

산적화물선의 에너지 저감 장치들의 성능 비교에 관한 연구

김억규¹ · 이강기² · 조권희[†]

(Received August 19, 2014 ; Revised November 12, 2014 ; Accepted January 12, 2015)

A Study on the Performance Comparison of Energy Saving Devices for Handy-size Bulk Carrier

Eok-Kyu Kim¹ · Kang-Ki Lee² · Kwon-Hae Cho[†]

요약: 최근에 CO2 배출에 대한 환경 규제가 마련되었고, 연료유 가격은 계속해서 상승하고 있다. 이런 상황들을 극복하기 위해 연료소모량을 감소시키고 추진효율을 개선한 에너지 저감 추진장치들이 계속해서 개발되고 있다. 본 논문에는 핸디형 산적화물선에 적용한 PBCF, SCHNEEKLUTH duct, 비대칭 러더 벌브, Mewis duct의 성능 실험을 서술하였다. 그 결과, SCHNEEKLUTH duct가 다른 에너지 저감 장치들에 비해 연료소모량 절감과 추진효율의 향상 측면에서 더 효과적이었다. 또한 SCHNEEKLUTH duct가 거주구 진동에도 효과가 있음을 확인하였다. 그리고 연료소모량은 주기판 de-rating을 통해서도 절감할 수 있었다.

주제어: 추진효율, 에너지 저감 장치, 핸디형 산적화물선, SCHNEEKLUTH duct, De-rating

Abstract: The environmental regulations for CO2 emissions from the ship have been established recently, and fuel oil price has been increased continuously. In order to overcome these circumstances, Energy Saving Devices (ESDs) have been developed continuously to reduce the fuel oil consumption and improve the propulsive efficiency. This paper describes the trial performance of PBCF (Propeller Boss Cap Fins), SCHNEEKLUTH duct, Asymmetric rudder bulb and Mewis duct applied to handy-size bulk carriers. As a result, SCHNEEKLUTH duct is more effective than other energy saving devices at the reducing the fuel oil consumption and the improvement of the propulsive efficiency. In addition, it is confirmed that SCHNEEKLUTH duct is really effective in the vibration of the deck house. And the fuel oil consumption can also be reduced through main engine de-rating.

Keywords: Propulsive efficiency, Energy saving device, Handy-size bulk carrier, SCHNEEKLUTH duct, De-rating

1. 서론

산업화에 따른 화석연료의 사용은 지구온난화, 오존층 파괴, 산성비 및 호흡기 질환 등을 유발하며 인류에 심각한 위협으로 다가오고 있으며, 전 세계적으로 지구 환경 보호에 관한 문제가 국제적 관심사로 부각되고 있다. 국제해사기구(IMO)의 '제2차 국제해사기구 온실가스 연구 2009 (Second IMO GHG Study 2009)'에 의하면 2007년 전 세계적으로 배출되고 있는 CO2 배출량은 약 317억 톤으로 추정된다. 이 중 선박에 의한 CO2 배출량은 1,046 백만톤으로 전 세계 배출량의 약 3.3%를 차지하고 있으며, 국제 항해 선박의 배출량은 870 백만톤으로 약 2.7%를 차지하고 있다. 이러한 이유로 인해 전 세계적으로 CO2 감축 기술 등의 환경영향기술에 대한 필요성의 지속적인 증대와 화석

연료의 고갈로 인한 고유가의 문제로 인해 최근 수송 효율의 극대화를 위하여 선박의 대형화 및 에너지 저감 장치에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그에 따른 추진 효율을 향상시키기 위한 에너지 저감 장치의 개발에 대해 조선소와 연구소에서 많은 연구를 진행하고 있으며, 이의 실용화를 위한 연구는 현재에도 지속적으로 수행되어 지고 있다[1]-[3].

본 논문에서는 핸디형(handy-size) 벌크선인 34k 벌크선과 35k 벌크선에 에너지 저감 장치인 PBCF, SCHNEEKLUTH duct, 비대칭 러더 벌브(Asymmetric rudder bulb), Mewis duct를 실제로 적용하였을 경우, 선박 속도와 마력값 간의 그래프와 주기판 회전수와 마력값 간의 그래프를 통해 어느 정도의 추진 성능이 개선되는지를 확인하고, 연료소모량 계

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1539-655X>): Department of Offshore Plant Management, Korea Maritime University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 606-791 Korea, E-mail: khcho@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4252

1 Department of Marine System Engineering Graduate School, Korea Maritime University, E-mail: ekkim@hanjinsc.com,

2 Department of Offshore Plant Management, Korea Maritime University, E-mail: kangkilee@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4266

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.



Figure 2: Speed-Power for A1 ship and A2 ship

Table 4: Power for A1 ship and A2 ship

Item	A1 ship	A2 ship
Power based on 15knots	4,009kW	3,697kW

Table 5: Speed for A1 ship and A2 ship

Item	A1 ship	A2 ship
Speed based on 5,000kW	14.9knots	15.1knots

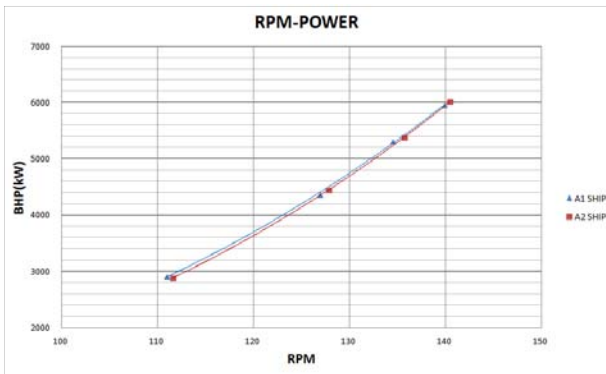


Figure 3: RPM-Power for A1 ship and A2 ship

Figure 3에서 근소하지만 동일마력상 A2 선박이 A1 선박대비 주기관 회전수가 약 0.4% 증가하였다. 이것은 PBCF가 프로펠러 토크 감소에 영향을 미치고, 토크 감소는 주기관 마력 감소와 연관됨을 의미하며, 실제로 상기 내용에 언급되었듯이 마력값이 7.8% 감소하였다.

그리고 주기관 90% 부하 기준, A1 선박의 연료소모량 예측값은 199.04 g/kW·hr 이며, A2 선박의 연료소모량 예측값은 185.73 g/kW·hr 이었다. 이 예측값을 하루 단위로 다시 계산하면, A1 선박의 연료소모량은 25.4 tons/day 이고, A2 선박의 연료소모량은 24.8 tons/day 이며, A2 선박이 A1 선박대비 연료소모량이 2.4% 절감되었다.

3.2 SCHNEEKLUTH duct 효과

Table 3을 기준으로 두 번째로 Heavy ballast 조건하에서의 에너지 저감 장치 미적용 선박과 SCHNEEKLUTH duct를 적용한 선박의 시운전 예측값을 비교 검토하였고, 에너지 저감 장치 미적용 선박을 A3 선박, Figure 4 도면의 SCHNEEKLUTH duct를 적용한 선박을 A4 선박이라고 칭하였다.

A3 선박과 A4 선박의 시운전 예측값을 Figure 5와 Figure 6의 그래프로 나타내었다. Figure 5는 선박 속도와 마력값 간의 그래프이고 Figure 6은 주기관 회전수와 마력값 간의 그래프이다.

Figure 5에서 선박 속도 14knots 기준, A3 선박과 A4 선박의 마력값은 Table 6과 같으며 A4 선박이 A3 선박대비 마력값이 17.5% 감소하였으며, 마력값 5,000kW 기준, A3 선박과 A4 선박의 속도는 Table 7과 같으며 A4 선박이 A3 선박대비 속도가 6.2% 증가하였다.

Figure 6에서 118rpm이하인 저회전영역에서는 두 선박의 회전수가 근소하나, 고회전수로 갈수록 A4 선박의 회전수가 A3 선박대비 증가하고 있으며, 평균적으로 A4 선박이 A3 선박대비 주기관 회전수가 약 1.4% 증가하였다.

SCHNEEKLUTH duct를 장착한 선박의 주기관 회전수가

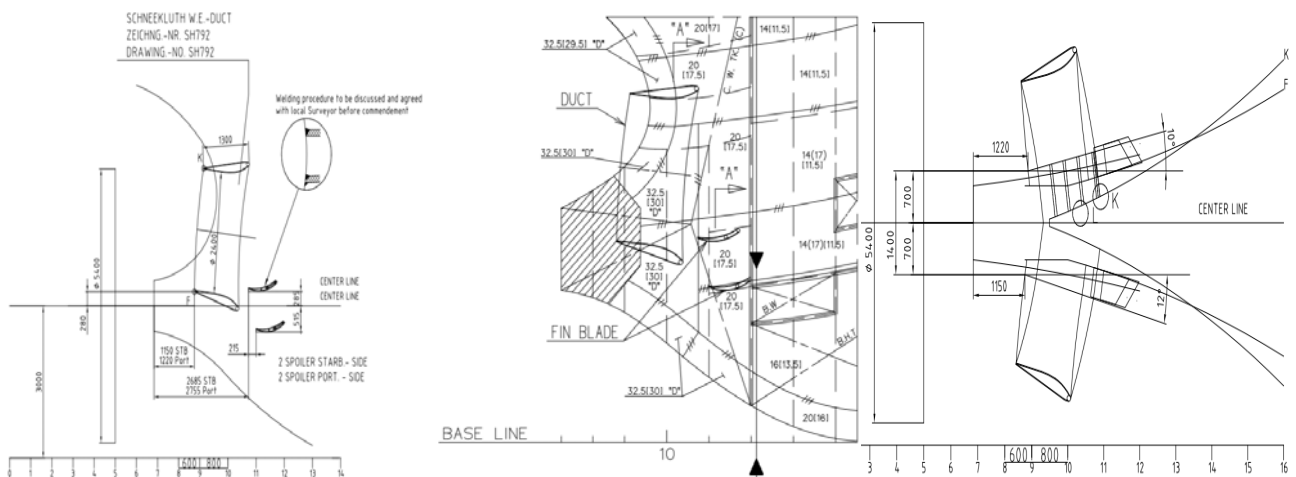


Figure 4: SCHNEEKLUTH duct for A4 ship



Figure 5: Speed-Power for A3 ship and A4 ship

Table 6: Power for A3 ship and A4 ship

Item	A3 ship	A4 ship
Power based on 14knots	5,277kW	4,353kW

Table 7: Speed for A3 ship and A4 ship

Item	A3 ship	A4 ship
Speed based on 5,000kW	13.7knots	14.6knots

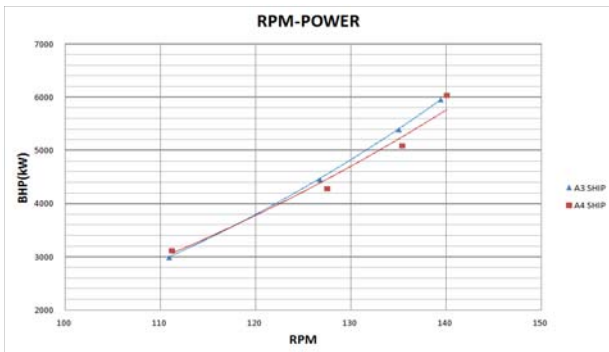


Figure 6: RPM-Power for A3 ship and A4 ship

PBCF를 장착한 선박대비 약 1.0% 더 증가하였으며, 회전수가 더 증가하였다는 것은 SCHNEEKLUTH duct가 PBCF보다 프로펠러 토크 감소에 좀 더 영향을 미친다는 의미로 분석되고, 실제로 PBCF가 마력값을 7.8% 감소시킨 것에 비교하여 SCHNEEKLUTH duct는 마력값을 17.5% 감소시켰다.

SCHNEEKLUTH duct가 PBCF보다 9.7%나 마력값을 감소시킨 만큼 연료소모량도 더 절감될 것으로 예상되며, A3 선박과 A4 선박의 연료소모량 계측값을 확인해 보았다. 주기관 90% 부하 기준, A3 선박의 연료소모량 계측값은 205.3 g/kW·hr 이며, A4 선박의 연료소모량 계측값은 202.2 g/kW·hr 이었다. 이 계측값을 하루 단위로 다시 계산하면, A3 선박의 연료소모량은 27.1 tons/day 이고, A4 선박의 연료소모량은 24.4 tons/day 이며, A4 선박이 A3 선박대비 연료소모량이 10% 절감되었다.

이것은 PBCF가 연료소모량을 2.4% 절감시킨 것 보다 7.6%를 더 절감시켰으며, SCHNEEKLUTH duct가 PBCF보다 마력값을 9.7% 더 감소시킨 만큼 연료소모량도 더 절감되었다.

그리고 SCHNEEKLUTH duct 제작사의 시험 결과 보고서에 의하면 SCHNEEKLUTH duct가 프로펠러로 들어가는 유체의 흐름을 균일류에 가깝도록 만드는 역할을 함으로써 프로펠러 날개 팁(blade tips)에서 발생하는 캐비테이션 형성을 억제하고 맥동 압력(pressure pulse)도 감소시켜 거주구의 진동을 감소시킬 수 있다고 한다. 실제로 Figure 7과 같이 SCHNEEKLUTH duct를 장착한 선박의 거주구 진동은 에너지 저감 장치를 설치하지 않은 선박대비 진동 수준은 약 36%이고, PBCF를 장착한 선박대비 진동 수준은 약 55%이며, 거주구 갑판의 진동을 0.5~0.7mm/s 수준으로 유지하였다.

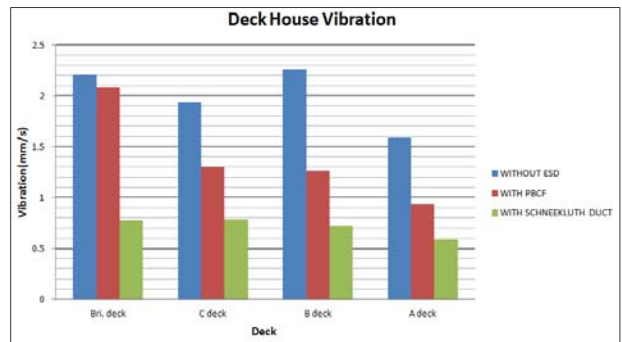


Figure 7: Deck house vibration for 34k bulk carriers

4. 35k 벌크선에서 비대칭 러더 벌브와 Mewis duct의 에너지 저감성능 비교

동일 시리즈는 아니지만 총 2척의 동일 선형 및 사양인 35k 벌크선에서 1척은 삼성중공업에서 개발한 비대칭 러더 벌브(Asymmetric rudder bulb)를 적용하였고, 나머지 1척은 뮤이스 덕트(Mewis duct)를 적용하였다. 실제 시운전은 2척 모두 Heavy ballast 조건하에서 진행되었다.

Heavy ballast 조건하에서의 비대칭 러더 벌브를 적용한 선박과 뮤이스 덕트를 적용한 선박의 시운전 계측값을 비교 검토하였고, Figure 8 도면의 비대칭 러더 벌브를 적용한 선박을 B1 선박, Figure 9 도면의 뮤이스 덕트를 적용한 선박을 B2 선박이라고 칭하였다.

B1 선박과 B2 선박의 시운전 계측값을 Figure 10과 Figure 11의 그래프로 나타내었다.

Figure 10은 선박 속도와 마력값 간의 그래프이고 Figure 11은 주기관 회전수와 마력값 간의 그래프이다.

Figure 10에서 선박 속도 14knots 기준, B1 선박과 B2 선박의 마력값은 Table 8과 같으며 B2 선박이 B1 선박대비 마력값이 9.7% 감소하였고, 마력값 5,000kW 기준, B1 선박과 B2 선박의 속도는 Table 9와 같으며 B2 선박이 B1 선박대비 속도가 3.5% 증가하였다.

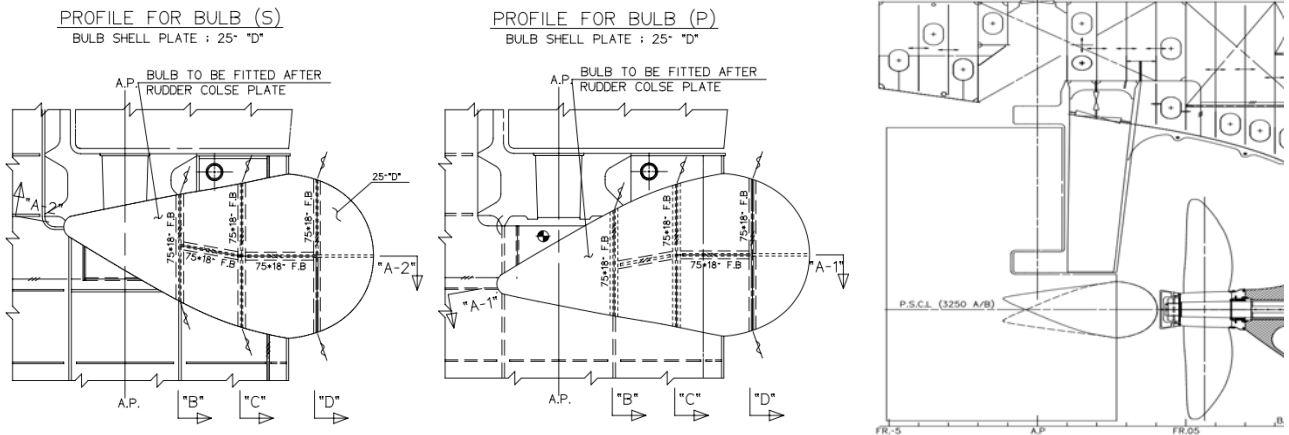


Figure 8: Asymmetric rudder bulb for B1 ship

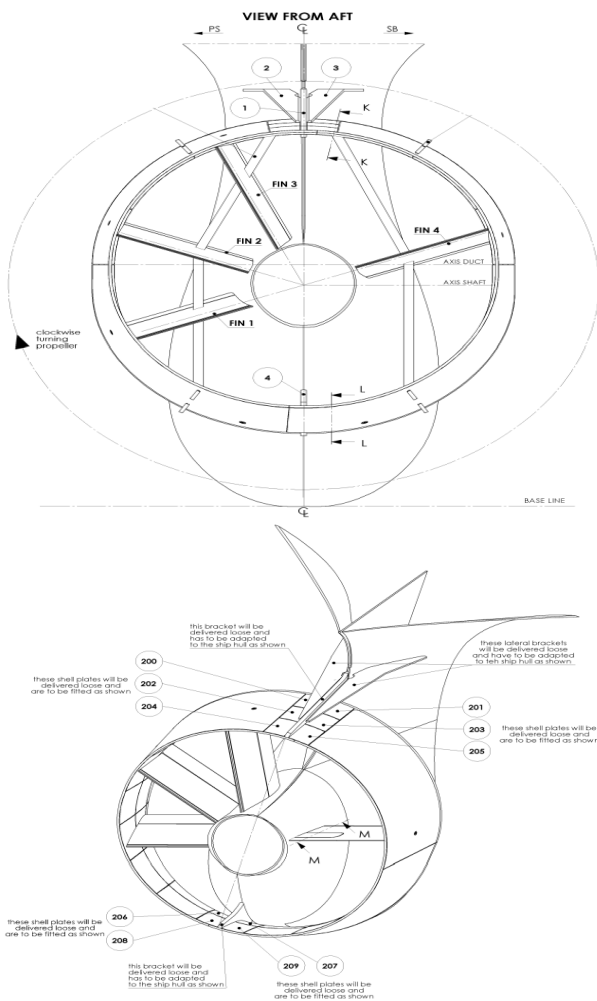


Figure 9: Mewis duct for B2 ship

Table 8: Power for B1 ship and B2 ship

Item	B1 ship	B2 ship
Power based on 14knots	5,305kW	4,792kW

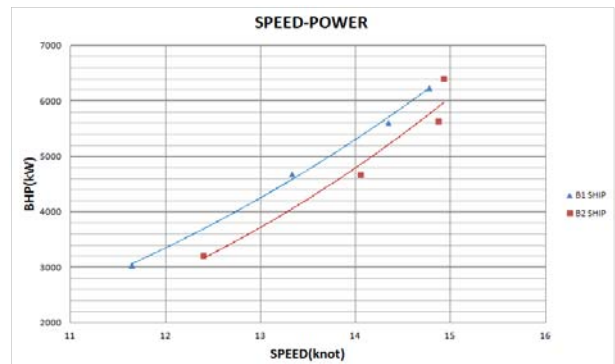


Figure 10: Speed-Power for B1 ship and B2 ship

Table 9: Speed for B1 ship and B2 ship

Item	B1 ship	B2 ship
Speed based on 5,000kW	13.7knots	14.2knots

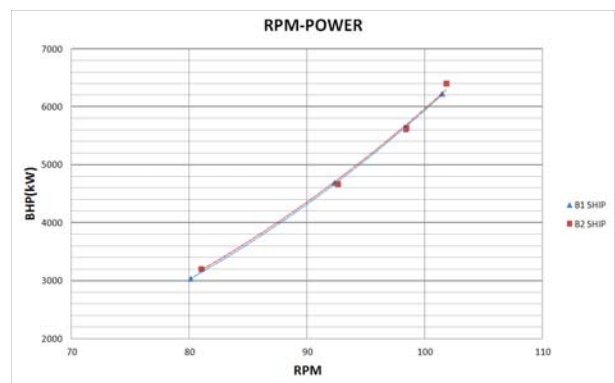


Figure 11: RPM-Power for B1 ship and B2 ship

Figure 11에서 B1 선박이 B2 선박보다 마력값과 속도에서는 안 좋았지만, 매우 근소하게 약 0.06% 정도의 주기관 회전수가 증가하였다. 뮤이스 덕트는 선체에 의해 교란되어 프로펠러에 불균일하게 유입되는 유동을 정류하고 유속

분포를 고르게 함으로써 뮤이스 덕트 후류에서 에너지의 손실을 최소화하여 비대칭 러더 밸브 대비 추진효율이 향상되는 반면, 비대칭 러더 밸브는 **Figure 12, Figure 13**과 같이 허브 와류를 감소시키면서 프로펠러에 의해 발생된 맥동 압력도 함께 감소시켜 뮤이스 덕트 대비 매우 근소하게 주기관 회전수가 증가한 것으로 보인다.

그리고 HSVA에서 **Figure 14**와 같이 우현 러더 밸브 하부에서는 밀어넣는 힘이 작용하고 좌현 러더 밸브 상부에서는 옆으로 빠져나가는 힘이 작용함을 확인하였다.

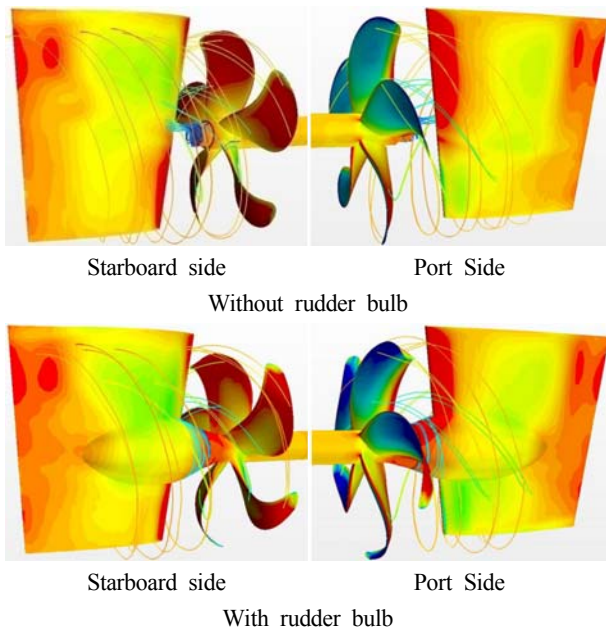
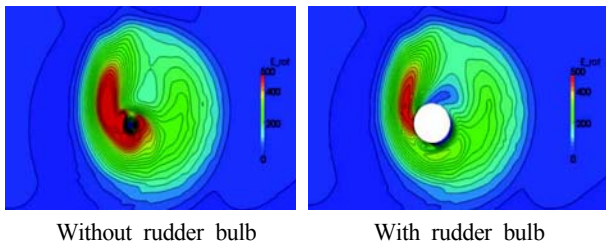


Figure 12: Pressure distribution and streamlines[4]



Without rudder bulb With rudder bulb

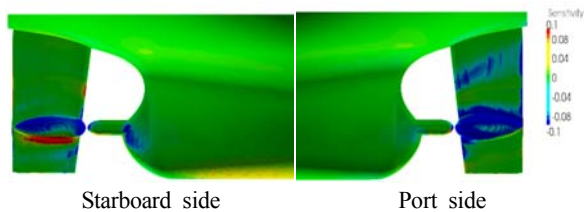


Figure 14: Sensitivities on the surface of rudder bulb[5]

이러한 작용으로 인해 **Figure 8**과 같이 우현의 러더 밸브 끝은 하부의 밀어넣는 힘을 완화시키고자 위로 올리고 좌현의 러더 밸브 끝은 상부의 옆으로 빠져나가는 힘을 줄

더 증대시키기 위해 아래로 내린 것으로 보이며, 이러한 비대칭 러더 밸브의 형상으로 인해 기존 형상의 러더 밸브보다 좀 더 허브 와류 감소에 영향을 미쳐 주기관 회전수 증가와 연관되는 것으로 보인다.

연료소모량은 주기관 90% 부하 기준, B1 선박의 연료소모량 예측값은 168.8 g/kW·hr 이며, B2 선박의 연료소모량 예측값은 167.8 g/kW·hr 이었다. 이 예측값을 하루 단위로 다시 계산하면, B1 선박의 연료소모량은 21.1 tons/day 이고, B2 선박의 연료소모량은 20.1 tons/day 이며, B2 선박이 B1 선박대비 연료소모량이 4.7% 절감되었다. 35k 벌크선의 경우, 에너지 저감 장치를 미적용한 동일 사양의 실적선이 없어 비교 대상이 없으므로, 해당 주기관 모델 (5S50ME-B9.2) SNCR의 FOC(22 tons/day)에 비교하였고, B1 선박은 연료소모량이 4.1% 절감되고, B2 선박은 연료소모량이 8.6% 절감되었다.

그리고 SCHNEEKLUTH duct가 거주구의 진동을 감소시키는 것을 확인하여 비대칭 러더 밸브와 뮤이스 덕트를 장착한 선박의 거주구 진동을 **Figure 15**와 같이 확인해 본 결과, 비대칭 러더 밸브는 허브 와류를 감소시킴으로써 러더의 저항이 감소되어 뮤이스 덕트 대비 거주구의 진동이 최대 약 23% 수준이었고, 뮤이스 덕트는 거주구의 낮은 갑판으로 갈수록 진동이 감소하는 반면에 비대칭 러더 밸브는 거주구 갑판의 진동을 0.7~0.8mm/s 수준으로 유지하였다.

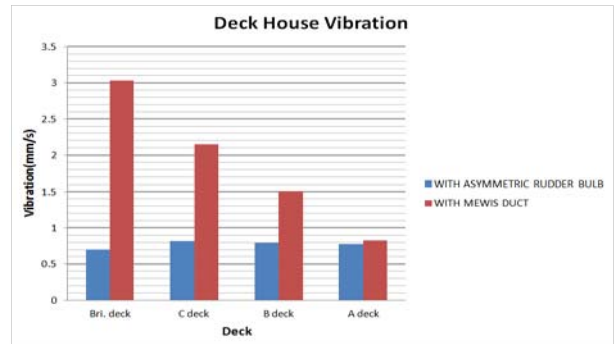


Figure 15: Deck house vibration for 35k bulk carriers

5. 주기관 최적화에 따른 성능 비교

34k 벌크선은 주기관 모델이 6S42MC7이었지만 35k 벌크선은 MC 모델보다 연료소모량이 적은 ME 모델이면서도 선박에서 필요한 출력보다 큰 성능을 내는 주기관 모델인 5S50ME-B9.2를 선택하고, 선박에서 필요한 출력만큼 de-rating하여 연료소모량을 **Table 10**과 같이 줄였다.

그런데 35k 벌크선은 축계 T/V를 계산한 결과, Limit τ_2 (τ_2)를 초과하여 T/V 댐퍼(damper)를 추가 설치하고 터닝 휠 사양을 변경해야 했고, 진동 문제로 인해 전기식 밸런서 (electric balancer)를 추가로 설치함에 따라 초기 투자비용이 추가로 증가하였다. 그러나 1년에 280일을 운항하고, 중유

(HFO) 가격을 현 시세에 따라 600 USD/ton이라 하면, 5S50ME-B9.2 모델이 6S42MC7 모델보다 연간 1,148톤의 연료를 적게 사용하며, 연간 688,800 USD를 절약할 수 있고, 초기 주기판 구매 투자비용이 400,000 USD 더 비싸지만, 1년 이후에는 초기 구매 투자비용을 회수할 수 있다.

량이 많이 절감되고 추진 성능과 거주구 진동이 좋음을 확인하였으며, 추후 34k와 35k급 벌크선에 5S50ME-B9 모델의 주기판과 SCHNEEKLUTH duct 에너지 저감 장치를 같이 적용한다면, 연료소모량을 더 많이 절감하면서 CO2 배출을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

Table 10: Comparison with 6S42MC7 and 5S50ME-B9.2

Main Engine Model	6S42MC7	5S50ME-B9.2
Cylinder bore X stroke	420mm x 1,764mm	500mm x 2,214mm
NMCR	6,480kW at 136rpm	8,900kW at 117rpm
SMCR	6,480kW at 136rpm	6,050kW at 99rpm
NCR	5,832kW at 131rpm	5,445kW at 95.6rpm
SFOC at SMCR	179 g/kW-hr	162.1 g/kW-hr

6. 결론

본 논문에서는 점차 강화되고 있는 환경 규제와 연료비 상승에 대응할 수 있는 추진효율을 향상시키고 연료소모량을 줄이면서 배출가스 또한 줄이는 에너지 저감 장치와 주기판 최적화를 실선 핸디형 벌크선에 적용하여 운전 성능을 비교 검토해 보았으며, 이 과정에서 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) PBCF를 적용한 벌크선은 에너지 저감 장치 미적용 선박 대비 선속은 1.3% 증가하였고, 연료소모량은 2.4% 절감되었다.

2) SCHNEEKLUTH duct를 적용한 벌크선은 에너지 저감 장치 미적용 선박 대비 선속은 6.2% 증가하였고, 연료소모량은 10% 절감되었으며, 거주구 갑판의 진동을 0.5~0.7mm/s 수준으로 유지하였다. PBCF를 적용한 벌크선보다 효과가 더 크다.

3) Mewis duct를 적용한 벌크선은 비대칭 러더 밸브를 적용한 벌크선 대비 선속은 3.5% 증가하였고, 연료소모량은 4.7% 절감되었다. 해당 주기판 모델 SNCR의 연료소모량 대비 비대칭 러더 밸브는 4.1% 연료소모량이 절감되었고, Mewis duct는 8.6% 연료소모량이 절감되었다. 그리고 비대칭 러더 밸브는 러더의 저항을 감소시켜 거주구 갑판의 진동을 0.7~0.8mm/s 수준으로 유지하였다.

4) 주기판 de-rating을 이용하여 연료소모량을 약 15% 절감할 수 있었고, de-rating에 의한 초기 구매 투자비용이 증가하지만, 연료절감에 따른 운항 비용 절감으로 짧은 기간 내에 투자비용을 회수할 수 있었다.

본 논문을 통해 핸디형 벌크선에서 SCHNEEKLUTH duct가 다른 에너지 저감 장치들에 비해 전반적으로 연료소모

References

- [1] K. M. Kim, A Study on the Recent IMO MEPC's Trend and Policy for Regulation of Air Pollution and CO2 from Ships, M.S. Thesis, Department of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Korea, 2010.
- [2] C. L. Kim, A Study on the Green Container (tanker) Development, M.S. Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Korea, 2011.
- [3] W. J. Mun, A Study on the Biased Energy Saving Device for Low Speed Vessels, M.S. Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Korea, 2013.
- [4] MAN Diesel & Turbo, Combined Kappel Propeller and Rudder Bulb System for Improved Propulsion Efficiency, p. 8, 2012.
- [5] HSWA, Asymmetric Rudder Bulb for Energy Saving, p. 12, 2013.