

폭발에 의한 용접구조물의 잔류응력 제거기술 Explosive Stress Relieving

문정기* 최병길*, 한국기계연구원 대전광역시 유성구 장동 171
심상한**, 한국중공업(주) 경남 창원시 귀곡동 555

1. 서론

용접구조물에 존재하는 잔류응력은 취성과파괴강도, 좌굴강도, 피로강도 등을 감소시키고 응력부식균열이나 저온 균열 등을 유발시킨다. 이러한 이유로 잔류응력이 최소가 되도록 용접 시공법을 결정하기도 하며 일단 잔류응력이 발생하는 경우 잔류응력을 완화시키려는 노력이 이루어지고 있다. 잔류응력 경감방법으로 현재 가장 널리 사용되는 방법은 후열처리법(post weld heat treatment, PWHT)이 있다. 이 방법은 잔류응력이 존재하는 부위를 응력풀림 온도까지 가열한 후 천천히 냉각시키는 것으로 처리비용이 많이 들고 구조물 종류에 따라 경감효과가 크지 않을 수도 있다.

한편 비열처리적인 잔류응력 경감방법으로 피닝법, 진동법 그리고 과부하 방법 등이 구조물 종류에 따라 사용되고 있으나 적용율은 그다지 높지 않다.

잔류응력 완화방법으로 폭발에너지를 이용하는 방안이 1970년대 초부터 소련 Paton Welding Institute(현재는 우크라이나 공화국 지원 연구기관, PWI)에서 시도되었다^[1]. 상업적인 시도는 산하알루미늄 제조공정에서 대형탱크의 내식성을 향상시키기 위하여 잔류응력을 경감시키는 시도에서 비롯되었으며, 이후 PWI에서는 이 기술을 (구)소련과 Yugoslavia에 적용하기 시작했다. 1980년의 PWI의 활동은 계속 확대되었으며 내식 목적에서 취성, 피로 등으로 활용범위가 확대되었다. 새로운 기술로 폭발 가열처리의 병행이 고려되고 용접제품의 크기와 형태의 안정화 역시 대상이 되었다.

폭발처리 방법이 성공하게 된 데에는 두가지 환경이 있었다.

- i) 아주 적은 5~20g/m의 화약으로 경제적이고 편리한 작업이 가능.
- ii) 종래의 가열처리법에 비해 cost, 생산성, 효율성이 높음.

이러한 것을 요약하면 가열처리법 대비 생산성은 10~50배가 높고 값은 1/10정도이다. 또한 특별한 장치나 숙련된 기능공이 없이도 가능하다. 뿐만 아니라 재현성이 높다. 또한 이용성이 좋아 작업 현장이나 노지에서 시공이 가능하고 건설 탑재 공정에서 가능할 뿐 아니라 부분적 또는 순차적인 시공역시 가능한 장점이 있다. 또한 기존 PWHT의 영향과 같은 부작용이 없고 필요한 경우 반대응력(opposite sign)까지 만들 수 있다.

2. 용접부의 폭발응력 제거처리

2.1. 판형구조체

체계적인 연구가 PWI에서 수행되었으며 폭발 인근 지역에서의 긍정적 효과가 용접부에 발생하는 현상이 밝혀졌다^[2]. 즉, 용접에 의해 용접비드를 중심으로 비드길이 방향의 인장

잔류응력 성분이 또한 비드에서 조금 떨어진 부분에서는 인장 잔류응력과 평형을 이루는 압축 잔류응력 성분이 발생된다. 이와 같은 잔류응력 분포를 갖는 저탄소강 판형 구조재 (Fig.1a 참조)에 Fig.b,c 및 d에서와 같이 12g/m의 기폭선(dettonating cord)을 사용하면 그 깊이 $d=10-12\text{mm}$, 폭 $w=8-10\text{mm}$ 정도의 범위에 걸쳐 잔류응력 경감 지역이 형성된다. 이때 기폭제의 폭은 인장 잔류응력의 폭과 같도록 하여 strip 기폭제(Fig.1b), cord 기폭제 (Fig.1c) 및 snake 기폭제(Fig.1d)를 설치할 때 잔류응력 경감효과가 두드러지게 나타났다^[3]. 판재 또는 판형용접구조물에서의 이 지역(비드부와 HAZ)에 상대적으로 화약량이 적은 폭의 것으로 strip형태 또는 기폭선의 조합을 비드 길이방향으로 설치하고 기폭하면 판재 내부에는 3차원적인 응력성분의 재분포가 일어날 수 있으며 그 결과로 잔류응력이 경감된다.

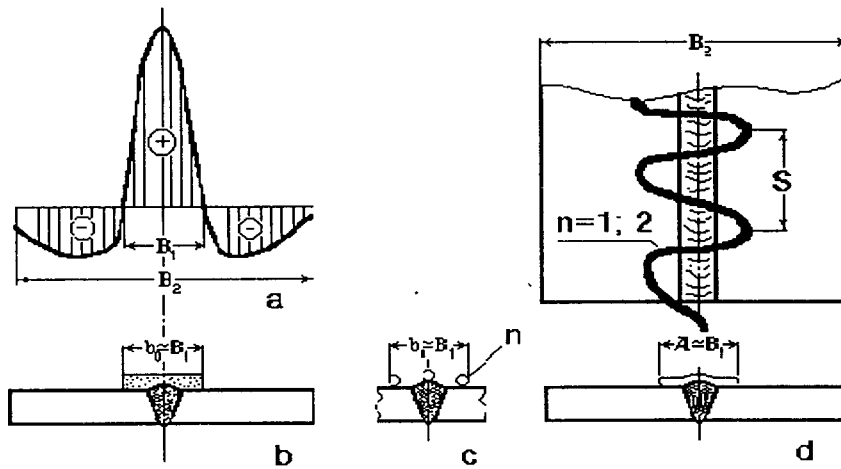


Figure 1. principal schemes of explosion treatment of welded joints in sheet metal structures : a-distribution of residual stresses ; b-strip charge; c-cord charges; d-"snake" scheme ; n-number of cord charges ; B_2 -plate width ; B_1 -zone of tensile residual stressed action ; and S-amplitude and spacing of detonation cord I the "snake" scheme; b_0 -width of strip charge; δ_1 -plate thickness.

기폭제의 설치방법에 따른 실제 시공을 검토하여 보면, 첫 번째 scheme(선형)에서 strip형 폭약량은^[4] 비드 길이 방향을 따라 인장응력구역의 폭에 의한 조절이 가능하다(Fig. 1a). 또한 이 scheme은 변형이 가능하며 재료 표면에 완전히 밀착시키든가 어느 정도 gap을 두는가 하면된다. Compact한 형태의 것으로 도폭선, 대형(strip), 판형(sheet)의 어느 것도 적합한 사용이 가능하다.

두 번째 scheme[뱀형]은^[5] 도폭선의 설치를 주기적 곡선을 갖게한다. 공장생산의 도폭선이 가장 적절한 폭약이다. 뱀형에서 효율적인 방법으로는 도폭선 간격을 조정하거나 단면의 치수를 보다 크게 하면된다. 단 이러한 도폭선을 사용할 경우 $n>2$ 이면 부적합하다. 따라서 탄력성 있고 생산이 쉬운 도폭선이 필요하나 구부렸을 경우의 안정화 폭평이 전제되어야 한다.

2.2. 박판 원통구조제

얇은 벽을 갖는 원형(저장조, 탱크)의 용접부의 응력제거처리는 폭약을 탱크 내부에 중첩 시킴으로 가능하다. 원주방향에 대해 상대적인 길이 방향의 잔류응력의 감소화에 있어서 주된 문제는 탱크의 국부적 변형기구(Fig. 2)이다.

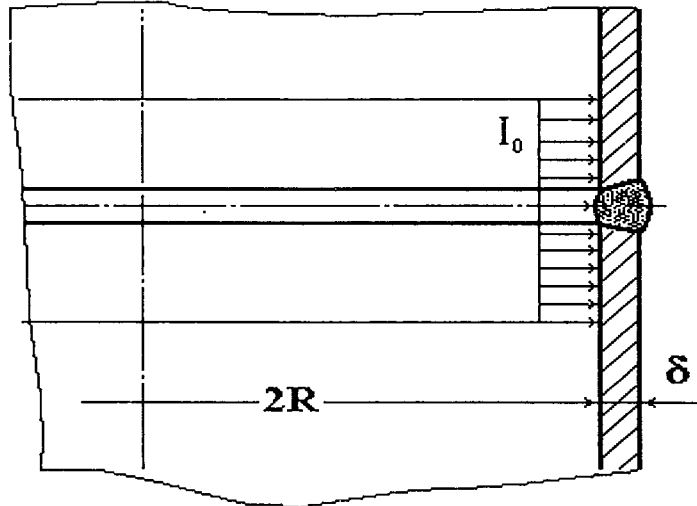


Figure. 2. Principal scheme of explosion treatment of circumferential welds in axisymmetrical metal structures: R -shell radius; δ -shell wall thickness; I_0 -explosion pulse.

폭약량의 결정에 필요한 추정 방법은 A. F. Demchuk^[6]에 의한 제안된 것과 같다. 이 문제는 2단계로 나누어 (첫번째는 벽에 부딪치는 것으로 벽을 완전한 강체 (rigid body)로 가정하고 그때 폭발에 따른 위치 변화를 계산) 계산한다. 폭발의 폭굉은 순간으로 간주한다 (등방향 폭발 : axisymmetric loading). 다음 탱크 원주 방향의 단위 높이에 대한 움직임을 고려하고 이러한 이유로 폭발처리 영역에 대한 탱크의 절편의 이음효과에 대한 것은 고려하지 않는다. 당초의 두께를 갖는 벽 내에서의 속도와 응력이 평형화 되는데 소요되는 시간 즉 불완전한 ring의 운동시간 역시 고려되지 않는다. 따라서 응력파의 상호간섭이 끝난 후의 탱크의 관성팽창인 두 번째 단계만을 고려하면 된다. 탱크내의 잔류응력은 없고, 전체 문제는 탄성운동으로 해석한다. 1 자유도를 갖는 강제진동으로 보면,

$$S = \frac{2N q_0}{\delta m \varepsilon_y} \text{-----식(1)}$$

단, N 은 금속재료와 폭약을 특성화하는 인자

q_0 는 도폭선의 비중(running density) δ 는 처리코저 하는 모재의 두께,

m 은 응력제거 효율계수로서 $m_{\max} = 2$,

ε_y 는 모재의 항복점이다.

예를 들어 PETN($Q_0 = 5\text{MJ/kg}$, $N=8.6\text{cm}^3/\text{cal}$), 도폭선을 사용하고 $\epsilon_y = 2 \times 10^{-3}$, SS400의 탄소강의 맞대기 용접의 경우

$$S = 10/m \delta \text{ -----식(2)}$$

가 된다.

3. 결 론

ESR은 새로운 기술로 그 경제성이 매우 높다. 주된 이유로는 폭약에너지의 값이 낮고 아주 적은량 만으로 처리가 가능하며 제어 역시 가능하다는 점이다. 산화알루미늄 제조공장, 화학, 금속공업, 트랙터공업 등의 대형탱크, 콘테이너, 파이프라인 등에 산업적 이용이 가능하다^[7]. 기타 발전소, 대형구조물 운반차량, 대형파이프 등이 또한 대상이 된다. 지난 20년간 (구)소련에서 50,000톤 정도의 구조물에 이 기술이 적용되었으며 이는 350km의 길이에 해당되고 15t의 폭약이 사용되었다. 유고의 Birach에서는 \$4,000,000의 경제적 이익을 계산한 바 있으며 종래 열처리방법에 대한 경제적 우위가 높아 가까운 장래에 이의 대체가 예상된다.

후기

본기술과 관련하여 PWI의 협조에 의해 한국중공업(주)과의 협력연구를 수행중에 있음.

참고 자료

1. Konon Yu.A. Explosion welding, Moscow, Mashinostroenie, 1987, 216 P.
2. Petushkov V.G. On mechanism of decreasing residual stresses during explosion treatment, Avtomaticheskaya svarka, 1982, No 4, P. 1-4.
3. Petushkov V.G. Estimation of effectiveness of reducing residual stresses by applying external load, Avtomaticheskaya svarka, 1975, No 7, P. 19-23.
4. Zhao Shida et al. Explosive relieving of residual stresses in thick plates butt joints of mild steel, Proc. Intern. Symp. "Intense dynamic loading and its effects, China, Beijing, 1986, P. 1050-1055.
5. US Patent No 4.432.609.
6. Demchuk A.F. A method of explosion chamber design, Zhurnal Prikladnoy Mekhanikii Tekhnicheskoy Fiziki, 1968, No 5, P. 6-12.
7. Moon J.G. Technical survey of explosive energy to the industrial working process, survey report, Korea Institute of Machinery and Metals, BSN001-007 · M, 1993