

인력선 설계에 대한 연구



민 계 식

· 1942년 생
· MIT 공학박사(1978년)
· 현 재 : 현대중공업 CEO/CTO
· Email : minks@hhi.co.kr



강 선 형

· 1955년 생
· 울산대 공학박사(1992년)
· 현 재 : 현대중공업 선박해양연구소
· 관심분야 : 저항/추진, 고속선
· 연 락 처 : 052-230-5546
· Email : shkang@hhi.co.kr



이 강 복

· 1946년 생
· 한국해양대 공학석사
· 현 재 : 현대중공업 선박해양연구소
· 관심분야 : 제품개발, 시험계측
· 연 락 처 : 052-230-6008
· Email : kblee@hhi.co.kr

1. 서 론

인력선은 인간의 힘만을 동력원으로 사용하는 선박이며 수질 오염이나 매연, 소음 공해가 없는 환경 친화적인 특성을 갖고 있다. 최근에는 수심 1m 이상이면 어떤 수상공간에서도 사용이 가능한 소형 인력선이 대중적 수상 스포츠 및 레저 등으로 각광을 받고 있으며 미국, 일본, 유럽 등지에서는 인력선을 상용화하여 보급함으로써 남녀노소 모두가 즐길 수 있는 새로운 대중 수상 레저 및 스포츠로 발전시키고 있다. 또한 인력선 설계와 제작과정을 거치면서 선형 설계기술, 수중익 설계기술 및 선체 경량화 기술 등 많은 첨단기술을 접하게 됨으로써 조선기술의 대중화 및 홍보에도 큰 기여를 할 수 있다. 당사에서는 2002년도부터 충남대학교 공과대학 선박해양 공학과에서 주관하고 있는 국내 인력선 축제 중의 시범경기 행사에 참여하여 왔다.

인력선 시스템 설계를 위하여 그간 외국에서 제작되었던 인력선들을 조사하여 본 결과 인력선 전체의 시스템은 크게 두 가지로 분류되었다. 한가지는 전문적인 경주용 선형이고 다른 한가지는 일반 레저용으로 설계, 제작하여 탑승자들이 특별한 훈련이나 기술을 갖지 않아도 쉽게 조종을 하면서 속도감을 즐길 수 있는 유형이다. 그동안 국내 인력선 축제에 참가한 선형들을 조사하여 본 결과 경주용과 오락용이 약간 혼합된 경향이 있었으나 경주용의 비율이 훨씬 더 높았으며 경주용 선형의 속도영역은 조선학적으로 보아 초고속선 영역에 있었다. 따라서 선형설계의 개념은 1990년대 초 당사에서 개발 완료하여 건조 경험이 있는 초고속 수중익 쌍동선의 개념을 활용하였으며 2인승 수중익 쌍동 인력선을 설계, 제작하였다. 이는 당시의 초고속 수중익 쌍동선의 개념 및 설계 기술이 초고속 속도 영역에서 운항하는 모든 선박에 적용할 수 있으며 성능면에서도 매우 우수함을 입증하는 것이라고 하겠다. 다만 너무 단기간에 설계, 제작을 완료하여 중량 경감에 대한 충분한 검토나 연구가 부족하였다는 아쉬움이 있다. 본 논문에서는 당사에서 설계, 제작한 2인승 수중익 쌍동 인력선의 설계 내용 및 제작과정을 간략하게 요약 정리하고자 한다.

2. 선형설계

표 1. 인력선의 초기 중량 추정 및 제작 후의 중량 비교

항 목	초기 추정	제작 후
선체 (kg)	20.0	16.5
수중익 시스템 (kg)	10.0	4.4
탑승 및 선체 고정 구조물 (kg)	16.0	20.0
동력 전달장치 (kg)	12.0	6.5
타 및 프로펠러 (kg)	2.0	2.0
기타* (kg)	-	3.6
선체 중량 (kg)	60.0	53.0
선수 2인 (kg)	120.0	128.0
전체 배수량 (kg)	180.0	181.0

* 도장 중량 포함

표 2. 인력선의 주요 치수

배수량 (kg)	180.0
길이 (m)	4.2
전폭 (m)	1.48
단동선 폭 (m)	0.28
흘수 (m)	0.123
방향계수(C_B)	0.625

선형을 설계하기 위하여 먼저 전체 중량, 즉 배수량을 결정하여야 한다. 전체 중량은 각 구성 요소별로 중량을 추정하여 합을 구하는 방법을 사용하였으며 초기에는 180 kg으로 추정하였다. 각 구성 요소별 초기 중량 추정과 제작 후 실제 중량을 표 1에 정리하여 놓았다. 중량 추정에 있어서 선체와 수중익 시스템은 FRP로, 탑승 및 동력전달용 구조물은 알루미늄 관으로 제작하는 것으로 하였다.

추정된 전체 중량, 즉 180 kg의 배수량을 가지고 당사에 준비되어 있는 최적 특성 선정 프로그램을 사용하여 최적 주요치수를 결정하였으며 표 2에 정리하여 놓았다.

결정된 주요 치수에 따라 당사에 준비되어 있는 초고속선 선형설계 프로그램[1, 2]*을 사용하여 쌍동선의 선형을 설계하였다. 쌍동선 선형설계를 위해서는 사

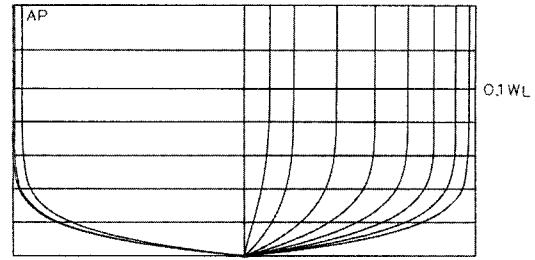


그림 1. 단동선의 횡단면도

전에 단동선 간의 거리를 적절히 고려하여야 한다. 특히 선수들이 승선한 만재상태에서의 초기 정적 트림을 고려하여 선미 쪽으로 배수량이 많이 분포될 수 있도록 선미부 끝단(transom)의 폭을 결정하였다. 그림 1은 쌍동선형 중 단동선의 선형을 보여주고 있다.

3. 수중익 시스템

자유표면 아래에서 작동하는 수중익 시스템이 일정 선속에서 원하는 높이 만큼 선체를 부양한 후 원하는 위치에서 그 위치를 고수하며 작동하도록 단 한번만에 설계를 하는 기술은 전 세계에서 현대중공업만이 보유하고 있을 것이다. 이러한 수중익 시스템 설계기술을 보유하게 된 것은 부력/양력 복합 지지 초고속선을 개발하여 오면서 오랜 기간에 걸친 이론적, 실험적 연구의 결과이다. 이러한 당사의 초고속 수중익 쌍동선의 수중익 시스템 설계 경험[3, 4, 5]을 인력선의 수중익 시스템 설계에도 활용하기로 하였다. 선체는 수중익에 발생하는 양력에 의하여 완전히 부양되도록 계획하였다. 수중익 시스템은 당사 고유의 NP series 단면을 이용하였으며 수중익의 입사각은 고정식으로 하였다. 선수, 선미 수중익의 양력 분담은 선형, 탑승 및 선체 고정 구조물과 선수 2인의 배치를 고려하여 결정하였다. 표 3에는 수중익 시스템의 주요 특성이 요약 정리되어 있다.

특히 수중익과 선체를 연결하고 수중익에 발생하는 양력을 선체에 전달하는 연결기둥(side strut)의 높이는

* []속의 번호는 참고문헌의 번호를 나타냄.

표 3. 수중의 시스템의 특성

	선수 수중의	선미 수중의
Design lift (kg)	89.0	91.0
Span (m)	1.2	1.2
Chord (m)	0.12	0.15
Foil depth in chord	1.667	1.333
Max. thickness (% of chord)	15.0	15.0
Angle of attack (deg.)	0.0	0.0
Max. camber (% of chord)	3.2	3.1

수중의 시스템의 효율적 양력 발생과 선체 완전 부양 시 연직 무게중심의 과도한 상승으로 인한 불안정성이 최소화 될 수 있도록 고려하여 선체가 수면 위 20 cm 정도 부양될 수 있도록 고려하였다.

4. 프로펠러 및 동력 전달장치

프로펠러의 설계를 위하여 소요마력 및 회전수를 다음과 같이 추정하였다. 인간은 순간적으로 1 마력 이상의 힘을 낼 수 있으나 시간이 지남에 따라 급격히 감소한다. 인력선 속도 경기가 대체로 1~2분 정도임을 고려하면 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 인간이 낼 수 있는 힘을 300~500 Watt(0.408~0.680 마력) 정도로 추정되므로 2인 기준의 발생 평균마력을 1.0 마력으로 추정하였다.

인력선에 승선한 앞사람과 뒷사람의 페달 바퀴에 붙어있는 사슬(chain)은 서로 직결하여 힘의 균형을 맞추도록 구성하였으며 그 회전력은 뒷사람 페달에서 그림 3에 나타난 것과 같이 2개의 상단, 하단 베벨 기어(bevel gear)로 연결되어 프로펠러에 전달되도록 구성하였다. 이는 통상적인 인력선에서 볼 수 있는 기어 박스를 별도로 제작하지 않음으로써 중량의 감소효과를 얻기 위함이며 또한 발생된 회전력을 직접 프로펠러에 전달되도록 하여 축 효율을 높이기 위함이다. 선수들의 적절한 페달 회전수와 프로펠러의 회전수를 결정하기 위하여 기어비를 다음과 같이 결정하였다. 선수 탑승 구조물 뒤축의 기어와 상단 베벨 기어에서 각각 약 1 : 3

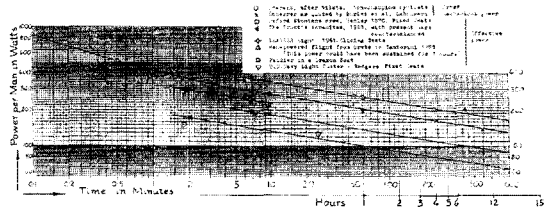


그림 2. 시간에 따라 인간이 낼 수 있는 힘[6]

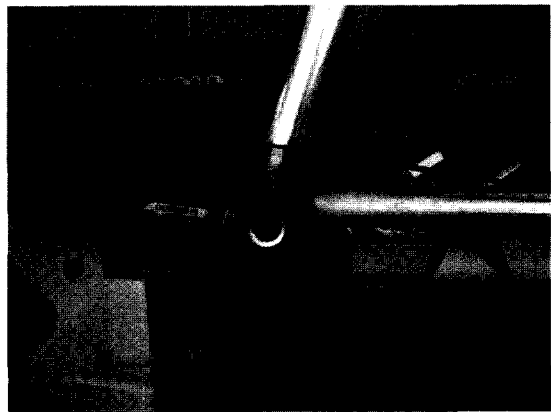
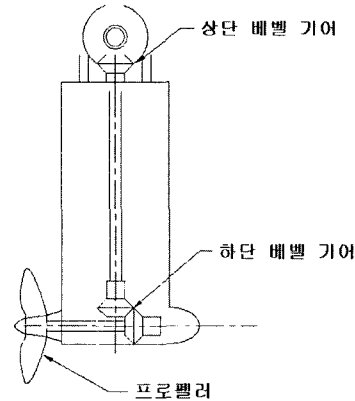


그림 3. 동력 전달장치 기어 시스템

의 기어비를 갖도록 기어를 선택하여 전체 기어비는 약 1 : 9가 되도록 하였다.

또한 일반 경주용 자전거 선수들이 좋아하는 자전거 페달 회전수는 72~100 RPM 수준이므로 선수들이 1~2분간 최대로 낼 수 있는 RPM을 100으로 결정하였다. 이로부터 인력선의 기어비를 고려하여 프로펠러 회전수는 900 RPM 으로 결정하였다. 이를 고려하여 당사

표 4. 프로펠러 설계 조건 및 특성

설계조건	Power (마력)	1.0
	분당 회전수 (RPM)	900
	VS (kts)	13.0
주요특성	직경 (m)	0.29
	날개 수 (개)	2
	Ae/Ao	0.252
	P/D _{0.7R}	1.7883
	Total Skew (deg.)	10.0

에서 개발한 프로펠러 설계용 프로그램[7]을 이용하여 프로펠러 설계를 하였으며 프로펠러 날개 단면으로는 당사 고유의 NP series 단면을 사용하였다. 표 4에 프로펠러 설계 시 고려한 사항과 설계 프로펠러의 특성들을 요약하였다.

방향타는 선체가 완전히 부양된 후의 직진성 확보와 최소의 방향 회전성을 목적으로 선미끝단에 설치하는 것으로 하였다.

5. 제작 및 조립

먼저 형틀(mould) 제작을 위한 코어(core)를 제작하고 그 위에 FRP를 입혀서 형틀을 제작하였다. 이 형틀 내부에 다시 FRP를 입혀서 선체를 제작하였다. 선체 강도는 유지하면서 선체 중량을 줄이기 위해서 선체 바닥은 FRP 2겹을 입혔으며 선체상부는 1겹으로 처리하였다. 그리고 선체의 강도 보강을 위하여 선체의 길이 방향으로 4군데에 우레탄 보강재를 삽입하였다. 그

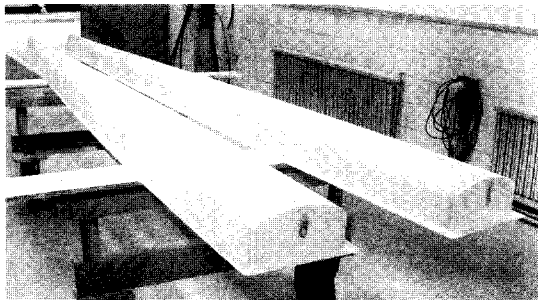


그림 4. FRP로 제작된 선체의 모습

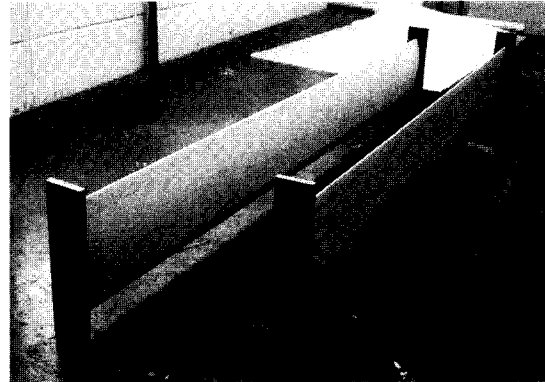


그림 5. FRP로 제작 후 표면 가공된 수중익의 모습
 립 4는 형틀에서 빼내어 도장한 후의 선체를 보여주고 있다.

수중익의 시스템 제작 시에도 중량을 최소화하면서 강도를 유지할 수 있는 제작방법을 채택하였다. 즉, 수중익은 유선형의 기본적 형틀에 FRP를 2겹 입힌 후 표면을 가공하였으며 수중익의 폭 방향으로 3군데에 우레탄 보강재를 삽입하여 수중익의 강도를 유지하도록 하였다. 그림 5는 FRP로 제작한 후, 표면삭성 작업이 완료된 선수와 선미의 수중익을 보여주고 있다.

연결기둥(side strut)은 수중익이 발생하는 양력을 선체로 직접 전달하는 역할을 하므로 특별히 강도 유지에 주의하였다. 이를 위하여 5 mm 알루미늄 판을 사용하였으며 특히 수중익과 연결기둥의 연결 부위에는 응력이 집중될 것을 고려하여 30 mm 길이의 알루미늄 판을 수중익 형상으로 가공, 수중익 내부에 삽입하여 연결이 되도록 함으로써 응력 집중에 의한 강도 보강을 하였다. 또한 필요시 초기 부양력의 조절을 위하여 작은 양의 받음각(angle of attack) 수정이 가능하도록 고려하며 연결기둥에 고정하였다.

동력 전달장치는 그림 3에 나타낸 바와 같이 회전축이 지나가는 부분에 과도한 저항이 걸리지 않도록 유선형으로 가공하였다. 또한 무게를 줄이기 위하여 2개의 알루미늄 판의 내부는 각각 중공으로 처리하여 결합하였다. 그림 6은 제작된 동력 전달장치와 프로펠러 구동부를 보여주고 있다. 프로펠러에 연결되는 구동부는 필요시 보수의 용이성을 목적으로 따로 가공하여

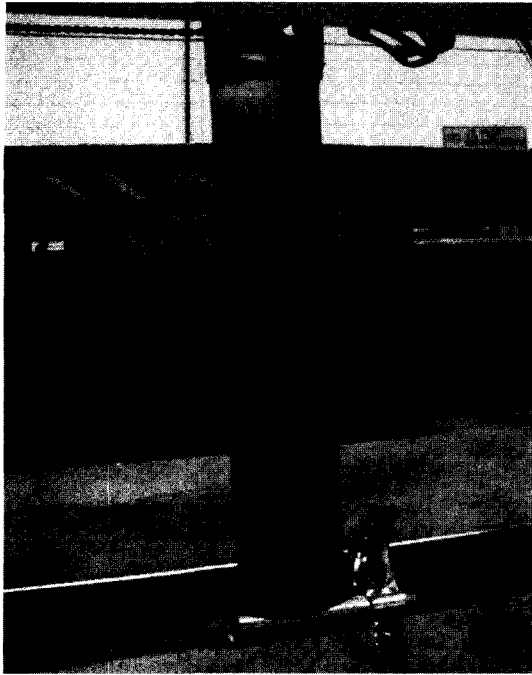


그림 6. 동력 전달장치 모습

결합하였다.

선수 탑승 구조물은 5 mm 알루미늄 관으로 자체 제작하였으며 쌍동선 선체 결합부는 8 mm 알루미늄 관으로 제작하였다. 또한 선체 결합부용 8 mm 알루미늄 관을 수중익 시스템의 연결기동 상단부와 연결되도록 함으로써 수중익 시스템에서 발생하는 양력이 연결기동을 통하여 선체와 선수 탑승 구조물에 직접 전달되도록 하였다. 그림 7은 선수 탑승 구조물의 제작 모습을 보여 주고 있으며 그림 8은 최종 제작 및 선체 조립 후의 모습을 보여 주고 있다.

최종 조립 후의 선체 중량은 표 1에 나타낸 것과 같이 53 kg 으로 설계 초기에 계획한 60 kg 보다 적게 제작되었다. 그러나 선수 탑승 구조물 및 선수 2인의 중량이 계획보다 초과되어 전체 배수량은 181 kg 이 되었다.

제작 완료 후 당사 예인수조에서 성능검증 시험을 수행하였는데 선체 완전부양 후의 50 m 구간 평균 선속은 약 13 노트로 예측되어 설계목표를 달성하였다.

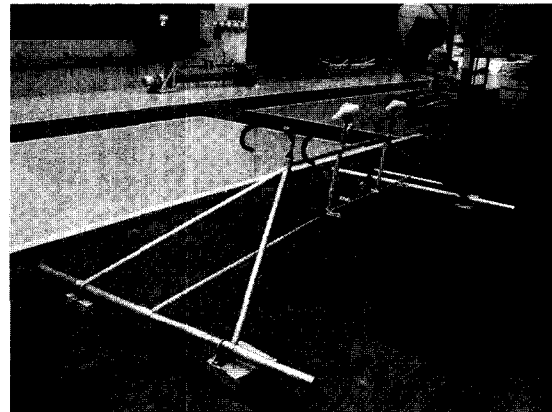
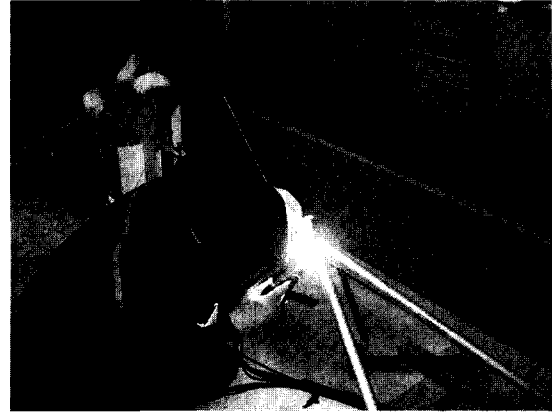


그림 7. 탑승 구조물 제작 모습

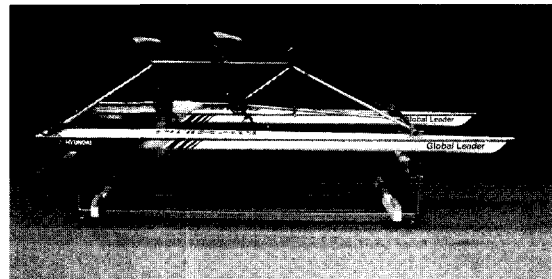


그림 8. 조립 완료된 인력선의 모습

그림 9는 지난 8월 19일 인력선 축제의 시범경기에 초청되어 대전 갑천 조정 경기장에서 현지 적응 훈련 중인 모습을 보여주고 있다. 대전 갑천 조정 경기장에서 초기 계획했던 수준의 부양을 보이고 있었으며 현지 적응 훈련 시 예측한 200 m 평균 속도는 약 12 노트를 기록하였다.

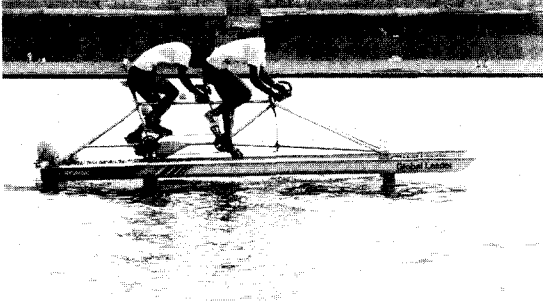


그림 9. 갑천 조정 경기장에서 활주중인 인력선의 모습

6. 결론

일반 레저 및 스포츠 활동에 활용되고 있는 소형 인력선 설계에 당사에서 개발, 건조 경험이 있는 초고속 수중익 쌍동선의 설계 개념을 활용하여 설계, 제작하였는데 당사의 초고속 수중익 쌍동선 설계 개념이 실제 선박뿐만 아니라 레저용 소형 선박에도 적용 가능함을 확인할 수 있었으며 성능면에서도 우수함을 확인할 수 있었다.

전체 중량을 일본 인력선 수준으로 감소시킬 수 있다면 종합적인 성능면에서 일본 최고 수준의 인력선보다 훨씬 더 우수하리라고 생각한다. 참고로 일본 인력선의 선체 중량은 약 35 kg 으로 당사의 인력선보다 18 kg 가볍다.

참고문헌

1. 민계식, 강선형, 1996, "배수량형 초고속선의 선형설계 및 저항특성 추정을 위한 체계적 연구", 대한조선학회지, 제33권 제4호
2. Min, K.-S. and Kang, S.-H., 1998, "Systematic study on the hull form design and resistance prediction of displacement-type super-high-speed ships", Journal of marine science and technology, Vol. 3, No. 2, The society of naval architects of Japan, Nov.
3. 민계식, 이흥기, 1996, "자유수면하 작동하는 HMRI NP-series 2차원 수중익의 유체역학적 특성 추정에 대한 체계적 연구", 현대중공업 기술개발본부 선박해양연구소 연구보고서 번호 HMRI-96-04-S068.
4. 민계식, 강선형, 1997, "자유수면하 작동하는 2차원 수중익의 유체역학적 특성 추정을 위한 수치연구", 대한조선학회 1997년도 추계 연구발표 논문집.
5. Min, K.-S., Kang, S.-H. and Streckwall, H., 1998, "Numerical and experimental studies for the prediction of hydrodynamic characteristics of two-dimensional hydrofoils operating under the free surface", The proceedings of the 22nd symposium on naval hydrodynamics, Washington, D. C., U.S.A., Aug. 9~14.
6. Coates, J. F., 1990, "Research and engineering aspects of reconstructing the ancient Greek trireme warship", SNAME Trans., Vol. 98, pp. 239-262.
7. Min, K.-S., 1991, "Propeller blade section design by conformal transformation method", The proceedings of the international workshop on the propulsor technology, Taejon, Korea, March 27~28. ⚓