

# 통계적 접근법에 의한 선박 중량추정 방법 개발

조용진<sup>†</sup>  
동의대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>

## A Development of the Ship Weight Estimating Method by a Statistical Approach

Yong-Jin Cho<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University<sup>1</sup>

### Abstract

Accurate weight prediction methods are an essential of the ship design in both ship cost managements and performance satisfactions. When no parent or similar ships are available, an adequate method of the ship weight estimating is required. In this study, there was carried out to develop the ship weight estimating method for the preliminary design phase. The weight estimating methods were first surveyed by the references and summarized their characteristics. The weight estimation method by statistical approach was developed for the container ship because the containerized transportation markets is gradually growing and ship's size and loading capacity are rapidly enlarged. The correlation analysis and the multiple regression analysis were used for developing the weight estimating method. As a results of evaluating the developed method, the error ratio of the variation between estimated weight and ship's data was about 5%. And it was only 1% difference with the calculating weight of conceptual design results by shipyard design team that the estimating weight of ultra-large container ship was predicted by the developed method.

**Keywords** : Weight estimating method(중량추정 방법), Statistical approach(통계적 접근), Ratiocination method(추론적 방법), Correlation analysis(상관분석), Multiple regression analysis(다중 회귀분석), Error ratio(오차비율)

## 1. 서론

현재 세계경제는 경제단위가 하나로 묶이는 글로벌화의 진행이 가속화 되어 국가 간의 교역이 매우 활발하게 진행되고 있다. 무역의 규모 또한 Fig. 1과 같이 경제위기에 따른 2009년의 침체를 제외하고 증가세가 유지될 것으로 예상된다(Paul, 2009).

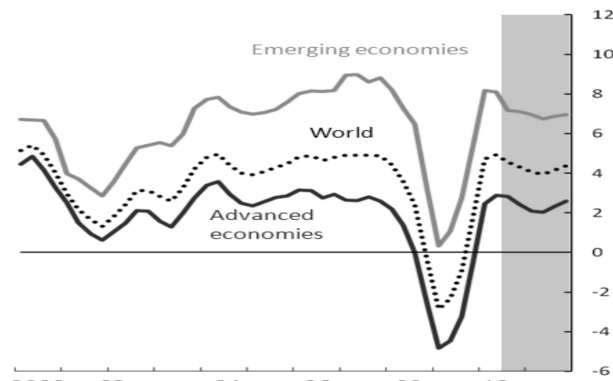


Fig. 1 Real GDP growth(percent change from a year earlier)

국제무역의 대부분을 차지하는 해상수송의 증가는 필연적이고 해상수송시스템인 선박의 수요증가는 경제위기로 조정을 거치는 과정이지만 향후 꾸준한 증가가 지속될 것으로 예상하고 있다. 특히 컨테이너 화물의 증가는 완만하지만 증가세의 유지는 지속될 것으로 내다보고 있다(Lee, 2001).

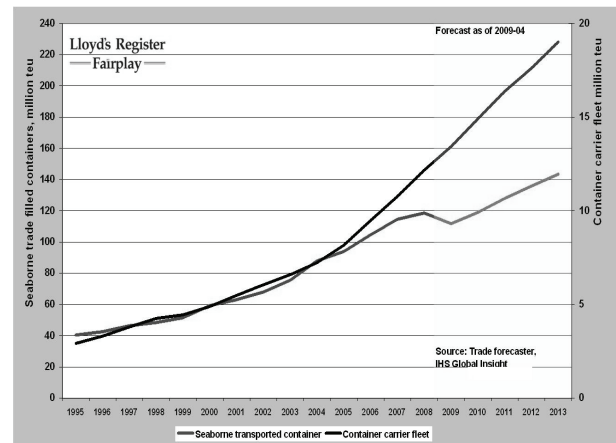


Fig. 2 Vessel supply overhang for container shipping (Trade forecaster, IHS Global Insight)

세계경제의 발전흐름에 편승하여 우리나라는 세계 제1의 조선 해양 산업국으로 성장하였다. 그러나 국내 조선산업은 수주량 세계 1위와 외형적으로 국제적 경쟁력을 확보하고 있지만 이를 바탕으로 지속적인 성장, 발전, 유지하기 위해서는 신형식의 다변화된 선박의 설계 건조를 위한 핵심기술에 대한 체계적인 연구가 필요하다(Koh, et al., 2004).

선박설계 건조의 방법에는 기존의 개발된 유사실적선(mother ship)을 이용한 새로운 선박의 요구조건에 맞도록 수정 설계하는 유사설계 기법과 유사선이 없는 경우 단계적인 반복설계과정 (design spiral)을 거쳐 요구조건에 맞도록 접근시켜(trade-off) 설계하는 방법으로 나눌 수 있다. 이들 선박설계 방법에서 중량의 추정과 관리기술은 매우 중요하게 취급되고 있고, 선박 수주를 목적으로 하는 영업설계과정인 선박개발의 초기단계에서 중량 추정의 중요성은 선가와 선박의 기본성능과 맞물려 대단히 중요한 의미를 지닌다.

그리고 조선해양 산업체에서는 중량의 추정과 관리에 대해서는 기업의 경쟁력을 가르는 중요한 기술로 기업비밀로 분류하여 중량관리에 대한 자료와 연구개발은 공개적으로 수행한 결과 거의 전무한 실정이다. 더욱이 중량의 관리를 위한 조선업체의 그룹분류의 표준이 개발되지 않아 자료의 공유가 불가능한 것도 한 가지 커다란 원인이 될 수 있다.

본 연구에서는 선박개발 과정의 선가와 선박성능에 영향을 미치는 선박 중량추정의 방법에 대한 조사연구를 수행하고 국내 건조개발의 대표선종이며 규모와 특성이 변화하는 컨테이너선 (Paul, 2009)에 대한 중량추정 모델을 개발하여 유사실적선이 없는 경우 선박설계 초기단계에서 활용할 수 있도록 하였다.

우선 국내 조선소의 건조 및 개발 경험이 많은 컨테이너선에 대한 실적선 자료를 수집하여 이를 상세하게 추정식 개발을 고려하여 다시 분류(grouping)하였다. 분류된 그룹별 중량에 영향을 미치는 선박 특성치 변수를 조사하고 중량에 관련된 새로운 변수들도 추가하여 개발하였다.

이렇게 조사하고 개발된 변수들과 그룹화된 중량과의 상관분석을 수행하여 상관도가 높은 변수인자를 선정하였다. 그리고 선정된 변수에 대한 다중회귀분석을 통하여 중량추정 모델을 개발하여 중량추정식을 도출하였다.

개발된 중량추정식의 신뢰성을 검토하기 위하여 실적선과 추정식과의 오차를 그룹별로 분석하였고, 조선소 초기설계팀의 개념설계를 통한 계산된 중량과 개발된 추정방법에 의한 결과를 비교하여 검증을 수행하였다.

## 2. 중량추정 방법

### 2.1 중량추정과 중량통제

선박 설계과정을 살펴보면 주요요목, 소요마력, 선체강도 및 일반배치는 선박 추정중량과 중심에 영향을 받는다. 이런 이유로 초기의 중량추정 과정에서 아주 면밀하고 조심스러운 추정과

노력에도 불구하고 설계와 건조과정에서 선박중량의 증가는 필연적인 것으로 알려져 있다. 이러한 중량증가를 고려하기 위하여 마진을 포함하여 중량통제가 이루어진다면 계획된 추정중량과 특성 요구조건을 만족시킬 수 있을 것이다.

사실 중량통제와 같이 선박의 설계와 건조에 중대한 영향을 미치는 다른 요소는 없다고 해도 과언이 아니다.

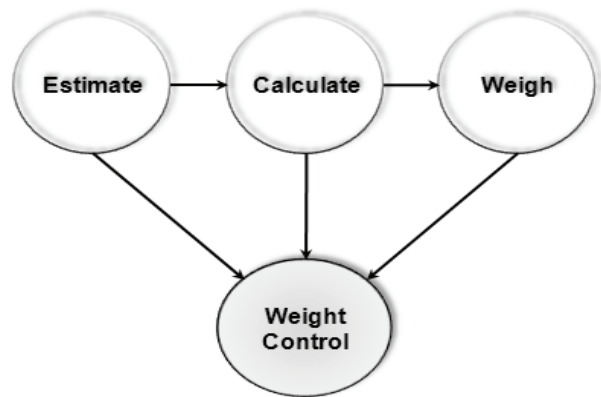


Fig. 3 High level weight engineering process

중량통제계획의 성공여부는 각 그룹의 분류 정도를 중량프로그램에서 얼마나 세세히 하여 포함시킬 수 있는가에 달려있다. 이러한 통합적인 노력개념이 필수적이고 조직적으로 관리가 신중하고 조심스럽게 이루어져야만 한다. 그룹관리자들은 중량추정과 통제에서 이와 같은 책임감을 인식하고 깨달아야 한다.

중량은 전체 설계와 건조과정의 고유한 특성이고 개발과정에서 각 단계별로 영향을 받기 때문에 중량통제는 설계와 건조 조직의 기본기능으로 고려되어야만 한다(Dominick et al. 2007).

### 2.2 중량의 선박성능 영향

선박설계에서 중량과 중량중심은 선박 복원성, 기본성능 그리고 선체강도에 깊은 영향을 미친다. 다른 많은 조선공학적인 특성들도 영향을 미치는 하지만 중량만큼 충분히 입증된 요소는 없다.

아르키메데스의 원리에 따라 선박의 흘수를 읽고 준비된 배수량 등곡선도의 축적을 이용하여 선박의 배수량을 얻으면 사실상의 중량을 얻게 된다. 어떠한 선박이던 선박중량은 배수량을 말하고, 길이 방향의 중량분포는 트림을 결정한다. 이 값으로부터 최대흘수, 침수표면적 및 수선길이와 폭과 같은 다른 정보를 얻게 된다(Dominick et al. 2007).

선박 운용에서의 중량의 영향은 간략하게 설명되어진다. 중량은 선박이 전복되지 않고 부양할 수 있는 능력, 요구속력과 내항성 요구의 충족능력, 그리고 해양환경의 변화에 구조손상 없이 견딜 수 있는 능력에 중대한 영향을 미친다. 이러한 관점에서 다음에 몇 가지 중량의 영향의 예를 보여준다.

### 2.2.1 복원성

환경적 외란이 선박을 경사시킬 때, 중량과 배수량의 평형원리는 중력중심과 부력중심이 일시적으로 더 이상 일직선이 아닐 때 적용된다. Fig. 4(a)와 같이 부력중심(B)은 새로운 선박의 기하학적인 수면하부 부력중심으로 이동하게 되어, 새로운 수직선은 부력중심을 통과하여 선박의 중심선과 만나게 된다. 작은 경사에서 수직선과 선박의 중심선과 만나는 점을 메타센터(M)라고 한다. 중량중심(G)은 메타센터의 위 또는 아래에 있게 되고, 그 높이  $\overline{GM}$ 을 메타센터 높이라한다.

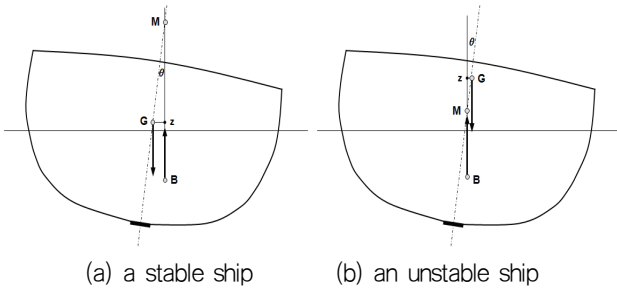


Fig. 4 Diagram showing the interaction of weight and buoyancy force

선박의 경사에서 중력과 부력은 각각 G와 B로 나타내고 우력의 형태이다. G가 M 아래에 있을 때, 그 우력은 양의 값을 가지며 안정한 선박이 된다. 그러나 G가 B의 위에 있을 때는 우력이 음의 값을 가지며, Fig. 4(b)와 같이 선박이 불안정한 상태에 놓인다. 결과적으로, 수직방향의 중량중심 위치(G)는 선박의 횡복원력을 결정짓는 중요한 요소이다.

### 2.2.2 속력

속력과 내항성능은 대부분 선박들의 주어진 임무수행을 하는데 있어서 가장 중요한 요소이다. 내항성능은 선박의 예비부력, 건현, 복원성 범위, 그리고 동복원력에 의해 추정될 수 있다. 예비부력과 건현은 중량에 직접적인 영향을 받고, 반면에 복원력 범위와 동복원력은 중량중심에 영향을 받는다.

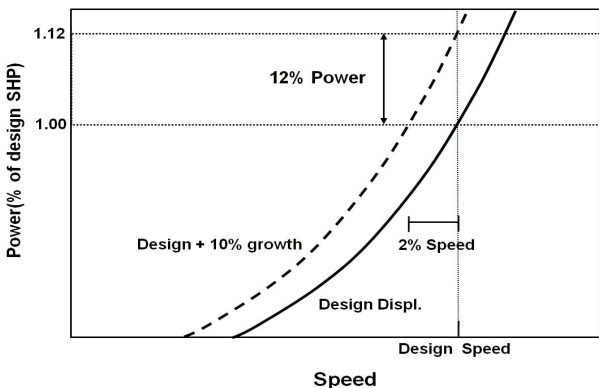


Fig. 5 Speed-power curve showing the effect of weight growth

Fig. 5은 중량의 변화가 속도에 미치는 영향을 보여준다. 속력대 마력곡선에서 아래의 실선은 설계중량에서 요구되는 축마력을 표현하고 있으며, 위의 점선은 중량이 10% 증가했을 때의 축마력곡선이다. 처음의 실험에서는 30노트 정도의 선박에서 속도가 2%로 약간 줄은 곳으로 나타났다. 그러나 속력을 만족시키기 위해서는 소요마력이 12%가 증가하여야하며, 따라서 소모연료, 항속거리, 그리고 엔진설계에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

### 2.2.3 선체강도

Fig. 6의 회색 윤곽은 전형적인 선박의 초기 종방향 중량분포를 나타낸다. 이에 더해 점선은 3개의 기선에 10%의 중량증가분포를 가정하였다. 보이론( $\sigma = My/I$ )에 따라서 중량, 부력곡선은 전단력과 굽힘 모멘트를 이용하여 계산하면 대략적으로 15%를 증가시키는 결과를 가져온다. 이 결과를 이용하여 종강도 계산을 하게 되면 선박의 종강도는 파단이 일어나는 것으로 평가된다. 그러므로 종방향의 중량분포가 추정되고 선박의 수명주기 동안에 감시(monitor)되어야 한다.

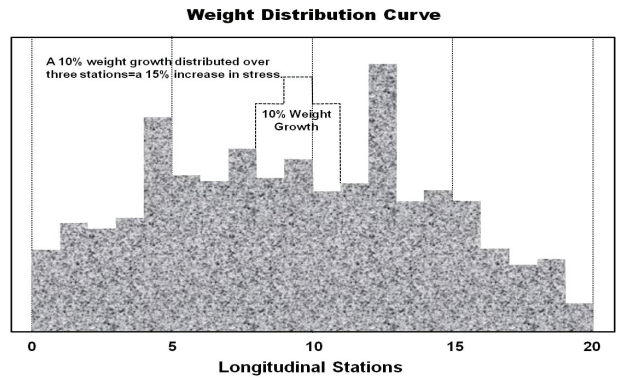


Fig. 6 Weight distribution plot showing the effect of weight growth

## 2.3 중량 추정방법 분류

일반적으로 초기 설계과정중의 선박중량 추정방법은 유사선 이용법, 중앙횡단면에 의한 추정, 기본제원에 의한 추정법, 그리고 통계자료 이용법 등이 이용되고 있다(Schneekluth & Bertram, 1998). 현재 조선소에서 사용하고 있는 중량 추정방법은 조선소의 실정과 경험을 토대로 유사 실적선박에 의한 추정식을 개발하여, 각사 내부적으로 제한되게 사용하고 있는 실정이다.

그리고 선박 중량의 분류(breakdown)는 조선소별로 세세항목은 차이를 보이나 대강의 분류는 선각중량, 선체외장중량, 기관의장(전기의장 포함)의 3분류하는 것으로 조사되었다. 추정된 선박의 경하중량에 대하여 중량여유는 배수량의 2% 또는 경하중량의 6%를 고려하고 있다(Hunt & Butman, 1993).

선박의 추정중량은 조선업체의 경쟁력을 가르는 핵심요소로 공개가 되지 않고 있지만, 현재까지 중량추정 방법은 다음과 같이 개략적으로 분류할 수 있는 것으로 조사되었다.

### 2.3.1 파라미터 방법(Parametrics)

선박의 파라미터(parameters)는 초기 선박설계 과정에서 중요하다. 선박 파라미터의 변화자료를 수집하고 유지하는 것은 초기 단계 중량특성을 통합하는 도구의 개발에서 핵심부분이다. 그리고 다음에 설명되는 추론(ratiocination)적 과정의 기본이 된다.

중량추정과정에서 파라미터의 응용은 광범위하고 다양한 그룹에 관한 최근 인도된 선박들의 넓고 상세한 중량자료와 이에 상응하는 설계자료의 수집을 요한다. 일단의 자료는 조합하기만 한다면 관리 유지하고 활용하는 것은 상대적으로 쉽다.

이런 파라미터 자료는 다양한 종류의 함정과 상선을 대표하는 선박들의 그룹에 대한 최종의 선박특성과 중량 보고서에 기초한다. 파라미터 방법은 다양한 형태로 개별적인 중량 그룹들을 중량 추정하는데 응용될 수 있다. 근본적인 원리는 추론에 사용되는 기법과 유사하다. 추정식을 개발하는데 사용하는 3가지 기본적인 방법은 주요목 특성 활용방법, 유사선대 설계선 비율방법, 부분 합산방법이다.

일반적으로 선택된 방법은 설계와 참고자료의 유용성에 의해 영향을 받는다. 활용 가능한 자료가 충분한 경우에는 다양한 방법으로 추정하여 서로 교차 검토가 가능하다.

초기설계 단계에서 빠른 중량추정을 위해 입방(cubic)계수와 만재배수량의 비가 사용되었다. 입방계수는 추론적방법과 마찬가지로 파라미터 방법에서도 종종 사용된다.

### 2.3.2 추론적 방법(Ratiocination)

경하중량 추정의 가장 대표적인 방법은 추론(ratiocination)하는 방법이다. 이는 동일한 조선공학적인 원리에 의해 선박이 건조 개발되기 때문에 유사 실적선박으로부터 새로운 선박의 중량을 추정할 수 있다는 가정이 성립된다는 것이다. 따라서 이러한 방법은 실적선의 시스템 중량에 적절한 축적비율을 곱해주면 새로운 선박의 중량추정을 추정할 수 있게 된다. 축적비율은 선박의 길이, 폭, 엔진마력 등과 같은 파라미터를 기초로 한 비율적인 계산모델이다.

이방법이 선박설계 과정에서 유용한 방법이라도 자체의 제약을 가지고 있다. 특별히 유사실적선과 설계선박 모두 일반적이지 않은 신기술 또는 특별한 형태 등이 적용되거나 규모가 너무 차이나는 경우에 비례계수가 맞지 않는다.

추론적인 방법의 중량추정은 이러한 속성에 따라 수정되어져야만 한다. 중량의 추정에 비례계수를 적용하는 것은 최근 운항 선박들의 넓고 상세한 그룹에 대한 매우 상세한 중량자료와 이에 일치하는 설계자료가 요구된다.

추론적 비례계수 방법은 다양한 방법으로 그룹중량의 추정에 사용되어 질수 있으며 파라미터 방법과 같이 3가지 추론방법이 있다. 우선 선박의 주요목을 함수로서 중량그룹의 추정식을 개발하는 주요목 특성 활용방법, 유사실적선의 중량 그룹으로부터 비율계수에 의해 그룹중량 추정식을 개발하는 유사선과 설계선의 계수비율 방법, 그리고 주요부분 또는 요소의 중량을 따로 추정하여 그룹이나 요소에 합산하는 부분 합산방법을 들 수 있다.

특정한 방법의 선정은 유용한 참고자료의 양에 의해 영향을 받는다. 충분한 활용자료가 있는 경우는 다양한 방법으로 추정하여 서로 검토 하거나 수척의 유사실적선으로부터 새로운 유사실적선을 생성하여 새로운 설계선 중량추정을 개발하는데 다양한 계수(ratio) 도출에 활용할 수도 있다.

Table 1은 미 해군(US Navy)의 분야별 그룹방법(SWBS, Ship Work Breakdown Structure)에 기초한 추론적 중량추정 방법에 활용하기 위한 유사 실적선박(함정)과 새로운 설계선박의 비율을 보여준다(Straubinger et al. 1983).

Table 1 Comparison rational parameters of frigate

Weight Estimation of a 2500 Ton Class Trimaran Frigate (2000 ton KFX base)				
	ELEMENT	NEW SHIP (n)	PARENT SHIP (p)	RATIO (n/p)
1	L	120.00	96.00	1.2500
2	B	30.00	11.50	2.6087
3	D	12.00	6.60	1.8182
4	Disp. <sub>DWL</sub>	2,500.00	1,975.20	1.2657
5	LBD/100	432.00	72.86	5.9289
6	LD	1,440.00	633.60	2.2727
7	LD(2D+B) <sup>2</sup>	4,199,040.00	386,553.02	10.8628
8	LBD <sup>2</sup> C <sub>p</sub>	286,416.00	28,911.85	9.9065
9	LD <sup>2</sup>	17,280.00	4,181.76	4.1322
10	SHP	60,000.00	53,640.00	1.1186
11	H	4.200	3.418	1.2288
12	C <sub>p</sub>	0.5525	0.6012	0.9190
13	C <sub>wp</sub>	0.2717	0.7519	0.3614
14	L(B+D)	5,040.00	1,737.60	2.9006
15	WSA	1,824.00	1,314.06	1.3881
16	2(D-H)L	1,872.00	610.94	3.0641
17	LBC <sub>wp</sub>	978.12	830.10	1.1783
18	KW	1,000.00	845.40	1.1829
ACCOMMODATIONS				
19	AccomO Officers	15.00	16.00	0.9375
20	AccomN NCO's	20.00	23.00	0.8696
21	AccomE Enlisted	100.00	114.00	0.8772
22	Accomt TOTAL	135.00	153.00	0.8824

### 2.3.3 기타 방법들

그리고 기타 활용되고 있는 방법들을 간략히 살펴보면 다음과 같이 정리할 수 있다(Dominick, et al., 2007).

- Baseline method

기준선 방법은 새로운 선박의 설계에 사용되는 다른 일반적인 방법이다. 전형적으로 다른 조선소에 의해 건조되는 시리즈선박

이나 유사선의 경우 첫 번째 호선의 결과를 기준선으로 활용하는 방법이다. 예를 들어 기준선박이 연안 공급선이고 새로운 선박이 앵커취급 공급선일 경우, 앵커취급부분과 엔진중기를 제외하고는 정확히 같은 형상의 선박일 경우에 기준선의 중량자료를 이용하여 추정하게 된다.

• Statistical method

이 방법은 많은 유사선을 통계적으로 회귀분석을 통하여 시스템이나 중량그룹을 표현하는 알고리즘을 개발하는 것이다. 회귀 분석은 선형적, 대수적, 다항식의 또는 지수적일 수 있다. 다수의 유사선을 사용함으로써 추론적인 방법에 의한 명확한 경향이 나타나지 않는 경우가 있다. 불확실의 표준편차(Root-Mean-Square, RMS)의 합은 추정의 불확실성을 나타낸다.

• Volumetric density method

이 방법은 항목중량을 예측하기 위하여 공간부피에 밀도계수를 곱하는 방법이다. 추정중량의 중량중심은 일반적으로 체적의 공간중심이라 가정한다. 전형적으로 탱크의 내부용적을 계산하고, 해수비중과 배제되는 용적에 대한 가중치를 곱한다. 가중치는 설계경험이나 조선소의 지침을 사용한다.

• Deck area fraction method

이 방법은 계산하려는 그룹중량이 차지하는 공간의 갑판면적에 중량계수를 곱하여 얻는다. 수직방향의 중심은 갑판의 중심이나 갑판덮개가 있는 경우 갑판높이에서 통행할 수 있는 공간의 3 피트 위에 있는 것으로 한다.

• Top-down method

이 방법은 선도가 정해지거나 배수량이 제한되어 선박 전체의 중량이나 배수량이 정해진 경우 사용된다. 전체중량과 중심은 다양한 중량 그룹에 따라 분류하여 배분되어진다. 부분중량의 비율은 유사선의 통계적 연구로부터 유도되어 계층적인 구조로 분류되고 분석을 통하여 정해진다.

• Bottom-up method

이 방법은 계층구조에서 낮은 수준에서 중량을 추정하는 방법이다. 낮은 수준의 부분중량을 전체 중량으로 상향 계층적으로 분류하여 놓은 것이다. 이 하향식 추정방법은 상향식 추정방법과 상호 보완적이며, 서로의 반대되는 도구를 검증하는 좋은 도구 역할을 한다.

• Midship extrapolation method

이것은 선박 전체중량에서 중앙단면도의 단위중량을 이용하여 선체 강재중량을 추정하는 방법이다. 선체의 선수, 중앙 그리고 선미단면을 중앙단면도로부터 예상 길이의 곱으로 이루어진다.

이 방법은 전체 길이에 걸쳐 횡단면적곡선에 단위 길이에 따른 중량을 곱하는 방법이다.

• Percent complete method

이 방법은 탑재중량의 추정이나 경하중량의 조사시점에서 추정중량을 완벽히 하기위하여 사용되어진다. 중량관리자는 때때로 추가 선박에 탑재되는 시스템의 변화나 중량 크기를 추정해야한다. 이러한 비율은 현재의 중량을 알기위한 완전한 시스템에 적용된다. 이 방법은 탑재되거나 제거되는 전체 중량추정의 비율을 나타낸다.

• Synthesis program

합성적 프로그램은 아주 새로운 설계에서 개략적이고, 개념적이며 그리고 타당성 조사과정의 추정을 위한 방법이다. 이는 요구조건을 기초로 성능특성과 선박물리를 포함하는 모든 공학 분야가 통합 되어있는 매우 정교한 프로그램이다.

전형적으로 이것은 초기개념에 활용되는 각각 선박유형에 대한, 현존하는 자료(중량자료 포함)에 의존하는 독자적인 프로그램이다.

• Factoring methods

중량 추정식은 단순히 단위중량에 불확실성이 포함된 단위 숫자를 곱하는 것이다. 이러한 중량추정의 허점은 시스템공학자가 설계를 완성하기 마지막 선박설계에서 단위숫자와 단위중량을 결정하는 것이다.

### 3. 중량추정 방법개발

#### 3.1 자료수집 및 변수개발

컨테이너선의 중량 추정 모델의 개발은 매우 까다롭고 세심한 주의가 필요하다. 중량추정은 선기에 중요한 재료비와 노무비 산출과 저항추정에 의한 주기 마력추정과 주기관의 선정에 영향을 주어 선기에 직접적인 영향을 미치고 있기 때문이다.

따라서 가능한 많은 실적선의 최근 자료의 수집이 요구되고 있다고 할 수 있다. Table 2는 국내 조선소 2개사의 선박자료이며 이에 대한 중량 분류작업은 직접적인 도움으로 가능하였다.

Table 2 Weight data of container ships from shipyards

Shipbuilding yard	Container Capacity	Ship Numbers
Company A	1,700~6,700 TEU	12
Company B	1,600~6,500 TEU	6
Conceptual Design	12,000~18,000 TEU	3

수집된 중량자료를 이용하여 추론적인 중량추정 방법에 상관 분석을 통해 검토해본 결과 변수들 간의 상관도가 유사하고 추정 모델생성에 컨테이너 선박의 특성을 반영하는데 미흡하여 새로운 변수개발이 필요하였다. 따라서 새로운 중량추정 변수는 기존에 미 해군에서 활용하는 추론변수들을 컨테이너선에 맞도록 변경하여 활용하였다. 그리고 조선공학적인 주요목, 기본계산과

정에 얻어지는 조합변수, 초기계획에서 얻을 수 있는 선박계수 및 컨테이너선 초기계획의 특성변수를 포함시킴으로써 초기단계 설계자가 활용 할 수 있는 가능한 많은 변수를 포함 시켰다. 이와 같이 컨테이너선의 특성을 반영한 모든 변수는 Table 3과 같다.

Table 3 Induced independent parameters for container ship weight estimating

	Independent Parameters
Principal Dimensions	LBP, B_MLD, D_MLD, T_F, DISP, KG_F, LCG_F, KG_LWT, LCG_LWT, VS, PS_MCR, LBD_100, LD LB, LB_2D, LD_2, CB, LB_D, D_2L
Containers	TEU, CONT_IN, CONT_OUT, CONT_TOT,
Crew numbers	CREW

### 3.2 상관분석과 다중회귀분석

초기설계 과정중의 선박중량의 추정을 위해 자세히 분류되어 있는 유사선의 중량자료를 수집할 때 중량의 분류기준이 동일하지 않으면 활용이 어렵고 추정된 계산식의 불확실성이 증가하게 된다. 따라서 수집된 실적선의 중량자료를 통일된 분류방법으로 재분류하는 까다로운 작업이 요구된다.

수집된 중량자료의 중량그룹 분류는 조선소간의 차이를 고려하여 두 조선소의 중량 추정그룹을 검토한 후에 새로운 분류기준을 정하였다. 중량그룹의 분류는 Fig. 7과 같이 선체, 의장, 기관, 전기 및 여유의 5분야 대그룹으로 분류하고, 세부그룹은 선체중량 6개, 의장중량 4개, 기관중량 4개, 전기중량 2개 및 중량여유 1개 그룹으로 분류하였다.



Fig. 7 Breakdown structure of the ship weight groups

이렇게 상세한 중량분류는 각 그룹 중량에 영향을 미치는 독립 변수와의 상관분석을 통해 상관성이 정확하게 드러날 것으로 기대하였다. 상관관계의 분석은 도출된 각종 변수와 중량을 모두 활용하여 전체 변수들과 세부그룹 중량과 상관분석을 수행하였으며 그 결과의 일부를 Table 4에 나타내었다.

상관분석은 Pearson방법으로 상관도를 검토하였으며 상관도가 0.5 이상이면 변수사이에 상관성이 있고, 0.7이상이면 상당히 상관있다고 판단하나 분석결과로부터 상관도의 크기와 변수들 간의 상관도 값을 고려하여 상위 5개 이내의 변수를 선정하였다.

상관분석과 다중회귀분석은 범용 회계분석 프로그램인 SPSS를 활용하였다. 우선 상관분석으로 변수선정을 하고 변수간의 산점도 매트릭스로 선행관계와 변수간의 다중 공성선의 가능성을 대략적으로 확인하였고, 이에 따라 선정된 변수를 수정하였다. 회귀식의 검정은 수정결정계수(R<sup>2</sup>)에 의해 회귀성을 검정하고, 회귀계수의 검정은 t-검정에 의해 검증하고 95% 신뢰구간에 있음을 확인하였다. 변수선택은 과정이 복잡한 단계적(stepwise) 방법 보다는 연구자 스스로 순서를 결정하는 위계적(hierarchical) 방법을 채택하였다.

회귀분석결과 도출된 회귀식을 이용하여 그룹별 경하중량 추정식으로 활용하여 각 세부그룹별로 중량추정식을 작성하였다.

아래의 Table 5는 선체중량 그룹의 선각중량(Body) 그룹부분에 대한 회귀분석 결과의 예를 보여준다.

Table 4 Correlation analysis between variables and weights (Total 48 variables were partially represented)

		TEU	LBP	B_MLD	D_MLD	T_F	DISP	KG_F	LCG_F	LIGHT WT
TEU	Pearson 상관계수	1.000	0.908	0.921	0.927	0.951	0.978	0.879	0.767	0.967
	유의확률 (양쪽)	.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000
LBP	Pearson 상관계수	0.908	1.000	0.819	0.912	0.922	0.945	0.780	0.732	0.946
	유의확률 (양쪽)	0.000	.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000
B_MLD	Pearson 상관계수	0.921	0.819	1.000	0.957	0.912	0.931	0.969	0.765	0.941
	유의확률 (양쪽)	0.000	0.000	.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000
D_MLD	Pearson 상관계수	0.927	0.912	0.957	1.000	0.951	0.960	0.934	0.777	0.975
	유의확률 (양쪽)	0.000	0.000	0.000	.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000
T_F	Pearson 상관계수	0.951	0.922	0.912	0.951	1.000	0.974	0.888	0.794	0.950
	유의확률 (양쪽)	0.000	0.000	0.000	0.000	.	0.000	0.000	0.000	0.000
	N	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000
DISP	Pearson 상관계수	0.978	0.945	0.931	0.960	0.974	1.000	0.894	0.752	0.983
	유의확률 (양쪽)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	.	0.000	0.000	0.000
	N	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000	21.000

Table 5 Multiple regression analysis of body weight (SPSS)

model	Non-Standard Coeff.		Standard Coeff.	t	significance probability	95% Confidence interval	
	B	Standard Deviation	beta			Upper limit	Lower limit
1 (const)	433.287	1256.922		.345	.734	-2197.480	3064.055
CONT_IN	-8.65E-02	1.121	-.094	-.077	.939	-2.433	2.260
LBD_100	1.064	1.066	1.136	.998	.331	-1.168	3.296
LB	4.117E-02	.405	.137	.102	.920	-.807	.890
LB_D	-5.10E-02	.247	-.253	-.206	.839	-.568	.466

a. dependant variable : BODY

### 3.3 중량추정식 개발

변수개발과 상관분석을 통해 선정된 5개 이내의 독립변수와 각 세부 그룹중량을 종속변수로 다중회귀분석을 수행하여 각 세부그룹별 중량추정식을 개발하였다. 그리고 각각의 세부그룹별 중량추정식은 5분야의 대그룹으로 각각 합산되고 최종적으로는 전체 선박중량을 추정할 수 있는 추정방법을 개발하였다. 이러한 추정방법을 수학적으로 일반화하면 다음과 같다.

우선 y를 k개의 독립변수로  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 의 함수로 정식화하는 것을 가정하면 자료집합은 다음과 같다

$$\begin{pmatrix} y_1, x_{11}, x_{21}, \dots, x_{k1} \\ \vdots \\ y_n, x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{kn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, i번째 종속변수의 자료값인  $y_i$ 는 k개의 독립변수로  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 의 자료값  $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ 와 함께 자료가 된다.

따라서 다중회귀식에서 종속변수  $y_i$ 값은 다음의 식(2)와 같이 표현이 된다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \epsilon_i \quad (2)$$

여기에서 계수  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 는 미지의 모수이며, 오차항  $\epsilon_i$ 는  $N(0, \sigma^2)$ 분포에서 추출한 독립변수로 가정한다(Anthony, 2008).

이와 같은 방법으로 Table 4의 회귀분석 결과인 선각(body)부분의 세부중량은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$W_{body} = \beta_0 + (CONT_{IN})\beta_1 + (LBD_{100})\beta_2 + (LB)\beta_3 + (LB\_D)\beta_4 + \epsilon_i \quad (3)$$

이 같은 방법으로 세부중량 그룹의 모델을 개발하였으며 각각의 세부중량 추정모델을 합하여 다음과 같이 대분류로 추정한다.

$$W_{HULL} = W_{body} + W_{hold} + W_{engroom} + W_{house} + W_{cellguide} + W_{paint} \quad (4)$$

$$W_{OUTFIT} = W_{outpipe} + W_{anch} + W_{genout} + W_{accom}$$

$$W_{MACH} = W_{piping} + W_{engine} + W_{prop} + W_{machout}$$

$$W_{ELEC} = W_{cable} + W_{elecequip}$$

이상의 그룹별 중량추정 결과를 토대로 경하중량 추정방법을 다음의 식(5)과 같이 완성하였으며, 추정방법에는 중량 여유도 회귀분석 결과에 의해 합하여 추정결과와 정도를 높였다.

$$LWT = W_{HULL} + W_{OUTFIT} + W_{MACH} + W_{ELEC} + W_{margin} \quad (5)$$

## 4. 중량추정 방법의 검증

개발된 중량추정 방법에 의한 그룹별 추정중량과 수집자료의 실적선 그룹중량의 차이에 대한 오차분석을 통해 추정식의 타당성을 검증하였다.

통계적으로 볼 때, 표준편차는 모집단의 평균과 개별 값들과 차이의 제곱합을 표본수로 나눈값에 제곱근을 취한 값으로 표현한다. 중량의 편차 값이 정규분포를 따른다면 전체 모집단의 1표준편차(1σ) 범위에 68%가 포함되고 오차가 1표준편차보다 작은 값을 가질 비율은 84% 범위임을 알 수 있다. 이로 부터 그룹중량을 시스템의 표준편차(Sys-SD)는 다음 식(6)과 같이 표현된다.

$$System\ Standard\ Deviation = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_n^2} \quad (6)$$

여기서 n은 개별 중량그룹의 수이고, s는 개별 그룹의 표준편차이다. 표현된 시스템의 표준편차가 정규분포를 하고 1 표준편차의 범위에 속한다면 오차의 비율은 표준편차의 그룹 중량의 비율로서 다음의 식(7)과 같이 나타낼 수 있다(Kern, 1978).

$$Error\ Ratio\ (\%) = \frac{(Sys - SD)}{\sum\ of\ Group\ Weight} \quad (7)$$

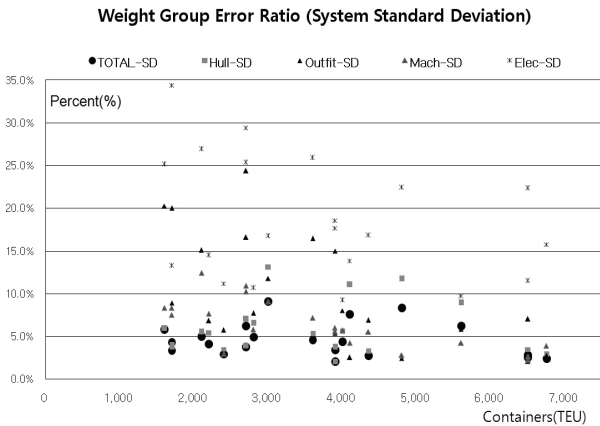


Fig. 8 Error Ratio of group(System Standard Deviation)

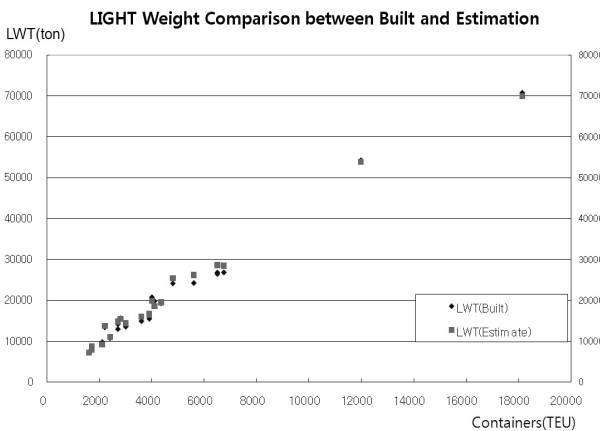


Fig. 9 Difference distribution of total light weight

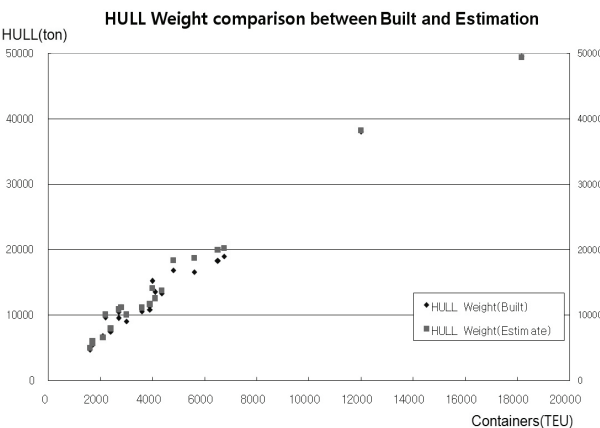


Fig. 10 Difference distribution of hull weight

위의 식과 같은 방법으로 다음의 Fig. 8은 그룹별 추정중량과 실적선 중량의 오차를 선박(TEU)에 따라 비율로 나타내고 있다. 그림에서와 같이 그룹별로 오차비율에 대한 분석을 해보면 수집된 중량자료의 상세한 분류가 가능했던 선체와 기관부의 중량은 추정식의 오차가 비교적 작은 5% 정도를 나타내고 있으나 중량 그룹의 분류가 어렵고 상세한 자료가 부족했던 전장부의 중량은 오차도 상대적으로 크게(최대 35%) 나타나고 있음을 도표로 부터 알 수 있었다.

그리고 개발된 중량추정 방법을 평가하기 위하여 실적자료와 추정식에 의해 재구성된 중량 자료를 동일 그래프에 컨테이너선의 적재용량(TEU)별로 표시하여 추정방법의 정도를 평가 하였다. 그룹별 추정식에 의한 중량과 실적선 중량을 비교한 예제를 다음의 그림들에 나타내었다. Fig. 9는 선박 전체 경하중량의 중량 차이를 보여주고 있고, Fig. 10은 대분류인 선체중량의 실적중량과 추정중량과의 차이를 보여준다.

Table 6 Weight comparison between estimation model and conceptual design results

Principal Dim.		Estimation	Concept Design
Loa			420.0 m
Lbp		400.0 m	400.0 m
Bmid		57.5 m	57.5 m
Dmid			27.2 m
Draft	Td	14.7 m	14.0 m
	Ts		14.7 m
Light Weight		57,500 ton	58,000 ton
Disp.	Td	213,700 ton	216,000 ton
	Ts		230,000 ton
Container Capacity	Deck	8,194 TEU	7,360 TEU
	Hold	6,806 TEU	7,220 TEU
	Total	15,000 TEU	14,580 TEU

그리고 규모의 차이가 많이 나는 다른 실적선의 자료를 구할 수가 없는 상황에서 컨테이너 적재용량이 2배 이상 차이가 나는 초대형 컨테이너 선박에 개발된 추정방법의 적용 가능성을 검증하기 위하여 실제로 국내 조선소에서 초기 개념설계를 수행하였다. 조선소에서 수행한 개념설계 결과에 따른 계산된 중량과 본 연구를 통해 개발된 추정방법에 의한 추정중량을 비교한 결과 아래의 Table 6와 같이 1%정도의 상당히 일치하는 결과를 보여주어 추정방법의 유효성을 검증할 수 있었다.



## 5. 결 언

본 연구에서는 초기설계 단계의 선박 경하중량을 추정할 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 조사연구를 통해 중량추정의 여러 가지 추정방법에 대한 분류를 하였으며 특성들을 정리하였다. 그리고 최근 건조가 많고 규모가 증가하는 컨테이너선을 대상으로 선박개발 초기단계의 통계적인 추정방법에 의한 중량추정 방법에 대한 개발연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 중량추정을 위해 수집되는 실적선 중량자료의 활용과 조선소 중량분류(breakdown)와 중량관리 표준에 대한 협력 논의가 필요함.
- (2) 초기설계 단계의 중량추정 방법의 개발을 위해서는 종속변수인 그룹중량에 영향을 미치는 설계선박의 제원과 특성이 포함되는 독립변수의 개발이 중요한 요소임.
- (3) 중량추정 방법의 개발에서 상관분석 결과 Pearson 상관계수를 이용한 독립변수의 도출과 활용에는 변수간의 중복성이 반드시 고려되어야 함.
- (4) 회귀분석을 이용한 중량추정 방법을 규모가 전혀 다른 설계선박에 적용을 위해서는 외삽에 의한 발산방지 대책으로 개념설계결과의 활용 등과 같은 적극적인 대책이 요구됨.
- (5) 추정방법의 검증을 위해 시스템 표준편차에 의한 오차비율 검증방법을 도입하여 검토 결과, 오차비율이 5%정도로 나타나 추정식이 초기설계단계에서 활용이 가능한 것으로 나타났고, 초대형선의 조선소 개념설계와의 비교에서도 1% 정도로 일치하여 추정방법의 유효성을 입증하였음.

현재 조선소의 중량 추정식은 실적자료와 설계자의 경험에 의존하나 선박의 규모와 형태가 차이는 선박의 초기 설계단계의 경우에는 중량의 추정은 신뢰성을 담보하지 못하고 있다. 이러한 경우 본 연구에서와 같이 통계적 접근방법으로 중량자료를 가능한 세밀한 항목으로 분류하여 선박의 종류에 따른 특성을 반영하여 추정식이 개발된다면 다양한 선종에서도 중량추정 방법의 적용이 가능할 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 동의대학교 교내일반연구과제(2009AA197) “선박의 경하중량 추정법 연구” 결과의 일부임을 밝힙니다.

## 참 고 문 헌

- Anthony, J.H., 2008. *Probability and Statistics for engineers and scientists*. Thomson books/cole.
- Dominick, C. et al., 2007. *Marine Vehicle Weight Engineering*. Society of Allied Weight Engineers.
- Hunt, E.C. & Butman, B.S., 1993. *Marine Engineering Economics and Cost Analysis*. Cornell maritime Press.
- Kern, P.H., 1978. A Statistical Approach to Naval Ship Weight Estimating. *37th Annual conference of the Society of Allied Weight Engineers, Inc.*, at Munich, West Germany, 8-10 May 1978.
- Koh, C.D. et al., 2004. Developments of Key Technologies for design of high value added ships (Conceptual Design of Next-generation Ships), *KORDI Report MI-0117-01-0001*
- Lee, J.H., 2001. Size up of Container Ships and Change of the Ports, Korea Container Terminal Authority, *Container Information*, 14, pp.44-63.
- Paul, B., 2009. Economic and Marine Cargo Outlook. *2009 California Maritime Leadership Symposium*, Sacramento, 13 May 2009.
- Schneekluth, H. & Bertram, V., 1998. Ship Design for Efficiency and Economy, Butterworth-Heinemann, pp. 149-179.
- Straubinger, E.K. Curran, W.C. & Fighera, V.L., 1983. Fundamentals of Naval Surface Ship Weight Estimating. *Naval Engineers Journal*, 95(3), pp.127-143.



조 용 진