

잠수함 함미 트랜지션 링 구조 형상에 대한 고찰

오도한* · 안남현**†

* 스트라스클라이드대학교 조선해양공학과 박사과정, ** 거제대학교 조선해양공학과 교수

Review of the Structural Shape for Aft Transition Ring of Submarine

Dohan Oh* · Namhyun Ahn**†

* PhD researcher, Department of Naval Architecture, Ocean and Marine Engineering, University of Strathclyde, Glasgow G4 0LZ, UK

** Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Koje College, Geoje, 53325, Korea

요 약 : 보이지 않는 힘으로도 불리는 잠수함은 수중에서 활동하는 은밀성을 장점으로 대함진, 대잠진 및 핵심표적 타격 등의 임무를 수행하는 전략 수중 무기 체계로 심해에서 높은 수압을 견디며 작전을 수행할 수 있어야 한다. 이러한 관점에서 잠수함 압력 선체는 잠항 깊이에 상응하는 외부 수압에 저항하는 가장 중요한 체계로서 누수, 화재, 충격 및 폭발과 같은 위험으로부터 안전성을 확보함으로써 생존성을 높임과 동시에, 작전 수행 능력을 유지할 수 있게 해주는 강도를 확보하고 있어야 한다. 이를 위해서는 잠수함 압력 선체의 구조 형상 설계가 초기에 수행되는 것이 합리적이다. 특히, 함미 원추부 구조물과 압력선체 평형부 및 함미 비압력선체를 연결하는 함미 트랜지션 링의 경우, 설계된 잠수함에 따라 다양한 형상을 띄고 있다. 본 구조물 설계를 위해서는 응력 흐름과 연결성을 고려한 설계뿐만 아니라 복잡한 형상이 기인한 구조물 제작 투입 시수 증가로 인한 원가 상승 또한 검토해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 4가지 서로 다른 형상을 갖는 함미 트랜지션 링에 대해서 비선형 유한요소해석을 통한 구조 강도 검토와 더불어 함미 트랜지션 링 형상 복잡도에 따른 작업 일수 및 자재비 검토를 통해 경제성 측면에서의 적정성 검토를 수행하였으며, 검토된 4가지 형상 중 가장 합리적인 잠수함 함미 트랜지션 링 형상을 제안하였다.

핵심용어 : 잠수함, 수중 무기 체계, 함미 트랜지션 링, 비선형 유한요소해석, 적정성 검토

Abstract : Submarines, which have been called an invisible force, are strategic underwater weapon systems that perform missions such as anti-surface warfare, anti-submarine warfare, and high payoff target strikes with the advantage of underwater covertness. A submarine should be able to withstand the hydrostatic pressure of the deep sea. In this respect, the submarine pressure hull, as the main structural system to resist the external pressure corresponding to the submerged depth, should ensure the survivability from hazards and threats such as leakage, fires, shock, explosion, etc. To do this, the initial scantling of the submarine pressure hull must be calculated appropriately in the concept design phase. The shape of the aft transition ring varies according to its connection with the submarine aft end conical structure, pressure hull cylindrical part, and non-pressure hull of the submarine; the design of the aft transition ring should not only take into account stress flow and connectivity but also the cost increase due to the increased man-hours of its complex geometry. Therefore, trade-off studies based on the four different shapes of the aft transition ring are carried out considering both the review of the structural strength through nonlinear finite element analysis (FEA) and economic feasibility by reviewing the estimations of the manufacturing working days and material costs. Finally, the most rational structural aft transition ring shape for a submarine amongst four reviewed types was proposed.

Key Words : Submarine, Underwater weapon systems, Aft transition ring, Nonlinear finite element analysis, Trade-off study

1. 서 론

수중 무기 체계로서 잠수함은 은밀성을 바탕으로 대함·대잠진 및 주요시설 타격의 임무를 수행할 뿐만 아니라, 감시

및 특수전 요원의 침투 지원과 같은 다양한 목적으로 운용된다. 또한, 잠수함은 은밀하게 적을 공격할 수 있어야 함과 동시에, 우수한 기동성과 승조원의 생존성 보장 및 수중에서의 작전을 지속할 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 이를 위해 잠수함 구조물은 잠항심도 깊이의 외압을 견딜 수 있는 강도를 확보함과 동시에 중량을 최소화하여야 한다.

* First Author : 76odohan@gmail.com, +44-7462-826146

† Corresponding Author : namhyun@koje.ac.kr, 051-680-1604



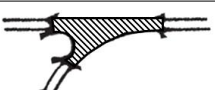

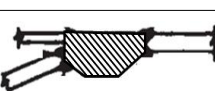
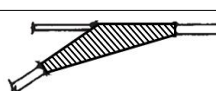
잠수함 함미 트랜지션 링 구조 형상에 대한 고찰

중량 최적화가 고려된 잠수함 압력 선체 형상은 구형 (spherical shape)이 이상적이지만, 제작 정도 관리의 유연성, 일반배치의 효율성 그리고 유체동역학적 특성의 극대화 측면에서 현대의 잠수함에는 눈물방울형 (tear-drop shape) 구조의 적용이 일반적이다. 눈물방울형 압력 선체의 적용은 잠수함 함미로부터 함미 끝막이 격벽을 포함한 원추부, 원통 평형부 및 함수 끝막이 격벽으로 구성이 되며, 압력 선체 원추부 및 원통부는 원환 늑골(이하 늑골)로 보강되어진다. 특히, 함미 원추부 압력선체와 함미 끝막이 격벽 및 함미 비압력선체를 연결하는 함미 트랜지션 링(Aft Transition Ring, 이하 ATR)의 경우는 응력 흐름과 연결성을 고려한 설계가 되어야 한다.

Table 1에서 보는 바와 같이 미 해군 잠수함에 배치된 ATR은 설계된 잠수함에서 ATR과 연결되는 인접 구조에 따라 다양한 형상을 띄고 있는데, 탄도미사일을 탑재한 전략원자력 추진잠수함인 SSBN, 공격형 원자력 추진 잠수함인 SSN, 보조 잠수함인 AGSS 및 상륙수송 잠수함인 LPSS에 다양한 형태의 ATR이 적용되었다. SSBN598, SSN585 및 SSN588은 사다리꼴 형상의 ATR이 적용되고 있으며, LPSS574와 SSN594는 삼각형 형상의 ATR이 적용되었다. 이에 반해 AGSS569는 앞서 언급된 2가지 형상과는 다른 오목 유선형 삼각형 형상의 ATR이 적용되었다(NAVSEA, 1979).

앞서 언급된 사다리꼴, 삼각형 및 오목 유선형 삼각형과 같은 ATR 형상은 제작 난이도가 서로 다르며, 이는 구조물 제작 투입 시수 및 자재비에 영향을 미친다.

Table 1. Aft Transition Ring shapes in submarine

Submarine		
Class	SSBN598	LPSS574
Shape		
Class	AGSS569	SSN585
Shape		
Class	SSN588	SSN594
Shape		

따라서, 본 연구를 통하여 ATR 구조 형상에 따른 구조 강도 검토와 더불어 형상 단순화가 작업성 향상과 원가 절감에 미치는 영향에 대해서 비교 검토하여 검토된 4가지 형상 중

가장 합리적인 잠수함 함미 ATR 형상을 제안하고자 한다.

본 연구의 수행을 위해 상용 프로그램인 MS Office EXCEL 및 ANSYS Classic을 사용하여 해석적 방법에 의한 강도 계산 및 수치 해석적 방법을 통한 구조 안전성을 검증하였다.

2. 잠수함 선체구조 일반

잠수함 선체의 구성은 잠항 중에 받는 수압을 버텨낼 수 있는 압력 선체와 잠항 중에 자유 통수로 인해 외부 수압의 직접적인 영향을 받지 않는 비 압력 선체로 구분된다.

압력 선체를 구성하는 구조물로는 Fig. 1에서 보는 바와 같이, 잠수함 함수 쪽으로부터 함수 끝막이 격벽, 압력 선체 평형부, 함미 ATR, 압력 선체 원추부 및 함미 끝막이 격벽이 배치되며, 압력선체 내부에는 원환 늑골 및 대형 늑골이 압력선체 외관을 지지하는 보강재로 배치된다(Oh, 2010).

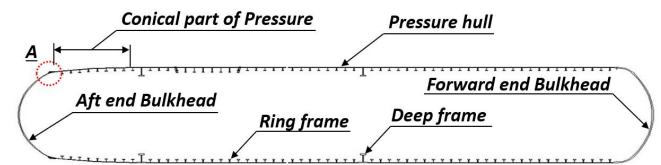


Fig. 1. Submarine pressure hull structure.

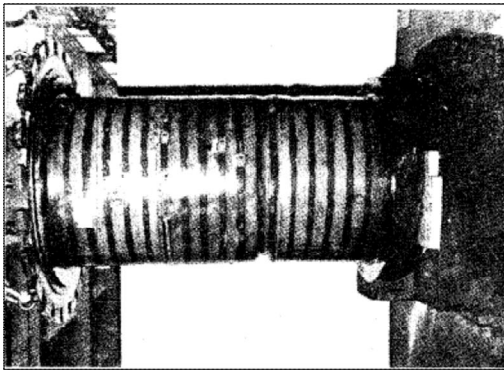
특히, 함미 원추부 압력선체와 함미 끝막이 격벽 및 함미 비압력선체를 연결하는 구조인 함미 ATR은 Fig. 1의 A위치에 배치되어 잠항 심도에서의 압력으로 발생한 내부응력에 대한 반력에 견딜 수 있도록 설계되며, 통상적으로 인접한 구조물의 두께보다도 두껍게 설계된다.

3. 구조강도 계산

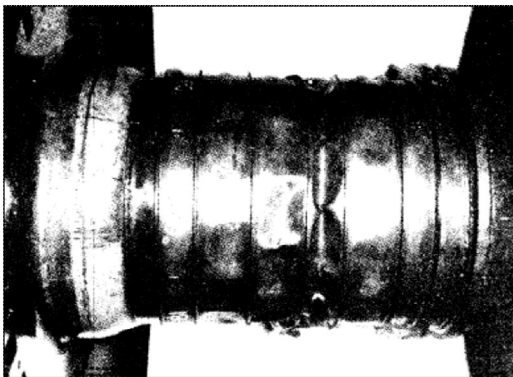
3.1 잠수함 압력선체 구조강도 계산

해군을 보유한 국가는 국가별로 함 운용관습 및 함정의 설계개념에 따라 독자적으로 정립한 설계기준을 바탕으로 선체구조설계를 수행한다. 잠수함 선체구조설계도 이와 마찬가지로 독자 기준에 따라 압력선체, 비압력선체 및 부가물에 대한 구조설계를 진행하게 된다. 여기서, 압력선체는 붕괴형태에 따라 Fig. 2(a) 축대칭 좌굴, Fig. 2(b) 비대칭 좌굴 및 Fig. 2(c) 전반적 좌굴을 검토하게 된다. 이때, 축대칭 좌굴은 외관이 상대적으로 두껍고 늑골 간격이 좁으면 나타나는 좌굴 형태이며 늑골 사이에서 원주를 따라 V자 형상으로 굴이 생기는 현상으로, 측면에서 보면 아코디언 주름과 같은 형태를 띤다. 반면에, 비대칭 좌굴은 외관이 상대적으로 얇고 늑골 간격이 넓으면 나타나는 좌굴로 압력선체 외관

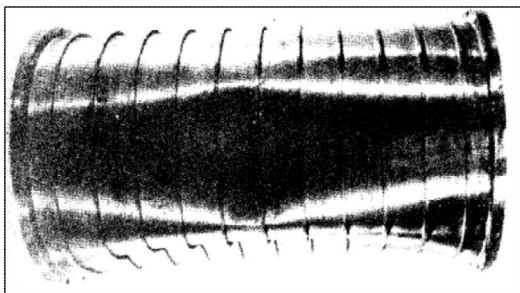
둘레에 걸쳐 파형 좌굴을 나타내는 형태로 인접한 늑골 사이의 좌굴과 비대칭 형상을 띤다. 또한, 전반적 좌굴은 늑골의 급격한 강도 저하로 인한 구조물 전반에 걸친 좌굴 강도의 불안정으로 발생하는데, 설계자는 좌굴로 인한 피해를 최소화하기 위해 전반적 좌굴이 발생하지 않게, 즉, 요구성능 이상에서 축대칭 또는 비대칭 좌굴이 발생하도록 설계를 수행한다.



(a) Axisymmetric buckling mode



(b) Asymmetric buckling mode



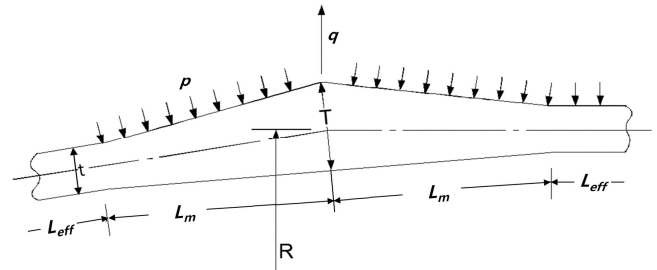
(c) Overall collapse mode

Fig. 2. Failure modes of pressure hull.

3.2 ATR 구조강도 계산

잠수함 ATR 구조는 Fig. 1. A에 배치되며, 상세 형상은 Fig. 3(a)와 같으며, 잠항심도에 상응하는 외압(p)에 의해 발생한

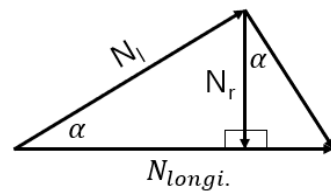
총 반경(R) 방향 하중(q)은 Fig. 3(b)를 기반으로 Fig. 3(c)와 같이 도식화할 수 있다. 결국 ATR은 반경 방향 하중에 의한 굽힘 응력에 저항할 수 있는 구조 강도를 확보하여야 한다.



where

- p is the pressure equal to the submerged depth,
- q is the load for the radial direction,
- T is the reinforced thickness of ATR,
- R is the radius of the conical part of pressure hull,
- L_m is the reinforced length of ATR,
- t is the thickness of the conical part of pressure hull and
- L_{eff} is the effective length.

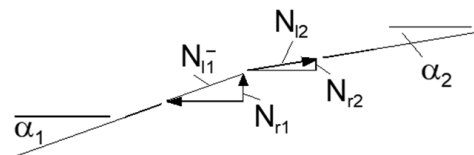
(a) Main dimension and load in ATR.



where

- α stand for the angle between conical part of pressure hull and pressure hull,
- N_{longi} is the longitudinal forces by pressure p
- N_l is the membrane forces and,
- N_r is the radial forces.

(b) Relation between N_l , N_r and N_{longi} .



(c) Membrane forces(N_l) and radial forces(N_r) in ATR.

Fig. 3. Forces generated at the ATR by external pressure.

Fig. 3(a), (b), (c)로부터 membrane force(N_l, N_r)는 아래 식(4)와 같이 정의할 수 있으며, 이로부터 식(5)와 같은 두 개의 반경 방향 하중(N_{r1}, N_{r2})이 구해진다. 각각의 반경 방향 하중이 만들어 내는 원주 방향 하중은 힘의 평형 상태를 이루고 있어야 하므로, 결론적으로 이 두 개의 반경 방향 하중의 차이가 식(6)과 같이 본 구조물에 총 반경 방향 하중(q)으로 작용하게 된다. 이때 식(6)은 구조물이 이루는 각도(Degree)에 대한 tangent 값의 차이는 각도 차의 radian 값과 유사하다는 가정하에 도출된 것이다.

$$N_{longi.} = N_l \times \cos\alpha \quad (1)$$

$$N_r = N_l \times \cos\alpha \times \tan\alpha = N_{longi.} \times \tan\alpha \quad (2)$$

$$N_{longi.} = \frac{pR}{2} \quad (3)$$

$$N_{l1} = \frac{pR}{2\cos\alpha_1}, N_{l2} = \frac{pR}{2\cos\alpha_2} \quad (4)$$

$$N_{r1} = \frac{pR}{2}\tan\alpha_1, N_{r2} = \frac{pR}{2}\tan\alpha_2 \quad (5)$$

$$q = \frac{pR}{2}(\tan\alpha_1 - \tan\alpha_2) \approx \frac{pR}{2}\Delta\alpha \quad (6)$$

where $\Delta\alpha$ is an approximation for $\tan\alpha_1 - \tan\alpha_2$

또한, 본 구조물의 계산에 필요한 ATR 길이(L)는 GL(2008)에 따라 식(7)을 적용하여 계산한 유효 길이(L_{eff})와 최대 보강 두께(T)와 외관두께(t)의 차이의 4배를 적용하며 계산한 보강부의 길이(L_m)의 합으로 정의하며, 식(8)와 같다(HDW, 2003). 이때 포와송 비(ν)는 0.3을 적용하였다.

$$L_{eff} = \frac{\sqrt{Rt}}{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}} \quad (7)$$

$$L = 2 \times (L_{eff} + L_m) = 1.56\sqrt{Rt} + 8(T - t) \quad (8)$$

$$\sigma_b = \frac{qL}{8} \frac{6}{T^2} < \sigma_{0.2} \quad (9)$$

계산된 총 반경 방향 하중(q), ATR 길이(L), 최대 보강 두께(T)로부터, 식(9)를 적용하여 굽힘 응력(σ_b)을 계산한다. 계산된 굽힘 응력(σ_b)은 재료의 항복응력($\sigma_{0.2}$)보다 작아야 하며, 이를 만족시키는 최대 보강두께(T) 및 ATR 길이(L)를 결정한다.

4. Trade-off 연구




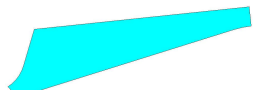
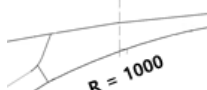
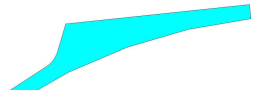

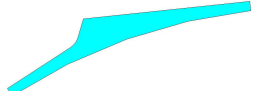
잠수함 ATR 형상에 대한 Trade-off 연구를 위해서 Table 1에 언급된 형상 정보를 참고하여, Table 2와 같은 ATR 형상을 고려한 Trade-off 연구를 수행한다.

Type 1은 응력 흐름을 고려한 ATR 형상으로 독일 잠수함에 적용된 적이 있으며, Table 1의 SSBN598, SSN585 및 SSN588에 적용된 사다리꼴 형상의 개량형으로 정의하였다.

Type 2는 Table 1의 LPSS574와 SSN594에 적용된 삼각형 형상의 ATR에 대한 검토를 위해 본 연구에 포함하였다.

마지막으로 Type 3과 4는 Type 2와 달리 ATR 안쪽 면을 직선이 아닌 곡선을 적용한 형상으로 압력선체 원추부와 함미 끝막이 격벽과 만나는 부분의 부드러운 연결이 ATR 구조 건전성에 미치는 영향을 검토하고자 고려하였다.

Table 2. Aft Transition Ring shapes for trade-off study

Type	CAD drawing	FEA model
1		
2		
3		
4		

5. 유한요소 해석

유한요소 해석을 수행하여, Table 2에서 정의한 type에 대한 피로강도 및 최종강도를 검토하였다. 잠수함 피로강도의 평가는 잠수함 운용심도 정수압(Nominal Service Pressure, NSP)에서 ATR 전후 압력선체 원추부 연결부에서 발생하는 주응력이 피로 허용응력 이내에 있어야 하며, 선형해석 결과를 바탕으로 평가한다. 본 trade-off 연구에 사용된 압력선체 원추부 연결부 두께는 26 mm가 적용되었으며, 이때 피로 허용응력은 499.435 MPa이다. 이에 반해 잠수함 최종강도는

재료 및 기하비선형해석을 수행하며, 하중을 점차적으로 증가시키며 비선형 구조해석을 수행한다. 더 이상 수렴하지 못하고 발산할 때까지 하중을 증가시키며 구조해석을 수행한 후, 발산 직전 압력을 최종강도로 판단한다(Chen et al., 2016). 이때 구조해석을 통해 도출한 최종강도($P_{collapse}$)는 안전율을 고려한 잠수함 설계심도 정수압(Calculation Pressure, CP)보다 커야한다. 해석의 편의를 위해 본 해석에서는 함미 끝막이 격벽은 경계조건으로 처리하며, 격벽에 작용하는 하중은 Coupling이 적용된 함미 끝막이 격벽과 만나는 부분에 식(10)과 같은 크기의 압력이 작용하는 것을 고려하여 해석을 수행하며, 하중은 P_{rf}^{NSP} or CP 로 정의한다.

$$P_{rf}^{NSP \text{ or } CP} = (NSP \text{ or } CP) \times \left(\frac{D_{BHDout}^2}{D_{BHDout}^2 - D^2} \right) \quad (10)$$

여기서, D_{BHDout} 은 압력선체 끝막이 격벽의 외경이며, D 는 압력선체 끝막이 격벽의 내경을 나타낸다.

5.1 요소의 선정

ATR 구조건정성 검토를 위한 유한요소해석 요소로 Plane 42를 선정하였다. 본 요소는 2차원 solid 및 4절점 요소로 축대칭 해석이 가능하며, ATR을 3차원 solid 구조로 모델링할 필요없이 2차원 평면에 모델링을 한 후 축대칭 특성을 활성화함으로써 3차원 모델과 동일한 결과를 도출할 수 있다(MacDonald, 2007). 결과적으로 본 요소의 적용은 유한요소모델의 요소 개수를 줄여줌과 동시에 수치 해석 시간을 줄일 수 있게 한다.

5.2 하중조건 및 경계조건

5.2.1 하중조건

선형 및 비선형해석을 수행하기 위한 하중조건은 아래와 같다.

- 선형해석: NSP, P_{rf}^{NSP}
- 비선형해석: CP, P_{rf}^{CP}

5.2.2 경계조건

Fig. 4에서 보는 바와 같이 좌측의 경계조건은 함미 끝막이 격벽으로부터 전달되는 하중에 따른 거동을 반영하기 위해서 Coupling 조건을 적용하고, 우측은 강체 운동을 방지하기 위해서 Y 방향으로 구속조건을 적용한다.

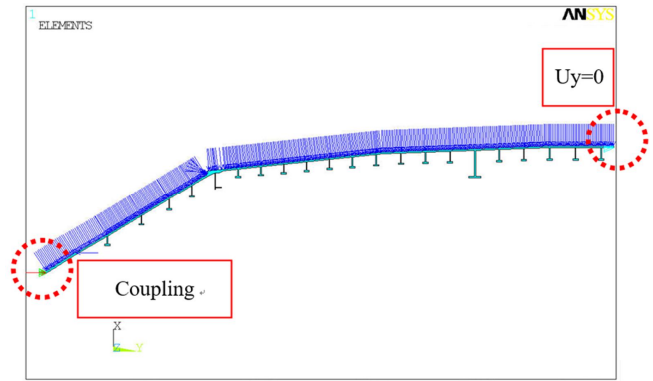


Fig. 4. Loading & boundary condition for trade-off study.

5.3 선형해석

선형해석의 목적은 앞서 언급한 바와 같이 ATR 전후 압력선체 끝막이 격벽 및 압력선체 원추부와의 연결부에서 발생하는 응력이 피로허용응력 이내에 있는지 여부를 판단하기 위해 수행한다.

5.4 비선형해석

비선형해석은 재료 및 기하비선형을 적용하며, 구조물의 최종강도를 파악하는데 목적이 있다. 이때, 최종강도는 비선형 유한요소해석을 수행하여 도출한다.

5.4.1 재료 모델

재료 비선형해석을 위한 재료 모델은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 실험을 통해 확보한 총 6개의 stress-strain data를 이용하여 Multi-linear 재료 모델을 구성하였다. 이때, X축은 strain($\times 10^{-2}$), Y축은 stress(MPa)를 의미한다.

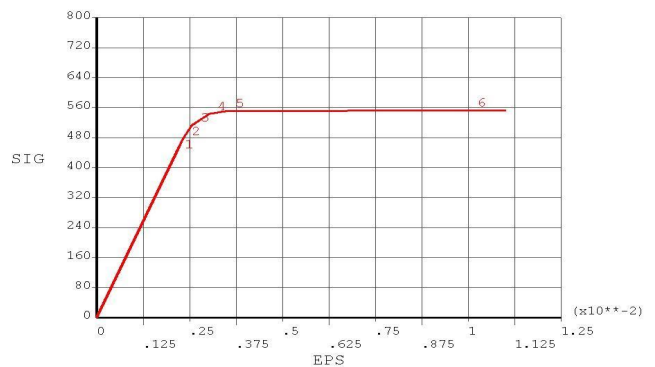


Fig. 5. Stress-Strain curve of material model for HY80.

5.4.2 재료의 기계적 특성 및 허용 응력

재료 비선형해석을 위한 재료의 기계적 특성 및 허용 응력은 MIL-S-16216K(1987)에 따라, Table 3과 같으며, 허용 응력의 경우 재료의 항복 강도를 적용하였다.

Table 3. Material properties of HY80

Property	HY80
Young's Modulus (E, GPa)	205
Poisson's Ratio (ν)	0.28
Density (ρ , g/cm ³)	7.75
Yield Strength ($\sigma_{0.2}$, MPa)	552
Elongation (%)	19

5.5 유한요소 해석 결과

선형 및 비선형 유한요소 해석 결과로부터, 해당 구조물의 피로강도 및 최종강도를 평가한다.

5.5.1 선형해석 결과

ATR 구조부의 피로강도는 ATR과 용접으로 연결되는 압력선체에서 발생하는 응력을 검토하여 건전성을 판단하며, Fig. 6 점선 원에서 보는 바와 같이 ATR구조를 제외한 상태에서 압력선체 원추부에 발생하는 주응력을 검토한다. 이와 같은 방식으로 도출한 각 type별 주응력은 Table 4 및 Fig. 7(a)~(d)에서 보는 바와 같이 각 type별 발생 주응력은 압력선체 원추부 안쪽 면에서 압축응력이 발생한다. 이는 ATR 구조가 압력선체 원추부 보다 상대적으로 강성이 커서 변형이 적게 발생하게 됨과 동시에 ATR과 만나는 압력선체 원추부 구조물의 변형이 크게 발생하게 만들고 이에 따라 큰 압축 응력이 발생하게 된다. 결과적으로 Type 1에서 4로 갈수록 ATR 자체의 강성은 더 약해짐을 알 수 있으나, 모든 type의 ATR 구조는 피로강도를 만족하고 있음을 알 수 있다.

Table 4. Evaluation of the fatigue strength for each ATR (MPa)

Allowable fatigue stress	Type			
	1	2	3	4
499.435	487.506	468.072	210.653	204.937

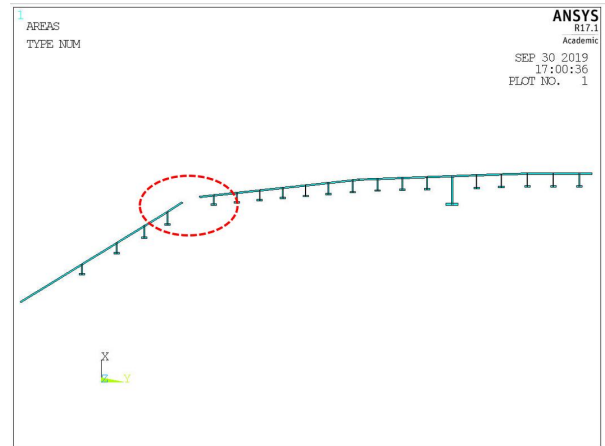
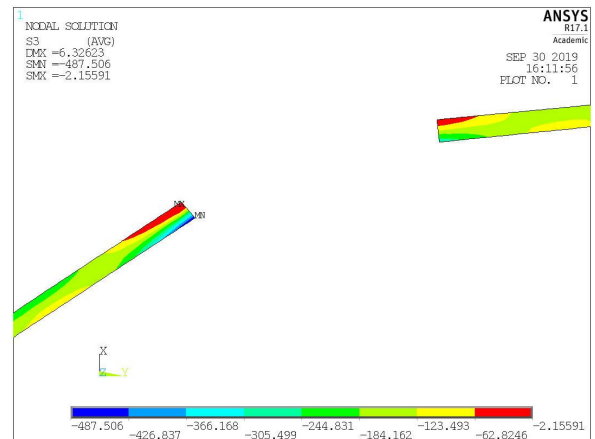
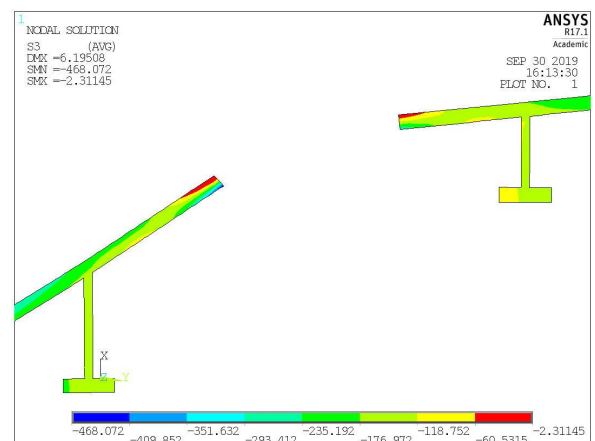


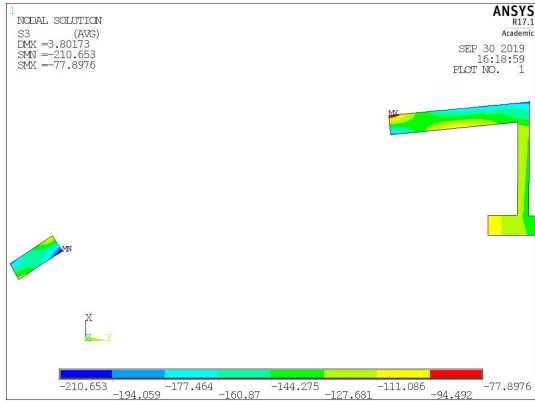
Fig. 6. Method of the evaluation of the fatigue strength for each type of ATR structure at NSP.



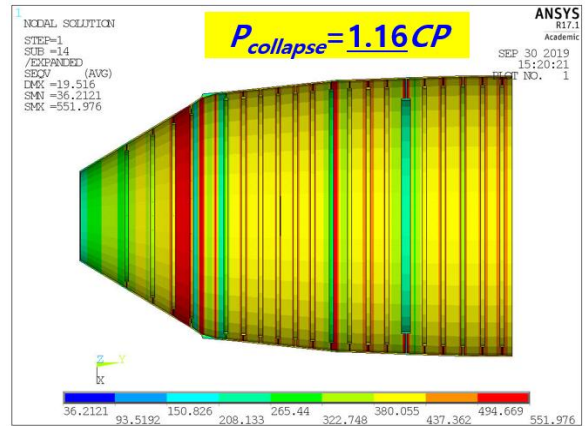
(a) Type 1



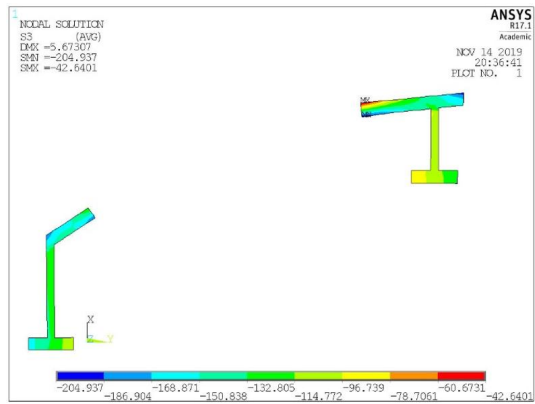
(b) Type 2



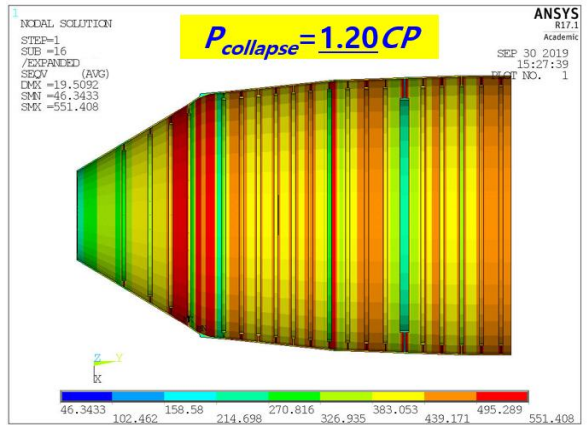
(c) Type 3



(b) Type 2



(d) Type 4

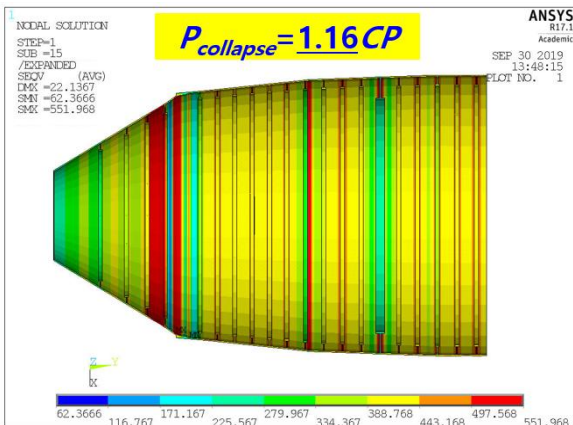


(c) Type 3

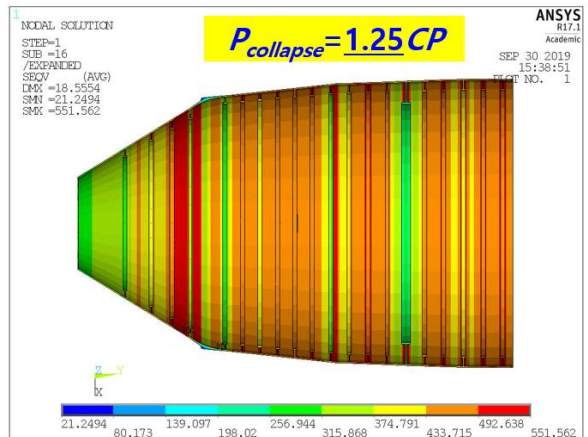
Fig. 7. Principal stress (MPa) of each type of the pressure hull adjacent to ATR at NSP.

5.5.2 비선형해석 결과

Type 1~4의 비선형해석 결과는 Fig. 8 (a)~(d)에서 보는 바와 같이 CP의 116%~125%로 다양하게 나타나며, 이는 설계식에 따른 ATR의 초기 설계가 최종강도 측면에서는 동등하게 잘 수행되었음을 보여준다.



(a) Type 1



(d) Type 4

Fig. 8. von Mises equivalent stress (MPa) of ATR structure and collapse pressure ($P_{collapse}$).

또한, Fig. 9에서 보는 바와 같이 함미 ATR 구조 자체에 발생하는 응력 분포를 통해서 알 수 있듯이 전반적으로 본 구조물은 함의 붕괴시점까지 잘 견디고 있으며, 설계시 분

구조물이 붕괴되지 않고, 그 인접 구역에서 붕괴가 발생하게 유도함으로써 ATR이 구조적 역할을 잘 수행하도록 적절하게 설계되었음을 확인할 수 있다.

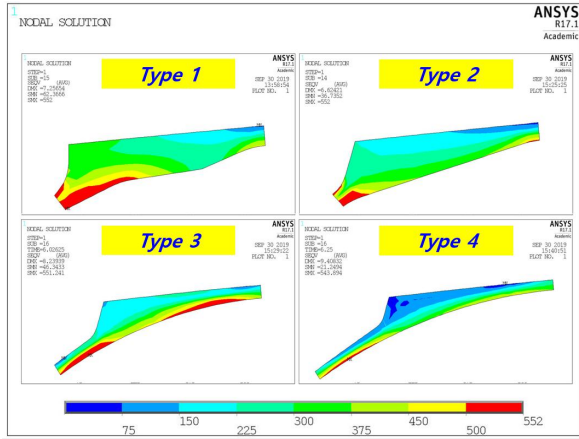


Fig. 9. von Mises equivalent stress (MPa) of ATR.

5.5.3 유한요소해석 결과 소결론

이상으로부터 도출한 선형 및 비선형 유한요소해석 결과를 정리하면, Table 5와 같으며, 결과를 분석해 보면 모든 type의 ATR은 피로강도 및 최종강도를 만족하고 있음을 알 수 있다. 특히, Type 3과 4 형상은 피로강도 및 최종강도 측면에서는 Type 1과 2에 비해서 안정적임을 알 수 있다.

Table 5. Summary of the FEA results for trade-off study

Type	FEA	Stress and $P_{collapse}$ (MPa)
1	Linear	Principal stress of pressure hull adjacent to ATR 487.506
	Nonlinear	Collapse Pressure ($P_{collapse}$) CP + 16 %
2	Linear	Principal stress of pressure hull adjacent to ATR 468.072
	Nonlinear	Collapse Pressure ($P_{collapse}$) CP + 16 %
3	Linear	Principal stress of pressure hull adjacent to ATR 210.653
	Nonlinear	Collapse Pressure ($P_{collapse}$) CP + 20 %
4	Linear	Principal stress of pressure hull adjacent to ATR 187.731
	Nonlinear	Collapse Pressure ($P_{collapse}$) CP + 25 %

6. 경제성 검토

유한요소해석 결과에 따르면, 구조강도 관점에서 Type 3과 4 형상은 Type 1과 2에 비해서 더욱 안전함을 확인 할 수 있었다. 하지만, 최적설계의 관점에서 접근해보면, 요구조건을 만족시킨다면 생산성 및 경제성이 뛰어난 ATR 형상이 가장 적합한 설계라 할 수 있다.

경제성 측면에서 조선소 생산 데이터(숙련공 작업기준)를 기반으로 한 type 별 가공시수 비는 Table 6과 같다. 생산성의 경우 Type 1이 가장 취약하며, Type 2가 최선의 것으로 판단된다. Type 3과 4는 형상에 큰 차이가 없는 만큼 생산 시수에서도 큰 차이를 보이지 않지만, Type2 보다는 생산 시수가 많이 투입되며, Type 1 보다는 적게 투입된다.

Table 6. Comparison of the productivity according to the ATR shape

ATR Shape	Type*			
	1	2	3	4
Ratio of Man-hours (Type*/Type1)	1	0.83	0.90	0.90
Takt time (days)	30	25	27	27
Cutting costs (%)	0	17	10	10

또한, Table 7에서 보는 바와 같이 재료비의 경우는 Type 1이 가장 뛰어나며, 다음으로 Type 2가 경쟁력이 있음을 알 수 있다. Type 3 및 4의 경우는 앞서 언급한 Type 1과 2 대비 2배에서 5배까지 차이가 나는 것으로 평가되었다.

Table 7. Comparison of the material cost according to the ATR shape

TYPE	AREA (mm ²)	Purchase order SIZE (m)		WEIGHT (Ton)	Material cost* (ten million won)
		Width	Depth		
1	14870	0.110	0.300	2.1851	4.152
2	17060	0.130	0.330	2.8354	5.387
3	19500	0.180	0.440	5.1955	9.871
4	30590	0.250	0.660	10.7222	20.372

* Material costs were calculated on the basis of forged bar, and the unit price was 19 million won per ton.

7. 결 론

본 연구는 ATR 구조 형상에 따른 구조 강도 검토와 더불어 형상 단순화가 작업성 향상과 원가 절감에 미치는 영향에 대해서 비교 검토하여 최적의 ATR 형상을 도출하기 위해서 trade-off 연구를 수행하였으며, 검토 대상은 총 4가지 경우가 선정되었다.

각각의 경우에 대해서 피로강도 및 최종강도를 평가하기 위해서 선형 및 비선형 유한요소해석이 수행되었으며, 그 결과에 따르면, Type 3과 4가 구조적으로 가장 적합한 형상으로 보여진다. 하지만, 경제성 측면을 고려했을 때는 오히려 구조강도 요구조건을 큰 여유없이 만족시키면서 가공비 및 재료를 줄일 수 있는 Type 2가 가장 적합한 것으로 평가되었다.

따라서, 잠수함 ATR 구조물은 구조강도 뿐만 아니라 경제성을 고려하여 ATR의 보강두께 및 길이를 확정하고, Type 2와 같은 형상으로 ATR을 설계하는 것이 4가지 검토 대상 중 가장 합리적인 것으로 판단된다.

References

- [1] Chen, X., B. Gao, and X. Wang(2016). Evaluation of limit load analysis for pressure vessels-Part I: Linear and nonlinear methods, *Steel and Composite Structures*, pp. 1391-1415.
- [2] GL(2008), Rules for Classification and Construction III-Part2 Annex A Design of the Pressure Hull, Hamburg, Germanischer Lloyd.
- [3] HDW(2003), Structure and strength design guideline for hull structure, Basics of shell theory related to Pressure hull strength.
- [4] MacDonald, B. J.(2007) Practical Stress Analysis with Finite Elements. Ireland: Glasnevin Publishing.
- [5] MIL-S-16216K(1987), MILITARY SPECIFICATION: STEEL PLATE, ALLOY, STRUCTURAL, HIGH YIELD STRENGTH.
- [6] NAVSEA(1979), Submarine hull inspection, S9086-C1-STM, Chapter 091, USA: Naval Sea Systems Command.
- [7] Oh, D. H.(2010), A study on Optimal Structural Design of Submarine Pressure hull, Thesis, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Korea.

Received : 2019. 10. 17.

Revised : 2019. 11. 15. (1st)

: 2019. 11. 26. (2nd)

Accepted : 2019. 12. 27.