

용접구조물의 공기중 폭발변형시험 개요

박태원 · 김홍규 · 홍성석 · 심인옥

Outline of Explosion Bulge Test in Air for Welding Structure

Taewon Park, Honggyu Kim, Sung Suk Hong and Inok Shim

1. 서 론

구조물 용접부에 일반적으로 사용되는 단순 인장/충격시험, 용접균열 저항시험 및 notched weld test 등은 구조물에 비하여 시편 크기가 작아 사용 중 실 용접부의 성능을 평가하기는 어렵다. 따라서 하중의 조절이 가능하며 full joint를 포함한 간단한 형상의 시편으로 semiworks-scale에 대한 구조시험을 경제적으로 수행할 수 있는 방법이 필요하다.

이러한 semiworks-scale 실험으로 응력조건을 변화하여 금속재료의 거동을 연구할 수 있는 방법은 biaxial loading이 가능한 tube test와 bulge test가 있다. Tube test는 넓은 면적에 걸쳐 균일한 변형을 주는 장점이 있는 반면 장치가 복잡하고 실험상의 난점과 비용이 많이 드는 단점이 있어 제한적으로 사용되고 있다. Bulge test는 실험방법상 장치가 간단하고 경제적이나 균일한 변형이 비교적 작은 영역에서만 국한되는 특징이 있다. 박판재의 경우 bulge test는 원형 및 타원형의 치구에 조립된 판재에 유압을 가하여 시험을 수행하나 판재가 두꺼워 질수록 가압장치가 커져야 하며 특수한 가압방법이 요구된다. 두꺼운 판재 용접부의 bulge test는 유압가압방식 대신 폭약을 사용하여 충분한 bulge를 얻을 수 있다. 폭약에 의해 controlled biaxial 응력상태를 만듦으로써 semiworks-scale 용접부 성능 시험을 수행할 수 있다. 폭약하중 방법으로 폭약을 시편에 접촉하여 수행할 경우에는 균일한 가압이 이루어지지 못하나¹⁾, 미국 해군연구소(NRL, Naval Research Laboratory)의 Pellini 등은 폭약을 치구에 설치된 시편 위의 일정거리에 위치하도록 하여 폭파시 매우 높은 기체압력에 의하여 급속한 하중이 균일하게 시편에 전달될 수 있으며 재현성이 있는 용접부 성능평가를 위한 폭파시험(Explosion Test)의 기초를 마련하였다²⁾.

실제 다양한 응력조건하에서 운용되는 구조물에 있어서 변형에 따른 파괴결과는 중요한 자료이며, 시험시 균열생성은 온도 및 용접부 인성에 의존하며, 용접부

초기 파괴는 온도 저하에 따라 균열전파에 대한 저항성이 작아져 모재부에 심한 파괴를 야기시키므로 온도 변화는 재료 성능평가에 있어 매우 중요한 사항이다. 따라서 semiworks-scale 용접부 성능평가를 위하여 저온에서 explosion crack starter test와 explosion bulge test가 사용되고 있다.

잠수함 및 수상함 등 구조적으로 압력을 받는 용접구조물에 사용되는 재료 및 용접이음부가 얼마나 큰 소성 변형까지 파괴되지 않고 버틸 수 있는가 하는 문제는 구조물의 설계 및 안정성 확보 측면에서 반드시 검토해야 할 가장 중요한 요인 중의 하나로서, 미 해군에서는 매우 빠른 변형 조건에서 재료 및 용접부의 파괴에 대한 저항성을 평가하는 방법으로서 폭파에 의한 공기압을 이용한 폭발변형시험을 규격화(MIL-STD-2149A (SH)) 하였다. 본 보고에서는 이 규격을 기초로 하여 국내 개발한 폭발변형시험을 소개하고자 한다.

2. 폭발변형시험절차

2.1 모재 준비

압연판재는 압연상태로 사용되며, 주조, 단조 및 압출품은 균일한 판재두께를 유지하기 위하여 양면을 기계가공 또는 연마한다. 용접이음부의 형상은 특별히 규정되지 않는 한 그림 1과 같이 double-V 형상으로 준

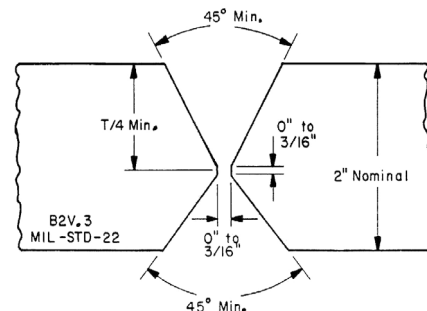


Fig 1 Typical joining configuration for explosion bulge test weldments

비한다. Double-V 경사면 은 편평하고 균일하도록 가공하며, 용접하기 전 경사면에 부착되는 잔류물(절삭유 및 산소절단에 의한 표면 산화층 등)을 제거한다. 용접 경사면은 모재의 압연방향과 평행하도록 가공한다.

2.2 시편 준비 및 용접

2.2.1 균열발생시험 시편

균열발생시험용 시편은 모재 및 용접부에서 균열의 생성 및 전파가 쉽게 발생하도록 하기 위해 모재 또는 용접부 위에 경도가 높고, 매우 취약한 Murex Hardex N 또는 그에 상당하는 균열발생 육성 용접 bead를 형성시키며, 육성 용접bead 방향은 시험목적에 따라 두 가지 형태이다.

용접이음부를 사용하여 모재를 평가하고자 하는 경우는 그림 2에 나타난 바와 같이 육성 용접bead 방향이 주 용접 bead 방향과 평행하도록 주 용접이음부 위에 위치시킨다. 두께 50.8mm 시편의 경우, 용접 용융선 가장자리에서 약 1.6-2.4mm 거리만큼 떨어진 위치에 두개의 육성 용접 bead를 만들며, 두께 25.4mm 시편의 경우에는 주 용접부의 중심선을 따라 한 개의 육성 용접 bead를 만들며, 육성 용접 bead의 길이는 약 50.8-76.2mm가 되게 한다.

용접이음부 없는 모재를 평가하는 경우의 육성 용접 bead는 그림 3에 나타난 바와 같이 시편의 중심부에서 시편의 주 가공방향에 대하여 수직으로 육성 용접 bead를 만들며, 두개의 육성 용접bead를 만드는 경우 시편의 중심선에서 양쪽으로 약 15.8mm간격이 되도록 한다.

용접재료 또는 용접공정을 평가하고자 하는 경우에는 그림 4와 같이 주 용접 bead 축에 수직으로 육성 용접 bead를 형성시킨다.

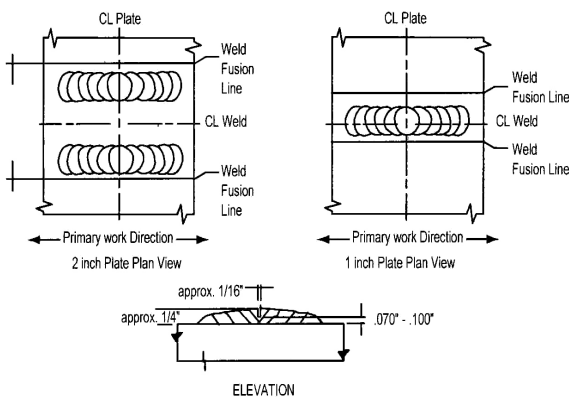


Fig. 2 Crack starter bead configuration for base metal evaluation incorporating weld joint

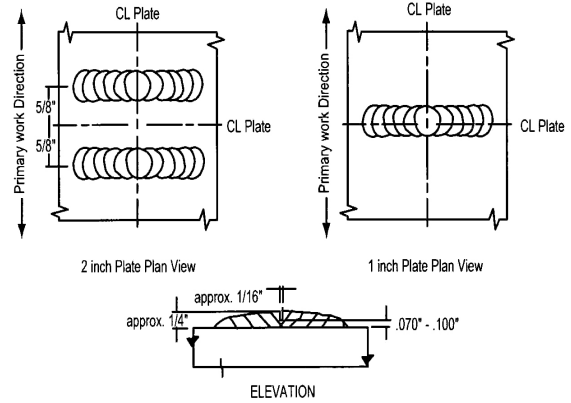


Fig. 3 Crack starter bead configuration for base metal evaluation without a weld joint

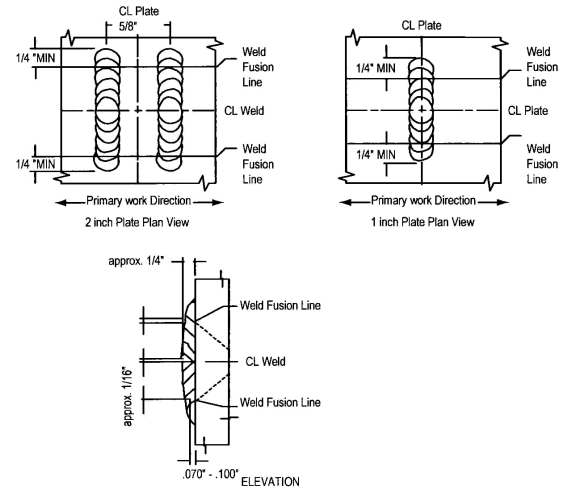


Fig. 4 Crack starter bead configuration for weld metal and weld procedure evaluation

두께 50.8mm의 시편의 경우 주 용접선의 중심으로 부터 16mm 정도 떨어진 위치에 두개의 육성 용접 bead를 만들며, 두께 25.4mm 시편의 경우에는 주 용접부의 중심에 한 개의 육성 용접 bead를 만든다. 육성 용접 bead는 약 50.8-76.2mm의 길이를 가지며, 비드의 양끝은 양쪽 용접 용융선에서 약 6.35mm정도 모재 위에 위치하도록 한다. 용접이음부의 폭이 62.7mm 보다 넓은 경우 육성 용접 bead가 양쪽 용접 용융선의 약 6.35mm정도 위에 위치하도록 하기 위해 육성 용접 bead 길이를 확장할 수 있다.

균열축진을 위한 육성 용접을 위하여 요구되는 용접 조건은 (1) 용접공정 : shield metal arc, 직류전류의 양극전극(DCEP : direct current electrode positive) (2) 전극직경 4.8mm (3) 자세 : 하향 평 자세 (flat, down hand) (4) 용접전류 및 전압 : 180-190 amps, 22-23 volts (5) 이송속도 : 114.3-127mm/min. 이

다. 육성 용접 bead 폭은 16mm를 넘지 않도록 한다. 균열발생시험 시편은 그림 2-그림 4에 나타난 바와 같이 균열발생 bead에 노치가공을 함으로써 마무리한다. 모재 평가가 목적인 경우에는 육성 용접부의 중간 위치에서 양쪽 용융선에 걸쳐 노치를 가공한다. 노치가공은 직경 25.4mm정도의 얇은 abrasive disk를 사용하며, 시편의 수직방향으로 홈이 파이고 전체 용접 bead 폭에 충분히 걸쳐지도록 가공하며, 노치의 밑부분과 모재 또는 용접 bead 사이가 약 1.8-2.54mm가 되도록 노치 깊이를 가공하며, 노치가 시험편의 주 용접이음부나 모재까지 연장되지 않도록 한다.

2.2.2 폭파변형시험 시편

폭파변형시험 시편은 앞의 2.1항 및 2.2.1항에서 제시한 시험편 및 용접 방법을 적용하여 그림 5와 같은 형상 및 치수를 적용하여 준비한다. 용접이음부의 건전성 평가를 위하여 용접이 완료된 후 48시간이 경과한 다음 치구영역을 제외한 모든 용접이음부에 대하여 육안검사, 방산선 검사 및 자분탐상 검사를 실시한다.

폭파시험편이 시험치구에 설치 할 경우에 시험편의 용접부를 폭파시험시편 측면으로부터 약 150mm정도 까지 연마/제거하여 시험편이 치구에 안정되게 설치되도록 한다. 또한 시편의 온도 측정을 위하여 폭파시험시편의 측면에 열전대를 삽입할 수 있는 구멍을 뚫는다. 구멍은 시편두께의 중심부, 시편의 측면 표면으로부터 25mm 위치에서 직경 약 3mm, 깊이 25mm 가 되도록 한다.

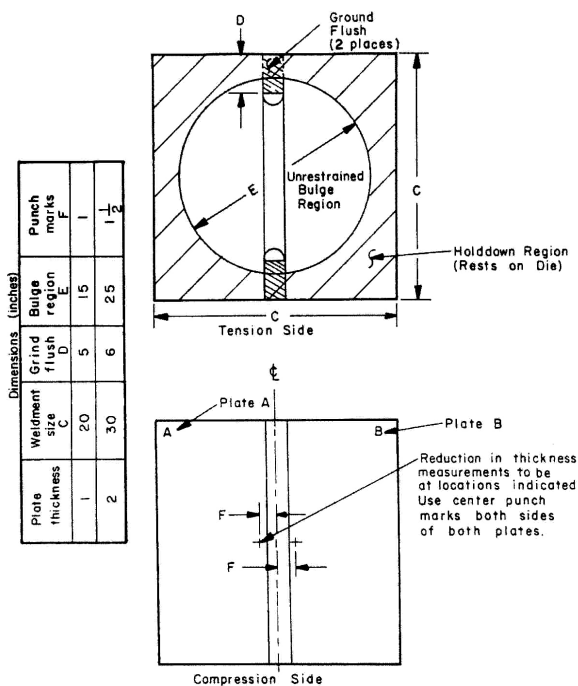


Fig. 5 Explosion test plate preparation

3. 기계적특성평가 및 폭파변형시험

3.1 기계적특성평가

기계적특성 평가를 위한 시험편은 그림 6에 나타난 바와 같이 폭파변형시험편을 연장 용접하여 연장된 용접부로부터 시험편을 채취한다. 용착금속 인장시편의 직경은 12.8mm로 하며, 가능한 최대 크기를 갖도록 한다. 50.8mm 두께의 용접시편의 경우 2개의 인장시편을 채취할 수 있으며, 인장시편의 준비 및 시험방법은 용접시편의 물성시험규격인 ANSI/AWS B4.0에 따른다.

Charpy V-notch(CVN)시편은 시편의 표면이 용접부 표면으로부터 4.8-8mm정도 되는 위치에서 채취되도록 하며, V-노치는 그림 6에 나타난 방향으로 가공하여 ANSI/AWS B4.0에 따라 시험한다.

Dynamic Tear 시험은 ASTM E604에 따라 15.9mm 표준시편을 가공하여 한다. 시편은 용접판재 표면으로부터 4.8-8mm정도 되는 위치에서 채취하며, 노치는 그림 6에 나타난 형상으로 가공한다. 굽힘시험이 규정된 경우에 ANSI/AWS B4.0에 따라 횡방향 전단면 측면굽힘(transverse full section side-bend)시편을 용접부로부터 채취하여 시험한다. 용접공정에 대한 승인을 목적으로 하는 경우 최소한 두개의 폭파시험/기계적 물성시험용 연장 용접시편(두께 50.8mm × 폭 762mm

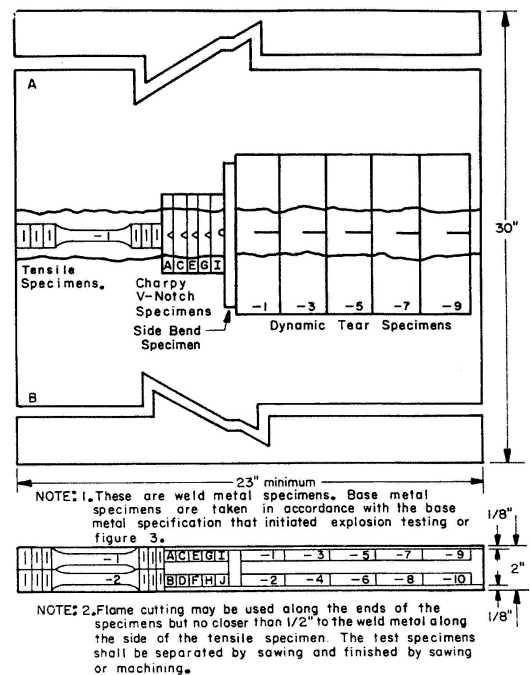


Fig. 6 Diagram of a typical mechanical specimen orientation

× 길이 1270mm)을 제작하기에 충분한 판재를 제공하며, 폭파변형시험을 필요로 하는 경우 감독기관이 정하는 바에 따라 추가적인 폭파용접시편(두께 50.8mm×폭 762mm×길이 762mm)을 제공한다.

3.2 폭파변형시험

3.2.1 시편의 냉각

폭파시험시편은 시편을 설치하는 동안 규정된 시험온도($-18\pm 1.5^{\circ}\text{C}$) 이상으로 가열되는 것을 방지하기 위하여 규정 시험온도 이하로 냉각한다. 냉각방법은 시험시편의 시험온도만 충족될 수 있으면 별도로 규정하지 않으며 액체질소 또는 dry ice로 냉각된 알콜을 냉각매질로 사용할 수 있으나 공기순환이 가능한 기계적인 냉동에 의한 냉각 box를 사용하는 것이 효과적이다.

취급 중 온도가 상승하는 속도는 판재두께, 주변온도 및 냉각장치에서 꺼내어 치구에 설치하는 시간에 의존하며, 시편의 과냉각 정도는 시편을 사용하여 사전에 시험하여 판단에 필요한 자료를 확보한다.

냉각장치 내부에서 시편의 전 두께에 걸쳐 온도가 균일해야 하며 폭파시험까지 냉각상태를 확인하기 위하여 열전대로 온도를 추적한다.

3.2.2 시편, 치구 및 화약설치

폭파시험 시편의 온도조건이 만족되면 앞의 그림 5와 같이 시편의 연마된 영역이 시험다이(그림 7(a))와 접촉되도록 시편을 설치한다. 시편에는 일정한 부위에서 두께 변형을 측정이 가능하도록 일정한 간격으로 그림 7(b)와 같이 표식을 한다. 폭파를 위한 장약(그림 7(c))은 적절한 이격거리를 유지한 상태(그림 7(d))에서 시편의 중심부에 일치하도록 그림 7(e)와 같이 설치한다. 그림 7(f), (g) 및 (h)는 각각 폭파시험시 폭파현상, 시험후 시편 형상 및 변형된 시편을 보여준다. 폭파변형시험을 위한 이격거리는 시험편 두께, 시험온도, 폭약량, 폭약 형태, 폭약 종류 등에 따라 달라지며 요구되는 표면변형 및 두께감소를 확보하기 위하여 필요한 폭약량 및 이격거리를 설정하기 위한 사전시험을 실시한다.

매 폭파마다 시험시편을 검사하여 모든 균열의 위치, 길이 및 방향을 서술 및 스케치하여 기록하며, 폭파시험 결과를 기록한다. 폭파시험 형태에 따라 요구되는 두께감소를 및 표면변형을 측정하여 기록한다.

폭파시험시편의 두께측정 방법은 deep throat caliper를 사용하거나 초음파 측정 장비를 사용하여 측정한다. 초음파측정 장비를 사용하는 경우 측정하고자 하는 재

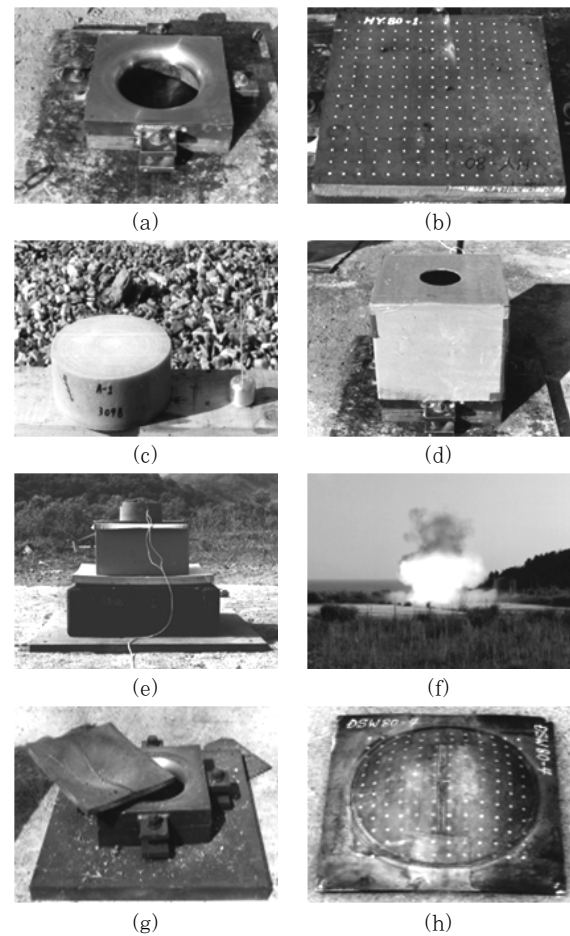


Fig. 7 Procedure of explosion bulge test

료와 동일한 조성을 갖고, 정확한 두께를 알고 있는 최소한 두께의 측정 표준시편을 사용하여 보정한다.

4. 폭파시험 요구조건 및 결과 평가

수행하는 폭파시험 종류 및 시험시편의 수량은 별도로 규정되는 바에 따르며, 폭파 균열생성시험 및 폭파 변형시험의 합격기준은 표 1에 규정된 사항에 따른다.

폭파균열생성시험(CST)은 폭파변형시험 전에 실시하며, 첫 번째 폭파 시 표 1에 규정된 사항을 만족할 경우 두 번째 폭파까지 시험을 수행한다.

폭파변형시험(EBT)은 높은 변형속도가 부가되는 조건에서 용접부의 임계변형정도를 평가하기 위하여 반복적으로 폭파시험을 수행한다. 폭파변형시험 시편은 파단이 발생하거나 또는 재료규격에서 규정하는 최소 두께변형율을 만족할 때까지 반복적으로 폭파시험을 실시하며, 폭파시험편의 규정된 부위에서 두께 감소율을 측정한다.

판재를 평가하는 경우 용접금속에서 발생된 파단은

Table 1 Explosion test acceptance criteria 1

Acceptance criteria	Crack starter test		Explosion bulge test		
	First shot	Second shot	First shot	Second shot	Additional shots
Crack starter bead shall crack	×	<u>2/</u>	N/A	N/A	N/A
No piece shall be thrown out of material being tested	×	×	×	×	×
No through thickness cracks shall be present	×	N/R	×	×	N/R
No crack shall extend into the hole down area	×	×	×	×	×
Percent reduction in thickness	<u>3/</u>	<u>3/</u>	<u>3/</u>	<u>3/</u>	<u>4/</u>

1/ : Conditions required for each shot are marked with an "×", N/R=not required
2/ : In the event the ctack-starter bead does not crack on the first shot, the first shot shall be repeted
3/ : The present reduction in thickness shall be recorded for information only
4/ : The required percent reduction in thickness shall be as specified in the applicable material specification. Shots shall be discontinued when the metal fails to meet the above conditions, or when the reduction in thickness requirement are met

no-test로 간주되며, 용접금속을 평가하는 경우 판재를 통과하는 파단은 no-test로 간주한다. 이러한 두 가지 경우에 파단 및 파단양상에 대한 분석 결과에 따라 재 시험을 수행할 수도 있다.

균열발생 시험시편의 경우 첫 번째 폭발시험 시 균열시작 비드에서 균열이 진행되어야 하며, 시험 판재로부터 어떠한 조각이 떨어져 나오면 안 된다. 또한, 첫 번째 폭발 후 두께방향으로 관통되어 진행된 균열이 없어야 하며, 균열이 치구영역까지 진행되어서는 안 된다. 폭발 후 시험판재의 두께감소는 규정 값이 없으며, 참고자료로 사용한다. 두 번째 폭발시험 시 판재로부터 어떠한 조각이 떨어져 나오면 안 되며, 균열이 치구영역까지 진행되면 안 된다. 두 번째 폭발 후 두께방향으로 관통된 균열은 허용되며, 두께감소는 참고자료 만으로 사용한다.

폭발변형시험 시편의 경우에는 첫 번째 폭발시험 시 시험편으로부터 조각이 떨어져 나오면 안 되며, 균열이 치구영역까지 진행되면 안 된다. 또한 두께방향으로 관통하여 진행된 균열이 없어야 하며, 두께감소는 참고자료 만으로 사용한다. 두 번째 폭발시험에서도 시험판재로부터 조각이 떨어져 나오면 안 되며, 두께 방향으로 진행된 균열이 없어야 하고, 균열이 치구영역까지 진행되면 안 된다. 두 번째 폭발 후 두께감소는 참고 자료로 이용되며 1회 폭발 시 약 3% 정도의 변형이 되도록 한다. 두께변형 시편에 대한 추가(세 번째 이상) 폭발시험을 두께감소율이 14%(항복강도 690MPa급, 16% : 항복강도 560MPa 급) 이상을 만족할 때까지 계속 수행한다. 추가 폭발시험 시 시험판재로부터 어떠한 조각이 떨어져 나오면 안 되며, 균열이 치구영역까지 진행되면 안 된다. 추가 폭발시험 시 두께방향으로 관통되는 균열은 허용된다.

두께방향으로 균열이 진행되거나 두께감소를 요구조건이 만족 되거나 균열이 치구 영역으로 진행될 때 폭발변형 시험을 중단하며, 시험을 중단할 때 두께감소 기준을 충족하지 못하면 시험소재는 불합격 처리한다. 변형부위는 폭발변형 시 치구에 의해 구속되지 않는 용접부위를 말하며, 두께 50mm 이상의 판재에서 변형영역은 치구의 구멍(반경 228.6mm) + 만곡부(반경 76.2mm) + 12.7mm로서 총 직경이 635mm이다. 치구영역은 이러한 원의 외부를 칭한다.

5. 결 언

폭발변형시험은 잠수함 및 수상함 등 구조적으로 압력을 받는 용접구조물을 시험편 단위가 아닌 넓은 면적의 용접부를 평가할 수 있는 방법이다. 우리나라는 삼면이 바다로 둘러 싸여져 있어 해상에 대한 방위는 점점 중요성이 증대되고 있으며, 주변국들도 해상무기의 선진화 및 대형화 추세에 있다. 국내에서 발생하는 국지전의 대부분이 해상에서 발생하고 있으며, 해상에서의 방위력 증강이 요구되는 실정이다. 국내에서도 잠수함의 경우 209함을 시작으로 214함, 구축함도 KDX-II에 이어 KDX-III로 점차 대형화 및 고성능화되고 있으며, 전 해상을 방위하기 위해 수량을 증가하는 추세이다. 이들 무기체계의 건조는 초기 기술도입에 의한 공동 건조 형태에서 점차 국내 독자 기술에 의한 설계/제작으로 진행되고 있다. 잠수함 및 수상함에 사용되는 고강도 판재도 국내에서 생산된 제품이 사용되고 있으며, 국내 독자 기술에 의한 판재 및 용접공정 적용을 위해서는 판재 및 용접부에 대한 평가가 이루어져야 하며, 이를 위해 폭발변형시험이 필요하며, 장차 이 시험이 더욱 활성화될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. E.J.Czyryca : Proceedings of 1st Conf. on Metallurgy,

Welding and Qualification of Microalloyed(HSLA) Steel Weldment, AWS, (1990), 553-572
2. Mil-S-24645(SH) 10, Janu, (1990)



- 박태원
- 1961년생
- 국방과학연구소 금속재료팀
- 철강재료 용접야금, 용접재료개발
- e-mail : parktw9@lycos.co.kr



- 홍성석
- 1958년생
- 국방과학연구소 금속재료팀
- 소성가공
- e-mail : sshong@add.re.kr



- 김홍규
- 1959년생
- 국방과학연구소 금속재료팀
- 초내열합금 특성평가
- e-mail : hkkim@add.re.kr



- 심인옥
- 1954년생
- 국방과학연구소 국방소재부
- 금속재료 개발
- e-mail : shimio@add.re.kr