

상향식 모형을 이용한 국내 조선업의 온실가스 배출 분석*

백천현** · 김후곤*** · 김영진**** · †정용주*****

A Bottom-up Approach for Greenhouse Gas Emission Analysis of Korean Shipbuilding Industry

Chunhyun Paik** · Hugon Kim*** · Young Jin Kim**** · †Yongjoo Chung*****

■ Abstract ■

This study presents a bottom-up approach for analyzing greenhouse gas (GHG) emissions for the shipbuilding industry in Korea. The overall procedures for deriving GHG emissions from the Korean shipbuilding industry are presented. Based on the long-term forecast on energy demands of the Korean shipbuilding industry, reference energy system (RES) and energy balance (EB) for the shipbuilding process are derived for bottom-up modeling.

Keywords : Climate Change, Greenhouse Gas Emissions, Bottom-up Approach, Shipbuilding Industry, Optimization

1. 서 론

2011년 12월 남아공 더반에서 개최된 제17차 유엔 기후변화협약 당사국총회(COP17)에서는 2020년 이

후 미국, 중국, 인도 등 모든 당사국이 참여하는 새로운 단일 기후변화체제(더반플랫폼) 설립에 합의했다. 이에 따라 2012년부터 새로운 기후변화체제를 위한 협상이 2015년 타결을 목표로 개시되었다.

논문접수일 : 2014년 02월 10일 논문게재확정일 : 2014년 03월 19일

논문수정일 : 2014년 03월 19일

* 본 연구는 환경부 “2013년 기후변화대응 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임.

** 동의대학교 공과대학 산업경영공학과

*** 경성대학교 경영정보학과

**** 부경대학교 시스템경영공학부

***** 부산외국어대학교 e-비즈니스학과

† 교신저자, chungyj@pufs.ac.kr

한편 2009년 대한민국 정부는 2020년의 온실가스 배출량을 배출전망치(BAU; business as usual) 대비 30% 감축하는 국가 온실가스 감축목표를 발표하고 이듬해에는 저탄소 녹색성장 기본법을 제정하였다. 2011년에는 산업, 전환, 건물, 교통, 농축산 등 세부 업종별로 구체화한 감축목표안을 마련하였다. 이 목표안에 따르면 2020년 조선업의 배출량 및 감축량은 각각 370만 톤, 25만 톤 CO₂e¹⁾으로써 감축 비율은 6.7%이다. 조선업의 경제규모를 고려할 때 상대적으로 배출량도 적고 감축비율도 낮은 편이다. 선박의 평생 이산화탄소 배출량(life-cycle assessment)은 높은 것으로 보고되고 있지만 이는 조선의 전후방 업종인 철강과 해운부문에서의 온실가스 고배출에 기인한 것으로 분석되고 있다[11-13]. 실제로 클락슨 보고서에 따르면 2010년의 국내 조선업의 수주금액이 35억 불인데 반해 이산화탄소 배출량은 약 220만 톤 밖에 되지 않는 것으로 집계되었다[8].

조선업은 우리나라의 대표적 수출주력산업으로 외화획득과 고용창출에 있어 대표적 효자산업이자 국가경제의 주력 기간산업이다. 본 연구에서는 상향식 모형인 MESSAGE(Model for Energy Supply's Strategy Alternatives and General Environmental effect)²⁾을 이용하여 조선업의 온실가스 배출량과 감축잠재량을 분석하였다. 정유, 시멘트, 철강 등의 온실가스 고배출 업종에 대해서는 상향식 기법을 이용한 많은 연구들이 있었지만 조선업을 대상으로 한 연구는 찾아보기 어렵다. 이는 조선업의 배출량

이 상대적으로 적고 대부분의 국가에서 조선업의 비중이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구는 상향식 접근법을 이용하여 조선업의 온실가스 배출량을 분석한 선구자적인 시도으로써 의미가 있으며 연구 결과는 업종별 목표관리 등을 위한 기초자료로 활용될 수 있다. 또한 경영과학의 한 도구인 최적화기법을 기반으로 하는 상향식 모형을 조선부문에 적용하여 조선부문의 온실가스 배출량 및 감축잠재량을 분석함으로써 경영과학의 현실문제 응용가능성을 증명하였다.

먼저 상향식 모형을 이용하여 온실가스 배출량과 감축잠재량을 분석하는 일반적인 절차를 소개한다. 이 절차에 따라 먼저 조선업의 수요(최종산출물) 및 기준에너지 시스템(RES; reference energy system)을 정의하고 에너지 사용 및 온실가스 배출의 관점에서 선박을 제조하기 위한 공정을 분류하였다. 예측모형을 통하여 조선업의 중장기 수요를 예측하고 각 공정별로 단위 산출물에 사용되는 에너지의 양(즉, 에너지 원단위)을 도출하였다. 최종적으로 에너지 사용량 및 배출량에 대한 BAU를 구하고 조선업에 접목될 수 있는 신기술을 적용함으로써 감축가능한 감축잠재량을 분석하였다.

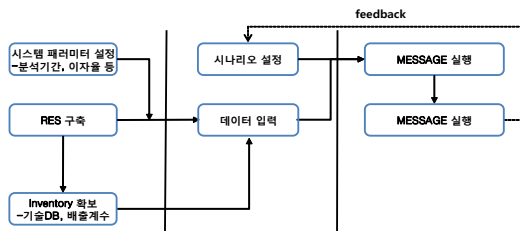
2. 상향식 모형을 통한 온실가스 감축잠재량 분석 절차

최적화 이론에 바탕을 둔 상향식 모형을 이용한 에너지 시스템의 분석 절차는 <그림 1>과 같다. 먼저 대상으로 하는 에너지 시스템의 RES를 구축한다. RES는 최종 수요를 만족시키기 위하여 필요한 공정(process, technology) 들을 정의하고 공정간 에너지 및 물질의 흐름을 효과적으로 보여주기 위한 네트워크 표현 방법으로써[10], 모형 전체의 방향을 결정짓는 핵심적인 부분이다. RES를 구축하기 위해서는 먼저 대상 시스템(국가 또는 특정 업종)을 대표할 수 있는 최종 산출물(수요)을 정의하

1) 온실가스 배출량은 모든 종류의 온실가스를 이산화탄소 배출량으로 환산한 CO₂e(CO₂ equivalent) 단위로 나타낸다.

2) MESSAGE는 비용을 최소화하는 기술조합을 도출하는 기술 중심의 상향식 최적화 모형의 대표적인 예이다. 1970년대 오스트리아에 소재한 국제 연구소인 IIASA(International Institute for Applied Systems Analysis)에서 개발되었으며 2000년대에는 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA) 주도하에 새로운 기능이 추가되고 사용자 인터페이스를 강화한 새로운 버전이 개발되어 보급되고 있다.

고 이러한 최종 산출물을 생산하기 위한 공정들을 정의하여야 한다. 최종 산출물은 실제 생산되는 제품일 수도 있고 개념적인 서비스가 될 수도 있다. <그림 3>은 본 연구에서 제시하는 조선업에 대한 RES로써 선박 건조량을 최종 산출물로 정의하고 있으며 선박 건조공정을 8개의 세부공정으로 분류하였다.



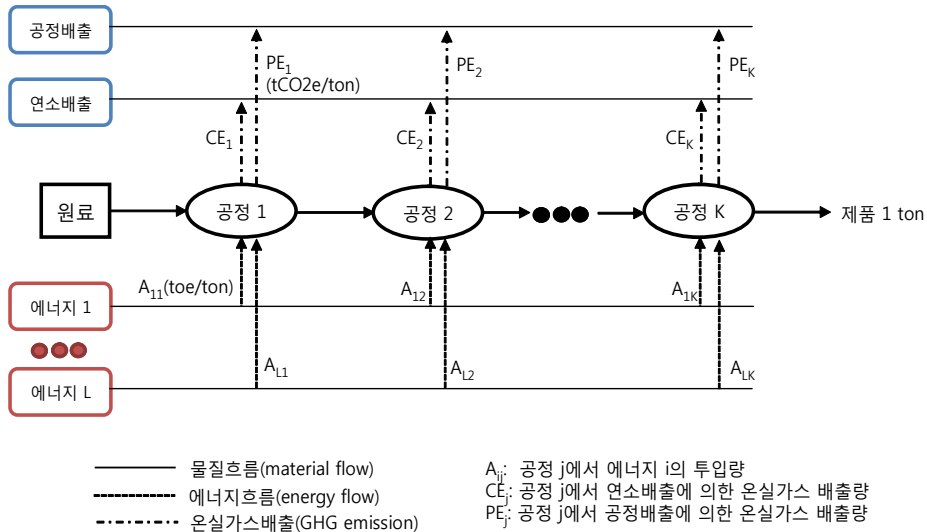
<그림 1> 상향식 모형의 일반적인 절차

RES가 확정되고 모형에 필요한 기타 정보(분석 기간, 분석기간 동안의 최종수요, 배출계수, 기술 DB 등)가 확보되면 모형에서 제공하는 인터페이스를 통하여 데이터를 입력하게 된다. 또한 BAU를 포함한 각종 감축 시나리오들을 정의하고 이를 입력한다. 일반적으로 감축 시나리오는 기술발전이 따

른 기술의 효율향상(예를 들어 에너지 소모량이 적은 도색기술의 발전), 기존 기술을 대체하는 신기술 등장(예를 들어 새로운 온실가스배출이 적은 도색 기술의 도입), 시장 점유율 변화 등으로 표현된다. 또한 온실가스 배출량에 대한 제약, 온실가스 배출량에 대한 페널티 등이 추가적으로 도입될 수도 있다.

특정 시나리오는 선형계획법(LP), 정수계획법(IP) 등 비용최소화를 목적함수로 하는 하나의 수리적 문제로 표현된다. 상향식 모형은 일반적으로 cplex, glpk 등의 최적화 툴을 이용하여 문제에 대한 최적해를 구하고 최종적인 결과는 시나리오별 최적해를 비교분석함으로써 구해지게 된다. 즉 최적해로부터 구해지는 최적기술조합, 비용 등의 결과는 시나리오에 따라 변하는데 시나리오간 이들 결과들을 비교함으로써 감축 시나리오의 온실가스 감축량, 감축비용 등 시나리오를 평가할 수 있는 정보들을 구할 수 있게 된다.

상향식 모형은 <그림 2>와 같이 공정단위의 분석체계를 적용한다. 공정단위 분석체계에서는 특정 산업분야의 제품 한 단위를 생산하는데 관계되는 공정을 단계별로 구분하고, 각 공정에 투입되는 물



————— 물질흐름(material flow)
 - - - - - 에너지흐름(energy flow)
 ······· 온실가스배출(GHG emission)

A_{ij} : 공정 j에서 에너지 i의 투입량
 CE_j : 공정 j에서 연소배출에 의한 온실가스 배출량
 PE_j : 공정 j에서 공정배출에 의한 온실가스 배출량

<그림 2> 온실가스 배출 산정을 위한 공정단위 분석

질(material) 및 에너지의 종류 및 양을 구한다. 각 공정에서 사용하는 에너지의 양³⁾에 배출계수를 곱함으로써 연소배출(CE; combustion emission)에 의한 온실가스 배출량이 계산된다. 한편 공정배출(PE; process emission)은 에너지연소가 아니라 투입되는 원료물질이 공정에 투입되어 변환되는 과정에서 수반되는 화학작용에 의해 배출되는 것으로 공정배출을 유발하는 원료물질의 종류 및 양에 의해 결정된다. 조선업에서는 연소배출이 배출량의 대부분을 차지하고 있다.

3. 조선업의 상향식 모형

3.1 최종산출물(수요)

앞서 살펴 바와 같이 조선업 부분을 상향식 모형으로 분석하기 위해서는 조선업을 대표하는 최종산출물을 정의해야 한다. 본 연구에서는 CGT(compensated gross tonnage)를 조선업 산출물의 단위로 정하였다. 이는 CGT가 OECD가 지정한 선박의 생산량에 대한 표준 단위로서 대부분의 국가에서 CGT 단위로 선박생산량을 발표하고 있으며 또한 선박을 생산하기 위해 필요한 작업량을 반영하고 있기 때문이다.

본 연구에서는 시계열 예측, 회귀분석 및 인공신경망 등 세 가지 방법으로 건조량을 예측하였다. 예측에는 1990년부터 2011년까지의 건조량 실측치가 사용되었고 본 연구의 분석기간인 2012년부터 2035년까지의 예측치를 구하였다. <그림 5>에서 건조량은 시계열 예측모형 중의 하나인 ARIMA(autoregressive integrated moving average)를 이용한 건조량에 대한 예측을 나타낸다. 회귀분석은 GDP, 업종별 산출액 및 부가가치액

을 설명변수로 이용한 회귀방정식이 적합도가 높았다. ARIMA 모형과 회귀분석을 적용한 결과는 2020년 정도까지의 단기 전망치에 있어서는 거의 유사한 결과를 보였다. 한편 회귀분석과 ARIMA 모형 이외에도 인공신경망(artificial neural network)을 적용하였는데 회귀분석이나 ARIMA 모형과보다 최종 수요를 다소 낮게 예측하였다.

3.2 선박제조 공정 및 RES

다음으로 선박제조 과정에서 시행되는 작업을 분석하였다. 먼저 본 연구에서는 에너지가 사용되지 않거나 너무 상세한 공정은 배제하여 전체 공정을 단순화하였다. 사용하는 에너지 및 공정의 특징에 따라 조선업의 제조 공정을 절단(cutting), 곡가공(plate forming), 조립(또는 용접), 크레인(crane), 콤프레서(compressor), 시운전 등 총 6개의 세부공정으로 분류하였다. 절단, 곡가공, 용접(조립)은 강재가공 및 조립과 관련된 공정이고 크레인은 구조물의 이동, 콤프레서는 주로 도장과 관련된 공정이다. 시운전은 선박의 기능 시험과 관련된 공정이다.

절단은 기계적인 힘이 아닌 열에너지를 이용하여 금속을 국부적으로 용융시킴으로써 여러 가지 재질의 금속을 원하는 크기의 형상으로 자르는 작업이며 금속의 산화반응을 이용한 산소가스 절단, 플라즈마(plasma) 절단 등이 있다. 곡가공 공정은 절단되어진 철판으로 선수와 선미 등의 3차원의 곡 형상을 하고 있는 부분을 만들 때 사용된다.

선박을 구성하는 크고 작은 블록들을 조립하는 과정에는 CO₂ 보호가스 용접, TIG(tungsten inter-gas) 용접 등의 용접기술이 사용된다. 특히 CO₂ 보호가스 용접이 가장 많이 사용되는데 이는 전기를 주 에너지로 하며 CO₂를 보호가스로 사용하여 공기중에 CO₂를 직접 배출한다.

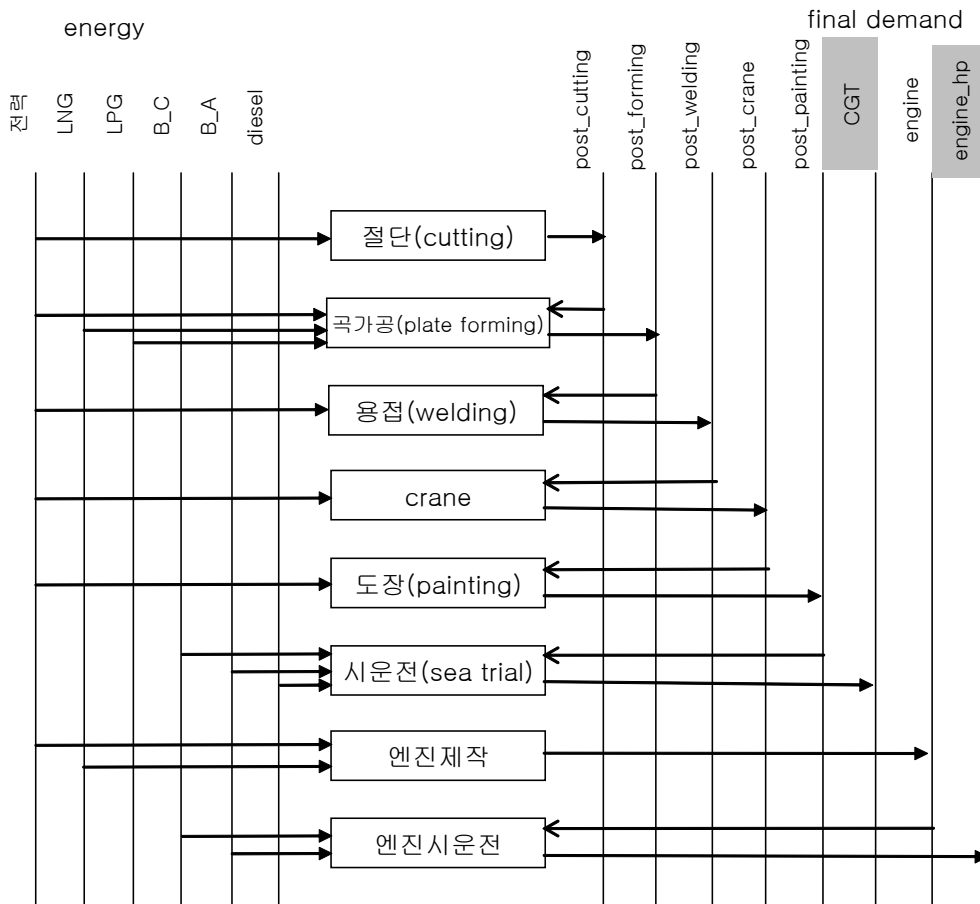
크레인은 조선소의 상징적인 장치로서 전기를

3) 에너지 사용량은 석유환산톤(tonne of equivalent; TOE)으로 표기된다. TOE는 국제 에너지기구(international energy agency; IEA)에서 정한 에너지단위로써 1톤의 원유를 연소할 때 발생하는 에너지, 즉 107Kcal의 발열량을 의미한다.

주 에너지원으로 하여 조선소 내에서 부품, 블록 등 선박 제조과정에서 필요한 이동활동의 대부분을 담당하고 있다. 콤프레서(공기압축기)는 공기를 압축기(공기충전기)로 압축하여 압축탱크에 일정량을 충전하는 기기를 일컬으며 선박제조과정에서 공기압축기는 도장용으로 주로 사용된다. 시운전은 선박을 완성한 후 실제로 선박을 운행하면서 시행하는 해상시운전(sea trial)뿐만 아니라 선박이 완성되기 전에 조선소 구내 안벽에 계류한 상태에서 주기관 및 기타 장비들의 성능을 검증하기 위하여 실시되는 계류시운전을 포함한다.

위의 세부공정을 바탕으로 본 연구에서 작성한 조선업의 RES는 <그림 3>와 같다. 첫 번째 에너지 레벨은 각 세부공정에서 사용하는 전기, LNG 등의 에너지원을 나타낸다. 즉, 절단, 용접, 크레인, 콤프레서 공정은 전력을 에너지원으로 하고 있으며, 곡가공 공정은 전력 외에도 LNG와 LPG를 사용하고 있다. 각 세부공정은 가상의 산출물을 생산하는데 공정이름 앞에 ‘post_’를 붙여 표시하였다. 예를 들어, 절단(cutting)의 산출물은 ‘post_cutting’이며 이의 단위도 CGT 톤이다.

그림에서 절단의 산출물이 곡가공의 입력물로



<그림 3> 조선업의 RES

사용되고 있다. 이는 건조량을 생산하기 위한 과정으로 (절단)→(곡가공)→(용접)→(크레인)→(컴프레서)→(시운전)의 과정을 순차적으로 거치는 것을 의미한다. 실제로는 이 세부공정들이 항상 순차적으로 이루어지는 것은 아니지만 이 모든 공정을 거쳐야 선박이 완성되기 때문에 편의상 순차적인 과정으로 나타내었다. 엔진은 (엔진제조)→(엔진 시운전)의 과정을 거쳐 하나의 엔진이 완성되는 것으로 가정하였다. 실제로는 엔진제조는 주조, 단조 등의 복잡한 과정을 거치겠지만 세부 과정에 대한 정보가 없기 때문에 하나의 통합된 공정으로 묶었다.

3.3 공정별 에너지 원단위

기존 문헌[12, 13] 및 국내 발표 자료를 바탕으로 구한 선박 1 CGT를 생산하는데 사용되는 공정별 총 에너지 원단위는 <표 2>와 같다. 에너지원별 상세 에너지 원단위는 생략하였다. 국내 발표 자료는 총 건조량과 에너지 종류별 총 사용 에너지만 공개하고 있으며 기존 문헌[12, 13]은 예제를 통하여 선박을 제조하는 공정별 에너지 분포를 분석하고 있다. <표 2>는 두 연구자료를 취합하고 분석하여 구한 결과이다. 표에서 1 CGT의 선박을 건조하는데 절단공정에서 0.0045 TOE가, 곡가공 공정에서 0.0069 TOE가 소비된다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 1 CGT의 선박을 건조하는데 절단에서 시운전까지의 6개 공정에 총 0.03521의 에너지가 소비되고 한 대의 엔진당 3.5959 TOE 에너지가 사용된다. 엔진제조를 제외한 6개의 제조공정 중에서 35%의 에너

지를 사용하는 시운전이 가장 많이 에너지를 소비하고 있으며 크레인 공정에 가장 적은 에너지가 소비되고 있다.

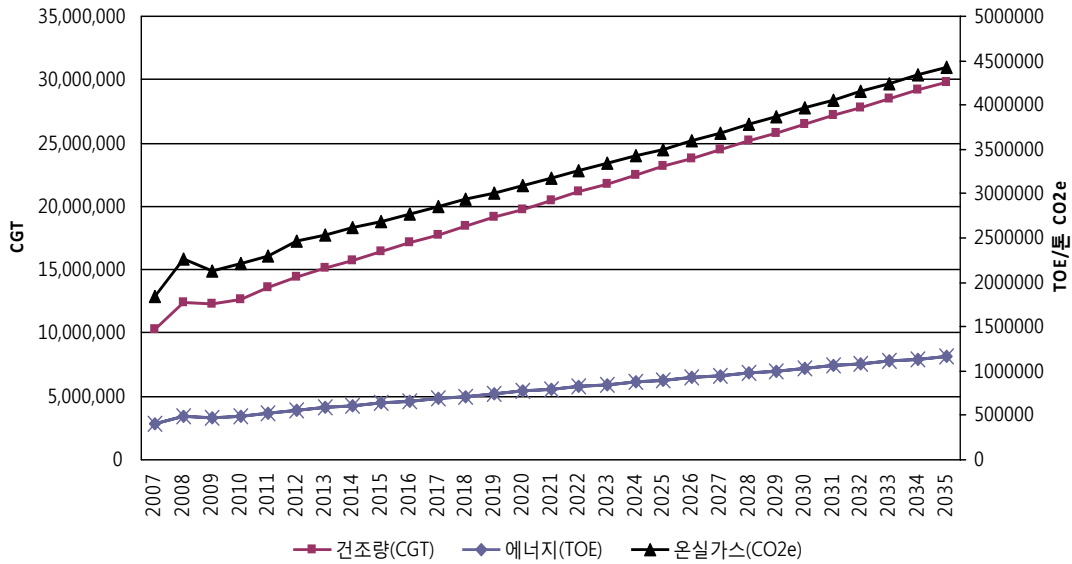
4. 온실가스 배출량 및 감축잠재량 분석

BAU 시나리오에서 선박건조량, 에너지 사용량 및 온실가스 배출량은 <그림 5>과 같다. 건조량의 증가와 비례하여 에너지 사용량과 온실가스 배출량이 증가함을 확인할 수 있다. 2020년 조선업의 BAU 에너지 사용량 및 이산화탄소 배출량은 각각 77만 TOE, 3100만톤 CO_{2e} 정도인 것으로 분석되었다.

감축 잠재량을 구하기 위하여 조선업에 적용될 수 있는 신기술을 정리하였다. 본 연구에서는 크레인에 적용되는 회생제동 시스템(regenerative braking system), 공기압축기에 적용될 수 있는 에너지관리 시스템(EMS; energy management system) 그리고 조립과정에 사용되는 마찰용접(friction welding)을 신기술로 채택하였다[4, 5, 9]. 참고문헌[4, 5, 9] 및 전문가 자문을 통하여 세 감축기술의 에너지절감 효과를 각각 30%, 6%, 90%로 설정하였을 때 <표 2>는 세 기술의 보급률 가정과 CO₂ 감축비율을 나타낸다. 감축률이 전반적으로 낮은 이유는 세 공정에서 사용하는 에너지 사용비율이 낮고 보급률에도 한계가 있기 때문이다. 결론적으로 조선업에서 에너지 사용 및 배출량을 줄일 수 있는 여지가 낮은 것으로 판단된다. 결국 시운전과정에서 사용되는 에너지를 줄여야만 감축량을 높일 수 있는데 이

<표 1> 2007년~2011년 평균 에너지 원단위

공정	절단	곡가공	용접	크레인	컴프레서	시운전	엔진제조	엔진시운전
단위	TOE/CGT						TOE/대	
공정별 단위 에너지	0.0045	0.0069	0.0034	0.0016	0.0059	0.0130	2.3410	1.2549
비율(%)	13	20	10	5	18	35		



〈그림 4〉 BAU 건조량/에너지/온실가스

〈표 10〉 감축기술의 보급률/감축량/감축비용

		2010	2015	2020	2025	2030	2035
보급률 (%)	회생제동	0	3	5	8	10	15
	EMS	0	5	10	20	30	40
	마찰용접	0	3	5	8	10	15
감축량(톤CO ₂ e)		0	6,687	13,094	24,164	34,010	54,369
감축율(%)		0	1	1	1	1	2

에 대한 아직 획기적인 방법이 개발되지 않은 것으로 조사되었다.

5. 결 론

본 연구는 상향식 모형을 이용하여 조선업의 온실가스 감축 잠재량을 분석한 선구적인 시도으로써 의미가 있다. 조선업의 최종수요, RES, 공정 입출력 요소 등을 정의하고 국내 통계데이터를 분석하여 상향식 모형에 필요한 데이터를 도출하였다. MES-SAGE 분석 모형을 사용하여 BAU 시나리오에서 연도별 건조량, 에너지 사용량, 온실가스 배출량을 구하고 세 가지의 감축기술을 도입하였을 때의 감축잠재량을 분석하였다. 분석결과 현재수준에서 조

선업에서 도입할 수 있는 감축기술로 절감할 수 있는 온실가스 배출량은 극히 미미한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 감축기술의 설치 및 운용에 대한 비용 데이터를 확보하기 어려워 감축비용을 분석하지 못하였는데 이에 대한 데이터가 확보 되는대로 감축비용에 대한 연구가 진행될 예정이다.

참고문헌

- [1] 박성재 외 3인, 「조선산업 신성장 동력확보 및 일자리 창출을 위한 해양플랜트 산업 활성화 방안」, 한국노동연구원, 2011.
- [2] 成瀬 健 등, 「造船所におけるインベントリー分析」, 선박기술연구소 연구발표회(일본), 1999.

- [3] 신혜성, 「국내 조선업 중장기 전망과 시사점, 산업이슈」, 한국산업은행, 2012.
- [4] 에너지관리뉴스(<http://www.emsnews.co.kr>).
- [5] 취재글, 「2009년 국내 마찰 용접 기술의 현황과 전망은?」, 메탈넷코리아(월간 용접저널), 2009.
- [6] 통계청(<http://www.index.go.kr>).
- [7] 한국조선해양플랜트협회(<http://www.koshi-pa.or.kr>).
- [8] <http://www.clarksons.com>.
- [9] <http://www.tptc.co.jp>.
- [10] IAEA, *MESSAGE User Manual*, 2008.
- [11] Jivén Karl et al., *LCA Ship-Design tool for energy efficient ships, A Life Cycle Analysis Program for Ships, Final Report*, 2004.
- [12] Kameyama Michihiro, "Study on Life Cycle Impact Assessment for Ships," *해상기술안전 연구보고서(일본)*, 제7권, 제3호(2007).
- [13] Kameyama Michihiro et al., "Development of LCA Software for ships and LCI Analysis based on actual shipbuilding and operation," *해상기술안전연구보고서(일본)*, 제7권, 제3호(2007).
- [14] OECD, *Environmental and Climate Change Issues in the Shipbuilding Industry*, 2010.
- [15] Shama, M.A., "Life cycle assessment of ships," *Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources*, 2005.
- [16] Wei Y. M. et al., "Progress in energy complex system modelling and analysis," *Int. J. Global Energy Issues*, Vol.25, No.1/2(2006).