

ISO 19030에 따른 선박의 속력 손실을 고려한 방오도료의 경제성 평가

김재혁[†]·김용운·이동권
대우조선해양 선박기본설계팀

The Study on Economic Evaluation of Anti Fouling Coatings based on Ship's Speed Loss in Accordance with ISO 19030 Standard

Jae Hyeok Kim[†]·Yong Woon Kim·Dong Kwon Lee
Ship Basic Design Division, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering

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.

The purpose of this paper is to establish the basic procedure and method for selection of preferred anti-fouling paint considering economic analysis according to ship's speed loss based on ISO 19030 that has been published in 2016 to prescribe practical methods for measuring changes in ship specific hull and propeller performance. In this study, six (6) anti-fouling paint products have been assumed for alternatives with each target maximum average speed loss and carried out comparison of the alternatives and sensitivity analysis in assumed conditions for selection of the preferred alternative.

Keywords : ISO 19030, MEPC 63/4/8(제 63차 해양환경보호 위원회), Anti-fouling paint(방오도료), Speed loss(속력손실), Fuel-saving(연료비 절감), Present worth method(현재가치법), Break even analysis(분기점 분석), Sensitivity analysis(민감도 분석), In-service performance indicator(운항 성능지표)

1. 서론

1.1 연구 배경

최근 조선업계에서는 선박 연료비 절감을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 선박 연료비 절감은 배를 발주 및 운영하는 선주 입장에서 더욱 관심을 갖고 있는 분야이며, 선박 운영 비즈니스에 직접적으로 영향을 미치고 있는 매우 중요한 분야로 부각되어 왔다. 선박 연료비 절감 방법 중에는 프로펠러 전방 또는 후방에 설치되어 효율을 높이는 부가장치(ex. pre swirl stator, duct, propeller boss cap 등)의 설치, ALS(Air Lubricated System), 선형 최적화, 선박 운항 최적화 등의 방법이 있다. 선박의 신조 또는 입거 수리 시 적절한 방오도료의 선택 또한 연료비 절감과 관련하여 매우 중요한 요소이다. 이는 단순히 선박의 수선하부 구역에 해양 생물이 달라붙는 생물학적 오염의 최소화라는 종전의 개념에 추가하여 최근에는 마찰 저항의 최소화,

속력 손실 최소화의 기능과 관련한 연료비 절감을 목적으로 한 방오도료 제품들이 출시 및 적용되고 있다. 그러나 타 분야의 선박 연료비 절감 방법들과 대비하여 방오도료의 경제성에 관련된 연구는 매우 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 최근 조선소에서 신조 되고 있는 선종들에 대하여 ISO 19030에 기반한 평균 속력손실과 가정된 방오도료들의 적용에 따른 연료비 절감액의 추정 및 도크 입거 주기 동안의 경제성 평가를 통한 최적의 대안을 선택하는 기초적 절차와 방법의 정립을 목표로 한다.

1.2 관련 연구 현황

2011년 개최된 제 63차 해양환경보호 위원회(MEPC 63/4/8)에서는 선박 운항 간 배출되는 이산화탄소에 대하여 선체와 프로펠러 성능이 미치는 영향을 추정하는 내용인 '투명하고 신뢰성 있는 선체와 프로펠러 성능 계측 표준(a transparent and reliable

hull and propeller performance standard)’의 의제가 다루어 졌으며 선체와 프로펠러 성능의 추정에 있어 신뢰성 있는 추정 방법과 표준 개발을 권장하고 있다.

Hong et al. (2014)은 LCC(Lifetime Cycle Cost) 기법을 이용하여 디젤연료 추진 선박과 LNG 연료 추진 선박의 CAPEX와 OPEX의 현재가치 분석을 통하여 경제성을 비교하였고 LNG 연료 추진 선박에 대한 할인율과 물가 변동률을 동시에 고려하는 복합 이자율을 적용한 민감도 분석을 실시하였다.

IMO에서는 선박용 유해 방오 시스템 규제 협약을 발효하여 2008년 1월 1일부로 유기주석(TBT) 화합물 성분의 방오도료의 사용이 전면 금지되었다 (IMO, 2001). 유기주석 화합물 성분의 방오도료는 매우 우수한 방오성능을 가지고 있어 과거 선박에 광범위하게 적용되었으나, 해당 성분으로 인한 해양 생물의 개체 수 급감 및 성별이 바뀌는 임포섹스 현상 등의 심각한 환경 문제를 유발했던 사례가 있었다. 이에 각 글로벌 도료사들은 유기주석 화합물을 대체한 방오성분을 개발하여 현재는 Tin free 자기마모형 도료(Self Polishing Copolymer, SPC)가 주로 선박에 적용되고 있다.

1.3 방오도료의 개요

방오도료의 경우, 단어 자체와 같이 선박의 수선하부 부위의 생물학적 오염을 방지하는데 그 목적이 있다. 하기의 Fig. 1은 방오도료가 적용된 선박을 보여주고 있다.

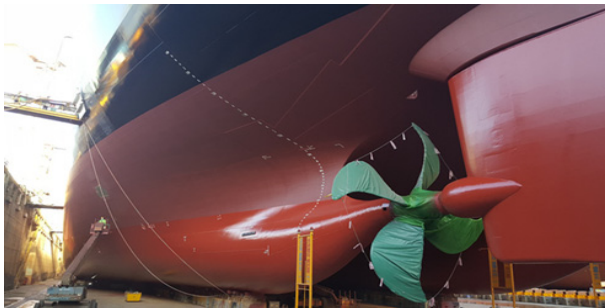


Fig. 1 Example of anti-fouling paint applied on LNG carrier

도료의 필수적인 방오 성능 이외에도 선박의 운항 중 표면의 마찰 저항을 최소화 시키는 역할까지 요구되는 것이 최신 경향이다. 상기의 연구 배경에서 설명한 여러 가지 에너지 저감 장치에 더하여 방오도료 또한 일종의 에너지 저감 장치 중 하나로 고려된다면, 타 저감 장치에 대비한 장·단점은 다음과 같다.

1) 장점:

- 재료 선택의 문제이므로 하드웨어적인 장치의 설치가 불필요하며 도면 작성 등의 부수적 작업도 적다.
- 여러 도료사의 다양한 제품이 시장에 출시되어 있어 선택의 폭이 넓다.

2) 단점:

- 타 장치 대비 수명주기가 짧다(보통 5년, 최대 7.5년).
- 선박의 장기간 정박 조건(static condition) 유지 시 해양 생물에 의한 오손으로 성능 저하의 우려가 있다.
- 성능 영향 평가가 어렵다.

2. ISO 19030의 개요

상기 MEPC 63/4/8 의제 이후 권고 안의 후속 이행 절차로 ISO 19030이 2016년 11월 초판 발행 되었다. ISO 19030의 목적은 선체 및 프로펠러 성능의 변화를 정량적, 현실적으로 측정하기 위한 방법을 제시하는 것이다. 배를 발주하는 입장에서 이러한 성능 변화 정도를 참조하여 경제성 있고 적절한 방오도료 선정을 위한 기초적 틀로 활용이 가능할 것이다. 본 문건은 다음과 같이 3개의 파트로 구성 된다.

1) ISO 19030-1: 선체 및 프로펠러 성능 변화 측정 방법에 대한 일반 조항의 설명과 선체 및 프로펠러 유지 보수, 수리, 개조 작업에 대한 성능 지표 정의

- 기본 변수: 선속, 전달 마력
- 보조적 변수: 흘수, 풍향, 풍속, 유의파고, 파향, 수온 및 밀도, 대기 온도, 수심, 타각 등

2) ISO 19030-2: 선체 및 프로펠러 성능의 변화를 측정하고 성능 지표를 계산하기 위한 기본(default) 방법을 정의하고 각 성능 지표의 예상되는 정확도에 대한 지침을 제공

3) ISO 19030-3: Part 2의 적용이 어려울 시 일부 정확도의 감소를 예상하고 적용 가능성을 높이기 위한 대안

ISO 19030-1의 경우, 4가지의 Case에 대한 성능 지표를 정의하고 있다. 이는 하기 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 그리고 Fig. 5와 같으며, 각 그래프의 기호는 다음을 의미한다.

- H: 선체와 프로펠러 성능 (Hull and propeller performance)
- DDn: 당기 도크 입거 (Present dry-docking)
- DDn+1: 차기 도크 입거 (Next dry-docking)
- DDI: 도크 입거 간격 (Dry docking interval)
- R: 기준 설정을 위한 참조 기간 (Reference period)
- E: 평가 기간 (Evaluation period)
- PI: 성능 지표 (Performance indicator)

ISO19030-2에서 선체와 프로펠러의 성능은 식 (1)과 같이 측정된 속력과 예상 속력과의 편차로 표현되며 이러한 속력 편차를 측정 횟수로 나눈 값을 H로 정의하고 있다. 이는 식 (2)와 같다.

$$V_d = 100 \times \frac{V_m - V_e}{V_e} \tag{1}$$

$$H = \frac{1}{n} \times \sum_i^n V_{d,i}, (i= 1,2,3,\dots,n) \tag{2}$$

여기서, V_d 는 속력 손실(%), V_m 은 측정된 속력, V_e 는 예상 속력, n 은 측정 횟수를 의미한다.

Fig. 2의 PI-1의 경우 도크 입거 간 적용한 보수 작업 또는 개조 작업의 효과를 평가하기 위하여 이전 도크 입거 후의 선체 및 프로펠러의 평균 성능과 해당 차수에서의 도크 입거 후의 성능을 비교하는 도크 입거 성능지표(dry docking performance indicator)이다.

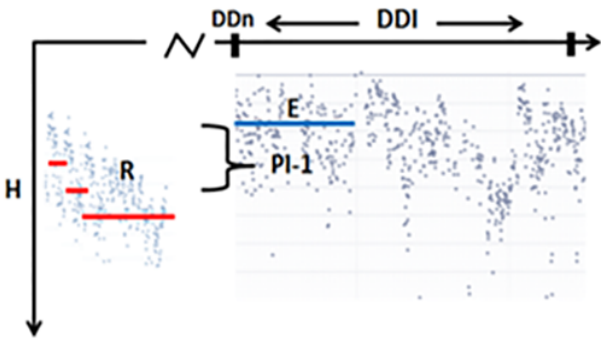


Fig. 2 Dry docking performance (Source: ISO 19030-1)

Fig. 3의 PI-2는 도크 입거 후 일정한 참조 기간 대비 다음 도크 입거까지의 평가기간 동안의 성능을 비교하는 운항 성능지표(in-service performance indicator)이다. 이는 도크 입거 기간 동안 적용했던 유지보수 활동들을 포함한 선체 및 프로펠러에 적용한 솔루션들에 대한 효과를 평가하기 위함이다.

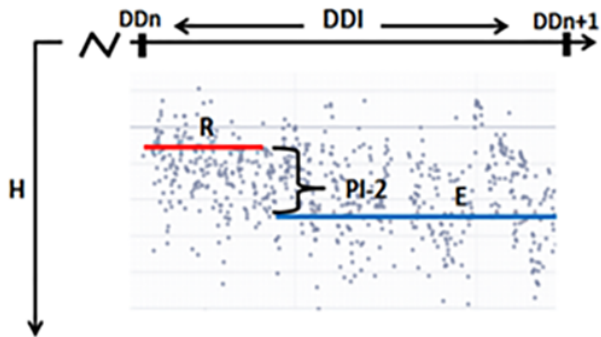


Fig. 3 In-service performance (Source: ISO 19030-1)

Fig. 4의 PI-3의 경우 도크 입거 간격 내 일정 기간 동안의 성능 변화를 나타내는 지표로서 선체 및 프로펠러의 유지보수의 필요 유무를 판단하기 위한 성능지표(maintenance trigger)이다.

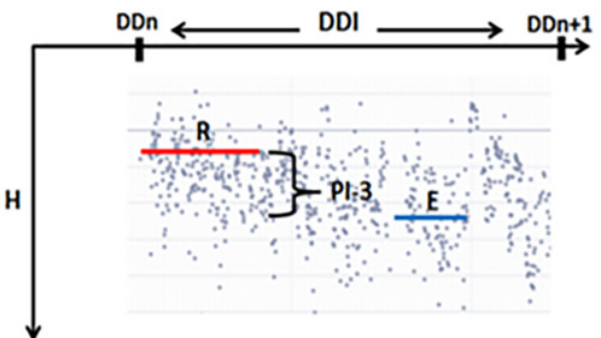


Fig. 4 Maintenance trigger (Source: ISO 19030-1)

Fig. 5의 PI-4는 도크 입거 간격 기간 내에 유지보수 작업(ex. diver cleaning or etc.)을 실시하였을 경우, 해당 유지보수 작업의 일정 기간 전 후의 성능 변화를 나타내는 지표(maintenance effect indicator)이다.

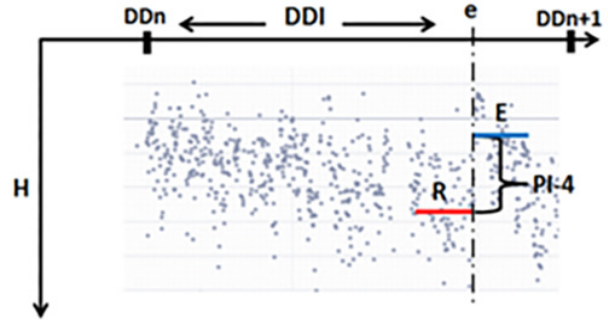


Fig. 5 Maintenance effect (Source: ISO 19030-1)

3. 연구 내용 및 경제성 평가 개요

본 연구의 방오도료 경제성 평가 절차는 각 선종별 적용되는 방오도료의 선택에 따른 초기 투자 비용 대비 시간의 경과에 따른 도막의 노후화 및 표면 거칠기 상승, 생물학적 오염 등으로 인한 선박의 속력 손실을 고려한 추가 연료비의 절감 효과를 이익으로 고려하여 현재가치법에 의한 경제성 평가를 실시하였다. 경제성 평가를 실시하는데 있어 7단계로 구성된 체계화된 기법(Systematic Economic Analysis Technique, SEAT)이 적용된다. 이는 투자대안을 모색하는 단계에서부터 경제적으로 최적의 대안을 선택하기까지 단계적 절차에 따라 실시하게 된다(John et al., 2017). 본 연구에서의 경제성 분석 인자를 상기 경제성 평가 기법에 적용하면 하기의 Fig. 6의 절차로 표현된다. 여기서 Step 5의 현재가치법(present value)은 계획 기간 동안 발생하는 현금 흐름을 현재시점에서 서로 등가가 되도록 단일 금액으로 변환시키는 방법으로 미래가치법, 내부수익율법, 편익-비용 비율법 등 대안들의 경제적 가치를 비교하는 여러 방법 중 가장 쉽게 현금 흐름을 비교할 수 있는 방법이다. 이는 다음의 식 (3)으로 표현된다.

$$P = A \left[\frac{(1+m)^n - 1}{m(1+m)^n} \right] \tag{3}$$

이를 계수기호로 나타내면 $P=A(\text{PIA } m\%, n)$ 이 되며 이를 균일급수 현재가치계수로 부른다(John et al., 2017).

4. 경제성 평가를 위한 가정 사항

4.1 투자 대안 및 계획기간의 설정

본 연구에서의 투자 대안은 선박의 수선하부에 적용되는 방오도료를 대안으로 선정하였다. 최근 선박의 연료저감 방법들 중

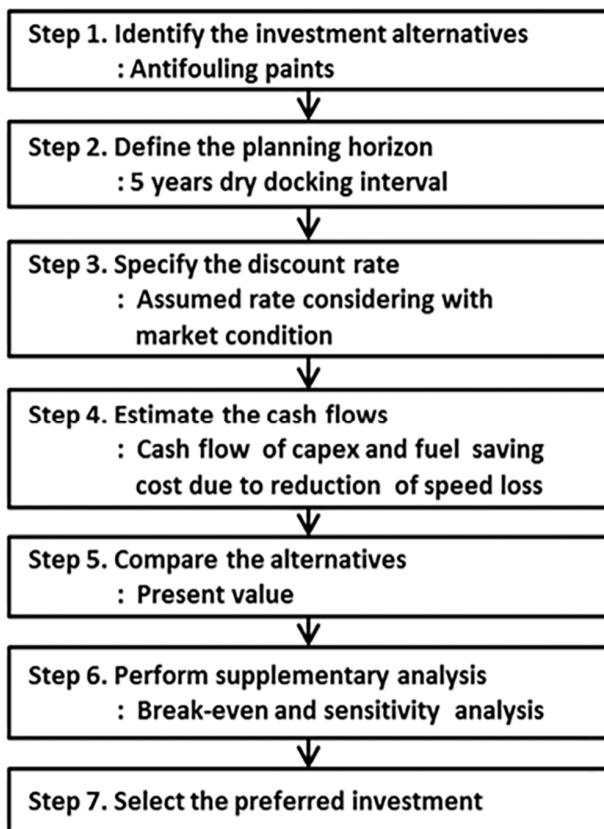


Fig. 6 Steps of systematic economic analysis technique

방오도료의 선정 또한 매우 중요한 요소로 부각되기 시작하였기 때문이다. 또한 방오도료는 해당 신조 선박의 인도 후 다음 번 도크 입거 시점까지의 기간을 근거로 하여 방오도료의 수명 주기가 결정되며 이러한 수명 주기 및 해수 온도, 선박의 분기 간 운항 일수에 따라 도막 두께의 사양이 결정된다. 통상적으로 선박은 도크 입거 주기인 5년의 기간이 적용된다. 따라서 본 연구의 계획 기간은 5년으로 가정하였다.

4.2 이자율(m)의 가정

본 연구의 경제성 평가를 위한 주요 변수인 방오도료의 경우, 수명주기가 끝난 후에 잔존가치의 반영이 불가능하다. 또 한 ISO 19030의 운항 성능지표에 따르는 성능 산정을 가정할 때 별도의 운영 비용 또한 필요하지 않다. 따라서 본 연구의 경제성 산정에 직접적으로 영향이 있는 인자는 Containership 및 VLCC의 연료인 HFO와 LNG의 연료인 LNG의 비용이다. 본 연구에서는 이자율 가정 시 현금흐름의 실제 이자율에 물가상승의 영향을 함께 반영한 복합이자율을 가정하였다. 실제 이자율, 물가 상승률, 복합 이자율간의 관계는 다음의 식 (4), 식 (5)와 같다 (John et al., 2017).

$$1 + m = (1 + d)(1 + j) \quad (4)$$

$$m = d + j + dj \quad (5)$$

여기서, m은 복합 이자율, d는 할인율, j는 물가 상승률을 의미한다. 본 연구에서는 할인율의 경우, 한국은행 기준금리의 평균값, HFO의 물가상승률은 Ship&Bunker의 가격 변경 추이 자료, LNG의 물가상승률은 국가 에너지통계종합정보시스템의 가격 변경 추이의 2015년 6월부터 2019년 8월까지의 평균 변동률을 각각 고려하여 다음의 Table 1과 같이 반영하였다.

Table 1 Combined rate for fuel price

	d	j	m
HFO	0.36 %	1.22 %/quarter	1.58 %/quarter
LNG	/quarter	0.05 %/quarter	0.42 %/quarter

4.3 방오도료 적용에 따른 속력 손실의 가정

글로벌 도료사들은 Silyl acrylate, Zinc acrylate, Nano acrylate, Lubyon technology 등 각자 고유의 기술을 적용하여 시장에 출시하고 있다. MEPC 63/4/8에서는 최근 도료사의 조사 결과를 인용하여 54개월의 선박 운항 기간 동안 동일한 추진 출력 작용 시의 속력 손실을 평균 2.36%로 보고하고 있다. 이러한 조사 자료들을 근거로 청정 선적 연합(Clean Shipping Coalition, CSC)에서는 선체와 프로펠러의 노후화 및 성능 저하에 기인한 영향으로 일반적인 도크 입거 기간 동안 15~20% 정도의 선박 효율(속력) 손실의 발생을 주장하고 있다. 또한 이러한 속력 손실 변화와 추진 출력 변화와의 관계의 경우, MEPC 63/4/8에서는 (Helio and Yebara)를 인용하여 1:3으로 정의하고 있다. 따라서 최근 도료 시장에서는 상기의 자료들을 바탕으로 선박에 일반적인 방오도료 적용 시 도크 입고 간격을 5년으로 가정하였을 때 평균 속력 손실은 5.9% 정도로 반영하고 있다 (IMO MEPC 63/4/8, 2011). 따라서 본 연구에서는 상기의 평균 속력 손실 5.9% 정도의 성능을 가진 일반적인 방오도료 대비 낮은 평균 속력 손실을 목표로 하여 시장에 출시되어 있는 고성능 방오도료 제품들을 적용 할 때 선체의 성능 변화 정도를 ISO 19030에 따라서 평가하는 상황을 가정하였다. ISO 19030-1의 4개의 성능 지표 중 선박의 신조 단계 시 고려할 수 있는 Case는 Fig. 3의 운항성능 지표 (in-service performance indicator)이다. 이는 선박의 최초 인도 또는 도크 입거 작업 이후 일정한 참조 기간 동안의 실제 속력과 예상 속력과의 차이의 평균값을 기준으로 지정하고 참조 기간 이후 차기 도크 입거 전까지의 기간 동안 측정된 실제 속력과 예상 속력과의 차이의 평균을 비교하여 성능 지표를 판단하는 경우이다. 본 연구에서는 도크 입거 간격을 5년으로 가정 시 ISO 19030-2의 권장 안에 따라 참조 기간은 1년(1Q~4Q), 평가 기간은 4년(5Q~20Q)으로 반영하였으며, 참조 기간 이후 평가 기간 동안의 각 목표 평균 속력 손실에 따른 기간 별 속력 손실 추이는 선형(linear)에 따른다고 가정하였다. Fig. 7은 이를 나타내고 있다. 1년(4분기 말까지) 동안의 참조 기간 후 선박의 속력 손실은 주어진 목표의 최대 평균 속력 손실을 기준으로 시간이 지남에 따라 선형적으로 증가한다고 가정하였다.

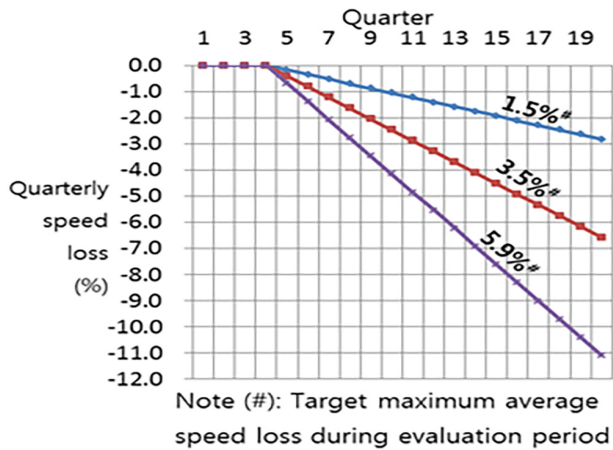


Fig. 7 Speed loss by period according to given averages

1년 (4분기 말까지) 동안의 참조 기간 후 선박의 속력 손실은 주어진 목표의 최대 평균 속력 손실을 기준으로 시간이 지남에 따라 선형적으로 증가한다고 가정하였다. 이를 식으로 표현하면 하기의 식 (6), 식 (7)과 같다.

$$QSL_{i,n} = 0, (n=1,2,3,4) \tag{6}$$

$$QSL_{i,n} = \frac{2}{17} \times TSL_i \times (n - 4), (n=5,6,7,\dots,20) \tag{7}$$

여기서, $QSL_{i,n}$ (Quarterly Speed Loss)은 방오도료(i)를 적용했을 시 해당 분기(n)의 평균 속력 손실(%), TSL_i (Target maximum average Speed Loss)은 방오도료(i)가 목표로 하는 전체 평가 기간 동안의 최대 평균 속력손실(%)을 의미한다.

4.4 연료비 및 초기 투자 비용의 가정

선박 연료비의 경우, 300K DWT VLCC와 23,000TEU Container ship에 사용되는 HFO의 단위 가격은 World bunker price의 19년 7월 시점의 평균 가격, 173.4K LNG에 사용되는 LNG fuel의 단위 가격의 경우 World bank의 Energy price index의 19년 7월 시점의 평균 가격을 반영하였다. 상기 정보들을 포함한 엔진용량, 연료 소모량, 선박의 운항 일수(operation days), 선종별 분기 간 연료비의 가정 사항은 하기의 Table 2와 같다. 본 연구에서의 투자대안인 방오도료의 경우, 현재 글로벌 시장에서 출시되어 있는 제품들을 참조하여 제품 후보군을 가정하였다. 제품별 표준 단가와 각각의 선종에 따른 수선하부 면적 및 추천사양 등의 정보들을 고려하여 평균 속력 손실 5.9%의 성능을 가진 일반적인 방오도료 대비 낮은 평균 속력 손실의 성능을 갖는 도료들의 적용별 추가 비용을 가정하였다. 이는 Table 3와 같다.

상기 가정 사항을 바탕으로 속력 손실에 의한 분기 간 추가 연료비의 계산은 다음의 식 (8)과 같다.

$$QAC_{i,x,n} = QFC_x \times \left[\frac{(-QSL_{i,n}) \times 3}{100} \right] \tag{8}$$

여기서 QAC(Quarterly additional fuel cost)는 방오도료(i)를 적용 시 선종 (x)의 n 기간 말에서의 속력 손실에 의한 추가 연료비(\$/quarter)를 의미한다. 따라서 방오도료(i)의 적용 시 기존의 일반적인 방오도료 적용 시의 속력 손실 5.9% 조건 대비 추가로 소모되는 연료비의 선종별(x), 분기별(n) 절감액 $G_{i,x,n}$ (\$/quarter)은 하기의 식 (9)로 표현된다.

$$G_{i,x,n} = QAC_{0,x,n} - QAC_{i,x,n} \tag{9}$$

5. 경제성 평가

5.1 분기별 현금 흐름 및 손익 분기점 추정

본 연구에서 추정된 현금 흐름 요소는 방오도료의 업그레이드에 따른 선종별 추가 비용을 지출 비용, 각 분기 말 속력 손실 감소에 따른 추가 연료비 절감 효과를 이익으로 반영 하였다. ISO 19030-1의 운항 성능 지표 평가 방법에 따라 최초 1년 (1Q~4Q)은 참조 기간으로서 절감 효과가 발생하지 않고 5Q부터 20Q까지의 평가기간 각 분기 말에 절감 효과가 발생하는 것으로 정의하였으며 이러한 절감 효과를 수익으로 고려하였다. 또한 시간의 흐름에 따라 이자율(m)까지 고려하여 방오도료(i) 적용 시 선종 및 분기별 발생 수익은 다음의 식 (10)와 식 (11)으로 표현할 수 있다.

$$A_{i,x,n} = 0, (n = 1,2,3,4) \tag{10}$$

$$A_{i,x,n} = (n - 4) \times G_{i,x,5} \times (1 + m)^n, (n = 5,6,7, \dots, 20) \tag{11}$$

Table 2 Assumption table for fuel price and consumption rate, ship power, operation days and quarterly fuel cost

Items		Value	Unit
Fuel unit cost; FUC	H.F.O	480	\$/ton
	LNG	520	
Power	VLCC	17,500	kW
	Container ship	54,500	
Fuel consumption rate	LNGC	22,000	g /kWh
	VLCC	157	
	Container ship	160	
Operation days	LNGC	135	days /quarter
	VLCC	73	
	Container ship		
Quarterly fuel cost; QFC	VLCC	2,310,500	\$/quarter
	Container ship	7,333,200	
	LNGC(#)	2,705,800	

Note(#): In case of LNGC, the pilot oil consumption has been not considered due to minor effect

이러한 계획 기간 동안의 현금흐름의 액수, 발생 시점 및 발생 유형 등을 쉽게 파악하기 위하여 현금흐름표를 작성하였으며, 본 연구에서의 현금흐름은 Fig. 8과 같이 지연 등비급수 현금흐름으로 표현된다.

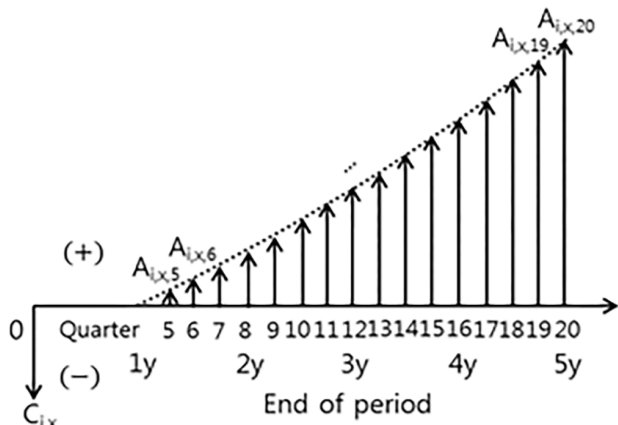


Fig. 8 Cash flow in dry docking interval

돈은 시간적 가치를 갖고 있음에 따라 이러한 각 분기별 현금 발생 금액은 서로 대등하게 비교될 수 없다. 따라서 각 분기별 모든 현금 발생 금액은 모두 동일한 시점으로 환산 후 다루어져야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 현재가치법을 적용하였다. 현재가치 P_i 를 표현하면 다음의 식 (12), 식 (13)과 같다.

$$P_{i,x,n} = -C_{i,x}, \quad (n=1,2,3,4) \tag{12}$$

$$P_{i,x,n} = -C_{i,x} + A_5 \sum_{k=5}^n \left[\frac{(n-4)}{(1+m)^5} \right], \tag{13}$$

$(n = 5, 6, 7, \dots, 20)$

Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 각 선종별 시간의 흐름에 따른 분기별 현재가치를 보여주고 있다. 여기서 각 선종별, 적용 도료별 손익 분기점을 판단할 수 있으며, 선종에 관계없이 목표로 하는 속력손실이 작은 값의 방오도료들을 선택하는 것이 초기에는 투자 비용이 많이 소요 되지만, 본 연구에서 가정된 도크 입거 간격(20분기) 동안 시간이 흐름에 따라 추가 연료비 소모를 점점

줄일 수 있어 편익 측면에서는 유리함을 보여주고 있다. 특히 타 선종에 비해 연료 소모가 큰 컨테이너선의 경우 방오도로 선정에 따른 현재가치에의 영향이 매우 크다는 것을 확인할 수 있다.

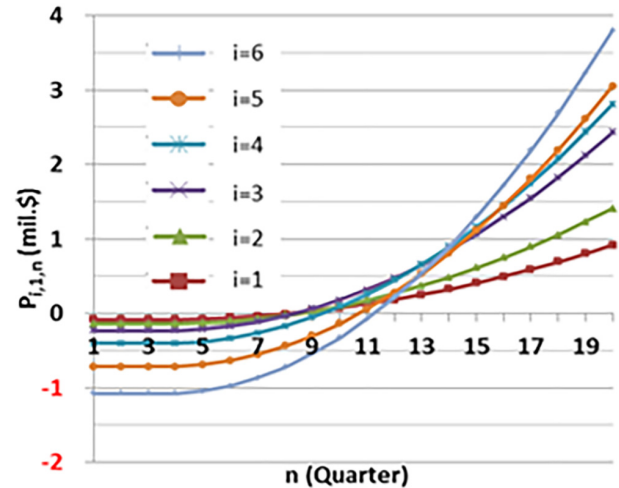


Fig. 9 Quarterly present value as per anti fouling paint application on VLCC

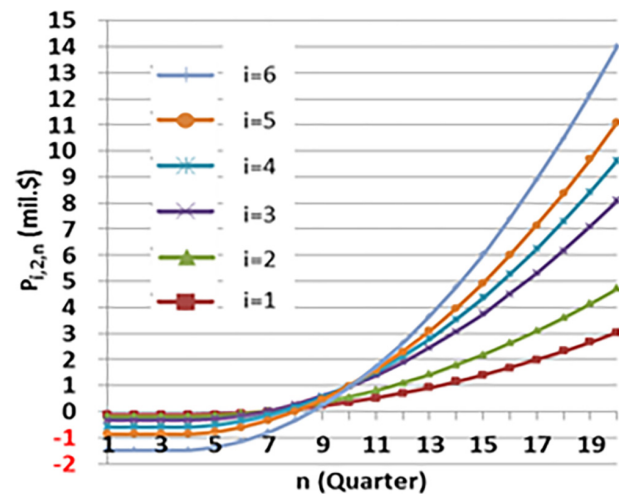


Fig. 10 Quarterly present value as per anti fouling paint application on Container ship

Table 3 Characteristics of assumed anti-fouling paint products and cost effects

i ; A/F paint products	TSL _i ; Target max. average speed loss (%)	C _{i,x} ; Cost effect for upgrade the anti-fouling paint (\$)		
		300K DWT VLCC (x=1)	23K TEU CONT. (x=2)	173.4K LNGC (x=3)
0	5.9	0	0	0
1	5.0	79,100	131,800	68,100
2	4.5	142,500	206,900	90,800
3	3.5	228,800	345,500	207,600
4	3.0	404,700	589,300	328,600
5	2.5	716,200	868,400	447,600
6	1.5	1,077,200	1,477,800	808,600

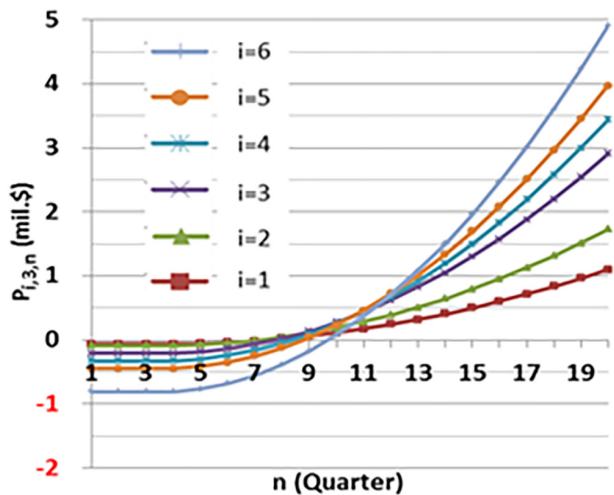


Fig. 11 Quarterly present value as per anti fouling paint application on LNGC

5.2 민감도 분석

상기 Fig. 6의 경제성 평가 절차 중 여섯 번째 단계인 보충적 분석 중 민감도 분석을 실시한다. 민감도 분석의 목적은 하나 이상의 변수 값이 지정된 변동 범위 내에서 변할 때 경제적 가치 척도에 미치는 영향을 파악하기 위함이다. 즉, 가치에 영향을 미치는 변수들의 우선순위를 살펴보기 위함이다. 변수 값의 작은 변화가 투자 대안의 경제적 가치에 크게 영향을 끼치는 경우, 해당 변수의 변화에 민감하다고 할 수 있다. 반대로 어떠한 변수 값의 큰 변화에도 가치에 영향이 작을 경우, 해당 변수의 변화에 강건하다고 할 수 있다. 따라서 경제성 평가 모델의 예측 값과 가정된 조건들은 항상 신뢰할 수 있는 정보가 아니므로 완벽하지 않은 변수의 추정 값이 있더라도 본 민감도 분석을 통하여 적절한 변동 범위 안에서 경제적 가치의 변화를 관찰하여 최선의 의사결정을 하는데 도움을 줄 수 있다 (John et al., 2017). 본 연구에서는 분기 별 현재가치에 따른 대안들의 비교 평가 시 가장 큰 편익을 나타낸 목표 최대 평균 속력손실 1.5%의 도료(i=6)를 적용했을 때의 민감도 분석을 실시하였다. 각 변수들의 추정 오차비율(e)은 ±50%로 설정하였으며 상기 Fig. 8의 등비급수 현금흐름 형태의 분기별 발생 수익은 하기의 Fig. 12와 같이 현재가치가 등가인 균일급수 현금흐름 형태의 분기 간 수익으로 전환된다.

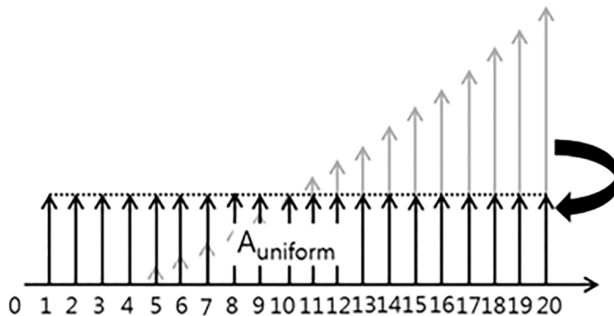


Fig. 12 Conversion to uniform series from geometric series

선종에 따른 20분기 시점까지의 수익에 대한 현재가치 ($P_{6,x,20} + C_{6,x}$)와 균일급수 분기 간 수익($A_{uniform,x}$)은 Table 4로 표현된다.

Table 4 Uniform series equivalent of a geometric series

	$(P_{6,x,20} + C_{6,x})$ (\$)	$A_{uniform,x}$ (\$)
VLCC ($x=1$)	4,879,776	286,473
CONT' ship ($x=2$)	15,487,718	909,224
LNGC ($x=3$)	5,714,650	298,501

또한 이자율(m)은 VLCC 및 Container ship의 경우 1.58%, LNGC의 경우 0.42%, 운영 기간은 5년, 각 선종 별 초기 투자 비용($C_{i,x}$)은 Table 3에서 도료(i=6)를 적용 했을 때와 같다.

1) 분기 간 수익 금액 추정 오차를 변화, 나머지는 고정

- 분기 간 수익

$$= A_{uniform,x} \times (1+e), e = \pm 0.5$$

$$\text{- 분기 간 비용} = C_{6,x} \times \frac{m(1+m)^{20}}{(1+m)^{20} - 1}$$

- 분기 간 가치 = 분기 간 수익 - 분기 간 비용

2) 초기 투자액을 변화, 나머지는 고정

- 분기 간 수익 = $A_{uniform,x}$

- 분기 간 비용

$$= [C_{6,x}(1+e)] \times \frac{m(1+m)^{20}}{(1+m)^{20} - 1}, e = \pm 0.5$$

- 분기 간 가치 = 분기 간 수익 - 분기 간 비용

3) 운영 기간을 변화, 나머지는 고정

- 분기 간 수익 = $A_{uniform,x}$

- 분기 간 비용

$$= C_{6,x} \frac{m(1+m)^{20(1+e)}}{(1+m)^{20(1+e)} - 1}, e = \pm 0.5$$

- 분기 간 가치 = 분기 간 수익 - 분기 간 비용

4) 이자율을 변화, 나머지는 고정

- 분기 간 수익 = $A_{uniform,x}$

- 분기 간 비용

$$= C_{i,x} \frac{m(1+e)[1+m(1+e)]^{20}}{[1+m(1+e)]^{20} - 1}, e = \pm 0.5$$

- 분기 간 가치 = 분기 간 수익 - 분기 간 비용

상기의 분기 간 수익금액, 초기 투자액, 운영 기간, 이자율의 변수들을 고려하여 각 선종 별 민감도 분석 결과는 하기의 Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15로 표현된다.

6. 결과 및 고찰

6.1 경제성 평가 결과 및 고찰

본 연구에서는 각기 다른 초기 투자비용과 성능을 가진 여섯 가지 방오도료의 적용을 가정하고 ISO 19030-1의 운항 성능지표(in-service performance)에 따른 선박의 속력 손실에 의한 추가 연료비 절감액을 이익으로 고려하여 경제성 평가를 실시하였다. 첫 번째 보충적 분석인 분기점 분석을 통하여 확인된 현재가치 기준의 순익 분기점은 다음의 Table 5와 같다.

Table 5 The break-even points according to the ship types and assumed paints (i)

i	300K VLCC	23K TEU CONT.	173K LNGC
1	9th quarter	7th quarter	8th quarter
2	9th quarter	7th quarter	8th quarter
3	9th quarter	7th quarter	8th quarter
4	10th quarter	8th quarter	9th quarter
5	11th quarter	8th quarter	9th quarter
6	12th quarter	9th quarter	10h quarter

두 번째 보충적 분석인 민감도 분석 결과 상기의 각 선종 별 그래프 결과에서 분기 간 가치는 그래프의 기울기가 가장 큰 분기 간 수익 금액에 대하여 가장 민감하다는 점을 확인 할 수 있다. 이는 각 선종에 관계없이 분기 간 가치는 분기 간 수익, 사업 기간, 초기 투자비용, 이자율 순으로 민감하다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 각 도료별 평균 속력 손실에 따라 분기 간 수익이 결정적으로 영향을 받고 있으므로 도료의 속력 손실 차이에 의해 분기 간 가치는 매우 민감하게 변동한다는 것 또한 판단이 가능하다. 특히 컨테이너선의 경우, 타 선종에 비해 분기 간 수익 금액 변화에 따른 분기 간 가치의 변화가 매우 민감한 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서 가정된 사항을 고려하여 경제성 평가를 실시한 결과, 다음과 같은 결과를 확인할 수 있다.

- 가정된 여섯 가지의 방오도료 모두 평균 속력 손실 5.9%의 성능을 가진 일반적인 방오도료 대비 5년의 계획 기간을 고려했을 때 양(+)의 현재가치를 가져 경제성이 있다고 판단할 수 있다.
- 목표 속력 손실 값이 작은 방오도료를 적용하는 것이 초기 투자비용이 많이 소요되지만 경제성 측면에서는 가장 유리하다.
- 특히, 연료 소모량이 많은 컨테이너선의 경우 도료 선정에 따른 연료비 영향이 타 선종 대비 크다.
- 본 연구의 평가 절차는 신조 초기 단계 시 도료 선정에 따른 기초적 경제성 평가를 실시하는데 활용이 가능할 것으로 기대된다.

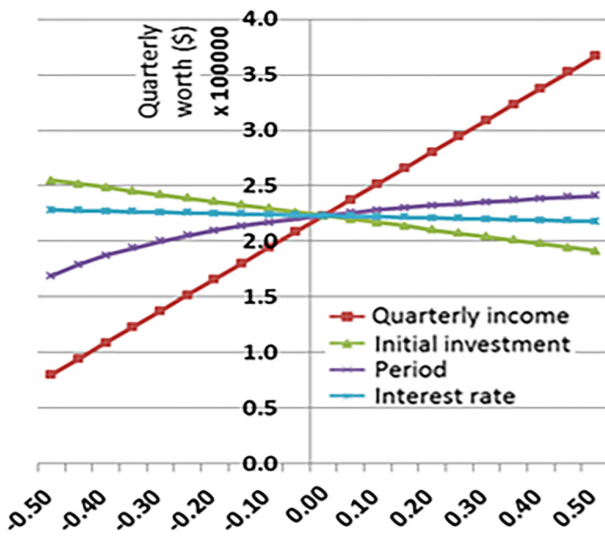


Fig. 13 Sensitivity analysis result of VLCC

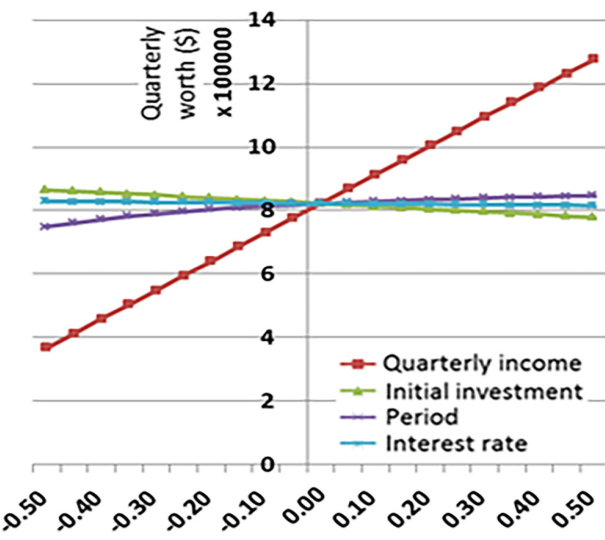


Fig. 14 Sensitivity analysis result of Container ship

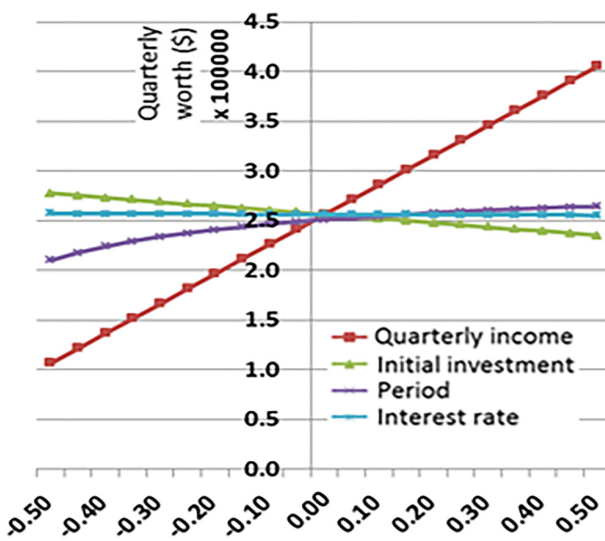


Fig. 15 Sensitivity analysis result of LNGC

6.2 본 연구의 한계점

본 연구에서는 ISO 19030-1의 운항 성능 지표에 따른 선체의 성능 측정 개념과 속력 손실 차이와 연료 소모 차이의 비(1:3)와 최근 도료 시장의 평균 속력 손실 5.9% 등의 가정 사항을 기반으로 경제성 평가를 실시하였으나 가정 조건들에 대한 검증이 필요하며 다음과 같은 한계점과 불확실성을 갖고 있다.

- ISO 19030의 경우, 2016년 11월에 발행된 표준으로서 아직 본 표준을 신조 초기 단계부터 실제 적용한 선박이 극히 적다.
- 현재 시장에 형성되어 있는 도료별 평균 속력 손실에 대한 기준 또한 실제로 검증된 도료가 매우 제한적이다.
- 본 연구는 도료 적용의 관점에서 계산 기준을 가정하여 계산에 반영하였으나, 현재 통용되고 있는 표면 조도의 영향 추정이나 선박 속력 손실량 산정을 위한 계산식과는 다소 차이가 존재할 수 있으며, 도료 선정에 따른 성능 변화와 프로펠러 및 동력과의 관계 또한 추후 실증적인 검증이 요구된다.

7. 결론

선박 연료비의 절감 문제는 이미 오래 전부터 선주와 조선소의 주요 관심사 중 하나였으며 최근 강화되고 있는 환경 규제와도 직결되어 선박의 신조 단계부터 필수적으로 고려되어야 할 요소가 되었다. 이러한 흐름에 따라 ISO 19030이 발행되어 선체 및 프로펠러의 성능 변화를 측정하기 위한 방법이 제시되었다. 본 연구에서는 방오도료의 업그레이드에 대하여 타 저감장치에 대비한 장단점을 비교해보았으며 ISO 19030-1에서 제시된 4개의 성능지표 중 선박의 신조 단계부터 고려할 수 있는 운항성능 지표를 반영한 경제성 평가를 실시하여 목표 속력 손실 값이 가장 작은 방오도료를 적용하는 것이 5년의 계획 기간 동안 가장 높은 경제성을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다. 추후 다수의 실적선 운항 정보가 축적되고 실질적인 성능 검증에 대한 제반 여건이 확보된다면 조금 더 정합성 있는 경제성 평가가 가능할 것으로 기대되며, 도크 입거 성능 지표, 유지보수 성능 지표 등도 본 연구에서 적용된 경제성 평가와 유사한 절차로 반영하여 각 대안들의 평가가 가능할 것으로 판단된다. 경제성 평가 절차는 선박의 신조 및 도크 입거 또는 운항 간 유지보수에 대한 투자 대안들의 비교 검토와 최선의 의사결정을 할 수 있도록 도움을 줄 것으로 기대되며, 본 연구에서 투자 대안으로 고려된 고성능 방오도료의 업그레이드는 타 연료비 절감 방법 대비 비교적 간단한 변화로 큰 효율성을 가질 수 있는 방법으로 사료된다. 향후 이러한 방오도료의 후보군을 더욱 광범위하게 적용하고 가정 조건들을 더욱 현실성 있게 고려하여 선박의 연료비 절감에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- Hong, J.P., Kim, S.Y. & Kim, C.J., 2014. A study on economic analysis of LNG fuel propulsion ships using Life Cycle Cost(LCC) based on combined interest rates and sensitivity analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(6), pp.451-458.
- IMO, 2001. *International convention on the control of harmful anti-fouling system on ships*, IMO, London.
- IMO MEPC 63/4/8, 2011. MEPC 63/4/8 A transparent and reliable hull and propeller performance standard.
- ISO, 2016. ISO19030 Ships and marine technology – measurement of changes in hull and propeller performance, ISO, Geneva.
- John, A.W., Kellie, S.G., Kenneth, E.C., Kim, L.N. & David, B.P., 2017. *Fundamentals of engineering economic analysis*. Text books, Inc.
- KESIS, URL: <http://www.kesis.net/> [Accessed 29 October 2019].
- World Bunker Price, URL: <https://shipandbunker.com/prices> [Accessed 29 October 2019].



김재혁

김용운

이동권