

육상전력 사용에 따른 정박중인 선박의 CO₂ 배출 및 운항비용 절감에 관한 연구

한원희* · 임경선**

* 목포해양대학교 기관시스템공학부, ** 목포해양대학교 대학원

A Study on the Reduction of CO₂ Emissions and Operating Costs of the Ship in Port by Shore Electric Power

Won-Hui Han* · Kyung-Sun Lim**

* Division of Marine Engineering System Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

** Graduate school of Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

요 약 : 최근 온실가스 감축을 위한 세계 각국의 노력이 다각도로 진행되고 있으며, 국제적인 협력 또한 시급히 요구되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 해운 업계에서는 항내에서 유발되는 선박 기인 온실가스 배출량 중 탄소에 대한 배출량 감축과 선박운항 비용 절감을 위한 친환경 항만 체계 구축 방안이 활발히 논의되고 있다. 이 논문에서는 탄소 배출량 감축 및 친환경 항만 체계 구축의 기초 연구로 정박 중인 선박에 자체 생산 전력을 공급하는 대신 육상전력을 공급하는 방안을 모색하였다. 이를 위하여 실제 운항중인 목포해양대학교의 실습선 새누리호를 대상으로 정박 중인 선박이 육상전력을 사용함으로써 얻을 수 있는 환경적·비용적 효과에 대해 고찰하였다. 연구 결과 육상전력을 사용한 경우에 CO₂ 배출량은 약 32.5%가 감소되었고, 운항비용은 약 33%가 절감된 것으로 나타났다.

핵심용어 : 온실가스, 선박운항비용, 탄소 배출량, 육상전력, 친환경 항만

Abstract : Recently, nations around the world are putting various efforts in many aspects to decrease greenhouse gases and international cooperation is urgently required. As part of these efforts, the shipping industry is working towards establishing "green ports" that reduce the carbon content of the greenhouse gases emitted in ports and can also decrease the operating costs. This study has tried to look for how to supply shore power instead of supplying ship's own generated power as a basic researches for reduction of carbon emissions and construction of "green ports" system. And in this paper, the training ship 'SAENURI' of Mokpo Maritime University under actual operation was selected to investigate for environmental and expense effects. The results of this study showed that CO₂ emissions were reduced 34% and operating costs were reduced approximately 31% in case of using the shore power.

Key Words : Greenhouse gases, Operating costs, Carbon emissions, Shore power, Green ports

1. 서 론

세계 각국의 화석연료 사용에 따른 산업발달로 인한 환경오염과 지구온난화 문제에 대하여 최근 국제사회의 관심이 증대되고 있다. 1992년 5월에 각국 대표와 관련 민간단체들은 지구환경의 중요성을 강조하며 지구온난화로 인한 기후변화를 예방하기 위해 기후변화협약(UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change)을 채택하였고, 협약 가입국은 온실가스 감축을 위한 국가전략을 수립 및 시행하고 이에 대한 국가적인 통계와 국가정책이행에 관한 보고서를 작성하여 기후협약 최고 의결 기구인 당사국 총회(COP : Conference of the Parties)에 제출하도록 규정하였다(이, 2008). 이후 온실가스 배

출을 줄이기 위한 각국의 의무규정 및 강화를 위한 법적 구속력이 있는 장치마련의 필요성이 제기되면서, 1997년 12월 일본에서 교토의정서가 채택되었다(국무총리실, 2006). 교토의정서는 선진국에 대한 구속력 있는 감축목표를 설정하고 공약을 이행시키기 위한 제도로서 배출권거래제도, 공동이행제도, 청정개발제도 및 공동삭감제도 등 신축성 체제(Flexibility mechanism)의 도입 및 국가 간 연합을 통한 공동감축목표 달성 등을 주요내용으로 구성되어 있다(손, 2006).

교토의정서의 의무감축 내용에 의하면, 1차 감축 공약기간인 2008~2012년 사이에 38개국의 감축의무 부담국가는 1990년 배출량 대비 평균 5.2%감축하도록 규정하고 있다. 또한 온실가스 배출권 거래 명시를 통해 에너지 절약 및 이용효율 향상에 대한 노력과 신재생에너지 개발 등에 대한 관심이 확대 될 수 있는 계기를 마련한 것으로 평가된다(김, 2009).

한국은 2002년 교토의정서를 비준하였고, 1차 공약기간에는

* 대표저자 : 종신회원, winhan@mmu.ac.kr, 061-240-7224

** 교신저자 : 비회원, mmuks@mmu.ac.kr, 061-240-7491

부과된 법적 감축의무가 없었으나, OECD 회원국으로서 국제사회 역할에 따른 온실가스 감축대상국 포함 압력을 받고 있다. 또한 2차 의무감축 대상국에 포함되어, 2013~2017년까지 온실가스 감축의무를 부담해야할 것으로 보인다(오, 2007).

최근 막을 내린 2009년 제15차 덴마크 코펜하겐 세계 기후변화협약에서는 2012년 만료되는 교토의정서를 대체할 새로운 기후 변화 협약이 마련되었고, 2050년까지 전 세계 온실가스 배출량을 1990년 기준 50% 감축이라는 목표가 제시되었다.

이 연구에서는 현재 전 세계적으로 문제가 되고 있는 온실가스 중 선박으로부터 발생하는 CO₂의 배출규제와 관련하여 선박의 정박기간 동안 육상전력을 이용하여 저감되는 CO₂량과 그에 따른 환경적, 비용적 효과를 고찰하고자 하였다. 이러한 연구자료는 친환경 항만(Green port)구축 및 사회적인 인프라 조성의 기초자료 등으로 활용이 가능 할 것으로 판단된다.

2. 연구대상 및 방법

2.1 연구 대상

실제 운항 중인 목포해양대학교 실습선 새누리호를 대상으로 연구에 필요한 자료조사를 수행하였다. 자료는 2007년 11월부터 2009년 10월까지, 2년(24개월) 동안의 육상전력 사용량을 기준으로 하였다.

Table 1은 조사대상 선박인 새누리호의 주요 제원과 주기관 및 발전기관의 제조사와 출력을 나타내고 있다(임, 2008). 주 연구대상인 디젤 발전기의 연료유는 Bunker-A를 사용하고 있으며 연료소모량은 193 +3%/kWh로 조사되었다.

Table 1. Specification of T/S SAENURI

Items	Specification
Gross ton	4701 [ton]
Full speed	16.5 [knot]
Persons	208 [persons]
Main engine type	HYUNDAI MAN B&W 6S 35MC MK7, 4454 [kW]
Diesel generator engine	YANMAR 6N21L-UV 660 [kW] / 720 [rpm] Bunker A 193 +3%/kWh (10,200kcal/kg at Rated output)
Generator	600 [kW] / 720 [rpm], 450 [V], 692.3[A], 3Ø, 60Hz, cosθ=0.8
Aux. Boiler	1300 [kg/h]
Built year	2003

2.2 연구 방법

선박에 설치된 발전기에 의해 생산하는 전력을 선박전력(Ship's electric power), 이외의 전력을 육상전력(Shore electric power)으로 구분하였다. 선박전력과 육상전력의 단위 킬로와트(1kW)를 생산하는데 소요되는 비용을 산출하여 비용 비교분석을 실시하였다. 또한 온실가스 배출량 중 이산화탄소(CO₂) 배출량을 비교하여 환경적 효과를 검토하였다.

육상전력 사용 비용은 조사기간(24개월)동안의 한국전력 청구서 기준이며, 선박전력 생산 비용은 Bunker-A 소모량과 조사 기간 중 싱가포르 국제유가 기준 Bunker-A 가격으로 산출하였다. 육상전력의 단위전력(kW)당 비용은 사용 전력량과 청구서 요금(목포해양대학교 사무처, 2009)을 활용해 산출하였고, CO₂ 배출량은 사용 전력량과 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) guideline에서 권고한 발전부문 국가별 탄소 배출량 계수, 0.424kg(IPCC, 2006)를 이용해 산정하였다(이, 2007). 또한 선박전력 생산 시 발생하는 CO₂ 배출량 산정에는 연료별 석유환산톤(Ton of Oil Equivalent : TOE), 탄소배출계수를 이용하였다.

Table 2는 월간 육상전력 사용량과 탄소배출량 그리고 전력 사용량에 따른 청구요금을 나타낸다(목포대학교 사무처, 2009). 월별 청구요금이 다른 것은 월별 새누리호의 출항일수와 관련이 있다. 2008년 5월과 11월, 그리고 2009년 6월의 청구요금이 다른 달의 요금보다 적은 것은 새누리호의 국제항해와 관련하여 육상전력 사용이 적었기 때문이다. 또한 2008년 8월과 2009년 8월의 청구요금이 다른 달에 비하여 높은 것은 학생들의 가정학습 기간 동안 새누리호의 출항일수가 적었기 때문에 발전기의 운전시간보다 육상전력의 사용시간이 길었기 때문인 것으로 판단된다.

Table 2. Shore power consumption, CO₂ emission and costs for T/S SAENURI

Date	Electricity [kW]	CO ₂ [kg]	Costs [Won]
NOV-07	45,982	19,496	3,587,000
DEC-07	66,828	28,335	4,717,480
JAN-08	41,035	17,399	3,318,720
FEB-08	66,657	28,263	4,708,200
MAR-08	81,668	34,627	5,001,210
APR-08	51,753	21,943	3,569,780
MAY-08	26,255	11,132	2,349,700
JUN-08	82,399	34,937	5,036,190
JUL-08	82,117	34,818	7,535,170
AUG-08	124,641	52,848	10,594,780
SEP-08	97,591	41,379	5,763,120
OCT-08	48,612	20,611	3,419,480
NOV-08	32,342	13,713	2,847,300
DEC-08	73,302	31,080	5,296,550
JAN-09	74,482	31,580	5,363,400
FEB-09	72,519	30,748	5,252,200
MAR-09	63,283	26,832	4,556,370
APR-09	49,220	20,869	3,396,180
MAY-09	45,013	19,086	3,240,930
JUN-09	31,332	13,285	2,287,230
JUL-09	97,513	41,346	7,898,553
AUG-09	94,049	39,877	10,157,292
SEP-09	91,988	39,003	8,002,950
OCT-09	73,203	31,038	5,709,830
Total	1,613,784	684,245	123,609,615

Table 1의 발전기 사양에 의하면 전력 1Kwh를 생산하기 위

하여 Bunker-A 0.193Kg이 소모되며 Bunker-A의 Specific gravity에 의하여 약 0.218ℓ가 된다.

$$0.898 \text{ (S.G.)} = 0.193\text{Kg} \div X \quad (1)$$

Table 3은 각 연료별 연소 시 발생하는 열량 및 오일계수를 나타내고 있다. 표에서 살펴보면 Bunker A는 단위 ℓ를 연소시킬 때 38.9MJ의 열량이 발생함을 알 수 있다. 1Kwh를 생산하기 위하여 소모되는 Bunker-A 0.218ℓ는 Table 4에 의하여 8.480MJ의 열량을 발생시킨다.

$$1\ell : 38.9\text{MJ} = 0.218\ell : X \quad (2)$$

Table 3. Fuel of TOE(Ton of Oil Equivalent) (IPCC, 2006)

Fuel	Unit	Gross calorific values		Oil Factor
		Kcal	MJ	
Gasoline	ℓ	8,000	33.5	0.800
Kerosene	ℓ	8,800	36.8	0.880
Light-oil	ℓ	9,050	37.9	0.905
Bunker A	ℓ	9,300	38.9	0.930

Where, 1kWh = 860kcal, 1TOE = 10⁷kcal, 1cal = 4.1868 J

Table 4는 각 연료별 CO₂ 배출량을 나타내고 있다. 표에서 살펴보면 Bunker-A는 1MJ당 0.0741Kg의 CO₂가 발생됨을 알 수 있다.

$$0.0741\text{kg-Co2/MJ} : 1\text{MJ} = 8.480\text{MJ} : X \quad (3)$$

Table 4. Fuel of CO₂ emission factors (IPCC, 2006)

Fuel	CO ₂	Carbon
Gasoline	0.0693kg-Co2/MJ	18.90kg-C/GJ
Kerosene	0.0718kg-Co2/MJ	19.60kg-C/GJ
Light-oil	0.0741kg-Co2/MJ	20.20kg-C/GJ
Bunker A	0.0741kg-Co2/MJ	20.20kg-C/GJ

새누리호의 단위전력(kW) 생산 시 발생하는 CO₂ 배출량은 Table 3 및 Table 4에 의하여 약 0.628kg으로 계산되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CO₂ 배출량 비교

Table 5은 월간 육상전력 사용량에 기인해 배출되는 CO₂ 배출량과 등가의 선박전력 생산 시 배출되는 CO₂ 양을 비교하여 나타낸 것이다. 총 조사기간 동안 육상전력을 사용한 경우 684,245Kg, 선박전력을 사용한 경우 1,013,456Kg의 CO₂ 배출량이 산정되었다. 계산결과 CO₂ 배출총량은 선박전력을 사용할 경우에 329,211Kg이 더 많았으며, 월간 평균으로는 13,717Kg 가량의 CO₂가 육상전력에 비해 추가로 배출됨을 확인할 수 있었다. 따라서 정박 중인 선박이 육상전력을 사용할 경우 CO₂ 배출량을 약 32.5%까지 감축할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 1은 2007년 11월부터 2009년 10월까지 24개월간 새누리호의 선박전력 생산 시 CO₂량과 육상전력 사용 시 CO₂량을 비교한 것이다. 2008년 8월에 27,545Kg으로 그 차이가 가장 컸고, 조사기간 동안 월별 전력사용량이 클수록 CO₂ 발생량 또한 증가하는 하는 것을 확인 할 수 있다.

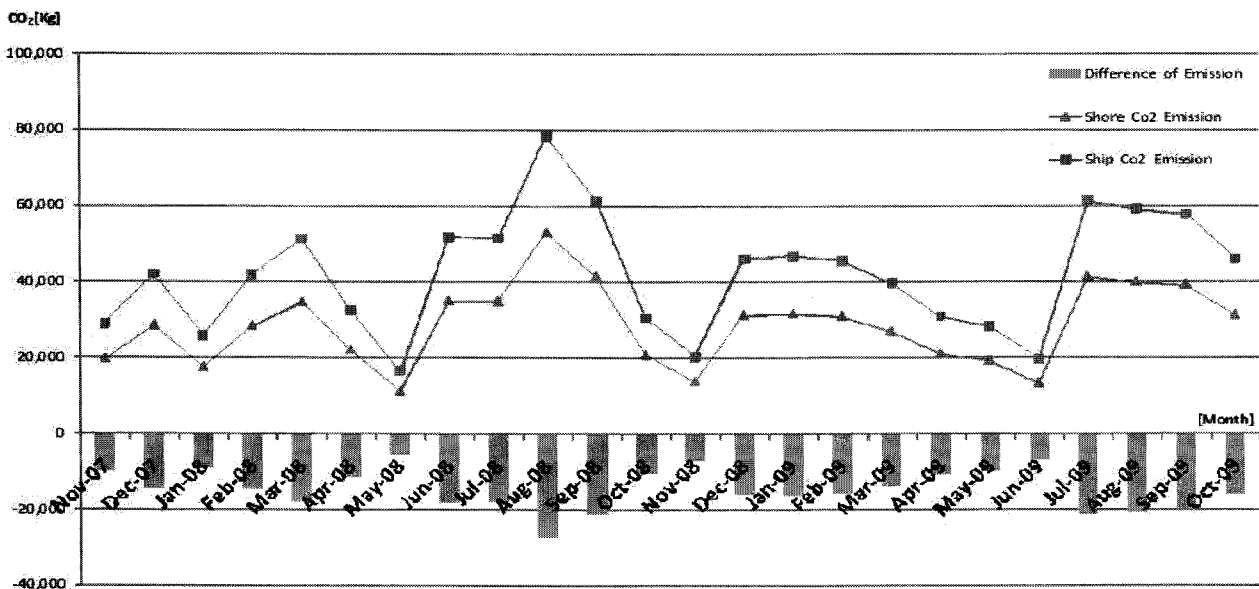


Fig. 1. Monthly CO₂ emission comparison between shore and ship.

Table 5. Comparison of CO₂ emission between shore and ship's electric power

Date	Electricity [kW]	CO ₂ emissions		Difference of CO ₂ emission
		Shore	Ship	
NOV-07	45,982	19,496	28,877	-10,162
DEC-07	66,828	28,335	41,968	-14,769
JAN-08	41,035	17,399	25,770	-9,068
FEB-08	66,657	28,263	41,861	-14,730
MAR-08	81,668	34,627	51,288	-18,048
APR-08	51,753	21,943	32,501	-11,437
MAY-08	26,255	11,132	16,488	-5,802
JUN-08	82,399	34,937	51,747	-18,210
JUL-08	82,117	34,818	51,569	-18,147
AUG-08	124,641	52,848	78,275	-27,545
SEP-08	97,591	41,379	61,287	-21,567
OCT-08	48,612	20,611	30,528	-10,743
NOV-08	32,342	13,713	20,311	-7,147
DEC-08	73,302	31,080	46,034	-16,199
JAN-09	74,482	31,580	46,775	-16,460
FEB-09	72,519	30,748	45,542	-16,026
MAR-09	63,283	26,832	39,742	-13,985
APR-09	49,220	20,869	30,910	-10,877
MAY-09	45,013	19,086	28,268	-9,947
JUN-09	31,332	13,285	19,676	-6,924
JUL-09	97,513	41,346	61,238	-21,549
AUG-09	94,049	39,877	59,063	-20,784
SEP-09	91,988	39,003	57,768	-20,329
OCT-09	73,203	31,038	45,971	-16,177
Total	1,613,784	684,245	1,013,456	-356,632

3.2 비용 분석

Table 6은 선박전력과 육상전력을 사용할 경우의 비용을 비교한 것이다. 비용 분석을 위한 전력사용 요금은 한국전력 청구 요금을 기준으로 하였고, 기준이 되는 유가는 싱가포르 국제유가 시장에서 거래되는 Bunker-A의 배럴당 가격과 동 기간동안 매월 고시환율을 통하여 산출하였다.

2007년 11월부터 2009년 10월까지 24개월간 총비용을 분석한 결과 육상전력을 사용한 경우에 123,609,615원, 선박전력을 사용한 경우에 183,931,275원으로 나타나 육상전력을 사용한 경우에 약 33% 비용 절감 효과가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 2는 2007년 11월부터 2009년 10월까지 24개월간 단위전력을 생성하는데 소요되는 비용을 나타낸 것이다. 육상전력 사용 시 비용 산출에는 한국 전력 청구 요금서를 사용하였고, 선박전력 사용 시 비용 산출에는 싱가포르 국제유가시장에서 거래되는 BUNKER-180의 현물유가와 매월 10일 외환은행 최종고시 매

매기준율을 적용하여 산출하였다. 24개월간 BUNKER-180의 1 배럴 당 평균가격은 70.39\$이고(KESIS, 2009), 동 기간 평균 환율은 \$당 1149.80원이었다. 또한 1배럴은 158.9ℓ로 환산하였다(외환은행, 2009). 그래프에서 살펴보면 비용이 가장 큰 차이가 나는 2008년 8월에 94.10원 차이가 났고, 가장 적은 차이는 2008년 11월에 오히려 육상전력 사용의 경우가 더 높게 나타나기도 하였다.

Table 6. Comparison of costs between shore and ship's electric power

Date	Electricity [kW]	Costs		Difference of costs
		Shore	Ship	
NOV-07	45,982	3,587,000	5,590,492	-2,003,492
DEC-07	66,828	4,717,480	7,792,145	-3,074,665
JAN-08	41,035	3,318,720	4,763,343	-1,444,623
FEB-08	66,657	4,708,200	7,718,214	-3,010,014
MAR-08	81,668	5,001,210	9,987,180	-4,985,970
APR-08	51,753	3,569,780	6,626,454	-3,056,674
MAY-08	26,255	2,349,700	4,034,606	-1,684,906
JUN-08	82,399	5,036,190	12,789,973	-7,753,783
JUL-08	82,117	7,535,170	14,444,380	-6,909,210
AUG-08	124,641	10,594,780	20,844,961	-10,250,181
SEP-08	97,591	5,763,120	14,641,578	-8,878,458
OCT-08	48,612	3,419,480	4,973,008	-1,553,528
NOV-08	32,342	2,847,300	2,043,368	803,932
DEC-08	73,302	5,296,550	4,579,176	717,374
JAN-09	74,482	5,363,400	5,029,025	334,375
FEB-09	72,519	5,252,200	4,866,750	385,450
MAR-09	63,283	4,556,370	3,983,032	573,338
APR-09	49,220	3,396,180	3,646,710	-250,530
MAY-09	45,013	3,240,930	3,954,392	-713,462
JUN-09	31,332	2,287,230	3,165,159	-877,929
JUL-09	97,513	7,898,553	10,014,585	-2,116,032
AUG-09	94,049	10,157,292	10,398,057	-240,765
SEP-09	91,988	8,002,950	9,901,588	-1,898,638
OCT-09	73,203	5,709,830	8,143,102	-2,433,272
Total	1,613,784	123,609,615	183,931,275	-60,321,660

이것은 환율과 유가의 상관관계에 따른 것으로 분석 되었는데, 2008년 6월부터 2008년 9월까지의 국제적인 고유가와 국내 경기침체에 따른 고환율의 영향인 것으로 판단되었다. 또한 단위전력 생산에 소요된 평균 비용은 육상전력이 76.33원, 선박전력이 110.13원으로 산출되어, 육상전력을 사용할 경우가 선박전력을 사용하는 경우에 비해 약 31%의 비용 절감효과가 발생 하는 것으로 나타났다.

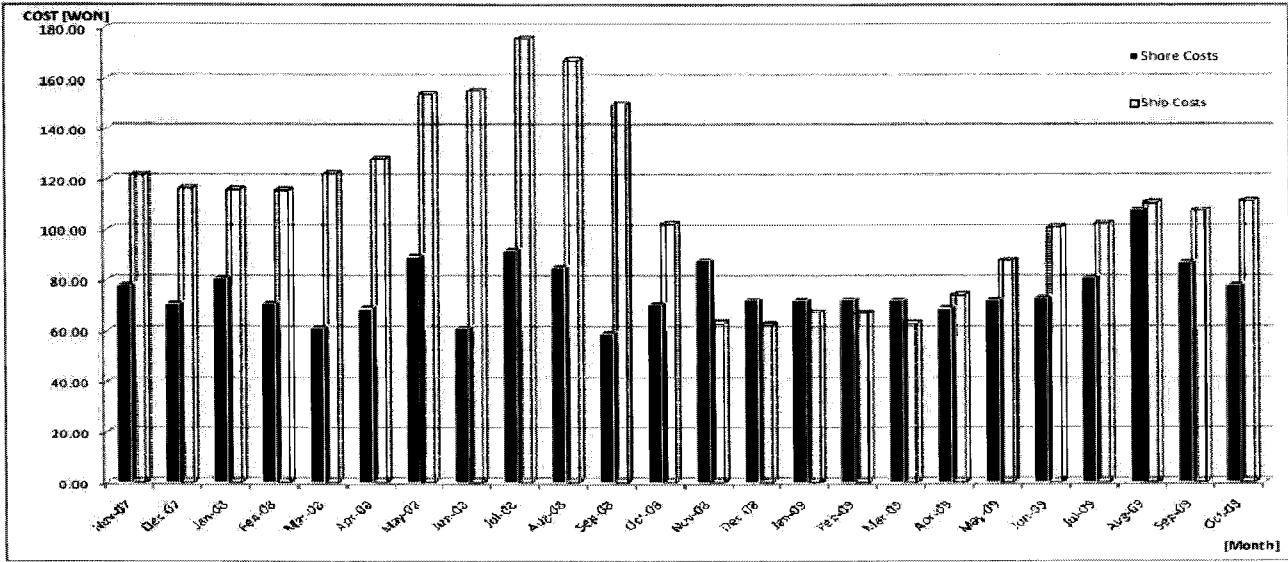


Fig. 2. The cost of 1Kwh generation.

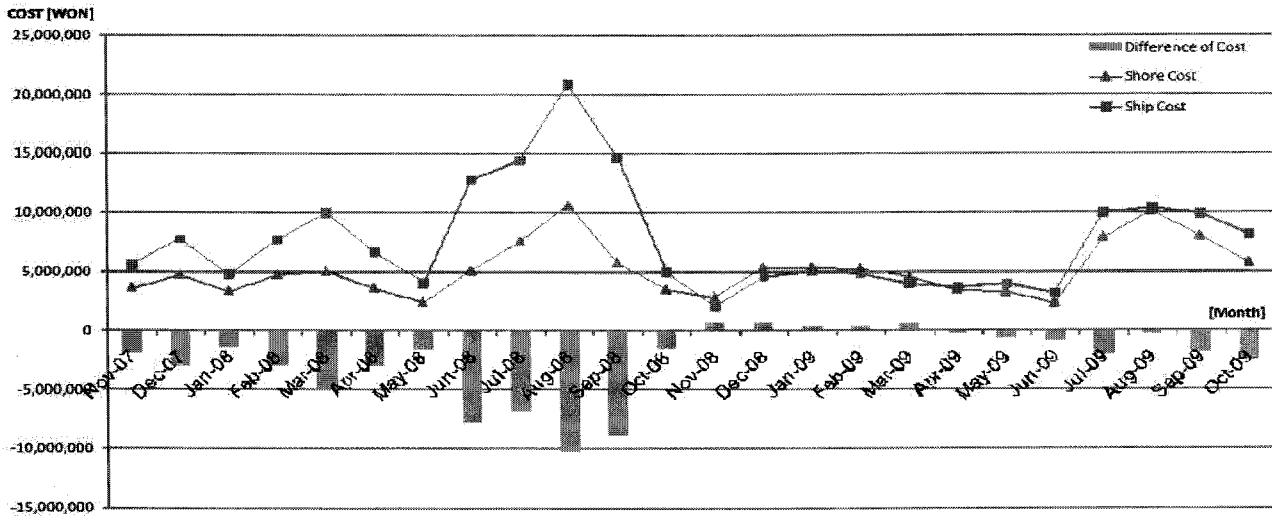


Fig. 3. Monthly cost comparison between shore and ship.

Fig. 3은 새누리호가 부두에 정박 중 사용한 전력량 부과 요금과 선박에서 등가 전력 생산에 필요한 Bunker-A 양을 유가 환산하여 비교·분석한 것이다. 선박전력의 경우 등가량의 전력을 생산할 때 필요한 Bunker-A에 대한 비용을 조사기간 동안 싱가포르 국제유가를 기준으로 산출한 것이고, 육상전력의 경우 동기간동안 등가량의 전력을 발전소로부터 공급 받을 경우 지불한 전기요금을 토대로 산출한 것이다. 그래프에서 살펴보면 가장 큰 차이는 2008년 8월에 10,250,181원을 나타내고 있고, 2008년 11월부터 2009년 3월까지의 오히려 선박전력을 사용하였을 때가 더 작게 나타났는데, 이는 국제적으로 치솟았던 유가가 환율 상승폭에 비하여 더 크게 하락했기 때문이다. 또한 동기간 동안 전체적인 평균은 1개월 당 4,825,733원의 절감을 보여주고 있기 때문에 육상전력을 사용할 경우에 약 33% 비용 절감 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 고유가·고환율이 지

속될 경우 비용 절감 효과는 더욱 증가 될 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 현재 전 세계적으로 문제가 되고 있는 온실가스 중 선박으로부터 발생하는 CO₂의 배출과 관련하여, 선박의 정박기간 동안 육상전력을 이용하여 저감되는 CO₂량과 그에 따른 환경적, 비용적 효과를 고찰하였다. 효과분석을 위한 모델은 실제 운항 중인 목포해양대학교 실습선 새누리호를 이용하였고, 24개월간의 육상전력 사용량, 전력사용료 및 새누리호 발전설비에 관한 각종 자료를 조사하고, 비교·분석하여 정량화 하였다.

연구 결과 정박 중인 선박이 선박 발전기를 운전하여 전기를 생산하지 않고 육상전력을 사용하면 CO₂ 배출량을 약

329,211Kg(32.5%) 정도 감축할 수 있고, 60,321,660원(33%)의 비용 절감효과가 나타나는 결과를 보였다.

또한 단위전력 생산 당 CO₂ 배출량은 선박 발전기를 사용하는 경우가 발전소에서 배출하는 에너지원별 CO₂ 배출량의 평균값보다 약 1.5배 많았다.

이 연구의 계산식들에 사용된 값들은 IPCC에서 제시된 일반적인 데이터들이며, 선박 조사 자료 또한 오차와 손실 등이 고려되지 않은 평균값 및 대표 값들이 사용되었기 때문에 차후 다양한 선박을 대상으로 적용 할 경우에는 상황에 맞게 보완해야하며, 그에 따른 추후 연구가 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 국무총리실(2008), 저탄소 녹색성장 추진전략(안), pp. 1-8.
- [2] 김승래(2009), 녹색성장을 위한 탄소세 도입방안, 재정포럼 5월호, pp. 17-27.
- [3] 목포해양대학교 사무처(2009), 실습선 새누리호 2007.11.~2009. 10. 육상전력 사용량 및 청구서 요금, p. 1.
- [4] 손효중(2006), 국제기후변화 레짐에 대한 비교연구 : 교토 의정서와 아·태 신(新) 기후협약을 중심으로, 연세대 대학원, pp. 31-67.
- [5] 오대균(2007), 기후변화협약과 우리의 대응방안, 국회도서관보, 제44권, 제4호, pp. 13-20.
- [6] 외환은행, 고시환율(2009), p. 1.
- [7] 이상중(2007), 화력발전소 입출력 특성계수를 이용한 순시 발전출력 대비 CO₂ 대기배출량 계산, 조명·전기설비학회, 제21권, 제5호, pp. 120-125.
- [8] 이연상(2008), 쉽게 풀어보는 기후변화협약, 한울, ISBN : 9788946050259, pp. 38-53.
- [9] 임남균(2008), 선박 전과정평가를 위한 실습선 배기가스 인벤토리분석, 한국항해항만학회지, 제32권, 제1호, pp. 29-35.
- [10] KESIS(2009), 에너지통계서비스, 석유시장분석, 석유제품 가격, 월별 석유제품가격, 싱가포르 현물, Bunker 180. 2007.11~2009.10, p. 1.
- [11] IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006), IPCC NGGIP PUBLICATION, p. 190.

원고접수일 : 2010년 04월 06일

원고수정일 : 2010년 05월 07일

게재확정일 : 2010년 06월 24일