

국적 선박에서 배출되는 그린하우스가스의 인벤토리 연구

The Inventory Study for Greenhouse Gas Emission from Korean shipping Industries

이돈출^{†*}, 이석희^{**}, 이경우^{***}

Don-chool Lee^{†*}, Seok-hee Lee^{**}, Kyoung-woo Lee^{***}

요 약 문

최근 IMO에서는 온실가스 배출을 규제화 하고자 하는 동향이 있으며 조만간 선박에서 온실가스 배출의 규제가 실현될 것으로 예상된다. 선박에서 배출되는 온실가스는 CO₂가 대부분을 차지하고 있으며 세계경제상황에 따른 영향이 고려되지만 지속적으로 증가추세에 있는 CO₂를 감소시키기 위한 아국의 대처방안이 필요한 시점이다. 또한 향후 발효될 EEDI를 소개하고 결과적으로 GHG를 저감시키기 위한 방안인 선형개선, 폐열회수시스템, 친환경연료사용기관, SEMP 등에 관한 내용을 다루어 보았다. 이 보고서에서는 GHG를 비롯한 NO_x, SO_x 및 PM과 같은 유해배출물질을 Top Down방식으로 평가함으로써 선박에서 기인하는 대기오염물질 관련 국내정책 및 해운산업의 장기적인 발전전략에 유용하게 사용될 것으로 기대한다.

※ Keywords : 그린하우스가스(GHG, Greenhouse Gas), 에너지효율설계지수(EEDI, Energy Efficiency Design Index)

1. 서 론

GHG(Greenhouse Gas)는 CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆로 구성되며 선박에서는 이중 이산화탄소의 영향이 98%정도를 차지하고 있다.

선박은 이러한 GHG 이외에도 저속, 고압압축 연소에 의한 질소산화물(NO_x), 저질 연료유에 많이 포함되어 있는 황 성분으로 인한 황산화물(SO_x)과 그의 부가물인 PM(입자성물질) 그리고 NMVOC(휘발성물질), CO 등이 있다. 해운산업

* 목포해양대학교
** 선박안전기술공단
*** 이경우한국선급
† 논문주저자

에서 발생하는 GHG는 주기관, 발전기 보일러 등에서 기관의 동력과 스팀을 얻기 위하여 연소된 연료에 의해서 발생하며 선박 운항의 빈도수 및 속도에 결정되며 해운경기와도 밀접한 관계가 있다. 2008년 말부터 시작된 미국 내 부동산 가격의 급격한 하락, 기업의 보증 불이행과 파산 등으로 경기침체와 함께 물동량 감소와 늘어난 선대로 인하여 현재 해운산업은 많은 어려움을 겪고 있다. 한국을 포함한 전 세계의 주요 해운사들은 이러한 경기 위축으로 인한 외부적인 환경에 영향을 받고 있지만, 중국을 포함한 개발도상국의 경제발전과 물, 원유, 광물, 석탄 및 원자재들의 수요가 꾸준히 증가할 것으로 예상된다.

따라서 장기적으로는 선박을 통한 세계 물동량은 계속해서 증가할 것으로 전망하고 있고 최근 UN(국제연합)에서 발간한 보고서에 의하면 2008년 1월 1일 기준 전 세계 선복량(재화중량)은 약 10억 4천만톤 이었다. 이중 세계 10대 해운국을 Table 1에 보인다.¹¹⁾ 그리고 해상을 통해서 연간 운송되는 양을 산술적으로 환산하면 2007년 기준 약 32조 해상마일-톤에 달하며 이는 전 세계물동량의 90%이상을 담당하고 있다. 2007년도를 기준으로 선박분야에서 배출되는 이산화탄소량은 약 10억톤을 약간 초과하며 육상 다른 산업과 비교한 결과를 Fig. 1에 보인다. 해운분야에서 상위 10개국 이 차지하는 선복량의 비중은 60%를 넘어 서고 있고, 우리나라는 선복량 기준 세계 7위로 전체 선복량의 약 3.6%를 차지하고 있다.

국내 산업에서 해운산업이 차지하는 비중은 대단히 높으며, 2008년 기준 총 해운 수입만도 366억 불에 달하여 그 비중과 중요도는 타 산업보다 비교하여 대단히 높다. 현재는 세계적인 경기 위기로

해운산업이 다소 어려움에 처해 있지만 머지않아 대형 국내 선사를 중심으로 국내 조선소와 함께 선대 확보로 세계 5위의 해운국으로 성장할 수 있는 잠재력이 크다. 장기적으로 보면 한국은 현재 많은 선박을 용선하고 있는 컨테이너 선박의 성장 잠재력이 가장 높으며 에너지 산업과 함께 가스운반선과 같은 고부가가치선 등도 기대할 수 있다.

본 연구는 현 정부의 녹색성장 방향에 따른 해운 및 조선산업의 장기적인 전략을 수립하기 위한 기초 자료로 국내 해운사가 보유하고 있는 국적선박을 기준으로 배출되는 GHG 인벤토리(Inventory)를 좀 더 과학적인 근거에 의해서 톱다운 방식에 의해서 작성하였다. 여기서 작성된 해운분야의 GHG 인벤토리는 앞으로 GHG감축을 위하여 에너지절약과 함께 효율적인 에너지 관리에 활용하고자 한다. 또한 IMO(국제해사기구)의 A이사국으로 IMO를 주축으로 한 UNFCCC(유엔기후협약)의 정책에 적극적으로 참여하고, IMO MEPC(해양환경 보호위원회)에 관련된 국내 정책 자료로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

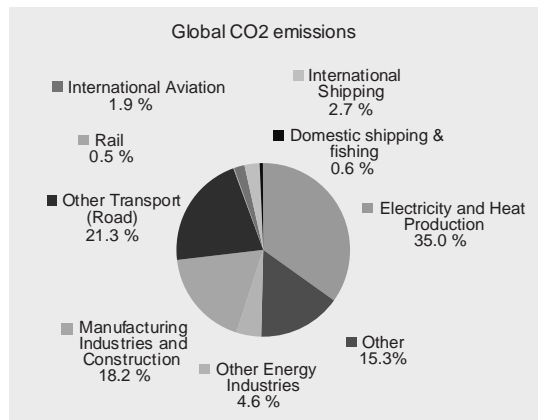


Fig. 1 각 산업 분야별 이산화탄소 배출량

Table 1 상위 10위까지 국가별 선박 보유량 (2008. 1.1 기준)

순위	국가	선박 수 (1,000톤 이상)	재화중량 (단위: 1,000ton)	비고
1	그리스	3,115	174,570	
2	일본	3,515	161,747	
3	독일	3,208	94,223	
4	중국	3,303	84,882	
5	노르웨이	1,827	46,872	
6	미국	1,769	39,828	
7	한국	1,140	37,704	
8	홍콩	657	33,424	
9	싱가포르	869	28,634	
10	덴마크	861	27,435	
누계	-	20,264 (전 세계 선박 의 55.80%)	635,190 (전 세계 선박 의 61.18%)	

2. IMO의 GHG 인벤토리 및 선박의 운송효율

IMO에서는 2000년에 처음으로 GHG 인벤토리 작업을 수행하였다.^[2] 이어 2차는 2008년 3월부터 2009년 7월에 걸쳐 선박에서 배출되는 이산화탄소를 포함한 그린하우스가스(GHG)에 대한 정확한 자료를 추정하기 위하여 노르웨이 마린텍(Marintek)를 주축으로 한 별도의 연구팀을 구성하여 선박에서 배출되는 GHG의 인벤토리 작업을 수행하였다. 그 결과로 IMO MEPC 58차에 1차 보고서^[3] 그리고 금년 IMO MEPC 59차 회의에 최종보고서^[4] 제출하였으며 Table 2는 1990년부터 2007년까지 배출된 GHG 및 다른 유해배출물을 보이며 2007년은 1990년 대비 87.5% 증가함을 보인다. 또한 세계 경제발전 속도에 따라 계속 증가할 것으로 예상되며, Fig. 2는 세계 경제성장

모델에 따라 2050년까지 선박에서 배출되는 이산화탄소량을 예측한 결과를 보인다. 특히, GHG 감축 정책이 부재할 경우 2050년에 가서는 2007년 대비 150~250%로 증가할 것으로 판단된다. 따라서 성장속도와 관계없이 이를 줄이기 위하여 기술적 그리고 선박의 운항과 관련된 대책을 동시에 시행하면 선종에 따라 다소 차이는 있지만 전체적으로 대략 25~75% 정도로 이산화탄소 배출량을 감축할 수 있을 것으로 평가하고 있다. 또한 추가적으로 GHG를 줄이기 위한 정책 중의 하나로 시장기반으로 한 조치는 높은 환경적인 효과와 함께 이산화탄소의 배출의 통제가 가능하며, 상당량은 육상에 다른 분야와 서로 상쇄할 수 있을 것으로 판단하고 있다.

최근 IMO는 신조선에서 EEDI(에너지 효율 설계 지수)를 강제적으로 제한하기 위한 규정작업을 서두르고 있으며 적용이 쉬운 컨테이너선, 탱커선 및 벌크운반선에 우선 적용하려고 하고 있다. 신조선에서 이를 적용할 경우 선박 설계단계로부터 에너지 효율을 검토함으로써 에너지 저감 효과가 높을 것으로 기대된다.

선박으로부터 배출된 이산화탄소가 기후변화에 미치는 영향을 검토하면 양(+)의 강제 복사력으로 작용하며 장기적으로 지구온난화에 기여하는 것으로 판단된다. 일부 학자들이 단기적으로 해운 산업이 전체적인 평균 강제복사력은 음(-)이고 냉각효과를 내포하고 있다고 주장하지만 지역적인 온도 반응과 기후변화의 다양성에 있어 그러하지 않다. 장기적인 측면에서 선박에서 유해배출물은 이산화탄소의 장기간에 걸친 효과가 어떤 단기적인 냉각효과를 압도함으로써 지구의 온난화를 초래하며, 2007년 기준 강제복사력(Radiative

forcing)은 49mW/m^2 이며 Fig. 4는 WRE 450과 WRE550에 대한 곡선에서 선박이 차지하는 이산화탄소의 배출량을 비교한 결과를 보인다. IMO는 선박이 가장 운송효율이 높은 수단에도 불구하고 이를 줄이기 위한 노력을 계속하고 있다.

Table 2 1990년~2007년 선박에서 배출된 총 그린하우스가스 배출량

(단위 : 백만톤)

Year	NOx	SOx	PM	CO	NMVOc	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
1990	14	7.9	1.0	1.3	0.4	562	0.05	0.01
1991	15	8.2	1.0	1.4	0.4	587	0.06	0.02
1992	15	8.4	1.0	1.4	0.5	598	0.06	0.02
1993	16	8.7	1.1	1.5	0.5	624	0.06	0.02
1994	16	9.0	1.1	1.5	0.5	644	0.06	0.02
1995	16	9.3	1.1	1.6	0.5	663	0.06	0.02
1996	17	9.5	1.2	1.6	0.5	679	0.07	0.02
1997	18	10	1.2	1.7	0.5	717	0.07	0.02
1998	18	10	1.2	1.7	0.5	709	0.07	0.02
1999	18	10	1.2	1.7	0.6	722	0.07	0.02
2000	19	11	1.3	1.8	0.6	778	0.07	0.02
2001	19	11	1.4	1.8	0.6	784	0.08	0.02
2002	19	11	1.4	1.9	0.6	794	0.08	0.02
2003	21	12	1.5	2.0	0.6	849	0.08	0.02
2004	22	13	1.6	2.1	0.7	907	0.09	0.02
2005	23	13	1.6	2.3	0.7	955	0.09	0.02
2006	24	14	1.7	2.4	0.8	1008	0.10	0.03
2007	25	15	1.8	2.5	0.8	1054	0.10	0.03

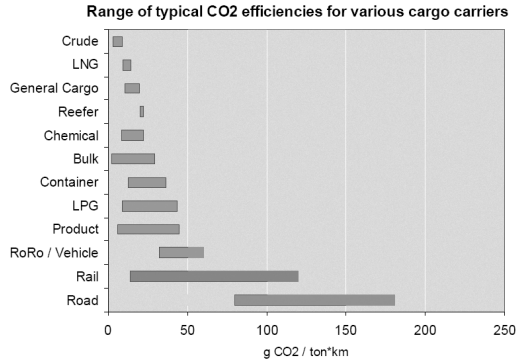


Fig. 3 기차 및 도로 운송과 비교한 선박의 이산화탄소의 효율 범위

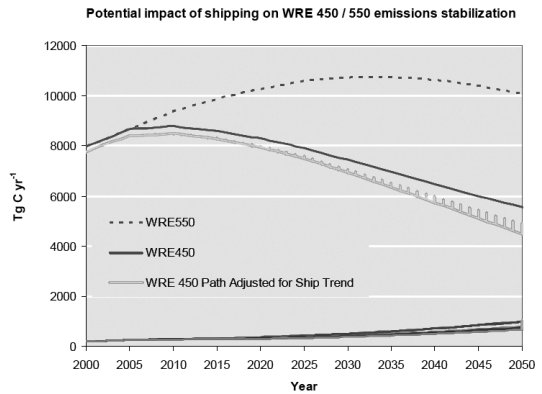


Fig. 4 WRE450와 WRE550 곡선에서 선박 기인 이산화탄소의 배출 비교

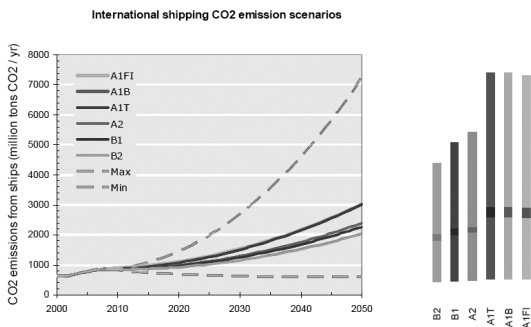


Fig. 2 2050년까지 경제성장 모델에 따른 선박분야의 이산화탄소 배출량예측

3. 국적선박의 GHG 인벤토리^[5]

이산화탄소의 배출량을 구하기 위해서는 Fig. 5에 보인 바와 같이 선박에 탑재된 주기관 및 발전기의 출력, 평균운전시간, 운전 시 평균 부하율, 단위출력당 평균연료소모량을 구하여 이들을 전부 곱하고 선박 및 선종별로 합산하면 총 연료소모량을 구할 수 있다.

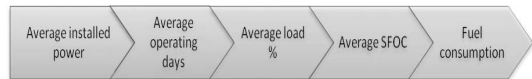


Fig. 5 연료사용총량계산 방법

원동기의 대부분은 디젤엔진으로 디젤엔진에 대한 연료 소모량은 Table 3과 같으며, 천연액화 운반선(LNG선)에서 원동기가 스팀터빈의 경우 LNG의 소모량은 320g/kW·hr로 조사되었다.

Table 3 선박용 디젤엔진의 연료소모량 [g/kW·hr]

Engine year	2 stroke low speed	4 stroke medium / high speed (> 5000kW)	4 stroke medium / high speed (1000~5000kW)	4 stroke medium / high speed (< 1000kW)
1970~1983	180~200	190~210	200~230	210~250
1984~2000	170~180	180~195	180~200	200~240
2001~present	165~175	175~185	180~200	190~230

본 연구에서는 앞에서 조사한 선상동력계수와 한국선급에서 제공한 데이터베이스 자료를 이용 선종별로 이산화탄소총량을 계산하여 보았다. Fig. 5를 이용하여 주기관에 의한 연간 총 사용연료량은 아래 식(1)에 의해서 계산할 수 있다.

$$TME_{fuelc} = MP_{inv} \cdot SN_{inv} \cdot MD_{avg} \cdot ML_{avg} \cdot MF_c \cdot 24/1000 \quad (\text{ton}) \quad (1)$$

여기서 MD_{avg} 는 선박의 연간 운항일이며 일반적으로 엔진제조사에 의한 설계 기준은 250일이며 선종, 해운경기, 국내선사의 영업 전략에 따라 다르게 수정 사용할 수 있다. ML_{avg} 는 주기관의 평균 사용 부하율이며, MF_c 는 시간당 주기관의 연료소모량(kg/kW·hr)이다. 또한, 발전기도 유사한 방법으로 계산할 수 있으며 정리하면 식(2)과 같다.

$$TAE_{fuelc} = AP_{inv} \cdot SN_{inv} \cdot AD_{avg} \cdot AL_{avg} \cdot AF_c \cdot 24/1000 \quad (\text{ton}) \quad (2)$$

여기서 AD_{avg} 는 발전기의 연간 운항일이며, 한 대를 기준으로 하기 때문에 통상 600일정도 된다. AL_{avg} 는 주기관의 평균 사용 부하율이며, AF_c 는 시간당 발전기의 연료소모량(kg/kW·hr)이다. 본 연구에서는 선주사는 한국이지만 다른 국적(예 : 파나마)을 가지고 있는 선박들을 고려해야하기 때문에 다음과 같은 수정 식을 사용할 수 있고 식 (3)은 매년 선복량 통계에 따라 국적 선박의 사용 연료량을 계산할 수 있다.

$$TME_{fuelc} = f_{cl} \cdot MP_{inv} \cdot SN_{inv} \cdot MD_{avg} \cdot ML_{avg} \cdot MF_c \cdot 24/1000 \quad (\text{ton}) \quad (3)$$

여기서 f_{cl} 은 $\frac{TDW_{unc}}{TDW_{inv}}$ 이며 주 기관과 발기기관의 평균동력은 데이터베이스를 이용한 결과와 후에서 언급한 이론상 계산한 결과를 서로 비교한 결과 이론계산이 높으며 원인은 최근 건조된 선박이 안전이 강화되고 선주가 약간 선속이 증가한 (약 0.5노트) 선박을 건조한 결과라고 볼 수 있다. 이러한 계산절차와 공식에 의해서 국적 건화물 운반선의 연료소모량을 계산한 결과를 Table 4에 보인다. 국적선에서 동일한 절차에 의해서 다른 선종의 연료소모량을 계산한 결과를 Table 5에 함께 보인다.

Table 4 국적 건화물운반선의 연료소모량 계산

한국 선급 조사	선박수(SN_{inv})	159 ships	비고
	총재화중량(TDW_{inv})	11,628,700 dwt	
	평균재화중량(DW_{inv})	73,136 dwt	
	주기관 평균출력(MP_{inv})	8,904 kW	
이론상 계산	발전기대당평균출력(AP_{inv})	535.6 kW	
	선박수(SH_{the})	?	
	총재화중량(TDW_{unc})	20,184,000 dwt	UNCTAD 자료
	평균재화중량(DW_{the})	73,136 dwt	
	주기관 평균출력(MP_{the})	10,673 kW	
발전기대당평균출력(AP_{the})	535.6 kW		

Table 5 국적 선사의 국외 운항선박의 연료량 추정

선종	연료소모량 (단위 천톤)	백분율 (%)	비고
건화물 운반선	2,351	30.0	
컨테이너선	1,734(+2,735)	22.1	(+용선)
일반화물선	747	9.5	
탱커선	1,576	20.1	
LNG선박	855	10.9	
기타	584	7.4	
합계	7,847(10,582)	100.0	(용선포함)

본 연구에서는 에너지 발생이나 연료소모량차원에서 중유(HFO)와 마린디젤오일(MDO)과 구분하지 않고 모두 중유라고 가정하고 계산하였다. 초기 계산에 있어 두 연료를 서로 구분을 두지 않을 경우 연료소모량과 이산화탄소의 배출은 크게 차이가 나지 않지만 황산화물은 현저하게 차이가 난다. Table 6은 Table 5를 참조하여 국외 항해 선박을 계산하였으며, 국내에서 운항하는 각종 선박은 한국선급과 선박안전기술공단의 데이터베이스를 이용하여 선박에서 사용하는 연료소모량을 평가하였으며 이를 Table 6에 보인다.

Table 6 국적 선사의 국내, 외 운항선박의 연료총량 추정

대분류	연료소모량 (단위 천톤)	백분율 (%)	비고
UNCTAD자료 (국외 운항선박)	7,847	74.1	
한국선급(국내운항선박)	1,020	9.6	
선박안전기술공단(국내)	1,128	10.6	
기타(레저포함)	600	5.7	추정
용선 (국외 운항선박)	2,735	-	
전체	10,595(13,330)	100	(용선포함)

Table 6으로부터 계산된 사용총량의 연료를 이용하여 GHG를 계산할 수 있다. 실제 IMO 통계에 따르면 중유와 마린 디젤 오일비는 77.5%, 마린 디젤오일은 22.5%이다. 이 값은 전 세계 통계값이고 한국은 비교적 유럽과 같이 연료유에 대한 규제가 엄격하지 않고 장거리운송이 우세하기 때문에 그 비를 각각 84%, 16% 그리고 저속 2행정 디젤엔진과 중, 고속디젤 엔진비를 80%, 20%로 하여 NOx를 검토하였으며 Table 7의 배출계수를 이용하여 계산된 GHG 및 다른 유해배출의 총량을 계산한 결과를 Table 8에 보인다. 이 표는 국적선사의 용선을 고려하지 않은 자료이지만 실제로 국적선사들이 IMF이후 컨테이너선을 대량으로 매각하고 재용선형식으로 빌려 쓰고 있다. 따라서 실제로 용선 선박은 아국에서 배출하고 연료비도 국적선사가 지출되기 때문에 사실상 총량에 포함하는 것이 합리적이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 통계에 대한 기본정책에 따라 공식적인 총량에 제외하였다. 단 (+)은 용선 선박에 해당되는 부분이다.

Table 7 단위연료량 유해 배출물 배출계수^[4]

Emission		Emission factor (kg emitted/ton of fuel)	Guideline reference
CO		7.4	CORINAIR**
NMVOC		2.4	CORINAIR
CH ₄		0.3	IPPC*** 2006/CORINAIR
N ₂ O		0.08	IPPC 2006/CORINAIR
CO ₂	Residual fuel oil	3130	IPPC 2006
	Marine diesel oil	3190	IPPC 2006
SO ₂	Residual fuel oil (2.7% S)	54	CORINAIR
	Marine diesel oil (0.5% S)	10	CORINAIR
NOx	Slow-speed diesel engines*	90 / 78 (85)	-
	Medium-speed diesel engines*	60 / 51 (56)	-
Boilers		7	-
PM10	Residual fuel oil	6.7	CORINAIR
	Marine diesel oil	1.1	CORINAIR

* NOx Emission factors : non-regulated / subject to IMO NOx regulation(2007 average emission factor)

** CORINAIR : CORE INventory of AIR emissions

*** IPPC : Intergovernmental Panel on Climate Change

Table 8 단위연료량 유해 배출물 총량

Emission		Emission factor (kg emitted/ton of fuel)	Total mount (thousand ton)
CO		7.4	78.40
NMVOC		2.4	25.43
CH ₄		0.3	3.18
N ₂ O		0.08	0.85
CO ₂	Residual fuel oil	3130	27,856.37(+8560.55)
	Marine diesel oil	3190	5407.69
SO ₂	Residual fuel oil (2.7% S)	54	480.59(+147.69)
	Marine diesel oil (0.5% S)	10	16.95
NOx	Slow-speed diesel engines*	90 / 78 (85)	720.46(+232.48)
	Medium-speed diesel engines*	60 / 51 (56)	118.66
	Boilers	7	-
PM10	Residual fuel oil	6.7	59.63
	Marine diesel oil	1.1	1.86

이상은 GHG 인벤토리를 계산하기 위하여 한국 선급과 선박안전기술공단 등록된 선박의 자료를 이용하였고 실제로 선박에 탑재되어 있는 주 기관과 발전기의 용량을 확인하기 어려울 경우도 있다. 따라서 임의의 선박에 대한 주 기관 발전기관의 탑재된 동력을 통계적인 방법에 의해서 조사를 하였으며 선박의 재화중량에 따라 설치된 주 기관과 발전기의 출력 값을 식 (4)와 같이 쓸 수 있다. Fig. 6, 7은 탱커선에 설치된 주 기관 및 발전기관의 엔진의 출력을 회귀분석한 결과로 조사대상의 선박은 최근 5년에 걸쳐 국내에서 건조한 선박의 자료를 이용하였다. VLCC를 포함하여 탱커선의 선속은 기존 선박과 비교하여 큰 차이를 보이지 않고 있어 인벤토리를 위한 통계 자료로 활용하여도 무난할 것으로 판단된다. Table 9, 10은 컨테이너 선과 벌크운반선 그리고 LNG선박에 대한 회귀분석 결과를 보인다. 특히 컨테이너 선박은 각 선사 영업 전략에 따라 초기 선박설계시 선속의 편차가 커서 결정계수가 매우 낮으나 분석 자료로 활용하여도 문제가 없을 것으로 판단된다. 그리고 앞으로 IMO에서 추진하고 있는 EEDI값을 강제규정으로

적용할 경우 컨테이너선도 탱커선과 유사하게 최대 선속은 선박의 재화중량에 따라 선사와 관계없이 선속이 유사할 것으로 판단된다. Table 9와 Table 10은 선박에 탑재된 주보기 자료가 없다할지라도 선종과 재화중량만으로도 선박의 노후화 계수개발과 함께 쉽게 인벤토리작업을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.^[5]

$$IPR(Installed Power Rate) = a \cdot b(Capacity)^c \quad (4)$$

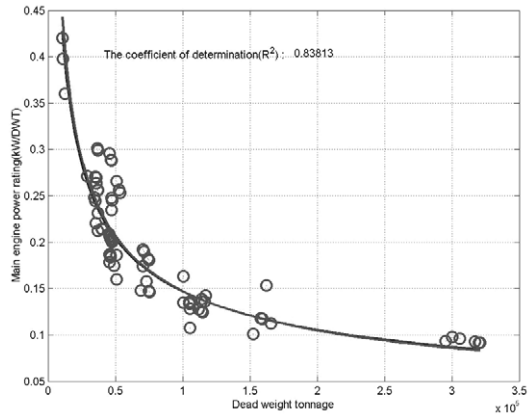


Fig. 6 탱커선에서 재화중량에 따른 주 기관 출력 분포

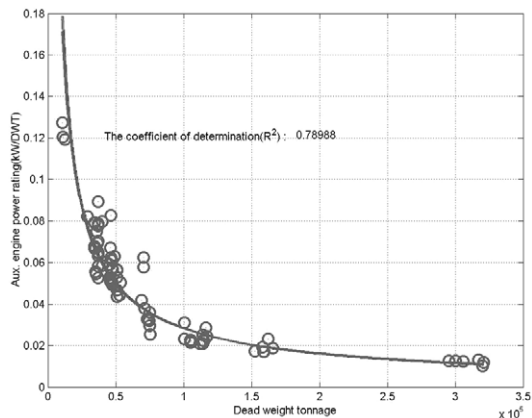


Fig. 7 탱커선에서 재화중량에 따른 발전기관 출력 분포

Table 9 선종별 탑재된 주기기관의 용량에 대한 곡선 계수

Ship	a	Capacity	c	Numbers of samples	R ²
Container ships	1.6098	DWT	0.0724	215	0.0283
Tanker	42.084	DWT	0.4912	483	0.8382
Bulk carrier	10.212	DWT	0.3793	26	0.9501
Gas tanker ¹	5072.0	M ³	0.0862	38	0.2614
Gas tanker ²	5.4517	M ³	0.2901	12	0.9080
Note : 1 Prime mover: steam turbine 2 Prime mover : Diesel engine					

Table 10 선종별 탑재된 발전기관의 용량에 대한 곡선 계수

Ship	a	Capacity	c	Numbers of samples	R ²
Container ships	4.4635	DWT	0.3171	215	0.2629
Tanker	291.56	DWT	0.8026	483	0.7899
Bulk carrier	114.3	DWT	0.7473	26	0.9064
Gas tanker ¹	31257	M ³	1.180	38	0.2973
Gas tanker ²	0.0196	M ³	-0.179	12	0.1794
Note : 1 Prime mover: steam turbine 2 Prime mover : Diesel engine					

4. GHG저감방법과 장기대책

선박으로부터 지금까지 잘 알려진 기술과 이의 실행을 통해서 이산화탄소의 잠재적 감축에 대한 평가 결과를 Table 11에 보인다. ① 선박의 저항은 Fig. 8에 보인 바와 같이 마찰, 조파, 와류 및 공기 저항으로 구분할 수 있으며⁶⁾ 속도가 낮은 선박일수록 선체표면에 의한 마찰저항의 영향력이 커

진다. 일반적으로 선박에 소요되는 주기기관의 동력은 식 (5)와 같고 소요되는 동력은 엔진속도의 3승, 그리고 배수량의 2/3승에 비례하므로 운송효율은 속도를 줄인 만큼 제곱에 반비례하여 연료를 절약할 수 있다.⁷⁾

$$Power = Coefficient \times (Speed)^3 \times (Displacement)^{2/3} \quad (5)$$

따라서, 선박설계에서 선박의 개념, 속도 및 용적을 최적화하면 이산화탄소를 줄일 수 있는 잠재력이 크며 IMO에서는 이를 실현할 목적으로 EEDI를 강제규정으로 적용하려고 하고 있다. 특히, 컨테이너 선박은 선속을 낮출 수 있는 여력이 아직도 크며 만약 종전 최대 선속이 25노트로 설계된 선박을 22노트로 설계할 경우 29%의 연료절약과 함께 이산화탄소를 그 만큼 저감할 수 있다. ② 선체와 상부 구조물에서 유체의 저항을 줄이기 위하여 선형과 상부 구조에서 공기저항을 최소화하여 소요되는 동력을 최적화 할 수 있는 잠재력이 있으며, 선형설계의 전문가들의 의견에 의하면 2020년까지 약 5% 개선을 목표로 연구를 수행하고 있다. ③ 원동기와 추진시스템에서 Fig. 9와 같이 폐열 회수시스템을 적용할 경우 10% 정도의 열효율개선 효과가 있다. 디젤엔진도 2020년까지 약 5% 열효율 개선목표를 가지고 선박용 디젤엔진 제작사들이 연구에 임하고 있다. ④ 최근 친환경연료인 LNG를 사용한 이중 연료엔진들이 개발되고 있으며, 일반 중유와 해상용 디젤오일보다 이산화탄소배출계수가 낮아(85~90%) 이산화탄소의 배출을 줄일 수 있다. 이러한 LNG를 연료유로 사용하는 이중연료엔진은 LNG 내 황의 성분은 거의 없고 저속2행정디젤엔진에 비하여 NO_x도 85%까지 줄일 수 있어 청정 연료로 2016년부터 적용되는 Tier 3에서 ECA (Emission Control Area)를 만족할 수 있다. ⑤ 재생

에너지로 식물성 바이오 연료를 검토하고 있으며 일부 육상에 발전용으로 적용하고 있으며, 연료 내 글리세린과 같은 고형성분이 많아 연료 공급시스템의 파이프라인에서 막힘 현상이 자주 일어나고 있어 사용상 주의가 필요하다. ⑥ 선박에서는 이산화탄소의 포집이나 다른 재처리 흡수공정은 선박의 특성상 실현 가능성이 희박하다. 이상은 선박의 설계단계에서 검토할 수 있는 이산화탄소 저감방법이며 IMO에서는 이를 줄이기 위하여 EEDI를 강제적용하려고 하고 있다.

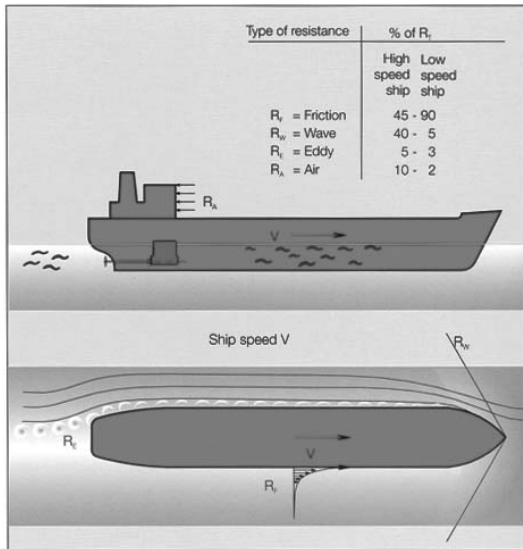


Fig. 8 선박의 전체 예인 저항

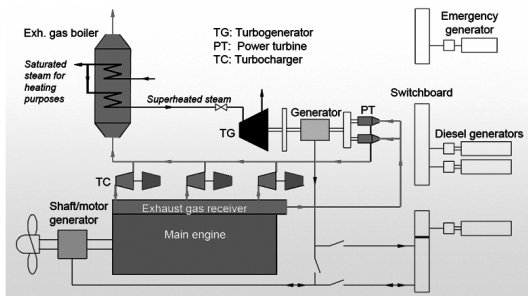


Fig. 9 주기관의 배기가스를 이용한 폐열회수 시스템에 대한 개략도

선박운항과 관련하여 IMO에서는 선박의 운송 효율을 평가하기 위하여 식 (6)과 같이 2005년 EEOI(에너지 효율운전지수 : 당시는 이산화탄소 인덱싱)을 개발하여^[8~9] 2005년부터 3년간 기초 조사를 하였고 선박별로 가이드라인을 설정하려고 하고 있다.

$$Index = \frac{\sum_i FC_i \times C_{Carbon\ i}}{\sum_i m_{cargo\ i} \times D_i} \quad \text{gramm CO}_2/ \quad (6)$$

여기서, FC_i 는 사용연료량, $C_{Carbon\ i}$ 는 연료 내 탄소함량, $m_{cargo\ i}$ 는 적재화물량, D_i 는 화물의 운송 거리이다. 이 EEOI값을 보면 원동기 및 선박의 성능에 대한 규제보다는 경제적인 선속을 유지하면서 화물을 가능한 많이 적재하여 운송효율을 증가시키고 불필요한 속도증가와 운항을 줄이는데 그 목적이 있다. ⑦ 선박의 운항과 관련해서는 해운상의 선대관리, 영업 전략에 따라 가능한 화물을 많이 싣고 불필요한 운항을 피하고 기항지 축소와 함께 선속의 감소 등으로 이산화탄소를 크게 감축할 수 있을 것으로 기대한다. ⑧ 선박의 항로 최적화를 통해서 이산화탄소를 감축할 수 있으며, 새로 건설되는 파나마 운하와 새로 개척될 북극 항로도 해운산업에 상당한 영향을 미칠 것으로 기대된다. ⑨ 선박에서 에너지관리도 중요한 이슈로 부각되고 있으며 'Energy Efficiency and Fuel Management'와 SEMP(Ship Efficiency Management Plan)에 따라 에너지관리를 철저히 하여 이산화탄소 배출을 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

Table 11 선박으로부터 알려진 기술과 실천을 통해서 이산화탄소 감축에 대한 잠재력 평가

Design(New Ship)	Saving of CO ₂ /ton-mile	Combined	Combined
① Concept, speed and capability	2% to 50%*	10% to 50%*	25% to 75%*
② Hull and superstructure	2% to 20%*		
③ Power and Propulsion systems	5% to 15%*		
④ Low-carbon fuels	5% to 15%*		
⑤ Renewable energy	1% to 10%*		
⑥ Exhaust gas CO ₂ reduction	0%	10% to 50%*	
Operation(All ships)			
⑦ Fleet management, logistics and incentives	5% to 50%*		
⑧ Voyage optimization	1% to 10%*		
⑨ Energy management	1% to 10%*		

5. 결 론

지구 온난화 속도를 줄이고 억제하기 위하여 모든 국가들이 현재 각기 다른 분야와 영역에서 GHG감축을 위한 많은 노력을 기울이고 있다. 이 GHG중 이산화탄소가 차지하는 영향력은 절대적이며^[10] 선박에서도 2007년을 기점으로 처음으로 전 10억톤을 넘어섰으며 이는 전 세계적으로 배출한 총량 대비 약3.3%이며 순수하게 수송 분야만을 고려하면 10%를 초과하고 있다. 그리고 해운산업에서 배출되는 이산화탄소의 배출량도 계속 증가 추세에 있고 무시할 수 없는 수준에 도달하였다.

본 연구는 국적 선사의 이산화탄소배출량을 좀 더 정확하고 과학적인 방법인 톱다운 방식으로 평가하여 보았다. 그 결과 국적 선박에서 배출되는 (2007년도 기준) 이산화탄소량은 약 3천 3백만톤 정도이며 용선까지 합할 경우 4천2백만톤 정도 추산되었다. 이외에도 NO_x, SO_x 및 PM과 같은 유배 배출물을 정량적으로 평가하였으며 이 자료는 앞으로 국가정책과 한국 해운산업의 장기적인 발전 전략에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) United nations conference on trade and development Secretariat, Review of maritime transport 2008, United Nations New York and Geneva, 2009
- (2) IMO MEPC45/8, "Report on the outcome IMO Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships submitted by Secretariat", 2000
- (3) IMO MEPC58/INF.6, "Update 2000 Study on Greenhouse Gas Emissions from Ships (Phase 1 report) submitted by Secretariat", 2000
- (4) IMO MEPC59/INF.10, "Second IMO GHG Study 2009 Update of the 2000 IMO GHG Study(Final report covering Phase 1 and Phase 2) submitted by Secretariat", 2000
- (5) 목포해양대학교, 한국선급, 선박안전기술공단, 부경대학교, 선박으로 인한 대기오염관련 국제 협약 대응전략 개발(4), 국토해양부, 2009년 5월
- (6) MAN B&W Diesel, Basic principles of ship 5510-0004-00ppr Jan. 2006
- (7) 전효중, 이돈출, 선박용디젤엔진 및 가스터빈, 동명사, 2005
- (8) IMO, MEPC53/WP.11, "Prevention of Air Pollution from Ships", 2005
- (9) IMO, IMO MEPC55/4/8, "Information about indexing trials according to the Interim Guidelines for Voluntary Ship CO₂ Emission Indexing", 2006
- (10) Bert metz et. al., Climate change 2007 mitigation of climate change, 2007, Cam-bridge university press.

이 논문은 국토해양부에서 지원하는 "선박으로 인한 대기오염관련 국제협약 대응전략개발"의 연구결과중 일부임을 밝힙니다.