

산적화물선 운항성능 분석을 위한 선속, 파고 및 풍속 자료의 유효성 분석

이경중[†] · 신명수¹ · 박범진² · 기민석³ · 전경환⁴

(Received November 14, 2018 ; Revised December 28, 2018 ; Accepted February 7, 2019)

Validity analysis of speed, wave height, and wind speed for the operational performance of a bulk carrier

Gyeong-Joong Lee[†] · Myung-Soo Shin¹ · Beom-Jin Park² · Min-Suk Ki³ · Kyung-Hwan Jeon⁴

요약: 조선사 및 운항사의 선박 에너지효율에 대한 관심이 날로 증가하고 있으며, 실 해상을 운항하는 선박의 운항자료를 모니터링하여 선박의 운항성능을 추정하려는 노력을 하고 있다. 운항성능을 보다 정확하게 추정하기 위하여서는 선박의 대수속도, 해상상태에 대한 자료의 유효성이 검증되어야 한다. 본 연구에서는 현재 운항하고 있는 산적화물선의 운항자료를 취득하여 이중 속도, 파고, 바람자료의 유효성을 검토하였다. 속도는 GPS로 얻어진 대지속도와 대수속도계(Speed Log)에 의한 대수속도를 비교 검토하여 유효성을 알아보았으며, 해상상태에 대하여서는 기상예보자료와 파고레이더, 풍속풍향계의 자료를 비교 검토하였다. 결과로 현재 대상선에 탑재된 대수속도계의 유효성을 검증하였으며, 기상예보자료도 운항성능을 추정하는데 사용될 수 있을 정도의 신뢰성을 가지고 있다는 판단이 내려졌다. 취득 자료의 신뢰성을 바탕으로 표준상태의 선속-동력곡선을 일부 추정하여 본 결과 타당한 결과가 얻어졌으며, 현재 계속 축적되고 있는 자료를 분석하여 운항선의 운항성능을 추정하는 방법에 대한 분석을 할 예정이다.

주제어: 에너지효율, 운항성능, 대수속도, 해상상태, 기상예보

Abstract: There is a growing interest of ship builders and shipping companies in energy efficiency, and efforts to estimate ship performance are having been realized by monitoring the operational data. An estimation of higher accuracy requires the validation of the speed through water and the ocean weather. In this paper, the validity of speed, wave height, and wind speed were investigated using the obtained operational data of a sea-going bulk carrier. The SOG(speed over ground) from GPS(global positioning system) and STW(speed through water) from speed log were compared and analyzed. And the weather forecast(hindcast) and the data from wave radar and anemometer were compared and discussed. As a result, the validity of the speed log with which the subject ship was equipped was confirmed. The data from the weather forecast were sufficient for the estimation of the ship performance. After performing certain sample calculations of the speed-power curves, reasonable results were obtained. And it is expected to analyze the methodology for the estimating the standard speed-power curve using the operational data which are being currently filed for the subject ship.

Keywords: Energy efficiency, Ship performance, Speed, Environment, Weather forecast

1. 서론

운송수단의 친환경화는 현재 중요한 이슈이며, 점점 더 강화되고 있는 추세이다. 선박의 경우 국제해사기구(IMO:

International Maritime Organization)에서 EEDI(Energy Efficiency Design Index) 규제를 강제화하고 있으며, 향후 EEOI(Energy Efficiency Operation Index) 규제도 계획되어있

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7555-9034>): Principal Researcher, Advanced Ship Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 32, Yuseong-daero 1312 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34103 Korea, E-mail: gjlee@kriso.re.kr, Tel: 042-866-3415

1 Principal Researcher, Advanced Ship Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, E-mail: msshin@kriso.re.kr, Tel: 042-866-3414

2 Senior Researcher, Advanced Ship Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, E-mail: bjpark@kriso.re.kr, Tel: 042-866-3416

3 Senior Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, E-mail: mski@kriso.re.kr, Tel: 042-866-3419

4 Senior Manager, Maritime Planning Team, SM Division, POSSM, E-mail: khjeon@possm.com, Tel: 051-400-1796

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.

다[1]. 이러한 지수들을 알아내기 위하여서는 선속-동력곡선으로 대표되는 운항성능을 보다 정확하게 추정하는 것이 필요하다. 운항선사는 선박의 운항성능에 대하여 지대한 관심을 가지고 있는데, 이는 운항비용 중 많은 부분을 차지하는 연료비 문제와 운항계획을 세울 때 해상상태와 선박의 운항성능이 중요한 요소로 작용하기 때문이다. 따라서 각 운항선사는 선박의 상태를 계속 확인 분석하고 선박 운항계획에 자료로 활용하기 위하여, 선박에 모니터링 장비와 이를 분석하는 시스템을 탑재하고 있다.

선박 운항성능은 여러 단계에서 확인하고 있다. 설계시 유사선박 및 동형선의 성능을 참조하여 성능을 예상하고, 모형시험을 통하여 설계 선박의 운항성능을 추정한다. 건조 직후에는 시운전을 통하여 운항성능을 검증한다. 속력시운전은 저항/추진성능을 추정하기 위하여 시행하는데, 파도와 바람이 없는 상태에서 시험을 하여야 하지만 그러한 상태를 만나기가 어려우므로 해상상태가 나쁘지 않은 상황에서 시운전 후 해상상태 영향을 보정하여 성능을 추정한다. 이 방법은 실선속력시운전으로서 ISO15016[2]으로 표준화되어 있다[3]-[6]. 이후 실 운항에 투입되면서 성능을 면밀하게 확인하는 작업은 어려워지지만, 모니터링을 통하여 계속적으로 선박의 성능은 추정되어지고 있다. 선박은 시간이 지나면서 기계적 성능뿐만 아니라, 선체외판이 더러워짐과 더불어 따개비 같은 수중생물이 외판에 붙어 서식하는 파울링(fouling)이 커지며 저항성능이 나빠진다. 따라서 통상적으로 3년에서 5년 사이의 기간마다 외부도색 및 내부수리를 하게 되고, 이때 성능변화를 겪게 된다. 이 성능변화는 표준화된 ISO19030[7] 방법을 이용하여 확인하고 있다. 그러나 ISO19030 방법은 아주 좋은 해상상태에서 속도변화가 거의 없는 상태에서의 자료를 추출하여 운항성능을 추정하므로 운항자료 중 아주 일부분의 자료만을 가지고 성능추정을 하고 있는 상황이다.

관심의 대상이 되는 선박 운항성능은 두 가지인데, 하나는 선박 표준운항성능으로 바람과 파도 등 외적요인이 없을 때의 선박 고유의 운항성능이고, 다른 하나는 환경외력을 받고 운항할 때의 운항성능이다. 선박 표준운항성능은 속력시운전과 마찬가지로 환경외력이 없을 때 표준 운항 상태에서의 성능인데, 운항자료 중 바람과 파도가 거의 없는 상태에서의 운항자료를 추출하여 사용하면 된다. 이의 방법이 ISO19030이다. 그러나 환경외력이 없는 해상상태는 거의 만나기가 어려우므로 ISO19030방법에 대한 어려움과 부정확을 주장하는 연구결과가 많이 나오고 있다[8]. 환경외력을 보정하는 방법으로, 실제 운항자료를 이용하여 실운항성능과 표준운항성능을 추정하는 방법들에 대한 연구가 많이 이루어졌으며, 환경외력을 보정하는 방법은 ISO15016으로 표준화가 이루어 있다[9]. 그러나 아직도 많은 불확실성이 남아있어서 해결해야할 과제가 남아있는 상황이다[10].

운항성능 추정의 정확도는 선박 운항상태와 이에 영향을 주는 해상상태에 대한 자료의 정확성에 영향을 받는다. 가장 중요한 인자는 선속, 출력, 해상상태이다. 이 중 선박 저항의 가장 중요한 인자인 대수속도는 계측기가 선박의 측면에 설치되어 선박주위의 변형된 유동장내에서 유체의 속력을 계측하므로 실제 선속과 차이가 발생할 수 있어, 속력시운전시 대지속도와의 비교를 통하여 캘리브레이션을 수행한 후 사용된다. 출력은 엔진마력, 축마력, 전달마력 등으로 구분하는데 실선에서는 축에서 계측하는 토오크와 축회전수를 곱한 축마력을 계측하거나 엔진시스템에서 제공하는 엔진마력을 주로 이용한다. 축마력 계측도 속력시운전에 별도의 축마력계측기를 부착하여 속력시운전을 하면서 캘리브레이션한다. 그 이후 운항하면서 문제가 없으면 검교정을 시행하지 않고 사용하는 것이 현실이다. 불확실한 자료를 주는 항목은 해상상태에 대한 자료이다. 해상상태는 통상적으로 관측에 의한 자료와 기상예보자료, 그리고 풍속계 및 파고레이더 자료를 사용한다[11]-[13]. 계측하는 방식은 선원의 눈에 의한 관측과 풍속계, 파고 레이더인데, 선원의 관측은 관측자의 경험과 관측시간에 따라 다르며, 풍속계는 부착위치와 바람의 방향에 따라 원하지 않는 결과를 줄 수 있으며, 파고레이더는 현재 파고를 직접 계측하는 것이 아니라 레이더 영상의 신호 대잡음비를 이용하는 비접촉식 방법으로 계측하기 때문에 간접계측의 한계성을 가지고 있다. 그러나 가장 큰 문제는 해상상태의 불규칙성이다. 직접 계측하기가 힘들고 계속 변화하기 때문에 통계적인 자료로 해상상태를 정의하여 사용한다. 이 때문에 실시간 계측값이 통계적 대푯값과 다를 수가 있어서, 통계치 범위내의 값인지를 확인하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 운항성능을 추정하는 방법의 검증과 향후 이용을 위하여 실제 운항하는 선박의 운항자료를 계측하여 축적하고 있는 한편, 축적된 자료를 이용하여 계측자료의 적정성, 선박의 표준운항성능을 추출하는 연구를 하고 있다. 현재 2015년부터의 대상선의 운항자료를 축적하고 있으며, 이는 2019년 초까지 계속될 예정이다. 본 논문에서 소개하는 결과는 우선, 계측자료의 유효성에 대하여 살펴보고, 환경외력을 보정하는 방법을 이용하여 선박의 선속-동력곡선을 추출한 결과를 소개하고자 한다. 또한 이러한 결과를 고찰하며 향후 어떠한 연구를 수행하여야 할지를 설명한다.

2. 실선 계측항목

본 연구의 대상선은 176K 산적화물선으로 주로 한국-호주항로를 운항하는 선박이다. 대상선의 주요치수는 Table 1과 같다.

Table 1: Principal particulars of the subject ship

LENGTH (O.A)	291.80 m	DEADWEIGHT (AT SCANT. DRAFT)	175,800 t
LENGTH (B.P)	282.20 m	CAPACITY OF CARGO HOLDS	195,000 m ³
BREATH (MLD)	45.00 m	MAIN ENGINE	MAN B&W 6S70MC Mark VI 1SET
DEPTH (MLD)	24.75 m	M.C.R.	16,860 kW × 91.0 RPM
DESIGNED DRAFT	16.50 m	C.S.R. (NCR)	14,331 kW × 86.2 RPM
SCANTLING DRAFT	18.25 m	SERVICE SPEED	14.9 knot (AT C.S.R., T=16.5m WITH 15% S.M.)

대상선 사진과 주 항로는 **Figure 1, Figure 2**와 같다.



Figure 1: Photograph of the subject ship



Figure 2: Main route of the subject ship

대상선의 운항성능 변화를 분석하기 위하여, 모형시험을 수행하였으며 그 결과 중 선속-동력곡선은 **Figure 3**에 실었다. 대상선의 계획흘수, 선수, 선미 각 1미터 트림상태의 속도별 축회전수, 축마력을 도시하였다. 축마력은 12노트의 값으로 무차원화 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 트림 변화에 의한 변화량은 무시 가능할 정도로 크지 않았다.

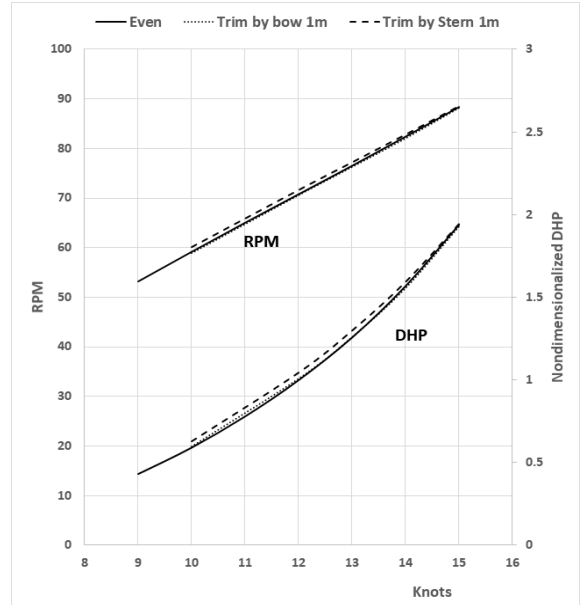


Figure 3: Model test result of the subject ship (speed-power curve)

대상선에는 ‘선박성능관리모니터링시스템(SPMS; Ship Performance Monitoring System)’이 탑재되어 선박운항사가 실시간으로 선박의 운항정보를 모니터링하고 있다. 모니터링되는 항목을 분석하여 선박의 운항성능을 추정하는데 필요한 항목을 정리하고, 모니터링되는 항목과 비교하여 추가로 필요한 항목들을 도출하여, 이 항목에 대한 자료를 얻어내는 방법을 협의하였다. 결과로 현재 선박에서 계측하고 있지만 모니터링하지 않고 있는 항목은 SPMS 항목에 포함하고, 새로운 계측이 필요한 항목은 계측기를 장착하는 것으로 정하였다. 새로이 장착된 장비는 파고레이더와 초음파 풍속계이었다. 파고레이더는 X-band를 사용하는 장비로 **Figure 4**에 파고레이더 분석화면을 소개하였으며, **Figure 5**는 파고레이더 장착위치를 보여주고 있다. 초음파식 풍속계는 선체유동의 영향을 적게 받는 위치를 선정하여 장착하였으며 **Figure 6**에 그 위치를 보여주고 있다.

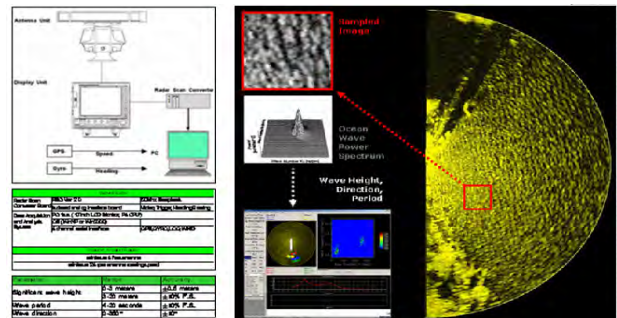


Figure 4: Analysis Screen of the Wave Radar (Wave Finder)



Figure 5: The location of the antenna of wave radar

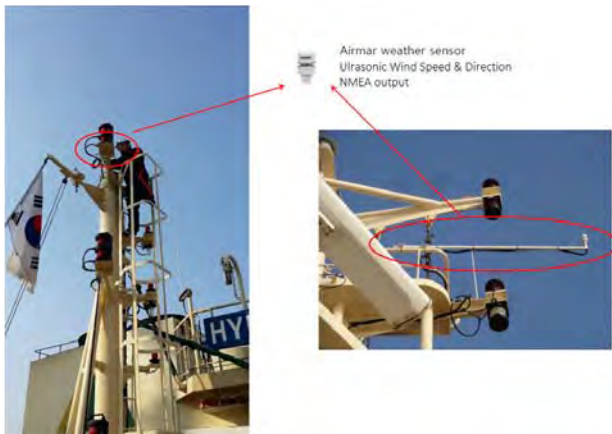


Figure 6: The location of the anemometer

운항성능 분석을 위하여 최종 결정된 운항자료 항목으로, SPMS로 모니터링되는 항목 중 필요항목과 추가 장착된 파고레이더, 풍속계 자료, 기상 예보자료를 추가하여 구성하였다. 기상자료는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 예보분석(Hindcast) 자료를 사용하였으며, 운항선 위치 근처의 자료들을 이용하여 보간법으로 운항선 위치에서의 자료를 구하는 방법을 사용하였다. 이렇게 하여 구성한 운항자료목록은 Table 2에 수록하였다.

자료의 시간간격은 처음에는 10분 간격, 2분 간격, 10초 간격, 1분 간격을 사용하다가 최종적으로는 2분 간격의 자료를 사용하기로 하였다. 위 자료항목의 대부분은 모니터링이 되고 있는 선박에서는 직접 구할 수 있는 자료들인데, 해수온도, 홀수 자료들은 직접계측하지 않는 선박들도 많이 있다. 본 연구의 대상선은 다행히도 계측하고 있어서 SPMS 항목에 포함되도록 하였다.

파고레이더의 작동이 안정화된 이후, 비교를 위하여 파고레이더, 기상예보, 목측에 의한 파고를 Figure 7, Figure 8에 수록하였다. 기상예보자료와 파고레이더 자료는 전반적으로 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 파고레이더 자료는 2분 평균자료를 통하여 유의파고를 산정하므로 기상예보자료보다 분산이 심한 것을 알 수 있다. 이 자료에 대한 운항선사의 평가는 다음과 같았다.

• 47항차 Ballast 운항

- Departure Port : Pohang, Republic of Korea
- Departure Data : 2016.11.26. 15:24 (+9)
- Arrival Port : Dalrymple Bay, AUS
- Arrival Date : 2016.12.08. 15:00 (+10)
- 전체적으로 3미터 이하의 파고이며 목측파고는 계측파고, 기후자료파고보다 1미터 정도 높게 계측되어 있음.
- Wave Radar계측파고와 기후자료 파고는 정량적으로 잘 일치하고 있음. 오차는 10%이내임.
- Accuracy : (기상예보 / 파고레이더) × 100 = 92.9%

• 47항차 Laden 운항

- Departure Port : Dalrymple Bay, AUS
- Departure Data : 2016.12.18. 12:15 (+10)
- Arrival Port : Kwangyang, Republic of Korea
- Arrival Date : 2017.01.04. 06:30 (+9)
- 전체적으로 3미터 이하의 파고이며 목측파고는 부분적으로 기후자료파고보다 1미터 정도 높게 계측되어 있으나 전체적으로 잘 일치함.
- Wave Radar계측파고와 기후자료 파고는 정량적으로 잘 일치하고 있음. 오차는 10%정도임.
- Accuracy : (기상예보 / 파고레이더) × 100 = 89.5%

• 결론

- 파고레이더와 기상예보는 잘 일치하고 있음.
- 반면, 선원 목측자료가 차이를 보이는데 이는 값이 아닌 Wave Force Code(Range 개념)로 작성되어 생기는 오차와 선원의 숙련도에 따라 발생할 수 있는 오차 때문으로 판단됨
- 따라서, 운항선의 운항효율 분석을 위하여 파도 데이터는 선원 목측 데이터 보다는 파고레이더, 기상예보 데이터 사용이 적절하다고 판단됨

위에 기술된 선사의 평가는 정성적인 면에서의 평가이므로, 운항자료의 유효성을 알기 위한 정량적인 평가가 필요하다.

3. 실선 계측자료 유효성 분석

계측된 운항자료는 자료에 오류 또는 오차가 있는지 확인한 후 사용하여야 한다. 계측 오류의 가장 흔한 원인은 부적절 위치에서의 계측, 선원의 부주의한 작동, 단위 세팅 변경 등이다. 또한 기상상황에 대해서는 방향정의도 확인하여야 한다. 풍향의 경우 입사되는 방향으로 통일이 되어 있는 반면, 파향에 대해서 선원은 입사되는 방향을 파향으로 정의하고, 해상과 연구자들은 진행방향을 파향으로 정의하여 파도의 방향정의는 아직 통일되어 있지 못하다. 심지어 NOAA 자료도 파향에 대해서는 정의가 통일되어 있지 못하다.

Table 2: Lists of the finally selected operational data

No.	Item	No.	Item	No.	Item
1	No. of Data	21	N/S	41	L_swell_period_M
2	time_UTC	22	long_Position	42	H_sea_height_M
3	time_UTC+9	23	E/W	43	H_sea_direction_M
4	speed_VG	24	Voyage Distance	44	H_sea_period_M
5	speed_VG_x	25	heading_Gyro	45	T_wave_height_W
6	Speed_VG_y	26	heading_GPS	46	T_wave_direction_W
7	speed_VS	27	rudder_angle	47	T_wave_period_W
8	speed_VS_x	28	seawater_Temp_M	48	L_swell_height_W
9	speed_VS_y	29	seawater_Temp_W	49	L_swell_direction_W
10	rel_current_speed_Zone1_M	30	seawater_Density_M (OPTION)	50	L_swell_period_W
11	rel_current_dir_Zone1_M	31	rel_wind_speed_M	51	H_sea_height_W
12	rel_current_speed_Zone2_M	32	rel_wind_direction_M	52	H_sea_direction_W
13	rel_current_dir_Zone2_M	33	abs_wind_speed_W	53	H_sea_period_W
14	abs_current_speed_W	34	abs_wind_direction_W	54	sea_Depth_M
15	abs_current_dir_W	35	wave_height_eye_M	55	sea_depth_W
16	propeller_rpm	36	T_wave_height_M	56	fp_drft
17	shaft_torque_KNM	37	T_wave_direction_M	57	ap_drft
18	shaft_Power	38	T_wave_period_M	58	mid_ps_drft
19	brake_Power	39	L_swell_height_M	59	mid_ss_drft
20	lat_Position	40	L_swell_direction_M	60	Air_Temp_M
				61	Air_Temp_W

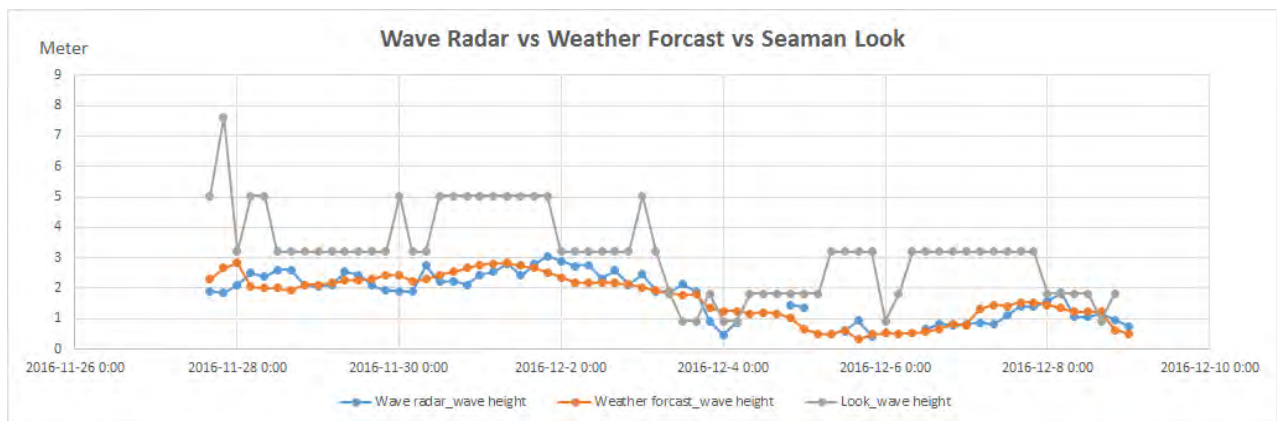


Figure 7: Comparison of wave radar, weather forecast, and visual observation in voyage 47-1 (Ballast)

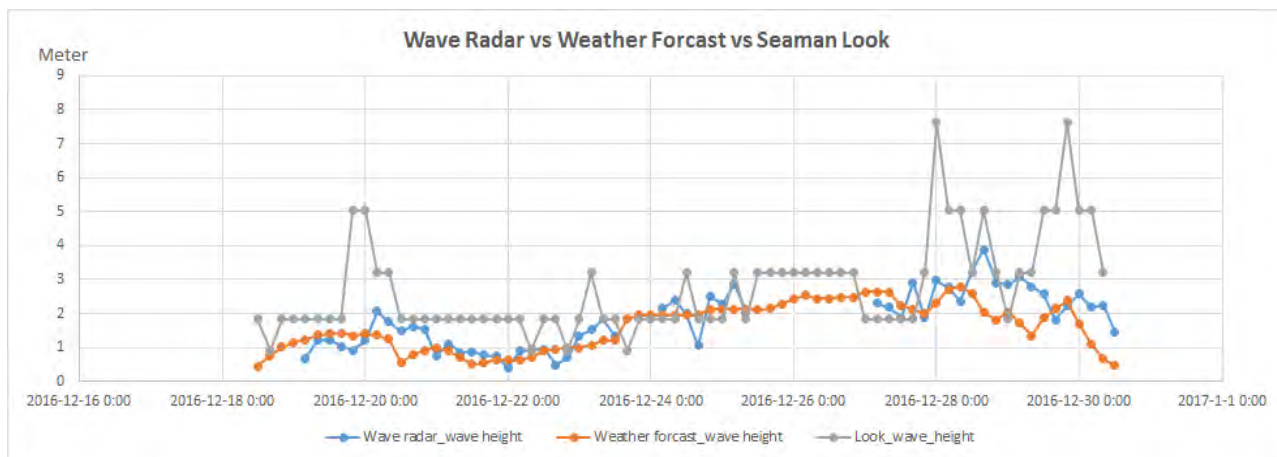


Figure 8: Comparison of wave radar, weather forecast, and visual observation in voyage 47-2 (Laden)

계측자료 및 예보자료는 오차를 포함하고 있으므로, 이 자료들에 대한 유효성 분석을 하는 것이 필요하다. 품질보증된 계측기를 선박에 장착하여 시운전시 현장에서 캘리브레이션을 하여 사용하지만, 선박이 운항에 투입된 이후에는 특별한 이유가 없는 한 계측기 검교정을 하지 않는 선박이 많은 것이 현실이다. 또한 축토크센서, 대수속도계 등은 탈착이 불가능하고 현장에서 검교정이 어려운 경우도 있다. 따라서 현재 계측되는 값에 대하여 유효성을 검증하고 사용할 필요가 있다.

검교정이 힘들거나 불가능한 경우, 하나의 항목을 단일 계측기로 계측한다면, 이 계측자료의 정확도나 유효성은 확인할 방법이 없다. 두 개 이상의 계측자료를 사용할 수 있다면, 어떤 값이 정확한 값인지는 알 수 없어도 계측자료들의 유효성을 분석할 수 있다. 대상선에서 얻는 운항자료 중, 하나의 항목에 대하여 두 가지 이상의 자료가 있는, 속도, 파도자료, 바람자료에 대하여 유효성 분석을 하여보자. 분석은 다음의 수치를 가지고 하는 것으로 하였다.

평균(mean)

$$\mu_x = E[x] \tag{1}$$

기댓값(expectation)의 정의는 다음과 같다.

$$E[x] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \tag{2}$$

분산과 공분산(variance and covariance)

$$\sigma_x^2 = E[(x - \mu)^2] \tag{3}$$

$$\sigma_{xy} = E[(x - \mu_x)(y - \mu_y)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \tag{4}$$

상관계수(correlation coefficient)

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad -1 \leq \rho_{xy} \leq 1 \tag{5}$$

오차의 실효값(root mean square error)

$$e_{xy} = \sqrt{E[(x-y)^2]} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \tag{6}$$

분석에 사용된 데이터는 속도분석의 경우 43, 45, 47항차의 자료를 주로 사용하였으며, 데이터의 시간간격은 2분으로 약 9,000개(편도항차)의 데이터를 사용하였다. 기상자료 분석의 경우에는 47항차부터 52항차까지의 자료를 사용하였는데, 47항차는 한국-호주 항로의 자료로서 시간간격 2분, 약 9,000개(편도항차)의 데이터를 사용하였으며, 48항차 이후의 자료는 한국-캐나다 항로의 자료로 시간간격 10초 약 100,000개(편도항차)의 데이터를 사용하였다.

3.1 속도

계측된 속도는 대지속도와 대수속도이다. 이중 선박 운항성과 관련된 속도는 대수속도이다. 물을 헤쳐 나가기 위한 추력은 대수속도에 따른 저항과 관련이 있기 때문이다. 아주 정확하게 계측을 할 수 있다고 하여도, 조류 때문에 두 속도는 차이가 발생하게 된다. 대지속도는 GPS(Global Positioning System)를 이용하여 위치정보를 알아내고, 변화되는 위치를 시간으로 미분하여 얻기 때문에 상당히 정확한 대지속도 정보를 준다. 대지속도와 대수속도를 비교하여 운항성능에 직접적으로 영향을 미치는 대수속도에 대한 분석을 하여, 계측되는 대수속도의 유효성을 검증하고자 한다. 대상선의 주 항로가 한국-호주의 왕복항로이므로 왕복항로를 모두 거친 거리는 해류의 영향이 줄어든 거리가 될 것이므로, 왕복거리비를 조사하면 속도자료의 유효성을 알아낼 수 있을 것이다.

한국-호주 항로의 47항차 운항자료 중 속도에 대한 자료를 보자. Figure 9, Figure 10은 대지속도(VG)와 대수속도(VS)를 그린 그래프이다. 47-1항차(Figure 9)는 한국에서 호주로의 항로이고, 47-2항차(Figure 10)는 호주에서 한국으로의 항로이다. 이것을 보면 대지속도와 대수속도는 서로 유사한 값을 주는 것을 알 수 있는데, 대지속도의 변화량이 대수속도보다 크다. 아마도 선박은 바닷물 위를 속도가 크게 변하지 않게 전진하고 있는데, 국부적으로 조류(tidal current)가 발생하여 대지속도는 변동이 조금 더 큰 것으로 판단된다. 또한 47-1항차 초반부와 47-2항차 후반부에서는 대지속도와 대수속도의 크기가 반전되는데 이것은 한국에서 호주로 가는 항로에 지속적인 해류(ocean current) 영향을 받아서 생기는 현상으로 보인다. 편도 항차는 해류의 영향을 받아 속도의 편차가 발생할 수 있으나, 왕복 항차를 모두 합치면 해류의 영향이 상쇄되어 속도의 값 자체를 검증할 수 있을 것이다. 왕복항차에 대하여 속도를 적분하여 항해거리를 계산하여 보자. 대지속도를 적분하여 구한 거리는 해류의 영향이 배제된 거리이므로 이것을 참조값으로 설정한다. 대수속도를 적분하면 물을 헤치고 나아간 거리가 나오므로 이것은 해류의 영향을 받는다. 그러나 해류의 영향이라면 왕복을 합하면 해류는 서로 상쇄되므로 영향이 줄어든 대수속도에 의한 거리를 얻을 수 있다. 둘을 비교하면 대수속도계(Speed Log)를 얼마나 믿을 수 있는지에 대한 정보를 얻을 수 있다.

Table 3에 속도 계측자료를 분석한 결과를 수록하였다. 3개 항차의 왕복을 비교해보면 0.4%에서 1.46% 정도의 오차가 있는 것으로 나타났다. 왕복거리비는 상당히 정확한데 이에 비하여 상관계수는 예측한 것보다 작게 나타나고 있다. 그 이유는 상관계수는 평균에서 변화하는 양들을 가지고 표시하는 것이고, 대지속도에 조류의 영향이 포함되어 있기 때문에 변화하는 양상이 달라서 1에 근접하지 못한 것으로 판단된다. 따라서 속도변화를 많이 겪지 않는 항해

Table 3: Comparisons of speed data in the Korea-Australia route (SOG: speed over ground, STW: speed through water, unit of speed - knot, unit of distance - km)

Voyage	47-1	47-2	45-1	45-2	43-1	43-2
Route	KR->AU	AU->KR	KR->AU	AU->KR	KR->AU	AU->KR
SOG(mean) (knot)	13.0444	13.1373	15.1561	14.0104	13.9758	13.0573
STW(mean) (knot)	12.9422	13.3333	14.7102	14.0248	13.5329	13.1710
Correlation Coeff.	0.856	0.9425	0.8845	0.8032	0.8282	0.7509
Error(RMS) (knot)	0.555084	0.536019	0.891564	0.668386	0.807553	0.666328
Dist. Ground (km)	6621.71	7102.03	7377.52	7190.86	7006.58	7174.03
Dist. Water (km)	6569.87	7207.96	7160.46	7198.23	6784.57	7236.48
Ratio of Distances	1.00789	0.9853	1.0303	0.9989	1.0327	0.9914
Ratio of Return Route		0.996		1.0146		1.0114

의 경우 정확도는 왕복거리비를 이용하여 판단하는 것이 좋다. 한국에서 호주로 갈 때는 대지거리가 더 크고 호주에서 한국으로 갈 때는 대수거리가 더 큰 것으로 나타났다. 모든 항차에서 이 현상이 있는 것으로 보아 해류가 평균적으로는 한국에서 호주로 갈 때 도움을 주는 방향으로 흐르는 항로를 택하였다는 것을 알 수 있다. 왕복거리비의 오차가 1.5%이하로 나타나 대수속도 계측이 상당히 정확하게 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다. 여기서 오차실효값은 (RMS error)는 오차가 아니라 조류속도의 실효값으로 해석될 수 있다. 조류는 0.5 - 0.9 knot의 표준편차를 가진다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 대수속도계는 유효한 값을 제공하고 있다고 판단된다.

대상선은 일정기간동안 한국-캐나다 항로에 투입되었다. 이때의 대지속도와 대수속도를 비교한 결과를 Figure 11에 실었다.

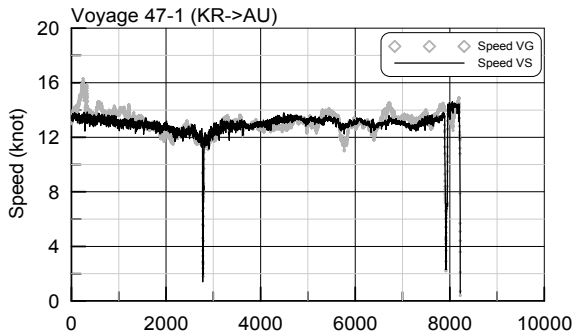


Figure 9: Comparison of speeds in the voyage 47-1 (KR->AU)

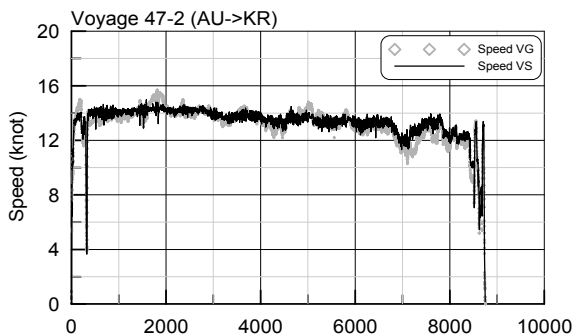


Figure 10: Comparison of speeds in the voyage 47-2 (AU->KR)

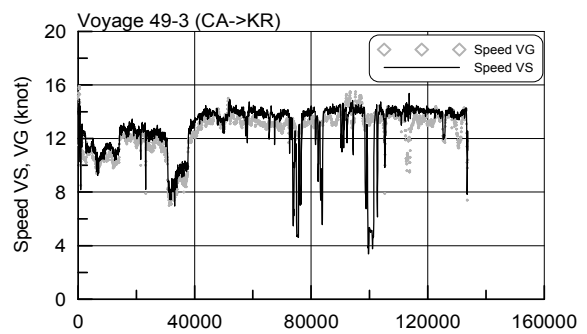
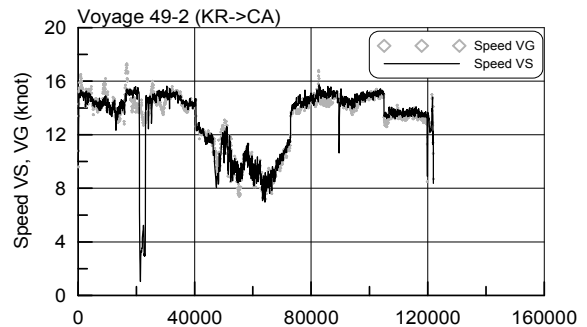
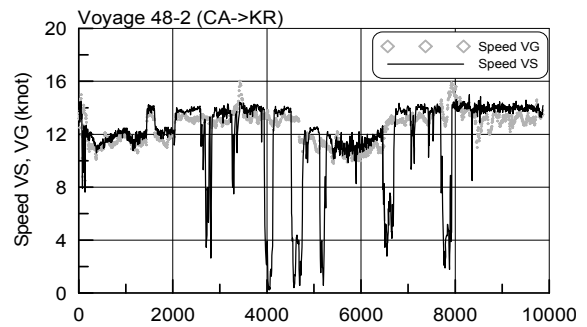
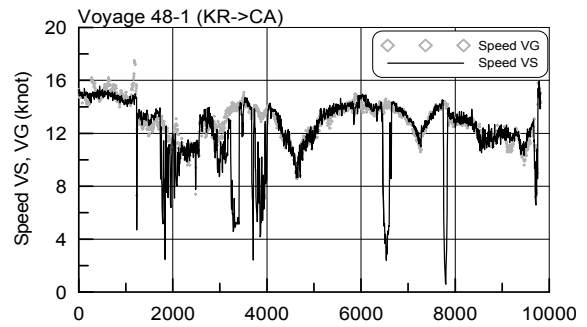


Figure 11: Comparisons of the speed over ground and through water in the voyage of Korea and Canada

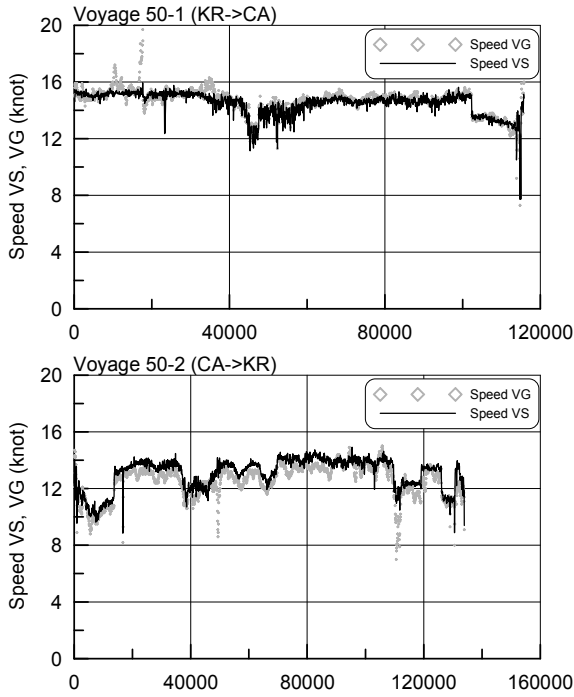


Figure 11: (Continue)

Table 4: Correlation coefficients of speeds and the ratio of distance in the voyage of Korea and Canada

Voyage No.	Speed Correlation Coeff.	Ratio of Distance (VG/VS)
48-1 (KR->CA)	0.390331	1.054385
48-2 (CA->KR)	0.186522	1.055355
49-2 (KR->CA)	0.813863	1.007049
49-3 (CA->KR)	0.564142	0.984969
50-1 (KR->CA)	0.843820	1.013650
50-2 (CA->KR)	0.888225	0.957891

Table 4는 한국-캐나다 항로에서의 속도 상관계수와 거리비를 보여주고 있다. 계측이 안 된 구간이 있어서 속도 상관계수와 거리비가 정확하게 계산이 되지 않았다. 그러나 뚜렷하게 보이는 것은 캐나다에서 한국으로의 운항시 대지속도가 대수속도에 비하여 항상 작게 나온다는 점이다. 즉 해류를 거슬러 항해를 하였다는 것을 알 수 있다. 계측에 문제가 없었던 50-1, 50-2 항차의 자료를 보면 상관계수가 0.8이상이고 거리비가 확연히 차이가 나는 것을 볼 수 있었다.

3.2 파고

파고레이더는 처음 설치 후 자료의 안정화하는데 시간이 많이 소요되었다. 이에 따라 47항차부터 자료가 제대로 취득되고 있으며, 아직도 가끔 계측을 못하는 경우가 발생하고 있다. 파고레이더는 레이더의 수명을 연장시키기 위하여 약 30분마다 2분씩 동작을 시키고 있다. 이런 이유로 자료가 연속적으로 나오지 않고 분산이 심하다. 기상예보자

료는 항차가 끝난 다음에 NOAA자료를 선박의 위치에서 내삽하여 구해 놓은 것으로 예보분석(Hindcast) 자료이다.

파고레이더와 기상예보에 의한 유의파고와 파향을 한 항차당 한쌍씩 비교하여 Figure 12에 표시하였다. 47항차는 한국-호주항로 이었으며, 나머지는 한국-캐나다 항로이었다. 파고레이더에 의한 방향은 상대방향(Relative)으로 설정되어 있어 절대방향(True)으로 변경한 후 비교하였다.

중간에 계측자료가 없는 구간이 존재하는데, 이것은 선원이 계측기의 전원을 내린 결과이다. 계측자료를 보면 분산이 심한 자료들도 있는데, 2분 계측의 평균을 구한 것이므로 분산이 상당히 심하나, 본 연구에서는 실제 선박에서 얻을 수 있는 자료에 대한 연구 목적을 가지고 있으므로, 실수나 분산이 있는 자료도 그대로 이용하였다.

해상상태를 표현하는 파도와 바람은 그 크기뿐만 아니라 계측자료와 기상예보자료의 방향 차이도 비교해 보아야 한다. Figure 12에서 분산이 심한 계측자료의 국소 평균을 보면, 파도의 크기는 편차가 있으나 파도의 방향은 편차가 적다는 것을 알 수 있다.

항차평균 파고의 비를 보면 1.02에서 1.44 까지의 값을 가지고 있다. 또 파고레이더의 값이 크게 나오는 것을 알 수 있다. 상관관계는 중간에 계측이 안 된 항차를 제외하면 0.7이상이 되며, 실효오차값은 평균값의 약 1/3정도 되는 것을 알 수 있다. 이것은 파고레이더의 계측값을 평탄화, 필터링 등을 하지 않은 이유 때문으로 판단되며, 필터링이나 평탄화를 하면 훨씬 작은 값을 가질 것으로 예상된다.

3.3 바람

바람은 풍향풍속계와 기상예보 자료를 비교하였다. 항차 47-1부터 51-2까지의 비교자료를 Figure 13에 실었으며, 이에 대한 비교표를 Table 6에 수록하였다. 풍속이 knot로 저장된 것은 항차 47-1, 47-2이었으며 m/s로 변환하여 사용하였으며, 풍속계의 풍향은 상대풍향으로 되어있는 것을 절대풍향으로 바꾸어서 비교하였다. 또한 기준높이(reference height)에 대하여서, 기상예보자료는 수면상 10m기준인데 반하여, 풍향풍속계는 운항상태에 따라 발라스트조건(홀수 7.9m) 30.35m, 만재조건(홀수 18.25m) 20m 높이에 위치하고 있다. 비교를 위하여 풍속 높이보정을 1/7법칙을 이용하였으며, 보정된 값도 Table 6에 수록하였다.

바람의 경우에는 기상예보자료와 풍속계의 자료에 대한 상관계수가 파고에 비해 비교적 상관계수가 높고, 크기비도 고른 것을 알 수 있다. 여기서도 파고와 마찬가지로 풍속계에서 계측한 바람의 크기가 기상예보자료보다 대체적으로 크다는 사실을 보여주고 있다. 또한 실효오차값은 풍속 평균값의 약 1/3 정도이다. 방향은 상당히 잘 맞고 있는 것으로 판단된다. 50항차자료를 제외하고는 보정된 풍속계 자료와 기상예보 자료의 차이는 약 10% 이내이고, 실제 운항하는 선박은 선박의 속도가 더해져 선박이 느끼는 상대풍속의 차이는 이것보다 적어질 것으로 예상된다.

산적화물선 운항성능 분석을 위한 선속, 파고 및 풍속 자료의 유효성 분석

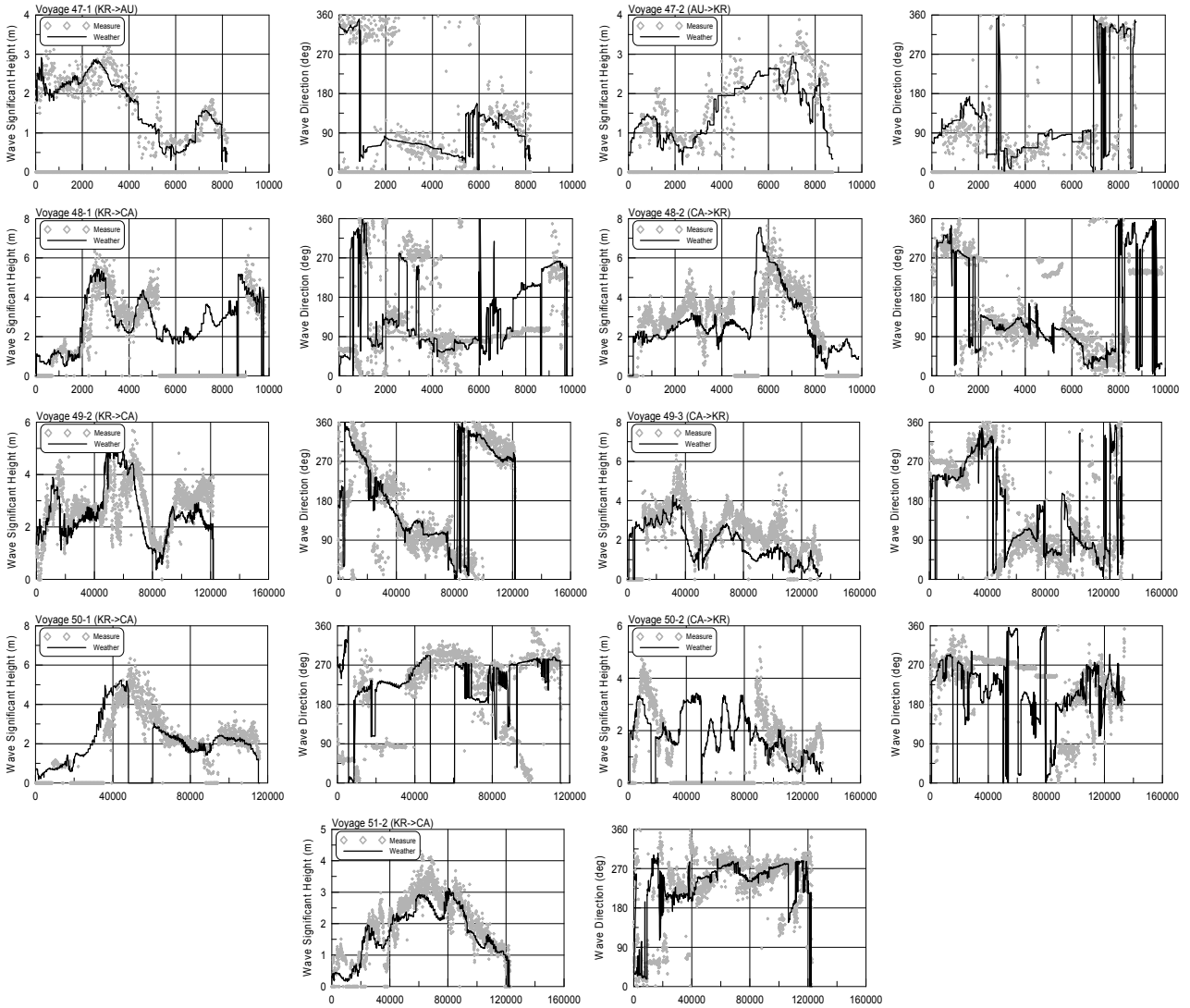


Figure 12: Wave height and direction from wave radar and weather hindcast

Table 5: Comparisons of significant wave height from wave radar and weather hindcast

Voyage	Wave Radar		Weather Hindcast		Comparison		
	Mean (m)	Variance	Mean (m)	Variance	Ratio of Means (R/W)	Correlation Coeff.	Error(RMS) (m)
47-1	1.805659	0.539481	1.769345	0.507388	1.020524	0.857809	0.388067
47-2	1.818344	0.671127	1.532670	0.446557	1.186390	0.645218	0.702033
48-1	3.134909	1.993028	2.956395	2.085231	1.060382	0.711870	1.098944
48-2	3.476467	1.212745	3.010648	2.128454	1.154724	0.714880	1.122981
49-2	2.745800	0.800299	2.576028	1.233371	1.065905	0.461258	1.070496
49-3	2.647203	1.012627	1.836272	0.902172	1.441618	0.717132	1.096143
50-1	2.660220	1.377536	2.051846	2.046106	1.296501	0.151881	1.812122
50-2	2.013097	0.984018	1.444535	0.652815	1.393595	0.471828	1.097163
51-2	2.067037	0.723744	1.798265	0.592457	1.149462	0.840168	0.536772

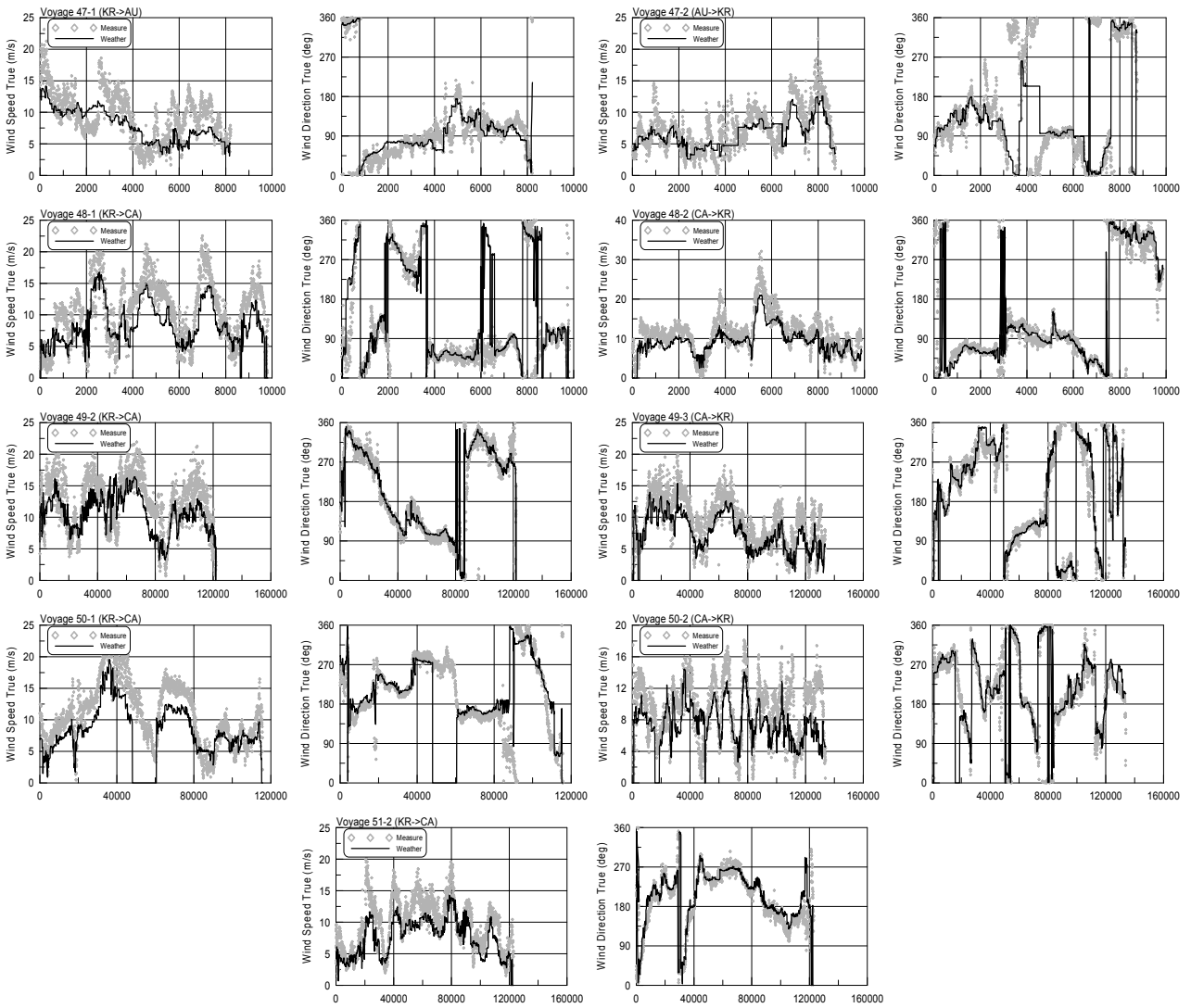


Figure 13: Wind speed and direction from anemometer and weather hindcast

Table 6: Comparisons of wind speed from anemometer and weather hindcast (Corrected: values at reference height 10m)

Voyage	Anemometer			Weather Hindcast		Comparison			
	Mean (m/s)	Variance	Corrected Mean (m/s)	Mean (m/s)	Variance	Ratio of Means (A/W)	Ratio of Corrected Mean (A/W)	Correlation Coeff.	Error(RMS) (m/s)
47-1	9.351740	15.093904	7.977	7.913236	6.707984	1.181784	1.008	0.663792	3.242322
47-2	7.450247	12.064039	6.750	6.633824	4.935545	1.123070	1.018	0.742561	2.491255
48-1	10.575239	23.318426	9.021	8.380676	11.413941	1.261860	1.076	0.771329	3.792248
48-2	11.184220	21.329025	10.133	9.228602	11.671483	1.211908	1.098	0.839050	3.216847
49-2	12.350116	17.417075	10.535	10.675550	9.366571	1.156860	0.987	0.653058	3.592404
49-3	9.316731	14.802283	8.441	7.526787	8.665861	1.237810	1.121	0.786695	2.975248
50-1	10.890934	24.438032	9.290	7.802033	18.520219	1.395910	1.191	0.734020	4.611721
50-2	9.333907	13.450108	8.457	7.421441	7.005932	1.257695	1.140	0.546877	3.673721
51-2	9.655958	15.250790	8.237	7.471672	8.811335	1.292342	1.102	0.820219	3.133194

선박 운항성능 분석에 사용되는 것은 상대풍속과 상대 풍향이다. 이것을 이용하여 바람의 힘을 알아내 속도를 유지하기 위한 마력을 산정하고, 바람이 없는 상태에서의 공기저항을 산정해 마력을 보정하는데 사용된다. 정확한 실제 풍속을 모르므로, 풍속계자료와 기상예보 자료의 중간이 실제풍속이라고 가정하면, 차이의 절반인 5%이내의 오차를 가지고 있다고 추정할 수 있고 상대속도를 얻기 위하여 선박의 속도를 더하기 때문에 상대속도로 변환한 풍속은 이것보다 더 작아져 약 3% 이내의 오차를 포함한다고 추정할 수 있다. 이 정도의 오차로는 공기저항이 6%정도 달라지지만 선박 전체저항 중에 공기저항이 차지하는 비율이 10% 미만이기 때문에 선박운항성능에는 결국 1% 이내의 영향을 줄 것이다. 따라서 결론적으로 기상예보자료를 사용하여도 선박의 운항성능을 추정하는데 문제가 없다는 결론에 도달하였다.

3.4 실선 운항성능

대상선의 운항자료는 현재 계속 계속하여 축적되고 있다. 이 자료를 이용하여 운항성능을 추정하여보자. 운항성능을 대표하는 것으로 선속-동력 곡선을 택하였다. 선속-동력 곡선은 선박의 저항성능, 추진성능, 자항성능이 포함된 대표적인 성능곡선이다.

실선의 운항성능은 해상상태와 기온, 수온, 배수량에 따라 다르게 나타난다. 따라서 해상상태 등의 영향이 없는 상태에서 운항성능을 추정하여야 선박 고유의 운항성능을 추정할 수 있게 된다. 본 연구에서는 EEDI 기준선속 산정을 위한 신조선 속력시운전해석법인 ISO15016:2015의 방법으로 해석을 수행하였다[2]. 이 방법은 해상상태, 수온, 배수량이 저항에 미치는 영향을 추정, 보정하여 표준운항상태(기준훈수, 기준 온도, 바람과 파도가 없는 상태)에서의 운항성능을 추정하는 방법이다. 이 방법은 기본적으로 표준운항상태와 다른 상태에 대한 영향을 부가저항으로 산정하여 출력 즉 전달마력을 보정하는 방법을 사용한다. 수온에 의한 부가저항은 해수의 밀도 변화 때문에 발생하는 부가저항이고, 배수량보정은 배수량에 따른 저항변화율을 추정하여 표준운항상태에서의 저항 및 출력으로 보정한다. 해상상태에 따른 부가저항은 바람에 의한 부가저항과 파도에 의한 부가저항으로 대별되는데, 바람에 의한 부가저항은 선박의 수면상부의 종단면적과 횡단면적 및 면적중심과 상대풍속과 풍향을 이용하여 전진방향의 공기저항을 산출해 내고, 바람이 없을 때 즉 전진속도에 따른 공기저항과의 차이를 부가저항으로 하여 산출해 낸다. 파도에 의한 부가저항은 파도를 주파수 영역에서 성분파로 나누고 각 성분파가 선박에 미치는 저항을 반사파에 의한 부가저항과 유발되는 선박운동에 의한 부가저항으로 나누어 계산한 후, 불규칙 해상상태에 대한 파랑스펙트럼을 곱하고 적분하여 부가저항을 산출해 낸다. 이 방법은 속력시운전해석법(ISO15016:2015)[2]에 수록되어있으며, 국내에서 개발한 프로그램[3]도 여러 조선소에서 사용되고 있다.

본 연구에 사용된 해석법 흐름도를 Figure 14에 실었다. 기본적인 방법은 ISO15016:2015와 같으나, 운항 시에는 왕복시운전(Double Run)수행이 불가하므로, 선속으로서 대수속도계(Speed Log)에 의한 속도를 사용하며 조류보정을 수행하지 않는다. 또한, 선상으로부터 수집된 데이터로부터 정상유동(Steady State)으로 판단되는 데이터를 필터링 한 후 공기, 파도, 수온 등의 부가저항을 해석하여 평상상태로 보정 한 후, 최종적으로 목표 배수량의 선속-동력 성능을 확정한다.

본 연구 대상선의 취득 데이터 간격은 2분이며 정상유동상태라고 판단되는 기준 필터링 기준을 Table 7에 보였다. 천수제한조건은 ISO15016제한조건을 사용하였으며, 파랑 부가저항은 부가저항 추정법 중 간략화 방법인 STAWAVE-II법을 사용하여 결정하며 선수로부터 45도가 넘는 방향의 파도는 해석에서 제외하였다.

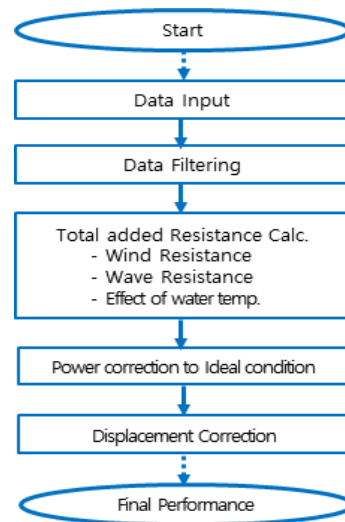


Figure 14: Speed-Power Analysis Procedure based on ISO15016:2015

Table 7: Steady State Criteria for Speed Power Analysis (2 minute measured data interval)

Sea Depth	by ISO 15016:2015
Rudder Angle Change	Less Than 5 Degrees
DHP Change	Less Than 80 kW
Speed Change	Less Than 0.1 knots
Wave Direction	Less Than 45 Degrees
Difference between GPS and Gyro Head	Less Than 5 Degrees

2016년도에 호주로부터 한국으로 향하는 40~47항차의 계측데이터를 Figure 15에 도시하였다. 계측된 전달마력(DHP)은 경향을 파악하기 어려울 정도로 산재되어 있음을 알 수 있으며, 모형시험 결과보다 대부분 큰 값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 항차별 데이터는 같은 DHP에서 선속만 변화하는, 엔진회전수(RPM)세팅에 의한 흔적을 보여주고 있다.

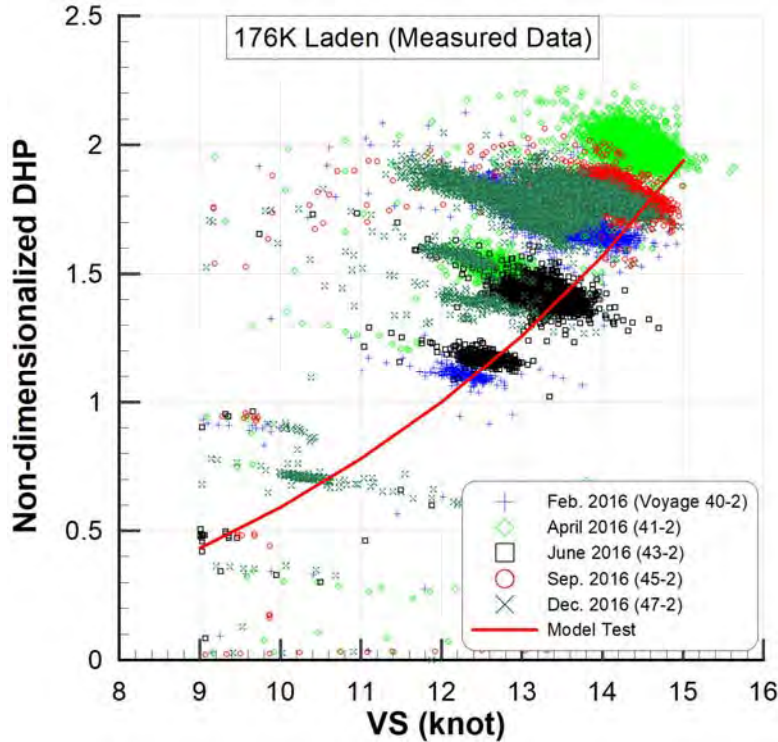


Figure 15: Measured DHP (Non-dimensionalized, Laden Condition)

Table 7에 의한 필터링결과를 Figure 16에 도시하였다. 모형시험결과와 비교하여 선속-동력 특성을 파악하기 어렵게 산재되어 있음을 알 수 있다.

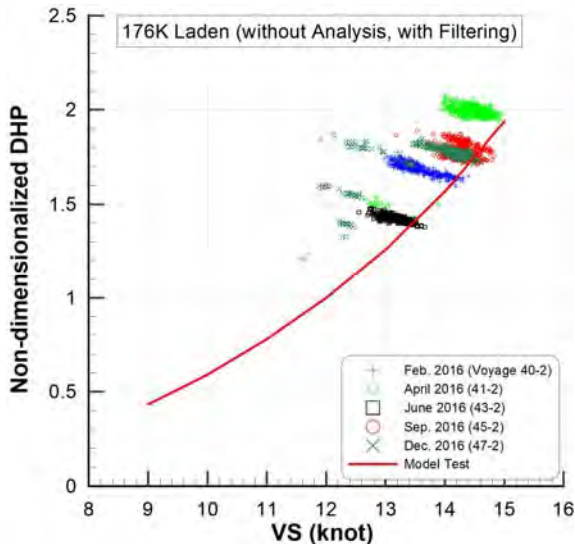


Figure 16: Filtered DHP (Non-dimensionalized, Laden Condition)

Figure 14에 의한 본고의 해석법에 의한 해석결과를 Figure 17에 도시하였다. Figure 16과의 확연한 차이를 알 수 있다. 수평하게 분포되어 있던 DHP가 바람, 파도, 수온을 보정하는 것에 의해 모형시험결과와 같은 기울기로 성능곡선을 그리고 있음을 알 수 있다.(수온은 계측치, 기상

상태는 기상 예보분석(hindcast)자료를 사용함.) 본 선박은 2015년에 상가하여 선체 도색을 수행하였던 선박으로서, 본 결과에 의하면 모형시험결과보다 15%정도 높은 동력곡선을 보여주고 있다.

부가저항을 보정한 결과가 모형시험에 의한 성능곡선에 그 경향 및 분포가 매우 가까워진 것을 알 수 있다. 따라서 부가저항을 보정하여 운항성능을 해석하면 더 많은 유효자료를 가지고 해석을 할 수 있는 이점이 있다. 또한 그 유효성도 입증되었다고 할 수 있어서 향후 이 방법으로 더 많은 자료를 분석하여 충분히 방법의 유효성을 입증할 수 있을 것으로 기대되고, 현재 계속 운항자료를 축적하고 있다.

4. 결 론

선박의 운항성능은 설계 시에 계산 또는 모형시험으로 추정하고, 선박의 건조가 끝나면 실선 시운전시험을 통하여 운항성능에 대한 검증을 하고 선주에게 인도 된다. 그러나 운항되고 있는 선박에 대하여서는 운항성능 시험을 하지 않고 계속 작업에 투입되기 때문에 운항성능에 대한 개략적인 추정을 할 수 있을 뿐이다. 따라서 선사에서는 여러 가지 방법을 통하여 운항중인 선박의 운항성능을 추정하기 위하여 노력하고 있다. 선박의 운항성능은 선사에서 운항계획을 세우는데 필요한 중요한 자료중 하나이다. 운항중인 선박의 운항성능을 추정하기 위한 방법으로 제시되고 있는 ISO19030 방법은 기상이 좋고, 변속이 없을 때의 자료만므로 운항성능을 추정하는 방법인데, 전체 운항자료

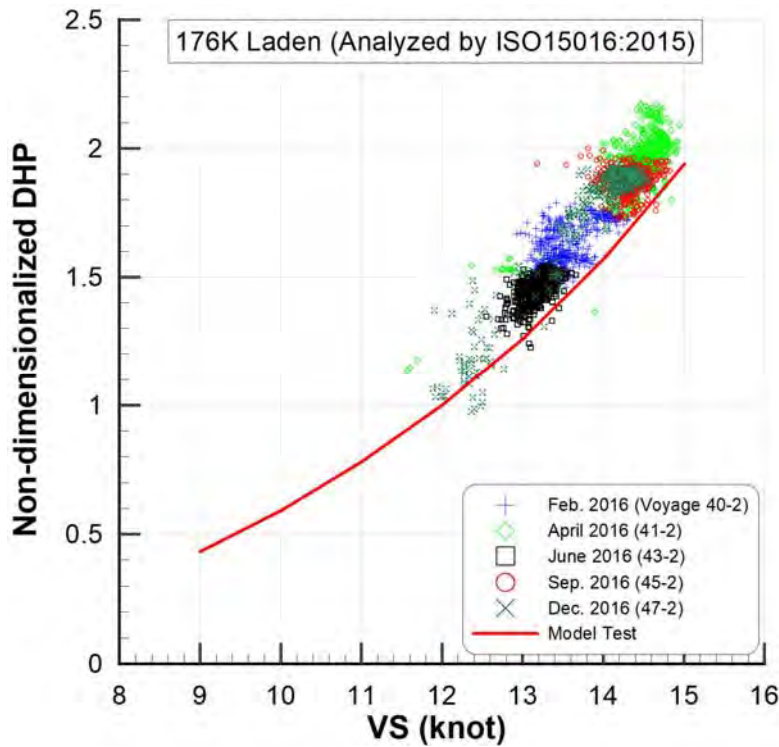


Figure 17: Final Speed Power Performance Diagram by ISO15016:2015 (Non-dimensionalized, Laden Condition)

중 조건에 부합되는 자료는 적으며, 극히 일부분인 경우가 많다. 그래서 기상 범위를 넓혀서 많은 자료를 이용하는 방법이 모색되고 있다. 그러기 위하여서는 현재 계측하고 있는 자료의 정확도를 알아야 하고, 환경의력을 정확히 추정하여 이 영향을 제거하여야 한다. 이런 방법으로는 운항 자료에 ISO15016 시운전 해석방법을 통하여 표준운항상태에서의 운항성능을 추정하는 방법이 바람직하다.

본 연구에서는 선박에 장착된 계측기와 기상자료들을 통합하여, 운항성능 추정에 필요한 자료목록을 확정하고, 실제 운항하고 있는 선박에서 이들 자료를 취합하여 분석을 하였다. 첫째로 속도계를 분석하여 대지속도와 대수속도의 상관관계와 크기비를 분석하였는데, 대상선의 속도계는 믿을 수 있는 정도의 정확도를 가지고 있다고 판단하였다. 둘째로 해상상태에 대한 기상자료와 계측자료(파고레이더와 풍속계)를 비교하였는데, 방향과 크기가 잘 일치하고 있었다. 다만 바람의 계측치가 기상예보 자료보다 조금 큰 경향이 있었다. 계측데이터의 유효성이 검증되었다고 판단된다.

계측데이터의 유효성이 검증되었다고 판단하고, 운항성능으로 표준운항상태에 대한 선속-동력 곡선을 추출하였다. 정상상태로 판단되는 데이터를 추출하여, ISO15016의 방법으로 바람 및 파도에 대한 영향을 보정하는 방법을 사용하여 유효성이 확인되었다. 앞으로 계속 계측되는 자료를 이 방법으로 보정하는 방법을 사용하여 유효한 충분한 자료를 축적하여 보다 체계적인 운항성능 추정의 방법과 실선에서의 적용에 대한 분석을 수행할 예정이다.

기상자료로는 NOAA에서 제공하는 자료를 사용하고 있는데, 분석의 정확도를 위하여 실시간예보(Nowcast) 또는 예보분석(Hindcast)자료를 이용하고 있다. 이것은 현시간이나 이전시간에 대한 기상자료이므로 정확도는 높은 수준에 도달하여 있다고 말할 수 있다. 그러나 운항계획을 세우기 위해서는 약 한 달 기간의 예보를 이용하게 되는데, 이 예보자료와 실제 그 시각에서의 기상자료는 차이가 날 수 밖에 없다. 따라서 장기간예보자료(Forecast)와 실제 기상을 대표할 수 있는 실시간예보(Nowcast) 자료와의 상관관계와 차이를 분석한 결과가 앞으로 필요할 것으로 보인다.

현재도 계속 운항자료가 쌓이고 있다. 본 연구가 끝나는 2019년 초까지의 자료가 쌓이고 이것을 다시 분석할 기회가 있을 것이다. 그 때는 보다 분석적인 해석이 덧붙여진 결과를 내놓을 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

우선 운항자료를 이용할 수 있게 협조하여 준 포스에스엔의 관계자 여러분께 감사의 말씀을 전한다. 계측자료의 정리는 ㈜랩오투원에서 많은 도움을 주었다. 랩오투원의 이상봉소장님께 감사의 말씀을 전한다. 또한 자료 획득에 도움을 준 대상선 선장 및 선원의 관계자분들에게 감사의 말씀을 전한다. 본 연구는 산업통상자원부의 지원으로 수행된 국가연구개발사업 ‘운실가스 저감 및 실해역 에너지 효율 향상을 위한 운항선 선속-동력 고정도 해석 기반기술 개발(과제번호: PNS3190)’의 일부임을 밝힌다.

Author Contributions

The following statements should be used “Conceptualization, G. J. Lee and M. S. Shin; Methodology, G. J. Lee; Software, G. J. Lee; Validation, B. J. Park and M. S. Ki; Formal Analysis, G. J. Lee; Investigation, G. J. Lee; Resources, K. H. Jeon; Data Curation, M. S. Ki and K. H. Jeon; Writing—Original Draft Preparation, G. J. Lee; Writing—Review & Editing, M. S. Shin and B. J. Park; Visualization, G. J. Lee and M. S. Shin; Supervision, G. J. Lee and M. S. Shin; Project Administration, M. S. Shin; Funding Acquisition, M. S. Shin”.

References

- [1] S. H. Kim, “Climate change and the energy efficiency of ships,” *Bulletin of the Naval Architects of Korea*, vol. 53, no. 1, pp. 13-16, 2016 (in Korean).
- [2] ISO, “ISO15016 ships and marine technology - Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data,” ISO, Geneva, 2015.
- [3] M. S. Shin, B. J. Park, G. J. Lee, and M. S. Ki, “Revision of the ISO15016 and analysis program (i-STAP) for the analysis of the standard EEDI speed,” *Bulletin of the Naval Architects of Korea*, vol. 53, no. 1, pp. 17-21, 2016 (in Korean).
- [4] T. I. Lee, G. S. An, Y. B. Ok, and M. U. Kim, “Analysis of the speed trial and application of ISO15016:2015 (Container),” *Bulletin of the Naval Architects of Korea*, vol. 53, no. 1, pp. 22-27, 2016 (in Korean).
- [5] G. B. Yu, Y. S. Han, and D. Y. Gang, “Analysis of the speed trial and the accuracy validation of ISO15016:2015 (COT, LNGC),” *Bulletin of the Naval Architects of Korea*, vol. 53, no. 1, pp. 28-34, 2016 (in Korean).
- [6] J. G. Kim and D. E. Kim, “Comparison of the speed trial results using ISO15016:2015 and optimization (Tanker, Bulk Carrier),” *Bulletin of the Naval Architects of Korea*, vol. 53, no. 1, pp. 35-38, 2016 (in Korean).
- [7] ISO, “ISO19030 Ships and marine technology - Measurement of changes in hull and propeller performance,” ISO, Geneva, 2016.
- [8] B. J. Park, M. S. Shin, M. S. Ki, G. J. Lee, and S. B. Lee, “Experience in applying ISO19030 to field data,” *HullPIC'2017 (2nd Hull Performance & Insight Conference)*, Ulrichshusen, Germany, 27-29 March 2017.
- [9] M. S. Shin, D. K. Lee, G. J. Lee, B. J. Park, H. J. Kang, J. Choi, and M. S. Ki, “Development of the software for the standard EEDI speed through speed trial,” *Report of KRISO (Korean Research Institute of Ships and Ocean Engineering)*, 2015 (in Korean).
- [10] B. J. Park, M. S. Shin, M. S. Ki, G. J. Lee, and S. B. Lee, “Ideas on how to improve ISO19030 based on the results of applying to field data,” *HullPIC'2018 (3rd Hull Performance & Insight Conference)*, Redworth, UK, 12-14 March 2018.
- [11] P. Arun Lakshminarayanan and Dominic A. Hudson, “Is wave height necessary to determine ship performance in calm water from measurements?,” *HullPIC'2018 (3rd Hull Performance & Insight Conference)*, Redworth, UK, 12-14 March 2018.
- [12] Mark Bos, “An ensemble prediction of added wave resistance to identify the effect of spread of wave conditions on ship performance,” *HullPIC'2018 (3rd Hull Performance & Insight Conference)*, Redworth, UK, 12-14 March 2018.
- [13] Rune Gangeskar, Gunnar Prytz, and Vemund Svanes Bertelsen, “On-board real-time wave & current measurements for decision support,” *HullPIC'2018 (3rd Hull Performance & Insight Conference)*, Redworth, UK, 12-14 March 2018.