

해상용 경유의 희석량에 따른 선박용 윤활유의 유변학적 거동연구

송인철^{*†} · 이영호^{**} · 여영화^{**} · 안수현^{**} · 김대일^{**}

*, ** 국민안전처 해양경비안전연구센터

Rheological behavior study of Marine Lubricating oil on the amount of MGO (Marine Gas Oil) dilution

In Chul Song^{*†} · Young Ho Lee^{**} · Young Hwa Yeo^{**} · Su Hyun Ahn^{**} · Dae il Kim^{**}

*, ** Ministry of Public Safety and Security Korea Coast Guard Research Center

요 약 : 본 연구에서는 해상용 경유의 희석량에 따른 선박용 윤활유의 점도 및 전단응력의 변화 등 유변학적 거동에 대한 연구를 하였다. 연료희석에 의한 윤활유의 점도감소는 피스톤링 및 라이너의 마모로 인한 엔진내구성 저하를 저하시키는 중요한 요소이다. 연구에 사용된 윤활유는 고유황 경유(황함유량 0.05%)를 3%, 6%, 10%, 15%, 20%로 희석하여 magnetic stirrer를 이용, 혼합하여 제조하였다. 측정온도는 -10℃ ~ 80℃ 범위로 설정하고, 점도 및 전단응력 변화는 회전점도계인 Brookfield Viscometer를 이용하여 측정하였다. 윤활유에 해상용 경유의 희석량이 증가할수록 점도 및 전단응력이 감소하며, 이것은 상대적으로 낮은 점도의 해상용 경유가 윤활유에 희석됨에 따라 윤활유의 점도 및 전단응력이 낮아지기 때문이다. 특히, 저온(0 ~ -10℃)에서는 점도 및 전단응력이 급격히 낮아지다가, 40℃ 이상에서는 점도 및 전단응력 감소가 해상용 경유 희석량의 영향을 거의 받지 않는다. 온도가 높아짐에 따라, 윤활유의 점도 및 전단응력 감소는 윤활유의 뉴턴유체 거동을 보이는 것을 확인했다. 경유의 혼입에 의한 점도감소로 선박의 엔진마모를 촉진할 수 있으므로 엔진의 내구성 향상을 위해 윤활유의 주기적인 관리가 필요하다.

핵심용어 : 해상용 경유 희석량, 윤활유, 점도, 전단응력, 유변학적 거동

Abstract : This paper describes the rheological behavior study such as viscosity and change of shear stress regarding marine lubricating oil according to the amount of Marine Gas Oil (MGO) dilution. The viscosity reduction due to fuel dilution is crucially important characteristic to decreasing engine durability because of the abrasion of piston ring or liner. The lubricating oil used in this paper was blended with magnetic stirrer diluted High Sulfur Diesel (HSD, 0.05 wt%) ratio of 3%, 6%, 10%, 15% and 20%. The viscosity and shear stress of diluted lubricating oil were measured with the temperature range from -10℃ to 80℃ using a rotary viscometer (Brookfield Viscometer). As the amount of MGO dilution increasing in lubricating oil, the viscosity and stress of those decreased, because the lubricating oil diluted MGO with low viscosity show the trends to decreased viscosity and shear stress. Especially, the viscosity and shear stress of lubricating oil radically decreased at low temperature (0 ~ -10℃) and doesn't effect in MGO dilution at over 40℃. As temperature risen, the reduction of the viscosity and shear stress in lubricating oil shows the Newtonian behavior. The lubricating oil was required to check up periodically to improve engine durability since the viscosity reduction by MGO dilution accelerating the engine abrasion.

Key Words : Amount of MGO dilution, Lubricating oil, Viscosity, Shear stress, Rheological behavior

1. 서 론

2015년 한해 국내에 입출항한 선박은 총 395,000여척, 화물운송은 14,620백만톤으로 국가간 해상을 통한 무역증대로

해상교통량은 지속적으로 증가하고 있다(SP-IDC, 2015). 또한, 바다에 대한 국민들의 관심증가에 따른 해상안전 및 해상치안 수요의 확대로 국민안전처 소속 경비함정의 임무와 역할은 중요해졌다. 따라서, 신속하고 효과적인 해양사고의 대응을 위해 경비함정의 출동에 문제가 없도록 경비함정의 관리에 철저한 점검이 필요하다. 현재 경비함정에 사용되는

† Corresponding Author : giver1@korea.kr, 041-640-2461

주기관은 대부분이 고속 디젤기관인 MTU엔진으로, 연료유가 갖는 화학적 에너지가 피스톤의 상·하 왕복운동으로 실린더내의 부피변화를 일으켜 흡입·압축·폭발·배기 과정을 반복적으로 시행하면서 기계적인 일로 전환시키는 내연기관이다.

경비합정이 채택한 선박용 디젤기관은 엔진의 고속, 고출력화에 따라 윤활유의 역할이 매우 중요하다. 대부분의 자동차 제작사 및 관련 연구에서는 최적의 엔진성능 향상을 위해 윤활유의 성능 적합성에 대한 다양한 검토와 실험이 진행되었으며, 윤활유의 열화시간에 따른 윤활유의 특성변화 분석으로 경유 회석량 및 soot/carbon 생성물, 첨가제의 산화 등 피스톤링 및 라이너의 마모에 관한 상관관계를 확인했다(Jeon and Kim, 2005; 2007; Jeon et al., 2011). 현재, 자동차 엔진의 경우 연료유 혼입에 대한 연구는 지속적으로 이루어져 연료유 혼입에 대한 제한을 6~10%로 하고 있다(Kim and Kim, 2005). 그러나, 자동차 윤활유에 대한 연구에 비해 경비합정에 채용된 고속 디젤엔진 및 윤활유에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 일반 자동차에 비해 장시간의 항해, 다양한 해상변화 및 급격한 엔진가속 등 엔진의 부하변동이 많은 조건에서 윤활유는 그 기능을 쉽게 상실할 수 있다. 자동차의 운행시간 및 운행거리가 증가되면서 윤활유의 열화가 가속화 될 수 있으며, 이는 경비합정 주기관인 고속 디젤기관 엔진에서도 동일하게 나타날 수 있다(Jeon et al., 2012; 2014).

경비합정의 출동시간이 증가되면서 고속 디젤기관 윤활유의 열화는 증가하게 되며, 이것은 윤활유 내 연료유, 수분 및 첨가제의 산화 등으로 윤활유 수명을 단축시키는 주요 원인이 된다. 엔진 가동율에 따른 엔진제조사의 시험절차 및 방법에 의거하여 윤활유의 교환주기를 결정하고 있으며, 이를 근거하여 경비합정의 주기관 윤활유도 주기적으로 교체를 실시하고 있다(Jung, 2009). 그러나, 해상의 기상상태 변화, 항해시간, 급가속 등 여러 가지 항행 조건에 따라 윤활유 교체주기를 고려하여야 하며, 윤활유의 교체주기 연장을 위한 성능분석 연구가 이루어져야 한다.

경비합정의 고속 디젤엔진이 갖는 다양한 운항조건에 따른 연료유 혼입은 엔진내부 운동부 마모의 주요 원인이 되며, 엔진성능 저하와 함께 엔진파손에 이를 수도 있다. 특히, 연료분사노즐의 파손 및 노후화로 인한 부정확한 연료분사는 윤활유로 연료유의 혼입량을 증가시키며 이것은 미연소 연료와 윤활유가 혼합되어 윤활유의 점도가 감소함으로써 피스톤링 및 라이너의 마모를 촉진한다. 따라서, 윤활유 내 연료유가 혼입되면서 발생하는 점도감소로 엔진의 출력감소 및 정비일수가 증가될 수 있어 경비합정의 운용에 막대한 영향을 줄 수 있으며, 이는 해상안전 및 치안활동에 공백을 일으킬 수 있다. 윤활유에 대한 해상용 경유혼입의 영향은 경비합정 주기관의 효율적 관리를 위한 윤활유 분석사례

결과에서 경비합정 66척을 대상으로 분석한 결과, 해상용 경유가 3% 이상 혼입된 합정 7척에서 주기관의 압력저하 등 엔진효율이 떨어지는 경향이 나타났다(Lee et al., 2012).

한편, 온도증가에 따른 유체의 점도감소 및 전단면에서의 응력감소 등 유변학적 물성을 갖는 윤활유의 성능시험은 고속 디젤엔진에서 윤활유의 교환주기 결정 등 고속 디젤기관 및 윤활유 연구에 필요하다(Kontopoulou, 2011). 따라서 이 연구에서는 MTU엔진을 사용하는 국민안전처 소속 경비합정의 주기관인 고속 디젤엔진에서 윤활유에 해상용 경유가 혼입하는 경우 윤활유의 점도 및 전단응력 변화 등 유변학적 거동을 실험적으로 고찰하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

본 연구에서 사용한 윤활유는 고속 디젤기관용으로, 선박용윤활유(SAE40, 단급점도유, S-OIL TOTAL LUBRICANTS)를 사용하였으며, 윤활유의 연료회석을 위해 사용된 연료유는 황함유량이 0.05 wt%인 해상용 경유(MGO, Marine Gas Oil, 현대오일뱅크)이다. 윤활유 및 MGO의 기본적인 물리적 특성은 ASTM 규정을 적용하여 분석하였으며, 그 측정값은 Table 1과 같다.

Table 1. Properties and Test method for lubricating oil (SAE40) and MGO

Physical Property	Lubricating Oil	MGO	Method
Kinematic Viscosity (mm ² /s)	40℃	123.4	ASTM D445
	100℃	13.97	
Viscosity Index	109	-	ASTM D2270
Density(15℃,g/cm ³)	0.8887	0.8851	ASTM D4052

경비합정에 사용되는 고속 디젤기관에서 윤활유에 해상용 경유의 혼입에 대한 영향을 알 수 있는 실험자료 및 기초 연구 자료가 부족하여 자동차 제조사 및 자동차 엔진 전문업체에서 권고하는 윤활유에 대한 경유 회석 한계값을 실험적 data를 기반으로 6~10% 정도를 제안한 Kim and Kim(2008) 방법에 따라 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 경비합정에 사용되는 고속 디젤엔진 윤활유에 MGO를 3~20% 회석(3%, 6%, 10%, 15%, 20%)하여 실온에서 magnetic stirrer로 30분 동안 충분히 혼합하여 윤활유에 대한 점도 및 전단응력 변화 등 유변학적 거동을 연구하였다.

2.2 유변학적 거동(Rheological behavior) 측정

항온유지 및 윤활유 시료를 측정하기 위한 vessel chamber 가 부착된 회전형 점도계(Brookfield Viscometer)를 사용하여 해상용 경유가 희석된 윤활유에 대한 절대점도(absolute viscosity), 전단응력(shear stress) 및 전단율(shear rate) 등 유변학적 거동을 측정하였다. 측정온도는 윤활유의 작동온도 범위를 고려하여 -10℃ ~ 80℃ 범위에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 물리적 특성

본 연구를 위해 사용된 고속 디젤기관용 윤활유는 SAE 40(단급 점도유)으로, 국민안전처 소속 경비함정에서 사용되는 윤활유이다. 또한, 연료유는 황 함유량이 0.05 wt%인 해상용 경유(MGO)로, 윤활유에 0~20%(0, 3, 6, 10, 15, 20%)를 희석하여 점도특성 및 밀도변화를 측정하였으며, 그 결과는 Table 2와 같이 나타났다.

Table 2. Physical properties for the MGO dilution ratio in lubricating oil

Physical Property	Fuel dilution(wt%)					
	0	3	6	10	15	20
Kinematic Viscosity (40℃)	123.4	107.3	89.94	77.26	63.58	49.92
Viscosity (100℃)	13.97	12.76	11.33	10.38	9.270	7.913
Viscosity Index	111	113	114	118	124	127
Density (15℃, g/cm ³)	0.88870	0.88866	0.88860	0.88846	0.88835	0.88824

연료유 희석량에 따른 동점도(Kinematic viscosity)는 윤활유에 점도가 낮은 MGO의 혼입량이 증가함에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 100℃에서의 동점도는 MGO가 3% 혼입된 윤활유는 혼합되지 않은 윤활유보다 8.7% 감소하고, 6% 혼입된 윤활유는 19% 감소, 10%가 혼입된 윤활유는 25.7% 감소, 15%가 혼입된 윤활유는 33.6% 감소, 20%가 혼입된 윤활유는 43%가 감소하였다. 이것은 윤활유에 MGO가 혼입됨에 따라 실린더 라이너 내부에 유막형성을 어렵게 만들어 피스톤링의 마모증대 등 기계적 손실이 증가할 것으로 예상된다.

온도변화에 따른 점도의 변화정도를 나타내는 점도지수(Viscosity Index)는 MGO 혼입량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. MGO가 10%가 혼입된 윤활유는 혼합되지 않은 윤활유의 점도지수 보다 6.3% 증가하고, 20%가 혼입된 윤활유는 14.4%의 점도지수 증가를 보였다. 이것은 점도

가 낮은 MGO가 윤활유에 혼입됨에 따라 점도지수가 높아지며, MGO의 혼입이 윤활유의 점도지수에도 영향을 미치는 결과를 보였다.

동점도 및 점도지수와 함께 윤활유의 주요 인자인 밀도는 윤활유에 비해 상대적으로 밀도가 낮은 MGO가 혼입됨에 따라 동점도의 변화와 유사하게 감소하는 경향을 보였다. MGO가 6% 혼입된 윤활유는 MGO가 혼합되지 않은 윤활유보다 밀도가 1.1% 감소하고, 20%가 혼입된 윤활유의 동점도는 5.2%의 밀도감소를 보였으며, 윤활유의 밀도변화를 통해 점도변화 및 불순물의 혼입 등을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 유변학적 거동

Fig. 1~2는 본 연구에서 사용된 MGO가 혼입된 윤활유의 유변학적 거동을 확인하기 위해 윤활유 온도 20℃에서의 전단율에 대한 전단응력 및 점도를 측정된 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 1은 MGO가 희석되지 않은 윤활유나 MGO가 희석된 윤활유 모두 전단율이 증가할수록 전단응력이 증가하는 전형적인 뉴턴유체 거동을 보였다(Kontopoulou, 2011). MGO의 희석량이 증가할수록 윤활유의 전단응력은 감소하는 경향을 보이며, 전단율이 34 S⁻¹에서 MGO가 3% 혼입된 윤활유는 혼합되지 않은 윤활유보다 12.9% 감소하고, 6% 혼입된 윤활유는 24.6% 감소, 10%가 혼입된 윤활유는 36.5% 감소하고, 15%가 혼입된 윤활유는 50%가 감소하고, 20%가 혼입된 윤활유는 58.3%가 감소하였다. 이것은 윤활유 내 MGO 함유량이 증가할수록 실린더 벽면의 윤활층을 유지하는 전단응력의 약화가 일어났기 때문으로 판단된다.

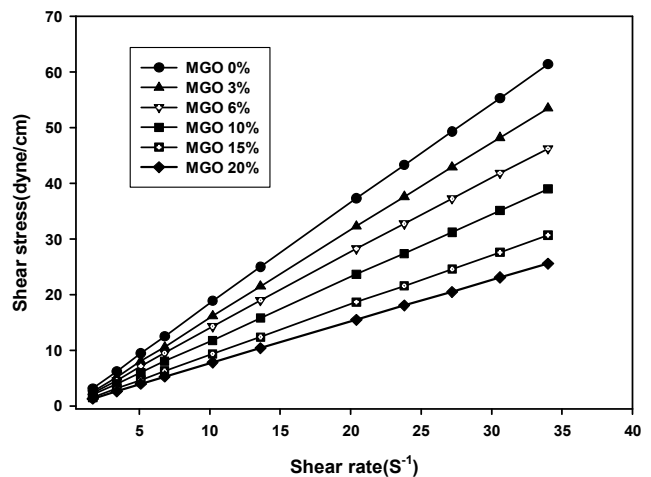


Fig. 1. The shear stress of lubricating oil as a function of shear rate at 20℃ for the amount of MGO (Marine Gas Oil) dilution.

Fig. 2는 전단율이 증가할수록 윤활유의 절대점도(absolute viscosity)는 MGO 함유량에 따른 점도차이만 있을 뿐 일정하게 유지하는 점도특성을 보이고 있다. 전단율이 34 S^{-1} 에서 MGO가 3% 혼입된 윤활유는 혼입되지 않은 윤활유보다 12.8% 감소하고, 6% 혼입된 윤활유는 24.3% 감소, 10%가 혼입된 윤활유는 36.5% 감소하고, 15%가 혼입된 윤활유는 50%가 감소하고, 20%가 혼입된 윤활유는 58.3%가 감소하였다. Fig. 1과 Fig. 2에서 전단율에 따른 전단응력 증가 및 점도유지 특성은 고속 디젤기관에 사용되는 윤활유에 MGO가 혼입되어도 뉴턴유체라는 것을 확인할 수 있다(Kim and Kim, 2008).

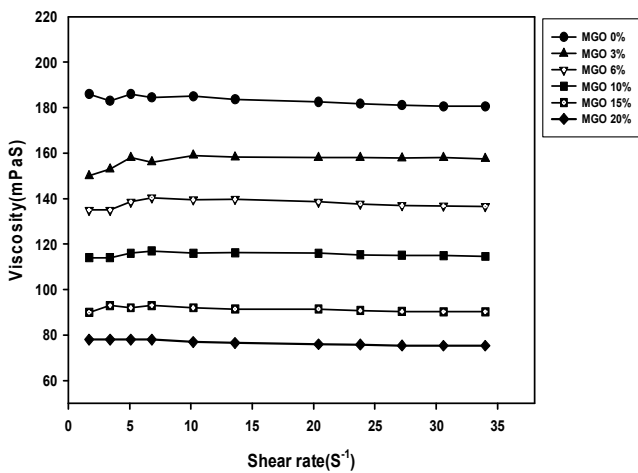


Fig. 2. The absolute viscosity of lubricating oil as a function of shear rate at 20°C for the amount of MGO (Marine Gas Oil) dilution.

Fig 3은 온도변화에 따른 MGO가 혼입된 윤활유의 점도변화 특성을 보여주고 있다.

일반적으로 윤활유는 온도가 증가할수록 점도가 점진적으로 감소하는 뉴턴유체 거동을 보이게 되며, 이는 광유계 윤활유의 전형적인 특성을 나타낸다(Kim and Kim, 2005). MGO가 회석되지 않은 윤활유나 MGO가 회석된 윤활유 모두 온도가 증가할수록 절대점도(absolute viscosity)가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

40°C 이후 고온으로 증가할수록 윤활유의 점도특성은 MGO의 혼입량에 영향을 거의 받지 않는데, 이는 윤활유에 혼입된 경유의 휘발에 따른 회석량의 감소로 윤활유에 미치는 점도의 영향이 줄어들기 때문이다(Kim and Kim, 2008). MGO는 윤활유에 비해 끓는점이 낮기 때문에 엔진내부의 온도가 증가함에 따라 증발하려는 경향을 가지고 있으며, 실제 작동온도에서 증발하는 연료유는 약 54% 정도인 것으로 알려져 있다(Kim and Kim, 2005). 그러나, 저온에서의 점도는

MGO 혼입량이 증가에 따라 급격히 감소하는 경향을 보였다. 10°C 에서 MGO가 3% 혼입된 윤활유는 혼입되지 않은 윤활유보다 8.7% 감소하고, 6% 혼입된 윤활유는 19.6% 감소하고, 10% 혼입된 윤활유는 37.3% 감소하고, 15% 혼입된 윤활유는 51.8% 감소하고, 20% 혼입된 윤활유는 60.6% 감소하였다. -10°C 에서는 MGO가 3% 혼입될 경우 11.9% 감소, 6%일 경우 25.3% 감소, 10% 혼입될 경우 38.1% 감소, 15% 혼입된 윤활유는 58% 감소하고, 20%가 혼입될 경우 70%로 점도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

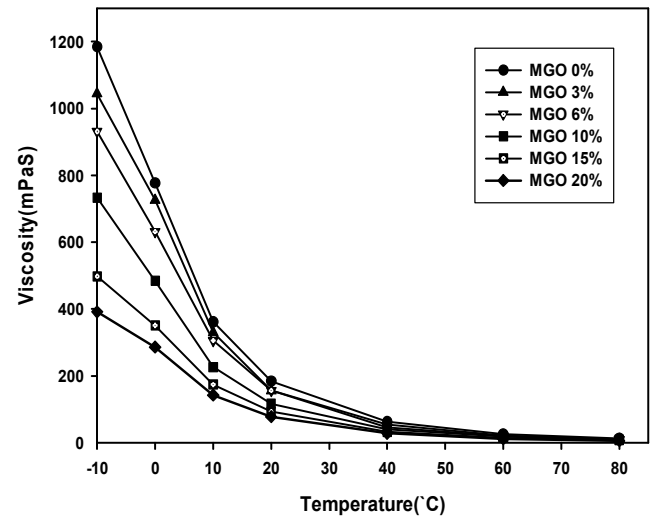


Fig. 3. The absolute viscosity of lubricating oil as a function of temperature for the amount of MGO (Marine Gas Oil) dilution.

Fig 4는 저온(-10°C)에서의 MGO 혼입량에 대한 윤활유의 전단응력 특성을 보여주고 있다. MGO가 혼입된 윤활유는 저온에서도 전단율의 증가에 따라 전단응력이 증가하는 뉴턴유체 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다. 전단율 10.2 S^{-1} 에서 전단응력은 MGO가 3% 혼입된 윤활유의 전단응력은 혼입되지 않은 윤활유 전단응력의 12.5%로 감소하고, 6% 혼입될 경우 24.9%로 감소하고, 10%가 혼입될 경우 38.1%로 감소하며, 15% 혼입될 경우 58% 감소하고, 20%가 혼입될 경우 66.7%로 현저히 낮아졌다. 이처럼 저온에서 MGO 혼입에 따른 점도감소 및 전단응력의 급격한 감소는 고속의 피스톤 운동부의 유막형성을 어렵게 만들고, 베어링 등의 윤활에 어려움을 야기시켜 따라서, 고속 디젤기관의 온도가 상대적으로 낮은 운항초기 및 겨울철의 윤활유 상태점검에 각별히 주의를 기울여야 할 것으로 사료된다(Kim and Kim, 2005).

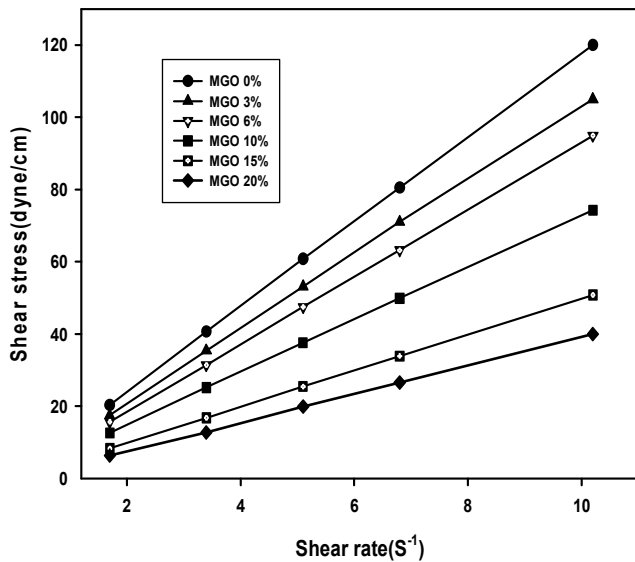


Fig. 4. The shear stress of lubricating oil as a function of shear rate at -10°C for the amount of MGO (Marine Gas Oil) dilution.

4. 결론

경비함정에 채용된 고속 디젤기관은 좁은 기관실 내에 설치되어 잦은 속도변경에 의한 부하변동, 해상의 파랑 등 기상조건 악화에 따른 롤링, 피칭 등의 급격한 부하 변화에도 견디어 내야 한다. 고속 디젤 엔진의 실린더 내 피스톤의 고속 왕복운동 시 마찰을 최소화하기 위해 윤활유의 성능유지는 필수적이며, 연료분사노즐 등을 통한 연료유의 윤활유로의 유입은 노후 된 선박일수록 그 유입량이 증가될 수 있다. 이는 윤활유의 점도를 감소시키고 실린더 내벽 유막형성의 불량으로 피스톤의 마찰을 증가시키는 중요 인자가 된다.

윤활유에 연료유 혼입량에 따른 점도 및 전단응력 감소에 대해 실험적으로 수행한 본 연구에서는 윤활유에 MGO 희석량을 3%, 6%, 10%, 15%, 20%로 증가하여 측정하였지만, 실제 윤활유 내 MGO 혼입량은 경비함정의 항해조건에 따라 변하게 된다. MGO가 10%까지 혼입된 윤활유의 전단응력 및 절대점도(absolute viscosity)는 MGO가 혼입되지 않은 윤활유에 비해 40% 이내로 감소하였다. 반면, MGO가 15% 이상 혼입된 윤활유는 전단응력(shear stress) 및 절대점도(absolute viscosity)가 50% 이상 감소하였다.

윤활유의 교체주기를 주로 결정하는 디젤기관 엔진 가동율 및 전염기(TBN, Total Base Number) 측정 등과 함께 연료유 혼입율은 윤활유 성능검사의 중요한 항목이다. 고속 디젤기관을 사용하는 경비함정은 다양한 운항조건에서 윤활유에 해상용 경유 유입의 가능성이 높아, 주기적인 윤활

유의 성능검사를 통해 윤활유의 상태를 확인하여 윤활유 교체시기를 놓치는 경우가 발생하지 않도록 주의해야 한다.

향후, 윤활유내 연료유 혼입에 의한 고온에서의 soot/carbon residue, 산화도(Oil oxidation) 및 질화도(Oil nitration) 변화 등의 연구를 통해 윤활유의 열화상태 연구가 필요하며, 경비함정 주기관용 윤활유의 성능향상 및 개선에 관한 연구를 지속적으로 수행하고자 한다.

References

- [1] Jeon, K. J., C. G. Lee, S. Y. Yong and M. H. Park(2012), The Oil Degradation Degree Analysis Study Due to the Amount of the Fuel Dilution in the Engine Oil, Transactions of the Korea Society of Automotive Engineers, pp. 286-290.
- [2] Jeon, K. J., J. K. Rhee, S. Y. Yong and M. H. Park(2011), Engine Wear Ratio Study through LPG Engine Oil Ageing Monitoring, Transactions of the Korea Society of Automotive Engineers, pp. 625-629.
- [3] Jeon, K. J., M. H. Park and S. Y. Yong(2014), A Study on Deterioration of Engine Oil Properties by Fuel Dilution and Water Dilution, Transactions of the Korea Society of Automotive Engineers, pp. 333-338.
- [4] Jeon, K. J. and S. K. Kim(2005), A Study on the Monitoring Method of Engine Aging by Lubricants Analysis, Transactions of the Korea Society of Automotive Engineers, pp. 579-585.
- [5] Jeon, K. J. and S. K. Kim(2007), A Study on Engine Wear Condition by Element Analysis of Diesel Engine Oil, Transactions of the Korea Society of Automotive Engineers, pp. 307-313.
- [6] Jung, Y. S.(2009), A Study on the Management of Lubricating oil for the Naval vessel Diesel Engines, Master's thesis of Korea Maritime University.
- [7] Kim, C. K. and H. G. Kim(2008), Experimental Study on the Viscosity Characteristics of Diluted Engine Oils with Diesel Fuel, Journal of the KSTLE, Vol. 24, No 1, pp. 1-6.
- [8] Kim, H. G. and C. K. Kim(2005), Experimental Study on the Tribological Characteristics of Diluted Engine Oil by Diesel Fuel, Journal of the KSTLE, Vol. 21, No 4, pp. 159-164.
- [9] Kontopoulou, M.(2011), Applied Polymer Rheology, Polymeric Fluids with Industrial Applications, A John Wiley & Sons, INC., pp. 3-27.
- [10] Lee, S. J., H. G. Choi, S. J. Park, D. I. Kim, K. E. Jeong

and I. G. Kim(2012), A Case Study Analysis of Lubricating oil for the Guard Ship Management, Transactions of the Korea Society of Automotive Engineers, p. 363.

[11] SP-IDC(2015), Shipping & Port Integrated Data Center, www.spidc.go.kr.

Received : 2016. 02. 29.

Revised : 2016. 04. 01. (1st)

: 2016. 04. 08. (2nd)

Accepted : 2016. 04. 27.