

## 순항속력 작전요구도 조정을 통한 함정 운용성능 개선 효과 연구

백현민<sup>1</sup> · 김철규<sup>2</sup> · 서정훈<sup>3</sup> · 이원주<sup>4</sup> · 이지웅<sup>†</sup>

(Received November 4, 2019 ; Revised November 5, 2019 ; Accepted November 8, 2019)

### A study on improvement of performance for fighting ships by adjusting required cruise speed

Hyun-min Baek<sup>1</sup> · Cheol-kyu Kim<sup>2</sup> · Jeong-hoon Seo<sup>3</sup> · Won-ju Lee<sup>4</sup> · Ji-woong Lee<sup>†</sup>

**요약:** 해군에서 운용하는 전투함의 순항속력 작전요구도(ROC)는 15~18kts 이나, 주력 전투함을 기준으로 연간 운용 속력 패턴을 분석한 결과, 5~15kts 운전이 전체 운전 시간의 80% 이상을 차지한다. 특히, 이중 가장 많은 운전비율을 보이는 8~12kts 범위에서 경제성이 극대화 되도록 추진용 디젤엔진을 다시 선택할 경우, 연간 약 13.8%의 연료유 절감 효과가 있으며, 이를 통해 함정의 수명주기 동안 약 30억의 예산 절감 효과가 있을 것으로 추산되었다. 결과적으로, 연료소비량의 절감은 함정의 작전반경과 작전 지속시간의 증가로 이어지며, 절감된 연료유 탑재 무게(약 70~75ton) 대신, 수직발사대 3개 모듈(24cell)을 탑재 하여 미사일 운용 시 발사 불가구역을 제거하거나 다양한 목적의 무장(대함, 대잠, 대지) 운용 옵션을 확장할 수 있다. 그 외에도 선체 크기를 함께 증가시키는 설계를 통해 추가 공간을 확보하여 대함 미사일을 8~16기를 더 장착하거나 해상작전헬기를 추가 적재가 가능해진다. 단, 순항속력을 감소시키는 방법은 가스터빈에 대하여 높은 신뢰도와 정비성이 요구되며, 목적항해 시 경제성이 저하되고, 지휘관이 선택 가능한 속력 사용의 선택 옵션이 감소하게 할 수 있다는 제약이 있다.

**주제어:** 순항속력, 작전요구도, 디젤엔진, 최적화, 경제성, 무장 탑재 능력

**Abstract:** The warships of the Republic of Korea Navy have the Requirement of Operational Capability (ROC) that requires a speed of 15 to 18 kt at cruise. However, according to the analysis of the operation patterns of actual ships for a year, more than 80% of its total operation is conducted at the speed of 5-15 kt. If the diesel engines for propulsion were re-selected to maximize the economic efficiency in the speed of 8 to 12 kt, which results in the largest ratio, the fuel saving effect is estimated at about 13.8% per year. This is equivalent to savings of about \$ 2.5 million over the total life cycle of a battleship. Furthermore, saving fuel also leads to an increased operational area and duration. Instead of carrying fuel weighing 70 to 75 ton, a vertical launching system with 3 modules (24 cells) with the similar mass could be mounted, thereby reducing the launch limit angle and widening the operation of all weapon types (anti-surface, anti-air, and anti-submarine). With a hull expansion, additional anti-surface missiles (8 to 16 cells), a harpoon, or a marine operation helicopter can be loaded. However, operating at a lower cruise speed has disadvantages such as the requirement of higher reliability and maintenance for the gas turbines, decreased economic efficiency in destination voyage, and reduced speed options for the commander.

**Keywords:** Cruise speed, Requirement of operational capability (ROC), Diesel engines, Optimization, Economics, Armed ability

## 1. 서론

해군 전투함정에 대한 작전요구성능(ROC, Requirement of Operational Capability) 중 순항속력은 약 15~18kts 가 요구되며 최대속력은 28~32kts 가 요구된다. 통상 해군의 전투함정은 순항속력 이하에서의 추진(목적항해 및 경비 임무 등)을 위해 추진용 디젤엔진을 사용하고 0kts에서 최대

속력까지 전 속력범위의 추진(전투를 포함한 실전상황 및 각종 훈련 등)을 위해서는 추진용 가스터빈을 사용하는 CODOG(Combined Diesel Or Gas turbine) 추진체계를 채택하고 있다.

전력 생산을 위한 발전체계는 통상 가외(加外)성(redundancy)을 고려하여 4대의 발전기로 구성되며 함정의

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6101-7389>): Assistant Professor, Division of Marine IT, Korea Maritime & Ocean University, Taejong-ro 727, Yeongdo-gu, Busan, 49112, Korea, E-mail: woongengine@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4571

1 Lieutenant Commander, R.O.K Navy Headquarters, E-mail: jeapo2812@naver.com, Tel: 031-685-7571

2 Lieutenant Commander, R.O.K Navy Headquarters, E-mail: chul3812@navy.mil.com, Tel: 031-685-7571

3 Lieutenant Commander, R.O.K Navy Headquarters, E-mail: chui58@navy.mil.com, Tel: 031-685-7571

4 Assistant Professor, Division of Maritime Engineering, Korea Maritime & Ocean university, E-mail: skywonju@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4262

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

추진체계와 발전체계를 포함하는 기관체계는 함정 수면하 공간의 50%를 차지한다. 현대의 전투함정은 이와 같이 추진 체계가 차지하는 공간과 무게를 절감하여 추가 무기체계를 탑재함으로써, 함정의 전투력을 개선시키는 과정에 있다[1].

함정의 무기탑재능력을 개선시키는 하나의 방법으로 해군이 채택한 방식은 추진체계의 변화이다. 해군은 대구급 호위함(FFG-batch II)을 시작으로, 전투함의 추진체계를 점차 기계식(mechanical propulsion)에서 복합식(hybrid)으로, 그리고 최종적으로 전기식(full electric propulsion) 추진체계로 변화시키고자 노력하고 있다. 이 과정에서 기계식 추진체계가 갖는 기관 시스템의 축계에 대한 종속성을 제거, 장비의 배치 유연성이 증가되면서 공간 활용성이 개선됨에 따라 무기 탑재량이 증가되고 대잠 정속능력이 개선되었다.

그러나 추진과 발전을 위한 전체 기관체계를 구성하는 원동기 수량이 감소(8대→5대)하면서 가외성이 감소되었고 추진용 디젤엔진을 대체한 발전용 디젤엔진의 운전시간 비율이 대폭 증가하면서 정비성(maintenance)이 감소되었다 [2]. 기관체계의 가외성은 가동 및 대기되는 원동기의 전체 수량에 비례하고, 정비성은 각 원동기의 운전 시간에 반비례한다. 따라서 기계식 추진체계에서 전기식 추진체계로 전환될수록 정비성과 가외성은 감소할 것으로 판단된다.

가외성과 정비성의 감소 없이 즉, 현재의 기계식 추진방식을 유지하면서 함정의 탑재 여유를 증가시키기 위해서는 추진용 디젤엔진의 운전 속력범위를 조정하는 방법이 검토될 수 있다.

본 연구의 목적은 해군에서 운용 중인 전투함의 목적항해 및 경비 임무 등에 사용되어 경제성을 향상시키기 위해 탑재되어 있는 추진용 디젤엔진의 실제 연간 운용속력 자료를 분석하여 디젤추진의 속도 최적화 구간을 도출하고 연료소비량 절감 정도 및 공간 확보 등을 분석하여 함정의 운용성능 향상 가능성에 대하여 고찰하고자 함이다.

## 2. 함정의 연간 운용속력 분석 및 응용

### 2.1 함정의 연간 운용속력 분석

본 절에서는 해군에서 운용하는 전투함 중 연안작전 임무를 주로 수행하는 호위함형의 연간 운용 패턴을 분석한 결과를 보고한다. 함정명, 측정 년도, 기타 보안과 관계된 내용은 공개치 않았다.

실제 전투함형의 연간 운용속력을 매 시간단위로 기록, 누적한 결과를 Figure 1에서 보이며, Figure 2에서 5 kts 단위로 구분하여 나타낸 연간 함정 운용 속력의 비율을 보인다.

Figure 3은 동절기(12~3월), 하절기(6~9월)의 함정 운용 속력의 비율을 비교하여 나타낸다.

5~10kts의 속력 운용비율은 ROC 상 순항속력이 포함되는 15~20kts 범위 운용비율의 10배에 해당되며, 10~15kts의 속력 운용비율은 순항속력 범위의 7배에 해당된다. 평균적으로 파고가 높게 유지되는 동절기에 1~10kts 운용 비율이

전체 운용 비율의 90% 이상을 차지하며, 하절기에는 5~15kts 운용 비율이 전체의 80% 이상을 차지한다.

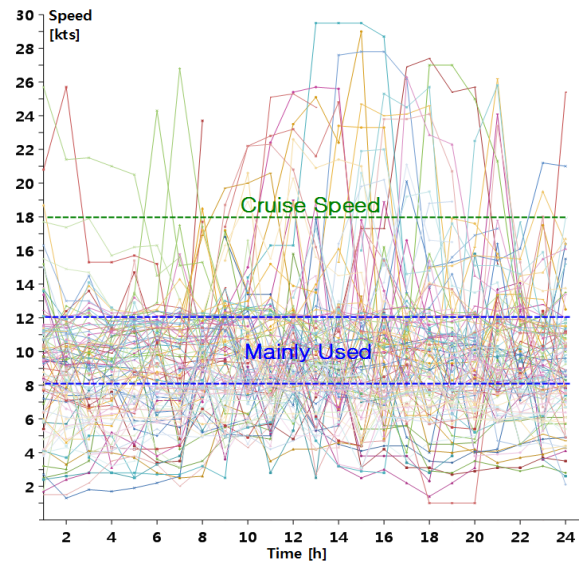


Figure 1: Speed record by cruise and mainly used speed of a naval fighting ship

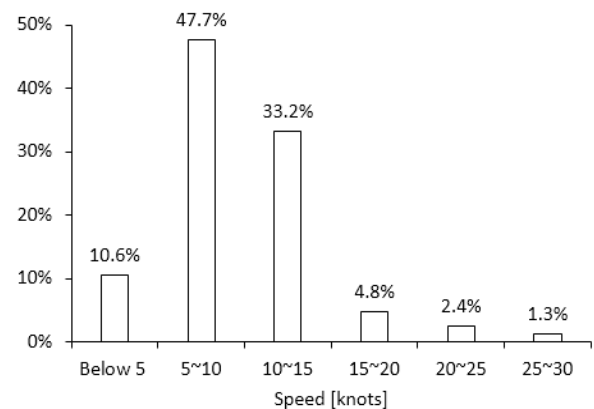


Figure 2: Ratio of a naval fighting ship's speed tendency of a year

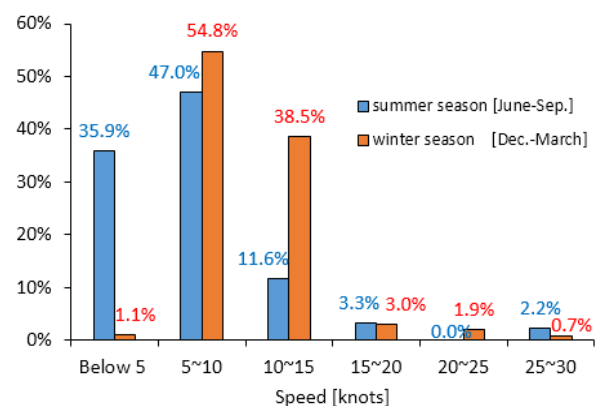


Figure 3: Ratio of a naval fighting ship's speed tendency by season

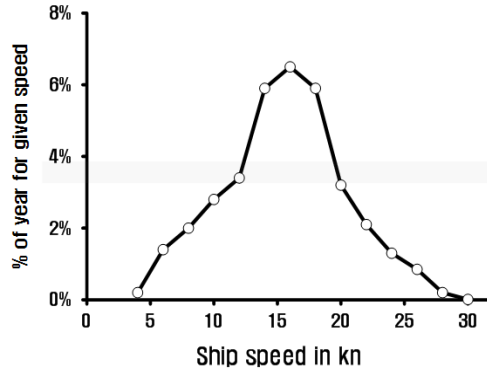


Figure 4: Mission profile for frigate of US navy [3]

ROC 상 순항속력 범위인 15~18kts의 연간 운용 비율은 매 항해 차수마다 편차는 있으나 최소 2% ~ 최대 13% 범위로, 매우 낮은 비율(평균 4.8%)을 차지한다. Figure 4의 약 15~18kts 속력에서 가장 많은 운용 비율을 보이는 미해군의 호위함형의 운용 속력 패턴[3]과는 대조적인 결과를 보인다.

조사된 전투함정이 주로 운전되는 속력 범위는 ROC 상의 순항속력보다 낮은 5~15kts 사이라 할 수 있으며, 함정의 실제 운용속력을 고려하여 디젤엔진에 국한하여 최적 선택할 경우, 디젤엔진의 성능은 5~15kts 사이에서 특히, 가장 많은 운전 비율을 보이는 평균 8~12kts 구간에 최적화될 필요가 있다고 판단된다.

## 2.2 경제성(연료소비율) 개선을 위한 엔진 최적화

Figure 5는 2.1절에서 다른 호위함형의 운용속력에 따른 실제 연료소비율을 나타낸다. 함정이 주로 운전되는 속력 구간(Figure 1, Figure 2)인 8~12kts에서의 연료소비율(g/kWh)은 현 ROC 상 순항속력(18kts)의 연료소비율보다 약 1.2~2 배 가까이 높다. 즉, 현재 전투함정은 경제적 운전을 위한 함정의 최적 조건(ROC)에 비해 비경제적으로 운전되어지고 있다.

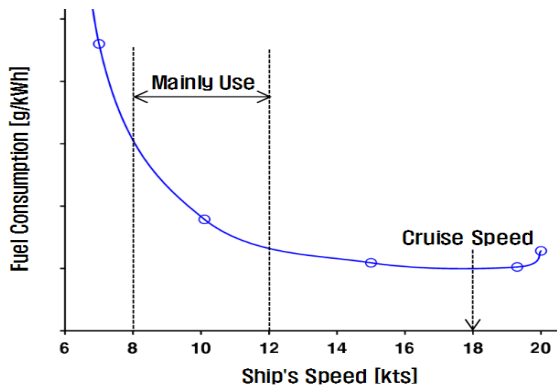


Figure 5: Fuel consumption when diesel engine used for a naval fighting ship

본 절에서는 18kts에서 연료소비율이 최소가 되도록 선택

된 현재 전투함정의 추진용 디젤엔진을 8~12kts에서 연료소비율이 최소가 되도록 다시 선택하였을 때, 연료소비율 측면에서의 경제적 효과에 대해서 검토한 결과를 보고한다.

엔진을 새롭게 선택하는 과정에서, 엔진회전수(rpm, 식 (1)의  $n$ )는 고정된 채 실린더 수의 조정, 연료분사량의 조정만을 통해 출력(BHP, Brake Horse Power)을 낮추어 요구속력에 최적화하게 되면 전체 연료소비율이 동시에 증가하게 되고(Figure 6) 추진축의 회전을 위한 토크(torque, 식 (1)의  $T$ )를 만족시킬 수 없다. 따라서 엔진의 rpm을 낮추는 방법을 통해 출력을 조정하는 방식 즉, 중고속에서 중속, 저속 범주의 디젤엔진을 선택하는 방법을 선택할 필요가 있다.

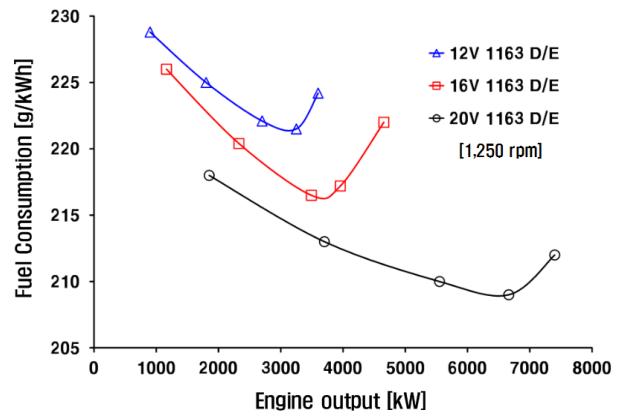


Figure 6: Measured fuel consumption rate of MTU 1163 series at factory acceptance trial

$$BHP = \frac{p_{mc} \times V \times n}{75 \times 60} = \frac{2\pi \times T \times n}{716} [PS] \quad (1)$$

여기서,  $p_{mc}$ : 정미평균유효압력,  $V$ :실린더 체적,  $n$ :회전수,  $T$ :토크를 의미한다.

이러한 방식을 통해 실제 운전 패턴에 맞는 디젤엔진을 다시 선택할 경우, 전체 연료소비율의 증가 없이 주 운전 속력 범위(8~12kts)에서 연료소비율을 최소로 할 수 있으며, 요구되는 토크를 만족시킬 수 있다는 점, 그리고 엔진의 선택폭이 넓어진다는 장점이 있다.

엔진의 실린더에서 생성된 지시마력(IHP; Indicated Horse Power)은 엔진 축 끝단에서의 제동마력(BHP)으로 전환된 후, 축계 및 프로펠러를 거쳐 함정의 추진에 필요한 유효마력(EHP; Effective Horse Power)으로 전환된다. 마력의 전달 과정에서 전체 저항( $R$ ) 및 함형과 관계되는 Admiralty 상수( $C_{adm}$ ), 배수량( $\nabla$ )이 동일할 때, 추진에 필요한 제동마력(BHP)은 식 (2)와 같이 속력( $V$ )의 세제곱에 비례한다[4].

$$BHP = \frac{V_{max}^3 \times \nabla^{\frac{2}{3}}}{C_{adm}} = \frac{V_{cruise}^3 \times C}{80\%} \quad (2)$$

순항속력은 엔진 최대출력(100%부하)의 약 80% 지점에서 결정하여 경제성을 극대화시키는 것을 가정하여 수식에 반영하였다.

기존 ROC 상 순항속력 18kts(ref.) 조건에서 추진에 필요한 추진용 디젤엔진 2대의 총 BHP는 7,200kW 이므로, 여기서 배수량 및 함형, Admiralty 계수와 관계되는 식 (2)의 상수  $C$  는 약 0.988 이다.

8~12kts 범위에서 순항속력을 달성하기 위해 새롭게 선택되는 디젤엔진 1대에 필요한 총 BHP, 달성 가능한 최대 속력의 계산결과 및 이때 필요한 rpm을 Table 1에 나타낸다. 가스터빈의 사용을 고려하여 기존에 함정에서 사용되는 감속기어 및 축계를 동일하게 유지할 필요가 있으므로, 새롭게 선택되는 디젤엔진의 rpm은 기존에 함정의 performance diagram을 참조하였다.

**Table 1:** Specification of the engine needed for cruise speed 8~12kts

| cruise Speed | Max. Speed | Max. Power (BHP) | revolution per min. |
|--------------|------------|------------------|---------------------|
| 8 kts        | 8.6 kts    | 320 kW × 2       | 600 rpm             |
| ~            |            |                  |                     |
| 12 kts       | 13 kts     | 1,100 kW × 2     | 900 rpm             |

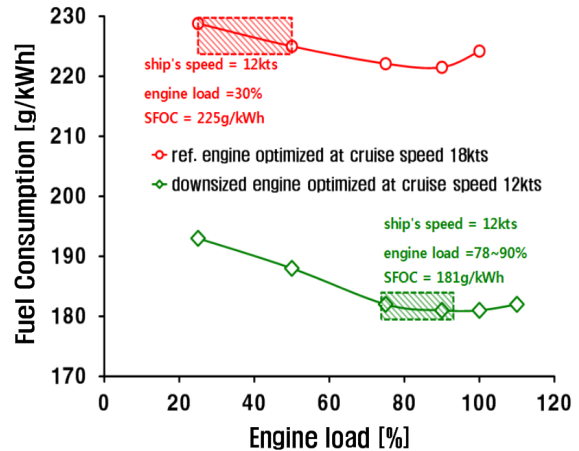
### 3. 조정된 순항속력에 따른 함정성능의 변화와 한계

순항속력 ROC를 18kts에서 12kts 이하로 조정할 경우, 엔진의 최대 운전 rpm을 낮출 수 있게 되면서 전투함정의 추진용 디젤엔진으로 소형 중저속 디젤엔진 또한 채택 가능하다.

Figure 7은 Table 1의 조건 중 순항속력 ROC를 12kts로 조정하였을 때, 함정에 탑재 가능한 실제 디젤엔진(bore : 210mm, stroke : 320mm, rpm 900, rated output : 1,200kW)의 연료소비율을 나타낸다. 비교를 위해 현재 함정에서 운용 중인 디젤엔진의 연료소비율을 함께 나타낸다[5].

순항속력 12kts 조건에 적합한 디젤엔진을 채택할 경우, 순항속력 18kts 조건 시 채택되는 디젤엔진과 달리, 주 운전속력 범위에서 연료소비율이 최적화됨에 따라 약 44g/kWh의 연료소비율 개선 효과가 있을 것으로 기대된다. 또한 엔진의 무게는 1대당 약 2ton 씩, 함정 기준 약 4 ton의 무게절감 효과가 있을 것으로 추산된다.

변화된 연료소비율은 함정의 경제성과 관계되며, 무게절감 효과는 무장탑재능력 및 연료유 적재능력과 관계된다. 또한 연료소비율의 개선과 무게의 감소는 함정의 항속거리 즉, 작전지속능력을 향상시키는 효과가 있다.



**Figure 7:** SFOC of the diesel engine optimized at cruise speed 12kts

#### 3.1 경제성(연간 연료소비량) 변화

엔진의 선택 변화가 함정의 경제성에 미치는 영향은 연료소비량의 변화에서 잘 나타난다.

Figure 8은 실제 전투함정에 탑재된 추진용 원동기의 운전 시 속력에 따른 연료소비량(총 적재량 대비 소비량)을 나타낸다.

기존 전투함정은 20kts 까지 디젤엔진으로 운전하다가 20kts 이상의 속력이 요구될 때 추진용 원동기를 디젤엔진에서 가스터빈으로 전환한다. 반면, 조정된 순항속력(18kts → 12kts) 조건에서는 13kts에서 추진용 원동기를 가스터빈으로 전환하여야 하며 기존 디젤엔진이 구동되는 13~20kts 구간은 가스터빈이 대신 구동된다.

따라서, 순항속력 ROC를 조정하게 되면 Figure 8의 ㉑ 영역에서는 연료가 소폭 절감되지만, ㉒ 영역에서는 오히려 가스터빈 구동에 따라 연료 소비량이 상당량 증가하게 된다.

그러나 2장에서 고찰한 바에 따르면 Figure 8의 ㉑ 영역에 해당하는 13kts 이하의 속력 구간은 실제 함정 운전 시간의 약 80%를 차지하는 반면, ㉒ 영역의 속력 구간이 차지하는 운전시간 비율은 약 16%에 불과하다는 점이 함께 고려되어야 한다.

변화된 연료소비 패턴과 각 속력별 운용 시간의 비율을 고려하여, 순항속력 ROC 개선 전과 후의 연료소비량 변화를 계산한 결과, ROC 개선 시 연간 연료소비량의 약 13.8%(약 21만 리터)의 연료유 절감 효과가 있으며, 해군에서 사용하는 고유황 경유의 면세가(약 450~500원/리터)를 고려 시 연간 약 0.95~1.05 억원의 예산 절감이 가능할 것으로 추산되었다. (함정의 수명 주기 약 30년)을 고려 시, 약 30억 절감 가능)

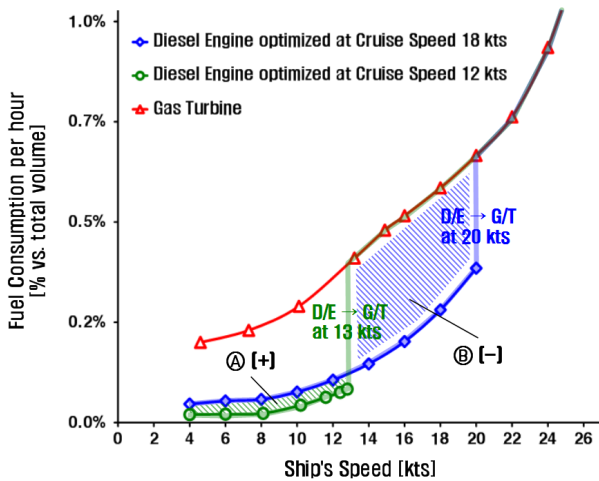


Figure 8: Fuel Consumption according to prime mover for propulsion

### 3.2 작전능력의 변화

함정의 연료소비량이 약 13.8% 절감된다는 점은 동시에 함정의 작전반경과 작전 지속시간이 약 13.8% 증가한다는 것을 의미한다.

또는 동일한 작전반경과 작전 지속시간 조건에서 총 연료유 적재량의 13.8%에 해당하는 연료유 무게(약 70~75톤)만큼의 선택 가능한 다른 화물의 적재가 가능하다는 것을 의미한다. 전투함정에서 화물은 곧 무기체계, 탄약 등 전투에 사용되는 화물이다.

순항속력 ROC 조정을 통해 절감 가능할 것으로 추산되는 70~75톤의 무게만큼 함정에 추가 탑재 가능할 것으로 판단되는 무기체계는 먼저 수직발사대(VLS, Vertical Launcher System)를 들 수 있다. 수직발사대는 현대 함정에서 사용되는 유도무기체계의 핵심 구성장비로, VLS 1개 모듈(8개 Cell)의 무게는 15톤이며, VLS 구성을 위한 부수장비의 무게는 2.472톤, Cell안에 들어가는 탄의 무게를 0.9톤으로 보았을 때, 총 3개 모듈(24개 Cell)의 운용을 꾀할 수 있다. Table 2는 3개의 모듈로 구성된 수직발사대의 무게 체원을 나타낸다[6].

Table 2: The weight of 3VLS module in Operation

| Module | Component | Arm (SSM) | Total |
|--------|-----------|-----------|-------|
| 45t    | 7.42t     | ○○t       | □□t   |

수직발사대를 운용함으로써 얻을 수 있는 작전능력으로는 미사일 운용 시 발사 불가구역 제거, 24개 cell에 각기 다른 목적의 유도탄(대함, 대잠, 대지)을 통한 무장 운용의 다양화를 들 수 있다.

다음은 수상 전투함정에서 주력 무기체계로 활용되는 대함미사일(SSM, Surface to Surface Missile)을 들 수 있다. 대함미사일은 발사대(약 0.7톤)와 미사일(발사관 포함 약 1.1

톤)로 구성되어 있으며 발사대 1기에 최대 4기의 미사일을 장착할 수 있으므로[7], 약 70~75톤의 무게 절감량 조건에서 최대 56기까지 미사일을 추가적재 가능하다.

그러나 현실적인 획득비용과 적재공간(갑판)을 고려할 필요가 있으므로 50~60톤의 무게만큼 선체(steel)의 크기를 증가시켜 적재공간을 확보하고 약 8기(10.2톤)~16기(20.4톤)의 미사일을 추가적재 하는 안이 적합하다고 판단된다. 또는 동일한 방법으로 함미갑판과 격납시설을 확충 시키고 대함미사일의 추가적재 대신에 약 5~7톤[8]에 해당하는 해상작전헬기 1대와 부가적인 탑재무장을 추가 운용하는 안도 적합하다.

이와 같은 방법을 적용하면 승조공간과 내부 장비 간의 구성 간격을 확장시킬 수 있기 때문에 함정의 승조환경 개선과 장비의 정비성 개선을 동시에 달성할 수 있다.

### 3.3 조정된 순항속력 적용 시 제약

화물선, 상선 등을 건조 시, 선주(owner)는 수명주기 간 선박이 운항될 항로와 운항 주기, 화물의 종류에 따라 주운항속력과 최대요구속력을 정하여 이를 조선소에 제시한다. 이후, 조선소는 해당 속력에 따라 추진용 엔진의 MCR(Maximum Continuous Rating)과 NCR(Nominal Continuous Rating)을 정하고 이를 구현하는데 적합한 엔진을 선택한다.

2장에서 고찰되어온 과정은 위에서 언급한 선주와 조선소 간의 의사결정 과정과 유사하다.

즉, 논의 과정에서 함정이 갖는 특수성과 유사시를 대비한 장래성은 배제하였으며, 더 싸게 더 많은 양의 화물을 탑재하도록 하기 위한 선박 본연의 경제성과 현실성에 무게를 두었다.

따라서, 함정의 특수성과 미래의 실제 전장에서 활용되는 장래성을 고려한다면 경제성과 현실성 중심으로 조정된 순항속력 적용은 다음과 같은 제약이 따를 수 있다.

첫째, 작전지역에서 가스터빈의 사용이 제한(고장, 손상 등)될 경우, 지휘관에게 주어진 속력의 선택범위가 감소된다.

둘째, 가스터빈을 사용한 고속하상 전까지 상대적으로 저속화된 디젤엔진의 운용으로 인해 모항으로부터 이격된 작전지역까지의 목적향해 시 경제성이 저하 또는 시간의 추가소요가 발생할 수 있다. 이 제약사항은 함정이 대형화될수록 부각될 것이다.

셋째, 함정 설계 시 순항속력용 추진용 디젤엔진의 선택 폭이 감소한다.

넷째, 가스터빈의 운전비용의 상대적 증가에 따라 전투, 고속기동 등 유사시 활용되는 가스터빈에 대하여 높은 신뢰도와 정비성이 요구된다.

## 4. 결 론

이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 해군에서 운용 중인 주력 전투함정의 연간 운용 패턴을

- 분석한 결과, 5~15kts 범위가 전체 운전 시간의 80%를 차지한다.
- 2) 함정의 실제 운용속력을 고려할 때, 순항 시 사용되는 추진용 디젤엔진에 한하여 8~12kts에 최적성능이 발휘되도록 선택할 필요가 있다.
  - 3) 12kts 속력에서 최적성능이 발휘되는 추진용 디젤엔진을 선택할 경우, 연간 약 13.8%(약 21만리터)의 연료유 절감 효과가 있다.
  - 4) 70~75톤(전체 연료유의 13.8%) 연료유 적재량만큼 다른 무기체계를 탑재할 경우, 수직발사대 3개 모듈(24cell)의 탑재가 가능하며, 현실성을 고려할 때, 대함미사일 8~16기, 또는 해상작전헬기 1대와 부가 탑재무장의 추가적재가 가능하다.
  - 5) 운용패턴을 분석하여 ROC를 현실적으로 재조정할 경우, 선택 가용한 속력 범위의 감소, 목적 향해 시의 경제성 저하 또는 소요시간 증가, 가스터빈에 대한 높은 신뢰도와 정비성이 요구되는 제약도 존재한다.

### Author Contributions

Conceptualization, H. Baek; Methodology, W. Lee; Investigation, C. Kim and J. Seo; Writing-Original Draft Preparation, H. Baek; Visualization, W. Lee; Writing-Review & Editing, J. Lee; Resources, H. Baek and C. Kim and J. Seo; Supervision, J. Lee; Validation, W. Lee; Project Administration, J. Lee; Funding Acquisition, J. Lee;

### References

- [1] R.O.K. Navy, "Change of required performance and technology of diesel engines for naval ships" Technology of naval ships(report of ROKN logistics support command,, pp. 79-103, 2017(in Korean).
- [2] H. M. Baek, A Study on Improvement of Turbocharging System for Performance Improvement of Naval Vessel's Diesel Engines, Ph.D. Dissetaton, Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Korea, 2018.
- [3] D. Stapersma, H,Knoll, "Practical emission research for a navy," CIMAC 1998, Copenhagen, pp. 1465-1477, 1988.
- [4] H. M. Baek, K. S. Jung, J. W. Lee, and J. S. Choi, "A study on the arrangement of integrated power system for warship", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 38, no. 9, pp. 1070-1074, 2014 (in Korean).
- [5] Hyundai, Engine and machinery division programme, Ulsan, Korea: Hyundai Heavy industries, 2016.
- [6] ROKN, VLS for guided missiles (KVLS user main-

tenance technical manual), Jin-He, Korea: Armed Forces Publishing House, 2017.

- [7] ROKN, Frigates operation manual, Jin-He, Korea: Armed Forces Publishing House, 2018.
- [8] Defense Times, [http://defensetimes.kr/article/view.php?&ss\[fc\]=2&bbs\\_id=DefenceTimes\\_news&doc\\_num=908](http://defensetimes.kr/article/view.php?&ss[fc]=2&bbs_id=DefenceTimes_news&doc_num=908), Accessed October 31, 2019.