

피로하중하 용접 잔류응력 완화의 정량적 평가

한승호* · 강성보* · 신병천*

Relaxation of Welding Residual Stresses under Fatigue Loads

S. H. Han, S. B. Kang and B. C. Shin

Key Words: Residual Stress, Welded Component, Fatigue Load, Stress Relaxation

Abstract

Residual stresses can be produced during manufacturing processes, eg. welding, machining and plastic working, and also in service. It can be superimposed with externally applied loads, so that unexpected deformations and failures of members will be occurred. Especially, the strength and the life of welded components are affected extensively by the residual stresses distributed around their weldments not only under static loads, but also fatigue loads. These residual stresses are not kept constant, but relaxed or redistributed during service. Under static loads the relaxation takes place when the residual stress superimposed with external stress exceeds locally the yield stress of material used. It is shown that under fatigue loads the residual stress is considerably relieved by the first or few cycle loading, and then gradually relaxed with increasing loading cycles. Although many investigations in this field have been carried out, the phenomenon and mechanism of the stress relaxation by mechanical means are still not clear, and there are few comprehensive models for predicting specific effects on the stress relaxation. In this study, the effects of applied static and fatigue loads on the residual stress relaxation were investigated, and a model to predict quantitatively the residual stress relaxation was proposed.

1. 서론

잔류응력은 용접, 기계가공, 소성가공 등의 제조과정뿐만 아니라 부품의 사용과정에서도 발생하며 정하중 또는 피로하중과 같은 외부하중과 중첩되어 부품의 변형과 파괴에 영향을 미친다. 이러한 이유로 잔류응력 완화의 필요성이 점차 대두되었으며, 금속뿐만 아니라 세라믹, 유리, 복합재료, 반도체, 박막구조에 이르기까지 그 대상은 다양하다.^(1,2)

잔류응력을 완화시키는 방법으로 풀림 또는 뜨임과 같은 열처리와 기계적인 하중을 가하는 방법 등이 있다. 열처리에 의한 응력완화는 풀림, 뜨임과 같은 공정을 통하는 것이 일반적이며, 재

료의 재결정온도 근처에서 수 시간 가열한 다음 실온까지 서냉시켜 잔류응력을 거의 모두 완화시킬 수 있다.^(1,3) 열처리가 바람직하지 않은 경우, 기계적 응력완화가 이용된다. 이것은 잔류응력을 갖는 부재에 외부하중을 주어 작용응력과 잔류응력의 합이 재료의 항복응력에 도달하게 하여 국부적인 소성변형을 일으키고, 탄성스트레인으로 남아있는 잔류응력을 소성스트레인으로 변환시켜 잔류응력을 완화 혹은 재분포시킨다.^(1,3) 정하중 하에서 뿐만 아니라 피로 또는 진동하중 하에서도 잔류응력이 점진적으로 완화되며, 작용응력과 사이클 수가 이를 결정한다.^(1,2,4) 또한 피로하중의 크기별로 고응력, 시간강도 및 피로한도 역에서 서로 다른 메카니즘으로 잔류응력이 완화된다고 보고되고 있다.^(1,2)

특히 용접부에 분포하는 잔류응력은 부재의 강도와 수명에 지대한 영향을 미친다. 용접구조물

* 한국기계연구원 구조시스템연구부

에 외부하중이 가해질 때 잔류응력의 안정성, 부분적 완화 및 재분포 현상을 파악하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 지금까지 피로에 의한 잔류응력 완화를 다룬 연구는 많지만, 아직까지 잔류응력 완화정도를 정량적으로 평가할 수 있는 모델을 제시하지 못하고 있다. 지금까지 연구결과를 살펴보면 잔류응력 완화량은 정하중의 경우 작용응력의 크기가 중요한 변수이며, 피로하중하에서는 응력진폭과 부하 사이클 수가 잔류응력 완화를 결정하며, 그 외 다른 변수들은 잔류응력 완화와 무관하다.^(1,2,4-6) 또한 피로하중하 잔류응력의 완화는 공통적으로 첫 번째 또는 수 번째 피로 사이클에서 크게 발생하며, 사이클 수의 증가와 함께 지수적 혹은 대수적 완화를 가져오고 응력의 크기에 따라 완화율이 결정된다는 연구결과가 있다.^(1,2,7,8)

본 연구에서는 작용하중 크기에 따라 잔류응력 완화에 미치는 영향 그리고 피로하중하 응력진폭과 사이클 수의 영향을 고려하여 용접부 잔류응력 완화를 정량적으로 평가하는 기법에 대해 연구하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

사용재료는 두께가 12mm인 SM490B이고, 압연에 따른 가공 잔류응력을 제거하기 위하여 열처리(700°C/2hr, 노냉)를 실시하였다. Table 1은 사용강재의 화학적 성분과 열처리 전·후의 기계적 특성이다. 사용된 강재의 기계적 특성은 열처리 전·후 차이가 없음을 확인하였다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SM490B

Chemical Composition (wt%)							
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0.155	1.304	0.0166	0.0104	0.423	0.032	0.038	0.018
Mechanical Properties							
σ_y (MPa)	UTS (MPa)		el.(%)				
352 [*]	514 [*]		29 [*]				
376 ^{**}	526 ^{**}		35 ^{**}				

* : 열처리 전, ** : 열처리 후

시험체 종류는 모재 및 용접재로 구분하였다.

모재 시험체는 용접작업 공정을 제외하고 용접시험체와 동일하다. 용접 시험체의 제작공정은 다음과 같다. 열처리된 SM490B를 104(폭)x400(길이)x 12(두께)mm으로 가공하고, 용접선을 따라 7(폭)x 10(깊이)mm의 Grooving 작업을 실시하였다. 용접시험체의 수축과 변형을 방지하기 위하여 시험체 고정용 지그를 Fig. 1과 같이 자체 제작하여 용접을 수행하였고, Cu-Plate를 이면비드 용락 방지용으로 사용하였다. 사용된 용접법은 CO₂-가스 용접이며 자동용접 조건을 구현하기 위하여 불스큐류를 이용한 모터이송장치에 용접기를 장착하는 방식을 채택하였다. 용접조건은 300A, 30V, 240mm/min이고, CO₂-유량은 18ℓ /min으로 고정하였으며, ϕ 1.2의 용접와이어를 사용하였다. 용접작업시 모재와 노즐간의 거리는 18mm로 일정하게 유지하였다. 입열량은 약 22,500 J/cm이다. 용접작업이 완료된 후 시험체 온도가 150~200°C 사이에서 고정용 볼트를 풀고 시험체를 제거하였다. 이 시험체를 Fig. 2와 같이 시험편으로 제작하였다. 모재와 용접 시험편 모두 시편 중앙에 ϕ 14 홀을 가공하여 피로시험시 균열발생위치를 모재로 국한시켜, 용접 시험편의 경우 HAZ 영향을 배제하였다.

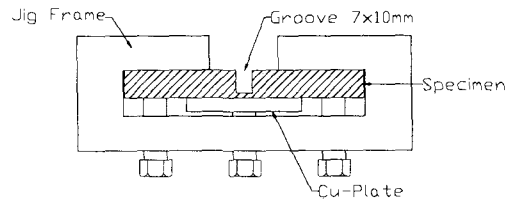


Fig. 1 Jig configuration for welding process

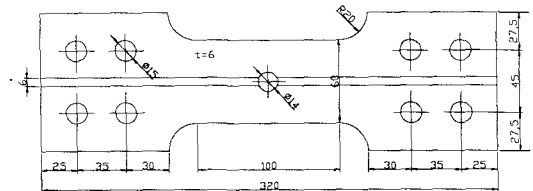


Fig. 2 Specimen configuration

2.2 실험방법

정·피로하중 부하를 위하여 용량이 25ton인 MTS사의 UTM을 이용하였다. 피로시험의 경우 하중비 R=0.1, 하중주파수 10Hz인 일정하중진폭

을 시험편에 가하였다. 용접 시험편의 잔류응력을 계측하기 위하여 단면절단법을 이용하였다. 단면절단법은 잔류응력 계측부위에 스트레인 게이지를 부착하고 단면을 절단시키면서 이루어지는 스트레인 값으로 잔류응력을 계측하는 방법이다. 스트레인 게이지 부착위치와 절단면의 위치를 Fig. 3에 모식도로 나타내었다. 시험편 절단은 Hand Sawing으로 실시하였으며, 절단작업시 Thermocouple(Module 80TK FLUKE)을 절단면을 기준으로 스트레인 게이지 반대쪽에 부착하여 온도변화를 계측하였다. 이때 계측된 온도는 25~38°C로서 스트레인 게이지의 STC(Self Temperature Compensation)영역에 놓여, 절단시 발생한 열에 의한 스트레인 신호의 오차가 없음을 확인하였다. 각각의 스트레인 게이지에서 얻어진 신호로부터 측정된 잔류응력은 아래식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_{res,y} = -E \cdot (\epsilon_y + \mu \epsilon_x) / (1 - \mu^2) \quad (1)$$

$$\sigma_{res,x} = -E \cdot (\epsilon_x + \mu \epsilon_y) / (1 - \mu^2) \quad (2)$$

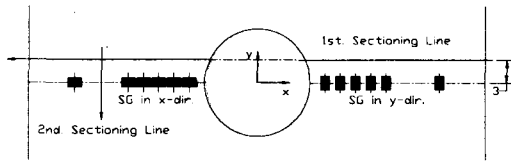


Fig. 3 Location of strain gages and sectioning lines

피로하중 부하시 부하 사이클 수에 따른 잔류응력 완화를 보다 효율적으로 계측하기 위하여 단면절단법 이외에 비파괴식 측정법인 자화식 응력측정법을 병행하였다. 사용된 장비는 Stresstech사의 Stress Scan 500C로서 잔류응력을 Magnetoelastic Interaction에 의한 Barkhausen Noise 강도로 나타낼 수 있다.

3. 실험결과

3.1 잔류응력에 의한 피로강도의 변화

모재 및 용접 시험편에 대하여 실시한 피로시험 결과는 Fig. 4와 같다. 모재의 경우 200만회의 반복 사이클 수에 대하여 피로한도 값은 202MPa로 계측되었으며, S-N 선도는 그림 중에 표시하

였다. 이에 대하여 용접재의 경우, 시간강도 영역 ($\Delta\sigma_r \geq 250\text{MPa}$)에서는 모재의 피로거동과 유사한 결과를 보이고 있는데 반해, 그 이하의 영역에서는 모재의 파단수명 보다 용접재의 수명이 다소 짧아지는 현상이 관찰된다. 200만회의 반복 사이클 수에 대한 피로한도는 172MPa로 모재에 비하여 낮게 나타났다. 그림 중에 표시한 용접재 S-N 선도의 경우, 기울기가 모재에 비하여 5.97으로 감소하였다. 본 연구에서 사용된 용접 시험편은 일반적으로 용접재에서 얻어지는 S-N선도 기울기 3 보다 큰데, 이는 균열의 발생과 진전이 모재에서 이루어지고, 모재와 단지 잔류응력 영향만이 추가되었기 때문이다. 피로시험에 사용된 시험편은 모재 및 용접재 모두 동일한 형상이며, 균열 발생부의 위치도 모두 모재로 국한시켜 저응력 수준에서 파단수명의 차이는 용접시험편에 상존하는 잔류응력 때문으로 판단된다. $\Delta\sigma_r \geq 250\text{MPa}$ 영역에서는 용접시험편의 잔류응력이 외력에 의하여 모두 완화되어 모재와 용접재가 동일한 거동을 보이고, $\Delta\sigma_r < 250\text{MPa}$ 영역에서는 용접 시험편에 상존하는 잔류응력이 완전히 완화되지 못하고 부분적으로 남아, 이 잔류응력이 외력과 중첩되어 파단수명을 감소시키는 것으로 사료된다.

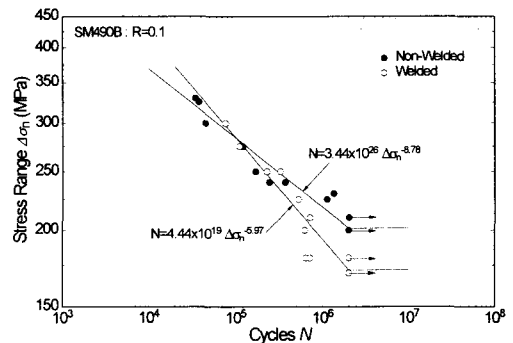


Fig. 4 Fatigue test results

3.2 정하중 부하시 잔류응력 완화

부하하중 크기에 따른 잔류응력 완화정도를 평가하기 위하여 하중크기를 변화시키면서 잔류응력을 계측하였다. Fig. 4의 결과에서 $\Delta\sigma_r = 180, 200, 225, 250\text{MPa}$ 에 준하는 하중을 1 cycle 가한 후, 식(1)을 이용하여 하중방향과 일치하는 y-방향에 대한 잔류응력 계측결과를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 하중을 가하지 않은 상태에서 잔류응

력은 Hole 선단 2mm($x=7\text{mm}$)에서 120MPa 정도의 인장응력이고, $x=24\text{mm}$ 에서는 -70MPa 정도의 압축응력으로 존재하였다. Iida 등⁽⁹⁾의 결과에 의하면, SM490A 판에 Bead-on-Plate 전자빔 용접한 시험편은 Hole에서 잔류응력이 220MPa 정도이고, 시험체 끝부분에서 -170MPa의 분포를 보인다. 본 연구와는 용접방법과 조건이 달라 대소의 차이는 있지만, 유사한 분포경향이 나타났다.

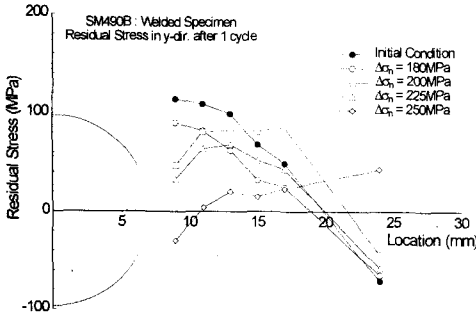


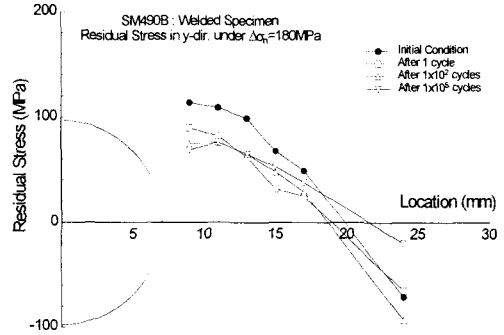
Fig. 5 Residual stress after 1 cycle loading

부하하중의 크기가 증가할수록 Hole 근방의 잔류응력이 상당히 줄어들었으며, $\Delta\sigma_n=250\text{MPa}$ 에 준하는 하중을 가한 후에는 Hole 선단 근방의 인장 잔류응력이 모두 소멸되어 결국에는 -20MPa 정도의 압축응력으로 변화하였다. 이 현상은 앞서 설명한 Fig. 4의 피로시험 결과와 일맥상통하다. 즉, $\Delta\sigma_n=250\text{MPa}$ 을 중심으로 이 이하의 응력수준에서는 시험편 Hole 근방에 인장 잔류응력이 계속 남아있어, 이는 외력과 중첩되어 피로수명을 감소시킨다.

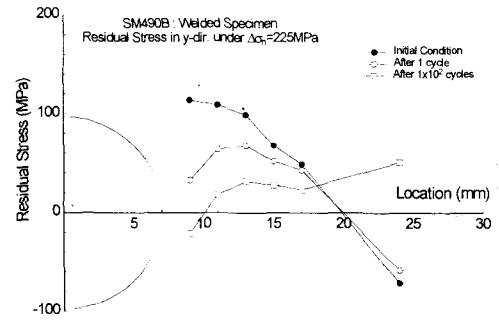
3.3 부하 사이클 수에 따른 잔류응력 완화

$\Delta\sigma_n=180, 225\text{MPa}$ 응력수준에서 Fig. 5의 결과를 부하 사이클 수에 따른 잔류응력 완화를 단면절단법으로 계측한 결과와 같이 Fig. 6에 나타내었다. $\Delta\sigma_n=180\text{MPa}$ 하에서 반복 사이클 수에 따른 잔류응력 분포결과 (a)에서 첫 번째 사이클 부하 후 Hole 선단($x=7\text{mm}$)의 인장잔류응력이 114MPa에서 90MPa 수준으로 감소하였고, 사이클 수가 지속됨에 따라 인장 잔류응력 완화는 거의 관찰되지 않았다. 이에 대하여 $\Delta\sigma_n=225\text{MPa}$ 을 부하한 (c)에서는 1 cycle 후 100 cycles이 경과된 후에도 잔류응력은 다시 큰 폭으로 완화되었다. 이는 첫

번째 하중 부하 후 완화된 잔류응력 수준이 아직 높은 단계에 머물러 다음 부하되는 하중과 중첩되어 다시 항복응력 수준을 넘어 잔류응력 완화가 발생한 것으로 판단된다.



(a) $\Delta\sigma_n=180\text{MPa}$



(b) $\Delta\sigma_n=225\text{MPa}$

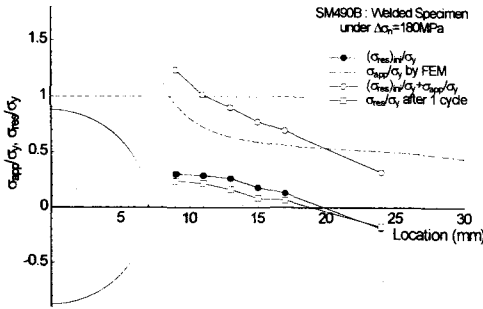
Fig. 6 Residual stress relaxation due to loading cycles

4. 잔류응력 완화모델 및 고찰

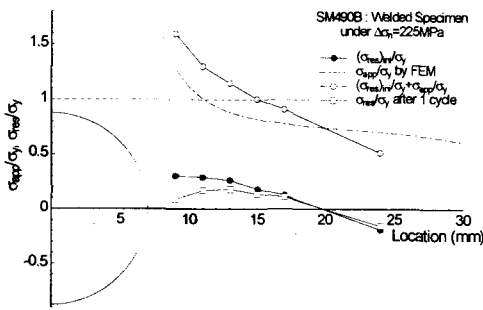
4.1 하중크기에 따른 잔류응력 완화모델

외력에 의한 잔류응력의 완화가 어떤 기구에 의하여 감소되는지를 평가하기 위하여, 공칭응력을 가했을 때 Hole 주변에 응력집중을 고려한 실제 작용응력 σ_{app}/σ_y 를 FEM 해석으로 구하고, Fig. 5의 초기 잔류응력분포 $(\sigma_{res})_{ini}/\sigma_y$ 와 $\Delta\sigma_n=180, 225, 250\text{MPa}$ 1 cycle 후의 잔류응력 σ_{res}/σ_y after 1 cycle을 같이 Fig. 7에 나타내었다. 1 cycle 후 잔류응력 완화는 증첩응력 $(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}$ 가 1을 넘는 시점부터 발생하며, $\Delta\sigma_n$ 이 클수록 Hole 근방에 작용하는 증첩응력이 광범위하게 1을 넘어서며

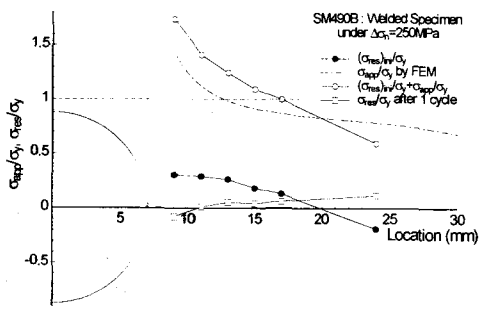
잔류응력 완화정도가 상대적으로 크다. 이상의 결과에서 잔류응력 완화는 외력에 의한 응력과 잔류응력의 합이 재료의 항복응력에 도달하는 시점부터 발생하는 것으로 확인되었으며, 초과하는 크기에 따라 잔류응력 완화 정도가 결정된다.



(a) $\Delta\sigma_n=180\text{MPa}$



(b) $\Delta\sigma_n=225\text{MPa}$



(c) $\Delta\sigma_n=250\text{MPa}$

Fig. 7 σ_{app}/σ_y and σ_{res}/σ_y before and after 1 cycle loading

Fig. 8은 외력에 의한 잔류응력 완화 정도를 정량적으로 평가하기 위하여, Fig. 7에서 $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y \geq 1$ 인 결과를 $(\sigma_{res})_{cycle}/(\sigma_{res})_{ini}$ 과 $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$ 로 나타낸 결과이다. $\Delta\sigma_n=250\text{MPa}$ 의 일부 실험결과를 제외하고 $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$ 가 증가함에 따라 $(\sigma_{res})_{cycle}/(\sigma_{res})_{ini}$ 은 선형적으로 감소한다. 실험 결과로부터 초기 잔류응력이 완전히 완화되기 위해서는 $\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y$ 가 1.6에 도달되어야 하고, 그 이상에서는 초기에 인장으로 작용하던 잔류응력이 압축 잔류응력으로 변환된다. Fig. 8의 결과로부터 하중크기에 따른 잔류응력 완화 추정모델을 다음과 같이 제안하였다.

$$\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y < 1 :$$

$$(\sigma_{res})_{cycle}/(\sigma_{res})_{ini} = 1 \quad (3)$$

$$\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y \geq 1 :$$

$$(\sigma_{res})_{cycle}/(\sigma_{res})_{ini} = -1.6[\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\}/\sigma_y] + 2.6 \quad (4)$$

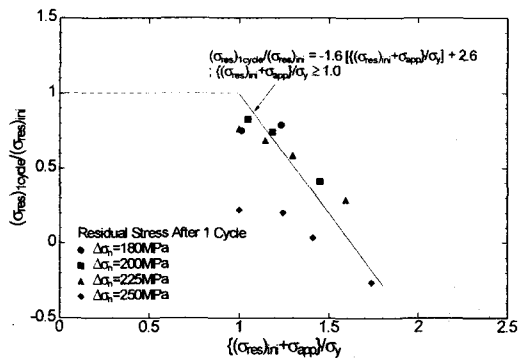


Fig. 8 Residual stress relaxation under static loads

4.2 부하 사이클 수에 따른 잔류응력 완화모델

부하 사이클 수에 따른 잔류응력 완화는 Fig. 6의 실험결과에서 알 수 있듯이, 첫 번째 사이클에서 대부분의 잔류응력 완화가 일어나고 계속되는 부하 사이클 수에 대해 잔류응력 완화는 거의 발생하지 않았다. Fig. 9는 Fig. 6의 결과에서 부하 사이클 수에 대해 잔류응력 $(\sigma_{res})_{relax}$ 를 1 cycle 후의 잔류응력 $(\sigma_{res})_{cycle}$ 으로 나눈 값을 부하 사이클 수 N 으로 정리한 결과이다. $\Delta\sigma_n=225\text{MPa}$ 의 경우를 제외하고 사이클 수에 따라 $(\sigma_{res})_{relax}/(\sigma_{res})_{cycle}$ 은 일정함을 알 수 있다. 단면절단법과 병행하여 실시한 자화식 응력측정법의 결과도 그림에서 알 수 있듯이 단면절단법과 동일한 결과를 보여주었다. 부하 사이클 수에 따른 잔류응력 완화 추정

모델은 다음과 같이 제안 할 수 있으며, Fig. 8의 결과로부터 잔류응력 완화지수 k 는 0으로 얻어진다.

$$(\sigma_{res})_{relax}/(\sigma_{res})_{cyclic} = (N-1)^{-k} \quad (5)$$

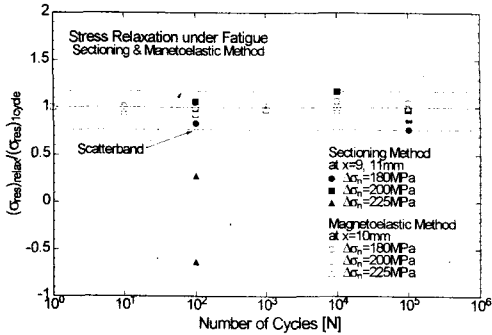


Fig. 9 Residual stress relaxation under fatigue loads

4.3 고찰

용접잔류응력의 작용하중 크기 및 피로하중하 반복 사이클 수에 의한 잔류응력 완화를 식(4) 및 (5)를 이용하여 다음 식으로 평가 할 수 있다.

$$\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\} / \sigma_y < 1 : \\ (\sigma_{res})_{relax} = (\sigma_{res})_{ini} \cdot (N-1)^{-k} \quad (6)$$

$$\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\} / \sigma_y \geq 1 : \\ (\sigma_{res})_{relax} = (\sigma_{res})_{ini} \cdot \\ (-1.6\{(\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app}\} / \sigma_y + 2.6) \cdot (N-1)^{-k} \quad (7)$$

상식으로부터 초기 잔류응력을 알고 있는 경우, 외력에 의하여 잔류응력 완화를 정량적으로 평가 할 수 있다. 그러나 본 연구에서 실시한 잔류응력 계측에서 측정범위를 넘어서는 결과가 다수 발생하여, 신뢰 할 수 있는 잔류응력 완화모델의 개발을 위해 보다 많은 Data Base 구축이 요구되고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 작용하중 크기에 따라 잔류응력 완화에 미치는 영향 그리고 피로하중하 응력진폭과 사이클 수의 영향을 고려하여 용접부 잔류응

력 완화를 정량적으로 평가하는 기법을 제안하였다.

참고문헌

- (1) Vöhringer, O., 1987, "Relaxation of Residual Stress by Annealing or Mechanical Treatment", Advances in Surface Treatment : Technology-Applications-Effects, Vol. 4, pp.367-396
- (2) James, M. R., 1987, "Relaxation of Residual Stress an Overview", Advances in Surface Treatment : Technology-Applications-Effects, pp.349-365
- (3) Throop et al, 1982, "Residual Stress and Stress Relaxation", ed. E. Kula and V. Weiss, Plenum Press, pp.205-226
- (4) Wahi, K. K., Maxwell, D. E., 1979, Trans. 5th int. Conf. Structural Mechanics in Reactor Technology, Rep. 13/3
- (5) Jhansale, H. R., Topper, T. H., 1973, "In Cyclic Stress-Strain Behavior-Analysis, Experimentation and Failure Prediction", ASTM STP 519, pp.246-270
- (6) Potter, J. M., Millard, R. A., 1977, "Advance in X-Ray Analysis", ed., H. G. McMurdie, Plenum Press, pp.309-319
- (7) Holzapfel, H., Schulze, V., Vöhringer, O., Macherauch, E., 1998, "Residual Stress Relaxation in an AISI 4140 Steel due to Quasistatic and Cyclic Loading at Higher Temperatures", Material Science and Engineering A248, pp.9-18
- (8) Hirsch, T., 1983, "Zum Einfluß des Kugelstrahlens auf die Biegeschwingfestigkeit von Titan- und Aluminiumbasislegierungen", Dr.-Ing. thesis, Universität Karlsruhe
- (9) Iida, K., Yamamoto, S., Takenashi, M., 1997, "Residual Stress Relaxation by Reversed Loading", Welding in the World/Le Soudage dans le Monde, Vol. 39, No. 3, pp.138-144