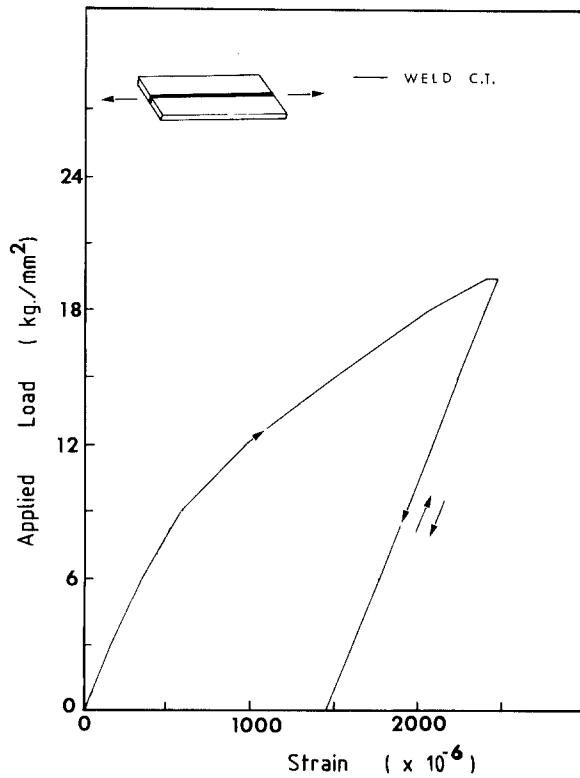


Fig. 8. Applied load-strain curve recorded during MSR treatment.

의 관계를 가지는 범위가 넓어지므로 안전한 응력상태가 된다.

V. 결 론

MSR 처리를 실제구조물에 적용하기 위해서 잔류응력과 기계적성질에 대하여 조사해 본 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) MSR 처리는 소성변형을 유발시켜 높은 인장 잔류응력을 감소시키는데 유효하며, 잔류응력이 낮은 부위에 대해서는 잔류응력 재배치에 따른 응력치의 변화가 수반된다.
- (2) 잔류응력 감소량은 MSR 하중에 비례하여 증가한다.
- (3) 모재의 항복응력보다 낮은 하중으로 MSR 처리를 하면 충격치의 감소는 무시할 정도이지만 모재의 항복응력보다 높은 하중으로 행하면 용착금속에서 충격치의 감소가 현저하다.
- (4) MSR 처리를 하게되면 항복응력이 높아지고, 잔류응력이 감소해서 선형의 응력-스트레인의 관계를 가지는 범위가 넓어져서 구조적으로 안전한 상태가 된다.

참 고 문 헌

1. Koichi Masubuchi, Analysis of Welded Structure, Pergamon Press, 1980
2. 米谷茂, 殘留應力の發生과 對策, 養賢堂, 日本, 1975
3. Kihasa, H., Masubuchi, K., and Iida, K., "Initiation and Propagation of Brittle Fractures in Residual Stress Fields", Document X-219-59, Commission of the International Institute of Welding, 1959
4. 松岡, 直井, "파이프 圓周溶接部의 內壓에 의한 溶接殘留應力除去效果," 日本溶接學會論文集, 52-2, pp. 29-35, 1983
5. 田中, 佐久, 松岡, "溶接殘留應力の 機械的除去에 의한 材質變化의 評價" 日本溶接學會論文集, 第4卷1號, pp. 95-101, 1986
6. H. C. Merchant, "Productive Applications of Mechanical Vibrations," winter annual meeting of American society of mechanical engineers, Phoenix, Arizona, November 14-19, 1982
7. H. Lee, "Shakedown(mechanical stress relief) of Liquid Filled Pressuse Vessels, "LLOYD's Register of Shipping, London
8. ASTM E 837-81