

## 용접구조물의 수중 폭발변형시험 개요

박태원 · 송영범 · 김홍규 · 홍성석 · 심인옥

### Outline of Explosion Bulge Test in Air of Welding Structure

Taewon Park, Youngbeum Song, Hongkyu Kim, Sunguk Hong and Inok Shim

#### 1. 서 론

1998년 국내에서 처음으로 1,200톤급 잠수함이 건조된 이래 11척의 1,200톤급 잠수함이 건조되었으며, 1,800톤급 잠수함도 3척이 건조되어 운용되고 있다. 2003년도부터는 4,500톤급 구축함이 진수되어 2004년도에 실전 배치되었으며, 7,600톤급 구축함 3척이 운용될 예정이고, 4,500톤급과 7,600톤급의 중간 크기의 구축함인 KDX IIA 가 2019년부터 전력화 예정인 것으로 알려져 있다.

우리나라 주변국인 일본, 중국, 러시아 등은 우리나라가 보유한 잠수함 및 구축함보다 성능과 규모 면에서 뛰어난 체계를 갖추기 위해 투자를 대폭 늘이고 있으며 해군력의 증강에 총력을 기울이고 있다. 국내에서도 이러한 추세를 감안하여 해군력의 증강에 장기적으로 많은 예산을 투자하고 있는 것으로 판단된다.

잠수함 및 구축함의 건조시 초기에는 외국의 설계와 기술이 도입되었지만 현재는 국내의 독자 설계 및 축적된 기술로 건조가 가능하다.

잠수함 및 구축함은 구조적으로 압력을 받는 용접구조물로서 해저 및 해상에서 부위에 따라 많은 압력을 받으며, 또한 기뢰나 폭뢰, 어뢰 등의 공격을 받을 수 있기 때문에 구조물의 안정성 확보가 중요한 문제로 인식되고 있으며, 독일 및 미국에서는 용접부에 대해 부풀음 시험을 하도록 규격으로 정하고 있다. 미국에서는 T0974-BD-GIB-101/300에 의해 폭발변형시험을 실시하며 공기중에서 시험온도에 따른 초기 균열발생 및 균열전파에 의해 저항성을 평가하는 방법이 있으며 이 방법에 대해 소개한 바 있다<sup>1)</sup>. 미국에서는 공기중에서 폭발시험을 수행하지만 독일에서는 수중에서 폭발시험을 수행하고 있으며 Nato Stang 4137에 실험방법을 규정해 놓았다. 국내에서 건조된 209함중 6번함까지는 수입된 고강도 판재인 HY-80강이 사용되었으나, 209함 7번함부터 214함은 모두 국내에서 개발된 DS-80

강 및 DS-100강이 각각 적용되었다. 이들 잠수함 건조는 알려진 바와 같이 모두 독일로부터 기술 도입에 의해 건조되었으며, 국내 개발된 모재 및 용접 판재에 대해 독일에서 수중 폭발시험을 수행하여 인증을 득한 후 잠수함에 적용될 수 있었다. 추후 국내 기술에 의해 잠수함, 수상함 건조를 위해서는 폭발변형시험의 국내 인증이 필요할 것이다. 공기중 폭발변형시험 방법 및 절차는 규격에 자세히 명기 되어 있지만, 수중폭발시험과 관련된 규격 및 방법은 비밀로 분류<sup>3)</sup>되어 있어 이에 대한 국내 개발이 필요하였다.

국방과학연구소에서는 독일에서 평가된 시험편의 수중폭발시험 결과를 분석하여 국내에서 가능한 수중폭발시험 기술을 확보하여 국내에서 생산된 강재에 대해 수중 폭발시험을 수행하여 선각재용 강재 및 용접부의 사용 적합성을 평가하였다. 본 고에서는 국내에서 개발된 수중폭발시험 기법에 대해 간략히 기술하고자 한다.

#### 2. 폭발변형시험

##### 2.1 모재 준비

시험 판재는 공기중 폭발변형시험 판재와 동일 방법으로 제작된 판재를 사용하며, 용접이음부의 형상도 특별히 규정되지 않는 한 공기중 폭발변형시험용 시험편과 동일한 형태인 double-V 형상이다.

##### 2.2 시험편 및 치구제작

수중폭발용 시험편은 그림 1과 같은 지름 800mm, 두께 25mm의 원형이다. 압연 방향과 수직, 수평 방향으로 그루브를 가공하여 용접비드를 생성시키며, 모든 비드는 제거하여 모재와 동일한 두께가 되도록 하여, 치구와의 접촉성을 양호하게 한다. 공기 중 폭발시험시 균열생성을 위해 제작한 육성 용접비드는 수중 폭발시

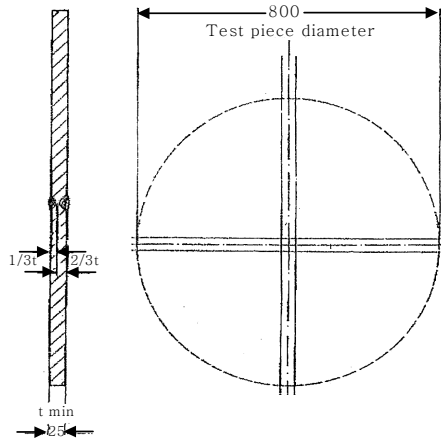


Fig. 1 Typical joining configuration for explosion bulge test weldments in underwater

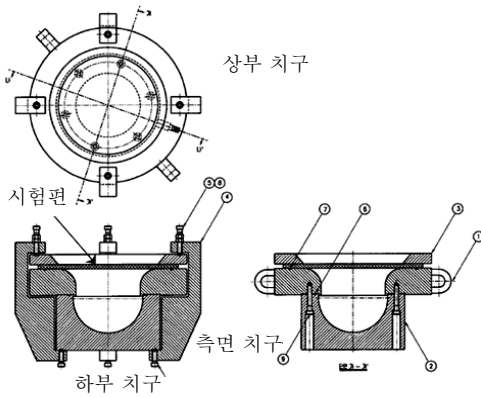


Fig. 2 Apparatus for explosion bulge test in underwater

험에서는 제작하지 않는다. 용접 후 48시간이 경과한 다음 치구영역을 제외한 모든 용접이음부에 대하여 육안검사, 방사선 검사 및 자분탐상 검사를 실시하여 용접부의 건전성을 확인한다.

수중 폭발시험은 수중 약 3.5m 에서 폭발되기 때문에 폭발 후 시험편 회수를 위한 치구 설계가 중요하다. 그림 2에 제작된 치구의 형상을 나타내었다. 치구는 크게 3 부분으로서 시험편을 지지하는 하부 치구, 시험편 위에 상부치구를 올려 하부치구와 상부치구를 고정시키는 측면치구로 이루어진다.

2.3 시험절차

수중 폭발시험은 3.5m 깊이의 수중에서 행하여지므로 폭약설치, 시험편의 정치, 시험편 및 치구의 입수/유지, 수중폭파, 시험편 및 치구`의 회수 등이 공기중 시험에 비해 상당히 까다롭다. 그림 3에 전체적인 시험

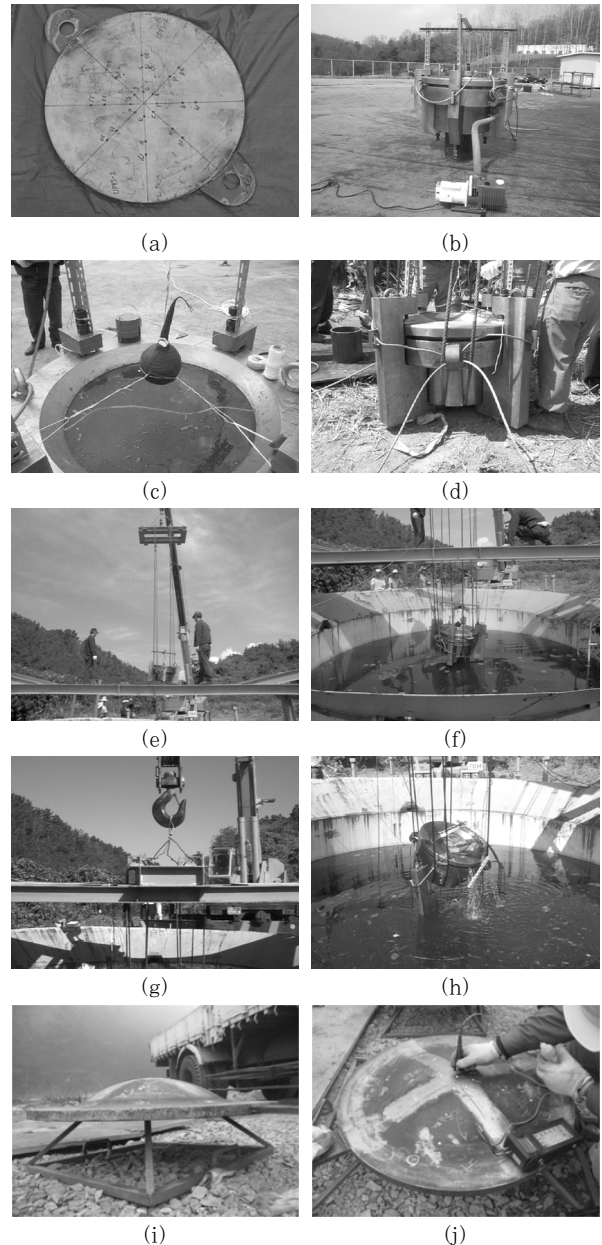


Fig. 3 Procedure of explosion bulge test in underwater

절차에 대해 나타내었다. 매 폭발마다 일정한 위치에서 두께 측정을 하기 위해 시험편에 표식(그림 3(a))을 하고 그림 2(b)와 같이 치구에 시험편을 설치한다.

시험편을 설치 할 때 용접비드가 큰 쪽이 인장응력을 받도록 하부로 향하도록 한다. 하부 치구 위에 시험편을 설치하고 상부 치구를 시험편 위에 올린 후 상부치구와 하부 치구에 가공된 홈을 일치시켜 측면 치구가 상, 하부 치구를 연결시켜 고정시킨다. 설치된 시험편 상단의 적당한 높이에 폭약 설치가 가능하도록 치구 외곽에 앵글을 설치하여 철사로 폭약을 고정한다. 폭약의 종류, 형태, 무게 등과 폭약 설치 높이는 예비실험으로

자료를 축적하여야 한다. 개발된 시험방법에서는 Comp C-4를 직경 110mm의 구형으로 제작하였으며, 무게는 약 1 kg 이다. 이 폭약을 사용하여 매 폭파마다 약 3-6%의 두께변형을 일으키기 위해 시험편으로 부터 약 100-200mm의 이격거리가 적당함을 예비시험으로 얻었다. 이 주 폭약에 EBW RP-87를 삽입하여 기폭 뇌관으로 사용한다. 폭약은 입수시 물이 스며들지 않도록 방수 비닐과 테이프를 사용하여 처리하고, 폭약의 부유를 방지하고 위치가 변경되지 않도록 고정한다. 시험편 설치 후에는 하부치구에 설치된 밸브에 진공 펌프를 연결하여 배기시킨다. 하부치구 내부와 시험편 사이의 공간을 진공으로 유지하기 위해서는 시험편과 상하부 치구 사이에 진공을 위한 패킹처리를 한다. 그림 3(c)는 시험편 상부에 고정된 폭약을 보여준다. 시험편과 폭약이 설치되면 이 전체를 크레인에 연결하여 입수시키기 위해 그림 3(d)와 같이 하부 치구의 용접 부착된 고리에 와이어를 연결한다. 그림 3(e)는 와이어로 연결된 치구를 크레인을 사용하여 입수시키는 장면을 보여준다. 치구로부터 연결된 와이어는 그림 3(e)의 상단 사각형 구조물에 연결되는데, 이는 와이어 길이와 하부의 거치대 철 구조물의 높이를 고려하여 시험편이 수심 3.5m를 조절하기 위함이다. 상부의 사각형 철 구조물을 하부의 철 구조물에 거치시키면 시험편은 수면으로 부터 3.5m에 위치한다. 그림 3(g)는 완전히 시험편이 폭파시험 준비된 상태이며, 폭파로 인해 상부 철 구조물이 움직이지 않도록 크레인으로 고정한다. 이 상태에서 수조로 부터 약 20m 후방에서 원격 폭파장치를 이용하여 폭파한다.

폭파 후에는 고정된 시험편이 완전 해체되지만 와이어로 연결된 모든 치구와 시험편은 그림 3(h)와 같이 회수되며, 그림 3(i)는 폭파로 변형된 시험편을 보여준다. 매 폭파시험 후에는 미리 표식한 위치에서 변형 깊이와 두께를 측정하며, 이 자료는 각각 다음 폭파시 시험편으로 부터 폭약 높이 조절과 폭약량을 조정하는 자료로 사용된다.

강재의 강도급에 따라 요구 두께변형률은 다른데, 항복강도 560MPa급과 항복강도 690MPa 급에서 각각 두께 변형률 16%와 14% 이상이 요구된다. 물론 균열 발생의 경우 치구 영역으로 까지 전파되지 않아야 한다.

그림 4는 수중폭파시험 후의 두께 변형 결과를 보여준다. 3폭 후에 약 18.5%의 두께변형율을 나타낸 결과이다. 변형은 폭압에 의한 하중을 가장 많이 받는 중심부가 심하고 치구 영역으로 갈수록 변형이 감소한다. 그림에서 1폭과 2폭에서 두께변형율이 7.04%와 13.95%로서 매 폭마다 3-6%의 변형율을 얻기 위해서

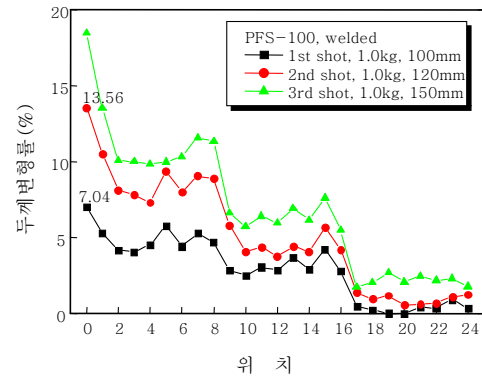


Fig. 4 Explosion test results in underwater for PFS steel

는 폭약량을 줄이거나 이격거리를 증가하여 폭파시 시험편에 가하여지는 폭압을 줄여야 한다. 1폭시 이격거리를 100mm로 하였지만 두께변형률이 7.04%로 2폭시 120mm로 이격거리를 늘렸지만 13.56%로서 더욱 이격거리를 늘릴 필요가 있음을 보여준다. 3폭시는 150mm 로서 약 5% 두께변형률 증가가 있음을 보여준다.

수중 폭파시험은 수중에서 폭파가 이루어지므로 공기중 시험에 비해 시험 절차가 복잡하고 까다로우며, 시간이 많이 소요된다. 시험편도 공기중 시험보다 크기 때문에 시험편을 고정시키기 위한 치구가 폭압에 견디도록 설계되어야 하고, 폭파후 치구와 시험편을 회수하기 위해서 많은 인원 및 특수 장비가 소요된다. 국방과 학연구소에서 1990년도부터 폭파시험을 수행한 결과 수중 시험에서는 공기중 시험보다 소량의 폭약으로 공기중 시험과 동일한 두께 변형을 얻을 수 있으며, 동일한 두께 변형에서는 수중 폭파시험에서 균열 발생 위험도가 감소하였다.

국내에서 개발한 폭파시험기법은 미국과 독일에서 각각 수행하고 있는 공기중 시험 및 수중 시험과 동일한 효과를 얻을 수 있으며, 국내에서 개발된 새로운 선각재용 신소재, 용접재료, 용접공정 등을 적용시 국내에서 폭파변형시험을 수행하여 잠수함이나 수상함에 적용을 위한 인증이 가능하다.

국방과학연구소에서 개발된 공기중 및 수중 폭파변형 시험 기법은 국내에서 선각재로 개발된 DS-80/100/130 강과 PFS-560/700 강에 대해 공기중 및 수중 폭파변형시험을 수행하여 개발 소재에 대한 압력선체용 강재 개발 평가에 활용하였으며, 1991년과 2001년에는 각각 209 잠수함과 214잠수함에 DS-80강과 DS-100강을 적용하기 위한 독일 선급협회인증 시험전 예비 실험을 통하여 독일의 결과를 비교, 평가함으로써 시험방법의 적절성을 확인하여 국내 개발 강재의 잠수함에의

적용에 기여하였다.(DS-80강 및 DS-100강은 각각 HY-80강 및 HY-100강의 국산화 개발 후 명명된 강재명). 또한 2005년에는 무예열 용접 판재로 국내에서 개발되어 규격화된 PFS-560/ 700 강<sup>4)</sup>을 폭파변형시험하여 한국선급협회 인증을 받아 KDX-111에 적용하였다.

내 인증을 통하여 진행되어야 할 것이며, 판재 및 용접재료, 용접공정의 적용 인증을 위해서는 폭파변형시험이 수행되어야 한다. 국방과학연구소에서 개발한 공기중 및 수중 폭파변형시험 기법은 국내에서 개발된 선각재용 고장력강의 잠수함 적용에 기여하였으며, 추후에 시험이 더욱 활성화될 것이다.

3. 결 언

참 고 문 헌

아시아가 세계 군비경쟁의 가장 뜨거운 무대가 되고 있다. 아시아 국가의 고속 경제성장으로 인해 아시아에서의 군사, 정치, 경제, 분야에서 우월적 지위를 확보하려는 각국의 의도가 유례없는 군비 증강 경쟁으로 치닫고 있다. 그런데 군비 증강의 특징은 모두 잠수함, 항공모함, 구축함 등 해군력 중심으로 이루어지고 있으며, 고성능의 무기체계가 탑재되어 있다. 국내에서도 해군력 향상을 위해 많은 예산을 투자하고 있으며, 잠수함 및 구축함의 성능을 향상시키고 척 수를 늘리고 있다. 잠수함 및 구축함의 국내 독자 기술에 의한 건조 시 국

1. Taewon Park, Hongkyu Kim, Sunguk Hong and Inok Shim : Outline of Explosion Bulge Test in Air for Welding Structure, Journal of KWJS, **27-6** (2009), 579-584 (in Korean)
2. MIL-STD-2149A(SH), Standard Procedures for Explosion Bulge Testing Ferrous and Non-ferrous Metallic Materials and Weldments, 1990
3. NATO STANAG 4137(Classified) "Standarg Underwater Explosion Test for Operational SurfaceShip and Crafts"
4. 저합금 고강도강, 용접구조용(PFS강), 국방규격번호 KDS-3001-1 (2002.11.1)



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



- 송영범
- 1967년생
- 국방과학연구소 금속재료팀
- 금속재료/부품 개발
- e-mail : ybsong@add.re.kr



- 김홍규
- 1959년생
- 국방과학연구소 금속재료팀
- 금속재료/부품 개발
- e-mail : hkkim@add.re.kr



- 홍성석
- 1958년생
- 국방과학연구소 금속재료팀
- 금속재료/부품, 소성가공/성형해석
- e-mail : sshong@add.re.kr



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