

잠수함 압력선체의 피로강도에 대한 실험적 연구

김을년^{†*}, 김국빈^{*}, 전재황^{**}

현대중공업 구조연구실^{*}
현대중공업 특수선잠수함설계 2 부^{**}

Experimental Investigations on the Fatigue Strength of the Submarine Pressure Hull

UInyeon Kim^{†*}, Kukbin Kim^{*} and Jaehwang Jeon^{**}

Structure Research Dep't, Hyundai Heavy Industries Co., LTD^{*}
Submarine Design Dep't 2, Hyundai Heavy Industries Co., LTD^{**}

Abstract

Submarine and deep sea diving structures are generally designed based on their ultimate strength. Fatigue strength at welded joint must be also taken into account because working stress is increased due to the increasing of diving depth and using high yield steel. The pressure hulls of submarine are subjected to fluctuating compressive loading. But in addition to the calculated stresses, high residual tensile stresses at welded part have to be considered. The state of stress level of pressure hull is tensile at surface and compressive at deep diving depth. This paper presents the results of an experimental investigation on the crack initiation and growth at the weld toe of T welded joints of HY-100 steel plate under constant amplitude loading. It is also investigated the phenomenon of the fatigue failure and test methods. Fatigue tests have been using real scaled local structural models of full penetration T-welded joint, which is a part of the cylindrical shell structures reinforced by ring stiffeners. Several load ratios under constant amplitude loading are considered in the tests. Crack initiation and growth characteristics are examined based on the beach marks of the cracked section of the test specimens. A design stress-life curve including the design formula is suggested according to tested data.

※Keywords: Fatigue strength(피로강도), Submarine pressure hull(잠수함 압력선체), Experiment(실험), Welded structure(용접구조물), HY-100 steel(HY-100 강), S-N Curve(피로수명선도)

접수일: 2009년 6월 5일, 승인일: 2010년 1월 6일

†교신저자: unkim@hhi.co.kr, 052-202-5553

1. 서론

잠수함 선체구조는 잠항수심 변화에 따라 수압을 받는 압력선체와 받지 않는 비압력선체로 나눌 수 있다. Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 수중에서 해수의 출입이 자유로운 부분을 비압력선체라고 하고 잠항수심에 따라 직접 외압을 받는 부분을 압력선체라 부른다.

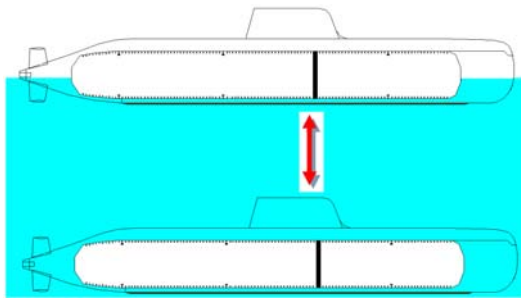


Fig. 1 Pressure hull and non-pressure hull on the submarine

최근 외압을 받는 잠수함 압력선체의 구조설계 경향은 최종강도를 기준으로 수행하고 있으므로 작용응력이 항복응력을 초과하는 것을 허용한다. 또한 잠수함의 운용수심을 증가하기 위하여 고탄복강(High yield steel) 또는 HSLA 강(High strength low alloy steel) 등을 사용하고 있으며 잠수함의 중량 최소화를 위한 최적설계를 수행하는 추세이다. 따라서 압력선체의 구조부재 치수가 기존 잠수함에 비교하여 얇아지는 경향이 있어 사용응력이 증가하고 있다. 특히 모재의 기계적 성질에 의존하지 않는 용접부에서의 높은 응력 발생이 피로강도 측면에서 중요한 점검 항목으로 대두되고 있다.

잠수함은 잠항하게 되면 압력선체가 압축응력 상태에 놓이게 된다. 일반적으로 구조물이 반복되는 압축응력으로 인한 피로파손은 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 잠수함 압력선체는 용접으로 건조되고 링프레임과 외판, 딥프레임(Deep Frame)과 외판, 횡격벽(Diaphragm)과 외판 등이

연결되는 용접부위에서는 건조 후 국부적 인장 잔류응력이 생기게 되며 이러한 인장 잔류응력은 인접부재에 구속력을 야기한다. 따라서 잠수함의 잠항과 수면으로의 부상에 따른 압력선체에 작용하는 변동 압축응력은 인장 잔류응력과 중첩되며 그 결과 균열이 발생하여 진전되어 구조가 손상되는 것으로 알려져 있다. 이 현상은 미국의 Dunham(1964)과 영국의 Kilpatrick(1986)에 의해서 수행한 실험결과에서도 나타난다. 이들 실험에서 균열의 완전진전(Full Penetration)이 압력선체의 붕괴를 일으키는 것은 아닌 것으로 나타났다. 즉, 압력이 해방되었을 때 주로 작은 누수 현상으로만 나타났다. HDW(2001)에 따르면 이런 누수 현상은 초기 2 차대전 때 부식에 민감한 재료로 만들어진 독일의 실제 잠수함에서도 균열의 완전진전이 나타났으며 이로 인하여 운항이 중단되었다. 이 잠수함을 해체하기 전에 균열 발생부위를 간단히 수리 후 대형 압력용기(Pressure Dock)에 넣어 파괴실험을 수행하였다. 붕괴는 균열에 의한 영향을 받지 않는 곳에서 예견된 전체붕괴 모드로 발생하였다. 따라서 압력선체의 균열발생으로 인하여 수상상태에서의 누수(Leakage)현상은 발생할 수 있지만 잠수하면 압축력으로 인하여 균열이 닫혀 누수현상은 사라질 것으로 예상된다.

본 연구에서는 잠수함의 피로파손 발생 메커니즘과 시험방법에 대하여 고찰하였다. 그리고 고탄복강(HY-100)으로 제작된 압력선체의 일부를 절단한 시험모형을 제작하여 피로시험을 수행하였으며 시험결과를 분석하여 피로선도와 피로 설계식을 제시하였다.

2. 압력선체 피로시험 방법 고찰

잠수함 압력선체의 피로시험 방법으로는 소형크기의 전체모델 피로시험법(Test Method 1)과 실제 두께 국부모델 피로시험법(Test Method 2)으로 나눌 수 있다. 소형크기의 전체모델 피로시험법은 Fig. 2 와 같이 압력용기(Pressure Chamber)에 시험모형을 넣고 압축기(Compressor)로 유압을 사용하여 시험을 수행한다. 이 방법의 장점은 시험

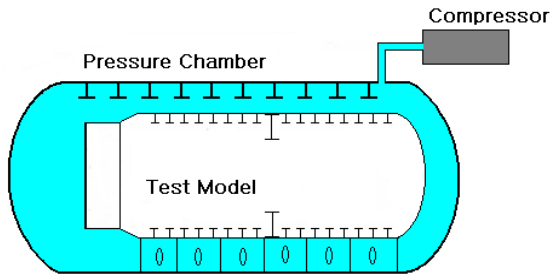


Fig. 2 Test method 1

모델이 실제 형상과 유사하므로 관심부위의 정확한 구조물 거동구현이 가능하다. 그러나 시험에 드는 시간과 비용이 많아 소수의 모형 시험만 가능하고 압력용기의 크기제한으로 소형의 모형 시험만 가능하다. 따라서 실제 잠수함 압력선체의 치수보다 작은 치수로 시험모델을 제작하므로 시험 후 치수효과가 고려되어야 하며 시험 경비 문제로 소수의 모델에 대하여 수행하기 때문에 시험 결과를 통계적으로 처리하기 위한 충분한 자료 확보가 어렵다.

또 다른 시험방법으로 Fig. 3 과 같이 실제 잠수함의 압력선체 일부를 절단한 국부모델을 사용하여 실제 응력상태와 유사하게 이상화하여 하중기로 시험하는 것이다. 이 방법은 실제 잠수함의 압력선체 치수를 가지는 시험모델에 대하여 적은 비용과 시간으로 충분히 많은 시험을 수행할 수 있으므로 신뢰성 있는 데이터 분석이 가능하다. 그러나 관심부위에서 압력선체의 실제 거동을 구현하기 힘들어 시험모델의 이상화가 요구된다. 본 연구에서는 두번째 방법인 실제두께 국부모델 시험을 채택하였다.

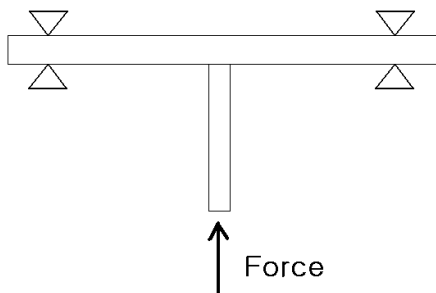


Fig. 3 Test method 2

잠수함 압력선체는 원환 보강 원통으로 외판과 링프레임 또는 외판과 뿔프레임 등을 용접하여 제작되므로 Fig. 4 와 같이 용접에 기인한 수축(Shrinkage) 현상과 잔류응력이 발생한다. 압력선체의 실린더부에서 균열발생은 일반적으로 외판(Shell) 용접부의 끝단에서 발생하여 외판을 관통하며 전파되는 것으로 알려져 있다.

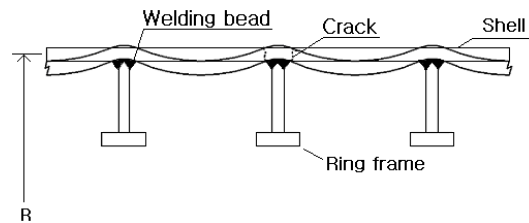


Fig. 4 Welding shrinkage and crack propagation

Fig. 5 는 용접 건조시 외판과 링프레임의 용접부에서 발생하는 잔류응력의 분포를 나타낸 것이다. 용접에 의한 잔류응력과 수축현상에 의해 유발된 굽힘응력이 중첩되어 오른쪽 그림과 같은 잔류응력 분포를 나타내게 된다.

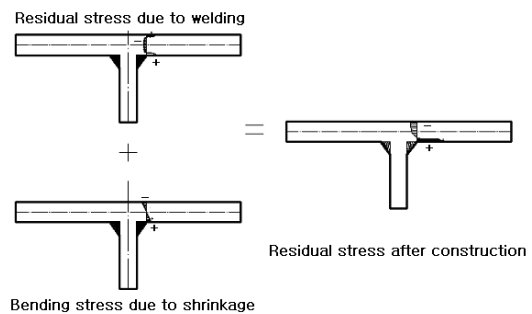


Fig. 5 Residual stress after pressure hull construction

피로시험을 수행할 때 Fig. 5 의 수축현상에 기인한 굽힘응력을 고려해야 한다. 즉, 압력선체로부터 피로시험용 단위 모델로 만들기 위하여 절단하면 왼쪽의 아래 그림에 나타난 수축변형으로 발생한 굽힘모멘트가 해방(Release)된다. 따라서 피로

시험 하중에 이러한 굽힘응력을 유발할 수 있는 초기하중을 포함하여야 한다

Fig. 6 은 잠수함이 잠항(Diving)하였을 때 발생하는 굽힘응력을 나타낸 것이다. 수중에서는 압력 선체의 원주방향에 수직인 길이방향으로는 압축응력과 굽힘응력이 나타나며 잠항 깊이가 증가함에 따라 응력도 증가하게 된다.

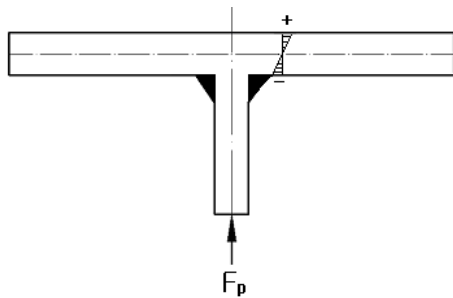


Fig. 6 Working stress due to diving depth change

따라서 본 연구에서는 압력선체에서 단위 시험 모델로 절단하면서 해방된 굽힘응력(+값)을 고려하기 위하여 일정크기의 초기하중(Pre-load)을 작용시킨 상태에서 잠항시 발생하는 굽힘응력(-값)에 해당하는 변동하중을 작용시키며 시험을 수행하였다.

실제 잠수함의 경우 반복하중에 의하여 균열 발생하기 전까지는 잔류응력이 내부에 존재할 것으로 추정되며 균열발생 이후에는 잔류응력이 사라질 것이다. 그러나 본 시험에서는 일정크기의 초기하중(Pre-load)을 시험모델의 균열이 진전되어 완전히 손상될 때까지 작용하였다. 따라서 본 시험 결과는 실제 잠수함에 나타나는 현상보다 피로 수명이 짧게 나타날 것으로 추정된다. 본 시험에서 균열이 발생한 이후에 인장응력을 제거하고 압축응력으로만 시험한 결과가 그렇지 않은 다른 시험보다 피로수명이 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 본 시험결과를 기초로 도출한 피로수명곡선은 보수적 측면에서 작성되었다고 할 수 있다.

수중에서 이동할 때 축전지(Battery)를 사용하는 재래식 잠수함의 잠항횟수는 사용수명

(Operational Life Time)을 30 년으로 고려하고 연간 3/4 정도 작전을 수행하며 1 일에 1 번씩 작전 운용 수심까지 잠항하였다가 축전지 충전을 위하여 수상으로 부상한다고 가정하면 8200 여회 정도이다. 또한 공기불요장치 추진 시스템(Air Independent Propulsion System)을 탑재한 재래식 잠수함의 잠항횟수는 이보다 짧을 것으로 추정된다. 따라서, 재래식 잠수함의 압력선체 피로강도 평가를 위한 잠항수심까지의 반복횟수는 수천~수만회 정도이며 본 연구에서는 이 영역에 대한 시험을 집중적으로 수행하였다.

3. 피로시험 방법 및 시험 결과

3.1 피로시험 모델

본 연구에서 사용한 피로시험 모델은 실제 압력 선체에서 사용하는 재질인 HY-100 강을 사용하였으며 재료의 기계적 특성치는 Table 1 과 같다.

Table 1 Characteristic properties of HY-100 steel

Young's modulus(MPa)	206,000
Poisson's ratio	0.3
Yield stress(MPa)	685
Tensile strength(MPa)	760

시험모델은 미국용접학회의 표준규격(AWS Standard)으로 SMAW (Shielded Metal Arc Welding) 절차에 의해 완전용입 용접(Full Penetration Welding)으로 만들었으며 용접부의 그라인딩은 하지 않았다. 2 가지 종류의 총 20 개의 시험모델(Model I : 5 개, Model II : 15 개)을 제작하였으며 Fig. 7 은 시험모델의 형상과 상세 치수를 나타낸 것이다.

Fig. 8 은 용접순서(Welding Sequence)와 균열이 성장한 후에 찍은 마크로 사진을 나타낸 것이다.

Fig. 9 는 시험모델을 설치하여 피로시험을 수행하는 모습을 보여주고 있으며 시험모델의 지지부

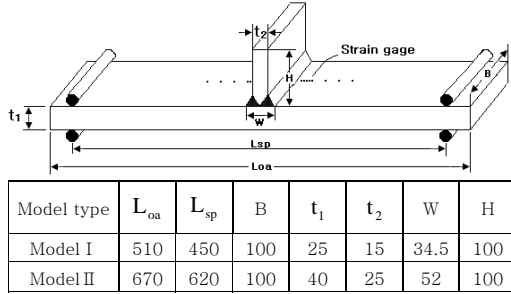


Fig. 7 Dimension of test model

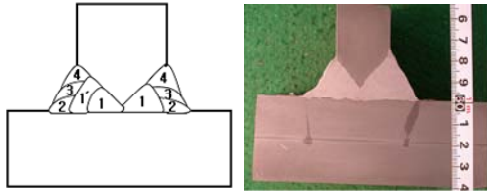


Fig. 8 Welding sequence and macro picture

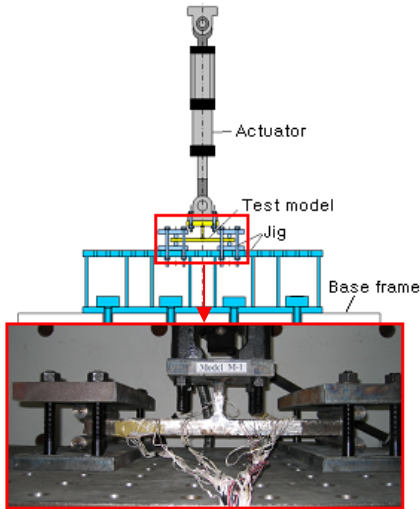


Fig. 9 An overall picture of the test set-up

는 원환봉을 설치하여 단순지지 조건을 구현하였다.

본 연구에서는 수압을 받는 압력선체의 거동을 생각하여 하중제어로 시험을 수행하였다. 피로 균열은 하중제어가 변위제어보다 빨리 진전되며

Frantza(1997)는 하중제어 시험이 변위제어 시험보다 피로수명이 1/3 배임을 확인하였다.

3.2 피로시험 조건

Fig. 4와 5에서 설명한 바와 같이 원환 보강원통을 용접으로 제작시 수축변형(Shrinkage)이 발생한다. 그러나 본 연구의 시험모델과 같이 절단하면 수축변형에 의한 굽힘응력이 해방(Release)되므로 해방되는 굽힘응력 분포를 파악하여 이를 시험하중으로 고려해야 한다. Frantza(1997)의 시험결과에 따르면 해방되는 굽힘응력은 용접 토우부에서 인장응력(σ_{inner})이 259MPa 이고 하부에서 압축응력(σ_{outer})이 -205MPa 이며 따라서 식(1)과 같이 평균 굽힘응력(σ_b)을 구할 수 있다.

$$\sigma_b = \frac{\sigma_{inner} - \sigma_{outer}}{2} = 232\text{MPa} \quad (1)$$

본 연구에서는 굽힘응력(σ_b)을 단면 계수(Z)를 고려하여 식(2)와 같이 초기하중($F_{preload}$)을 구하였다.

$$F_{preload} = 2 \frac{Z \cdot \sigma_b}{L} \quad (2)$$

여기서, $Z = \frac{Bt_1^2}{6}$

$$L = \frac{(L_{sp} - w)}{2}$$

잠항 깊이에 따른 하중(F_p)에 의한 작용 응력범위(Stress Range, $\Delta\sigma$), 응력비(Stress Ratio, R), 평균응력(Mean Stress, σ_{mean})은 각각 식(3)~(5)와 같이 얻을 수 있으며 계산결과는 Table 2와 3에 정리하였다

$$\Delta\sigma = \frac{F_p \cdot L}{2 \cdot Z} \quad (3)$$

$$R = \frac{F_{preload} - F_p}{F_{preload}} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{mean}} = \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2} \quad (5)$$

여기서 σ_{max} 과 σ_{min} 은 각각 최대응력과 최소응력으로 식(6)과 (7)로 된다.

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{\Delta\sigma}{1-R} \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{min}} = \sigma_{\text{max}} - \Delta\sigma \quad (7)$$

Table 2 Test condition and results for Model I

Model	R	$\Delta\sigma$ (MPa)	σ_{mean} (MPa)	N_{i-1} ($\times 100$)	N_{i-2} ($\times 100$)	N_f ($\times 100$)
S-1	-1.0	485	0	110	430	715
S-2	-1.0	485	0	46	245	667
S-3	-0.5	362	61	230	880	1,176
S-4	-0.5	362	61	630	1,364	2,247
S-5	0.0	242	121	456	2,190	2,995

Table 3 Test condition and results for Model II

Model	R	$\Delta\sigma$ (MPa)	σ_{mean} (MPa)	N_{i-1} ($\times 100$)	N_{i-2} ($\times 100$)	N_f ($\times 100$)
M-1	-2.0	717	-119	36	67	602
M-2	-1.5	597	-60	59	102	590
M-3	-1.0	478	0	154	475	903
M-4	-1.0	478	0	100	310	725
M-5	-1.0	478	0	115	339	658
M-6	-1.0 ~ ∞	478 ~ 239	0 ~ -119	222	2,490	3,558
M-7	-0.4	334	72	312	900	1,435
M-8	-0.4	334	72	225	650	1,056
M-9	0.0	239	120	940	1,710	2,607
M-10	0.0	239	120	678	1,267	1,988
M-11	0.2	191	143	980	1,915	3,517
M-12	0.2	191	143	1,128	2,300	3,975
M-13	0.2 ~ 0.5	191 ~ 598	143 ~ -60	43	210	603
M-14	0.5	119	179	435	6,900	11,940
M-15	0.5	119	179	9,286	15,820	19,507

3.3 시험결과

피로시험을 수행하기 전에 정적시험을 수행하여 시험모델의 응력분포를 유한요소해석과 비교하였다. 시험모델의 용접 토우부에서 4mm 떨어진 위치로부터 응력집중게이지(2mm 간격으로 5 개의 변형을 게이지)를 시험모델 좌우에 각각 1 개씩 부착하였고 공칭응력을 구하기 위해 부착된 응력 집중게이지로부터 40mm 간격으로 게이지를 시험모델의 좌우에 3 개를 부착하였다. 시험모델의 시험 모델 하부면에는 길이방향으로 중앙으로부터 20mm 또는 40mm 간격으로 총 5 개의 게이지를 부착하였다. Fig. 10 은 예비테스트 모델의 정적시험에서 나타난 응력분포를 나타낸 것으로 유한요소해석과 비교한 것이다.

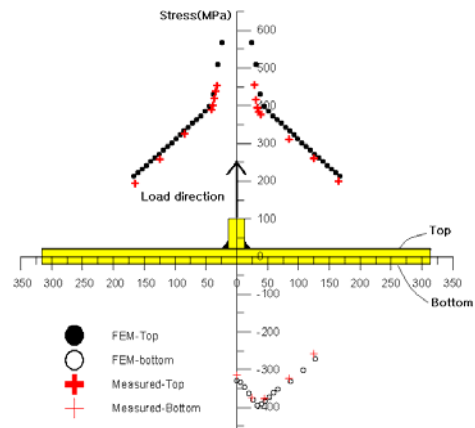


Fig. 10 Comparison of stresses between experiment and FEA

피로시험은 MTS 사의 피로 25 톤 유압하중기를 사용하여 응력비를 $-2 \sim \infty$ 의 범위에서 일정진폭 하중(constant amplitude loading)으로 공기 중에서 1~5Hz 주파수로 수행하였다.

피로수명(Fracture fatigue life, N_f)은 균열발생 수명(Crack initiation life, N_{i-1} 또는 N_{i-2})과 균열전파 수명(Crack propagation life, N_p)의 합으로 정의된다. 본 연구에서는 N_{i-1} 를 표면균열 길이가 8mm 발생했을 때, N_{i-2} 를 표면균열 길이가 80mm 발생했을 때, N_f 를 최대 균열깊이가 외판

두께의 67%에 도달하였을 때로 정의하였다.

Fig. 11 은 M-9 시험모델의 파단면을 나타낸 것이다. 균열 진전은 비치마크(Beach mark)를 실시하여 확인하였고 용접토우에 있는 미세한 크랙에서 시작하였다. 균열의 성장 메커니즘을 살펴보면 Step A 단계에서는 균열이 단면 곳곳에서 동시에 발생하였고 균열의 종횡비는 작은 값을 가짐을 알 수가 있다. Step B 단계에서는 Step A 에서 발생한 균열들이 성장하여 서로 합쳐지며 균열 진전속도가 빨라진다. Step C 단계에서는 한 개로 합쳐진 균열이 두께방향으로 큰 종횡비를 가지며 성장하여 마침내 Step D 단계에서 외판의 파손이 일어나며 시험을 종료하였다.

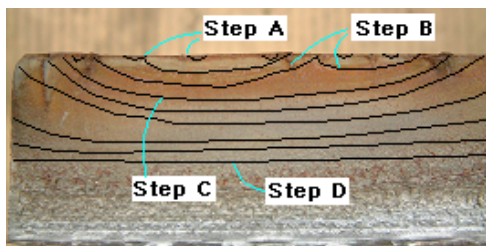


Fig. 11 Crack shape development (Model M-9)

Fig. 12 는 M-10 과 M-15 의 비치마크를 나타낸 것이다.



(a) Model M-10



(b) Model M-15

Fig. 12 Beach marks

4. 피로 설계식 도출과 설계선도 비교

4.1 설계식 도출

이상의 피로시험 결과로부터 잠수함 압력선체 피로 설계식을 제안한다. 설계식은 AD Merkblatt S2(1998)의 피로설계식을 기초로 파손확률 2.3%(Mean-2SD)를 기준으로 개발하였다.

참고로 AD-S2 선도(1998)는 독일의 산업용 압력용기 설계를 위한 피로수명곡선으로 압력용기내의 가스유출로부터 사고를 방지하기 위하여 보다 엄격하게 균열발생을 방지할 목적으로 0.01% 파손확률 기준으로 피로강도를 평가한다. 본 연구 결과로부터 허용응력 영역을 계산하는 피로강도 설계식은 식(8)과 같다.

$$\Delta\sigma_{allow} = 1.51 \cdot f_d \left[\frac{7.53 \cdot 10^{11}}{N} \right]^{\frac{1}{3}} - 124 \quad (8)$$

----- $N < 5.2 \times 10^4 f_d^3$

$$\Delta\sigma_{allow} = 1.12 \cdot f_d \left[\frac{7.53 \cdot 10^{11}}{N} \right]^{\frac{1}{3}} - 29$$

----- $N \geq 5.2 \times 10^4 f_d^3$

여기서, $f_d = F_d^{\frac{\log(N)-2}{4.301}}$

$$F_d = \left(\frac{25}{t_1} \right)^{\frac{1}{4}}$$

N : 설계 반복수명

t₁ : 외판의 두께

4.2 설계식들의 비교

본 연구에서 제안하는 피로 설계 선도를 시험결과와 비교하였으며 Fig. 13 과 같다. 여기서, 시험과 결과는 N_{i-2}, N_f 상태에 대한 외판두께 t₁ 이 25mm, 40mm 일 때이다.

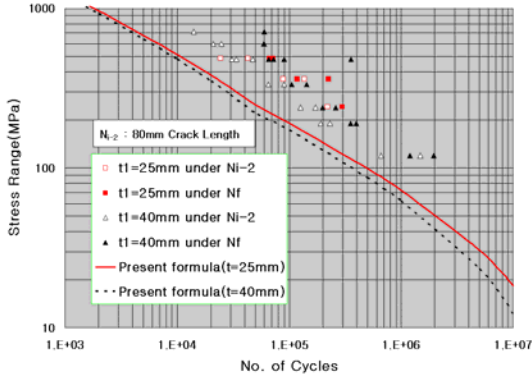


Fig. 13 S-N curves using by present design formula

Fig. 14 는 잠수함의 압력선체 또는 압력용기의 피로강도 설계를 위하여 사용되는 피로수명곡선 (S-N Curve)을 비교한 것이다. AD-S2 선도는 2.3% 파손확률 기준을 나타내었다. 본 연구에서 수행한 시험결과 중 외판두께가 40mm 인 것 25mm 로 환산하였으며 Franitza(1997)가 수행한 결과를 함께 표시하였다.

Table 4 는 각 피로 설계식으로부터 계산된 허용응력값을 비교한 것이다. 본 연구에서 제시한 설계식에 의한 결과는 HDW 사의 기준과 비교적 잘 일치하나 잠수함의 실제 사용수명 범위내에서 약간 큰 허용응력값을 나타낸다.

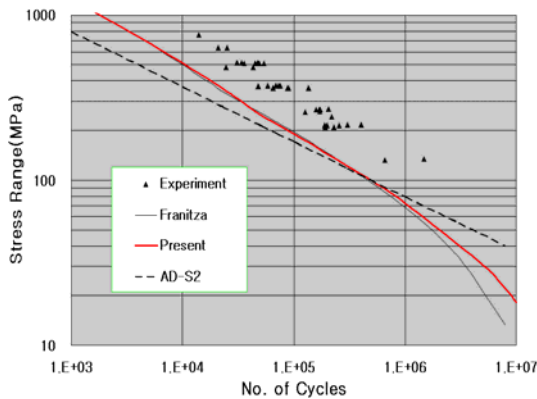


Fig. 14 Comparison of fatigue design curves

Table 4 Comparison of allowable stress obtained by present, AD-S2 and Franitza ($t_1 \leq 25mm$)

	$\Delta\sigma_{allow}$ (MPa)		
	$N = 10^4$	$N = 2 \times 10^4$	$N = 3 \times 10^4$
AD-S2	368	292	255
Franitza	502	368	302
Present	514	382	318

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 잠수함의 피로파손 발생 메커니즘, 최근의 잠수함 건조경향에 따른 연구의 필요성, 시험방법 등에 대하여 논의하였다. 또한 실제 두께 국부 시험모델을 고향복강인 HY-100 으로 제작하여 용접 잔류응력과 잠항깊이에 따른 응력을 고려하여 하중기로 피로시험을 수행하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 잠수함 피로강도 시험방법으로는 실제두께의 국부모델 시험이 적은 비용과 시간으로 충분히 많은 시험을 수행할 수 있어 효과적이라 할 수 있다.
- 잠수함의 피로파손은 건조과정에서 발생하는 축형상과 용접잔류응력이 내재된 상태에서 잠항수심의 변화에 따른 굽힘응력이 작용하여 발생하는 것으로 사료된다.
- HY-100 강으로 만들어진 T형의 용접 시험모델을 총 20 개 제작하였으며 평균응력과 응력비, 응력범위를 고려하여 시험을 수행하며 균열발생과 전파를 조사하였다.
- 시험결과로부터 잠수함의 피로강도 평가를 위한 설계식을 제시하였으며 이를 기존 설계식 또는 시험결과와 비교하였다.
- 본 연구에서 제시한 피로강도 설계식에 의한 허용응력은 재래식 잠수함 요구하는 수명(Cycle 수)에서 Franitza(1997)의 설계식에 의한 값보다 약간 크게 나타났다.

참 고 문 헌

- AD Merkblatt S2, 1998, Analysis for cyclic loading.
- Dunham, F.W., 1964, "Fatigue Testing of Large-Scale Models of Submarine Structural Details", New England Section, SNAME.
- Franitza S., 1997, Fatigue Examinations of Specimens Made of HY-100, IKL Report 101-299/80/1041-02-00-00.
- HDW, 2001, KSS-II Design Lectures, Hull Structure Design, A.2 Design Guideline for Hull Structure - Fatigue Strength, Kiel, Germany.

- Kilpatrick, I.M., 1986, The Fatigue Characteristics of Submarine Structures Subjected to External Pressure Cycling, Advances in Marine Structure, ARE, Dunfermline, Scotland.



< 김을년 >



< 김국빈 >



< 전재황 >