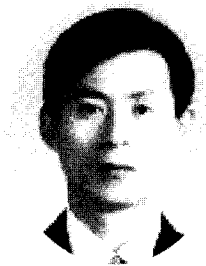


잠수함 기본설계 시스템(SUB-21)을 이용한 중형잠수함 설계 결과 소개



김 충 렬

· 1956년 4월 4일생
· 1979년 서울공대 조선공학과 졸업
· 현 재 : 대우조선해양 의장설계팀
· 연락처 : 055-680-2045
· E-mail : crkim@dsme.co.kr



이 성 근

· 1957년 5월 18일생
· 1992년 미국 오하이오주립대 공학박사
· 현 재 : 대우조선해양(주) 선박해양기술연구소 재직
· 관심분야 : 조선 IT, CAD/CAM
· 연 락 처 : 055-680-2049
· E-mail : sklee@dsme.co.kr

신면섭, 김일홍 / 조화중, 이원준, 우일국 /
김동수, 유민철
대우조선해양(주) 수중설계팀 / 선박해양기
술연구소 정보기술연구팀 / 설계기술연구팀

요 약

잠수함 설계는, 내압(耐壓) 성능 유지를 위해 효과적인 공간 활용이 어려운 원통형의 구조를 가질 뿐 아니라 제한된 공간에 다양한 장비들을 배치해야 하고, 수심 수백 미터의 극한 환경에서 3차원 운동을 하는 등의 환경 및 운용특성으로 인하여 수상 선박에 비해 많은 경험과 고난도의 기술들이 요구된다.

본문에서는, 해외의 우수한 대학 및 설계 기관과의 공동설계를 수행한 경험과 13년여에 걸친 장보고급 잠수함 건조기간 중에 수행한 수 차례의 역설계 과정 등을 통하여 습득한 설계 기술과 자료들을 바탕으로, 대우조선해양에서 자체 개발한 잠수함 기본설계 시스템(SUB-21)을 이용하여 수행한 중형잠수함 설계결과에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

본 SUB-21의 개발은 잠수함 기본설계의 핵심 과정인 배치, 선형개발, 저항, 추진, 조종 및 압력선체 설계뿐만 아니라 디젤발전기-축전기-추진전동기로 구성되는 추진계통의 최적화 과정을 실시간으로 처리할 수 있기 때문에 기본설계에 소요되는 시간을 획기적으로 절감할 수 있으며 기본설계 결과의 신뢰성 제고에 크게 기여할 수 있을 것이다.

1. 서 론

새로운 잠수함을 설계할 때는 제한된 원통형 공간 내부의 장비 배치 가능성을 설계 초기 단계에서부터 철저히 검토하면서 부력과 중량 및 길이 방향의 부심(浮心)과 중심(重心)이 일치되는지 확인해야 한다. 이런 과정들은 수상함에 비하여 더욱 다양한 장비를 탑재해야 하는 잠수함의 특성에 기인하는 것이며, 따라서 매우 방대한 작업이 된다. 이러한 계산 결과들을 즉시 검토해 가며 설계를 진행하기 위해서는 3차원의 부피를 가지고 있는 설계 모델을 컴퓨터에 저장하여 설계 변경에 유연하게 대처하도록 해야 한다.

SUB-21은 CAD를 이용하여 잠수함의 형상을 구체화하는 '형상정의 시스템'과 잠수함의 설계 과정에서 생성된 방대한 분량의 각종 데이터를 관리하고 계산을 수행하는 '기본설계 데이터 관리시스템'으로 구성되어 있다.

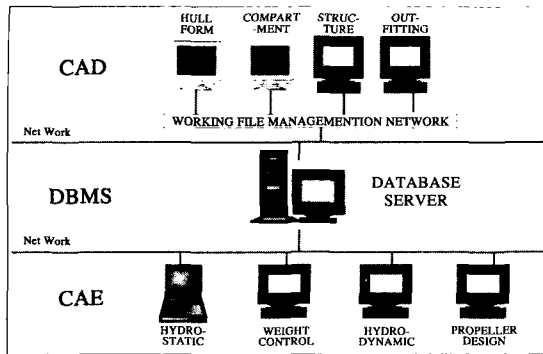


그림 1 잠수함 기본설계 시스템(SUB-21) 구성도

또한 기본설계 과정을 일관화 하기 위하여 관련 독립 프로그램들과 연계되어 있다. <그림 1>은 SUB-21의 전체 시스템 구성도를 보여주는 그림이며 주요기능들에 대해서는 아래 <표 1>에 간략하게 요약하였다.

표 1 SUB-21 주요기능

- ◆ 기본 제계산 (유체정역학 계산 포함)
- ◆ 중량 관리
- ◆ 의장품 및 구조부재들의 배치 설계
- ◆ 압력선계 최적 설계 (프레임 간격/중량 최적화)
- ◆ 추진계통 최적화 (추진모터 / 축전지 등)
- ◆ 프로펠러 설계
- ◆ 조종성 시뮬레이션 (모형 시험전 선행 개발)
- ◆ 설계 정보의 체계적인 관리

SUB-21에 적용된 주요 기술들은 <표 2>와 같이 요약할 수 있다.

잠수함 기본설계 과정에서 일부 주요 장비의 위치를 변경하거나 선행을 변경할 경우 기존의 설계 방법으로는 one(1) 사이클 수행시 최소 60 man-month 이상 소요되나, SUB-21과 같은 디지털 Mock-up 기능이 뛰어난 파라메트릭 모델링 개념을 지닌 CAD 시스템과 설계 도중 생성되는 대량의 데이터를 원활하게 관리할 수 있는 관계형 데이터베이스 시스템을 기반으로 하는 통합 시스템을 사용하면 수 man-month로 one(1) 사이

표 2 SUB-21에 적용된 주요 기술

- ◆ 기 확보 잠수함 설계기술 응용
생산 경험 + 설계 연습 + 해외 연수
- ◆ 제품 모델링 기술
3차원 솔리드 제품 모델
Parametric Design (파라미터 변경으로 2D 양한 영상 구현)
Conditional Macro (매크로 프로그램으로 다양한 출력)
도면 자동 생성 프로그램
- ◆ 데이터베이스 구축 기술
성능 향상을 고려한 관계형 데이터베이스 구축
(모든 설계 변경이 실시간으로 출력 가능)
CAE 계산 기능 구축
연계 프로그램용 데이터베이스 자동 작 성

클을 수행할 수 있어 기본설계 기간을 획기적으로 단축할 수 있을 뿐만 아니라 설계 결과의 신뢰성을 더욱 증대시킬 수 있다.

당사가 SUB-21을 성공적으로 개발 완료함으로써 <표 3>과 같은 유형 및 무형의 효과를 거둘 수 있게 되었다.

표 3

- ◆ Software 도입 대체효과
도입비 약24억, 로열티 약100억/년 ('96년도 기준)
- ◆ 자체 설계 능력 확보 입증
- ◆ 잠수함 기본설계 기간 단축 가능
- ◆ 다양한 설계 변경 요구에도 신속한 대처 가능

2. SUB-21을 이용한 중형 잠수함 기본설계 결과 소개

본문에서는 SUB-21을 이용하여 설계한 결과들 중에서 주요한 몇 가지를 예를 들어 설명하고자 한다.

가. 부력(Buoyancy) 및 배수량(Displacement) 계산

수상 선박의 경우 배수량 계산은 선행 정보만으로도 족하지만, 잠수함의 경우에는 수상함에 비해 비중이 매우 큰 부가물의 영향을 최대한 반영하기 위하여 수중 배수량 계산과 상세 부력 계산을 각각 수행하고 부력 계산서를 기준으로 수중 배수량 계산 결과를 보완하는 과정을 거쳐야 한다.

잠수함에서는 공식적으로 수상배수량과 수중배수량이라는 용어를 사용하고 있다. 수상배수량은 잠수함이 장기간의 작전 수행을 위하여 무장, 연료유, 식량 등 모든 물품을 완전하게 적재한 상태에서 메인 밸러스트 탱크만 채우면 중성부력과 제로트림 상태로 잠수할 수

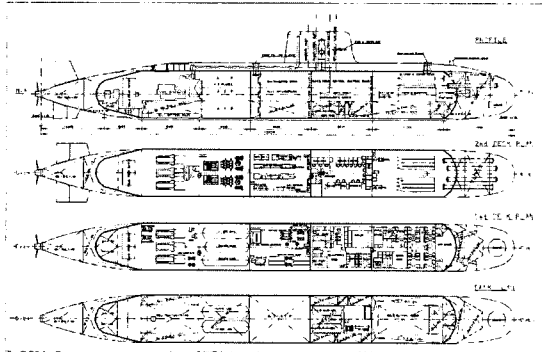


그림 2 대우 중형잠수함 일반배치도

그림 3 상세부력(Detailed buoyancy) 계산서

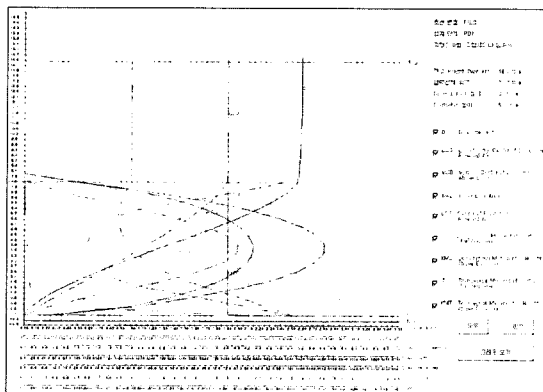


그림 4 수중배수량 곡선도(Curves of Submerged Displacement)

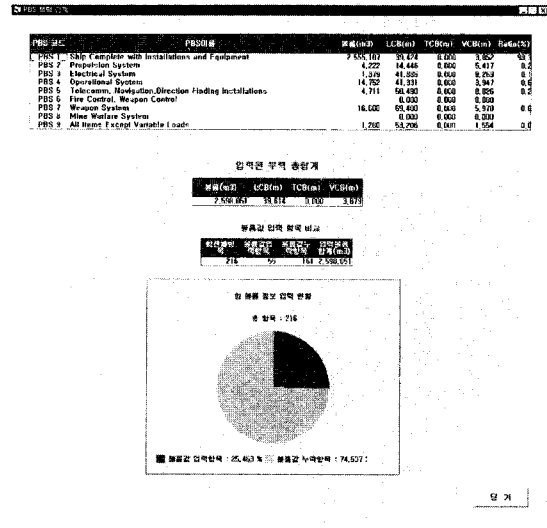


그림 5 부력 계산결과 종합(Buoyancy Summary Table)

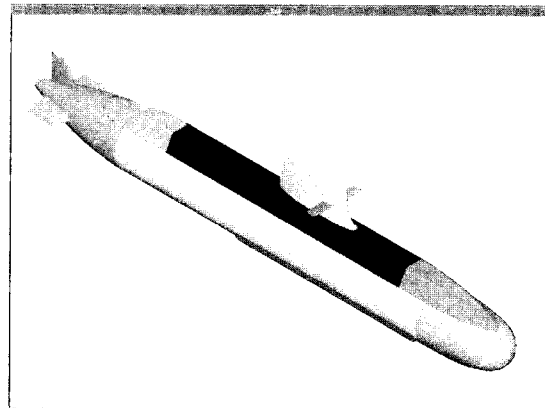


그림 6 외부형상 솔리드 모델

있도록 조정된 상태의 총 배수체적 또는 중량을 말한다. 또한 수중배수량은 수상배수량에 메인밸러스트 탱크의 실체적을 합한 수치를 나타낸다.

데이터베이스상의 정보를 종합하여 수중배수량을 계산한 후 <그림 3>과 같은 상세부력 계산서를 비롯하여 <그림 4>와 같은 수중배수량 곡선도를 작성하고 또한 <그림 5>와 같은 부력 계산결과 종합표를 작성하였다.

<그림 6>은 중형잠수함의 외부형상 솔리드 모델이며 이 모델을 이용하여 <표 4>와 같은 저항, 운동 및 조종성능 해석에 사용되는 형상배수량, 침수표면적 및

표 4 외부형상 계산 결과

중심	형상배수량	3497.7m ³
	길이방향 (함미 기준)	40.804m
	높이방향 (기선 기준)	4.276m
	침수표면적	2082.8m ²

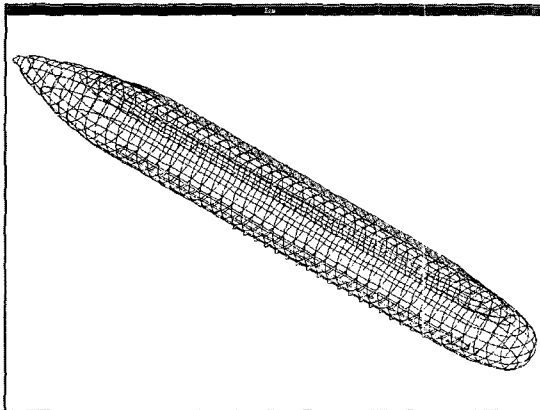


그림 7 외형 선도(線圖)

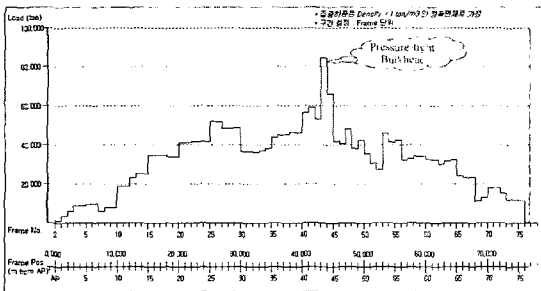


그림 8 중량분포 곡선도(Weight Distribution Curve)

중심위치 등을 계산하였다.

〈그림 6〉은 부피를 가지고 있는 모델이므로 이로부터 등간격으로 분할하여 선도(Lines Plan) 출력에 필요한 〈그림 7〉과 같은 선체 외형 선도를 작성하였으며 사용자의 필요에 따라 임의의 선도를 자동 출력하게 된다.

나. 중량 계산(Weight calculations)

데이터베이스 정보를 종합하여 상세중량 계산서를 출력할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 형식의 중량 계산서와 〈그림 8〉과 같은 중량 분포 곡선도를 작성할 수

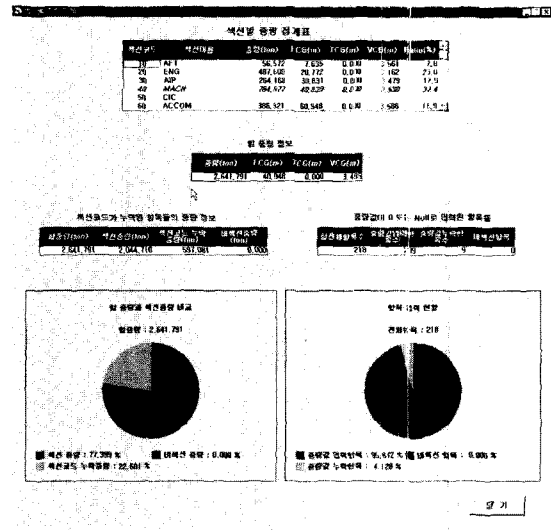


그림 9 섹션별 중량 종합표(Section Weight Summary Table)

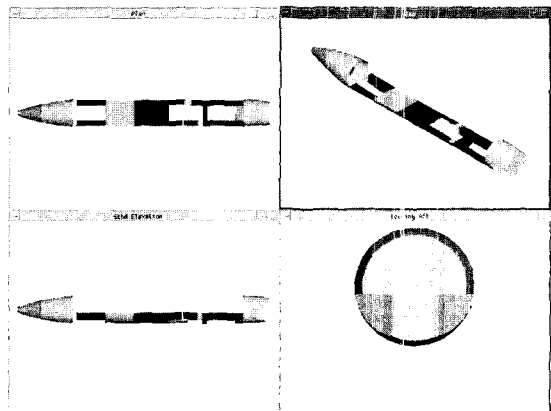


그림 10 선체분할면 및 구획 모델링 결과

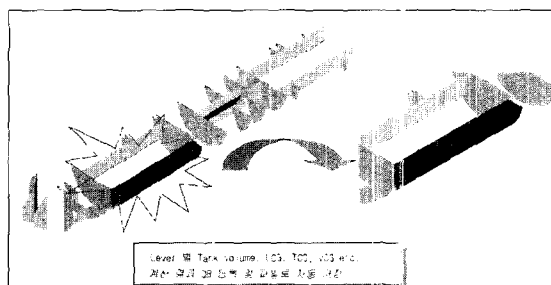


그림 11 탱크체적 계산 수행과정

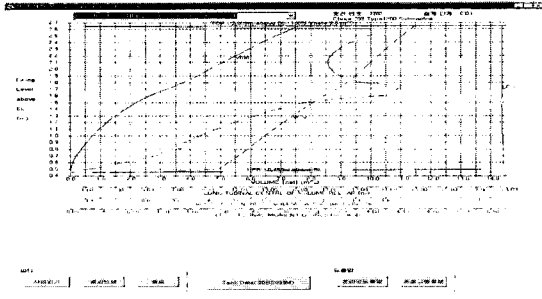


그림 12 탱크체적 곡선도(Tank capacity curves)

있다. 또한 잠수함의 크기를 객관적으로 비교하기 위한 표준배수량을 계산할 수 있다. <그림 9>는 건조 중 각 섹션별 중량을 파악하기 위해 작성된 섹션별 중량 계산결과와 종합표를 보여주고 있다.

다. 구획 배치(Compartment Arrangement)

<그림 10>과 같은 탱크 분할면 및 구획 모델링 작업 수행 후 탱크 체적 계산 프로그램을 실행하면 <그림 11>과 같은 계산 수행 과정을 거쳐 계산 결과들이 데이터베이스에 실시간(Real Time)으로 자동 저장되며, 사용자는 필요에 따라 특정 탱크의 계산 결과를 불러온 후 <그림 12>와 같은 탱크체적 곡선도를 작성할 수

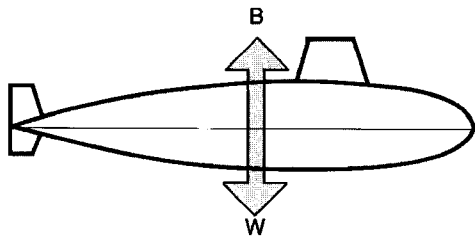


그림 13 중성부력(Neutral Buoyancy) 상태

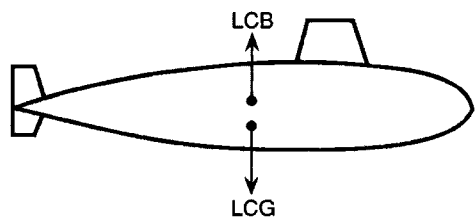


그림 14 제로트림(Zero Trim) 상태

표 5 균형설계(Balance Design) 평가 결과

부력	2647.4톤	종방향 부심	39.614m
중량	2456.1톤	종방향 중심	40.094m
납 밸러스트 소요량	191.3톤	납 밸러스트 중심	33.418m

있다. 또한 계산된 모든 탱크 및 구획의 체적과 중심 계산결과를 종합한 표가 실시간으로 자동 저장된다.

라. 종 방향 균형(Longitudinal Balance) 검토

<그림 13>과 같이 부력(B)과 중량(W)이 일치하여 중성부력 상태를 유지할 수 있는지 또한 <그림 14>와 같이 길이 방향의 부심(浮心)과 중심(重心)이 동일 연직면 상에 있게 되는지 확인하는 과정이다. 부력과 중량 계산 결과 및 부심과 중심 위치 계산 결과를 비교하여 <표 5>와 같이 고정 밸러스트 적재량 및 적재 위치를 계산한다. 고정 밸러스트의 중량에는 상설설계 및 건조단계에서의 중량 여유값이 포함되어 있다.

마. 정적 안정성(Static Stability) 계산

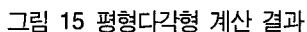
정상 수상상태, 즉 다이빙 트림 상태에서의 정적 안정성(GM)은 중량 계산 결과와 배수량 계산 결과를 근거로 평가하며, 또한 수중상태의 정적 안정성(BG)은 중량 계산 결과와 부력 계산 결과를 근거로 계산한 후 <표 6>과 같이 관련 규정을 기준으로 규정 만족 여부를 평가한다. 필요할 경우 부상 또는 잠수 과정 중 순간적인 위험성이 잠재된 천이상태에서의 안정성 해석을 수행할 수 있다.

표 6 수중 및 수상 안정성 평가 결과

항목	적용규정	설계 결과	비고
수중안정성	320mm	383mm	만족
수상안정성	200mm	309mm	만족

바. 평형다각형(Equilibrium polygon)

설계 중인 잠수함이 life time 동안 직면할 가능성이 있는 아주 극단적인 하중 조건들(Load cases)을 가정한 후 이 상태에서 중성부력과 제로트림 상태를 유지



잠수함의 평형다각형을 평가할 때 운용범위(Operating range)의 결정이 매우 중요하다. 즉, 작전 해역 또는 잠수심도가 변경되면 수온 및 염도 등이 변화하게 되며, 결국 해수밀도가 바뀌게 되므로 잠수함의 운용범위는 중량 보상능력과 매우 밀접한 관계를 갖는다. 기준 해수밀도를 함수에 근접하게 낮출 경우 함 내부에 사용 빈도가 매우 낮은 잉여공간이 있어 필요 이상 커지게 되며 이로 인한 추진계통 등의 용량증가가 발생한다.

압력선체 설계는 주어진 잠수 깊이에서의 설계압력에 대해 링프레임으로 보강된 Cylindrical Shell의 구조체계가 최소 단면적으로 저항할 수 있도록 프레임 간격, 외판 두께, 프레임 높이 및 두께, 플렌지 폭과 두께 등을 변수로 하고 최소 중량을 목적함수로 하여 응력 및 허용 진원도 공차를 만족하는 최소 구조치수를 도출하는 과정이다.

경 7.6m에 대하여 약 11mm) 이내여 들어야 한다. 따라서 설계단계에서부터 건조 중 변형을 최소화하기 위한 철저한 대책을 세워야 하며, 특히 압력선체에 대해서는 100% 비파괴 검사(NDT)를 수행하는 등 엄격한 품질관리를 통해 결함을 완벽하게 제거하여야 한다.

〈그림 16〉은 당사에서 개발한 압력선체 최적설계 프로그램을 사용하여 중형잠수함의 압력선체 강도를 계산한 결과를 보여주고 있다. 압력선체 원통형 부분에 대한 계산 결과를 요약하면 〈표 7〉과 같다.

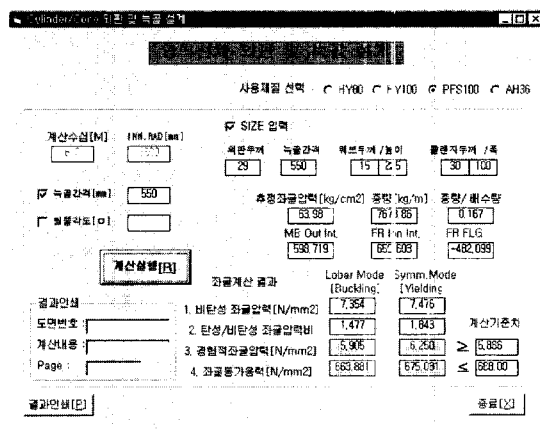


그림 16 압력선체 설계 프로그램 실행결과

표 7 압력선체 최적설계 결과

느골 간격	외판 두께	느골 치수	중량	전체 중량	느골 수량
550 mm	29mm	225×15 + 100×30mm	7,674 kg/m	433톤	100개

◆ 저항 계산

외부 형상 정의결과[그림 6 참조]로부터 유체동력학 성능해석에 필요한 선형 정보를 유체 해석 전용 프로그램으로 전달하여 <그림 17>과 같은 프로펠러면에서의 반류분포도 등 프로펠러 설계에 필요한 데이터를 쉽게 얻어낼 수 있다.

당사에서 개발한 선박 프로펠러 설계를 위한 통합
엔지니어링 시스템인 ProdesWin에 SUB-21에서 도출

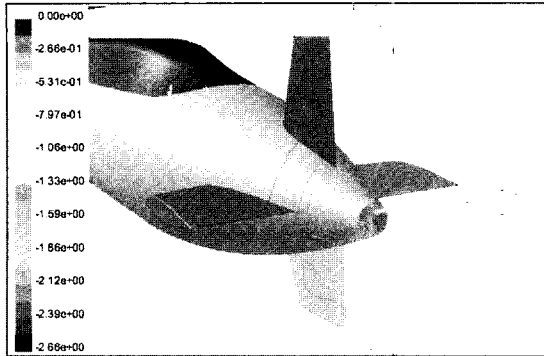


그림 17 프로펠러면에서의 축 방향 유속 분포

된 결과와 모형시험 결과 등을 입력하면 최적의 성능을 보유한 프로펠러를 설계할 수 있다.

ProdesWin은 1999년도 후반 윈도우를 기반으로 하고 프로펠러 설계 중 3차원 형상 가시화 필요성, 설계 데이터의 체계적인 입출력 관리 및 방대한 각종 해석용 시험 데이터 관리의 필요성에 따라 개발되었다. <그림 18>은 ProdesWin을 이용하여 본 함 프로펠러를 설계하는 과정이며, <표 8>은 설계결과를 보여주고 있다.

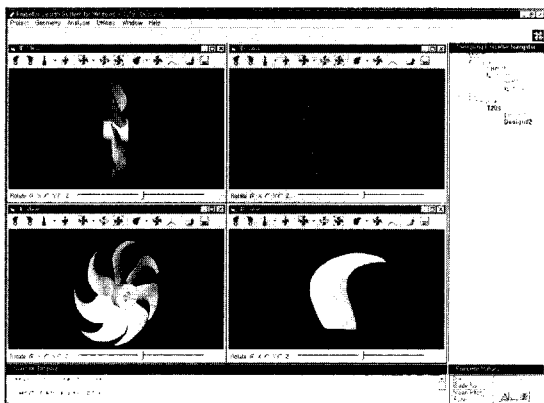


그림 18 ProdesWin을 이용한 프로펠러 설계 과정

표 8 프로펠러 설계결과

직경×날개수	3.95m×7	스쿠각	33.6°
피치비	0.9695	설계 마력	4100kW
전개면적비	0.6957	속력×회전수	20.4노트×150RPM

◆ 추진 계통 최적화 설계

디젤 전기추진 잠수함의 경우 추진계통 장치 (디젤 엔진, 발전기, 축전기, 추진전동기 및 관련 제어반)가 압력선체 체적의 50% 정도를 점유하기 때문에 잠수함의 크기를 결정할 때 ROC(Required Operational Capability)를 충족시키는 범위 내에서 최적화해야 한다.

당사는 연료량, 발전기 용량 및 축전기 용량과 수량을 산출하는 등 추진계통 관련 장비의 적정한 용량을 산출하고 항속거리 분석 과정을 전산화함으로써 설계 기간을 단축하고 설계 변경시 신속하게 대응할 수 있는 프로그램을 개발한 후 SUB-21에 연계하여 편리하게 사용할 수 있도록 하였다. <그림 19>는 많은 계산 출력결과들 중의 한가지이다.

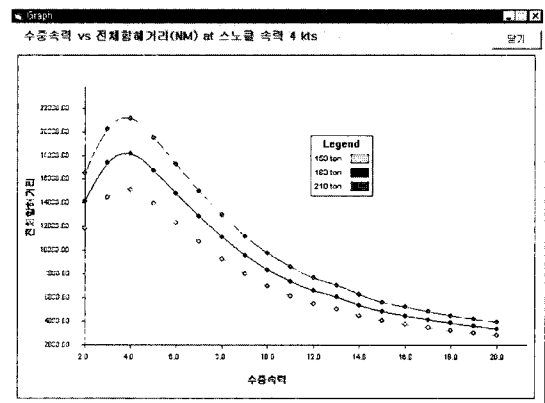


그림 19 수중속력 vs. 전체 항속거리 (스노클 속력 4노트)

자. 조종성능(Maneuverability)

당사는 1998년 잠수함이 수중항해를 할 때 함수와 함미 수평타, 함미 수직타의 제어 및 추진력의 변화에 의한 6자유도 운동 모습과 항적을 화면상에 3차원으로 구현하는 프로그램을 개발했다.

<그림 21>은 실선 조종성 시운전 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 SUB-21의 설계결과와 실선 실험결과가 매우 유사한 것으로 보아 SUB-21의 설계결과를 신뢰할 수 있다고 판단된다. 따라서 현재 당사에서 추진 중인 중형잠수함 조종성능 관련 모형시험이 완료되면 설계

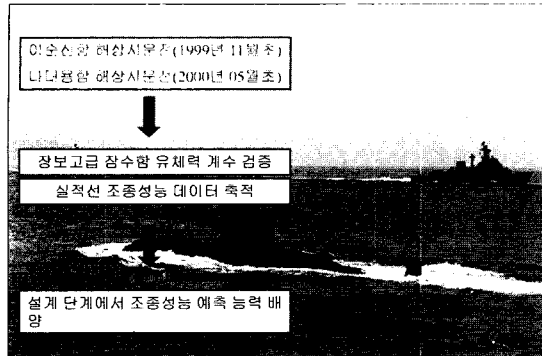


그림 20 실선 조종성 시운전 시험

단계에서의 본 중형잠수함의 조종성능을 정확하게 예측할 수 있을 것이다.

3. 최적 선형 개발을 위한 모형시험

당사는 2001년 초부터 중형 잠수함 선형 개발계획을 수립하고 한국 해양연구원과 공동으로 모형시험을 수행하고 있다. 지금까지 소개한 SUB-21을 이용하여

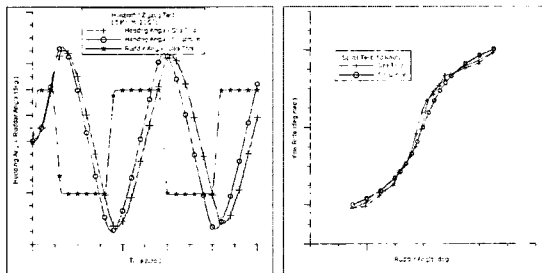


그림 21 실선 시운전 결과와 시뮬레이션 결과 비교

설계한 중형잠수함 기본 선형을 이용하여 1차 기본선형 평가 시험을 완료한 후 현재 선형 최적화를 위한 시험과 연구를 계속 수행하고 있으며 이어서 설계 프로펠러 시험, 유동장 계측시험, 캐비테이션 측정시험 및 조종성능 시험 등이 진행될 예정이다.

잠수함 모형시험은 수상선박과 시험 항목에서는 유사하지만 척도효과 및 제한된 체원을 갖는 예인수조에 서 자유표면 효과를 완전하게 소거한 결과를 도출하는 작업 등은 많은 시험 경험과 연구결과로부터 축적된 데이터베이스뿐만 아니라 실선 시운전 결과 등이 필수적으로 요구된다. 해양연구원은 이를 위해 기존의 축적된 기술을 기반으로 하고, 또한 당사에서 건조한 장보고급 잠수함에 대한 실험을 선행함으로써 신뢰할 수 있는 중형잠수함 모형시험 결과가 도출될 것으로 기대하고 있다.

4. 결 론

SUB-21의 성공적인 개발과 이를 이용한 대우 중형 잠수함 설계 결과는 당사가 13여 년간 잠수함을 건조하는 동안 자체 설계 능력을 확보하기 위해 끊임없이 추진해 온 노력의 결실이라고 평가할 수 있다.

이와 같이 당사는 잠수함 설계 및 건조기술력을 유지 발전시킴으로서 잠수함 선진 생산업체로서의 위상을 제고시키고, 아울러서 주변 강대국 해군과 경쟁하게 될 한국 해군 고유 모델의 중형잠수함 탄생을 앞당길 수 있는 발판을 구축하기 위하여 최선을 다하고 있다.