



Received: 2019/10/08  
Revised: 2019/12/20  
Accepted: 2020/01/17  
Published: 2020/03/20

**\*Corresponding Author:**

**Donghoon Kim**

E-mail: brandon.kim.navy@gmail.com

# \*\*\*\* 잠수함 구조해치구역 검사인증체계 및 유한요소해석에 관한 연구

**Abstract**

구조해치구역에 대한 대한민국해군이 실시 중인 검사 및 인증체계에 대하여 소개를 하였다. 또한 유한요소해석 결과를 통해 잠수함 구조 심도에서도 DSRV 및 PRM과 안전하게 접합이 가능한 것을 알 수 있었다. 하지만 시간이 흐름에 따라 두께가 얇아지는 상황을 고려하여 추가적인 유한요소해석을 실시했다. 그 결과, 설계기준치인 16 mm에 비해 15 mm로 접합부위가 얇아졌을 때 심해구조정과 접합은 무리 없을 것으로 판단되었다.

The ROK Navy inspection and certification system for the submarine rescue hatch area was introduced. In addition, the finite element analysis results show that it can be safely mated with DSRV and PRM even in the certain submarine depth. Additional finite element analysis, which took the thinning of the hatch area over time into account, was performed. These analyses showed that, when the joint area was reduced to 15 mm from the design standard 16 mm, the DSRV and submarine can still mate each other safely.

**Keywords**

Submarine Rescue Hatch Area (잠수함 구조해치 구역),  
Submarine Rescue Hatch Area Inspection & Certification  
(잠수함 해치 접합면 두께 및 해치 구조물에 대한  
한국해군의 검사인증 체계),  
Finite Elements Analysis (유한요소해석)

본 논문은 해군과학기술학회 2019년 추계학술대회 발표논문을 기반으로 작성되었습니다.

## A Study on the Submarine Rescue Hatch Area Inspection/ Certification(SRIC) and Its Finite Elements Analysis

**김동훈\*, 이상주, 김효철, 이광호**

대한민국 해군 잠수함사령부

**Donghoon Kim\*, Sangju Lee, Hyocheol Kim, Kwangho Lee**

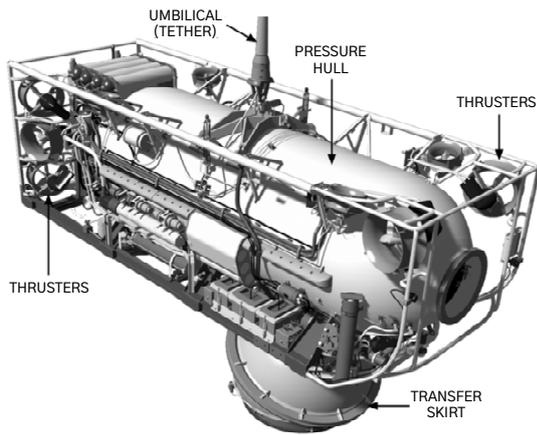
Submarine Force Command, Republic of Korea Navy

### 1. 서론

수중에서 임무중인 잠수함이 피격, 암초 접촉 등으로 추진력 및 부력을 상실하여, 더 이상의 임무행이 불가할 때에 대비한 최후의 수단으로 승조원 생명을 보호하기 위해 승조원들을 함 외로 구조해야 한다. 천해에서의 구조는 탈출복을 착용 후 직접 탈출하는 방법이 있으나 심해에서 함 내의 승조원을 구조하기 위한 최선의 방법은 Figs. 1-3과 같은 심해잠수구조정(DSRV: Deep Submergence Rescue Vehicle, PRM: Pressurized Rescue Module)이나 잠수함 구조챔버(SRC: Submarine Rescue Chamber)를 이용하는 것이다.



**Fig. 1.** Deep Submergence Rescue Vehicle (DSRV)



**Fig. 2.** Pressurized Rescue Module (PRM)



**Fig. 3.** Submarine Rescue Chamber (SRC)

DSRV나 PRM를 이용할 경우 잠수함 내의 승조원이 외부 수압에 노출되지 않게 함으로써 잠수병 등 신체손상을 최소화할 수 있기 때문이다. 심해잠수구조정을 이용하여 잠수함 내 승조원을 안전하게 구조하기 위해서는 심해잠수구조정의 구조용 해치와 잠수함 탈출용 해치가 완벽하게 접합되어야 하고, 이때 하부에 있는 잠수함의 탈출용 해치는 심해잠수구조정의 하중과 좌초된 잠수함의 심도에 해당하는 수압에 대해 충분한 응력을 보장해야 한다. 이러한 상황에 대비하기 위해서 과거부터 정비창과 잠수함 수리창을 중심으로 많은 노력이 있어 왔다. 하지만 이러한 검사는 국제적으로 인정되는 인증(certification)으로 이어지지 못했다. 이러한 현실태를 인식한 저자는 2019년 2월 미국 샌디

에이코에서 열린 아시아-태평양 잠수함회의(APSC: Asia-Pacific Submarine Committee)에서 우리 해군의 잠수함 구조해치 구역 검사 및 인증능력을 설명했고 많은 나라와 공감대를 형성할 수 있었다.

이러한 노력의 결과로 심해잠수구조정과 잠수함 해치 접합면 두께 및 해치 구조물에 대한 한국해군의 검사인증 체계(Submarine Rescue Hatch Area Inspection & Certification)를 정립할 수 있었고, 검사결과 및 실측치에 대한 유한요소 해석(finite element analysis)을 통해 잠수함의 탈출 수단을 안정적으로 운용할 수 있는 기준을 마련할 수 있었다. 이 연구는 대한민국 해군 정비창과 잠수함 수리창 그리고 저자 모두의 노력에 관한 이야기이다.

## 2. 잠수함 구조해치구역 검사 및 인증 체계

잠수함과 심해잠수구조정 간 완벽한 접합을 보장하기 위해 구조해치구역(Fig. 4)에 대한 검사인증(Submarine Rescue Hatch Area Inspection & Certification/SRIC)은 필수 고려요소이다. 과거 \*\*\*\* 잠수함 도입 이후, 해군 자체적으로 제한적인 접합면에 대한 검사는 시행되었으나 구조해치 구역에 대한 전반적인 검사 및 인증은 이루어지지 않았다. 그러나 인도주의적 차원에서 시행 중인 국제 잠수함 구조 훈련(Pacific-Reach 등) 같은 외국군 심해잠수구조정과 접합 훈련을 실시하기 위해서는 구조해치구역에 대한 공신력 있는 인증이 필요하게 되었다. 이후 美 해군체계사령부(NAVSEA: Naval Sea Systems Command)에서 작성 및 적용 중이고 또한 각국에서 국제기준으로 사용하고 있는 국제 잠수함 구조 요구사항 및 훈련 지침서 “International Submarine Rescue Requirements and Instruction Manual for Mating with U.S. Navy Rescue Assets (NAVSEA SS700-AA-INS-010.s)”을 기준으로 한국 해군 잠수함 구조해치구역에 대한 검사를 실시하였으며, 2019년 이후 자체 기준을 기반으로 구조해치 접합구역에 대하여 인증을 시행 중이다.

해군 정비창과 잠수함수리창 주관으로 실시되는 검사 및 인증은 약 2주 동안 진행되며 해군 구조해치구역 정비 및 검사절차서를 기준으로 실시한다. 검사종류는 DSRV 및 PRM의 경우 총 9종목으로 실시되고 SRC의 경우 해치베일(hatchbail) 인장력 검사가 추가된다. 모든 검사는 ASNT Level II(American Society for Nondestructive Testing) 자격보유자들을 통해 이루어지고 최종적으로 안전감찰실과 ASNT Level III 보유자에 의해 인증된다.



Fig. 4. Submarine Rescue Hatch Area Inspection & Certification (SRIC) procedure

세부적인 검사 및 인증항목과 그에 대한 검사내용은 다음과 같다. ① 잠수함 구조해치 구조물의 내부 및 외부에 결함이나 부식이 있는지 육안검사(visual check up)를 실시하고, ② 해치 접합면을 지지하는 수직 및 수평 지지물에 대한 두께를 측정한다. ③ 또한 접합면의 도장에 대한 표면 거칠기(surface roughness)를 검사하고 ④ 심해잠수구조정의 접합을 위한 접합면에 대한 결함(defects, 깊이, 위치, 길이 등)을 측정한다. ⑤ 접합면에 대한 굴곡 여부를 확인하기 위한 접합면 평편도 검사(surface flatness)를 하고 ⑥ 접합면의 두께감소 여부를 확인하기 위한 접합면 두께를 측정한다. ⑦ 또한 실린더 트렁크의 두께 감소여부를 확인하기 위한 검사를 실시한다. ⑧ 마지막으로 구조해치의 개방 시간섭여부를 확인하기 위한 해치개방간섭검사와 해치 트렁크의 진원도(circularity)를 측정한다. 잠수함 구조해치구역에 대한 실제 작업절차는 Fig. 5에 열거하였다. 잠수함 구조해치구역 검사절차서를 기준을 실제 진행된 검사결과를 Fig. 6와 같이 작성 후 대상함 측에 제공된다.

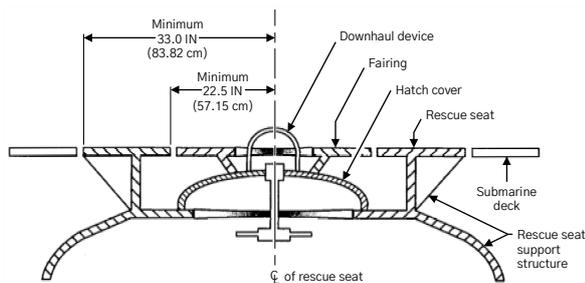


Fig. 5. Boundary of the submarine rescue hatch area

구조해치 접합구역 검사 보고서 (INSPECTION REPORT OF THE MATING SEAT AREA)			
측정명 (MEAS. NAME)	접합면 표면 거칠기 측정(RESCUE SEAT SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENTS)		
잠수함 (Submarine Information)	함명명 (NAME)	함번호 (Hull Number)	트렁크 (Trunk)
장비 (Equipment Information)	계측기 (Meter)	모델명 (Model)	시리얼번호 (Serial No.)
	INSPEX	IPX-104	교정일 (Calibration Due Date)
[ 기준치 (Tolerance Limit) : 6.35미리 (Below) ]			
측정위치 (Location)	표면거칠기 (Profilometer Surface Roughness)		
	측정결과 1 (Measurement 1)	측정결과 2 (Measurement 2)	측정결과 3 (Measurement 3)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
사용단위: (Measurements are recorded in units of) μm			
검사자 (Inspector):	서명 (Signature):	일자 (Date):	
승인자 (Approval):	서명 (Signature):	일자 (Date):	Page 1/1

Fig. 6. Submarine rescue hatch area inspection result (surface roughness)

### 3. 잠수함 구조해치구역 유한요소해석 (FEA: Finite Elements Analysis)

상기 서술한 바와 같이 한국해군은 성숙된 수준의 잠수함 구조해치에 대한 검사 및 인증 제도를 통해 침몰과 같은 위험한 상황이 도래했을 때 안전한 탈출할 수 있는 기반을 마련했다. 하지만 잠수함 구조해치의 구조적(structural)인 부분에서 심해잠수구조정의 접합면이나 트렁크의 두께가 부식이나 결함에 의해 설계치보다 줄어들었을 때 심해잠수구조정의 접합이 가능한지, 심해잠수구조정과 해당심도 해수의 중량을 버틸 수 있는지에 대한 판단은 실제적으

로 어렵다. 이러한 판단에 대한 근거를 마련하기 위해 잠수함 구조해치구역에 대한 유한요소해석은 필수적이라고 할 수 있다.

잠수함 구조해치구역에 대한 유한요소해석을 위해 해당 구역에 대한 3D 모델링을 실시했다. \*\*\*\* 잠수함 구조해치 도면을 기반으로 솔리드웍스(Solidworks 2019)를 사용하여 모델링을 진행했으며 용접부위에 대한 기준 치수는 0.3 mm 공차를 적용했다. 모델링 결과는 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

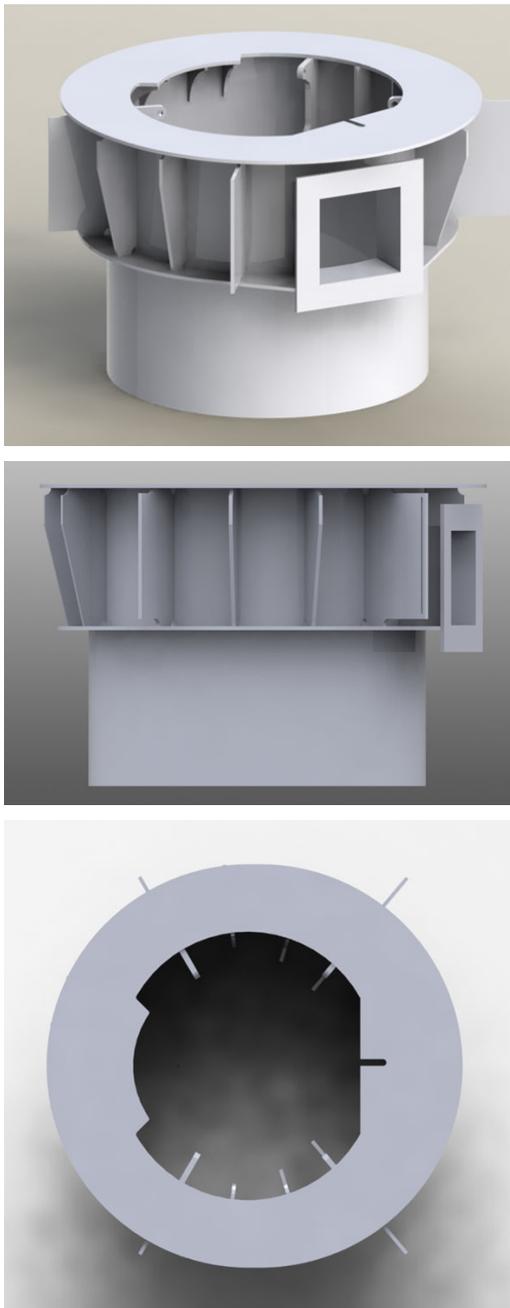


Fig. 7. Submarine rescue hatch area (3D modeling)

삼차원 모델링된 잠수함 구조해치구역을 기반으로 ANSYS 2019를 사용하여 유한요소해석을 진행했다. 단위는 메트릭(mm, kg, N, s)을 사용했고, 구조는 Solidworks로 작성된 Fig. 7의 구조해치구역을 적용했다. 해석 코드는 ANSYS 2019 R1을 사용했다. 해석경계는 원점을 기준으로 x, y, z, 각각 1,830 mm, 1,245 mm, 1,780 mm이고 해석된 부피는 1.3479e+9 mm<sup>3</sup>이다. 구조해치에 적용된 금속은 HY-80강이고 총 해석중량은 1,044.1 kg이다. 해석을 위한 메쉬(mesh)는 사면체(tetrahedral)와 육면체(hexahedral)가 최적 메쉬(optimized adaptive mesh)를 적용했고 42,723노드가 모델링되었다.

Fig. 8에서 잠수함 구조해치구역에 대한 메쉬를 적용한 결과를 확인할 수 있다. 또한 해석코드에 입력된 구조해치 구역의 금속은 실제 HY-80강의 물리적 특성을 적용했다.

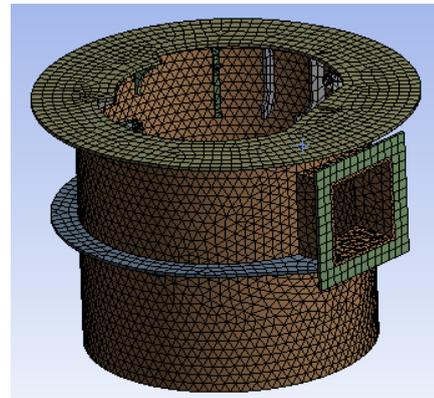


Fig. 8. Submarine rescue hatch area mesh

Figs. 9-12는 기존 설계에 반영된 설계치를 기준으로 잠수함 구조해치구역을 정적구조(static structural) 기반 유한요소해석을 실시한 결과를 보여준다. 관련 설계치 기준은 다음 Table 1과 같다. 이 때, 구조해치구역 상부 접합면에 가해진 부하(load)는 美 해군체계사령부 관련 기준을 사용했다. 이 기준은 일반적인 각국의 잠수함 \*\*심도에서의 해수의 부하와 PRM의 부하를 합한 수치이며, 본 연구 시 총 부하는 70,000 lbf-m(311,375 N·m)를 적용했다.

Table 1. Submarine rescue hatch area design criteria

검사항목	설계기준
지지물 두께	16.0 mm 이상
접합면 표면결함	0.15 mm 이하
접합면 평편도 검사	0.8 mm 이하
접합면 두께측정	16.0 mm 이상
트렁크 실린더 두께 측정	16.0 mm 이상

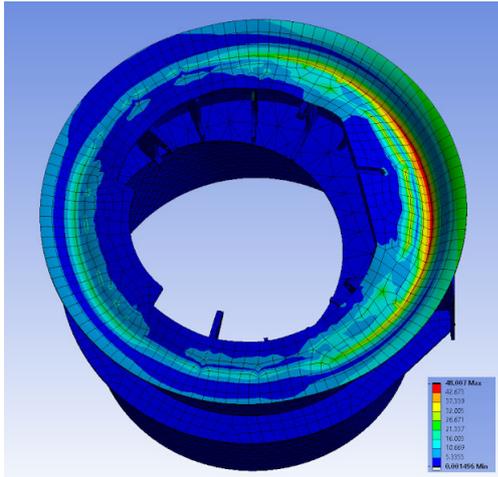


Fig. 9. Submarine rescue hatch area mesh

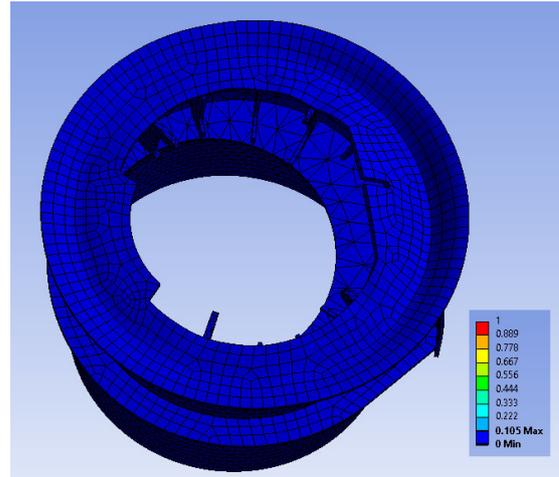


Fig. 10. Submarine rescue hatch area mesh

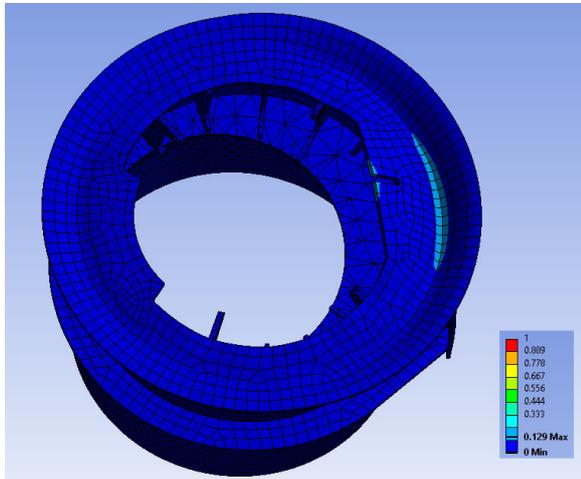


Fig. 11. Submarine rescue hatch area mesh

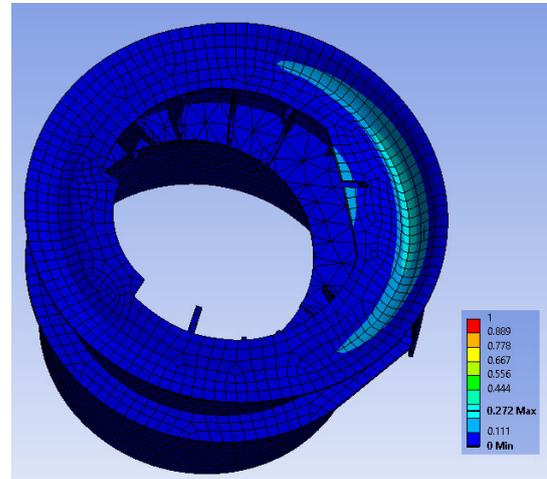


Fig. 12. Submarine rescue hatch area mesh

Figs. 10-12에서 알 수 있듯이 접합부위에 대한 변형도는 접합부위 두께에 따라 0.272 mm - 0.105 mm의 변형분포를 보이고 있다. 당연하게도 접합부위 두께가 얇아질수록 변형도가 커지고 있으며 접합부위 두께에 대한 변화율과 추세선식은 Fig. 13과 식 (1)과 같다.

$$y = 1.3504e^{-0.163x} \tag{1}$$

식 (1)에서  $x$ 는 구조해치 구역 접합부의 두께[mm]이고  $y$ 는 해당 접합부위의 변형도[mm]를 보여주고  $R^2$ 값은 0.9841이다.

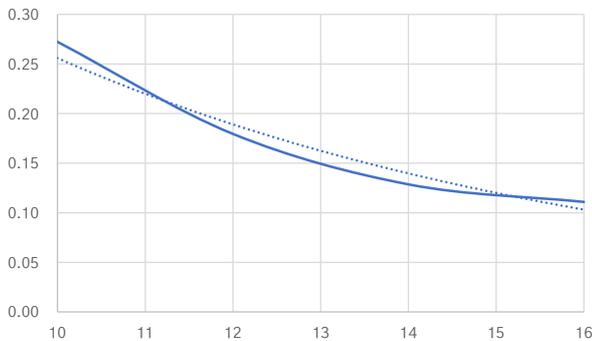


Fig. 13. Submarine rescue hatch area deformation plot

#### 4. 결론

구조해치구역에 대한 대한민국해군이 실시 중인 검사 및 인증체계에 대하여 소개를 하였다. 또한 유한요소해석 결과를 통해 최초 설계 상(16 mm) 구조해치구역은 가장 가혹한 상황인 잠수함 \*\*심도에서도 DSRV 및 PRM과 안전하게 접합이 가능한 것을 알 수 있었다. 하지만 구조해치구역의 수치는 설계 수치와 다르기 때문에 실측수치에 대한 해

석을 두께가 얇아지는 상황을 고려하여 추가적으로 실시했다. 설계치 두께인 16 mm에서 최대 0.105 mm의 변형률을 보인 것을 기준으로 15 mm에서 최대 0.113 mm 변형률을 판단해보면 최대 0.008 mm 변형 차이가 심해잠수구조정과 접합이 불가하다는 판단은 하기 힘들다. 다시 말해서 설계기준치인 16 mm에 비해 15 mm로 접합부위가 얇아졌을 때 심해구조정과 접합은 무리없을 것으로 판단된다. 최대 0.008 mm 변형 차이는 구조정측 접합부의 고무부분의 압축률(10 cm → 5 cm)을 고려할 때 충분히 감수할 수 있는 수치이기 때문이다.

이후 연구방향은 현재 \*\*\*\* 잠수함 구조해치구역에 대해서만 해석 및 분석했기 때문에 \*\*\*\* 잠수함의 구조해치 구역에 대한 해석을 같은 방식으로 실시할 예정이다.

## 감사의 글

오랜 기간 관련 구조해치 구역에 대한 검사 및 인증체계에 묵묵히 기여하고 계신 대한민국 해군정비창과 잠수함수리창 요원과 함정승조원의 희생과 노력에 진심으로 감사드립니다. 또한 이러한 연구를 허락해 주신 해군 함정(기관) 예하 선후배, 동기 분들께 감사의 말씀을 전합니다.

## 참고문헌

[1] Naval Sea System Command, "INTERNATIONAL SUBMARINE RESCUE REQUIREMENTS AND INSTRUCTION MANUAL FOR MATING WITH U.S. NAVY RESCUE ASSETS," NAVSEA SS700-AA-INS-010.