

EDISON CFD를 이용한 저속비대선용 반원형 덕트 에너지 저감장치의 변수연구

박 승 철¹, 최 영 민¹

¹서울대학교 조선해양공학과

연료효율에 대한 선주들의 요구와 그린쉽이라는 사회적 흐름에 맞춰 현재 연료 절감 장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 KVLCC2M의 반류개선 및 연료효율 증가를 위한 반원형 덕트의 변수 연구를 진행하였으며, 계산의 신뢰도를 검증하기 위해 서울대학교 선박저항성능 연구실에서 실시한 모형 시험 결과와 비교하였다. 반원형 덕트의 크기와 길이방향 위치를 설계변수로 설정하여, 총 12가지 경우에 대한 CFD 계산을 시행하였으며, 계산 결과를 유동 정류를 통한 저항 감소와 반류 개선을 통한 프로펠러의 성능 개선이라는 두 가지 기준으로 최적 조건을 선정하였다. 또한, 후처리를 통해 계산 결과를 추가적으로 분석하여 에너지 절감의 이론적인 배경을 찾았으며, 이를 바탕으로 반원형 덕트를 개선하여 부채꼴형 덕트를 새로이 설계하였다. 이에 대한 추가적인 계산 결과 최대 4%의 연료절감 효과를 최종 확인하였다.

Key Words : 전산유체역학 (CFD), 이중모형 선체 (Double body), 반원형 덕트 (Semicircular duct), KVLCC2M, ESD (Energy Saving Device), EEDI (Energy Efficiency Design Index)

1. 서 론

연료효율의 증가와 CO₂배출의 감소는 선박 설계에서 가장 중요한 관심사 중 하나이다. 2013년 1월부터 국제해사기구 (International Maritime Organization, IMO)에서는 에너지설계효율지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 도입하여 CO₂ 배출이 낮고 연료효율이 좋은 친환경선박 건조를 의무화하였다. 이러한 기준에 부합하기 위하여 선박의 연료 효율을 증가시키는 연구가 진행되고 있다.

특히, 선미에 부착하는 부가물에 대한 학계의 연구는 매우 활발하게 진행되고 있다. 이는 크게 프로펠러 허브에 부착되는 전류고정 날개[1]와 덕트[2], 선체 측면에 부착되는 핀[3]에 대한 연구 등으로 나눌 수 있다. 이들 중 좌우 대칭형상을 가지고 있어 본 연구에서 사용한 해석자의 해석조건(이중모형 선체)[4]에 부합하며, 연료 효율 증대효과가 검증된[5] 덕트 부가물에 대한 연구를 진행하였다. 특히, 종래의 원형 덕트를 개선하여 만들어진 반원형 덕트 부가물을 본 연구 대상으로 선정하였다. [6]

Inukai et al. [7]는 CFD를 이용하여 실제 크기의 선박에 대하여 반원형 덕트의 효과를 검증하였다. 연구 결과 유동 정류를 통한 추력 발생 및 선미부 유동 속도 저하로 인한 반류 증가를 통해 연료 절감효과를 얻을 수 있었다. 그리고 덕트의

크기에 따른 성능의 차이를 실험을 통하여 보였으며, 이에 따라 덕트의 크기에 대한 최적화 과정의 필요성을 검증하였다.

Inukai et al. [5]는 앞선 연구에 이어 반원형 덕트와 원형 덕트를 부착한 모형선의 저항 및 자항 시험을 실시하여 반원형 덕트의 효율성을 직접 검증하였다. 시험 결과 반원형 덕트는 덕트 반지름이 프로펠러 반경의 70%일 때 최고 효율을 나타냈으며, 5%의 연료 절감 효과를 달성하였다. 이는 종래의 원형 덕트보다 효과적이었으며, 이 연구로부터 밀지 보오텍스가 강하게 나타나는 영역은 상부 반원 영역이고, 이에 해당하지 않는 하부 반원을 생략하여 불필요한 저항의 증가를 방지할 수 있음을 밝혔다.

이외에도 신현준 외 [8]는 선미부에 부가물 장착을 용이하게 하기 위하여 반원형 부가물이 설치될 결합 홈을 미리 설계단계에서 반영하는 선형을 개발하여 설치 비용 및 시간을 절약하였고, 최영달 외 [9]는 반원형 덕트에서 나아가 부채꼴형상 덕트를 개발하였다.

본 연구에서는 KVLCC2M의 에너지 절감을 위한 반원형 덕트의 변수연구를 시행하였으며, 선행연구에 따라 덕트의 크기와 길이방향 위치를 변수로 하여 12가지 계산 조건들을 설정하였다. [6] 그리고 후류 유동 정류를 통한 선박 저항의 감소와 반류의 증가에 따른 반류비 증가를 기준으로 각 결과를 분석하였고, 이를 바탕으로 부채꼴형 덕트를 새로이 설계하여 그 효과를 분석하였다.[5]

2. 대상 선박 및 수치해석 기법

2.1 대상 선박

연구의 대상 선박은 KVLCC2M으로, 이는 선박해양플랜트 연구소(Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KRISO)에서 설계된 KVLCC2의 선미부 선형을 개선한 선형으로, 선미부의 개선된 일부분을 제외하고 KVLCC2와 일치하는 선형을 가진다. 본 연구에 사용된 모형선의 제원은 Table. 1과 같다.

Table. 1 Principal particulars of KVLCC2M

	KVLCC2M	KVLCC2M Model
Scale [m]	1	1/100
Lpp	320	3.2
B/Lpp	0.01813	0.01813
D/Lpp	0.0650	0.0650
S0/Lpp ²	0.2668	0.2656
Cb	0.8099	0.8098
Propeller Diameter [m]	9.86	0.0986

2.2 계산영역 설정 및 수치해석 기법

2.2.1 계산영역 설정

계산 영역은 EDISON에서 제공하는 해석자의 매뉴얼[4]를 참고하여 Fig. 2와 같이 설정하였다. 선체의 Lpp를 기준으로 선수부에서 앞으로 1.5 L 만큼, 선미부에서 뒤로 3 L만큼의 영역을 설정하였으며, 선수부와 선미부를 더 조밀하게 가공하기 위하여 블록을 세분화했다.

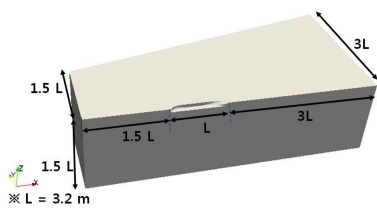


Fig. 2 Computational domain

2.2.2 수치해석 기법 및 신뢰도 평가

격자 생성은 상용 프로그램인 Trelis을 사용하였고, 계산은 EDISON에서 제공하는 선박 저항 성능 추정 S/W를 이용하였다. 수치해석에 사용된 격자는 비정렬 격자로서 전체 격자수는 약 300만개의 격자를 사용하여 계산 정확도를 최대화하였고, 유동이 들어오는 선수부와 유동이 나가며 부가물이 부착되는 선미부에 주로 격자를 세분화하여 배치하였다.

본 연구에 들어가기 전에, 먼저 나선에 대한 CFD 계산을 수행하여 이를 서울대학교 선박저항성능 연구실에서 실험한 모형 시험 결과와 비교하여 격자의 신뢰도를 평가하였다.

Table. 2 Comparison of model test and CFD results

	Model Test	CFD
Scale	1	1/100
Resistance [N]	4.287	3.901
Error [%]	0	9%

Table. 2에 따르면 9%의 오차가 발생하였다. 이는 CFD 계산 시 몰수체로 계산을 수행하기 때문에 조파저항이 반영되지 않아 생긴 오차로서, Raven et al. [10]에 따르면 KVLCC2의 실선에서의 조파저항은 전체 저항의 약 12%에 해당하고, 모형선의 경우 이보다 더 작은 값을 가진다고 한다. 이를 고려하여 조파저항을 제외하고 다시 계산해보면, 3.4%의 충분히 작은 오차를 확인할 수 있으며, 격자의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

3. 반원형 덕트 부가물 설계 및 해석조건

3.1 반원형 덕트 제원

이중모형 선체로 해석하기 위해 사분원 형태로 만들어졌다. 또한, 유동을 모아주기 위해 프로펠러에 가까이 갈수록 반지름이 줄어들게 하였다. Fig. 3은 프로펠러에서 바라보았을 때의 반원형 덕트의 정면도(a)와 측면도(b)이다.

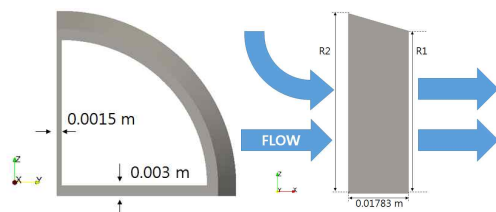


Fig. 3 Particulars of semicircular duct

부가물의 지지대 두께는 모두 0.003 m로 동일하였으며, 다만 중심 지지대의 경우 이중모형 선체를 사용하기 때문에 좌우대칭을 위해 0.0015 m의 두께를 가졌다. 또한, 부가물의 전체 폭(최대 반원과 최소 반원사이 거리)은 KVLCC2의 허브의 길이의 80%로 통일하여 0.01783 m로 통일하여 길이방향 위치를 변수를 설정 할 수 있도록 하였다. 위 그림에서 R1은 작은 원의 반지름을 나타내고, R2는 큰 원의 반지름을 나타낸

다.

3.2 설계변수 설정

선행연구에 따라 덕트의 반지름과 길이방향 위치를 설계 변수로 설정하였다. Imukai et al. [5]의 선행연구를 따라 프로펠러 반경의 70% 기준으로 하여 프로펠러의 반경(R, 0.0493 m)의 0.65, 0.70, 0.75, 0.8배의 반지름을 가지는 반원에서 0.1R 만큼 반지름이 커지는 형상으로 4가지 크기의 덕트 형상을 생성하였다. 또한, 선미부에서 프로펠러 위치로부터 세 가지 거리(덕트 후방 x좌표 : -0.0727(I), -0.07493(II), -0.07716(III))를 설정하여 각 크기별로, 각 위치에서 총 12개의 격자를 생성하여 계산을 실시하였다. 계산조건 설정 내역은 Table. 3에 정리하였다.

Table. 3 Summary of case setting

Radius [R]		Mounting Location of Duct		
R1	R2	I	II	III
0.65	0.75	Case1	Case5	Case9
0.70	0.80	Case2	Case6	Case10
0.75	0.85	Case3	Case7	Case11
0.80	0.90	Case4	Case8	Case12

4. 해석 결과

선행 연구에서 밝혀진 대로 유동 정류를 통한 저항 감소와 반류 개선을 통한 추진 효율 증대 두 가지를 기준으로 하여 계산 결과를 평가하여 최적화 설계를 진행하였다.

4.1 유동 정류를 통한 저항 감소

EDISON을 통한 계산 결과 추정된 각 계산조건 별 부가물 부착시의 저항은 Table. 4 와 같다.

Table. 4 Computed Model Resistance for semicircular duct [N]

CASE	Resistance	CASE	Resistance
CASE 1	3.895	CASE 7	3.911
CASE 2	3.893	CASE 8	3.937
CASE 3	3.908	CASE 9	3.894
CASE 4	3.929	CASE 10	3.894
CASE 5	3.883	CASE 11	3.925
CASE 6	3.896	CASE 12	3.933
Bare hull	3.901		

덕트의 반지름이 프로펠러 반경의 65%, 70%일 때 주로 저항값이 작게 계산되었고, 반원형 덕트의 길이방향 위치보다는

크기에 영향을 많이 받았다. 이는 선행연구의 결과와 일치하며, 본 선박의 유동정류에 있어 최적화 된 부가물의 크기임을 의미한다. 특히, CASE 5에서 저항이 가장 크게 줄어들었으며, 나선대비 약 0.46%의 저항이 감소되었다.

위 모형선에 대한 실험 결과를 바탕으로 실선의 유효동력(EHP)을 추정하여 반원형 덕트의 효과를 검증해보았다. 모형선-실선의 마찰저항은 ITTC-1957법을 사용하였고, 실선 저항의 추정은 서울대학교 선박저항성능 연구실에서 사용하는 2차원 외삽법(Froude법 기준)을 사용하였다. 각 실험 조건 별로 추정된 실선의 유효동력은 Table. 5에 나타냈다.

Table. 5 Full-scale ship EHP for semicircular duct [kW]

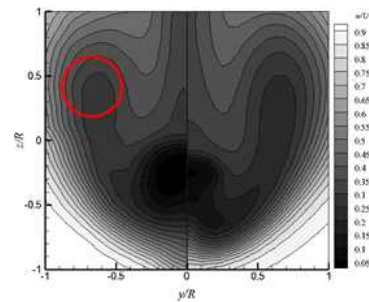
CASE	EHP	CASE	EHP
CASE 1	12,064	CASE 7	12,195
CASE 2	12,048	CASE 8	12,407
CASE 3	12,171	CASE 9	12,057
CASE 4	12,342	CASE 10	12,057
CASE 5	11,967	CASE 11	12,309
CASE 6	12,073	CASE 12	12,375
Bare hull	12,114		

앞선 결과와 마찬가지로 CASE 5에서 유효동력이 가장 크게 개선되었으며, 약 1.21%가 개선되었음을 확인 할 수 있다.

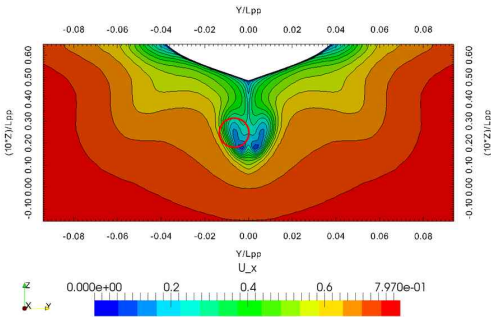
4.2 반류개선을 통한 프로펠러의 성능 개선

4.2.1 나선의 공칭반류

Park et al. [11]는 프로펠러 앞에 위치하는 부가물의 경우 공칭반류 재현의 중요성을 강조하였다. Fig. 4는 앞선 연구에서 발표한 KVLCC2 나선의 공칭반류분포와 본 연구에서 계측된 공칭 반류 분포를 비교한다.



(a) Nominal wake (left; measurement by SNUTT(seo et al., 2013), right : CFD (2014) [12])



(b) Nominal wake (Bare hull)
Fig. 4 Nominal wake of KVLCC2

Fig. 4 를 통해 저속비대선의 특징인 hook-shape vortical wake가 본 연구의 계산 결과에서도 뚜렷하게 나타났음을 확인할 수 있다. 나선에서의 반류비(w)는 0.4821로 측정되었으며, 이러한 반류분포를 개선하여 반류비를 증가시켜 추진 효율을 증가 시킬 것이다.

4.2.2 반원형 덕트를 통한 반류 개선

반원형 덕트를 통해 개선된 반류비는 Table. 6과 같다.

Table. 6 Wake fraction (w) for semicircular duct

CASE	Wake fraction	CASE	Wake fraction
CASE 1	0.5682	CASE 7	0.5660
CASE 2	0.5669	CASE 8	0.5656
CASE 3	0.5746	CASE 9	0.5634
CASE 4	0.5649	CASE 10	0.5718
CASE 5	0.5662	CASE 11	0.5663
CASE 6	0.5712	CASE 12	0.5646
Bare hull	0.4821		

반류비가 가장 개선된 조건은 CASE 3였으며, 이의 공칭반류 분포는 Fig. 6과 같다.

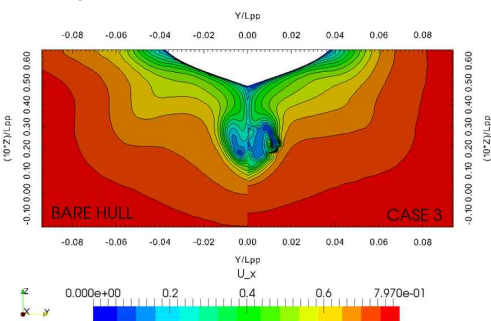


Fig.5 Comparison of bare hull(left) and case 3(right)

Fig. 5를 보면 앞서 나선에서 보이던 hook-shape vortical wake에 변화가 생겼고, 이를 통해 반류비가 개선된 것으로 보인다.

현재 저항시험이 수행되지 않아 추력감소계수(1-t)를 알 수 없기 때문에, 선각효율 및 제동동력(BHP)를 통해 에너지 절감 비율을 직접 계산할 수는 없었지만, 개선된 반류비는 에너지 절감에 긍정적인 영향을 줄 것으로 생각된다.

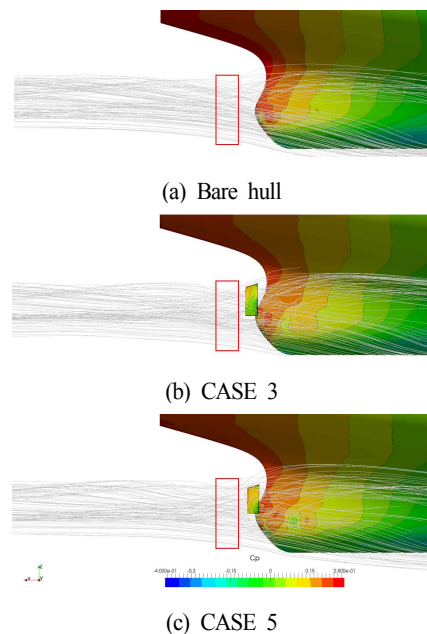
또한, Inukai et al. [5]에 따르면 저항 감소를 통한 유효마력의 증가는 약 2%에 해당했고, 나머지 3%는 개선된 반류 및 덕트에 의한 추력 발생으로 인해 발생한다고 하였으므로, 추가적인 실험을 통해 CASE 3의 추력 감소 계수를 측정하고, 개선된 에너지 절감 비율을 직접 계산해 보는 것이 충분히 의미 있을 것으로 생각된다.

4.3 후처리를 통한 추가 분석

4.1과 4.2에서 각각 선정된 최적 조건의 연료 절감 효과에 대한 이론적 근거를 찾기 위하여, 각각의 압력 분포 및 프로펠러 평면을 지나는 유선을 나선과 비교 분석하였다. 덕트의 경우 선미부의 유동에 주로 영향을 주기 때문에 선미부에 대한 분석을 중점적으로 실시하였다.

4.3.1 선미부 압력 분포 및 유선

선미부의 압력 분포와 프로펠러 평면을 지나는 유선은 Fig. 6과 같다.



(c) CASE 5
Fig. 6 Comparison of pressure distribution and streamline

Fig. 6에서 붉은 색 사각형으로 표시한 부분은 프로펠러가 설치되는 공간이다. 반류 개선 효과가 가장 컸던 CASE 3의 유선을 보면, 선미를 지나는 유선들이 반원형 덕트에 의해 프로펠러로 모여들게 되고, 이에 의한 추력 증가가 발생하여 연료 효율 증가를 야기한다고 추측 할 수 있다.

4.4 부채꼴형 덕트 설계

4.4.1 부채꼴형 덕트 제원

Fig. 7는 프로펠러에서 바라본 부채꼴형 덕트의 정면도와 측면도이다.

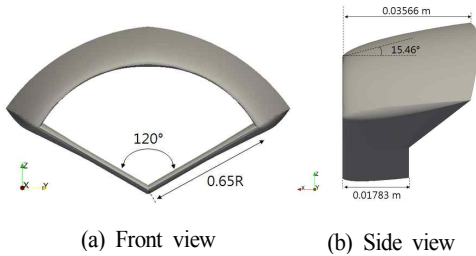


Fig. 7 Particulars of developed semicircular duct

앞서 분석된 결과를 바탕으로 하여 반원형 덕트를 개선하여 부채꼴형 덕트를 설계하였다. 덕트 크기는 앞서 최적화 크기로 선정된 0.65R를 사용하였고, 기존의 각도인 15.46°를 유지하며 점점 커지는 형상을 가졌다. 하부의 폭은 기존의 크기를 유지하였으며, 유동을 모아주는 효과를 극대화하기 위해 덕트 상부의 길이를 2배로 확장하였다. 그리고 불필요한 저항을 감소시키기 위해 중심부의 지지구조물을 제거하였고, 선행 연구에 따라 덕트 단면의 형상을 날개형상(NACA 0012 airfoil)으로 하여 저항을 줄였다. 추가적으로, 기존의 반원형에서 더욱 축소하여 부채꼴 형태로 설계하여 불필요한 저항을 최소화하였다.

4.4.2 해석 결과

부채꼴형 덕트에 대한 해석 결과는 Table. 7과 같다.

Table. 7 Performance of developed semicircular duct

	Result
Resistance [N]	3.876
Full-Ship EHP [kW]	11,909
Wake fraction (w)	0.5723

부채꼴형 덕트를 통해 0.64%의 저항이 감소되었고, 실선의 유효동력은 1.68%가 감소하였다. Inukai et al. [5]에 따르면

1~2%의 유효동력 개선을 통해 각각 3~5%의 총 에너지 절감 효과를 얻었다고 한다. 그러므로 본 연구 결과 약 4%의 총 에너지 절감 효과를 기대할 수 있다.

4.4.3 후처리를 통한 추가 분석

부채꼴형 덕트 부착시 공칭반류 분포와 추진기 평면에서의 축방향 속도 분포는 Fig. 8, 9 과 같다.

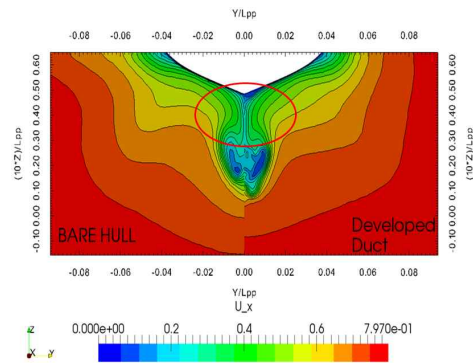


Fig. 8 Comparison of bare hull(left) and developed duct(right)

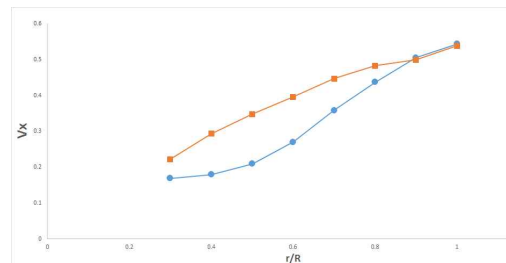


Fig. 9 Radial distribution of axial velocity components at propeller plane (square : barehull, circle : developed duct)

Fig. 8을 보면 덕트에 의한 유동 정류 효과에 의해 나선에 비해 붉은 색 원 안에 있는 고속 영역이 상대적으로 넓어졌음을 확인 할 수 있다. 고속 유동에 의한 흡입 효과로 전체 반류의 크기가 상대적으로 감소하였음을 나타내었고, 이를 통해 저항 감소의 원인을 추정할 수 있었다. Fig. 9과 같이 프로펠러 평면에서의 축방향 속도를 정량적으로 비교하였다. 프로펠러 허브 근처에서 급격하게 변하는 유동이 덕트의 유동 정류 효과에 의해 상대적으로 완만한 변화 폭을 보였다. 또한 각 선행에서의 반류비 비교를 통해 실험값 대비 약 2%의 반류비 개선을 보였다. [12] 이는 CASE 3와 마찬가지로 연료 효율 증가에 긍정적인 영향을 줄 것으로 기대된다.

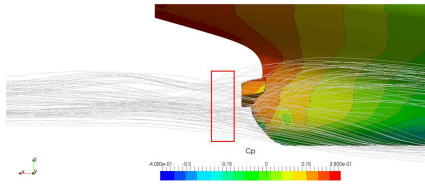


Fig. 10 pressure distribution and streamline of developed duct

Fig. 10를 통해 앞서 밝혔던 유동을 모아주는 효과가 더욱 뚜렷하게 나타난 것을 확인 할 수 있었다. 특히, 앞선 반원형 덕트의 경우 단순한 기둥 형태의 두께를 가졌으므로 유동이 이에 부딪혀 맴도는 형태를 확인 할 수 있었지만, 부채꼴형 덕트는 날개 단면을 가져 이러한 현상이 크게 감소하였고, 전 반적으로 안정된 유선을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 KVLCC2M에 대한 반원형 덕트의 변수연구를 진행하였다. 저항성능이 가장 개선된 조건은 CASE 5였고, 반류가 가장 개선된 조건은 CASE 3였다. 후처리를 통해 추가적인 분석을 하여 에너지 절감 효과의 이론적 근거를 찾았으며, 그 결과 반원형 덕트의 형상에 의해 선미부의 유동에 생기는 변화에 기인한 것으로 판단하였다. 이를 바탕으로 이러한 효과를 극대화 할 수 있는 부채꼴형 덕트를 새로이 설계하였으며, 그 결과 1.68%의 유효동력 감소를 확인하였다. 선행연구에 따르면 이를 통해 최대 4%의 에너지 절감 효과를 보일 것으로 추정된다.

본 연구에서는 모형선의 저항 값과 반류 분포를 분석하여 변수연구를 진행하였지만, 프로펠러와 유동의 상호작용을 예측할 수 없어 실질적인 에너지 절감 효과를 계산 할 수는 없었다. 하지만, 반원형 덕트의 효과를 충분히 입증하였으며, 차후에 개선된 반원형 덕트에 대한 모형시험을 진행하여 구체적인 에너지 절감 효과를 계산할 수 있고, 차후에 발전된 형태의 덕트를 설계하는데 참고 할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0020557)

References

- [1] 2003, Kang, Y.D., Kim, M.C., Chun, H.H. "A Study on the Design of a Biased Asymmetric Preswirl Stator Propulsion System", *KSOE*, pp.32-36
- [2] 2012, Lee, K.J., An, J.S., Yang, S.H., "A Study on the Development of Energy-Saving Device "Crown Duct"", *KSOE* Vol. 26, No. 5, pp.1-4.
- [3] 1988, A. Masuko, Y. Koshiha, T. Ishiguro, "Energy Saving Device for Ships IHI-L. V. Fin", *IHI Engineering Review*, Vol. 38, No. 6, pp.392-397
- [4] 2015, "SNUFOAM Ship Resistance for EDISON 사용설명서", 서울대학교 선박저항성능 연구실.
- [5] 2007, Inukai Yasuhiko, Itabashi Masahiro, Sudo Yasuhiro, Takeda Takeshi, Ochi Fumitoshi, "Energy Saving Device for Ship, IHIMU Semicircular Duct", *IHI Engineering Review*, Vol. 40, NO. 2.
- [6] 2013, Shin, H.J., Lee, K.H., Han, M.R., Lee, C.Y., Shin, S.C., "Pre-Swirl Duct of Fuel Oil Saving Device Design and Analysis for ship", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol 50, No. 3, pp.145-152.
- [7] 2011, Inukai Yasuhiko, Kaneko Tadaaki, Nagaya Shigeki, Ochi Fumitoshi, "Energy-Saving Principle of the IHIMU Semicircular Duct and Its Application to the Flow Field Around Full Scale Ships", *IHI Engineering Review*, Vol. 44, No. 1.
- [8] 2012, 신현준, 이강훈, 한명륜, 이창열, 이종승, 허의범, "선박용 추진 장치", 현대중공업 주식회사.
- [9] 2012, 최영달, 정승규, 정성욱, 김현준, 김지웅, "선박 선미 유동 개선용 부채꼴 형상 덕트 부가물", 에스티엑스조선해양 주식회사.
- [10] H.C. Raven, A. van der Ploeg, A.R. Starke, "TOWARDS A CFD-BASED PREDICTION OF SHIP PERFORMANCE --- PROGRESS IN PREDICTING FULL-SCALE-RESISTANCE AND SCALE EFFECTS", *MARIN (Maritime Research Institute Netherlands)*, Portugal.
- [11] 2015, S.Park, G.Oh, S.H.Rhee, B.-Y.Koo, and H.B.Lee, "Full Scale Wake Prediction of an Energy Saving Device by Using Computational Fluid Dynamics," *Ocean Engineering*, Vol. 101, June 201, pp.254-263.
- [12] 2000, Kim, W.J., Van, S.H., Kim, D.H., Lee, C.J., "Experimental Study on Local Flow Characteristics and Propulsive Performance of Two KRISO 300K VLCCs with Different Stern Shapes", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 37, No. 3, pp. 11-20