

복합재 반자율 무인잠수정(SAUV)의 내압선체 설계 및 구조해석

정 태 환* · 이 종 무* · 홍 석 원* · 안 진 우** · 김 태 옥*** · 김 진 봉***

* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

** 국방과학연구소

*** 한국기계연구원

A Pressure Vessel Design and Structural Analysis of a Semi-Autonomous Underwater Vehicle(SAUV)

Tae-Hwan Joung* · Chong-Moo Lee* · Seok-Won Hong* · Chin-Woo An** · Tae-Wook Kim*** · Jin-Bong Kim***

* Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

** Agency for Defense Development, Jinhae, Korea

*** Korea Institute of Machinery & Materials, Changwon, Korea

KEY WORDS : SAUV 반자율 무인잠수정, FRP 섬유 강화 플라스틱, FEA 유한요소해석, Buckling 좌굴, Pressure Test 압력시험

ABSTRACT : A Semi-Autonomous Underwater Vehicle (SAUV) capable of simple work at sea bed is under development in KRISO-KORDI. A pressure vessel of SAUV which is composed of FRP was manufactured to load electronic equipments. The objective of this paper is to verify the safety of the pressure vessel through conducting the structural analysis and test in pressure tank. Strain and stress under unit load were obtained by using ANSYS in the linear structural analysis. And local buckling analysis was performed with NASTRAN for the middle cylindrical hull. For the pressure test, strains were measured at three point. We found that the results by linear structural analysis and experiment are coincide well at the points where buckling does not occur. Maximum depth was estimated to be 250m by the local buckling analysis.

1. 서 론

삼면이 바다인 우리나라는 국토 개발의 효율성을 증진시키기 위해 해양 개발이 필연적이다. 특히 육상의 부존자원이 부족한 우리나라는 조선과 해운이 발달한 해양국임에 비해 해양자원의 적극적인 개발이 부진한 편이었다. 현재 전 세계 석유, 천연가스의 28%가 대륙붕에서 생산되고, 머지않아 40%를 상회할 것으로 예상되며 또한 크롬, 망간과 같은 값비싼 심해저 광물의 집광도 선진국 중심으로 증가하고 있다. 이를 위하여 해저에서의 열악한 환경에서 인간의 작업을 대체할 수 있는 장비의 개발이 국내에서도 진행되고 있다.

해양개발 장비는 심해의 압력 조건에서 작업을 수행해야 하므로 내압기술은 해양개발에 있어서 필수적인 요소기술이다. 내압기술은 내압챔버의 설계제작이 기본요소가 되고, 관측창 부위의 국부 구조설계기술, 해양계측을 위한 외부 노출형 센서류의 내압 설계제작 기술, 수중 작업을 위한 로봇팔이나 수중 커터 연결부 설계기술, 추진 장치의 방수설계기술 등이 핵심요소가 된다(장 석, 1997).

특히 심해의 내압선체 제작을 위해서는 높은 강도와 강성을 가지며, 내부식성 및 비자성(非磁性) 소재가 요구된다. 비자성의 소재이면서 내부식성이 좋고, 강성과 강도까지 뛰어난 FRP소재는 그동안 소재의 특성상 확실한 구조해석이 뒷받침되지 않아 내압 선체에 사용하기 힘들었다. 그러나 구조해석과 시험을 바탕으로 확실한 예측이

가능하다면, 심해의 많은 장비들이 복합재료로 만들어 질 수 있을 것이다.

현재 한국해양연구원 해양개발시스템 연구본부에서 개발 중인 반자율 무인잠수정(Semi-Autonomous Underwater Vehicle, SAUV)의 내압선체는 이러한 FRP의 우수한 성질(비자성, 내부식성, 뛰어난 강도/강성)을 이용하여 만들어졌다. 내압선체는 공간적 요구와 유지 보수 용이성을 고려하여 단일 내압선체에 이러한 장비들을 탑재하는 것이 유리하다고 판단되어 상하로 분리된 단일 내압선체로 설계되었다(홍석원 외, 2000).

본 논문에서는 SAUV의 내압선체를 복합재료로 선택함에 따른 목표 수압하에서의 선형해석을 바탕으로 하여 내압시험의 결과와 비교/분석하여 보았으며, 국부좌굴해석을 통한 내압선체를 분석, 검토하고자 한다.

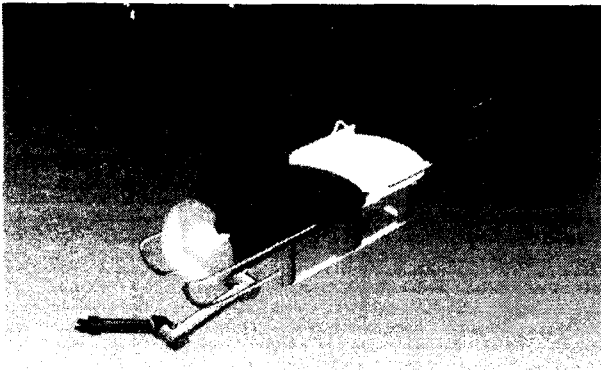


Fig. 1 Concept design of SAUV

2. 기본 형상 및 물성치 산정

2.1 설계 조건 및 기본 형상

내압선체는 잠수정이 잠수정으로서 유지시키는 외형 및 내형의 가장 주요한 요소이며 잠수 심도에서의 잠수압력에 견딜 수 있어야 한다. 내압선체는 그 잠수정의 특성상 사전에 규정된 어떤 특정한 파괴심도(Collapse Depth)를 기준으로 설계되고 이 파괴심도 부근의 극히 제한된 오차 범위 내에서 실제로 파괴가 일어나야 한다. 이러한 파괴심도에 상응하는 압력이 내압선체 계산의 기준이 된다. 잠수함의 경우, 예전에는 독일해군은 2.5를 미국해군은 1.5를 안전율로서 사용하였으나 현재에는 각국의 대부분의 해군들은 공히 이 두 값 사이의 값을 안전율로 사용하고 있으므로, 여기의 내압선체의 안전율도 여기에 상응하는 값인 약 1.5~2로 설계하였다(손호재 외, 2000).

징적인 수압이 내압선체에 작용하고 있으므로, 경계조건이 없는 해석이니, 유한 요소법의 특성상, 경계조건을 미미하게 가장 끝단에서 UY방향만 구속하였다. 압력은 단위하중인 1

$N/mm^2(=10bar)$ 을 부여하였으며, 목표 수심은 400m(=40bar)이다. 구조해석은 상용 소프트웨어인 ANSYS 6.1을 사용하였으며, 사용된 요소는 SHELL93(8node structural shell)과 SHELL99(Linear layered structural shell)이며, 절점수는 5366개, 요소수는 1802개이다.

중앙실린더 부분과 응력이 적을 것으로 예상되는 선수부분의 반구형은 요소를 크게(coarse mesh)하였으며, 응력이 클 것으로 예상되는 선수부의 모서리 부분과 굴곡이 큰 선미 부분은 유한 요소의 오차가 생기지 않는 범위에서 조밀하게(fine mesh) 나누었다. 내압선체의 구조해석을 위한 전처리 모델은 다음과 같이 되어 있다.

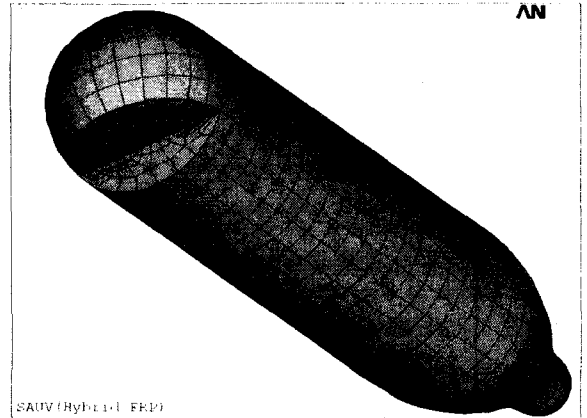


Fig. 2 FE Model of Pressure Vessel

2.2 물성치 산정

강화섬유와 수지로 이루어진 복합재료는 그 부피 중에 섬유의 부피를 비율로 나타낸 섬유체적율 v_f 와 수지의 부피를 비율로 나타낸 수지체적율 v_m 에 따라서 그 강성과 강도가 결정된다. 본 연구에서는 탄소섬유 직조판과 유리섬유 직조판을 함께 사용하여 잠수정의 선체를 구성하였다. 사용재료는 (주)한국화이버에서 생산되는 유리섬유 직조판인 635-CR와 탄소섬유 직조판인 CF6638이다. 유리섬유의 밀도 ρ_{CF} 는 $2.54 g/cm^3$, 강성 E_{CF} 는 72.4GPa, 강도 S_{CF} 는 3.45 GPa이고 사용된 직조판의 면중량(Aerial weight) W_{CF} 는 $196.5 g/m^2$ 이며, 탄소섬유의 밀도 ρ_{CF} 는 $1.8 g/cm^3$, 강성 E_{CF} 는 230GPa, 강도 S_{CF} 는 3.53GPa이고 사용된 직조판의 면중량 W_{CF} 는 $337 g/m^2$ 이다.

복합재료 적층판의 두께 t_c 와 사용된 재료의 밀도와 면중량을 이용하여 적층판내의 섬유체적율을 계산할 수 있다. 섬유체적율을 계산하기 위하여 1층의 직조판을 이루고 있는 섬유의 단위면적당 차지하는 두께를 아래와 같이 계산하여야 한다.

$$\text{유리섬유의 두께} : t_{CF} = W_{CF} / \rho_{CF} = 0.0774mm$$

$$\text{탄소섬유의 두께} : t_{CF} = W_{CF} / \rho_{CF} = 0.18mm$$

20mm 두께의 복합재료 적층판을 이루기 위해 사용된 직조판은 20장의 유리섬유 직조판과 20장의 탄소섬유 직조판이다. 따라서, 복합재료 적층판내의 섬유체적율은 아래와 같다.

$$v_f = \frac{l_{CF} \times \text{적층수} + l_C \times \text{적층수}}{l_c} \approx 25 [\%]$$

복합재료를 구성하고 있는 섬유와 수지의 물성값과 구해진 섬유체적율을 이용하여 적층판의 물성을 계산할 수 있다. 복합재료는 일반적으로 수지보다는 강화섬유가 대부분의 하중을 담당하기 때문에 본 연구에서는 수지의 물성을 고려하지 않으며 섬유의 강도와 강성을 이용하여 유리섬유/수지 직조판과 탄소섬유/수지 직조판의 강도와 강성을 계산하였다.

[강성]

$$E_{CF} : 72.4 \text{ GPa} \times 0.25 / 2 = 9.05 \text{ GPa}$$

$$E_C : 230 \text{ GPa} \times 0.25 / 2 = 28.75 \text{ GPa}$$

[강도]

$$\sigma_{GF} : 3.45 \text{ GPa} \times 0.25 / 2 \approx 440 \text{ MPa}$$

$$\sigma_C : 3.5 \text{ GPa} \times 0.25 / 2 \approx 440 \text{ MPa}$$

강성과 강도의 계산에서 그 값을 반으로 나눈 것은 직조판에서 섬유가 1방향과 2방향으로 거의 균등하게 나누어져 직조되어 있기 때문이다.

유리섬유/수지 직조판과 탄소섬유/수지 직조판이 같이 사용된 복합재료 적층판의 인장강성 E_c 는 아래와 같이 계산할 수 있다(이대길 외, 1998).

$$E_c = \frac{1}{l_c} \sum (E_{CF} \times l_{CF} \times \text{적층수} + E_{GF} \times l_{GF} \times \text{적층수})$$

복합재료는 균질재료와는 달리 동일한 재료로 구성된 구조물이더라도 적층순서에 따라서 인장강성과 굽힘강성의 차이를 가져올 수 있다. 구조물의 좌굴은 굽힘강성에 따른 영향을 받으며 적절한 적층순서는 인장강성에서의 손실이 없이 임계좌굴하중을 크게 증가시킬 수 있다. 판형의 구조물에 굽힘이 발생할 때에는 판의 좌우에서 가장 큰 변형율이 발생하므로, 복합재료 적층판의 경우 굽힘강성을 높이기 위해서는 변형율이 큰 외각부분에 강성이 큰 재료가 위치하도록 적층할 수 있다.

3. 1차 설계

1차 설계에 사용된 SAUV의 적층순서는 탄소와 유리섬유를 번갈아가며 5ply씩 8층으로 40ply를 적층하여, 전체 선체의 두께는 20mm, 선수부 매니플레이터 연결부의 각진 부분은 30mm가 되도록 하였다. 탄소섬유와 유리섬유가 차례로

적층된 1차 설계에서는, 구조해석을 단순화하기 위해 탄소섬유와 유리섬유의 복합재를 단일재로 치환하여 유효강성을 사용하였다. 유효 강성으로 계산된 단일층 혼합 복합재료의 강성(탄성계수)은 22.18GPa이었으며, 포와송 비 0.15, 강도(항복강도)는 440MPa이다.

3.1 구조해석(선형해석)

유효강성에 의한 유한 요소모델로 선형해석을 한 결과, Fig.3에서 보는 바와 같이 최대 변형률은 선수부의 모서리에서 발생하였고, 1차 주응력 방향에 대한 변형률은 최대 1840 $\mu\text{m}/\text{m}$, 2차 주응력 방향에 대한 변형률은 877 $\mu\text{m}/\text{m}$, 3차 주응력은 3차 주응력은 516 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이었다.

또한 최대응력은 약 63MPa이었으며, 최대응력 발생지점은 선수부의 좌우 모서리이었다. 그러나 선수부의 매니플레이터 부착부를 제외한 나머지 요소는 39MPa로서 약 1/2정도 작았다. 그러므로, 선형-탄성 구조해석 결과, 정적 수압이 작용할 경우, 모서리 부분을 충분히 보강한다면 400m하의 수압에서 1.5이상의 안전계수를 가질 것으로 보이나, 좌굴의 영향과 복합재의 층간분리, 기지파손등에 의한 파손 영역과 복합재료 사이의 사후피해등은 고려하지 않았다.

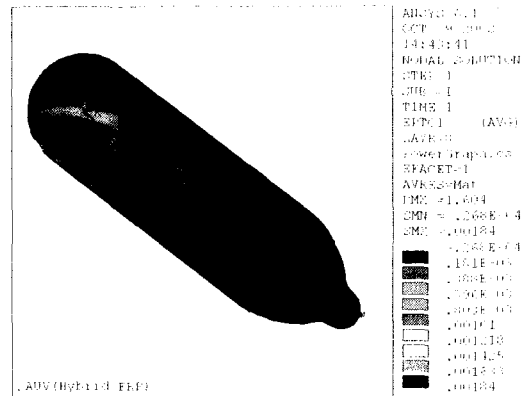


Fig. 3 1st Principle strain (1st Design)

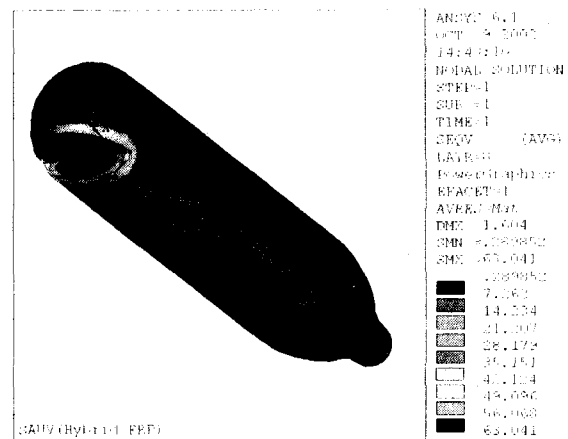


Fig. 4 Stress contour (1차설계)

3.2 내압 시험 및 결과 비교

내압 시험은 실제의 내압선체를 사용하여 국방과학연구소의 압력탱크에서 이루어졌으며, 시험은 5bar, 10bar, 12bar의 3차에 걸쳐 수행하였다.

스트레인 게이지의 부착위치는 Fig. 5와 같으며, Fig. 6에 구조해석과 내압시험의 변형률 값을 나타내었다.

내압시험에서의 작용압력이 5bar일 경우에는 구조해석과 같이 선수부 모서리에서 최대 변형률이 발생하였으나, 10bar와 12bar로 가압시에는 중앙 실린더에서 가장 큰 변형률이 발생하였으며, 1차 설계에 대한 내압시험에서의 붕괴는 이 부분에서 시작된 것으로 추정된다(Fig. 6, 7).

선형해석과 내압시험을 비교한 결과, 선수부 및 반구와 실린더가 만나는 지점에서의 응력값은 거의 같았으나, 내압 선체가 파손되기까지의 중앙 실린더 부분은 차이가 크게 남을 알 수 있다. 이는 좌굴에 의해 파손되기 시작한 것으로 보여지며 원통형 실린더의 경우, 직경에 비해 두께가 얇고(D/t), 길이에 비해 두께가 얇은(L/t) 원통형 실린더에서는 선형해석 뿐 아니라, 좌굴해석이 필요함을 나타낸다.

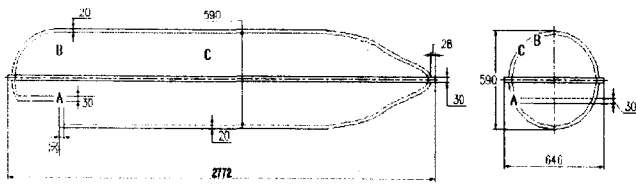


Fig. 5 Position of Strain Gage

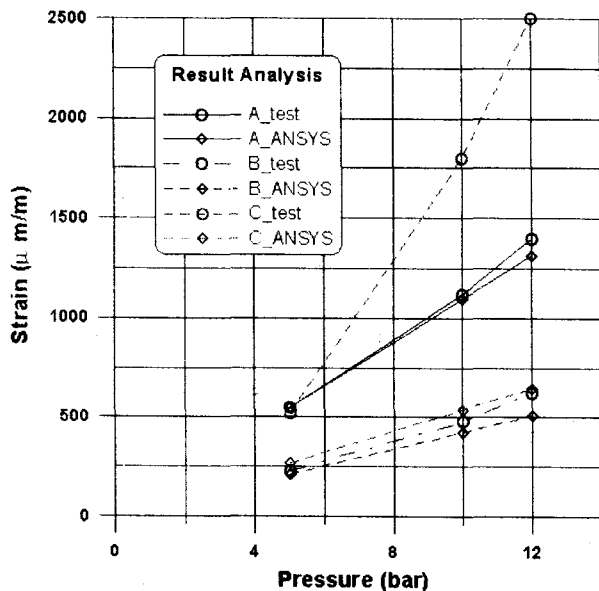


Fig. 6 Comparison of Pressure test with FEA (Strain, 1st design)



Fig. 7 Photo of Collapsed SAUV hull (1st design)

4. 2차 설계

2차 설계에서 사용된 SAUV의 내압선체의 두께는 전체 두께 20mm, 선수부 메니플레이터 연결부의 각진 부분은 30mm로서 1차 설계와 동일하나, 적층 순서는 1차 설계와 달리 탄소섬유와 유리섬유를 번갈아가며 적층하지 않고, 인장력과 압축력이 가장 크게 발생하는 적층판의 바깥에 강성이 큰 탄소섬유를 배치하고, 내부에 유리섬유를 배치하였다. 적층수는 총 탄소 7ply, 유리 33 ply, 탄소 7ply의 순이나 구조해석에서는 탄소와 유리 섬유를 각각 하나의 layer로, 총 3개의 Layer로 이루어진 층상 복합 재료로 단순화시켰다.

또한 2차 설계에서는 복합재의 정확한 구조해석을 위해서 적층 순서에 따른 물성치를 각각 입력할 수 있는 요소 (SHELL99, Linear layered structural shell)를 사용하여 구조해석을 실시하였으며, 1차 설계에서 나타난 중앙 실린더 부위의 좌굴현상을 고려하기위해 중앙의 원통형 실린더 부분에 대해 국부 좌굴 해석을 실시하였다.

4.1 선형해석

구조해석 결과, 최대 변형률은 1차 주응력의 방향이 가장 큰 값을 가지고 있으며, 탄소섬유층의 최대 변형률은 약 2036 μm/m ~ 2523 μm/m이었으며, 유리섬유층의 최대 변형률은 약 4853 μm/m이었다. 최대 응력의 크기는 탄소섬유층에서 64.82MPa ~ 84.19MPa이었고, 유리섬유층에서는 33.29MPa이었다. 최대 변형률과 최대응력이 나타난 내압선체의 가장 안쪽의 섬유층을 Fig. 8~9에 도시하였다. 최대응력은 1차 설계와 마찬가지로 선수부의 모서리 부위에서 발생하였으며, 하중을 직접 받는 외측벽면 보다 내측벽면에서 응력이 크게 나왔다. 선수부 모서리를 제외한 부분의 응력은 55MPa이하이었다.므로, 선형 탄성의 해석만 가지고 본다면, 선수부의 모서리 부분을 충분히 보강해주었을 경우, 정적인 수압만이 작용한다면, 선체는 수심 400m에서 안전계수 약 1.8을 가진다.

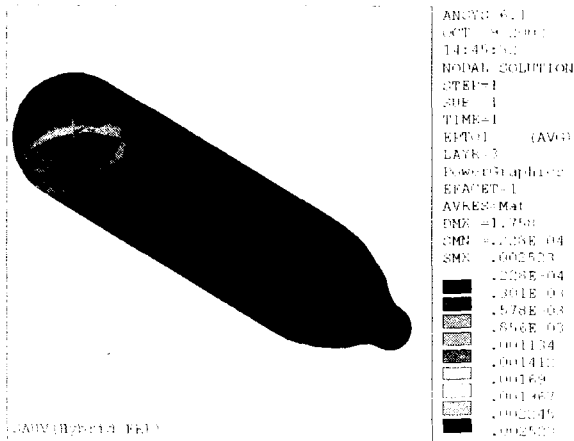


Fig. 8 1st Principle strain (2nd Design, 3rd Layer)

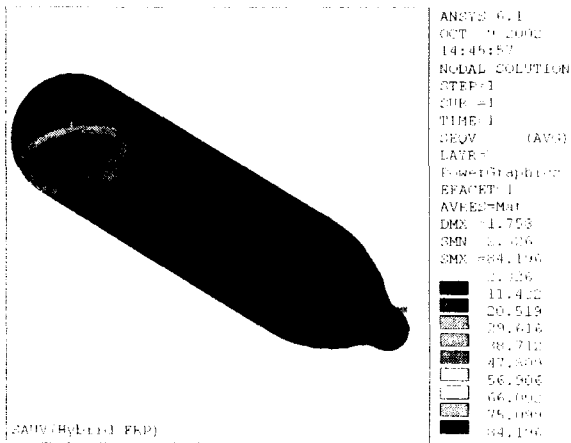


Fig.9 Stress contour (2nd design, 3rd layer)

해석 결과에 나타난 바와 같이 외압이 작용하는 경우에 대해서는 선체 내부의 응력이 크므로, 보강재는 선체 내부가 효과적이다.

4.1.2 내압 시험 및 해석 결과

2차 설계에 대한 내압 시험은 9차에 걸쳐 이루어졌으며, 작용하는 압력의 크기는 2bar에서 7bar까지의 선형-탄성구간이었다. 유한요소 해석과 내압시험을 비교한 결과, 선수부 모서리 부분을 제외하고는 유한요소 해석결과와 거의 일치함을 알 수 있었다. 선수부 모서리 부분의 차가 1차 설계와는 달린 것은 실제 모델에 제작 공정에서 이 부분을 충분히 보강하였고, 유한 요소로 모델링하기 어려운 라운딩이 되었으며, 두께의 크기를 서서히 변화시켜 강성의 크기가 크지않게 제작되었기 때문이다. 따라서 응력 집중현상이 나타난 유한요소 해석과는 잘 일치하지 않았다. 선수부 모서리 부분(A지점)을 제외한 부분은 구조해석 결과와 잘 일치하였다(Fig.10).

1차 설계와 2차 설계의 변형률은 B점에서는 거의 차이가 없었으나, 보강된 A점과 C점에서는 변형률이 약 1/2로 감소

하였다(Fig. 11).

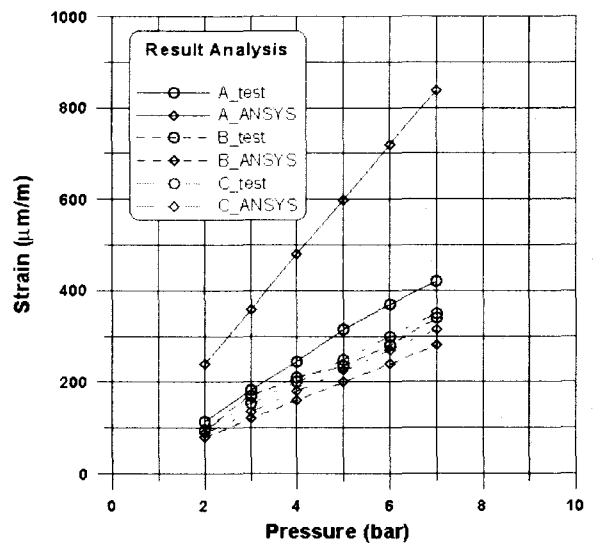


Fig. 10 Comparison of Pressure test with FEA (Strain, 2nd design)

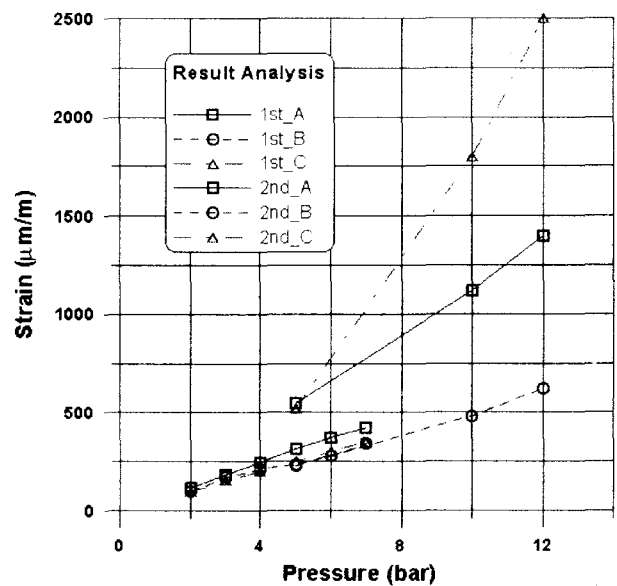






Fig. 11 Comparison of 1st Design with 2nd Design (Strain)

4.2 국부 좌굴 해석

SAUV의 내압선체는 전장 2772mm의 복합재 구조물이며, 중앙의 원통형 실린더 부분은 1684mm이다. 특히 원통형 실린더 부분의 D/t는 29.5, L/t는 84.2로서 박판이므로 좌굴에 의한 붕괴의 가능성이 높다(심장용 외, 1999).

원통형 실린더의 기본 좌굴 모드는 현상을 Table. 1에 4차 모드까지 나타내었다. 1차 모드는 병진운동을 하여, 탄성 좌굴이 발생하지 않는 모드이므로, 원통형 실린더는 기본 좌굴 모드에 해당하는 2차 모드에서 가장 붕괴되기 쉬운 것을 알 수 있으며, 원통의 붕괴 양식은 대칭적임을 알 수 있다.

Table 1. 원형 실린더의 좌굴 모드
(Buckling mode of Circular cylinder)

n	1	2	3	4
Buckling Mode				

국부 좌굴 해석의 Pre/Post processor는 MSC Patran을, Solver는 MSC Nastran을 사용하였다. 구조 해석을 위해 사용된 요소는 CQUAD4(4절점 판요소)이고, 요소수는 306개, 절점은 324개이다. 유한 요소 해석을 위한 경계조건은 한쪽 UY 끝단 고정이고, 하중조건은 단위하중 $1 N/mm^2$ 과 선수부의 반구에서 전달되는 압력을 절점에 가해지는 하중(약 $2.73 \times 10^5 N$)으로 치환하여 부여하였다.

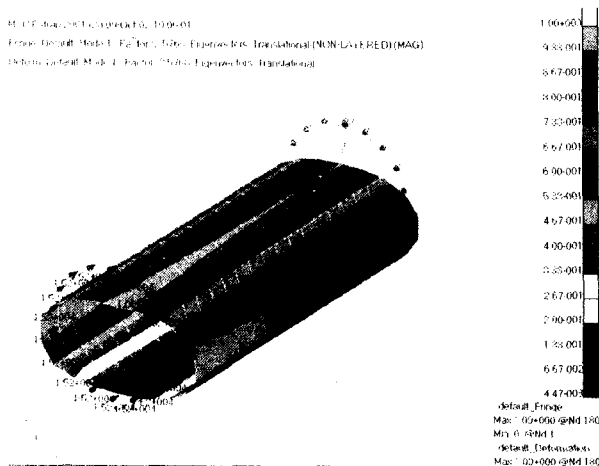


Fig. 12 Buckling Analysis of Local Structure
(Circular Cylinder)

유한요소 해석결과, 가장 붕괴되기 쉬운 2차 기본 모드에서 좌굴이 발생하였고, 원통형 실린더 부분의 좌굴하중은 약 $2.5 N/mm^2 (=25bar)$ 이었다.

5. 결 론

본 연구에서는 SAUV 내압선체를 유한 요소법을 이용한 선형해석과 선체 중앙의 원통형 실린더의 국부 좌굴해석을 수행하여 압력 시험값과 비교/분석하여 보았으며, 요약하면 다음과 같다.

1) 1차 설계에서의 내압선체의 파손을 경험으로 섬유 적층

순서와 수지를 바꾸고, 응력 집중부에 보강을 충분히 하여, 변형률이 약 2배 이하로 낮아졌다.

2) 선형해석에서는 1차 설계와 2차 설계 모두 수심 400m 하의 압력에서 안전한 것으로 보이나, 내압시험에서 1차 설계는 12bar에서 좌굴이 발생하여 붕괴되었고, 좌굴해석 결과 2차 설계의 내압선체는 최대 작업 수심으로 약 250m까지 안전할 것으로 보인다. 그러나 복합재의 특성과 제작 공정(핸드레이업)에서의 변수에 의해 최대 작업 수심은 더 낮아질 수 있다.

3) 두께에 비해 길이가 길고, 직경과 두께의 비가 큰 원통형 실린더 형상의 구조물은 선형 해석뿐 아니라, 좌굴 붕괴의 가능성이 높으므로 국부좌굴해석이 필수적이다.

4) 선형 유한요소해석 결과치를 내압시험의 결과치와 비교한 결과와 복합재료의 물성치를 부여하여 계산한 국부 좌굴 해석은 앞으로 복합재료로 만들어지는 해양장비 개발의 설계에 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- 홍석원 외(2000), "무인 잠수정의 운항제어 및 매니퓰레이터 기술개발", KRISO 연구소 보고서 UW00-904-2298 99-M-DU-21-C-01
- 이대길 외(1998), "복합재료 역학 및 제조기술", 시그마프레스
- 전의진 외(1995), "최신 복합 재료", (주)교학사
- 손호재, 박창수(2000), "잠수함 공학 개론", 대영사, pp 118~139.
- 장 석(1997), "조선산업 기술의 개발 방향", 조선공업 제172호 Vol.172, pp 42~49.
- 심장용, 우중식(1999), "심해용 압력용기에 대한 붕괴해석", 한국해양공학회지 13권 제4호, pp 82~97.