

## 선박의 운항에 의해 배출되는 이산화탄소에 대한 포괄적 환경영향평가

이희수<sup>1</sup> · 박종천<sup>1,†</sup> · 조용진<sup>2</sup> · 정세민<sup>3</sup> · 유정석<sup>4</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 조선해양공학과

<sup>2</sup>동의대학교 조선해양공학과

<sup>3</sup>대우조선해양 중앙연구소(주)

<sup>4</sup>(주)한국해양기술

## Comprehensive Environmental Impact Assessment for CO<sub>2</sub> Emitted from Sailing Ship

Hee-Su Lee<sup>1</sup>, Jong-Chun Park<sup>1,†</sup>, Yong-Jin Cho<sup>2</sup>, Se-min Jeong<sup>3</sup> and Jeoung-Seok Yu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

<sup>3</sup>Institute R&D, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd., Seoul 100-180, Korea

<sup>4</sup>Korea Ocean Engineering & Consultants Co., Ltd.(KOCECO), Suwon 442-819, Korea

### 요 약

인간의 인위적 활동에 의한 이산화탄소의 배출 증가는 지구 온난화의 원인 중 하나로 알려져 있으며, 기상이변 등과 같이 지구 환경에 막대한 영향을 미치고 있다. 이로 인해 최근 들어 이산화탄소 배출량을 규제하기 위한 움직임이 활발해지고 있다. 또한 배출된 이산화탄소의 환경영향을 평가하기 위해, 일본 조선학회 산하의 IMPACT 위원회에서는 자연의 개발로 인한 환경영향과 경제성을 동시에 고려하여 평가할 수 있는 포괄적 지표인 Triple I (III)를 제안하고 있다. 본 연구에서는 III를 적용하여 컨테이너 선박의 운항 시 배출되는 이산화탄소로 인한 환경영향 및 경제성에 대해 생애주기 평가를 통해 정량적으로 비교하였다. 또한 선박의 규모 변화 및 운항 항로의 변경에 따른 포괄적 환경영향평가를 실시하였다. 결과적으로 선박의 운항에 의한 포괄적 환경영향평가는 선박의 규모보다는 이산화탄소 배출량과 밀접한 선박의 운항 항로에 보다 더 민감한 것으로 판단되었다.

**Abstract** – The increase of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission is known as one of the major causes of global warming, and it has a strong influence on the global environment. Therefore many researchers and politicians have tried to regulate the CO<sub>2</sub> emission. In regards to the matter, the IMPACT (Inclusive Marine Pressure Assessment and Classification Technology) committee under the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (JASNAOE) has developed an inclusive environmental impact assessment index, so-called “Triple I(III)”, in order to assess the environmental impact including economic factors due to the artificial development of marine. In this study, III was applied to compare between the environmental impact of CO<sub>2</sub> emitted by container vessels during their life-cycle period and economic benefit due to their operating. Furthermore, III was also applied to assess the comprehensive environmental impact for the cases with various capacities of container vessels and different sailing route. From the results, the case for shortening of the sailing route is more effective to get the advantageous assessment results of III than the case for varying the size of vessels.

**Keywords:** Comprehensive environmental impact assessment(포괄적 환경영향평가), Carbon dioxide(이산화탄소), Ecological footprint(생태학적 발자국), Inclusive impact index(III, 포괄적 환경영향평가기법)

<sup>†</sup>Corresponding author: jcpark@pnu.edu

## 1. 서 론

최근 들어 대기 중 이산화탄소 농도 증가에 따른 지구온난화 등과 같은 기후변화가 전 지구적인 심각한 환경문제로 대두되고 있다. 하와이의 Mauna Loa 화산에서 관측된 이산화탄소 농도 변화를 관측한 미 해양대기청의 자료에 따르면 최근 50년간 대기 중의 이산화탄소 농도는 약 315 ppm에서 397 ppm으로 증가된 것으로 보고되고 있다(NOAA[2013]). 이러한 대기 중 이산화탄소 농도의 증가로 인해 최근 100년간 지구표면온도는 약 0.74 상승한 것으로 알려져 있다(IPCC[2007]). Lee *et al.*[2010]에 따르면 서울의 경우 기온이 1 상승함에 따라 사망자 수가 약 2.5% 가량 증가한다. 또한 기후변화는 인간에게 흡서, 홍수, 태풍 등과 같은 직접적인 영향 외에도 말라리아, 설사병, 영양실조 등의 간접적인 영향을 줄 가능성 또한 크다(Hong[2008]). 따라서 최근에는 지구온난화 등과 같은 기후변화 문제가 심각해지면서 주요 원인 중 하나인 이산화탄소 배출원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

산업혁명 이후 급격한 경제성장에 힘입어 각 국가 간의 경제교류가 활발해 짐에 따라, 전 세계의 교역량은 증가하고 있으며, 이 가운데 해상을 통한 물동량 또한 증가하고 있는 추세를 보이고 있다. 이러한 해상 물동량은 선박의 운항 횟수를 증가시키는 요인으로 작용하고 있으며, 이로 인해 선박의 운항에 따른 이산화탄소 배출량 또한 증가 추세이다. 국제해사기구인 IMO[2009]의 보고서에 따르면, 선박의 운항으로 인한 이산화탄소 배출량은 전 세계 이산화탄소 배출량의 3.3%를 차지하고 있으며, 이를 이산화탄소 배출량으로 환산하면 약 1.06 G-ton에 해당한다. 이는 2007년 기준으로 독일 전체에서 배출되는 이산화탄소 양보다 많은 것으로 집계된다.

선박에 의해 배출되는 이산화탄소의 양이 무시 못 할 수준에 도달함에 따라, IMO에서는 선박에 의한 이산화탄소 배출량 규제를 위한 논의가 시작되었다. IMO는 에너지효율설계지표(Energy Efficiency Design Index, EEDI)와 에너지효율운항지수(Energy Efficiency Operational Index, EEOI)를 개발하였고, 2013년부터 적용할 예정이다(IMO[2011]). 그리고 향후 기준에 부적합한 선박의 운항을 금지하려는 움직임을 보이고 있다. 이러한 EEDI나 EEOI의 경우 선박에 의한 이산화탄소의 배출을 억제하는 데에는 영향을 줄 수 있으나, 이산화탄소의 배출에 의한 환경영향을 평가하지 못한다는 취약점을 가지고 있다. 이에 일본 조선회화 산하의 IMPACT 위원회에서는 인간의 인위적인 개발행위가 유발하는 환경영향이 지구 환경에 미치는 영향과 개발로 인한 경제성 평가를 동시에 포함하는 포괄적 평가 지표인 Triple I(Inclusive environmental Impact assessment Index, III)를 제안하고 있다(IMPACT Research Committee [2008]). 본 연구에서는 III를 적용하여 선박의 생애주기 동안 배출되는 이산화탄소로 인한 환경영향을 정량적으로 평가하여 보았다. 특히, 컨테이너 선박의 규모 및 운항 항로에 따른 이산화탄소 배출량을 비교 분석하고 이로 인한 포괄적 환경영향평가를 실시하였다.

## 2. 포괄적 환경영향평가 기법

### 2.1 Ecological Footprint (EF)

EF는 1990년대에 캐나다의 British Columbia 대학의 W. Rees 교수와 M. Wackernagel 박사 등에 의해서 개발되었다(Global Footprint Network[2008]). EF는 인간의 경제활동에 필요한 자원이나 에너지의 이용 및 폐기물 처리 등에 필요한 생태계의 처리 능력을 나타내는 지표이다. 즉, 인간의 삶을 영위하기 위한 행위가 자연환경에 많은 영향을 미칠수록 이를 복원하기 위한 생태계의 처리 능력을 크게 요구하게 되어 큰 값의 EF가 필요해지며, 이는 개발행위가 유발하는 환경문제로 인해 생태계의 지속성이 건전하게 유지되기 어려워짐을 의미한다. EF는 생산성이 있는 토지(경작지, 목초지, 삼림, 생산력이 있는 수역, 생산력 저해지)의 면적으로 환산한 값으로 나타내게 된다. 이러한 과정에서 각 유형의 토지들이 가지고 있는 생산력은 차이가 있기 때문에, 등가계수(Equivalence factor)를 곱하여 평균적인 토지면적으로 환산한다. Table 1에는 등가계수에 대한 예를 나타낸다(Global Footprint Network[2008]). 이러한 평균적인 토지면적의 단위로는 Global hectares(gha)가 이용된다. 또한 실제로 지구상에 존재하는 오염원을 정화시킬 수 있는 토지나 수역도 동일한 형태의 등가계수를 이용해 평균적인 토지면적으로 환산할 수 있으며, 그 토지를 Biocapacity(BC)라고 부른다.

EF는 인간 활동으로 인해 생산력이 있는 토지가 얼마나 소비되었는가를 산출해 내는 지표이며, BC는 실제로 지구의 처리가능 용량을 나타내는 지표가 된다. BC와 비교하여 EF는 인류의 지속 가능성을 측정하는 기준으로 이용할 수 있다. EF는 토지면적이라는 매우 단순하고 알기 쉬운 지표이기 때문에, 유럽연합을 비롯한 세계 각국에 급속도로 보급되어 사용되고 있다. 하지만 EF는 기본적으로 현 시점에서의 통계 데이터를 기초로 산출되기 때문에, 장래적인 가치나 수명, 기술의 혁신 등이 반영되어 있지 않다고 하는 비판도 있다(IMPACT Research Committee[2008]). 따라서 정책결정에 이용할 때 장기적인 관점으로부터의 비교 평가를 어떻게 도입할지가 문제로 떠오르고 있다.

### 2.2 Triple I (III)

III는 EF의 개념에서 출발하여 자연환경의 개발에 따른 환경영향과 개발에 소요되는 비용 및 손익을 포함시켜 개발의 타당성을 판단하는 지표로서 개발하였다(IMPACT Research Group[2013]).

**Table 1.** Land classification and equivalence factor from EF (Global Footprint Network [2008])

Area type	Equivalence factor (gha/ha)
Primary cropland	2.64
Forest	1.33
Grazing land	0.50
Marine	0.40
Inland water	0.40
Built-up land	2.64

생태계의 관점에서만 개발의 영향을 평가한다면 EF의 개념으로 충분하다고 할 수 있지만, 정책결정의 판단기준에 이용하기 위해서는 인간에 의한 위험도(Human risk, HR)나 경제적 가치 평가를 무시할 수 없다. 따라서 III에서는 환경적 측면에서의 평가 지표와 경제적 측면에서의 평가 지표를 통합하기 위해, 대상이 되는 자연환경의 이용에 관한 기술이 적용되는 나라 또는 지역의 EF( $EF_{region}$ )와 GDP( $GDP_{region}$ )의 비, 혹은 세계의 총 EF와 총 GDP의 비를 도입한다. 따라서 이 환산계수의 값이 환경적인 측면과 경제적인 측면 평가의 가중치를 결정하는 중요한 의미를 갖게 된다. 따라서 III는 다음의 수식으로 계산이 가능하다(IMPACT Research Committee [2008]).

$$III = [(EF - BC) + \alpha ER] + \frac{EF_{region}}{GDP_{region}} [\beta HR + (C - B)] \quad (1)$$

여기서 BC는 자연 본래의 환경이 가지고 있는 자정작용의 능력을 뜻하는 환경용량(Biocapacity), ER은 환경위험도(Environmental risk), HR은 인간의 건강에 영향을 주는 건강위험도(Health risk)로 정의한다. 그리고 C는 자연환경의 개발에 소요되는 금액, B는 자연환경의 개발로 얻을 수 있는 경제적 이득을 뜻한다. 또한  $\alpha$ 는 ER을 EF로 환산하는 계수,  $\beta$ 는 HR을 가격으로 환산하는 계수이다.

하지만 식 (1)의 III의 계산에 있어서 ER이나 HR의 계산은 아직 불확실성이 크고 계산이 번잡해진다는 문제점이 있다. 따라서 IMPACT 위원회에서는 다음과 같이 식 (1)을 간략화한  $III_{Light}$ 를 제안하고 있다(Otsuka[2012]).

$$III_{Light} = [EF - BC] + \frac{EF_{region}}{GDP_{region}} [C - B] \quad (2)$$

위의 식에서 III의 값에 따라 다음과 같은 판단이 가능할 것이다.

- $III > 0$ 의 경우: EF가 개발로 얻을 수 있는 이익 보다 큰 값을 갖기 때문에, 자연환경을 개발하기 보다는 보전하는 방향으로 나아가는 것이 바람직함.
- $III = 0$ 의 경우: 개발로 인한 환경부하와 이로 따른 경제적 이익이 동일함.
- $III < 0$ 의 경우: 개발로 얻을 수 있는 이익이 EF 보다 크기 때문에, 개발이 타당함.

본 연구에서 포괄적 환경영향평가 기법으로 사용하고 있는 III는 자연환경의 이용으로 인한 모든 환경영향을 포함하는 완벽한 평가 기법이라 지칭하기에는 무리가 있다. 하지만 본 평가 기법을 제안한 그룹(IMPACT Research Committee, 2008)은 자연환경을 이용함으로써 발생될 수 있는 환경영향 및 경제적 효과를 함께 고려하고 있다는 점에서 “포괄적”이라는 표현을 사용한 것으로 보이며, 자연환경의 개발에 대해 환경적인 측면과 경제적인 측면을 동시에 고려하고 있다는 점에서 큰 의의가 있다고 판단된다.

### 2.3 Triple I (III)의 평가 과정

Fig. 1에는 본 연구에서 실시한 III의 평가 과정을 나타내고 있다.

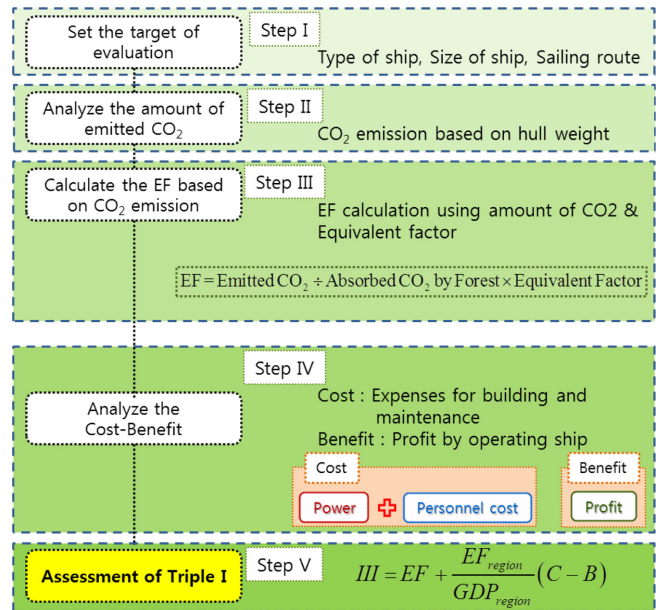


Fig. 1. Procedure for performing the inclusive environmental impact assessment.

본 연구에서는 앞서 언급한 III의 간략화된 버전인  $III_{Light}$ 를 사용하여 포괄적 환경영향평가를 수행하였다. 이 과정을 살펴보면 평가(평가) 과정은 크게 5단계로 구분할 수 있다. 첫 번째 단계에서는 평가 목표로 상정하고 있는 대상인 선종, 선박의 규모, 항해 경로 등을 선정하고, 두 번째 단계에서는 선박의 생애주기 평가법에 의해 선박의 생애주기 동안 발생하는 이산화탄소의 양을 산정하게 된다. 세 번째 단계에서는 선박의 생애주기 동안 발생하는 이산화탄소 발생량에 의해 환경영향을 평가하는 EF 분석을 실시하게 되며, 네 번째 단계에서는 선박의 건조 및 운항으로 인해 발생하는 경제성을 추정한다. 여기서 선박의 경제성은 선박의 건조 및 유지보수 등에 의해 발생하는 지출과 선박의 운항으로 인해 얻을 수 있는 수입을 고려한다. 그리고 마지막 단계에서는 선박의 이산화탄소 발생으로 인한 환경영향과 경제성을 포함하는 포괄적 환경영향평가인 III 분석을 실시한다. 이러한 과정을 거쳐 선박의 건조 및 운항으로 인해 발생하는 환경영향 및 경제성을 포괄하는 포괄적 환경영향평가를 수행할 수 있게 된다.

## 3. 선박에 의한 이산화탄소 배출

### 3.1 생애주기 평가법 (Life Cycle Assessment)

생애주기 평가법은 대상 제품의 생산 시스템의 생애주기 동안 발생하는 투입, 산출 그리고 잠재적인 환경영향을 평가하는 기법이다(ISO 14040[2006]). 따라서 제품의 생산에 필요한 원료의 생산 과정에서부터 제품의 생산, 사용, 폐기에 이르는 동안의 모든 영향을 평가할 수 있는 기법이라 할 수 있다. 본 연구에서는 생애주기 평가법을 사용하여, 선박의 건조에 필요한 원자재의 가공에서부터 선박의 건조, 운항에 이르는 과정에서 발생하는 이산화탄소의 양을

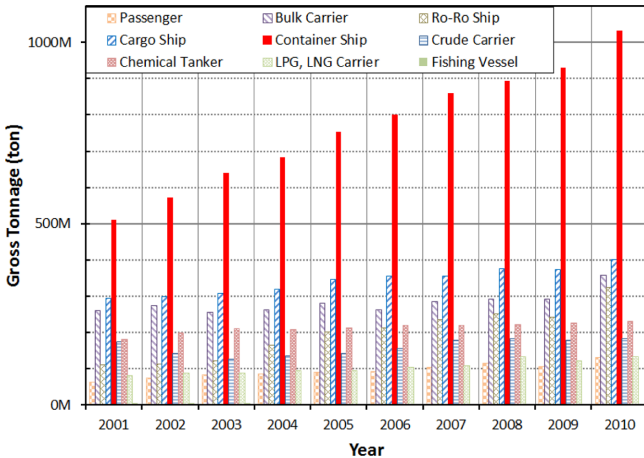


Fig. 2. Results of domestic entry and departure by ship types (KMI [2012]).

추산하고, 이로 인한 환경 영향을 평가하였다. 하지만 선박의 제조 공정 중 용접, 기타 자재의 사용으로 인해 발생하는 이산화탄소는 정확한 추산이 어려우므로, 선박의 주 원자재의 생산 과정에서 발생하는 이산화탄소의 배출량만을 산정하여, 선박의 건조 과정에서 발생하는 이산화탄소의 양을 추정하는 간략화된 방법을 사용하였다.

3.2 평가 대상 선종 및 조건의 선정

본 연구에서는 포괄적 환경영향평가를 적용하기 위해 컨테이너 선을 평가 대상 선종으로 선정하였다. 이는 Fig. 2에 나타내고 있는 바와 같이 2001년부터 2010년까지 10년간 국내 선박입출항실적에서 총 톤수 기준으로 가장 높은 비중을 차지하고 있기 때문에 국내에 입출항하는 선박 중 가장 많은 양의 이산화탄소를 배출할 것으로 예상되기 때문이다. 따라서 국내에 입항하여 해외로 운항하는 컨테이너선을 선정하였으며, 평가 대상으로 선정한 컨테이너선의 규모는 1,600~7,000 TEU급을 대상으로 평가를 수행하였다.

본 연구에서는 두 가지의 사례 연구를 통해 선박의 이산화탄소 배출량을 산정하고자 한다. 먼저 선박의 운항거리나 선박의 목표 수명 등의 요소들이 같은 경우를 가정하고, 선박의 규모에 따라 달라지는 건조과정에서의 이산화탄소 배출량을 산정하였다. 다음으로 선박의 운항 경로의 단축, 변경 등에 의해 변화되는 이산화탄소 배출량을 비교하기 위해, 같은 규모의 선박이 같은 기항지를 운항하지만 항로가 변경될 경우를 가정하여 선박의 이산화탄소 배출량을 산정하였다.

먼저 선박의 규모에 따른 이산화탄소 배출량을 산정하기 위해, 동일한 운항조건을 가정하고 선박의 크기가 변하는 경우의 이산화탄소 배출량을 산정하였다. 이를 위해 다음과 같은 가정을 수립하였다.

- 평가 대상 선박의 운항 거리는 10,000 km로 가정
- 선박이 목표 거리를 운항한 후, 선박의 하역 작업 및 기타 작업을 위한 기간으로 3일의 시간이 소요되는 것으로 가정

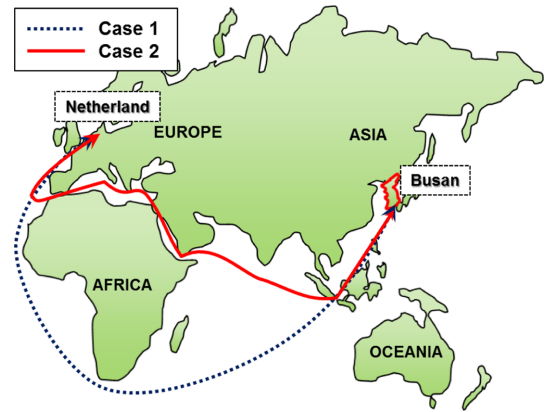


Fig. 3. Examples of Sailing route for comparing the distance effect.

- 선박의 유지 보수를 위한 기간으로 연간 30일 가량이 소요되는 것으로 가정

- 선박의 목표 수명은 20년으로 가정

다음으로 동일한 크기의 선박이 운항할 경우를 가정하고, 선박의 운항항로에 따라 바뀔 수 있는 이산화탄소 배출량을 산정하기 위해, 두 가지의 경우를 고려하였다. 이는, 같은 목적지를 운항하는 항로에서 운하 등의 항로를 선택하여 단축할 수 있는 요소를 고려할 경우와 그렇지 않을 경우를 비교하기 위해서이며, 구체적인 선박의 각 운항항로는 Fig. 3에 나타내고 있다. 이 경우 선박의 운항 항로를 제외한 다른 조건은 앞서 언급한 조건과 동일하다.

- Case I : 부산→아프리카의 희망봉→네덜란드의 항로를 운항하는 경우(약 27,800 km)
- Case II: 부산→이집트의 수에즈 운하→네덜란드의 항로를 운항하는 경우(약 20,000 km)

3.3 평가 대상 선종의 이산화탄소 배출량 추정

선박의 건조 중 발생하는 이산화탄소 발생량은 대상 컨테이너선인 1,600~7,000 TEU급의 경하중량 추정치를 바탕으로 산정하였다. 단, 경하중량의 경우 각 조선소에서의 보안사항에 해당하므로 자세한 재원의 출처에 대해서는 본 연구에서 공개할 수 없음을 명시해 둔다. 선박의 건조 중에는 용접 등의 다른 활동으로 인한 이산화탄소 발생량도 고려해야 하지만, 이는 조선소 및 선박의 건조 공법에 따라 상이하고, 정확한 추정이 어려우므로 본 연구에서는 배제하기로 한다. 또한 선박의 폐기 작업에 따른 이산화탄소 배출량의 산정은 아직 확립된 방법이 없으며, 선행 연구자들의 산정 방법 또한 서로 다르므로 정확한 산정에 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 선박의 생애주기 평가 중 폐기 과정을 제외한 과정에 대해 이산화탄소 배출량을 추정하였으며, 폐기 과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량은 향후의 진행될 연구에서 추가로 반영하기로 한다.

선박을 구성하는 후판의 경우 탄소강을 주로 사용하는 것으로 알려져 있다. KEITI[2012]에 따르면 탄소강 1 ton을 생산하는 과정

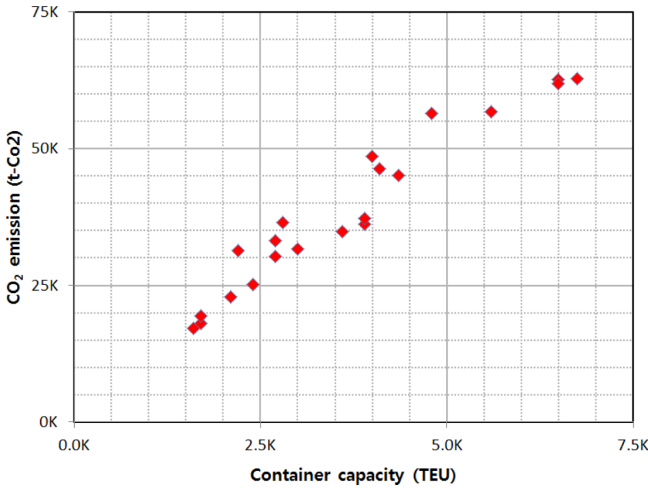


Fig. 4. Results of CO<sub>2</sub> emission during manufacturing of structural steel for container ship.

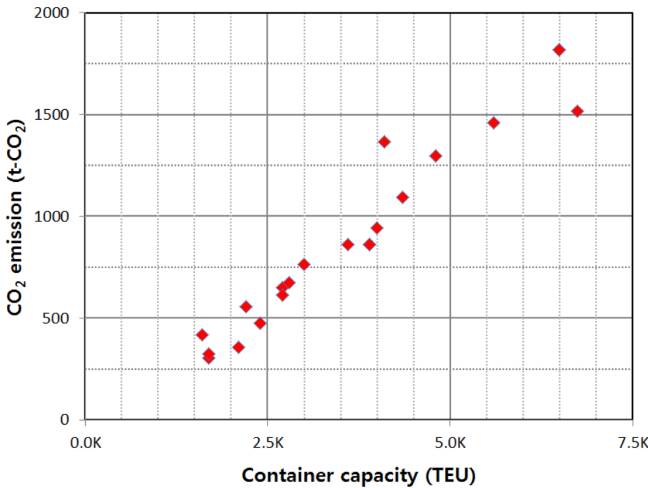


Fig. 5. Results of CO<sub>2</sub> emission during daily voyage.

에서 배출되는 이산화탄소의 양은 2.34 t-CO<sub>2</sub>/t-steel이 배출되는 것으로 보고되고 있다. 선박의 건조 과정에서 배출되는 이산화탄소의 양은 Fig. 4에 나타난다. 이를 살펴보면 선박의 규모가 증가할수록 선각 중량의 증가로 인해 선박의 건조 중 발생하는 이산화탄소의 양은 거의 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

다음으로 선박의 운항 중 배출되는 이산화탄소 양을 추정하였다. 선박의 운항 중 발생하는 이산화탄소의 배출량은, 다음 식 (3)과 같이, 선박이 1일간 운항하는데 소요되는 연료의 소모량에 이산화탄소 배출량으로 산정할 수 있는 변환계수를 곱하여 산정한다. 단, 선박의 주요 연료로 사용되는 중질유의 경우 이산화탄소로의 변환계수는 3.1144를 사용하였다(Rightship[2011]).

$$\text{CO}_2 \text{ emission per day} = \text{Oil consumption per day} \times \text{Conversion factor} \quad (3)$$

### 3.4 선박 기원의 이산화탄소 배출에 대한 EF 분석

이산화탄소의 배출량을 이용한 EF의 값은 식 (4)에 의해 산출된

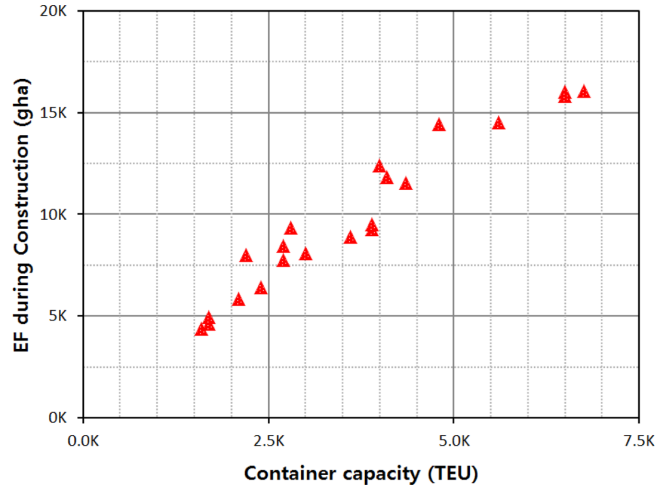


Fig. 6. Results of EF calculation during construction by container capacity.

다. 배출된 이산화탄소를 숲 1헥타르가 연간 흡수하는 이산화탄소의 양으로 나누어 Table 1의 숲의 등가계수를 곱하여 EF를 산출하게 된다. 본 연구에서는 숲 1헥타르가 연간 흡수하는 이산화탄소의 양은 Murai and Yoan[2008]이 사용한 5.2 t-CO<sub>2</sub>를 사용하였다.

$$\text{EF} = \text{Emitted CO}_2 \div \text{Absorbed CO}_2 \text{ by Forest} \times \text{Equivalent} \quad (4)$$

이러한 과정을 통해, 3.3절에서 산출된 선박의 건조중 이산화탄소 배출에 대한 EF의 평가 결과는 선박의 크기에 따라 Fig. 6와 같이 나타난다. 이로부터 선박의 크기가 증가할수록 EF의 크기가 거의 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 식 (4)에서 알 수 있듯이 EF는 이산화탄소 배출량에 의해 직접적으로 영향을 받기 때문에 결과적으로는 Fig. 3에서의 선박의 건조중 이산화탄소 배출량의 결과와 동일한 경향을 보이기 때문이다.

다음으로, 선박의 운항에 따른 EF는 3.3절의 운항 중 배출하는

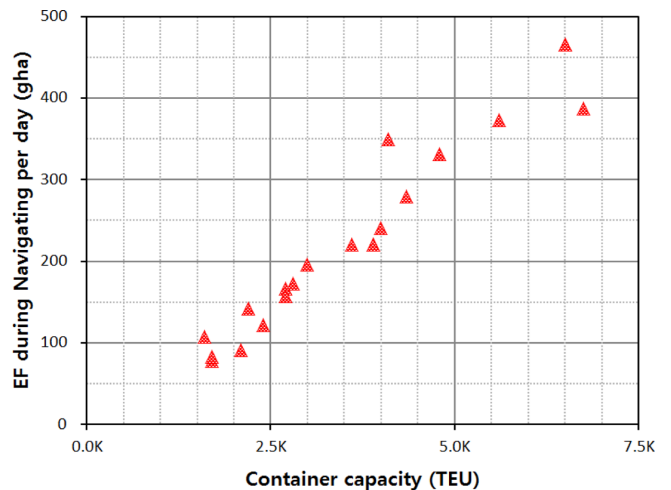


Fig. 7. Results of EF calculation during daily voyage by container capacity.



이산화탄소의 양을 바탕으로 식 (4)를 이용하여 계산할 수 있다. Fig. 7에는 선박이 하루에 발생시키는 EF의 양을 나타낸 결과를 보여주고 있다. 선박의 건조중 EF와 유사하게 선박의 크기가 증가할수록 선박의 운항중 EF의 분포가 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 선박의 규모가 커짐에 따라 운항을 위해 더욱 많은 동력이 필요하게 되므로, 연료의 소비량 또한 증가하기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

### 4. 포괄적 환경영향평가 기법의 적용

#### 4.1 포괄적 환경영향평가 기법의 적용 과정

먼저, 선박의 운항에 따른 포괄적 환경영향평가 기법을 적용하기 위해, 선박의 생애주기에 따른 이산화탄소 배출량을 산정하였다. 이 때, 선박의 생애주기에 따른 이산화탄소 배출량은 선박의 건조 과정과 운항 중 배출되는 이산화탄소 양으로 구분하였다.

다음으로 포괄적 환경영향평가의 구성요소 중 하나인 경제성 평가를 위해, 선박의 건조에서 운항에 이르기까지의 비용 분석을 실시하였다. 선박의 건조에서 운항에 이르는 비용으로는 크게 건조비와 운항에 소요되는 비용으로 구분할 수 있고, 이 가운데 운항에 필요한 비용은 선박 운항에 따른 유류비, 선원의 인건비, 입학세 및 도선료 등에 필요한 제반경비, 세금, 하역비 등이 포함된다. 하지만 본 연구에서는 유류비와 인건비를 선박의 주 운영경비로 고려하여 분석을 실시하였다. Fig. 8에는 포괄적 환경영향평가에 필요한 각 항의 계산 방법 및 구성 요소를 나타내고 있다. Fig. 8을 살펴보면 III의 요소 중 BC, ER, HR의 항목에 대한 평가 과정이 빠져있는 것을 알 수 있다. 이는 해당 항목의 정확한 추산에 대한 명확한 정의를

내리기 곤란하므로, 본 연구에서는 III를 간략화한 III<sub>Light</sub>를 사용하여 평가를 수행하였다. 향후, 이러한 항목들에 관한 보다 깊이 있는 논의 및 적용이 필요할 것이다.

#### 4.2 평가 대상 항목의 분석

선박의 운항에 따른 비용·편익 분석을 실시하기 위해, 먼저 비용 분석을 실시하였다. 선박에 소요되는 비용은 크게 건조와 운항 부분으로 구분된다. 건조 비용의 경우 선박의 가격으로 산정할 수 있다. 본 연구에서는 선박의 건조 비용을 추정하기 위해 UNCTD [2010]에서 발표한 컨테이너선의 규모에 따른 평균 선가에 대한 자료를 참고로, 선박의 크기에 따른 가격 데이터를 선형 보간하여 건조비를 산정하였다.

다음으로 선박의 운항에 소요되는 비용 분석을 위해 선박의 동력부 유지를 위한 연료비, 인건비, 입학세, 도선료 등의 제반 경비, 세금, 하역비 등으로 구분하여 평가하였다. 하지만 모든 자료를 수집하기에는 어려움이 따르므로, 본 연구에서는 단순히 동력부의 유지 비용과 선원의 인건비로 운항 비용을 추정하였다. 동력부의 유지를 위한 연료 구매 비용의 산정을 위해 2005년부터 2008년까지의 병거 C유의 평균가격(MOL ferry Co., Ltd.[2010])을 사용하였으며, 선원의 임금 추정에는 Osumi[2005]가 추정한 선원 1인의 평균 연봉에 대한 자료를 사용하였다. 그리고 선박의 운항으로 인한 경제적 이득은 컨테이너를 운반하여 얻을 수 있는 수입으로 산정하였다. Table 2에는 선박의 운항에 따른 비용·편익 분석 결과를 정리하였다.

#### 4.3 적용 결과 및 분석

계산 순서로는, 각 선박의 목표 속도를 기준으로 동일한 운항 거

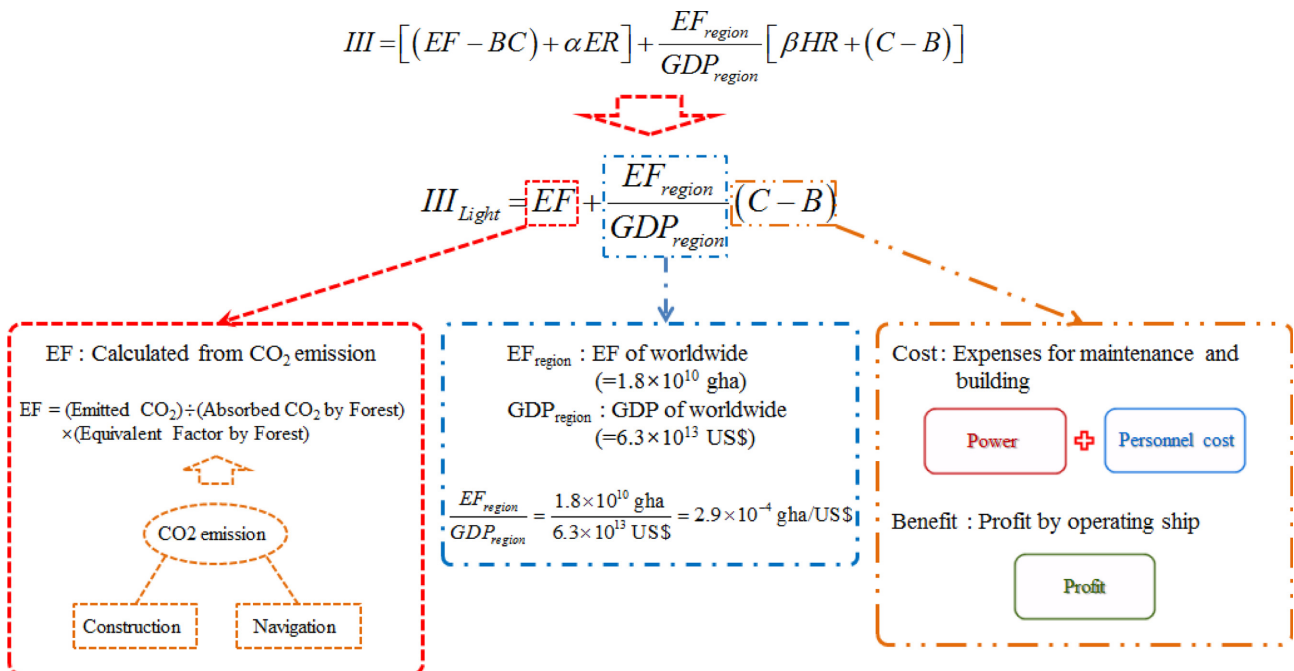
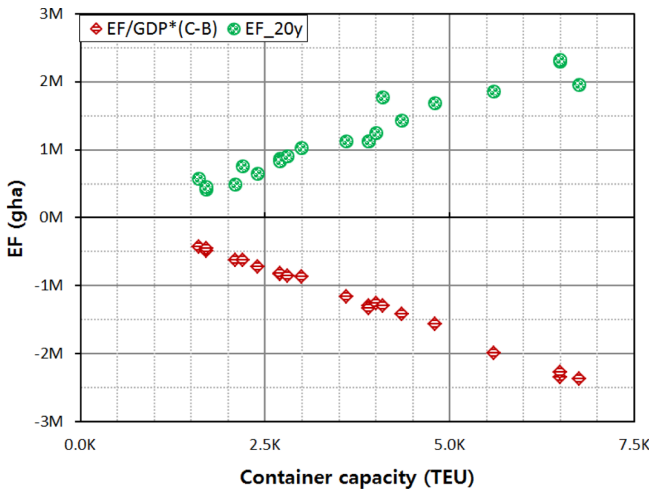


Fig. 8. Analysis results for all factors composed into III<sub>Light</sub>.

**Table 2.** Examples of calculated factors for 6,500 TEU class of container ship

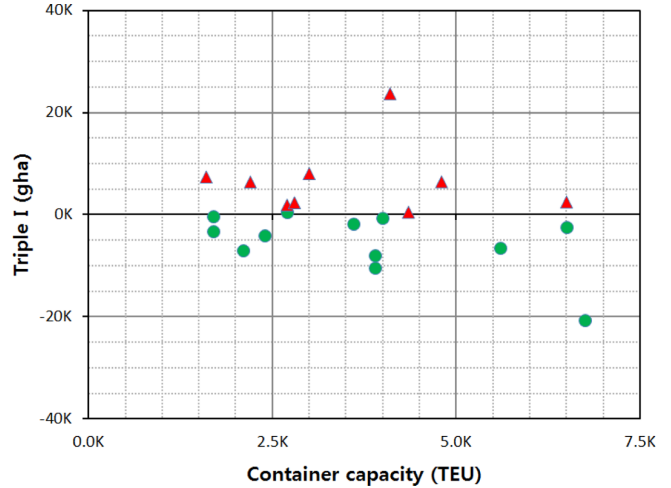
	Factor	Value
Cost	Ship price	$7.48 \times 10^7$ US\$
	Fuel cost (20 years)	$1.78 \times 10^9$ US\$
	Salary for crew (29 persons - 20 years)	$4.00 \times 10^7$ US\$
Benefit	Profit by container transport (20 years)	$3.75 \times 10^9$ US\$
EF/GDP	EF of world wide	$1.8 \times 10^{10}$ gha
	GDP of world wide	$6.3 \times 10^{13}$ US\$
	$EF_{world}/GDP_{world}$	$2.9 \times 10^{-4}$ gha/US\$



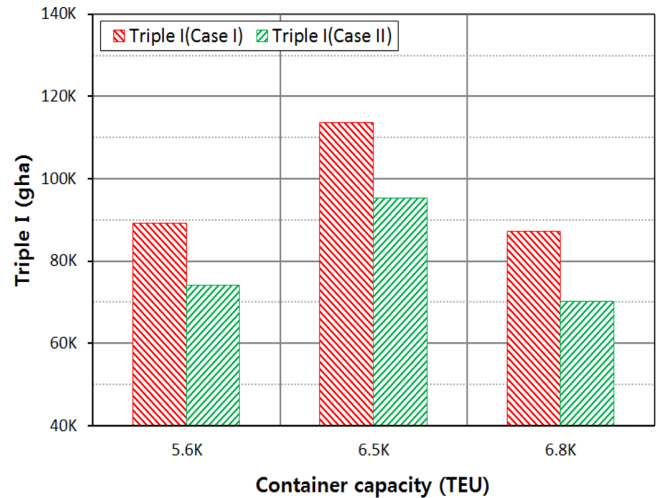
**Fig. 9.** Comparison results of EF between economical benefit and CO<sub>2</sub> emission (by container capacity).

리를 1회 운항하는데 소요되는 운항 시간을 산정하고, 목표 수명 기간 동안의 항해 가능 횟수를 산정한 뒤, 그에 따른 선박의 비용과 편익을 산출하였다. 먼저 선박의 운항으로 배출되는 이산화탄소를 바탕으로 EF 분석을 실시하였다. 앞서 산출한 운항 일정에 따른 연료 소비량을 바탕으로 이산화탄소의 배출량을 산정하였다. 선박의 운항으로 인한 경제적 이익을 EF로 환산한 값과 선박의 목표 수명인 20년 동안 운항하며 배출하는 이산화탄소량을 바탕으로 산정한 EF의 결과를 비교한 결과를 Fig. 9에 나타낸다. Fig. 9의 양의 값으로 나타나는 부분은 선박의 운항으로 인한 이산화탄소 배출량을 EF로 환산한 결과이며, 음의 값은 선박의 운항으로 인한 경제적 이익을 EF와 동일한 단위로 환산한 결과를 나타낸다. 이를 살펴보면 선박의 규모가 커질수록 선박의 운항으로 인한 경제성은 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 선박이 운항할 경우 운송이 가능한 화물의 양이 많아짐에 따라 수익이 증가하기 때문인 것으로 해석될 수 있다.

다음으로 Fig. 10에는 선박의 운항으로 인한 III의 평가 결과를 나타내고 있다. III의 결과가 음의 값을 갖는 경우와 양의 값을 갖는 경우로 나누어지고 있는데, 음수의 값의 경우는 선박의 운항에 의해 배출되는 이산화탄소의 환경영향을 선박의 운항으로 인한 경



**Fig. 10.** Comparison results of III by container capacity.



**Fig. 11.** Comparison results of III by sailing route.

제적 이득으로 상쇄시킬 수 있다는 것을 의미하게 된다. 따라서 Fig. 10에 나타나고 있는 바와 같이 선박의 규모가 일정 이상이 되면, 선박의 규모가 작은 경우에 비해 상대적으로 운항으로 인한 이득이 큰 것으로 판단된다.

다음으로 선박의 운항 항로의 변경에 대해 포괄적 환경영향평가 기법을 적용하여 그 결과를 Fig. 11에 나타낸다. 결과적으로 Case I과 Case II의 운항거리가 서로 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 항로의 선택에 따라 선박이 한번 운항하는데 소요되는 운항기간이 변할 수 있으며, 이에 따라 선박의 운항으로 인해 발생하는 수익률 또한 변할 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 수에즈 운하를 통과하여 상대적으로 짧은 거리를 운항하는 Case II의 결과가 더 좋은 것은 희망봉을 지나는 항로인 Case I의 경우 운항 항로가 약 27,800 km로 Case II에 비해 약 7,800 km 더 긴 항로를 운항함에 따라 연료의 소모량이 증가하게 되어 이산화탄소의 배출량이 증가하기 때문인 것으로 분석된다. 또한 운항항로가 길면 생애주기 동안 운반할 수 있는 화물의 양이 줄어들어, 선박의 운항으로 발생할 수 있는 이익

이 줄어드는 것을 의미한다. 따라서 운항항로가 길어질 경우, 연료 소모량의 증가로 인한 이산화탄소 배출량이 증가하게 되고 선박의 운항으로 인해 발생하는 경제적 이득이 줄어들게 되기 때문에, 상대적으로 평가에는 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 같은 항로를 운항하는 선박이지만 다른 결과를 보이는 것으로 보아, 선박의 엔진과 같은 장비의 차이로 인해 다른 값을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 각 선박의 사양에 따른 심도있는 평가가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서와 같이 III<sub>Light</sub>의 평가를 수행하게 될 경우 추산하지 않는 ER 이나 HR과 같은 항목들에 대해, 면밀한 검토가 이루어진 후 평가를 수행하게 된다면 서로 다른 값을 나타낼 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 포괄적 환경영향평가 기법인 III(IMPACT Research Committee[2008])를 이용하여, 컨테이너 선박의 규모 및 이들의 운항 시 배출되는 이산화탄소 배출량을 생애주기 평가를 통해 비교 분석하고 이로 인한 포괄적 환경영향평가를 정량적으로 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 동일한 운항거리를 가정할 경우, 선박의 규모가 클수록 경제적 이익이 선박의 운항에 따른 이산화탄소 배출로 인한 환경영향을 상쇄하는데 유리한 것으로 나타났다.

- 운항항로에 따른 비교 평가 결과를 살펴보면, 상대적으로 짧은 항로의 운항이 환경에 영향을 적게 미칠 수 있는 것으로 나타났다.

다만, 본 연구에서는 특정한 선형 및 항로를 대상으로 평가의 범위가 한정적이었지만, 향후 선박의 연료가 중질유 외의 복합연료(Dual fuel 등)를 사용하는 경우나 해상상태에 따른 선박의 운항 성능 변화에 대한 영향을 반영하는 경우 등 친환경 선박의 환경 부하 저감 방안을 위한 포괄적 환경영향평가가 적용 가능할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] NOAA, 2013, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [2] IPCC, 2007, Summary for Policymakers, A report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [3] Sara Lee, Ho Kim and Seung-Muk Yi, 2010, "The Relationships between Temperature Changes and Mortality in Seoul, Korea", Journal of Environmental Health Sciences, Vol. 36, No. 1, pp. 20-26.
- [4] Yun Chul Hong, 2008, "Climate Change and Human Health", Journal of the Korean Medical Association, Vol. 51, No. 8, pp. 764-769.
- [5] IPCC, 2009, Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization (IMO) London.
- [6] IMO, 2011, <http://www.imo.org/MediaCentre/PressBriefings/Pages/42-mepc-ghg.aspx>
- [7] IMPACT Research Committee, 2008, "海洋の大規模利用による環境影響評価", Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers.
- [8] IMPACT Research Group, 2013, <http://impact-triple-i.com/eng/IMPACT.html>.
- [9] Global Footprint Network (2008). Calculation Methodology for the National Footprint Accounts, 2008 ed, Global Footprint Network annual report.
- [10] Koji Otsuka, 2012, "Inclusive Impact Index "Triple I" for Assessing Ocean Utilization Technologies", Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 118-125.
- [11] ISO 14040 (2006) "Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework", International Standard Organization, Switzerland.
- [12] KIM, 2012, 2011 Shipping Statistics Handbook, <http://www.kmi.re.kr/Contents.do?command=Detail&MENUID=dongt10>.
- [13] KEITI, 2012, Korean LCI DAtabase Information Network, <http://www.edp.or.kr/lcidb/co2db/co2db01.asp>.
- [14] Rightship, 2011, Calculating and Comparing CO<sub>2</sub> Emissions from the Global Maritime Fleet.
- [15] Murai, M. and Yoan, A. (2008), "Inclusive Environmental Impact Assessment for Construction of Offshore Airport", Journal of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 8, pp. 27-34.
- [16] UNCTD, 2010, Review of Maritime Transport, United Nations Conference of Trade and Development annual report.
- [17] MOL ferry Co., Ltd., 2010, [http://www.sunflower.co.jp/cargo/information/log/baf\\_kamipa.html](http://www.sunflower.co.jp/cargo/information/log/baf_kamipa.html).
- [18] Osumi, T, 2005, Recent Marine Transportation – Chinese factor and resource factor – From the iron and steel industry and the standpoint of the material transportation, [http://www.gscc-asian-business.jp/workshop/2005/asi2\\_04.pdf](http://www.gscc-asian-business.jp/workshop/2005/asi2_04.pdf) (in Japanese).

2013년 5월 16일 원고접수

2013년 8월 7일 심사수정일자

2013년 8월 20일 게재확정일자