트윈스케그 적용 대형 로팩스선의 선형개발

이화준^{1,†}·장학수¹·홍춘범²·안성목²·전호환³
삼성중공업(주) 특수선기술지원팀¹
삼성중공업(주) 조선해양연구소²
부산대학교 조선해양공학과³

Hull-Form Development of a Twin-Skeg Large Ro-Pax Ferry

Hwa Joon Lee^{1,†}·Hag-Soo Jang¹·Chun-Beom Hong²·Sung-Mok Ahn²·Ho-Hwan Chun³
Technical Engineering Team, Samsung Heavy Industries Co., Ltd.¹
Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd.²
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

A hull-form for a 32,000G/T class Ro-Pax ferry has developed in accordance with a need of ferry operators to reduce fuel oil consumption(FOC) due to the drastic increase in oil prices recently and strengthening of environmental rules and regulations such as CO₂ emission. A twin-skeg type is applied as the hull-form in lieu of an open-shaft type in order to improve propulsion performance. In order to achieve this object, flow control devices are installed to reduce a propeller induced vibration which is a main reason to obstruct the application of twin-skeg type passenger vessels owing to an uncomfortable vibration level. Numerical simulation by using an in-house code and a commercial code (Fluent) has performed to find out an optimum design of the flow control devices and to check an improvement in cavity volume. Model tests in Samsung Ship Model Basin are carried out to evaluate propulsion performance with the developed twin-skeg type hull and a reference hull of open-shaft type. In conclusion, it is shown that the twin-skeg type hull is better than the open-shaft in FOC by around 7% and in cavity volume by 20% as well.

※ Ro-Pax ferry: Ro-Ro & Passenger ferry

Keywords : Twin-skeg(트윈스케그), Ro-Pax ferry(로팩스선), FOC(연료소모량), Flow control device(유동제어장치)

1. 서론

국제해상인명안전협약(SOLAS)에 따르면, 여객선은 12명을 초과하는 승객을 운송하는 선박으로, Fig. 1과 같이 운송화물의 종류와 운송목적에 따라 페리선, 로팩스선, 크루즈 페리선 및 크루즈선으로 구분될 수 있다. 단, 로로선은 승객은 태우지 않고 Ro-Ro(Roll-on Roll-off) 화물만을 운송하므로 여객선의 범주에 포함되지 않는다.

대형 로팩스선의 발주는 2008년 미국발 금융위기 이후 주춤한 상황이지만, 향후 기존 선대의 교체 수요 발생과 약 1.3%의 물동량 수요 증가로 증가세가 전망되고 있다(Clarkson Research Services Limited, 2011). 그러나 국제해사기구(IMO)의 선박 오염방지 국제협약(MARPOL)에서 규정하는 EEDI(Energy Efficient Design Index) 인증 법제화를 통한 이산화탄소(CO₂) 배출규제 강화를 2013년 1월1일 이후 강제화하고, 안정세를 보이던 유가도 2002년 이후 증가세로 전환되어 2012년 8월말 현재 96.5 \$/배럴(WTI 기준)로 2002년 대비 약 2.5배가 상승된 상태로, 이에 따라

연료소모량 저감에 대한 시장의 요구가 증대되었다. 한편, 선박의

Fig. 1 Type of passenger vessel

속력 성능은 19세기 Froude의 저항에 대한 과학적인 접근 이후, 과학적 이론에 근거한 개선방안, 모형시험을 통한 성능개선 및 CFD 기법을 활용한 최적선형 도출 등의 다양한 방법으로 선형

및 부가물 설계 최적화가 지속적으로 진행되어 현재는 최적화 기술이 충분히 확보되었다고 판단된다. 더불어 CFD solver가 상용 소프트웨어로 일반화되고 다양한 In-house 코드의 개발로 선형개발시의 설계최적화 과정이 보편적으로 적용되고 있어서 성능의 추가 개선이 쉽지 않은 상황이다 (Saunders, 1957; Jang, et al., 2003; Lee, et al., 2004). 따라서, 본 연구에서는 발상의 전환을 통한 대형 로팩스선의 성능개선을 극대화 할 수 있는 방안을 도출하였다. 즉, 항만내 흡수 제한 및 엄격한 복원 성능과 운동성능의 요구 등으로 여객선에 일반적으로 적용되는 2축 오픈샤프트 선형 대비 추진효율이 약 4% 우수한 것으로 알려진 2축 트윈스케그 선형의 적용을 검토하였다 (ABB Industry Oy, 2001). 그러나 트윈스케그 선형은 추진효율이 우수한 반면에 프로펠러 기진력이 크고 기진원이 선미벌브를 통해 선체로 직접 전달되기 쉬워 선체진동을 유발하게 되며, 이러한 이유로 승객의 안락함이 증시되는 여객선에는 그동안 적용을 못하였다. 본 연구에서는 추진효율의 개선은 물론이고 유동제어장치를 활용한 2축 트윈 스케그 선형의 프로펠러 기진력 감소로 승객의 안락성도 확보할 수 있는 대형 로팩스선의 선형개발을 시도하였다.

2. 개발 대상 선박

삼성중공업(주)는 그리스의 Minoan Lines사, 네덜란드의 Norfolkline사 및 스웨덴의 Stena RoRo사에 대형 로팩스선 8척을 성공적으로 인도하였다 (Joo, 2001; Jang, et al., 2006; Significant Ships 2011, 2012). 본 연구에서는 개발선박의 주요 제원을 선정하기 위해 발주가 유력한 유럽 선주사와 긴밀한 협의를 수행하였으며, 개발 결과를 비교하기 위한 실적선박으로 삼성중공업에서 인도한 8척 중 2011년에 인도된 Stena Transporter호를 선정하였다. 개발선과 실적선의 주요제원을 Table 1에 비교하였으며, 실적선의 운항모습과 일반배치를 각각 Fig. 2, 3에 보였다.

Table 1 Comparison of principal particulars

	Unit	Development	Reference
Gross Tonnage	G/T	32,000	33,700
LOA x B	m	212.5 x 27.3	212.0 x 26.7
Td	m	6.25	6.3
Cb	-	0.62	0.60
Power @ NCR	kW	24,480	16,850
Speed	kts	22.5	22.2
No. of Pax.	P	1,000	300
Trailer Lane	m	3,000	4,050

Fig. 2 Reference vessel in operation

Fig. 3 General arrangement of the reference vessel

3. 트윈스케그 선형 적용 방안

트윈스케그 선형은 Fig. 4와 같이 1축 추진선 보다는 추진 효율이 낮지만, 2축 추진이 필요한 경우에는 2축 오픈샤프트 선형대비 추진효율이 우수한 특성을 보인다. 따라서, 항만내 흡수 제한 등으로 2축 추진시스템의 적용이 요구되는 로로선에 일반적으로 적용되어 왔으며, 최근 선박의 고속화에 따라 프로펠러 부하가 큰 대형 컨테이너선이나 LNG 운반선의 경우에도 트윈스케그 선형이 적용되고 있다. 그러나, 여객선의 경우에는 Fig. 5와 같이 선미벌브의 존재로 불균일한 선미 유동장이 발생하고, 프로펠러 기진력이 증가하여 축계를 통한 진동이 선체로 직접 전달되며 승선감이 떨어지는 문제가 있다. 또한, 선미벌브의 내부공간 협소로 축계작업 등 생산공정에 어려움을 초래할 수 있어서 트윈스케그 선형의 여객선 적용에 어려움이 있었다.

Fig. 4 Propulsive efficiency (ABB Industry Oy, 2001)

Fig. 5 Wake distribution and propeller cavity

일반선의 경우는 선박의 추진효율 개선의 관점에서 Fig. 6과 같이 Vortex generator, SAVER Fin 등 다양한 유동제어장치에 대한 연구 결과가 실선에 적용되었다. 본 연구에서는 유동제어장치가 반류분포의 개선에 따른 기진력 감소의 효과가 있음을 감안하여 트윈스케그 선형의 수선아래 선미부에 유동제어장치를 설치하여 프로펠러 면으로의 유선을 반듯하게 펴고 반류분포를 보다 균일하게 개선하여 프로펠러 기진력을 감소코자 하였다.

Fig. 6 Examples on the application of commercial vessels

또한, 트윈스케그 선형을 적용하는 경우, 선미벌브 내부공간 협소로 인한 축계작업 등에 대한 생산작업이 어려운 문제는 선형

설계시 내부공간에 충분한 작업공간을 확보해 주고, 선미벌브가 1축선 대비 날씬하여 발생하는 Whirling 진동의 축계 베어링을 통한 선체전달 문제는 선미벌브 하부면적을 키우고, 축계배치를 단순화하는 것으로 해결될 수 있다.

4. 트윈스케그 대형 로팩스선 선형개발

개발선의 주요제원은 Table 1과 같으며, 2축 추진 선박의 선미부 형상차이를 Fig. 7에 나타내었다. 오픈샤프트 선형이 선미 중앙부에 센터스케그를 두고 추진축을 스트럿이 지지하는 구조를 택한 반면에, 트윈스케그 선형은 선미벌브를 길게 연장하여 추진축을 바로 프로펠러에 연결하는 선체구조를 보인다.

Fig. 7 Comparison of twin shaft stern profiles

4.1 최적선형 개발

본 연구에서는 실적선의 선수벌브가 과도하여 발생한 저항증가를 최소화하기 위해, 트윈스케그 선형의 개발에 앞서 실적선에 대한 선형 최적화 과정을 수행하였다. 선형최적화는 삼성중공업의 In-house 코드인 Fig. 8의 'RAPID-HOP'를 사용하여 선형의 체적분포를 최적화하는 과정을 통해 조파저항을 최소화하였다. 한편, 실적선에 적용된 Knuckle bulb와 일반적인 High bulb 및 여객선에 많이 사용되는 Gooseneck bulb를 대상으로 구상선수의 높이를 바꿔가며 상용 CFD solver인 Fluent를 사용한 선체주위 유동장 비교 계산을 수행하였다. Gooseneck bulb가 비교에서 좋은 결과를 보였으며, Fig. 9와 같이 구상선수의 조파저항 상쇄 효과와 자체 저항증가 사이의 절충안을 선택하여 구상선수 최적화 설계를 수행하였다. Fig. 10은 이와 같은 최적화 설계를 통해 선수부 파도가 상당히 낮아지고 선체 전반적으로 파도의 차이가 완화된 결과를 보여 최적선형의 조파저항이 개선될 것으로 전망된다.

Fig. 8 Samsung's In-house code 'RAPID-HOP'

(a) Reference

(b) Development

Fig. 9 Optimization of bulbous bow

Fig. 10 Improvement of wave profile

또한, 최적선형의 부가저항을 최소화하기 위해 부가물최적화 시험을 수행하였다. Fig. 11은 스트럿 설계시 적용되는 3가지 각도에 대한 정의를 보이며, Vee angle과 Rake angle은 실제선 결과를 반영하여 66도와 20도가 각각 적용되었고, 스트럿 암의 축과 스트럿 단면의 중심축이 형성하는 스트럿 암 단면 각도를 최적화하기 위한 실험장치의 모습을 Fig. 12에 보여준다. 즉, 스트럿 대신에 더미 브라켓을 설치하여 축계를 지지하고, 5공 피토투브를 이용해 스트럿 주위의 유동을 계측하였다. 계측

결과로 스트럿 암 단면 각도는 내측 스트럿이 -0.5° , 외측 스트럿은 -4° 로 최적화되었다. 이때, 각도는 스트럿 단면의 트위스트 앵글은 작업성을 고려하여 무시하였고, 평균 각도를 취하여 선정되었으며, (-)부호는 Fig. 11과 같이 선측 반대쪽으로 회전함을 의미한다. 그리고, 프로펠러의 회전방향을 선정하기 위해 회전방향 최적화시험이 수행되었으며, 선미에서 선수방향으로 보았을 때 센터라인(center line) 쪽으로 회전하는 경우가(inward) 선측방향으로 회전하는 경우(outward) 대비 요구마력이 2.5% 우수하여 본선의 프로펠러 회전방향을 Inward로 선정하였다. Fig. 13은 프로펠러가 Inward로 회전할 때에 대한 초기타각 최적화 시험결과를 보이며, 초기타각 1.5° 일 때 0.5%의 저항개선의 효과가 있음을 나타내고 있다.

Fig. 11 Definition of angles related to strut design

Fig. 12 Sep-up for strut angle optimization tests

Fig. 13 Results of rudder initial angle test

4.2 스케그 최적설계

트윈스케그 선형을 계획할 때, 주요한 최적설계 인자로는 Fig. 14와 같이 스케그 사이의 거리와 스케그 수직각도가 있으며, 스케그 수직각도는 축계에 대한 스케그의 수직각도로 정의되고,

본 연구에서는 저항 및 반류분포에 대한 설계인자의 영향을 고려하여 최적 스के그 요소를 선정하였다.

Fig. 14 Design factor of twin-skeg hull-form

Fig. 15 Wake distribution for skeg vertical angle variation

Fig. 16 Resistance for skeg vertical angle variation

먼저, 스के그 수직각도 최적화를 위해 프로펠러 직경이 4.6m 이므로 선폭의 37%를 스के그간 거리로 가정하고, 각도를 8도, 15도, 20도로 바꿔가며 반류분포를 Fig. 15와 같이 비교 하였으며, 각도가 작을 때가 미소하게 반류분포가 균일한 결과를 보이고 있다. 반면에, 저항증가는 Fig. 16과 같이 각도가 작을때 저항이 크게 추정되는 결과를 보이고 있어서 본 선의 스के그 수직각도는 15도로 선정하였다. 한편, 스के그간 거리는 선폭의 37%와 44%를 비교하였으며, Fig. 17, 18은 스के그간 거리의 변화에 대해 반류분포는 유사하나, 거리가 증가하면 저항도 증가하는 결과를 보여서 스케그간 거리는 선폭의 37%로 선정하였다.

Fig. 17 Wake distribution for skeg distance

Fig. 18 Resistance for skeg distance

4.3 유동제어장치 최적설계

유동제어장치는 선미 유선의 조정을 통해 반류분포를 보다 균일하게 하여 자항요소의 개선과 프로펠러 기진력의 감소를 위해 선미벌브가 시작하는 위치에 핀을 부착하는 것으로 설계되었다. 핀의 부착위치와 각도는 파라메트릭 검토로 선정

Fig. 19 Configuration of flow control device

Fig. 20 Streamlines at stern frame

되었으며, 길이방향으로는 스테이션 3번, 높이방향으로는 1m 수선에 중심점을 두고 길이 2.1m 폭 0.3m의 핀을 수선에 12도 각도를 갖고 설치하였고, Fig. 19는 핀의 부착 위치와 형상을 보이고 있으며, Fig. 20은 핀을 부착해서 유선의 흐름이 개선된 결과이다. Fig. 21은 트윈스케그 선형에 핀을 부착하여 반류 분포가 개선되고 프로펠러 캐비티가 감소한 결과를 보여준다.

(a) Without flow control device

(b) With flow control device

Fig. 21 Wake distribution and propeller cavity

5. 모형시험을 통한 성능 검증

트윈스케그 적용 대형 로팩스선 선형이 이상과 같이 수치계산을 이용한 최적설계로 개발되었으며, 성능을 검증하기 위해 삼성중공업 대덕선박연구센터내 수조에서 모형시험을 수행하였다 (SSMB, 2011). 모형선의 축척비는 1/24이며, Fig. 22는 실적선(Open-shaft hull-form)을 개선한 최적선형과 개발선 (Twin-skeg hull-form)의 모형선을 보여주고 있다.

실험결과는 실적선, 최적선형 및 핀이 없는 경우와 있는 경우의 개발선에 대한 속력-마력 곡선을 Fig. 23에 나타내었다. 최적선형은 실적선 대비 배수량이 약 5.3% 증가하였음에도 계획속력 22.5노트에서 요구마력이 오히려 1.5% 개선되었으나, FOC 저감에 대한 시장의 요구를 감안하면 만족할 만한 결과로 고려하기는 부족하였다. 한편, 개발선은 최적선형 대비 3.6%의 마력절감을 달성하였고, 핀을 부착하면 요구마력이 0.4% 증가함을 감안하면, 유동제어 장치를 갖는 개발선은 실적선 대비 배수량이 5.3% 증가하였음을 감안하지 않더라도 4.7%의 소요마력 절감 효과를 보이고 있어서 FOC 저감에 대한 시장의 요구를 만족하는 것으로 판단되었다. 또한, 개발선에 대한 인터셉터 적용을 위한 모형시험 결과는 2.3% 마력절감 효과를 보이고 있어, 실적선 대비 전체 개선 효과는 7.0%이며, 이 결과를 Table 2에 요약하였다.

(a) Optimized hull-form to reference (Open-shaft)

(b) Developed hull-form (Twin-skeg)

Fig. 22 Ship models for twin-skeg Ro-Pax ferry

Fig. 23 Comparison of speed-power curve

Table 2 Required power to service speed of 22.5 knots

Hull-form	Description	M/E Power
Reference	Open-shaft	100 %
Optimized hull	Open-shaft (w/ Interceptor)	98.5 % (95.6 %)
Developed hull	Twin-skeg	94.9 %
	Twin-skeg w/ Fin	95.3 %
	Twin-skeg w/ Fin & Interceptor	93.0 %

※ Effect of the displacement increase, 5.3 %, is not considered in the above figures.

한편, 프로펠러 기진력에 대한 개선 결과를 파악하기 위해 실적선과 개발선의 반류분포를 예측하여 Fig. 24와 같이 나타내었고, 예측결과를 토대로 프로펠러 캐비티를 추정하였다.

Fig. 25는 개발선의 캐비티 체적이 실적선 대비 약 20% 감소한 결과를 보여주고 있어서, 승객의 안락성 확보 측면에서도 본 개발선이 대형 로팩스선에 적용될 수 있을 것으로 판단되었다.

(a) Reference vessel (b) Developed vessel with fin
Fig. 24 Results of wake measurements

Fig. 25 Comparison of cavity volume

6. 결 론

대형 로팩스선 건조시장은 유가 상승과 친환경 규제의 강화로 연료소모비 저감에 대한 요구가 증가하는 추세로, 본 연구에서는 이러한 수요에 대응하기 위해 자항성능이 우수한 트윈스케그 선형을 대형 로팩스선에 세계 최초로 적용 개발하였으며, 유동제어장치 활용을 통한 프로펠러 기진력 감소로 승객의 안락성을 개선하여 트윈스케그 선형을 여객선에 적용 가능하도록 개발하였다. 개발선은 삼성중공업 대덕선박연구센터내 수조에서 모형시험을 수행하여 성능이 검증되었으며, 계획속력 22.5 노트에서 실적선 대비 배수량이 5.3% 증가되었음에도 요구 마력이 오히려 7.0% 개선된 결과를 보여 연료소모비를 효과적으로 절감하였고, 유동제어장치를 활용한 프로펠러 기진력 감소는 캐비티 체적이 실적선 대비 20% 절감되어 높은 수준의 여객선 진동 요구수준을 만족할 수 있어서, 본 개발결과가 대형 로팩스선에 성공적으로 적용될 수 있는 것으로 판단된다. 본 연구결과는 특허로도 출원이 되었으며 (Lee & Hong, 2012), 향후 연료소모비 저감과 승객의 안락한 승선감 확보를 통한 여객선 건조 기술차별화로 수주경쟁력의 제고가 전망된다.

참 고 문 헌

- ABB Industry Oy, 2001. *The CRP Azipod Propulsion Concept – The most economic way from crane to crane*, ABB Industry Oy 3BFV000388R01 Rev. B.
- Clarkson Research Services Limited, 2011. *The Newbuilding Market 2011~2023*, Shipbuilding Forecast Club, Forecast Report, March 2011.
- Jang, H.S. Lee, H.J. Joo, Y.R. & Chun, H.H., 2003. Review on the Hull Form Characteristics of a High-Speed Large Passenger Ferry. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(4), pp.9–15.
- Jang, H.S. et al., 2006. Development of large Ro-Pax ferry for operation in the English Channel. *Proceedings of Fall Meeting of Society of Naval Architecture of Korea*, Busan, Republic of Korea, 15–16 May 2006.
- Joo, Y.R., 2001. Performance of 28,000GT High Speed Ro-Ro Passenger Ferry for Minoan Lines. *Proceedings of Cruise+Ferry 2001*, London, UK, 8–10 May 2001.
- Lee, H.J. Jang, H.S. & Chun, H.H., 2004. Study on the Shaft-Strut Design in the Initial Design Stage. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(6), pp.114–120.
- Lee, H.J. & Hong, C.B., 2012. *Twin skeg vessel*. Korean Pat. 10-2012-0086442.
- Saunders, H.E., 1957. *Hydrodynamics in Ship Design*. The Society of Naval Architect & Marine Engineers.
- Significant Ship of 2011, 2012. The Royal Institution of Naval Architects, 2012.
- SSMB, 2011. *Calm Water Model Tests for 3,000LM Ro-Ro Passenger Ferry*, SSMB Report No. R2109162TT-P3, Samsung Ship Model Basin, 2011.