
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 34 卷 第 1 號 1997年 2月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 34, No. 1, February 1997

계류중인 선박의 프로펠러 추력 추정에 관한 연구

하문근*, 송인행**, 김도정*, 위기섭*, 김성환**

A Study on the Propeller Thrust for a Moored Ship

by

M.-K. Ha*, I.-H. Song**, D.-J. Kim*, K.-S. Wee** and S.-W. Kim**

요 약

선박의 시운전 수행 이전에 엔진 및 프로펠러의 작동상태를 체크하기 위하여 때때로 안벽계류 중에서 주기 및 발전기의 성능시험을 수행하는 데, 이때 주기판을 100% 작동시키는 것은 계류용 로프 및 안벽 비트의 강도 문제등의 여러가지 위험 부담을 갖게 된다. 본 연구는 이러한 시험에 대한 안전성 검토를 위해 필요한 프로펠러의 추력의 추정을 목적으로 하고 있다. 대상선은 최근에 건조한 대형 컨테이너선이며, 실선시험은 안벽계류 상태에서 수행되었기 때문에 프로펠러는 수면위로 노출되어 있는 상태에서 작동되었다. 이러한 낮은 프로펠러 축 물수 수심에서 작동하는 안벽계류 상태에서의 프로펠러의 특성을 조사하기 위해 모형시험을 수행하였으며, 이들 시험결과로부터 안벽계류 시험중의 프로펠러의 추력에 관한 약산식이 도출되었다. 그 결과 프로펠러의 특성은 축 수심에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있으며, 특히 축 수심이 작아 프로펠러가 수면위에 노출되어 있는 경우에는, 같은 축 수심에서도 프로펠러 회전수에 지배되는 특성이 파악되었다. 한편 심수 중에서 작동하는 프로펠러에 대해서도 추력에 대한 추정식을 도출하여 실선 시험 담당자가 사용하기 쉽게 하였으며, bollard pull에서의 FPSO(Floating Production Storage and Offloading tanker based system)의 프로펠러의 추력 예측값과 비교 검토 하였다.

Abstract

Shipbuilder checks the status of main engine and propeller operation before sea trial. Generally these tests are carried out at a quay during fitting out of the ship. For these tests

접수일자 : 1996년 8월 20일, 재접수일자 : 1996년 11월 23일

* 정회원, 삼성중공업 조선·플랜트연구소

** 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

the operator has to estimate the maximum RPM with permissible torque and thrust to ensure the safety of the mooring line and ship. In this paper, the propeller characteristics according to the draft variation for a moored ship is investigated. From these tests, it is shown that shaft submergence is a dominant parameter in the propeller performance at shallow shaft submergence and that the propeller performance is dependent upon the propeller RPM when the shaft submergence is kept unchanged. In this study, a simple formula of the required thrust for a given propeller shaft submergence and propeller RPM is derived. The propeller thrust, which is calculated by another formula in case of deep draft, is compared with results of bollard pull test for FPSO.

1. 서 언

조선소에서는 때때로 선박의 시운전 수행 이전에 안벽에서 선박의 주기관(M/E) 및 발전기(generator)의 성능시험을 수행하는 데, 이렇게 함으로써 선박의 성능을 부분적으로 검증함은 물론이고, 해상 시운전에서의 엔진 및 프로펠러의 작동상태를 사전 체크하여 시운전 시간을 절약할 수 있다. 그러나 선박이 안벽에 계류된 상태에서 주기관을 충분히 작동시키는 것은 많은 위험 부담을 안고 있기 때문에, 계류용 로프 및 안벽 비트의 강도문제 등을 초기에 추정하여야 할 필요성이 생긴다. 이와 같은 계류력에 관한 안전성 검토의 주요 인자는 계류상태에서 프로펠러가 발생하는 추력이다. 건조중인 선박이 안벽에 접안되어 있을 때에는 대부분 홀수가 경하상태보다도 상당히 낮기 때문에 프로펠러의 추력은 기본설계시에 수행한 경하상태와 설계하중 상태에서의 추력보다 훨씬 작은 값을 갖게 된다.

현재까지 이러한 연구는 조선소의 문제에 국한되어 선박관련 연구자들의 관심의 대상에서 비껴온 것으로 보인다. 그러나 프로펠러의 추력 및 토오크 특성은 축 수심 및 프로펠러 회전수에 크게 지배받고 있기 때문에 계류기술에 숙련된 기술자라 할지라도 선박의 fender와 안벽의 bollard사이의 계류 로프수와 방향을 결정할 때에는 신중하지 않으면 안된다.

관련된 연구와 유사한 연구로서, 최근 서틀 탱커 등과 같이 동력학적 위치제어(dynamic positioning)

성능이 주요한 선박과 관련하여, 파랑중에서의 추력 및 토오크의 변화를 추정하기 위하여 덕트 프로펠러의 수심변화에 따른 프로펠러 추력 및 토오크 변화를 조사한 결과[1]가 있다. 그러나 여기에서는 프로펠러의 외곽에 위치한 덕트에 의해 공기 유입이 억제되기 때문에 일반적인 경우라 볼 수 없으며, 양승일등[2]은 파랑중을 운항하는 컨테이너선의 저항증가, 추력감소등, 종합적인 내항성능을 실험적으로 연구하여 좋은 결과를 보여주고 있는데, 프로펠러 단독시험에서는 날개끝이 수면에 닿아 있을 때에 대해서만 추력과 토오크를 보고하고 있어, 본 연구가 목적으로 하고 있는 프로펠러가 수면 밖으로 충분히 노출되었을 경우에 대한 추력 및 토오크의 변화는 취급하지 않고 있다.

본 연구는 삼성중공업이 최근에 건조한 대형 컨테이너선의 주기 성능시험을 안벽계류 상태에서 수행하기 위한 안전성 검토를 위해 수행되었다. 본 안벽계류 시험에서는 프로펠러의 축이 0.2R만큼 물속에 잠겨 있어 상기[1][2]의 경우와는 다르리라 예상된다. 이 때의 프로펠러의 추력의 특성을 파악하기 위해 우선 회류수조를 이용한 시험을 수행하여 프로펠러의 추력 및 토오크의 특성을 조사하였다. 회류수조에서는 수심의 변화 및 프로펠러의 회전수 변화가 용이하여 기본적인 특성을 충분히 파악할 수 있었다. 대상 프로펠러는 탱커용 재고 프로펠러를 이용하였으며, 이 결과의 검증을 위하여 예인수조에서 몇가지 홀수 및 프로펠러 회전수에 대해 프로펠러의 특성시험을 수행하였다. 예인수조에서는 대상 프로펠러로 3400TEU급의

컨테이너선의 설계 프로펠러가 선정되었다.

모형시험을 통하여 프로펠러의 추력 및 토오크가, 프로펠러 축의 수심(h)이 반경(R)보다 충분히 큰(보통 $h/R \geq 1.5$ 이상) 경우에서 수행되는 프로펠러 단독특성에 비해 크게 저감되는 경향을 얻었다. 이와 같은 특성은 Gutsche[3]가 여러 수심 및 회전수에 대해 수행한 일련의 실험에서도 찾아 볼 수 있다. 즉, 컨테이너선의 프로펠러와 같이 중하중(heavily loaded) 프로펠러의 경우 프로펠러의 날개가 수면위에 노출되었을 때의 프로펠러 단독 특성은, 심수중인 경우에 비해 전구간의 전진비(J_A)범위에서 프로펠러의 추력계수가 감소하는 경향을 보인다. 또한 전진비가 특정값(문헌[1]에서는 약 0.4)에서 추력의 큰 강하현상을 보이며, 그 이하의 전진비에서는 추력계수가 거의 일정한 결과를 얻었다. 이러한 추력의 큰 강하현상은 공기 유입 때문인 것으로 추정할 바 있다.

본 연구에서도 유사한 결과를 얻었으며, 이에 대해서는 본문에서 자세히 살펴 보겠지만, 공기유입이 발생하는 지를 확인하기 위해 캐비테이션 터널에서의 벤틸레이션 관찰시험을 수행하였다. 그 결과 프로펠러의 전 반경에 걸쳐 fully-ventilating 상태가 발생하는 것이 관찰되었다. 그러나 프로펠러의 날개끝이 수면위에 노출되어 있다고 fully-ventilating 상태가 항상 발생하는 것은 아닌 것 같다. 문헌에서는 탱커 또는 벌크선 프로펠러와 같은 경하중(lightly load) 프로펠러에서는 공기 유입이 충분히 발생하지 않으며, 따라서 추력의 감소도 전진비에 대해 비교적 완만한 것으로 보고 되어 있다[1].

위와 같은 모형시험의 결과를 실선의 안벽 계류 상태의 프로펠러 시험의 결과와 비교, 검토하여 최종적으로 프로펠러의 추력에 관한 추정식을 도출하였다. 그러나 상기의 추정법은 프로펠러의 추력이 프로펠러의 하중에 따라 크게 다르기 때문에 모든 프로펠러에 적용시키는 것은 현재로서는 가능하지 않고, 여기서는 공기유입이 잘 이루어지는 중하중 프로펠러에 한하였다. 또한 심수중에서의 일반 프로펠러의 추력에 대해서도 간단히 추정할 수 있는 식이 필요하므로 본 고에는 이러한 심수

중의 프로펠러 추력에 대한 추정식의 도출도 포함하고 있으며, bollard pull 상태에서 시험한 FPSO 선 프로펠러의 추력과 비교하였다.

2. 프로펠러 추력에 대한 자유표면 영향

건조중인 선박이 안벽에 접안되어 있을 때에는 프로펠러의 추력의 추정에 세심한 주의를 가져야 한다. 이러한 접안상태에서는 대부분 흡수가 ballast상태보다도 상당히 낮기 때문에, ballast와 design 상태에서의 추력보다도 훨씬 작은 값을 가지게 된다. 이러한 경향은 다음과 같이 설명할 수 있다.

프로펠러가 자유표면에 가까이 위치하거나 수면 위에 노출되어 있을 때 자유표면의 효과에 의해 프로펠러의 부하를 표시하는 순환은 작아진다. 이 문제는 수면을 경계로 수면 위에는 수면 밑에 있는 프로펠러의 순환과 같은 세기 및 반대방향을 갖는 순환을 분포시키는 경상법(image method)을 사용하면 쉽게 이해가 가능하다. 이러한 경상법은 프로펠러의 회전수가 높다는 가정하에 자유표면 조건을 근사적으로 만족시키는 방법이다. 그러나 프로펠러의 날개가 수면위에 노출되어 있는 경우에는 이러한 경상법에 의한 순환의 감소이외에도 추력을 감소시키는 요인이 있다. 즉 자유표면으로부터 압력이 낮은 프로펠러 날개끝 보오텍스 및 날개의 흡입면으로 공기가 유입되어 프로펠러 날개가 충분히 공기유입이 이루어지는 상태가 되어 super-cavitating 프로펠러가 아닌 경우 날개의 부하가 크게 감소된다. 이러한 공기의 유입에 의한 추력의 감소 현상에 대해서는 많은 보고가 있어 왔으나, 공기유입의 초기조건은 프로펠러의 부하에 크게 작용하고 있어 뚜렷한 기준은 아직 제시되지 못하고 있다.

공기유입 현상을 재현하기 위한 모형시험에서는 높은 레이놀즈수 및 동일 전진비 외에도 모형선-실선의 다음(1)식과 같은 air-ventilation 수(σ_{atm})를 동일하게 하여 동력학적 상사를 만족시켜야 한다.

$$\sigma_{atm} = \frac{2gh_{tip}}{(2\pi nR)^2} \quad (1)$$

여기서, $h_{tip} = h + R$ 임.

공기유입에 의한 ventilation 현상을 시험하기 위해서는 프로펠러 축의 수심비(h/R)와 회전하고 자 하는 실선 프로펠러의 회전수 $\times \sqrt{\lambda}$ (λ : 축적비)를 고려하여야 한다. 이는 (1)식으로부터 다음과 같이 된다.

$$\frac{h_s}{n_s^2 D_s^2} = \frac{h_M}{n_M^2 D_M^2}, \quad n_M = n_s \sqrt{\frac{D_s}{D_M}} \quad (2)$$

식(1)에서 보듯이 h/R 이 작을수록, 그리고 프로펠러 회전수 n 이 커질수록 공기유입수가 작아져서, ventilation 길이가 커지며 프로펠러의 부하는 감소한다.

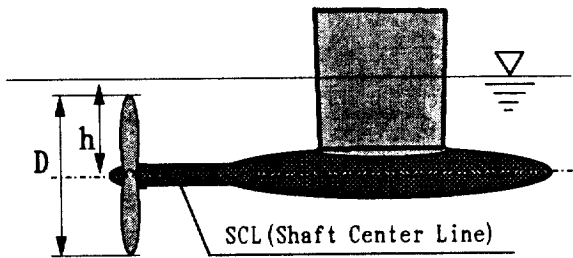


Fig.1 Model test set-up

Table 1 Principal dimensions

선장	L_{pp}	2.0 m
선폭	B	0.365 m
방형비척계수	C_B	0.818
프로펠러 직경	D	6.5 cm
프로펠러 피치비	P/D	0.7
프로펠러 전개면적비	A_e/A_o	0.55
프로펠러 단면		MAU

3. 회류수조 및 예인수조에서의 모형시험

안벽에서의 실선 프로펠러 시험을 원활하게 수행하기 위해서는, 프로펠러 회전수에 대한 프로펠러의 추력의 추정이 중요한 사항이 된다. 안벽계류 상태에서의 프로펠러의 기본적인 특성을 이해하기 위하여 회류수조 및 예인수조에서 시험이 수행되었다.

3.1 회류수조에서의 모형시험

회류수조에서 수행한 시험상태는 프로펠러의 단독상태(open-water) 및 모형선에 프로펠러를 장착한 선후상태(behind ship)이며, 유속이 0일때 흘수 및 프로펠러 회전수를 변화시키면서 추력 및 토크의 변화를 조사하였다. 이때 프로펠러 축(SCL: Shaft Center Line)의 수심비(h/R)는 -0.50~2.5 범위에서, 프로펠러 회전수는 10~30rps의 범위에 있다. 선후상태의 실험에 사용된 선박은 310K VLCC선형이며, 모형의 주요치수 및 프로펠러의 제원은 Table 1과 같다. 회류수조 실험은 Fig.1에 보이고 있듯이 프로펠러 축의 수심비(h/R)를 변화시키면서 수행하였고, 선후상태에서는 VLCC선형에 프로펠러를 장착하여, 추력(T)과 토크(Q)를 계측하였다.

실험의 결과는 단독상태 및 선후상태에서의 추력 및 토크의 수심변화에 따른 경향이 비슷하여, 여기서는 선후상태에서의 경향만을 고찰하였고, 결과는 Figs.2,3에 나타내고 있다. Fig.2는 선후상태의 결과를 나타내고 있다. 횡축은 프로펠러 물수심도를 나타내고, 종축은 추력 및 토크의 비($T/T_o, Q/Q_o$)를 나타내는데 T_o 및 Q_o 는 프로펠러가 충분히 잠겼을 경우의 추력 및 토크로, 보통 프로펠러 축 심도가 반경의 2배의 수심의 경우의 값을 취하고 있다. Fig.3은 선후상태의 동일한 실험결과를 공기유입수에 대하여 정리한 것이다. 실험 결과로부터 프로펠러가 수면에 접근하여 수심이 감소하게 되면 추력은 급격히 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 감소의 경향은 프로펠러의 회전수, 즉 프로펠러의 하중조건에

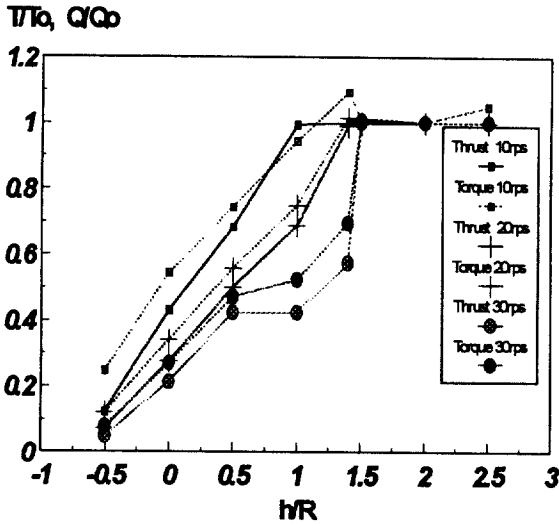


Fig.2 Effect of submerged depth of propeller SCL on efficiency (behind condition)

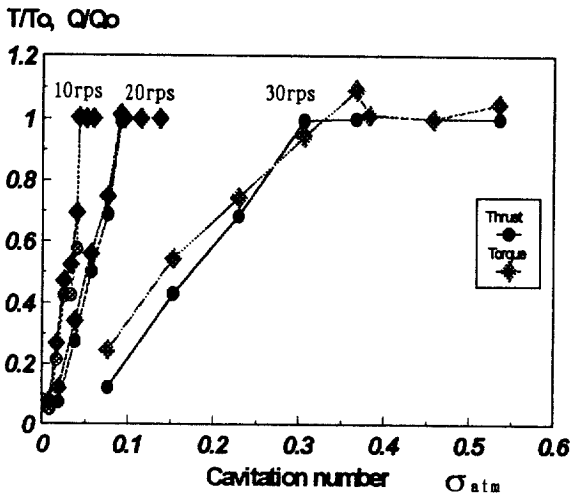


Fig.3 Thrust and torque vs. cavitation number at behind condition

대해서도 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉 높은 회전수에서의 중하중 상태에서는 낮은 회전수의 경하중상태에 비해 추력감소의 경향이 심하다. 이는 중하중 상태에서는 경하중 상태에 비해 부분 공기유입이 보다 쉽게 발생하기 때문인 것으로 보인다. 이와 같은 경향은 MARINTEK에

서의 결과[1]에서도 찾아볼 수 있다. 이 문헌의 실험의 경우는 일반 프로펠러가 아닌 덕트가 붙은 azimuth thruster를 사용하였으나 결과는 동일한 경향을 보여주고 있다.

시험결과로 부터 프로펠러가 수면에 접근하여 공기유입수가 낮아지면 추력과 토오크가 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 이러한 감소의 경향은 같은 공기유입수라 하더라도, 프로펠러 회전수의 변화 즉 하중도의 변화에도 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

3.2 예인수조에서의 모형시험

예인수조에서 수행한 프로펠러 단독시험(POW) 상태는 Table 2에 보였으며, 프로펠러 축의 수심비가 0.5(천수 I) 및 0.0(천수 II)인 2가지 상태에서 전진비의 전구간에서 추력 및 토오크가 계속되었다. 프로펠러의 날개수는 4이며, 전개면적비는 0.561, 평균피치비는 0.966이다. 모형시험시의 프로펠러 회전수는 관심 있는 실선의 안벽시험의 공기유입수에 맞추도록 식 (2)에서 결정된다. 여기서 프로펠러의 회전수는 NCR Power의 80%에 해당하는 93RPM으로 선정하였다. 또한 선후상태에서 예인속도가 0일 때 몇가지 프로펠러 회전수에 대해서도 조사되었다. 프로펠러 단독상태에서의 결과는 Fig.4에 보였다.

Table 2 Model test conditions

제원	심수	천수 I	천수 II
Prop. Dia	0.24809 m		
Prop. RPM	14.5 rps	8.7 rps (실선 NCR, 93 RPM)	
Prop. SCL	3.0 R	0.5 R	0.0 R
Rn _{0.7R}	0.497*10 ⁰	0.298*10 ⁰	0.298*10 ⁰
σ _{atm0.7R}		0.1295	0.0755

h/R=0.5인 천수 I의 경우, 프로펠러 전진계수가 약0.23이상일 때는 추력계수 및 토오크 계수가 대략 심수에 비해서 40~50%가 감소하며, 이는 Oberembt[4]의 결과와 유사하다. Oberembt는 이

러한 수면에 노출되어 있는 $h/R=0.8$ 에서의 프로펠러 문제를 해석한 바 있으며, 그의 결과에서 프로펠러 날개의 부하는 위치에 따라 변화하며 추력이 자유표면에 의해 무한수심의 경우에 비하여 약 31%가 감소되고 있음을 보였다. 또한 $h/R=0.6$ 에서는 추력이 42%가 감소됨을 보였다. 그러나 이러한 추정은 공기유입이 일어나지 않는 상태에서의 값이며, 공기유입이 일어나는 경우에는 해석하지 못하였다.

그리고 공기유입이 발생하는 0.23 이하에서는 75~80%가 감소한다. 또한 $h/R=0.0$ 인 천수 II의 경우, 프로펠러 전진비가 약 0.23이상일 때는 추력 계수 및 토크 계수가 대략 심수에 비해서 60~70%가 감소되나 공기유입이 발생하는 0.23이하에서는 80%이상 감소한다. 이러한 경향은 MARINTEK[1]의 보고서중 “프로펠러에 공기유입이 발생하는 경우가 발생하지 않는 경우에 비하여 추력의 20~30% 까지 급격히 감소하며, 프로펠러가 물밖에 노출되어 있으면 더 감소된다”는 내용과도 잘 일치한다. 한편 공기유입의 발생조건에 대해서는 아직까지 정확히 밝혀져 있지 않으나, 보통 탱커 및 벌크선의 경하중 프로펠러에 대해서는 프로펠러가 수면위로 돌출되는 경우에 발생한다고 알려져 있다.

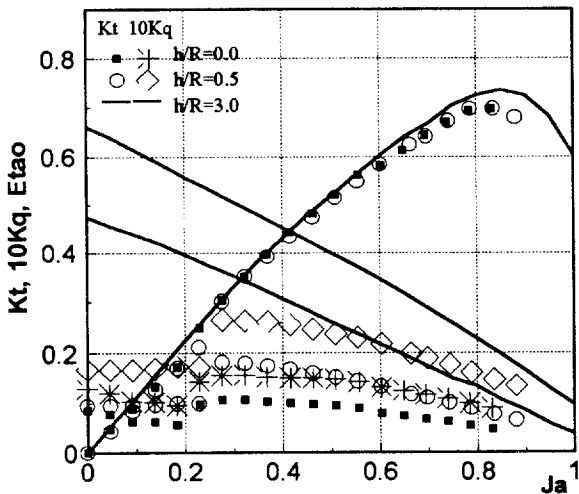


Fig.4 Results of measured thrust & torque with propeller emergence variation

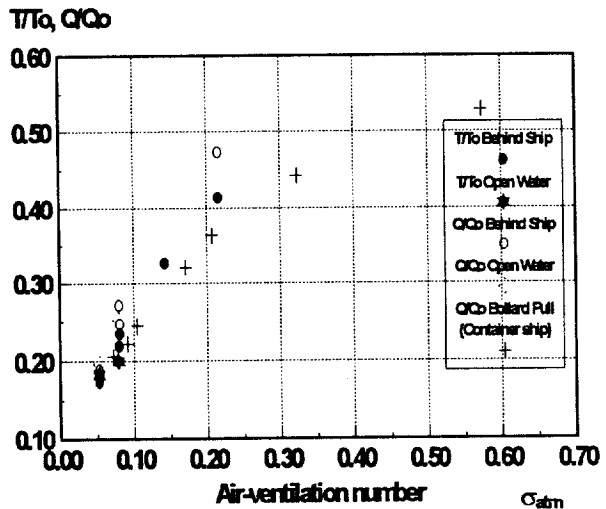


Fig.5 Results of measured thrust & torque with propeller emergence variation

Fig.5는 $J=0$ (bollard상태)의 결과로 공기유입수를 매개변수로 하여 표시하였으며, 최근 수행한 대형 컨테이너선 프로펠러의 안벽시험 결과(토크 계측 결과)도 함께 수록하였다. 그림에서 보듯이 프로펠러의 추력 및 토크의 감소현상은 공기유입수에 지배되고 있음을 알 수 있다. 회류수조의 결과와는 달리 예인수조에서의 시험결과가 공기유입수에 대해 일정한 경향을 가지는 것은 예인수조에서 사용한 프로펠러가 컨테이너선 용으로 중하중 프로펠러로 상대적으로 공기유입이 용이하기 때문인 것으로 보인다.

4. 프로펠러의 추력

4.1 심수상태 프로펠러의 예항상태에서의 추력

선박의 bollard pull시험 또는 계류 상태에서는 선박의 전진 속도가 없으므로, 프로펠러의 전진비 (J)가 0에 해당한다. 어떤 선박에 있어서 프로펠러가 정해지고, 프로펠러가 심수상태에 있다고 가정하면, 프로펠러 단독의 추력 및 토크 특성은 실

힘에 의하여 쉽게 구할 수 있다. 이는 각각의 전진비에 대하여 정해지고 관계를 나타내는 곡선에 의하면, 전진비 0에서 추력계수(K_T)와 토오크 계수(K_Q)의 관계는 프로펠러 단독특성 곡선으로 부터 알 수 있으며, 추력(T)는 다음의 관계로부터 구해진다.

$$T = K_T \cdot \rho D^4 n_o^2 = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{Q_o}{D} \quad (3)$$

$$= \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{716.2}{D} \cdot \frac{P_o}{N_o} \eta_R$$

여기서 추력 및 토오크 계수비(K_T/K_Q)는 프로펠러의 종류 즉, 날개수, 피치비 그리고 전개면적비에 따라 달라지지만 계열자료[5][6]등을 참고하면, 날개수, 전개면적비의 변화에는 크게 영향을 받지 않고, 피치비에 따라 크게 변화 함을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 프로펠러 단독시험의 결과를 참고로 하여, 추력 및 토오크의 계수비를 일반 프로펠러일 경우 컨테이너용과 탱커용 2가지로 분류하여 컨테이너(피치비 약1.0가정)일 경우 약7.0, 탱커와 벌크선(피치비 약0.6가정)의 경우 10.0의 값을 사용하기로 한다. 또한 덕트 프로펠러의 경우 일반 프로펠러와 약간 달라 피치비가 1.0인 경우 약12.0, 피치비가 0.6인 경우 약15.0의 값을 가진다. 이러한 자료를 참고하여 조사한 속도 0일 때의 추력과 토오크의 계수비를 조사한 결과를 Table 3에 나타내었다. 또한 상대회전효율 η_R 은 1.0으로 보아도 문제가 없을 것이다. 그리고 예인상태에서의 추력감소 계수는 0.05정도[6]이다. 따라서 예인력(F ; kg단위임)은 이러한 자료 및 식(3)으로 부터 다음과 같이 유도된다.

$$F = 0.95 T = 0.95 \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{Q_o}{D}$$

$$= \frac{680.39}{D} \cdot \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{P_o}{N_o} \eta_R \quad (4)$$

여기서 D : 프로펠러 직경
 P_o : M/E의 POWER(BHP)
 N_o : 프로펠러 회전수(RPM)
 이다.

Table 3 Ratio of thrust/ torque of propeller at J=0.0

	Thrust/Torque (K_T/K_Q)	
	conventional	ducted
Container (Pitch ratio = 1.0)	7.0	12.0
Tanker, Bulk (Pitch ratio = 1.0)	10.0	16.0

4.2 프로펠러가 수면 위로 노출되어 있는 안벽 계류상태에서의 추력

2절에서 언급 하였듯이 추력은 프로펠러의 수심 및 회전수에 따라 바뀌게 된다. 결국 프로펠러의 축 수심이 작을 경우에는 프로펠러의 성능곡선이 심수층의 경우와는 크게 달라져 프로펠러가 P_o/N_o 관계가 크게 바뀌어 식(4)는 더 이상 사용할 수 없게 된다. 즉, MCR의 마력일 경우라도 MCR에 해당되는 프로펠러 회전수에 크게 미치지 못하는 경우가 발생한다. 이러한 경우에는 프로펠러의 추력은 추력계수를 공기유입 수의 함수로 간단히 하여 추정할 수 밖에 없다.

Fig.5에서 볼 때, 추력 및 토오크는 공기유입수에 따라 거의 같은 변화를 보이며, 프로펠러 기하의 특성에는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이런 가정하에서 공학적으로 관심이 큰 프로펠러의 물수심도 변화에 따른 추력의 변화를 공기유입수의 함수로 다음식과 같이 표현하여 추정할 수 있다.

$$\frac{Q}{Q_0} \left(\text{or } \frac{T}{T_0} \right) = \begin{cases} 1.167 \sigma_{atm} + 0.14 & \text{at } \sigma_{atm} \leq 0.24 \\ 0.389 \sigma_{atm} + 0.327 & \text{at } 0.24 \leq \sigma_{atm} \leq 0.60 \end{cases} \quad (5)$$

그리고 (5)식중 공기유입수가 큰 경우의 예인력 F는

$$F = 0.95 K_T \rho n^2 D^4 (0.389 \sigma_{atm} + 0.327) \quad (6)$$

이 된다.

그러나 이러한 공기유입수에 따른 추력의 추정에 프로펠러의 기하와는 관계 없는 일률적인 수식화에는 다소 무리가 있을 것으로 보이며, 엄밀하게는 프로펠러의 부하에 따른 분류 즉, 경하중 프로펠러 및 중하중 프로펠러에 따라 구분되어 수식을 만들어야 할 것으로 보인다.

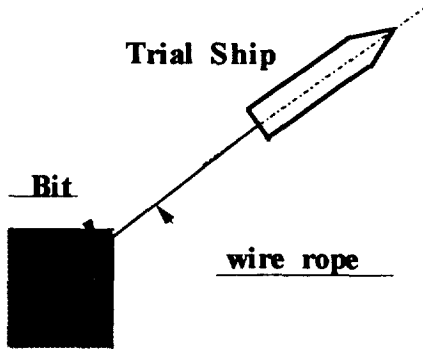


Fig.6 Status of bollard trial

5. 결과에 대한 고찰

5.1 Bollard Pull 시험과 비교검증 예

최근 당사는 FPSO선박의 주기관 성능을 검증

하기 위하여 안벽에서 bollard pull 시험을 수행하였다. 이러한 시험은 장비 및 수행상 여러가지로 어려움이 따르기 때문에 조선소에서도 수행하는 경우가 거의 없는 시운전 항목이다. 본 시험의 방법은 선급 DNV가 추천하는 방식을 참고로 하여, 흘수 6.69m (FP 6.04m, AP 7.40m), 트림은 배길이의 약1.0% (DNV 추천 2%), wire 로프의 길이는 200m로 하였고 시험을 수행하는 선박주위 반경 100m 이내는 수심이 11.0m이상인 영역에서 시험을 수행하였다. 본 선박의 프로펠러는 가변피치 프로펠러로서, 단독시험의 특성조사에서 피치100% 및 회전수 212rpm이며, 시험의 상태를 요약하면 Table 4와 같고, 탑재된 엔진은 2500KW가 2sets 이다.

Table 4 Comparison of measured and estimated thrust

Sea depth	13.0 m
Draft F.P.	6.58 m
Draft A.P.	7.20 m
Wind dir. speed	P.20, 3.0 m/s
L of towing wire	200.0 m
Prop. dia	3.0 m
H of SCL fr. Bottom	4.5 m

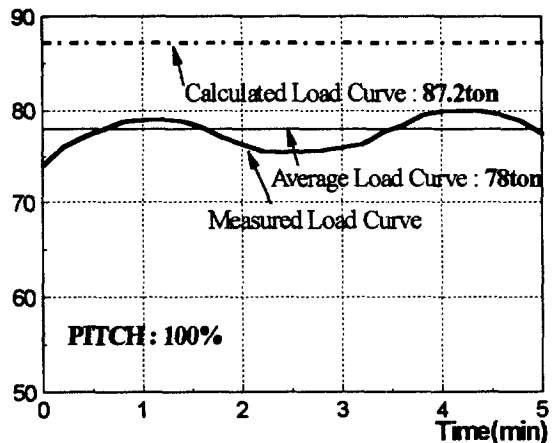


Fig.7 Comparison of thrust between bollard pull test and estimation

Bollard pull 시험하는 선박의 추력은 우선 프로펠러의 축의 중심의 수심상태가 프로펠러 반경의 1.5배 이상이므로 식(4)를 적용하여 추정 계산을 수행하면 약 87.2ton이다. 실선시험의 계측결과와 추정 결과는 Fig.7에 표시하였으며, 실선 시험에서 계측한 결과는 약 78ton으로 계산 추정치가 약간 높게 나왔으나, 양호한 일치율을 보여주고 있는 것으로 보인다.

5.2 안벽 M/E 시험과의 기교

안벽에서의 주기관 시험은, 선박이 안벽의 비트에 계류된 상태에서 수행하게 되는데, 이때의 계류 로프의 강도와 갯수는 선박의 안전성 문제에 영향을 주며, 프로펠러의 추력에 따라서 이들이 결정되어 진다. 선박이 안벽에 계류된 상태에서는 흘수가 상당히 낮게 되어 프로펠러가 수면 밖으로 돌출되어 추력도 심수상태보다 급격히 떨어질 것으로 예상되나, 실제의 추력이 얼마나 될 것인지 상당히 어려운 문제이다.

당사 건조호선에 대하여 안벽에서 M/E 시험시에 엔진의 마력을 측정된 결과를 전술한 추정식에 의하여 계산한 결과와 비교해 보자. 실선에 탑재되어 측정에 사용된 장비의 제원, 프로펠러 및 주기관의 제원은 Table 5와 같다.

Table 5 Principal dimensions of M/E, propeller and power measuring equip

M/E (Sultzer)	66120BHP, 102rpm	
Propeller Dia.	8.3 m	
Power Meas. Equip.	KVANER, SPS-100	
Draft	F.P.	7.1 m
	A.P.	5.2 m
Dist. of SCL fr. Bot.	4.4 m	

식(2)로 부터 안벽에 계류상태의 선박에 대한 추력을 추정하기 위해, 우선 추력/토크비는 Table 3으로부터 7.0을 사용하고, 상대회전 효율은 1.0으로 한다. 또한 프로펠러 축의 수심은 $h/R=0.193$ 이다. 프로펠러는 몰수심도로 부터 공기 유입이 심하게 발생하는 중하중 상태임을 알 수

있으므로, Fig.5로 부터 이에 해당하는 값을 읽거나 (6)식을 이용하여 추력을 계산 할 수 있다. (6)식으로 부터 추정된 추력과 안벽 시험에서 얻어진 값을 정리하여 Table 6에 보였다.

Table 6 Comparison of thruster power between estimated and measured results

Power RPM	Torque meter with G.(P)	Emperical formula (T)	Engine shop (P)
30	1741 HP	36 ton	
40	3457 HP	53 ton	
50	5542 HP	70 ton	
60	6500 HP	75 ton	19000 HP
70	10231 HP	94 ton	
75	11435 HP	102 ton	
85	15432 HP	119 ton	38000 HP
102			66120 HP

결과로 부터 알 수 있듯이 프로펠러가 수면위로 노출되어 있을 경우에는, 전술하였듯이 공기유입 등에 의하여 상당히 감소된 추력이 발생함을 알 수 있다. 이는 조선소의 안벽의 구조강도 문제와 계류 기술등의 개선에 의하여 상당히 높은 마력의 주기관 출력상태에서도 안벽에서의 엔진에 관한 시험이 가능 할 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결과를 정리하면, 회류수조에서 수행한 실험의 결과는 덕트 프로펠러의 실험결과와 잘 일치하고, 프로펠러가 중하중 상태에서는 $h/R=1.5$ 이하에서 급격히 추력이 감소하고, 경하중 상태에서는 $h/R=1.0$ 이하에서 추력이 급격히 감소하게 된다. 이는 다른 예인 수조등에서 얻어진 결과와도 일치하는 경향이다.

주기관의 안벽시험시 안전성을 검토하기 위하여 제시한 추력에 관한 실험식은, bollard pull 또는 예항상태와 같이 프로펠러가 심수상태에서는 어느 정도 검증되었다고 할 수 있다. 그러나 안벽계류 상태와 같이 천흘수 상태에서의 추력에 대해서는

예인수조 시험등을 통하여 공기유입에 의한 추력 감소를 확신 할 수 있었으나, 추정식의 실선 적용의 유용성에 대해서는 아직 충분한 검증이 수행되지 않은 상태이므로, 계속해서 연구조사가 필요하다. 프로펠러 추력이 추정되면 이를 기초로 하여 안벽 계류시 각 비트에 작용하는 힘과 로프에 작용하는 힘을 구하여 선박 및 계류 로프의 강도를 고려한, 안벽에서의 주기 시험을 수행하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Erik Lehn, "Practical methods for estimation of thrust losses", MARINTEK, Report 513003.00.06, 1992.
- [2] 양승일, 김은찬외, "과량중 운동성능에 관한 연구", 한국기계연구소, 연구보고서, UCN131B-260.D, 1982
- [3] Gutsche F., "Einfluss der Tauchung auf Schub und Wirkungsgrad von Schiffpropeller(Effect of shaft sub-mergency on thrust and efficiency for ship Propeller)", Schiffbauforschung, 1967
- [4] Oberemb H., "Zur Bestimmung der instationaeren Fluegelkraefte bei einem propeller mit aus Wasser her-ausschlagenden Fluegeln(For the prediction of unsteady force in surface-piercing)", Bericht Nr.247, Institute fuer Schiffbau Uni. Hamburg, 1968
- [5] Carlton J. S., "Marine Propellers and Propulsion", BH, 1993, p96
- [6] 나가시마 프로베라株式會社; "マリンプロベラ", 1971年6月, p128-134, p337-349