***급 잠수함 구조해치구역 검사인증체계 및 유한요소해석에 관한 연구

김동훈[1]*, 이상주[1], 홍순국[2], 김효철[3], 최경억[4]
잠수함사[1], (주) 베리타스[1], 해군사관학교[2], 제주기지전대[3], 잠수함사[4]

A study for ***class Submarine Rescue hatch area Inspection & Certification(SRIC) and its Finite Element Analysis

Donghoon Kim[1]*, Sangju Lee[1], Sun Guk Hong[2], Hyo Cheol Kim[3], Kyung Eock Choi[4)]

Abstract : 수중에서 임무중인 잠수함이 피격, 암초 접촉 등으로 추진력 및 부력을 상실하여, 더 이상의 임무수행이 불가할 시 승조원 생명을 보호하기 위해 승조원들을 함외로 구조해야 한다. 해저에 침몰한 잠수함 내의 승조원을 구조하기 위한 최선의 방법은 심해잠수구조정(DSRV: Deep Submergence Rescue Vehicle, PRM: Pressurized Rescue Module)이나 잠수함 구조챔버(SRC: Submarine Rescue Chamber)을 이용하는 것이다. DSRV를 이용하여 잠수함내 승조원을 안전하게 구조하기 위해서는 DSRV의 구조용 해치와 잠수함 탈출용 해치와 안전하게 접합되어야 한다. DSRV와 잠수함 해치 접합면 두께 및 해치 구조물에 대한 한국해군의 검사인증 체계 및 최초 설계치에 대한 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 통해 잠수함을 안전하게 운용할 수 있는 기준을 마련했다.

Key Words : Submarine Rescue Hatch Area Inspection & Certification(잠수함 구조해치구역 검사 인증), Finite Element Analysis(유한요소해석)

1. 개 요

수중에서 임무중인 잠수함이 피격, 암초 접촉 등으로 추진력 및 부력을 상실하여, 더 이상의 임무수행이 불가할 시, 최후의 수단으로 승조원 생명을 보호하기 위해 승조원들을 함 외로 구조해야 한다. 심해에서 함 내의 승조원을 구조하기 위한 최선의 방법은 Fig. 1 ~ 3과 같은 심해잠수구조정(DSRV, PRM)이나 잠수함 구조챔버(SRC)를 이용하는 것이다. DSRV나 PRM를 이용할 경우 잠수함내의 승조원이 외부 수압에 노출되지 않게 함으로써 잠수병 등 신체손상을 최소화 할 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 하중에 대해 충분한 응력을 보장해야 한다. 심해잠수구조정와 잠수함 해치 접합면 두께 및 해치 구조물에 대한 한국해군의 검사인증 체계(Submarine Rescue Hatch Area Inspection & Certification) 및 실측치에 대한 유한요소 해석(Finite Element Analysis)을 통해 잠수함의 탈출 수단을 안정적으로 운용할 수 있는 기준을 마련하고자 한다.

Fig. 1. Deep Submergence Rescue Vehicle(DSRV)

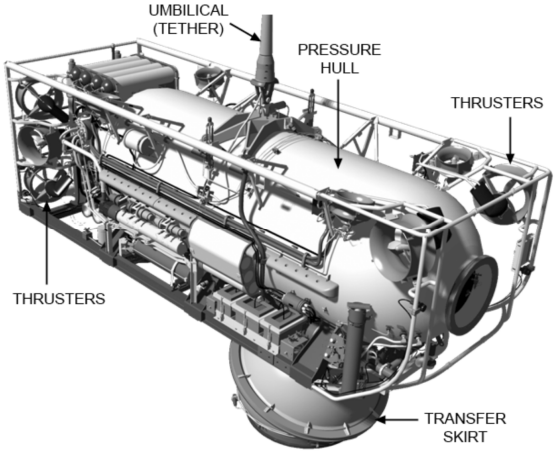


Fig. 2. Pressurized Rescue Module(PRM)

Fig. 3. Submarine Rescue Chamber(SRC)

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 ***급 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 구조훈련(Pacific-Reach 등) 같은 외국군 심해잠수구조정과 접합 훈련을 실시 할 경우 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 Requirement and Instruction Manual for Mating with U.S. Navy Rescue Assets)[1]을 기준으로 한국 해군 잠수함 구조해치구역에 대한 검사를 실시하였으며, '19년 이후 자체 기준을 기반으로 구조해치 접합구역에 대하여 인증을 시행 중이다.

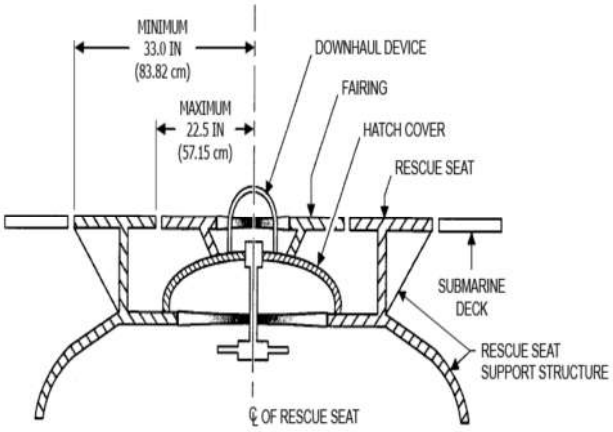
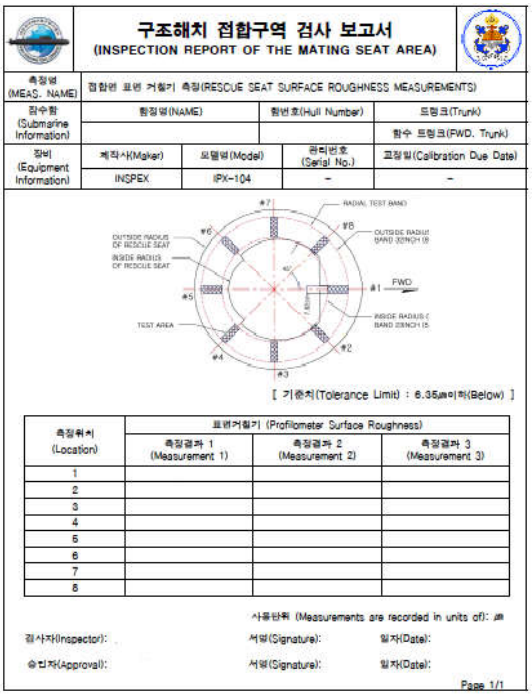


Fig. 4. Typical Components of Scope of Rescue Hatch Boundary

Fig. 5. Submarine Rescue Hatch Area Inspection Procedure



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)	함정명(NAME)	함번호(Hull Number)	트렁크(Trunk)
			함수 트렁크(FWD. Trunk)
장비 (Equipment Information)	제작사(Maker)	모델명(Model)	관리번호 (Serial No.)	교정일(Calibration Due Date)
	INSPEX	IPX-104	-	-

[기준치(Tolerance Limit) : 6.35㎛이하(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): ㎛

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)

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 안전감찰과 ASNT Level III 보유자에 의해 인증된다.

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 심해잠수구조정과의 접합을 위한 접합면에 대한 결함(Defects, 깊이, 위치, 길이 등)을 측정한다. ① 접합면에 대한 굴곡 여부를 확인하기 위한 접합면 평편도 검사(Surface Flatness)를 하고 ⑤ 접합면의 두께감소 여부를 확인하기 위한 접합면 두께를 측정한다. ⑥ 또한 실린더 트렁크의 두께 감소여부를 확인하기 위한 검사를 실시한다. ⑦ 마지막으로 구조해치의 개방시 간섭여부를 확인하기 위한 해치개방 간섭검사와 ⑧ 해치 트렁크의 진원도(Circularity)를 측정한다. 잠수함 구조해치구역에 대한 실제 작업절차는 Fig. 5.에 열거하였다. 잠수함 구조해치구역 검사절차서를 기준을 실제 진행된 검사결과는 Fig. 6.와 같이 작성 후 대상함측에 제공된다.

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

상기 서술한 바와 같이 한국해군은 성숙된 수준의 잠수함구조해치에 대한 검사 및 인증 제도를 통해 침몰과 같은 위험한 상황이 도래했을 때 안전한 탈출 할 수 있는 기반을 마련했다. 하지만 잠수함 구조해치의 구조적(Structural)인 부분에서 심해잠수구조정과의 접합면이나 트렁크의 두께가 부식이나 결함에 의해 설계치보다 줄어들었을 때 심해잠수구조정과의 접합이 가능한지, 심해잠수구조정과 해당심도 해수의 중량을 버틸 수 있는지에 대한 판단은 실제적으로 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. ***급 잠수함 구조해치 도면을 기반으로 솔리드웍스(Solidworks 2019)를 사용하여 모델링을 진행했으며 용접부위에 대한 기준 치수는 0.3mm 공차를 적용했다. 모델링 결과는 Fig. 6.에서 확인 할 수 있다.

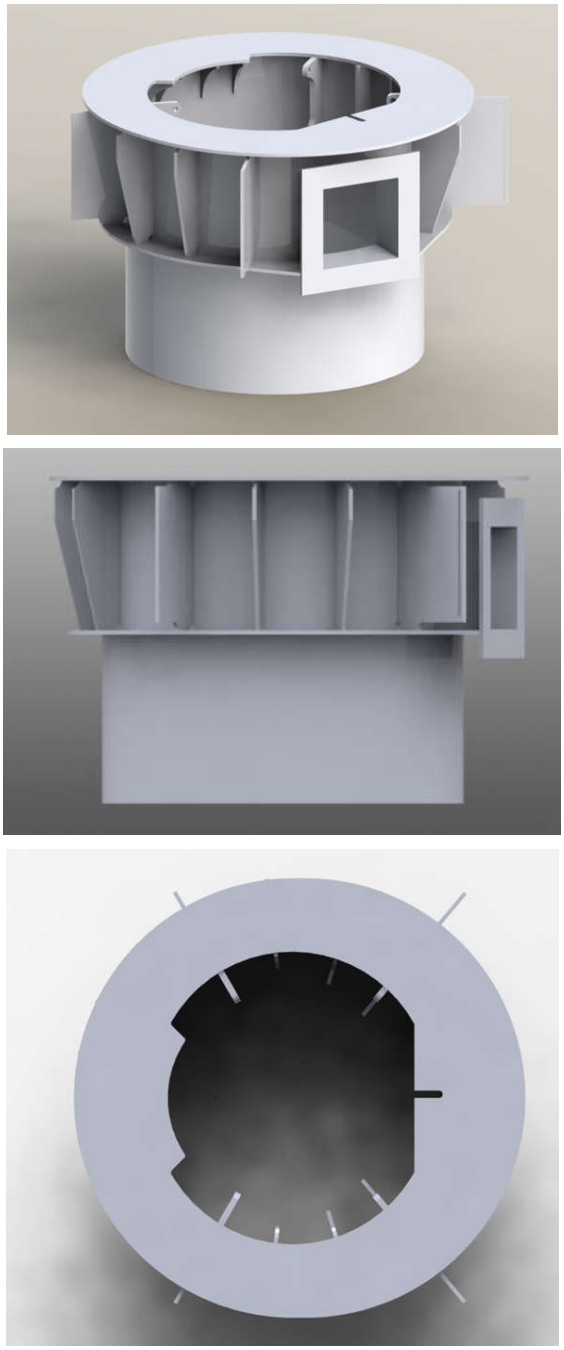


Fig. 6. Submarine Rescue Hatch Area (3D Modeling)

삼차원 모델링된 잠수함 구조해치구역을 기반으로 ANSYS 2019를 사용하여 유한요소해석을 진행했다. 단위는 메트릭(mm, kg, N, s)을 사용했고, 구조는 Solidworks로 작성된 Fig. 6.의 구조해치구역을 적용했다. 해석 코드는 ANSYS 2019 R1을 사용했다. 해석경계는 원점을 기준으로 x, y, z, 각각 1830 mm, 1245 mm, 1780 mm이고 해석된 부피는 1.3479e+9 mm^3이다. 구조해치에 적용된 금속은 HY-80강이고 총 해석중량은 1044.1 kg이다. 해석을 위한 메쉬 (mesh)는 사면체(tetrahedral)와 육면체(hexahedral)가 최적 메쉬(optimized adaptive mesh)를 적용했고 42723노드가 모델링되었다. Fig. 7에서 잠수함 구조해치구역에 대한 메쉬를 적용한 결과를 확인할 수 있다. 또한 해석코드에 입력된 구조해치구역의 금속은 실제 HY-80강의 물리적 특성을 적용했다.

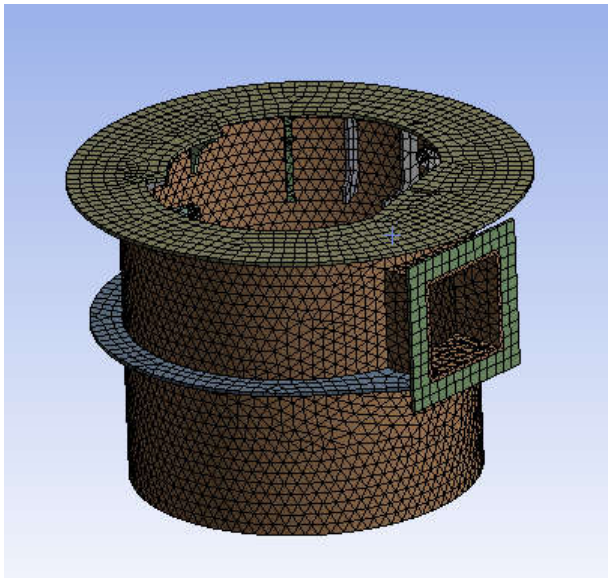


Fig. 7. Refined Mesh of the Submarine Rescue Hatch Area

Fig. 8.~ 9.는 잠수함 구조해치구역을 정적구조(Static Structural) 기반으로 유한요소해석을 실시한 결과를 보여준다. 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 연구시 총 부하는 70,000 lbf-m(311,375 N-m)를 적용했다. Fig. 8.에서 보듯이 상당응력는 최대 53.91 Mpa까지 분포되고 있고 응력은 트렁크 실린더에는 미치지 않고 있으며, 대부분의 응력은 접합면에 가해지고 있다. 해석의 특성상 접합면 전체에 총 부하가 적용되어 접합면 안쪽의 돌출부위에 많은 부하가 있는 것으로 확인되지만 실제 DSRV이나 PRM 접합 시 부하가 작용되지 않는 부분이기에 고려대상에서 제외가 가능할 것으로 판단된다. Fig. 9.는 총 부하가 구조해치구역 접합면에 가해질 때 변형분포를 보여주고 있다. 해당 분포는 최대 0.35043 mm 까지 변형이 되고 있다. Fig. 8.과 마찬가지로 최대 변형치를 나타내는 부분은 접합면 내부 돌출부이다. 하지만 실제 접합 시에는 압력이 가해지지 않는 부위이기 때문에 고려대상에서 제외 가능하며 구조해치구역은 변형이 거의 없다는 것을 알 수 있다.

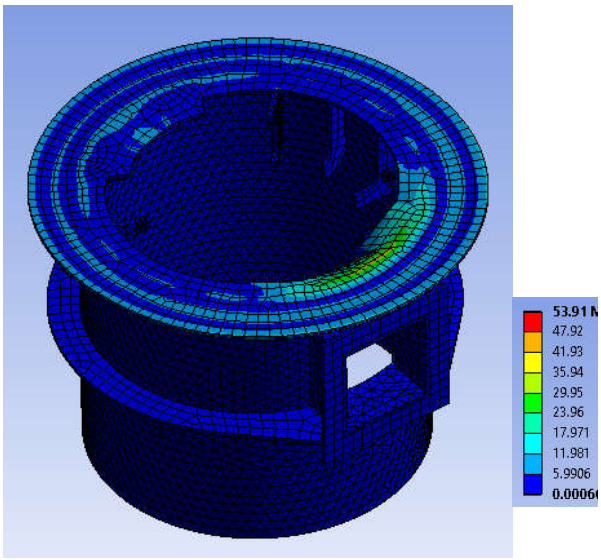


Fig. 8. Equivalent Stress of the Submarine Rescue Hatch Area

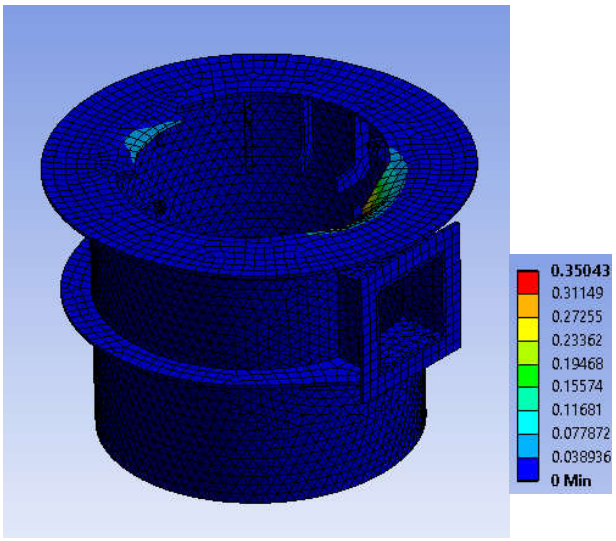


Fig. 9. Total Deformation of the Submarine Rescue Hatch Area

이러한 유한요소해석 결과를 통해 최초 설계 상 구조해치구역은 가장 가혹한 상황인 잠수함 **심도에서도 DSRV 및 PRM과 안전하게 접합이 가능한 것을 알 수 있었다. 하지만 실제 ***급 잠수함 구조해치구역의 수치는 설계 수치와 다르기 때문에 실측수치에 대한 해석이 필요하다. 이에 따라 향후 구조해치구역 실측결과를 모델링에 반영하여 각 함정별로 해석을 진행할 예정이다. 또한 ***급 잠수함의 구조해치구역에 대한 해석을 같은 방식으로 연구하도록 하겠다.

3. 결론

***급 잠수함 구조해치구역에 대한 한국해군의 검사 및 인증체계에 대한 소개와 해당 구역에 대한 유한요소해석을 진행하였다. 해석결과 설계치를 기준으로 DSRV나 PRM과 접합이 충분히 가능함을 증명하였다.

후 기

잠수함 구조해치구역 검사 및 인증체계에 기여하고 계신 한국 해군 정비창과 잠수함수리창 요원들의 노력에 진심으로 감사드립니다. 또한 이번 연구를 함께해주신 공동저자 이상주 기계공학 박사님에 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.