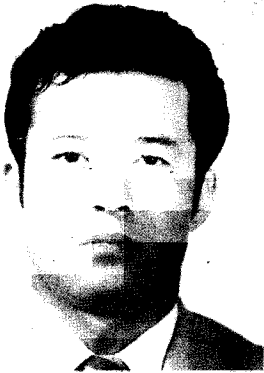


# 폭발에 의한 용접구조물의 잔류응력제거기술(1)

- 기본 기구 및 이론 -



문 정 기(KIMM 산업설비 연구부)

'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

## 1. 서론

용접구조물에서 가장 취약한 부분은 용접부(welds)와 열영향부(Heat Affected Zone; HAZ)이다. 이 부분은 응력과 결함이 집중되어 있고 재료는 열소성변형(thermal plastic deformation) 또는 경년변화(또는 시효: aging)의 대상이 되어 구조적 변화(structural transformation)와 화학적 불균형이 발생하게 되고 결국 높은 용접잔류인장응력이 발생하게 된다. 위의 여러 인자의 조합된 효과는 접합부(welded joints)는 물론 구조물 전체의 성능을 저하시키는 등 나쁜 영향을 주며 특히 매우 가혹한 환경이나 가변하중, 저온과 같은 조건하에서의 사용은 보다 심각하다. 따라서 용접구조물의 신뢰성이나 품질을 개선하기 위한 특별한 조치가 필요하며 구체적이며 본질적으로는 적절한 재료와 용접방법의 채택, 설계의 강화, 구조물의 조립과 탑재 방법 등의 선택을 들 수 있다. 또한 잔류응력의 제거, 응력집중의 완화조치, 조직안정화와 같은 용접후처리 역시 고려되어야 한다. 통상 이러한 방법은 경제적으로 효과가 있지만 기술적으로는 많은 제약이 따른다. 가장 일반적으로 잘 알려진 열처리방법(Post Weld Heat Treatment: PWHT)은 상대적으로 비용이 많이 들고 소정의 효과를 얻는 데에 있어 제한적으로 사용되고 있는 방법이다. 거기에다 현존하는 비열처리방법(변형을 주는 방법)인 peening, 초음파, 진동, 과부하방법 또한 이미 잘 알려져 있는 여러 가지

기술적 이유로 실용화에 어려움이 따르고 있는 현실이다.

본고에서는 잔류응력제거를 위한 기술적 방안의 하나로 폭약의 폭발 에너지를 이용한 기술을 소개코저 하며, 이 기술에 대한 기본구조 및 이론, 예비실험 및 결과를 2회에 나누어 연재한다.

## 2. 용접잔류응력 제거를 위한 기존의 방법

금속 구조물의 용접부에 있는 잔류응력의 제거 또는 완화방법은 일반적으로 실용화되기 어렵고 현저한 노력과 비용이 수반된다.

G.A Nikolaev<sup>[1]</sup>는 기존의 아이디어를 종합하여 잔류응력 제거에 필요한 다음 세가지 원리를 제안한 바 있다.

- ① 재료의 가열로 인해 야기된 소성변형량의 부족분을 줄이고 소성 흐름에 의해 포위된 금속체적을 감소시킨 것 ; 이것은 열팽창이나 인공적인 냉각의 정도를 조절하는 방법으로 실현이 가능하며 용접부의 크기 또는 량을 줄이거나 용접프로세스중에 금속재료를 기계적인 힘으로 당김으로서 가능하다.
- ② 용접영역내의 스트레인이 부족한 곳에 소성 스트레인을 증가시키는 것 ; 이것은 용접전 또는 후에 소성변형을 줄이는 것을 필요로 한다.
- ③ 스트레인이거나 길이 변형량에 대해 반대 부호의 스트레인을 새로히 주는 것에 의해 보상하는 것 (용접이전의 사전 굽힘, 좌우 대칭의 용접방법 등) ;

에너지를 전달하는 형태에 따라 잔류응력의 제거는 열적(thermal)인 것, 열변형적인 것, 변형적인 것으로 세분화된다. 잔류응력 제거에서 열

적인 방법중 가장 흔한 것은 온도를 가하는 것으로 간단한 고정형이며 프로판가열토치 등 단순한 열기기가 사용된다. 열처리 과정 중의 잔류응력의 감소는 재료의 이완(relaxation)현상에 기인하며 이것은 응력분포가 탄성 스트레인에서 소성의 것으로의 변화에 관계가 되며, 결국 결정구조의 재 배치에 기여하는 것이다.

대형구조물에서 연강의 예를 들어 용접부의 잔류응력의 감소에는 600~650℃ 온도에서 재료 두께mm당 2.5~3분의 유지시간을 필요로한다. 동시에 이러한 고온은 용접부와 HAZ의 기계적 성질을 약화 시키는 원인이 되기도 하며 결국은 용접부 전체의 강도를 낮추게 된다. 특히 이중 재료로 만들어진 용접구조물에 대해서는 매우 바람직하지 않는 방법이기도 한다. 적정온도 범위를 벗어난다는 것은 또다른 새로운 응력을 만들어짐을 뜻하는 것이다. 용접구조물의 뜨임(temper)처리는 재료의 파괴저항을 감소시키고 가끔은 취성파괴를 일으킬 수도 있다. 이 방법은 생산적인 것이 아니며 값비싼 장비의 사용을 피할 수 없고 얇은 두께의 구조물에 있어서 길이 방향 안정성의 손실과 같은 위험도 따른다.

국부가열은 열의 대류, 복사, 가스불꽃, 고주파 전류, 레이저 등의 수단을 동원하여 가능하다. 이러한 국부가열에 있어서 주의하지 않으면 안될 사항은 일반적인 구조물의 형상이나 그렇게 단순하지 않고 효율성이 떨어진다는 것 이외에도 냉각중의 구조물의 파괴, 부풀음(bulges), 새로운 잔류응력의 생성 등의 위험등이다<sup>[2]</sup>. 가장 잘 알려진 국부가열방법의 적용의 예로서 석유운송용 파이프 라인의 원주방향 접합부의 안전성 개선이나 석유정제산업에 있어서의 황화물 크랙(sulphide cracking)에 대한 접합강도의 증가방안을 들 수 있다. 그러나 이 작업은 생산성이 별로 없다. 예를 들어 OGCC(Orenburg Gas-

Condensate Complex)에서의 사례<sup>[3]</sup>를 보면 2교대 작업으로 4명의 숙련 노동자(트랙터 운전, 가열장치 운전, 열처리 작업)가 168mm직경의 파이프에 18~20개의 접합부(또는 400~500m 길이)를 처리하였으며, 이때 25kw용량의 설비가 6개의 독립된 장소에 설치 사용되었다. 이 OGCC에서 168×14mm직경의 용접에 0.6시간이 소요되는 반면 열처리에서는 4.3시간이 소요되었으며 거기에서 75%의 시간이 가열·냉각 과정에 소요되었다. 물론 이 과정을 보다 집중적으로 처리한다면 1.6배의 효율을 올릴 수 있다고 판단되지만 경제적으로 완벽한 것은 아니다.

또하나의 응력제거처리 방법으로 저온열변형을 기본으로 한 linde method<sup>[4]</sup>를 들 수 있다. 즉, 가스버너와 같은 이동열원에 의해 HAZ는 탄성열팽창을 받아 접합부가 늘어나고 이것에 따라 소성변형을 만들어 지는 것이다. 이것은 잔류응력으로부터 weld의 unloading에 기인한다. 이 방법은 롤러에 의한 weld의 압연, 표면강화, 정적과부하 하중, 탄성-소성 굽힘과 기타것의 두가지의 기본을 사용한다. 이것의 원리는 인장잔류응력의 최대치(peak)를 줄이는 것 뿐만 아니라 금속 표면층에 있는 압축잔류응력의 감소의 효과를 노리는 것이다.

용접부와 HAZ에 국부적 소성변형을 일으키는 방법으로 peening, hammering high-velocity impulse deforming과 같은 기계적 방법이 있으며 N. O. Okerblom에 의하면 최대 75%까지의 효과가 있다 하였다.<sup>[5]</sup> hammering에 의한 것은 2~4배의 효과가 있음이 확인 되었다. 또한 매우 효과적인 방법은 high-velocity deforming으로 이 방법은 가열과 병행하여 사용되기도 한다. 압연(rolling)은 보다 큰 효과가 있어 인장의 것이 압축으로 바뀔 수 있으며 접합부 최대응력은 모재와 거의 동일한 수준이 된다. 때로는 수동함마가 hammering시 impulse magnetic

field 에너지 역할을 하며 이 경우 최대 70%정도의 효과가 확인된 바 있다.

최근의 진동방법 또한 잘 알려져 있다.<sup>[6]</sup> 이것은 접합부의 형태, 재료, 재료강도, 중량에 따라 어떤 일정 간격으로 고유진동수가 가깝게 또는 공명에 해당되는 가진기능을 갖는 기계적 가진기에 의해 행하여 진다. 이 진동 방법은 편의성, 생산성, 복잡한 형상에의 적용성, 몇개 용접부의 동시 적용성 등의 장점이 있다. 기술적으로는 최고의 방법이다. 이 처리 방법은 "vibro-creep" 이라고 불리우는 잘 알려진 현상으로 항복점을 현저하게 감소시킴에 연유한다. 이 현상은 잔류응력이 반복스트레스(cyclic stress)정도로 낮아져 항복점 보다 훨씬 낮아짐을 알 수 있슴과 같다. 다른 연구에서는 이와 상반되게 vibro-creep효과는 무시할 정도이며 외부힘에 의한 변형이 잔류탄성응력과 유관하여 이를 감소시켜 준다 하였다. 어떤 연구자는 재료의 불완전한 탄성이 잔류응력의 감소와 관계한다고도 하였다.

정리해 보면 이완효과가 진동법에서 중요한 역할이 되며 이에 대한 계속적인 연구가 필요하다. 기본적으로 여기에서 진동법에 의한 잔류응력의 감소는 구조물의 서로 다른 자유도를 만족시키는 서로 다른 진동의 진폭에 추가된 것이라 할 수 있다. 이 방법은 열처리와 병행하여 사용할 수 있는 가능성이 있으며 용접시공 중에서도 적용이 가능하나 아직 실용화는 멀다고 본다.

초음파에 의한 방법 역시 고려될 수 있다.<sup>[7]</sup> 진동자(striker)없이 2mm두께의 판재에서는 약 50%, 진동자를 채용하는 경우 90~95%의 효과가 보고 되었다. 어떤 연구자<sup>[8]</sup>는 초음파 충격 방법으로 multi-striker를 사용하여 20%까지 하향시켰다.

여러 가지 방법은 모두 나름 대로의 제한성이 있다.<sup>[8]</sup> 현실적인 문제는 대형, 다량의 처리가 산업에 이용이 가능할까 하는 점이다. 현존하는 방법을 완전하게 하고 새로운 방법을 찾아 용접 이후 응력제거는 물론 강화, 안정된 geometry, 금속 구조물 형태의 개선등 많은 분야의 연구가 계속되어야 한다.

### 3. 용접부 성질 개선에 필요한 폭발 열처리 기술현황

폭약은 금속가공에서 에너지원으로서 어느 정도 가능성을 이미 확보하고 있다. 이 에너지는 금속처리의 범위를 현저하게 확장하고 있다. 지금까지 종래의 기술에 의해 불가능한 이종 금속을 접합 한다든가 기계적 성질의 약점을 보완된 부품도 가공할 수 있다.

폭약 에너지를 사용한 금속가공에 대한 최초의 시도는 지난 세기 말로 돌아간다. 이후 체계적 연구는 1940~1950년이었고 1944년 미국에서 I. Carl에 의해 처음으로 발표되었다. 거의 동시에 소련에서는 M.A. Lavrentiev에 의해 경사의 충돌각을 갖은 고체에 대한 기본 연구가 있었다. 1950년대 중반에 와서 재료에 대한 특별한 가공을 포함한 강화, 성형, 절단, 신재료 합성에 대한 연구결과가 발표되었다. 최초의 미국에서 단순하게 출발되었던 이 분야 기술은 지금은 선진공업국에서 차츰 일반화되어 가고 있으며 소련내에는 20여곳의 폭약물질에 의한 가공 전문 그룹이 있다. 이를 정리하면 참고자료<sup>[10][22]</sup>와 같다.

1950년 말에 기계공학, 재료과학, 산업, 토목에 널리 쓰여 수십개의 기술이 미국이나 소련에서 개발되었고 공업선진국에 의해 점유되기 시작하였다. 그러나 하나의 예외는 폭발에 의한 금속구조물의 용접부의 처리라고 할 수 있다. 1970년 초까지 이 분야에서의 기술적 시도는 없

었으며 이후 25년간 E. O. Paton Institute(이하 PWI)의 연구팀이 이를 시도하였다.<sup>[9]</sup> 산화 알루미늄 제조공장에서 대형탱크의 내식처리가 성공적으로 착수된 이후 PWI에서는 이 기술을 (구) 소련과 yugoslavia에 적용하기 시작였다.

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 성공하게된 데에는 두가지 환경이 있었다.

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

이러한 것은 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 탐재공정에서 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.

최초의 피로강도 개선에 관한 연구가 PWI<sup>[11]</sup>에서 1967년에 있었다. 이후 가공경화, 압축잔류응력의 생성에 관한 연구노력이 있었다. St3, 10G251, 14ChMNDFR, M16S(주: SS34,SWS400 동급)에 대한 재료적용 실험이 있으며 필릿의 건축 재료에 대한 것도 있었다.<sup>[12]</sup> 폭발에 의한 잔류응력 제거처리(Explosive Stress Relieving, 이하 ESR) 이후; 및 이전에 대해 급힘시험(R.

표 1. 여러 응력제거방법에 의한 용접부의 파괴강도의 개선효과(예비실험 데이터)

처리방법	파괴강도의 개선효과(%)					
	맞대기 용접		필릿단 용접		필릿 용접부	
	$R_s = -1$	$R_s = 0$	$R_s = -1$	$R_s = 0$	$R_s = 1$	$R_s = 0$
폭발	20 - 5	15 - 30	75 - 90	40	120	75
기계	20 - 5	20 - 100	-	5 - 25	-	10 - 25
전기아크	50 - 90	-	50 - 80	-	-	-
고온소루	30 - 95	0	-	0	0 - 260	0 - 50
정하중	20 - 50	-	-	-	-	45
햄머표면강화	80 - 105	45	40 - 90	60	-	25 - 75
국부가열 (점 또는 선)	-	-	-	-	20 - 60	0 - 105
plastic reducing (점 또는 선)	35 - 50	30	110	-	110	70
플라스틱 코팅	0 - 40	-	-	-	-	-

$R_s = -1$ , pulsating( $R_s = 0$ ), 비대칭( $R_s = +0.3$ )조건에서의 피로실험이 수행되었다. 이 시험에서 피로 파괴 형태의 파괴가 용융라인의 직교의 날개(rib)와 용접부 끝부분에 있는 필릿용접의 시료에서 나타났다. 이 실험은 파괴의 깊이 2~4mm가 될 때 중지하였다. 피로파괴에 대한 저항값은 폭발처리이후 당연히 증가함을 보여주었다. 접합부의 강도는 반복횟수에 따라 달라 졌지만 3~5배정도로 확인되고 대칭성의 사이클 조건하에서 75~120%, 비대칭 또는 pulsating 경우에는 35~120%의 파괴강도 개선효과가 있었다. 특히 비대칭 사이클 하에서의 파괴강도의 절대값의 효과가 특이하게 나타났다. [표 1 참조]

또한 연강과 저탄소강에 대한 파괴저항 효과에 대한 처리방법별 효과분석도 있었다. 겹치기 이음(lap joint)의 폭발처리방법은 다른 방법보다 그 효과가 적어 응력집중인자(stress concentrators)인 표면강화, 국부가열의 구역내에 압축 잔류응력의 생성에 기인하였으며, 응력집중(기계, 전기아크)완화를 기초로 하였다. 맞대기 이

음(butt joint)에서는 약간 적은 효과가 나타났는바 낮은 응력집중을 갖는 접합부의 파괴저항을 확인할 수는 없었다. V. P. Larionov등은 이러한 특성을 갖는 용접부의 폭발처리에 대한 효과를 확인하였다.<sup>[13]</sup> 물론 이것은 다른 방법에 대해 확인된 바는 아니었다. 이와 유사한 데이터가 O. Sleptov 연구결과에서도 확인된 바가 있었다.<sup>[14]</sup>

이후 영국의 M. Chadwick에 의해 파괴저항을 개선하기 위한 폭발처리방법과 관련한 연구가 수행되었다. maraging 강, fortiweld, 알루미늄 합금의 시료를 사용하여  $R_s = 0$ , 주파수 115~160 cycle/S,  $10^5 \sim 10^7$  사이클로 실험을 행하였으며 그 두께는 각각 4.8mm(maraging 강), 6.4mm(fortiweld, 알루미늄 합금)로 하였다. 실험에서의 폭약은 용접부의 용융라인을 따라서 시료와의 직접접촉, 또는 6.35mm정도의 이격거리를 주었다. 또한 상품명 cordtex (PETN, 10g/m, 6500m/S) 또는 관재 플라스틱 폭약인

metabel(PETN 65%, 기타 성형재, 7000m/S)을 사용하였다. 폭발강도는 폭약량, 폭약의 종류, 이격재료의 두께 및 형태를 변화시켜 조절하였다. cortex 의 경우 접촉 및 이격, 어떤 경우에도 약 40%의 개선효과가 있었으며 fortiweld시료의 경우, 이격거리를 6.35mm로 했을 때 50% 효과가 있었다. 반면에 0.25mm두께의 plumbum spacer를 삽입하여 알루미늄 합금에서의 효과는 약 20%정도 이었다. 규정강도의 65% 정도로 반복하중하에서의 폭발처리결과의 시료는 전체적으로 내구성의 향상이 있었다. 결과로 용접직후와 비교하여 5배의 내구성 개선으로 확인되었다. 이후 G. R. Loosemore에 의한 maraging 강 실험에서도 흥미로운 점이 계속 밝혀졌다.<sup>[15]</sup>

St3 등 자동아크용접부에 대한 잔류응력의 변화 가능성은 PWI에서 1970년대에 최초로 밝혀

졌다.<sup>[16]</sup> 그 판재는 500×400(8-16)mm로 실제 재료에 가장 근접하였으며, 이 결과는 폭발처리에 의한 잔류응력 감소의 현저한 효과(95%)를 정립한 것으로, 여기에 ESR이 폭약의 특성이나 에너지 뿐 아니라 대상접합부의 특성에 따라 달라짐이 확인되었다.

#### 4. 용접부의 폭발응력 제거처리

##### 4. 1. 판형구조재

체계적인 연구가 PWI에서 수행되었으며 폭발 인근 지역에서의 용접부에 형성되는 긍정적 효과가 밝혀졌다.<sup>[17]</sup> 금속은 항복점에 거의 가까운 응력성분을 갖는 축교의 압축잔류응력의 영향을 받는 특성이 나타남이 확인되었다. 이 영향을 받은 부분의 단면을 보면 저탄소강에 12g/m의

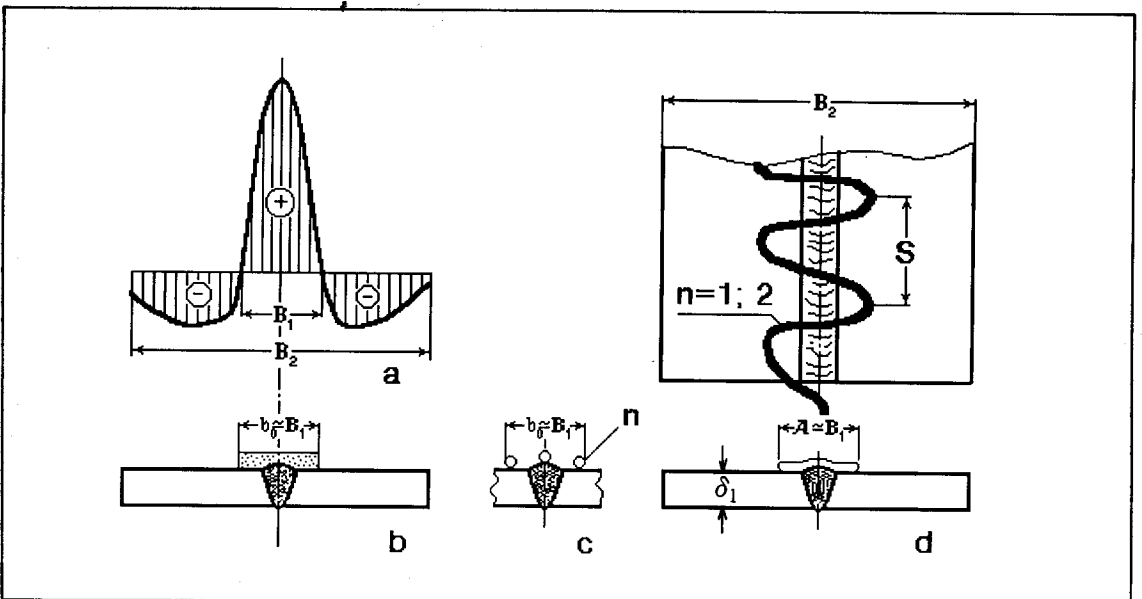


Figure 1. Principal schemes of explosion treatment of welded joints in sheet metal structures: a-epure of residual stresses; b-strip charge; c-cord charges; d-“snake” scheme; n-number of cord charges;  $B_2$ -plate width;  $B_1$ -zone of tensile residual stresses action; A and S-amplitude and spacing of detonating cord in the “snake” scheme;  $b_0$ -width of strip charge;  $\delta_1$ -plate thickness.

기폭선( detonating cord)을 사용하면 그 깊이  $W=10-12\text{mm}$ , 폭  $V=8-10\text{mm}$  정도이다. 폭발 주변의 잔류응력과 stress-strain 관계의 분석으로부터 최소의 폭약량에 의한 최대의 효과는 인장 잔류응력지역에 폭약을 설치하는게 가장 좋은 것으로 나타났다.<sup>[18]</sup> 판재 또는 판형용접구조물에서의 이 지역(용접부 또는 HAZ)은 상대적으로 화약량이 적은 폭의 것으로 길이방향으로 늘인 것이 적합한 것으로 확인되었다. strip 형태 또는 기폭선의 조합으로 가능하며 이런 형태만으로 금속재료내에 실질적으로 비정력학(non hydrostatic) 응력의 특성화에 필요한 3차원적인 흐름이 구현된다 하였다.<sup>[10]</sup>

이러한 사실로 보아 stress-strain 관계내의 금속의 응력의 형태는 판형, 판재의 것을 참고로 하면 길이방향 잔류응력을 따르는 방향이 stress-strain-trace 성분 ( $\sigma_{xx}$  또는  $\sigma_{zz}$ )과 일치한 것을 알 수 있다.

첫 번째 scheme(선형)에서 strip형 폭약량<sup>[19]</sup>은 용접축의 길이방향을 따라 인장응력구역의 폭에 의한 조절이 가능하다(Fig 1a). 이 scheme은 변형이 가능하며<sup>[12]</sup> 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]<sup>[20]</sup>은 transverse stress strain  $\delta_{zz}$ 가 주요 함수일 때 도폭선의 설치하는 주기적 곡선을 갖는다. 공장생산의 도폭선이 가장 적절한 폭약이다. 뱀형에서 효율적인 방법으로는 도폭선 간격을 조정하거나 stress-strain 단면의 치수를 보다 크게 하면된다. 단 이러한 도폭선을 사용할 경우  $n>2$ 이면 부적합하다. 따라서 탄력성있고 생산이 쉬운 도폭선이 필요하다.

나 구부렸을 경우의 안정화 폭핑이 전제되어야 한다.

#### 4. 2. 박판 원통구조재

얇은 벽을 갖는 원형(저장조, 탱크)의 용접부의 응력제거처리는 폭약을 탱크 내부에 중첩시킴으로 가능하다. 원주방향에 대해 상대적인 길이

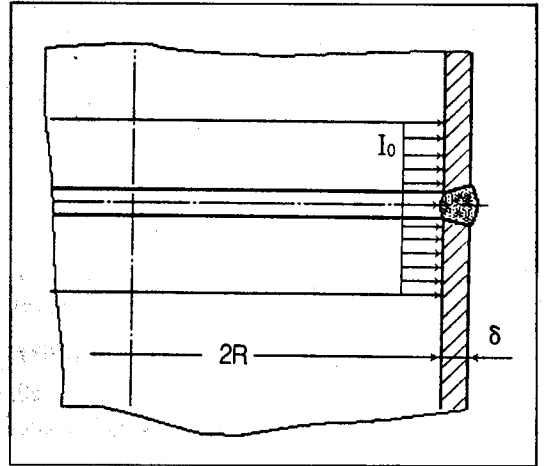


Figure 2. Principal scheme of explosion treatment of circumferential welds in axisymmetrical metal structures : R-shell radius:  $\delta$ -shell wall thickness :  $I_0$ -explosion pulse.

방향의 잔류응력의 감소화에 있어서 주된 문제는 탱크의 국부적 탱크에 따로 변형기구(그림 2)이다.

폭약량의 결정에 필요한 추정 방법은 A.F. Demchuk<sup>[21]</sup>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. 폭약의 폭핑은 순간으로 간주한다 (동방향 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 즉 불완전한 ring은 운동시간 역시 고려되지 않는다. 따라서 응력과의 상호간섭이 끝난 후의 탱크의 관성팽창인 두 번째 단계만을 고려하면 된다. 탱크내의 잔류응력은 없고, 전체 문제는 탄성운동으로 해석한다. 1 자유도를 갖는 강제진동으로 보면, 도폭선 간격 S는

$$S = \frac{2Nq_0}{\delta m \epsilon_y} \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

여기에서 N은 금속재료와 폭약을 특성화하는 인자 q<sub>0</sub>는 도폭선의 비중 (running density) δ는 처리코저 하는 모재의 두께, m은 응력제거 효율계수로서 m<sub>max</sub>=2, ε<sub>y</sub>는 모재의 항복점이다. 예를 들어 PETN (Q<sub>0</sub>=5MJ/kg, N=8.6cm<sup>3</sup> /cal), 도폭선을 사용하고 ε<sub>y</sub>=2×10<sup>-3</sup>, ss400의 탄소강 맞대기 용접의 경우

$$S=10/m \delta \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

가 된다.

### 5. 결론

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. 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.

본 기술과 관련하여 PWI의 협조에 의해 한국 중공업(주)과의 협력연구를 수행중에 있다.

### 참 고 자 료

- [1] Nikolaev G.A. Residual stresses and strength of welded joints and structures, Moscow, Mashinostroenie, 1969, 240 P.
- [2] Klimochkin M.M. Method of determining the heating zone at local high temper of circumferential welds in vessels, Svarochnoe proizvodstvo, 1982, No 2, P.14-15.
- [3] Malinsky D.I. Heat-treatment of welded butts on Orenburg gas-condensate complex, Stroitelstvo truboprovodov, 1972, No 1, P. 5-7.
- [4] Kedrov I.V. Thermo-mechanical method of decreasing the inherent stresses, Proc. TsNII MPS, Moscow, Mashinostroenie, 1950, P. 35-40.
- [5] Okerblom N.O. Welding deformations of metal structures at welding, Moscow, Mashgiz, 1950, 144 P.
- [6] Sagalevich V.M. Methods of removing the welding deformations and stresses, Moscow, Mashinostroenie, 1974, 248 P.
- [7] Kholopov Yu.V. Treatment of welded joints by ultrasonic aiming of residual stress relieving, Svarochnoe proizvodstvo, 1973, No 12, P. 8-10.
- [8] Mikheev P.P. et al. Effectiveness of ultrasonic treatment application for raise of fatigue strength of welded joints, Avtomaticheskaya svarka, 1984, No 3, P. 4-7.



- [9] Konon Yu.A. Explosion welding, Moscow, Mashinostroenie, 1987, 216 P.
- [10] Deribas A.A. Physics of explosion strengthening and welding, Novosibirsk, Nauka, 1980, 221 P.
- [11] Mikheev P.P. et al. Using the impulsive treatment for increase of fatigue limits of welded joints, Avtomaticheskaya svarka, 1967, No 10, P. 63-64.
- [12] Trufyakov V.I. Fatigue in welded joints, Kiev, Naukova Dumka, 1973, 216 P.
- [13] Larionov V.P. et al. Resistance to low-temperature brittle cracking and wear of machine parts and welded joints, Novosibirsk, Nauka, 1976, 206 P.
- [14] Slertsov O.I., Petushkov V.G. et al. Increase of resistance to low-temperature brittle cracking of welded structures for North, Novosibirsk, Nauka, 1982, 244 P.
- [15] Loosemore G.R. et al. Shock loading improves joint properties in maraging steels, Welding and metal fabrication, 1984, NO 5, P. 191-197.
- [16] Petushkov V.G. et al. Explosion treatment of welded joints-the new effective method of increasing quality of welded structures, Proc. Intern. Symp. "Use of explosion energy for fabrication of metallic materials with new properties, Chekoslovakiya, Marianske Lasne, 1973, P. 333-337.
- [17] Petushkov V.G. On mechanism of decreasing residual stresses during explosion treatment, Avtomaticheskaya svarka, 1982, No 4, P. 1-4.
- [18] Petushkov V.G. Estimation of effectiveness of reducing residual stresses by applying external load, Avtomaticheskaya svarka, 1975, No 7, P. 19-23.
- [19] 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.
- [20] US Patent No 4.432.609.
- [21] Demchuk A.F. A method of explosion chamber design, Zhurnal Prikladnoy Mekhaniki i Tekhnicheskoy Fiziki, 1968, No 5, P. 6-12.
- [22] Moon J. G. Technical survey of explosive energy to the industrial working process, Feasibility Report, Korea institute of Machineng and Metals, BSN 001-007. M, 1993