

어선용 물제트 추진장치의 개발 현황

서 정 천/서울대학교 조선해양공학과/RIMSE

요 약

소형 어선의 조업 환경을 개선하고자 하는 선주와 어민 입장에서 연안에서 빈번히 발생하는 그물 걸림이나 충돌시 손상이 적은 추진장치를 저렴하게 공급받기를 원한다. 어선의 고속화 및 뉴시전용선 개발 추세에 부응하여 어선용 소형 물제트 추진장치의 특성을 파악하고, 시스템의 개념 설계, 시제품 제작과 시운전 시험을 통하여 실용화 가능성을 검토하였다. 어선의 저항 감소, 캐비테이션 억제 등과 관련된 한계 기술을 개발하는 후속 연구가 진행되고 있다.

1. 배 경

연안 조업 환경을 개선하고자 하는 선주들의 욕구에 부응하여 보다 빠르고 안전하면서 제반 성능이 우수한 어선을 건조하려는 분위기가 고조되고 있다. 기관과 추진장치를 선정할 때, 초기 투자비, 관리비, 운항비 등 경제적인 요소와 편의성, 안전성, 안락성 등 기본 성능을 고려하게 된다. 조업 목적과 함께 다양한 부차적인 기능을 모두 충족시키기에는 상충되는 설계 조건이 따르게 된다.

일반 나선형 프로펠러(screw propeller)를 추진장치로 채택하여 선속을 높일 목적으로 기관 마력을 높이면, 기관 중량과 연료 적재량이 함께 증가하게 되고, 최적 프로펠러의 크기가 커진다. 따라서, 배의 저항 증가, 프로펠러축의 침수깊이의 제한, 프로펠러 날개의 손상 가능성 증가 등 오히려 역효과가 발생하면서 투자대비 추진 성능이 떨어지는 경우가 있다. 어선을 직

접 관리·운영하는 어민 입장에서는 선구상에서 구입하는 일반 프로펠러 대신에 어선의 운항 환경과 특성에 적합한 특수 추진장치를 저렴하게 공급받기를 원하고 있다. 또한 연안해역에 산재된 폐어망 등 해상 부유물에 의하여 추진장치가 손상되는 문제점이 해결되기를 희망하고 있다.

이러한 요구에 적합할 것으로 예상되는 어선용 물제트 추진장치에 대하여 그 실용화 가능성을 검토할 목적으로, 어선용 특수 추진장치에 대한 일반적인 특성을 파악하고 소형 물제트 추진장치의 시스템 설계에 대한 방향과 기술 현황 및 개발 전망을 기술하고자 한다[1].

2. 어선용 추진장치

2.1 소형 특수 추진장치의 특성

소형 어선에 가장 보편적으로 쓰이는 추진장치로 선외기인 스텐 드라이브 시스템이 있다.

조타가 용이하도록 킬러 및 유압 방식으로 선외기 본체를 움직이도록 되어 있다. 외국으로부터 전량 수입에 의존하기 때문에 구입비와 연료비가 비싸다는 단점이 있다. 국내에서도 다판 유압 글러치가 장착된 150마력급 디젤 아웃 드라이브를 개발하여 실용화 단계에 이르고 있으나[2], 기관 본체는 선체 바닥에 고정되기 때문에 선미 장착형 선외기로 채택하기에는 부적합하다.

고속 운항시 프로펠러의 캐비테이션 발생을 최소화하여 추진 성능을 향상시키는 방안으로써 부분노출 프로펠러가 소형 고속선에 이용되고 있다[3][4]. 부분노출 프로펠러는 회전하는 동안에 해수면 위로 노출된 날개 일부가 해수면 아래로 다시 진입하면서 공기가 함께 유입된다. 유입된 공기가 날개 주위를 둘러싸게 되어 공기 공급상태(ventilation)의 공기층을 만들어 (그렇지 않으면 프로펠러에 발생하는 캐비테이션으로 인하여 유발될) 추진효율을 저하, 침식을 회피하려는 목적에서 개발된 추진장치이다. 통상적으로 한바퀴 회전하면서 추력의 변동폭이 크며 운항조건에 따라 기관 부하와 추진성능이 민감하게 변하여 방사 소음이 크다는 단점을 갖고 있다. 이 단점을 개선하기 위하여 공기공급터널형 프로펠러(ventilated propeller in tunnel)를 낚시용 요트, 경비정에 적용하곤 한다[5]. 이는 트랜섬 선미부 선체 바닥에 위치한 터널에 공기를 강제로 유입시키고 그 속에서 부분노출 프로펠러를 작동시키는 시스템이다. 발표된 시운전 시험 자료에 의하면 고속 운항시에 낮은 연료소비율로 높은 추진 성능을 보이고 있다. 공기 대신에 기관 배기가스를 사용하는 경우에는 배기가스 공기오염 문제를 부수적으로 해결하는 효과를 얻을 수 있다.

유사한 장치로써, 저속에서 대기로부터 공기가 프로펠러 날개로 유입되는 것을 방지하면서 선미로부터 프로펠러로 유입되는 물의 흐름을 원활히 할 목적으로 터널형 방지판을 설치하고 부분노출 프로펠러를 작동시키는 'surface drive' 시스템이 있다[6]. 일명 'SARO drive'로 알려진 이 시스템의 작동 원리를 착안하여

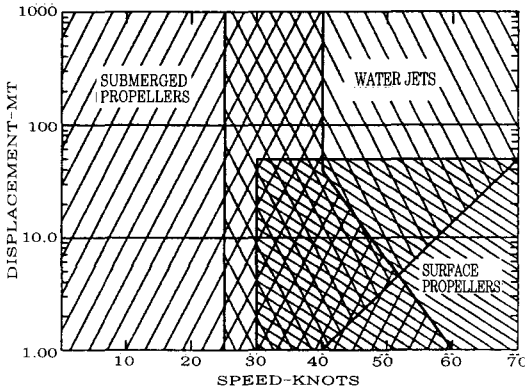
국내에서도 선미에 터널형 공간부를 가지는 추진장치를 개발하여 적용하고 있다[7].

이밖에도, 연직축 모터형(vertical axis motor) 물제트 추진장치를 천수역 수조에서 모형시험을 실시하여 배수량형 대형선박에도 물제트 추진장치를 적용할 수 있는 가능성을 보였다. 또한 스티븐 드라이브와 물제트 추진장치의 기능을 둘다 갖춘 소형 선외 물제트(outboard waterjet) 추진장치가 개발되고 있다[8][9]. 이 장치는 임펠러의 작용에 의하여 취수구로부터 거의 연직 상태로 물을 흡입하여 약 270도 굴곡된 관로를 통과하면서 정류 작용을 거쳐 원하는 방향으로 분사하는 특징을 갖고 있다.

국내 수요가 확대되면서 물제트 추진장치에 관한 연구가 국내 연구기관에서 1990년 이후에 지속적으로 진행되어 왔다. 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(KRISO)에서는 공기공급과 물제트 기능을 함께 활용한 공기유입 물제트 추진기(ventilating waterjet propulsor)를 제안하였다[10]. 초고속선의 추진기로 새로이 주목받고 있는 이 장치는 공기공급을 통하여 공동(캐비테이션) 내부로 유입된 공기가 캐비테이션 붕괴시 완충작용을 하여 충격압력을 줄이는 효과를 갖게 되어 진동, 소음, 침식을 회피할 수 있는 장점이 있다. 2001년에 이르러 중대형 물제트 추진장치의 실용화 개발 사업이 본격화되고 있다.

2.2 어선용 물제트 추진장치의 특성

물제트 추진장치는 하나의 추진시스템으로 전진, 조종, 후진, 선회 등 다양한 성능을 발휘한다는 점을 중시하여 고속선에 급속히 보급되는 추세이다[11]. 초기 투자비가 과다하고 중량이 무거우며 저속에서는 추진효율이 일반 프로펠러의 효율보다 낮다는 단점 때문에 물제트 추진장치는 선속이 20~25노트 이상인 선박에 적용되어 왔다[12](참조 <그림 1>). 초고속 운항, 작은 선회 반경, 급가감속의 조종 성능, 소음과 진동 저감, 과부하 감소, 천수역 운항 등 기존의 프로펠러에 비하여 여러 장점이 있다[13](참조



〈그림 1〉 선속/배수량에 따른 추진장치 선정기준(3)

〈표 1〉). 외국으로부터 수입된 물제트 추진장치를 장착한 어선이 있으나, 기존 추진장치에 비하여 구입비가 고가이고, 구조가 복잡하여 유지·관리비가 비싸기 때문에 수입을 꺼리는 실정이다. 간단하면서도 저렴한 어선용 소형 물제트 추진장치의 국내 개발을 희망하고 있다. 전반적으로, 일반 나선형 프로펠러의 단점을 해소하여, 어선의 추진장치로서 물제트 추진장치를 선택하는 것이 유리할 것으로 판단되며, 국산화 개발을 통하여 초기 투자비용의 감소와 회수방안을 충분히 반영할 수 있을 것이다. 최근에 선미 장착형 소형 물제트 추진장치에 관한 연구가

시작되면서 어선용으로 활용하려는 개발 사업이 진행되고 있다[14][15]. 연안 해역에서 이동이 잦은 국내 어선용으로 적합한 시스템을 구성하여 실용화되는 경우에, 어선의 성능 향상뿐만 아니라, 양식어장에 피해를 주지 않고, 추진장치의 손상으로 인한 어선의 표류를 상당히 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

2.3 시스템 구성의 기본 방향

이론 및 성능 해석, 펌프 및 입구의 설계 개념, 경험식, 실선 사례 등 물제트 추진장치에 관하여 종합적으로 검토한 자료 [11]을 토대로 하여 다음과 같은 설계 지침을 정하였다. 보다 자세한 설명은 문헌 [13][14][15]를 참조하기 바란다.

- (1) 중량을 최대한 적게 한다. 요구되는 추력을 내면서 최대 효율이 되는 출구 노즐의 물제트속도와 노즐면적이 결정되는 경우에는 관로 크기가 커져서 전체 시스템이 매우 무겁게 된다. 크기를 줄이고 제트 속도를 높여서 그로 인한 효율과 중량간의 타협을 통하여 추진장치의 크기를 결정하는 것이 바람직하다.

〈표 1〉 물제트 추진장치의 일반 프로펠러에 대한 특성 비교

항 목	일반 프로펠러	물제트 추진장치	물제트 추진장치의 특성
친 수 역 운 항	불 리	유 리	· 그물, 부유물 등에 의한 걸림 감소
효 율	저 속	유 리	· 20~25노트 이상의 고속선에 적합
	고 속	불 리	
진 동 / 소 음	불 리	유 리	· 단축과 차폐에 의한 진동/소음의 감소
건 조 공 정	불 리	유 리	· 선체와 분리 건조 공정 가능
조 타 성 능	불 리	유 리	· 협소한 해역에서 선회 가능
초 기 투 자 비	유 리	불 리	· 운항 성능개선으로 투자비 회수 가능
기 관 배 치	불 리	유 리	· 선미 기관실에 따른 일반 배치의 용이
보 수 관 리	유 리	불 리	· 유압장치 계통 선내에서 점검 가능
중 량	유 리	불 리	· 조타/후진장치의 경량화 개발 가능
저 항 성 능	불 리	유 리	· 수면하 부가물의 저항 감소

- (2) 적당한 펌프 형식을 선택한다. 출구 노즐의 제트 속도는 높이고 임펠러 크기는 작게 선정하면서 제작, 선체 상호작용, 캐비테이션, specific speed, 내부 손실 등 성능 요소를 고려하여 혼합형, 축형, 축유기형중 적당한 펌프 형식을 선택한다.
- (3) 선미에 장착할 연직 위치를 감안한다. 출구 노즐에서의 제트 분사는 수선면 바로 위에서 이루어지는 것이 바람직하다. 조종, 후진용 버킷(bucket)이 물 속에 잠기는 경우에 선미 트림에 의하여 저항이 상당히 증가할 수 있다. 반대로 수선면으로 부터 너무 높이 설치하면 출발시 물을 취수하는 과정인 초기 priming 상태에서 물이 빨아 올라오지 않는 상태가 초래될 수 있다.
- (4) 펌프 형식과 기관 동력에 맞추어 동력 축 회전수를 결정한다. 작은 펌프를 선택하면서 기관 동력을 충분히 흡수하기 위해서는 축 회전수가 높아져야 하고 그에 따라 임펠러의 주요 제원이 결정된다.
- (5) 임펠러 날개끝과 관로벽 사이의 간극(tip clearance)은 되도록 작게 한다. 날개끝 간극에 의하여 펌프 효율이 영향을 받지 않고 제대로 성능을 유지하기 위해서는, 제작상 어려움이 없으면 가능한 한 임펠러 직경의 0.1% 이내로 하는 것이 좋다.
- (6) 제작이 수월하고 부품 교환과 수리가 편리하여야 한다. 선미 장착형을 취하고 기어나 벨트 구동 형식을 택하면 기관 동력 전달축과의 연결이 손쉽게 된다.

는 1.5톤급 FRP 어선을 택하였다. 선정된 기관은 디젤기관이고 감속 기어를 사용하기로 한다. 설계 기관 출력은 MCR출력의 85%에 해당하는 NCR로 택하고 축 전달 효율은 약 95%로 잡았다. 선체 저항은 세장비와 Froude 수에 크게 지배된다[3]. 개념 설계 단계에서 부가물 저항과 공기 저항을 합쳐 알몸 저항의 20%로 경험적으로 추정하여 전체 저항을 약 3,000 Newton으로 추정하였다. Flush형 입구를 갖는 물제트 추진장치의 자항계수에 대한 경험 자료 [3]와 모형 시험자료[16]를 바탕으로 반류계수 $w=0.07$, 추력감소계수 $t=0$, 상대회전효율 $\eta_r=1.0$ 으로 추정하여 추력을 3,000 Newton으로 택하였다.

대상선과 유사한 단순 선형을 정의하고 이를 발전시켜 표현되는 전제가능 선형을 결정한 후 Mouldless 공법에 의하여 제작된 모형선을 택하였다. 모형선의 실선 배수량은 1.13톤으로써 대상선형의 1.5톤보다 배수량이 적기 때문에 선정된 모형선 홀수를 대상선의 계획 홀수 8cm보다 크게 정하였다. 서울대학교 선형시험수조에서 15cm와 20cm의 두 홀수 상태를 택하여 저항 시험을 수행하였다[17]. 실시한 모형 시험의 결과로부터 실선으로 확장한 결과에 의하면 홀수상태 15cm, 회망 선속 20노트에서 유효마력이 47마력으로 추정된다. 따라서 종합추진효율 50%로 가정할 경우 MCR상태의 기관마력 97마력에 해당된다. Froude수에 따라 저항이 선미부 선형과 밀접하게 관계가 있으므로 배의 길이를 약간 조정하거나 선미 유동을 개선하여(가령 flap을 선미 트랜섬에 부착하여) 저항을 줄이는 방안을 강구한다.

3.2 추진장치 크기 결정

캐비테이션이 발생하지 않는 임계 흡입 비속도(suction specific speed limit)를 경험식으로 부터 산정한 결과, 축마력 약 80마력, 선속 20노트인 경우에 입구 직경은 약 16cm 이상이 되어야 한다. 또한 최대 제트 효율에 해당하는

3. 시스템의 개념설계의 예

3.1 기관 선정과 저항 추정

대상 선박으로는 현재 국내 연안에서 조업하

입구 직경은 약 25cm 정도가 된다[18] [19].

기관마력 대비 추력비가 8.45lb/hp이 되고, 이때 동력밀도(power density) 0.2hp/cm²에 해당되는 직경은 23cm 정도가 된다. 계산된 동력 밀도와 추력밀도는 캐비테이션이 발생하지 않는 영역에 위치한다. 중량, 효율, 캐비테이션 관점에서 종합적으로 파악한 후, 추진장치의 크기를 약 15%~20%의 여유를 주어 임펠러와 입구 직경을 $D_i = 20\text{cm}$ 로 택한다.

초기단계에서 출구 노즐면적을 입구면적의 53%로, 펌프 효율 $\eta_p = 0.8$ 로 정하면, 노즐면적 $A_j = 53\% A_i = 166.5\text{cm}^2$, 제트 속도 $V_j = (V_i + \sqrt{V_i^2 + 4T/\rho A_j})/2 = 19.32\text{m/s}$, 제트 속도비 $JVR = \mu = V_s/V_j = 0.533$ (반류제트속도비 $\mu_w = 0.529$), 이상 제트효율 $\eta_j = 2\mu/(1+\mu) = 0.695$, 실제 제트효율 $\eta_j = 0.628$ (노즐효율 0.98, 입구회복효율 0.8, $h_j = 5\text{cm}$ 로 가정), 종합추진효율 $OPC = \eta_i \cdot \eta_p \cdot \eta_j \cdot (1-t)\eta_j = 0.487$ 이 산정된다. 출구 노즐 직경은 이상의 제트효율 관점에서 입구 직경의 약 72.5%에 해당하는 약 14.5cm를 택하였다. 이때 펌프 양정은 $H = 14.45\text{m}$ 이며 specific speed $N_s = 203$ (U.S. 단위로는 10,150; 무차원 계수로는 0.6 임)인바, 이러한 specific speed는 축형과 혼합형 펌프를 선택하는 선정 기준의 경계 근처에 해당된다. 제작상의 편의를 위하여 축형 펌프를 택하기로 한다. net positive suction head $NPSH = 14\text{m}$ 이며 suction specific speed $N_{ss} = 199$ (무차원 계수로는 0.587)으로써 순항 조건에서는 캐비테이션이 발생하지 않을 것으로 예상된다. 다만 희망 선속 20노트 보다 낮은 속도 영역에서는 캐비테이션 발생 가능성이 높다. 이상의 주요 제원에 대하여 경험식에 의하여 산정된 최적 추력은 2,500 Newton 정도이다. 초기에 추력을 3,000 Newton으로 추정하여 입구/출구 노즐 직경을 결정한 것이 어느 정도 타당함을 알 수 있다. 최적 회전수는 2,070 RPM으로 산정되는 바 효율이 감소되더라도 중량 관점에서 직경을 더 줄이는 방안도 검토할 필요가 있다.

3.3 임펠러 설계

물체트 추진장치의 관로 내부에서 발생하는 수두 손실을 극복하여 입구와 출구에서의 운동량 차이와 압력차이가 평형을 이룰 수 있도록 임펠러가 관로 내부의 압력을 증가시키도록 일을 하게 된다. 임펠러가 한 일에 해당되는 동력은 $P = \Delta p Q$ 이 된다. 여기서 Δp 는 임펠러가 증가시켜야 되는 압력 차이이며, Q 는 통과하는 유량이다[20]. 임펠러 성능을 임펠러의 용도, 작동조건, 설계조건 등에 따라 4개의 무차원 변수(속도계수 σ , 직경계수 δ , 압력계수 ψ , 체적계수 ϕ)로 표시하고, 압력 상승(Δp)과 임펠러 날개 형상과의 관계를 결정짓는 캐스케이드 이론과 날개 이론을 사용하여 압력과 유기속도와 의 관계 및 날개 단면의 피치와 양력과의 관계를 부여하고, 날개 요소의 양력과 항력에 대한 점성 특성을 고려하여 확산율, solidity를 결정하는 이론적인 해석 결과를 바탕으로 축형 임펠러에 대한 반경 방향 평형 방정식을 사용한다. 반경 방향의 부하 분포를 속도 분포 유형으로 정하고 각 반경 위치별 날개 요소에 대한 피치각, 받음각을 포함한 코오드 길이, 캠버, 두께를 정하는 과정을 전산화하였다[21][22][23][24][25].

1차 시제품용으로 설계한 임펠러의 기본 제원과 설계조건은 직경 $D = 20\text{cm}$, 날개수 $Z = 5$, 압력수두 $\Delta p = 13\text{m water head}$, 유량 $Q = 0.322\text{ m}^3/\text{min}$, 설계 회전수 $N = 2,650\text{ rev/min}$, 허브비 $v_h = 0.5$ 이다. 이때 속도계수 $\sigma = 1.4163$, 직경계수 $\delta = 1.2405$ 이다. 날개단면의 두께-코오드비는 날개의 뿌리부터 날개 끝까지 선형적으로 감소한다. 날개단면은 NACA 단면이며 널리 알려진 NACA66(mod.) 두께 분포와 $a = 0.8$ 평균선 분포를 사용하였다. 주물용 임펠러 날개 형상은, 원통좌표계로 표현된 날개 형상을 삼각법에 의하여 직교 좌표계에서 단면 형상을 전환함으로써 표현하였다. 주물로 제작된 대표적인 임펠러 날개 형상을 <그림 2>에 보였다.



〈그림 2〉 주물 제작된 임펠러 날개(BL3)

4. 실선 시험

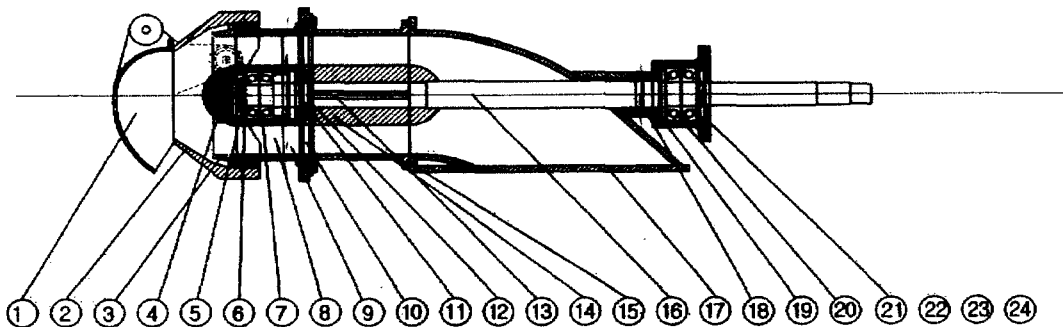
4.1 1차 시제품 제작

〈그림 3〉에 보인 시스템은 크게 관로 부분, 회전 부분, 조종 부분, 기타 소품부분으로 구성되어 있다. 회전축은 선미 트랜섬을 관통하여 장착하였으며, 방수시일, 방진패드, 베어링, 베어링 커버 및 하우징, 베어링 고정 너트로 구성된 부분이 선체에 고정된다.

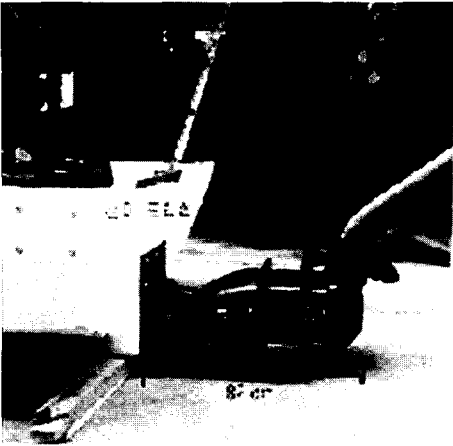
선미에 위치한 취수구 입구에는 이물질의 유입을 차단하기 위하여 그릴을 설치하였으며 그릴을 취수구 뒤로 약간 연장시켜 선미에서 나타나는 흡입 인하 현상을 완화하도록 한다. 입구

로부터 시작하여 임펠러와 회전축을 둘러싸고 있는 관로는 직경 20cm인 원형 덕트를 택하였다. 회전축 재질은 연강(크롬으로 표면 처리)이며 그 직경은 약 45mm를 택하였다. 로우터의 날개와 허브부분은 알루미늄 재질에 일체형으로 가공하였다. 회전축과 로우터는 키로 회전력이 전달되도록 하였다. 보 이론에 근거한 응력 해석에서 임펠러 날개의 뿌리에 걸리는 응력은 약 1.33×10^7 pascal로 산정되었다. 알루미늄의 항복응력 5.5×10^7 pascal을 감안하면 계수 4의 안전율을 확인하였다. 임펠러의 로우터 뒤에 위치한 정류용 스테이터의 날개수는 8개이며 가공 편의상 방전 가공하였으며 각각의 날개는 평판 두개를 일정 각도로 이어 붙인 모양을 취하고 있다. 스테이터와 회전축 사이에는 볼 베어링을 설치하였으며 자연 순환 냉각 방식을 택하였다. 조종 버킷과 후진 버킷은 킬러 방식으로 함께 조절하도록 하였다. 조종 버킷의 회전 범위를 좌우 30도로 정하였다.

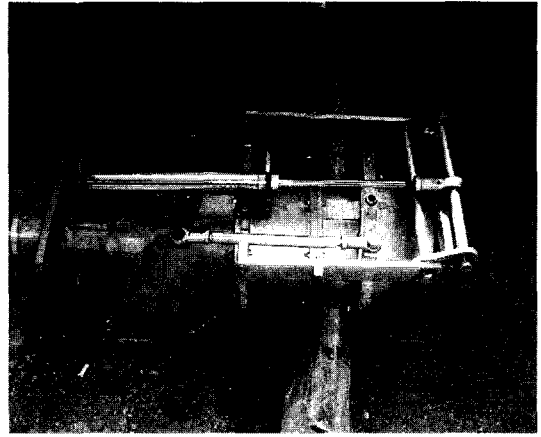
1차 시제품을 예인력 계측 실험용 시험선의 선미 트랜섬에 장착된 모습이 〈그림 4〉에 나타나 있으며 임펠러 회전축 주위의 여러 부품을 〈그림 5〉에 보였다. 부품은 stainless steel을 소재로 기계 가공하였다. 1차 시제품에 대하여 서울대학교 예인 수조에서 실험용 시험선의 흘수를 변화시키면서 스트레인 게이지형 검력계를 사용하여 기관 회전수에 따른 예인력을 계측



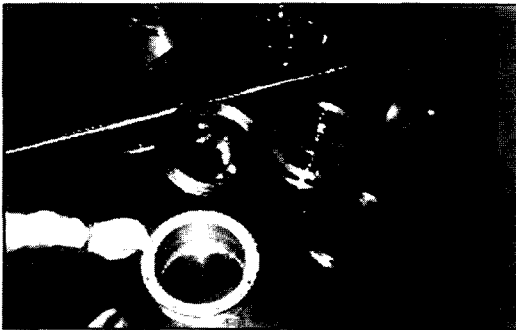
〈그림 3〉 소형 물제트 추진장치의 시스템 구성도



〈그림 4〉 실험용 시험선에 장착한 물제트 추진장치의 모습



〈그림 6〉 시제품의 조타장치의 전경



〈그림 5〉 물제트 추진장치의 임펠러 부품

하였다. 물제트 추진장치의 출구 노즐의 수평 중앙선이 수면하 5cm 이상 잠긴 경우에는 초기 priming이 이루어지며 일단 초기 priming이 이루어진 후에는 홀수가 변함에 따라 예인력이 그다지 변하지 않음을 확인하였다.

4.2 2차 시제품 제작 및 수정

기관 및 부속 의장부품을 제외한 1차 시제품의 본체 무게는 약 100kg중 정도이다. 강철이 주요 소재인 1차 시제품을 장착한 경우에 실선 시운전시 선미 트림이 심하게 나타난다. 소형 어선의 경우 선박의 자세가 성능에 주요한 영향

을 미치므로, 2차 시제품의 주요 구성품은 알루미늄 합금을 소재로 교체하였다. 1차 시제품에 비하여 약30~40%의 감량이 이루어졌다. 이와 더불어 몇 가지 시스템을 변경하였다. 입구 형상을 사각형으로 하였고, 후진 버킷은 고정식으로 하였으며 구동은 유압시스템을 사용하였고, 조타시스템은 수동 방식을 채택하였다. 〈그림 6〉에 완성된 2차 시제품의 모습을 보이고 있다.

2차 시제품을 사용하여 실선 시운전 속도 시험을 수행한 결과 선박의 속도가 예상보다 매우 낮아져서 캐비테이션이 발생하는 것으로 판단되었다. 이는 실선 저항이 부정확하게 추정되었고 기관 출력이 공시 출력보다 적음으로 인하여 설계 속도와는 달리 선속이 낮게 나타나기 때문이다. 이와 함께 임펠러의 입구 직경을 36cm로 키우는 경우에 저속에서도 캐비테이션 성능을 개선됨을 확인하였기 때문에, 임펠러의 입구 직경을 30cm로, 출구 노즐 직경은 24cm로 수정하여 택하였다. 수정된 시스템은 추진장치의 크기가 커지면서, 조종 노즐을 선체에 부착하는 방법을 택하였으며, 후진 버킷을 조종 노즐에 부착시켜 후진시 조종성능을 향상시키고 중량을 줄이도록 하였으며, 조타 시스템은 수동식 핸들 방법을 택하였다. 부식방지를 위한 Anodizing, 열처리 및 도장을 하도록 하였다.

4.3 실선 시운전

물제트 추진장치의 시제품의 성능을 확인하기 위한 실선 시운전을 수행하였다. 실선 시운전에 사용한 선박은 1.5톤급의 기존 소형 어선으로부터 선미 트림을 줄이기 위하여 선미 부근에 부력통을 부착한 1차 시험선을 제작하였으며, 2차 시험선은 1차 시험선 보다도 선체 길이를 약 1m 가량 늘리면서 주상계수를 줄이고 6cm 길이의 stern flap을 트랜섬 선미 끝단에 부착하였다. 설계 Froude수인 0.6에 도달하면서 조파저항곡선의 봉우리를 넘는 방안으로써 길이 변화 및 stern flap 등 선형 변화를 통한 저항, 추진 성능을 개선하고자 하였다. 두 시험선의 주요 제원을 <표 2>에 비교하였다.

<표 2> 실선 시운전용 1차 시험선과 2차 시험선의 주요 제원

항 목	1차 시험선	2차 시험선
Length overall (m)	7.640	8.600
LWL (m)	6.560	7.089
Beam (m)	2.040	2.300
Draft (m)	0.140	0.130
Volume (m ³)	0.752	0.865
Prismatic coeff.	0.771	0.547
Block coeff.	0.343	0.355
Wetted surface (m ²)	10.267	11.301
Engine reduction gear ratio	1:1	1.82:1 2.51

기관은 'Mighty'와 'Musso' 디젤기관으로 2종류를 택하였으며 'Mighty' 기관의 기관 출력은 68hp × 2,700RPM(MCR)이고, 'Musso'는 120hp × 4,000RPM(MCR)이다. 'Musso' 기관의 경우에는 회전수를 조절하기 위하여 감속 기어를 사용하였으며 감속 기어비는 1.82:1, 2.5:1의 두가지 경우를 택하였다. 시운전 실험에 사용한 임펠러의 로우터는 6종류이며 <표 3>에 날개수와 피치각을 비교하였다.

BL1은 1차 시제품의 임펠러 로우터를 의미하고 알루미늄 소재로 기계 가공하였다. 터어빈

<표 3> 실선 시운전에 사용한 임펠러 로우터의 기본 재원

No.	날개수	축방향 길이(cm)	r/R=0.8에서의 피치각(deg)	비 고
BL1	5	12	41	알루미늄 재질
BL2	4	10	42	
BL3	5	10	42	
BL4	6	10	42	
BL5	8	10	42	
BL6	4	12	38	날개면적 확장

날개의 형상 설계 기법을 이용하여 설계한 개별 날개의 형상은 동일하면서 날개수만을 변화시켜 각각을 BL2, BL3, BL4, BL5으로 명하였다. 황동을 소재로 하여 주물 제작되었다. BL6는 2차 시험선과 'Musso' 기관의 감속기어비 1.82:1에 적합하도록 설계한 임펠러이다. 캐비테이션 발생을 억제하기 위하여 날개 면적을 BL2에 비하여 증가시켰다.

실선 시운전은 낙동강(양산)에서 실시하였으며, 강물의 흐름 방향으로 떨어진 부표 사이를 왕복 운항하면서 GPS 기기를 이용하여 선속을 측정하였다. 그림상에 표기된 '1:1' 등은 감속비를 의미하며, 'Up', 'Down'은 상류 방향과 하류 방향으로 운항하면서 측정된 결과를 표시하였으며 표시가 없는 경우는 산술 평균한 값을 의미한다. <표 4>에 보인 바와 같이 기관, 임펠러, 감속기어, 선형의 몇 가지 조합을 선정하여 시제품에 대한 실선 시운전을 실시하였다.

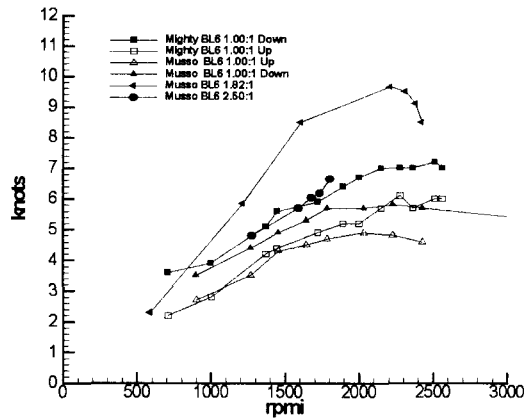
<표 4> 실선 시운전에 사용한 시스템의 구성

시운전 시험번호	T1	T2	T3	T4	T5
계측항목	홀수별 예인력	기관 회전수별 속력			
시험선	실험용 기존선형	1차 시험선		2차 시험선	
기 관	'Mighty' 기관		'Musso' 기관		
감속기어비	감속기어 없음(1:1)		1.82:1	2.5:1	
임펠러	BL1	BL1~6	BL6	BL1~4, BL6	BL3, BL6

1차 시험선에 감속기 없이 임펠러와 직결된 'Mighty' 기관을 사용하여 속력을 계측한 결과로는 임펠러의 회전수가 2,000RPM을 이르면서 속도 증가가 둔화되는 현상을 보이며, 2,200RPM을 지나면서부터는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이것은 캐비테이션이 발생하여 추력이 급격히 떨어지는 현상이 일어난 것으로 판단된다. 이러한 현상은 낮은 선속에서 물체 추진장치가 작동할 때 더욱 심화되는 경향이 있다. 일반적으로 날개 면적이 증가하면 캐비테이션 발생을 억제하는 것으로 알려져 있지만, 모든 임펠러(BL1~BL6)가 공히 높은 회전수에서 동일한 현상이 발생하고 있다.

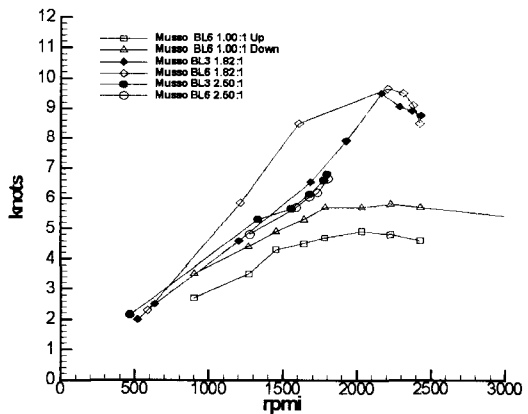
이를 뒷받침하여 주는 결과로써, 2차 시험선에 'Musso' 기관을 장착하고 감속비가 1.82:1인 감속기를 부착하여 실험한 결과에서는, 전반적으로 'Mighty' 기관에 비하여 속도가 향상된 것을 나타나고 있었으나 여전히 임펠러 회전수 2,200RPM 부근에서 캐비테이션이 발생하기 시작함을 알 수 있다. 'Mighty' 기관을 사용하는 경우와는 달리 BL6가 가장 속도가 높은 것으로 나타나고 있다.

(그림 7)은 1차와 2차 시험선에 BL6를 사용하여 수행한 결과를 보이고 있다. 그림에서 감속비가 1:1인 (감속기가 장착되지 않은) 1차 시험선에 대해서는 두 기관에 대하여 추력 손실 현상으로 인하여 만족할 만한 속력에 이르지 못하고 있다. 선형을 바꾸어 저항 성능을 개선한 2차 시험선과 'Musso' 기관에 감속기 1.82:1을 사용한 경우가 성능 개선 조짐을 뚜렷이 보이고 있다. 이는 임펠러 설계를 이 조건에 맞추어 수행했기 때문이다. 그러나 여전히 임펠러 회전수 2,000RPM 부근에서부터 회전수가 증가하면서 추력이 떨어지는 현상이 일어난다. 다만 회전수만을 낮출 목적으로 감속기 2.5:1을 사용하는 경우, 캐비테이션 발생으로 인한 추력이 급격히 떨어지는 현상은 일어나지 않은 것으로 확인되었다. 결국 임펠러 BL6는 감속기 2.5:1에 적합하도록 설계하지 않았기 때문에 동력을 충분히 흡수하지 못하고 있다.



(그림 7) 임펠러 BL6를 사용한 1차 및 2차 시험선의 속력 시험

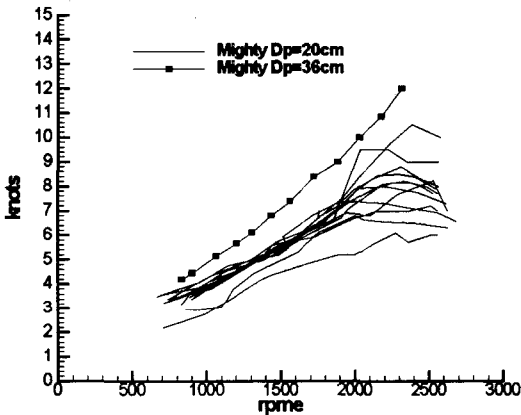
시험 결과로부터 몇 가지 경우를 택하여 감속비에 따른 속도의 변화를 보인 (그림 8)에서 이를 확인할 수 있다. 감속비 2.5:1의 경우 임펠러 회전수가 1,800RPM에 도달할 때까지도 캐비테이션이 발생하고 있지는 않지만, 임펠러의 로우터를 감속기가 없는 'Mighty' 기관을 기준으로 설계하였기 때문에 기관 출력을 임펠러가 충분히 흡수하지 못하여 추력을 제대로 발생하지 못하고 있다.



(그림 8) 감속 기어비에 따른 변화 ('Musso' 기관)

이상과 같은 계통적인 시험 결과로부터, 초기 설계 단계에서 선정된 임펠러 크기가 캐비테

이선 발생을 억제하기에는 너무 작다는 판단을 내리고, 임펠러 입구직경이 36cm인 수정 시제품을 제작하여 실선시험을 수행하였다. 'Mighty' 기관에 감속기를 장착하지 않았다. <그림 9>에서 캐비테이션은 발생하지 않는 것으로 판단된다. 그러나, 기관 회전수가 2400 rpm 까지만 도달함으로써, 임펠러가 과부하가 걸린 것으로 인하여, 회전수가 떨어져 충분한 동력 흡수가 이루어지지 못하고 있다. 이는 임펠러의 피치를 줄이면 해결할 수 있을 것으로 기대된다.



〈그림 9〉 임펠러 직경 36cm에 대한 시험 결과

5. 결 언

고속선 추진장치로 주목을 받는 물제트 추진 장치의 장점을 살리고 단점을 보완할 수 있는 선미 장착형 물제트 추진장치를 1.5톤급 소형 FRP 어선에 적용하였다. 선형, 기관, 저항, 강도, 재질 등을 고려한 개념 설계를 실시한 후 이를 토대로 동력 전달 및 추진 시스템을 구성하고 실선에 적용하기 위한 시제품을 제작하였다. 시험선, 기관, 감속기, 임펠러에 대한 여러 조합으로 이루어진 시제품에 대하여 시험선 시운전을 실시하였다. 높은 임펠러 회전수에서 발생하는 캐비테이션으로 인하여 추력이 급격히 떨어지는 현상을 파악하였다. 이를 해결하는 방안

으로써, 초월 공동형 임펠러 날개 단면을 입구 유동을 조절할 수 있는 기능을 추가하는 설계 방향을 설정하였다. 수행한 실선 시운전 속력 시험 결과를 토대로 하여 장차 2~3차례의 임펠러 재설계 과정을 거쳐 실선 시운전 시험을 진행할 예정이며 어선용 물제트 추진장치의 실용화를 위한 구조 성능 및 제반 내구성 시험을 병행할 예정이다.

소형 물제트 추진장치의 설계/제작 분야의 기초 기술을 확보함으로써 선형 개선과 함께 대상선의 성능 향상에 기여할 수 있다. 개발될 물제트 추진장치로 기존의 축계형 추진기를 대체할 수 있는 가능성을 확인하였다. 양식업이 점차 확산되는 추세에 비추어 볼 때, 기존의 축계형 선박으로는 그물 걸림을 피하기가 어려운 단점이 있었으나, 그물 위를 넘나들 수 있으므로 상당한 수요가 있을 것으로 예측된다.

향후 공기공급식 물제트 추진장치, 중대형 물제트 추진장치 등 유사 추진장치의 개발에 활용할 수 있다. 개선된 시스템으로써 hydro-air drive의 연구가 진행되고 있다[26].

본 연구는 1998년도 해양수산부 수산특정 연구과제인 'Mouldless FRP 공법 개발과 공법적용 고효율 어선의 개발에 관한 연구'와 2000년도 중소기업청 산학연 컨소시엄 사업과제 '소형 어선용 선미장착형 소형 물제트 추진 장치의 개발'의 일부 연구 결과를 발췌하였으며, 연구 수행에 있어서 두뇌한국21사업 핵심 분야에 의하여 지원받고 있는 내부연구조원이 참여하였음을 밝힌다.

참고문헌

- [1] Proceedings of International Conference on Waterjet Propulsion, RINA, Amsterdam, 1998.
- [2] "아웃 드라이브 장치," (주) 영창산업기계, NT승인 심사자료, 1999.
- [3] Blount D. L. & Barte R. J., "Design of Propulsion Systems for High-speed

- Craft," *Marine Technology*, vol. 34, no. 4, 1997.
- [4] Sato R., "제6장 고속선용 프로펠러," 제3회 박용 프로펠러에 관한 심포지움, 일본조선학회, 1987.
- [5] van Tassel G. W., "Applications of the Air-drive Ventilated Tunnel/Surface Piercing Propeller Propulsion System," *Proceedings of the Intersociety High Performance Marine Vehicle Conference & Exhibit*; Arlington, 1992.
- [6] Pike D., "Surface Drives—are they coming of age?," *Ship & Boat International* 2000.
- [7] "선체에 터널형 공간부를 가지는 선박용 추진기(포세이돈 드라이브)," (주) 우남마린, KT승인 심사자료, 1999.
- [8] "Waterjets on Displacement Hulls." *Warship Technology*, October, 1999.
- [9] Rodler W. E., "Outboard Waterjet Propulsion Development," *Vehicle Technology*, Third Monthly Report, 1997.
- [10] 이진태, 문일성, 박영하, 김경열, 김기섭, "초고속선을 위한 공기유입 물체트 추진기 개발," *대한조선학회 논문집*, 제36권, 제3호, 1999.
- [11] Allison J., "Marine Waterjet Propulsion," *SNAME Transactions*, vol. 101, 1993.
- [12] Svensson R., "Waterjets versus Propeller Propulsion in Passenger Ferries," *Vacational Training Centre*, Kamewa, 1998.
- [13] Svensson R., "Kamewa Water Jet System Engineering Course," (unpublished) Kamewa, 1997.
- [14] 서정천, 김효철, 이상홍, 제정락, "천수용 신형식 추진장치", *조선 신기술 실용화 workshop*, 인하대, 1999.
- [15] 서정천, 안성필, 제정락, "소형 어선용 선외 장착형 물체트 추진장치," FRP 선박 건조 신기술 세미나, 부산, 2000.
- [16] 양승일, 안종우, 송인행 등, "차세대 선박 핵심기술 개발: 차세대 추진장치 기술 개발", 과학기술부 연구보고서 UCN 022-2051D, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, 1997.
- [17] 김효철, "Mouldless FRP 공법 개발과 공법 적용 고효율 어선의 개발에 관한 연구," 해양수산부 연구과제 실적 보고서, 1999.
- [18] 송인행, "워터제트 초기설계 관련 자료," (unpublished), 1999.
- [19] 이진태, "초고속선의 추진장치 특성 비교 검토", 초고속선 workshop, 한국해사기술연구소 (현 한국해양연구원 해양시스템안전연구소), 1991.
- [20] White F. M., *Fluid Mechnaics*, 2nd ed., Mc-Graw Hill, Inc., 1986.
- [21] Eck, B., *Fans: Design and Operation of Centrifugal, Axial-flow and Cross-flow Fans*, 1st English ed., Pergamon Press, 1973.
- [22] Lewis R. I., *Turbomachinery Performance Analysis*, Arnold, 1996.
- [23] Shigley J. E. & Mischke C. R., *Standard Handbook: Machine Design*, McGraw Hill Inc., 1986.
- [24] Karassik I. J., et al., *Pump Handbook*, 2nd ed., McGraw Hill, 1986.
- [25] Schetz J. A. & Fuhs A. E., *Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinery*, Wiley Interscience, 1996.
- [26] 미국 특허 자료 "Hydro-Air Drive", Patent no. 5,505,639, April 9, 1996.