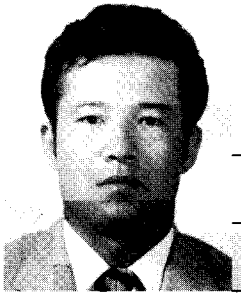
폭발에 의한 용접구조물의 잔류응력제거기술(Ⅱ)

- 실험 및 결론 -



문 정 기

(KIMM 환경설비연구부)

'66. 3 - '74. 2 홍익대학교 정밀기계과(학사)
'74. 3 - '78. 8 국립공업시험원
'77. 8 - '80. 2 홍익대학교 기계공학과(석사)
'89. 8 - '93. 2 홍익대학교 기계공학과(박사)
'78. 9 - 현재 한국기계연구원

최 병 길

(대전산업대학교)

'75 서울대학교 조선공학(학사)
'81 미 오하이오주립대 용접공학(석사)
'93 영남대학교 정밀기계과(박사)
'84 산업인력관리공단, 기계(용접)기술사
'75 - '99. 2 한국기계연구원 책임연구원
'99. 3 - 현재 대전산업대학교

1. 서 론

폭발에 의한 용접잔류응력 제거기술(Explosive Stress Relieving ; ESR)은 기존의 응력제거 처리 방법에 비하여 그 경제성이 높고 효율 역시 높아 최대 75%까지의 응력감소가 있음이 확인되었다. 이는 어떤 용접시공 방법의 경우에도 적용이 가능하며 탁월한 효과가 인정된 것으로 본고에서는 지난 본지 제9권 제2호 통권 32호(1997)의 '기본기구 및 이론'에 이은 후속 편으로 일반강재 16~40mm 두께의 맞대기 용접에 의한 시편을 사용한 예비실험결과를 기술코저한다. 한편 전회에서는 용접잔류응력제거를 위한 기존의 방법과 폭발처리 방법의 기술현황을 분석하고 기본기구와 함께 구조물 재료에 따른 실험방법을 소개하였으며 소요화약량을 결정하는 기본공식의 제시 및 화약의 설치방법중 뱀형의 것의 효율이 보다 높음을 제안한바 있다.

2. 18~20mm 두께 시험 시편에서의 ESR 예비실험결과

20mm 두께의 구조용강의 맞대기 용접에서 중앙이 용접된 500×400×20mm의 시편으로 ESR의 효율성에 대한 예비 실험을 행하였다. 잔류응력의 측정은 연속냉각중에 기계적 방법에 의해 절단한 시편을 20mm 간격으로 기계적인 계측기구를 사용하여 측정하였다. 잔류응력의 분포선을 알기 위해서 용접부의 서로 다른면과 다른 방향

에서의 응력을 측정, 평균값을 취하였다. 측정 결과는 그림 1에 나타나 있다. 곡선 1은 용접후의 초기 잔류응력이다. 곡선 2는 저밀도 ES의 판형 폭약에 의한 처리결과이고, 곡선 3은 후열처리결과이며, 곡선 4는 뱀형에 의한 처리결과이다. 그림에서 보여준 것처럼 폭발 처리후의 효과는 어떤 측정지점에 있어서도 우수한 결과를 보여주고 있다. 그러나 뱀형 처리의 경우 소모재료의 비용이 기존의 처리 방법보다 조금 낮은 것으로 나타났다. 평균적으로 폭발 처리에 의한 효율은 PWHT와 근본적으로 차이가 없음이 확인되었다.

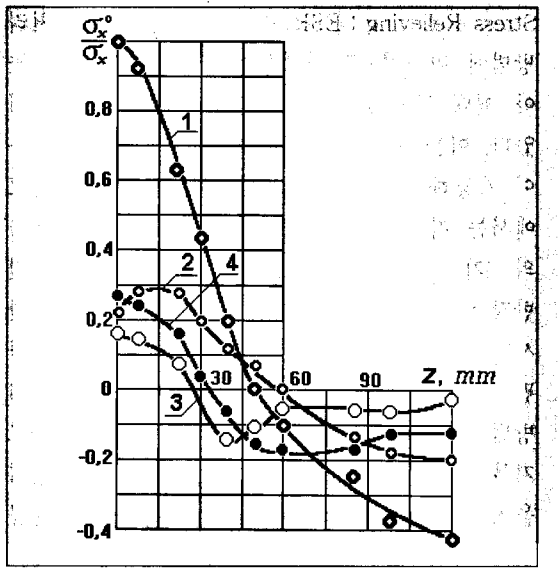


그림 1. Distribution of residual stresses : 1-after welding, 2-after explosion treatment by linear scheme, 4-same but by scheme "snake", 3-after heat treatment.

3. 압력 용기용 재료의 16~40mm 두께 시험편에서의 ESR 예비실험 결과

3.1 잔류 응력 측정 방법의 선택

기계적 응력을 측정하는 방법의 거의 모든 범위가 잘 알려져 있다. 그것들은 정밀도, 노동력, 작업비용, 응용영역과 그 외의 요소에 의해 선택이 된다. 재료내의 고유한 특히 용접잔류응력의 측정은 훨씬 복잡한 문제로 나타난다. 활용 가능한 방법들의 조합은 다음의 세가지 원리들로 나뉘어질 수 있다.

① 파괴적인 방법(destructive methods, 측정하고자 하는 목적물의 부분적 또는 전체적인 파손을 수반하는)은 고 정밀도의 확보가 가능한 점이 특징이지만 동시에 측정시 제거되는 부분의 발생 또는 구조물로부터 직접 얻은 시편의 채취가 불가피한 점이 있다.

② 특수 목적의 물리적 특성에 근거한 비파괴적인 방법(non-destructive methods)은 그 특성의 변화에 작용하는 기계적 응력들과 측정된 단일값(single-valued)과의 의존성으로서 나타낼 수 있는 방법을 사용한다. 이 특성들의 변화를 측정하는 것은 특별한, 복잡한, 값비싼 설비를 필요로하고 금속의 물리적 특성 변화와 그것에 작용하는 기계적 응력들(용접잔류 응력들을 포함하는)사이의 관계로서 정의된다. 이러한 기술의 정밀도는 파괴적인 방법보다 확연히 낮으나 건축물 또는 작업중의 구조물에 적용이 가능한 이점이 있다.

③ 다음은 분석적 방법(analytical method)으로 Ⅰ) 다양한 공식에서 변형 연속체의 온도문제에 대한 해답을 구하거나, Ⅱ) 주어진 힘을 가정하는 방법의 적용이 있으나 여러가지 이유로 인해 계산을 이용한 결과는 실제적인 문제들의 해답과는 상당한 거리가 있음을 부인할 수 없다.

압력 용기 접합부의 응력 측정방법의 선택은 측정의 고 정밀도를 제공하는 당연성과 건조중인 구조물에서 측정을 가능케 하는 적합성 모두를 만족하여야 한다. 대형 구조물 용접부의 기계적 응력 측정에 있어서 활용 가능한 가장 편리한 방법은 기계적 스트레인 측정장치를 사용하는 파괴적 방법과 magneto-elastic tensometry의 비파괴적 방법의 결합이라는 점이 확인되었다. 파괴적 방법은 전형적으로 손쉽게 이용될 수 있으나 구조물의 경우에는 비파괴적인 변형 방법이 보다 성공적으로 적용될 수 있다. 비록 정의

된 잔류 응력의 절대 값은 만족시키지는 못하지만 폭발 처리 방법의 결과로서 응력제거 값의 비교가 가능하다는 장점이 있다.

3.2 16~40mm두께시험편에서의 잔류 응력 측정의 데이터 베이스

압력 용기 접합부의 시편들에서 스트레인 측정은 측정코저하는 시편의 절단을 통한 종래의 방법을 우선적으로 들 수 있다. 본 실험에서는 용접부길이 방향의 베이스 길이(L_1)를 20~ 25mm까지로 하고 가로 방향의 길이(L_2) 10mm로 하였다. base측정과 시편 절단의 배치는 그림 2에 나타나 있다. 베이스는 시편의 중심선을 따라 양계면에 대칭적으로 위치시켰다. 시편의 절단으로 인해 생긴 변형은 다음식에 따라 계산된다.

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L_1}{L_1} \quad , \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta L_2}{L_2} \qquad (1)$$

ε_1은 용접부길이 방향의 금속의 변형률이고 ε_2는 가로 방향의 금속의 변형률이다. ΔL은 시편의 절단 전후의 스트레인 측정장치에 의한 차이

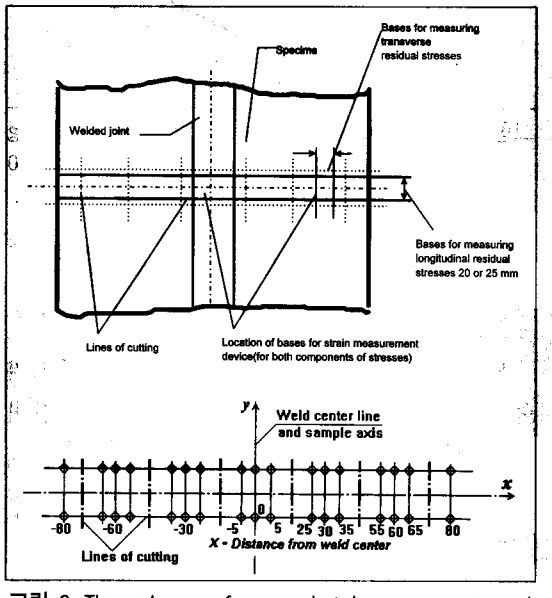


그림 2. The scheme of measuring bases arrangement and cutting specimens for gaging residual stresses.

표시로 나타나는 변위이다. 잔류 응력은 다음 방법으로 계산된다.

$$\sigma_1 = E\left(\frac{\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2}{1-\mu^2}\right) \quad , \quad \sigma_2 = E\left(\frac{\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1}{1-\mu^2}\right) \qquad (2)$$

여기서 σ_1은 용접부 길이 방향의 잔류응력이고 σ_2는 가로 방향의 잔류응력이다. E는 탄성계수(강재의 경우, E≒21000MPa), μ는 포아송비(강재의 경우는 거의 0)이다. magneto-elastic tensometry 방법에 의한 측정은 기계적측정으로부터 얻은 결과들의 비교 검증을 위한 목표로 사용한다. 250×190×36mm 크기의 용접부 시편에서 magneto-elastic tensometry 방법과 파괴적 방법에 의해 얻은 용접잔류응력의 측정결과는 그림 3에 도시되어 있다. 그림 3의 1은 비파괴 방법 의해 측정된 세로 방향의 응력이고 2는 파괴 방법에 의한 값이다. 비파괴적인 방법은 magneto-elastic tensometry에 의해 측정된 것이다. 곡선의 형태는 서로 상대적인 용접 축들에 대칭적으로 위치한 측정 점들에서 얻은 값들에 대응하여 두께에 따른 평균값으로 작성하였다. 세로축의 응력은 무시할 만큼이었고 이는 부적당한 시편 크기와 관련이 있는 것으로 보인다. 잔류응력의 형태는 맞대기 용접이음에 대해 특이한 형상을 가지고 있다. 비대칭은 결론적으로 시편의 두께를 통해 동일하지 않은 응력의

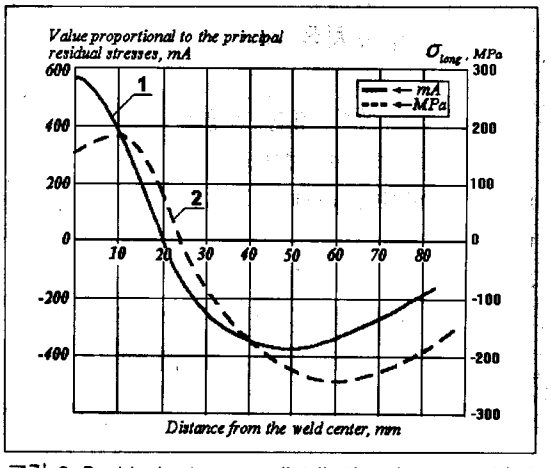


그림 3. Residual stresses distribution in as welded sample recorded by methods of magneto-elastic 1, and destructive 2, strain measurement.

분포를 뜻한다. 그리고 현실적으로는 커다란 두께의 다중패스 용접부일 때 발생한다.

magneto-elastic tensometry에 의해 기록된 응력의 형상은 분포선을 따라 변화하며 파괴적 방법에 의해 얻어지는 것과 동일한 것을 볼 수 있다. 이것으로 보아 실제 구조물에서는 용접부들의 응력 상태 도출에 관한 한 두가지 접근법의 결합이 잘 이용될 수 있음을 확인시켜 주고있다.

용접부에서 인장 응력값(~150MPa)은 매우 낮게 나타났으며 통상 평판의 맞대기 용접에서 아크 용접에 의한 값(0.8~1.0) σ_y과 쉽게 비교된다. 이처럼 낮은 인장응력은 2가지 이유로 기술된다.

1) 열팽창을 감소시키는 멀티패스 용접의 채택, 즉 자체 열처리효과와,

2) 시편의 부적당한 치수, 즉 두께, 대비, 폭의 크기가 너무 작은 점이다.

물론, 500×400mm보다 적지 않은 치수를 가지는 시편들을 이용한 실험을 실시한 후에 확실한 이유들을 알 수 있을것으로 본다. 시편의 폭발 처리법의 결과 기술의 효율성에 대해 과소평가된 점을 보여주고 있는데 이는 시편들의 불충분한 치수가 용접된 금속에 가해지는 폭발하중과는 반대 상황을 야기시켰기 때문으로 보인다.

3.3 250×190×36mm 두께 시험편의 잔류응력의 수치적 계산

응력의 계산에서 평면 변형을 감소시키는 공간적 문제를 허용한 평면 변형의 전제가 적용된다. 평면 변형에 대한 고전적인 방정식의 변형텐서 $\varepsilon_{ij}(i,j=x,y,z)$의 성분 상호 관계를 만족시키는 조건에 의해 결정된다. 계산시 사용되는 좌표시스템은 그림 4에 도시되어 있다.

$$\varepsilon_{xy}=\varepsilon_{xz}=\varepsilon_{yz}=0 \qquad (3)$$

온도 범위, 표면 하중, 재질의 물성치가 z축 방향으로 바뀌지 않는다면 탄소성 변형에서 평면 변형의 사방정계(prismatic body)의 완성이 가능하다. 게다가 평면변형의 조건은 소진되고 이 문제는 xy단면(z=const)으로 해결된다.

이러한 것은 von Mises 항복조건에 기인하는 등온소성흐름의 이론에 기본을 둔 알고리즘을 만족시킨다. 그 해(解)는 시간에 의존한 첫번째 비드의 중첩의 출발로부터 완전한 냉각에 이르기까지 탄소성 변형의 발전의 일련의 연속적인 추적에 의해 풀이가 가능하다. 다음에 오는 비드는 중첩되는 Stress-Strain 상태의 발전과정의 결과인 폭발하중의 허용한도내에 있는 이전의 히스토리를 따라서 수행된다.

물리적 비선형성을 알기 위해서 Ψ의 상태함수의 관점에서 반복과정이 사용되며 이는 이후 별도로 기술코저 한다.

추적의 각 단계에서의 모서리문제를 정의하는 기본적 상관관계와 탄성문제로 본 반복과정, 그러나 탄성의 변화인자와 추가적 변형을 고려하면 아래의 텐서 형태로 정의가 된다.

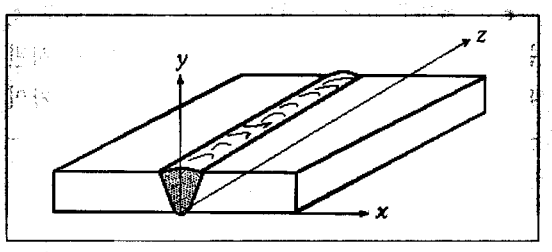


그림 4. Coordinate system used at numerical calculating the residual stresses in welded samples of 250 ×190×36 mm in dimension in as welded state.

① 평형 방정식

$$\sigma_{ij,j}=0,(i,j=x,y,z) \qquad (4)$$

식(5)에서 표면부분에 정적 조건을 첨부시켜 줄 필요가 있다. 여기에서 외력 P_i의 투영분이 지정된다.

$$\sigma_{ij}\mu_i=P_i \qquad (5)$$

② 어떤 가정하에서 kinematic 상관 관계, 변형량의 증가분은 대수롭지 않으며 그것은 다음과 같은 식으로 표현 가능하다.

$$\Delta\varepsilon_{ij}=0.5(\Delta\mu_{i,j}+\Delta\mu_{j,i}) \qquad (6)$$

여기서 $i,j=x,y,z$: $\Delta\mu_{i,j}$는 변위 증가의 벡터 성분이다.

③ 응력과 변형 증가분간의 연결 방정식, non-discontinuity 변형 방정식으로부터 얻은 것은

$$b_{i,j}=(\frac{\sigma_{i,j}}{2G})^{*)}+\delta_{i,j}[\sigma_{i,j}^{*)}(K-\frac{1}{2G})-\Delta\varphi],$$
$$(i,j=x,y,z) \qquad (7)$$
$$\Delta\varepsilon_{i,j}=\Psi\sigma_{i,j}+\delta_{i,j}(K-\sigma-b)-b_{i,j}$$

가 된다.

여기서 $\delta_{i,j}$는 단위텐서 또는 Kronecker's 심볼이다. 만약 $i\neq j$이면 $\delta_{i,j}=0$가 되고, $i=j$이면 $\delta_{i,j}=1$이 되며, $\Delta\varphi$-온도변화에 따른 체적증가분의 함수 K는 탄성의 bulk계수이다. G는 전단응력이고 표시 $^{(*)}$는 이전 트랙킹 단계에서의 어떤 값이다. 상태함수 Ψ는 반복 프로세스방법에 의해 결정된다.

$$\Psi^{(n+1)}=\psi^{(n)P-(1-P)}[\frac{1}{2G}+\Phi(\sigma_i^{(n)},T)\Delta t],$$
$$\text{만약}\quad \sigma_i^{(n)}-\sigma_Y(T)-m,$$
$$\Psi^{(n+1)}=\Psi^{(n)},\ \text{만약}\quad -m<\sigma_i^{(n)}-\sigma_Y(T)<m, \qquad (8)$$
$$\Psi^{(n+1)}=\Psi^{(n)}\sigma^{(n)}\sigma_Y(T),\ \text{만약}\quad \sigma_i^{(n)}-\sigma_Y(T)>m,$$
$$\text{마지막은}\quad \left|\frac{\Psi^{(n+1)}}{\Psi}(n)-1\right|<\delta\ \text{일 때이다.}$$

여기서 (n+1), n은 반복 수이다. $0\leq P\leq 1$, $m\ll\sigma_Y(T)$, $\delta\ll 1$은 반복 프로세스의 인자들로서 결과의 정도와 얼마만큼 수렴되었으냐로 정의된다.

여기에서 트랙킹의 각 단계의 Ψ반복마다 발생하는 선형 문제는 유한 요소 법에 의해 해가 가능하다. 용접부의 두 시퀀스 변형에 대한 계산 결과들은 그림 5 및 6에 도시되어 있다.

4. 시험편의 크기와 두께를 달리한 시험편에서의 ESR 실험결과 종합

36mm 두께의 구조용강 맞대기 용접에서 중앙

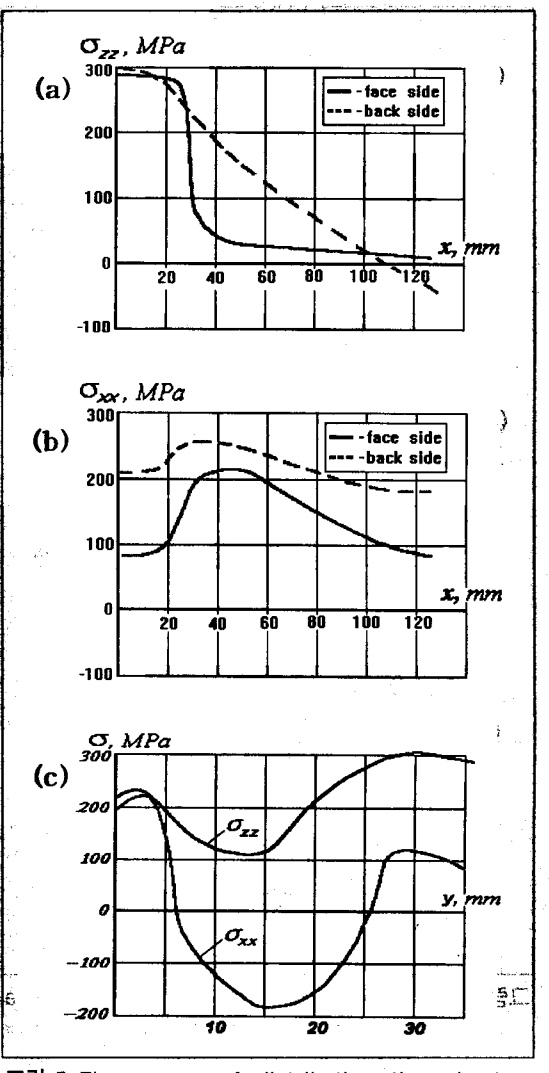


그림 5. The epures of distribution throughout a specimen. (a) longitudinal(σ_{zz}), (b) transverse(σ_{xx}) residual stresses for a case, (c) the curves of longitudinal and transverse residual stresses distribution throughout specimen thickness in the center of weld(middle section of sample) for a case, when the welds on back surface were made first.

이 용접된 250×190×36mm의 시편의 잔류응력 분포도를 그림 7에 나타내었다. (a)는 용접후 재료에 남아있는 잔류응력을 측정하였고, (b)는 용접후 뱀형의 방법으로 폭발처리한 시편의 잔류응력분포도이다. (a)의 용접부위에 매우 큰 잔류

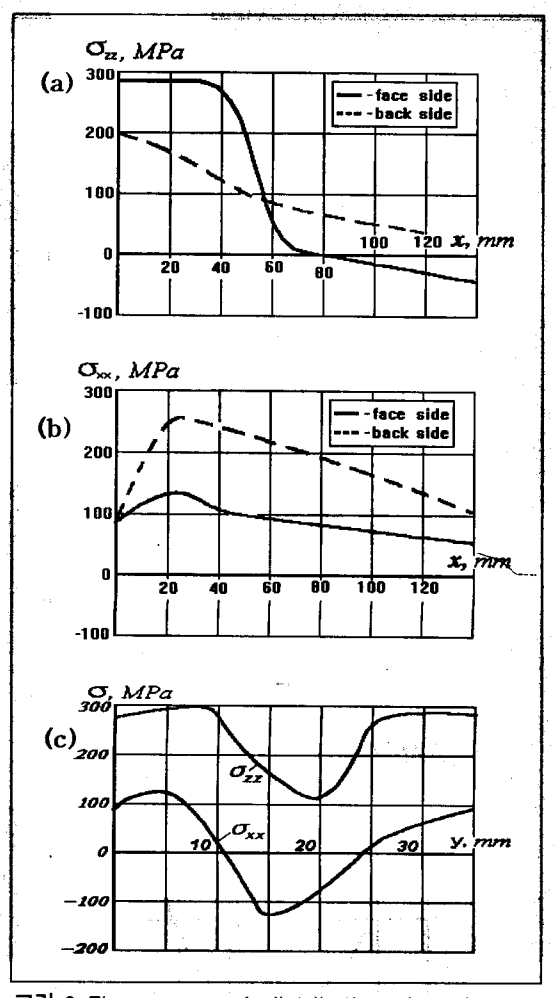


그림 6. The epures of distribution throughout a specimen. (a) longitudinal(σ_{ZZ}), (b) transverse(σ_{XX}) residual stresses for a case, (c) the curves of longitudinal and transverse residual stresses distribution throughout specimen thickness in the center of weld(middle section of sample) for a case, when the welds on back surface were made last.

응력이 존재함을 알 수 있고 (b)는 잔류응력이 (a)의 잔류응력보다 현저하게 감소됨을 알 수 있다. 또한 시료의 크기와 두께의 변화를 주기 위해 360×250×16mm와 360×250×36mm의 시편을 사용한 잔류응력분포를 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 그림에서 시편의 잔류응력을 시편의 앞면과 뒷면에서 측정하였다. 16mm 두께

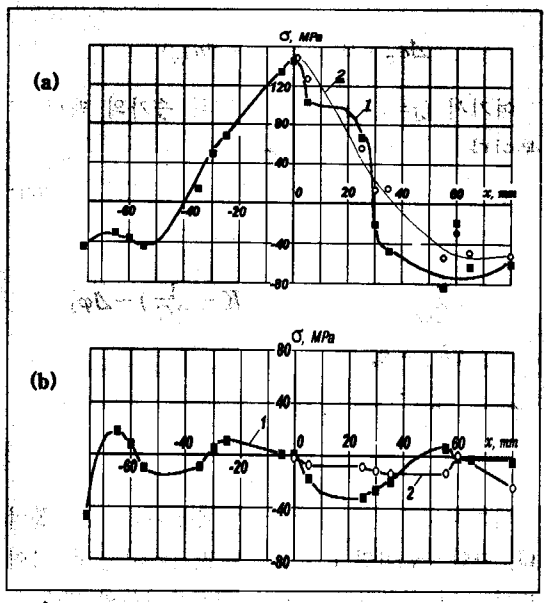


그림 7. The epures of residual stresses in (a) as welded, (b) explosively treated specimens(250×190×36mm) : 1-over whole width of specimen, 2-averaged as to data of measurements on both sides from weld axes.

의 시편에서는 시편의 앞면과 뒷면에서 동일한 잔류응력분포를 보임을 알 수 있고, 36mm 두께의 시편에서는 시편의 앞면에는 인장응력이, 시편의 뒷면에서는 압축응력이 존재함을 알 수 있다. 이러한 현상은 앞면에 존재하는 잔류응력이 뒷면에 존재하는 잔류응력보다 훨씬 크므로 해서 이를 완화하기 위한 응력분포로 뒷면에 압축응력이 발생하는 것으로 보여진다. 16mm와 36mm 두께의 시편 모두 폭발처리한후 잔류응력 제거에 확실한 효과가 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

2회에 걸친 '폭발에 의한 용접구조물의 잔류응력제거기술' 연재 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 용접부의 폭발 처리법이 용접잔류응력제거에 효과적인 방법이라는 점이 분석적으로, 실험적으로 확인되었다.

2) 3종류의 강재 시편들에 대한 연구결과, 폭

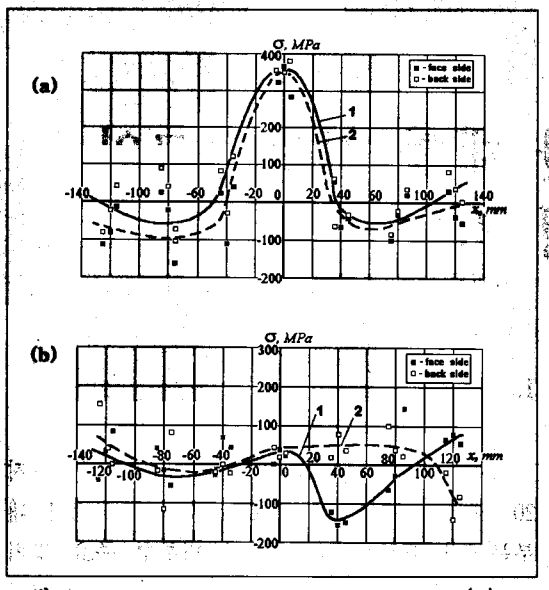


그림 8. The epures of residual stresses in (a) as welded, (b) explosively treated specimens(360×250×16mm), 1-over whole width of specimen, 2-averaged as to data of measurements on both sides from weld axes.

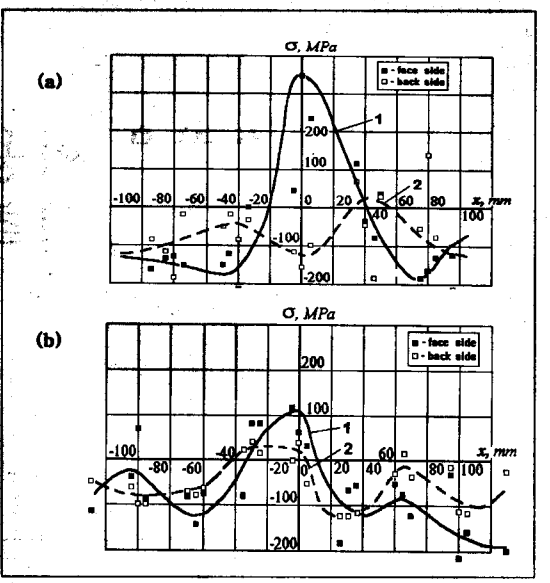


그림 9. The epures of residual stresses in (a) as welded, (b) explosively treated specimens(360×250×36mm), 1-over whole width of specimen, 2-averaged as to data of measurements on both sides from weld axes.

발 처리법이 최대 75%까지 용접잔류응력이 감소될 수 있다는 사실을 추정할 수 있었다.

3) 폭발 처리법은 현저한 잔류응력감소에도 불구하고 기계적 특성과 금속구조에 아무런 영향을 끼치지 않는다는 사실을 확인할 수 있었다.

4) 실험 결과로서 용접부의 폭발 처리법은 압력용기의 실제 구조에 성공적으로 적용될 수 있다는 점을 설득력 있게 증명하였다. 금전적 비용, 에너지비용, 노동력 등을 줄임으로서 작업 실행 공정의 과감한 절약이 성취될 수 있었다고 본다.

결론적으로 폭발처리법은 환경적 측면, 비용의 효율성, 열처리법보다 높은 기술적 효과가 뛰어난 프로세스이다. 또한 화약의 원가 역시 고밀도의 집중 에너지 원으로서 상대적으로 에너지 원가가 저렴하다는 점을 빠트릴 수 없다. 용접부에서의 화약의 안전상 문제 역시 효과적으로 조절될 수 있으며 무게가 비교적 가벼운 화약을 이용함으로서 이의 제고가 가능하다고 본다.

본 내용은 PWI의 협조에 의해 한국중공업(주)과의 협력연구를 수행한 결과의 일부이다.

참 고 문 헌

[1] Petushkov V. G., Fadeenko Yu. I "On explosion treatment of welded joints". Phizike goreniyai vzryva, 1980, No. 5, pp. 64-68.

[2] Petushkov V. G., Bryzgalin A. G. "Improvement of service properties of welded structures by explosion treatment", Weld and Surfacing Reviews(Edited by B. E. Paton), Vol. 9, Part. 1, England, Harwood Academic Publishers, 1997, pp. 167-175.

[3] Petushkov V. G., Kudinov V. M., Fadeenko Yu. I "An explosion treatment of welded joints in metalstructures", M. Metallurgy, 1993, p. 23.