

선박 슬러지유의 정유성능 향상에 관한 연구(I) (금속여과망의 유압력 및 유온의 영향에 대해서)

한원희* · 하만식** · 이진열***

*목포해양대학교 기관시스템공학부, **해양경찰청 기획과, ***한국해양대학교 기관시스템공학부

A Study on the Refining Performance Improvement of Marine Sludge Fuel Oil(I)

(for the temperature and pressure effects in metal filtering element)

Won-Hui Han* · Man-Sik Ha** · Jin-Yeol Lee***

*Division of Marine Engineering System, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

**Planning Part, National Maritime Police Agency, Incheon, 400-707, Korea

***Division of Marine System Engineering, Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

요 약 : 최근 선박 연료유는 고점도화 되고 슬러지분이 증가되고 있는 추세이며, 선박에서 발생한 슬러지의 처리 및 보일러 연료유로의 재활용 방안 등에 대해서 많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구 중 특히 슬러지를 미립화하여 분쇄하기 위한 초음파 유화기는 가장 현실성 있는 재활용 장치로 알려져 있다. 이러한 관점에서, 이 연구는 초음파 유화기 개발에 대한 기초연구로서 슬러지의 유온과 유압에 따른 여과효율을 조사하였다. 실험결과는 보일러 인젝터에 슬러지를 분사할 경우 적절한 온도와 압력을 결정하거나, 또한 초음파 유화기에 의한 실험결과와 비교할 수 있는 자료로 활용될 수 있다. 아울러 유온과 유압의 영향에 따라 분쇄된 슬러지 입자의 여과효율 등을 연구하는데 있어서 기초자료로 활용될 수 있을 것이며, 궁극적으로 선박에서 발생한 슬러지를 자체 처리하여 보일러의 연료유로 사용함으로써 해양유류오염을 방지하는데 기여할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 초음파 유화기, 재활용 장치, 슬러지 입자, 여과효율

ABSTRACT : As ship's fuel oil recently becomes viscous and the amount of sludge increases, many researches and studies are underway to process the sludge onboard the ship and to recycle it as a fuel for ship's boiler. Of many researches, especially ultrasonic emulsifier to break the particle of sludge into fine pieces is recognized as a most possible recycling device. In this regards, the author investigates the property change of sludge's temperature and pressure at the early stage of the study of ultrasonic emulsifier. This study can be used as a useful data to determine the proper temperature and pressure to inject the processed sludge in the boiler injector and the results can also be comparable data with the experimental data by ultrasonic emulsifier. In addition, the results will be a fundamental data to study the filtering efficiency of the sludge particle broken by temperature and pressure. It is expected that this study ultimately play a role to prevent marine oil pollution as the sludge is recycled onboard the ship and used as a fuel for boiler.

KEY WORDS : Ultrasonic Emulsifier, Recycling Device, Sludge Particle, Filtering Efficiency

1. 서 론

선박연료유는 엔진의 성능향상과 더불어 고점도·고밀도화 되고 연소성이 심히 떨어지며 잔류탄소, 슬러지분, 유황, 바나듐, 및 유동촉매(FCC)미립 등의 함량이 많아진다.[1,2] 이러한 저질중유는 대형저속의 디젤기관에 사용하여도 연료유의 전처리와 연소관리에 어려운 문제점이 많은 데, 특히 슬러지분에 의한 유동성 및 고형미립자의 전처리가 더욱 어렵다. 그러나

*강희원, winhan@mmu.ac.kr, 061)240-7239
**강희원, manmanse48@nmpa.go.kr, 032)884-9654
***강희원, jinyeol@hanara.kmaritime.ac.kr, 051)410-4281

Table 1 Properties of Fuel Sludge Oil

Oils	Properties	Kinematic viscosity (cSt/40°C)	Specific gravity 15/4°C	Flash point (°C)	Residual carbon (Wt %)	Total acid number (mgKOH/g)
HFO		288.5	0.992	97.5	0.08	6.7
SFO		392.5	1.050	155	2.13	5.1

유류수급의 균형, 원유가의 동향 및 선복·선령의 구성 추이에 따라 선박연료유는 280~450cSt/50°C가 주류를 이루고, 600cSt/50°C급은 원유운반선(crude oil tanker)등 특수 선박에 사용되고 있다.[3,4] 이와 같은 선박연료유 질의 변화추이에 따른 연소효과로 가열기, 원심분리기, 균질기(homoginizer), 초음파정유기, 여과기 등을 활용한 선내 전처리로서 수분, 슬러지분, 촉매미립 등을 처리하는 한편, 기관은 가능한 대형·저속화시키고, 연료유는 고압분사하고 분사시기를 자동조절하며, 과급율의 적정화, 자켓온도의 고온유지, 내열·내식재료의 사용 등으로 대처하고 있다.[5~7] 하지만, 저질 선박 연료유의 전처리를 위하여는 종래부터 사용되어온 원심청정기(centrifugal purifier)나 정압식 여과기 외에 새로운 처리장치가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 고점도, 고밀도인 슬러지유를 시험유로 하여서 유온 및 유압력에 따른 여과성능을 우선 파악하고자 금속망식 여과기를 사용하여 실험을 수행하였다. 실험결과는 원심분리 정유기, 균질기 및 초음파 정유기 등의 정유성능을 향상시키기 위한 기술개발의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 실험방법

시료유는 선박에서 사용하는 중유(HFO : heavy fuel oil) 및 슬러지유(SFO : sludge fuel oil)를 사용하였고, 이들의 특성은 다음 Table 1과 같다. 또한, 펌프의 공급압력을 0.5kg/cm², 1.5kg/cm² 및 2.5kg/cm²로 설정하였고, 금속망식 여과입도는 50, 100 및 150 메쉬(mesh)로 정하였다. 그리고 유환경은 유온을 25, 50 및 75°C로 가열하여 사용하였고, 일정한 실험시간 후에는 유조에 신유를 보충하면서 실험을 계속하고, 연속적으로 pH값 및 점도값을 측정하여 유의 산화에 유의하였다. 전기가 열기에 의해 유온은 증가시켰고, 슬러지유의 중력침전을 억제하기 위하여 교반기에 의해 교반하였다. 그리고 금속망식 여과기의 입출구 압력변화, 즉 압력저하율(%)로 실험시간에 따라 정리하여 여과성능을 평가하였고, 압력저하율(%)은 식(1)과 같이 정리하였다.

압력저하율(P_e),

$$P_e = \frac{P_i - P_o}{P_i} \times 100(\%) \quad \text{----- (1)}$$

단, P_i : 여과망 입구압력, P_o : 여과망 출구압력

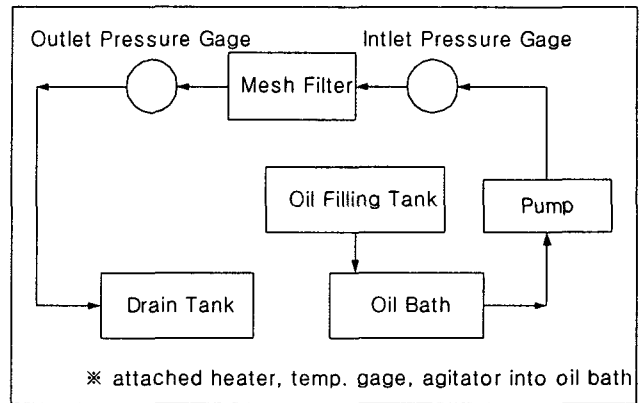


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

2.2 실험장치

압력펌프는 기어펌프로서 릴리프 밸브(relief valve)로 압력을 조정하였고 금속망식 여과기 및 관계의 길이 및 직경은 일정량의 기름이 관계 내를 가능한 층류로 유동하는 다음의 조건 식(2)[8]를 만족하였고, Fig. 1은 실험장치의 개략도를 보이고 있다.

$$p + h > \frac{8Q\mu L}{\pi r^4} \quad \text{----- (2)}$$

단, p : 대기압, Q : 유량, μ : 점도, r : 관반경, L : 관길이
 h : 펌프와 유조내 유면의 수두차

유조(oil bath)는 20ℓ의 용량으로 가열기, 교반기 및 온도계 등을 갖추어 슬러지의 고형물이 침전되지 않고, 유온은 오차 ±3°C범위내외로 자동조정 하였다. 급유탱크(oil filling tank)에서 유조로 급유하였으며, 관재질은 PVC로 하였다. 또 여과기는 평면 금속망(25mm ϕ)을 사용하고 금속망 입출구에 압력계이저를 부착하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 0.5kg/cm² 유압에서의 유온 및 여과입도에 따른 압력저하율 평가

Fig. 2는 슬러지유(SFO)를 유온 25°C, 펌핑압력 0.5kg/cm²조

간하에서 실험시간(t)에 따른 여과기 금속망의 여과입도인 150 100 및 50 매쉬(mesh)에서의 압력저하율(Pe %)을 나타낸 것이다.

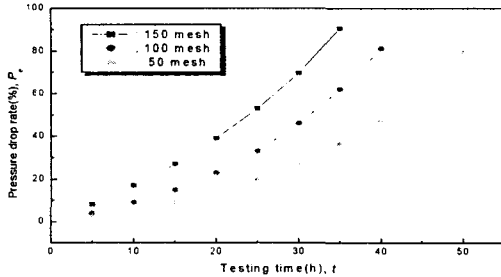


Fig 3-1 Pressure drop rate between filtering element in SFO under 25°C oil temp and 0.5kg/cm² pumping pressure

Fig. 2 Pressure drop rate of SFO (25°C, 0.5kg/cm²)

150 매쉬 금속망에서는 35 실험시간에서 90%이상으로 압력 한기값을 나타내고, 50매쉬에서는 실험시간 50시간에서 약 80%의 압력저하율을 보이고 있다. 이와 같이 매쉬가 클수록 압력저하율이 크고, 실험시간이 경과할수록 매쉬에 따른 압력저하율의 폭이 크게 되는 것은 슬러지분이 여과입도를 폐쇄하는 정도가 입도크기에 반비례하고, 고형분과 슬러지분 사이의 계면장력의 저하 영향이라고 생각한다.

Fig. 3 및 Fig. 4는 Fig. 2의 조건에서 슬러지유의 온도만을 50°C 및 75°C로 가열시킨 상태에서의 압력저하율을 실험시간에 따라 정리한 그래프이다. 유온을 50°C에서 75°C로 증가시키면 압력저하율이 상당히 감소하는 경향을 보이고, 매쉬가 150매쉬에서 50매쉬로 입도가 증가할수록 압력저하율 폭이 현저히 적어지는 모습을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 온도증가에 따라 계면장력의 감소와 동시에 점성이 저하되어 여과통과 성능이 우수하기 때문이다. 또한 150 매쉬에서보다 50매쉬에서 압력저하율의 감소폭이 우수한 것은 온도증가에 따른 점도저하의 영향을 크게 받고, 상온에서 난용성인 탄화수소분이 고온에서 용해성이 증가하기 때문이라 생각된다.

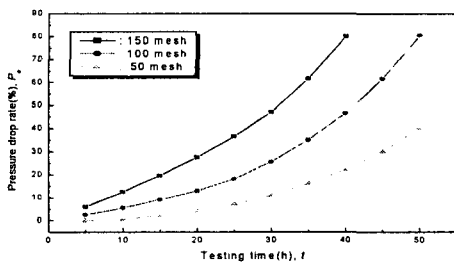


Fig 3-2 Pressure drop rate between filtering element in SFO under 50°C oil temp and 0.5kg/cm² pumping pressure.

Fig. 3 Pressure drop rate of SFO (50°C, 0.5kg/cm²)

따라서 슬러지유의 온도증가에 따른 압력저하율 영향을 좀 더 규명하기 위하여 Fig.5는 Fig.2, 3 및 4를 참조하여 100매쉬 하에서의 온도(25, 50 및 75°C)의 영향을 압력저하율로 나타낸 것이다.

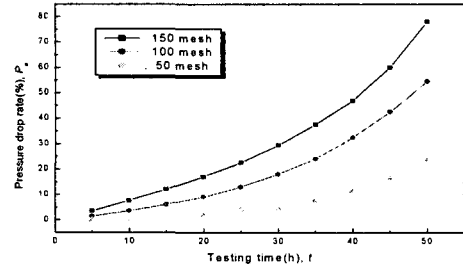


Fig 3-3 Pressure drop rate between filtering element in SFO under 75°C oil temp and 0.5kg/cm² pumping pressure

Fig. 4 Pressure drop rate of SFO (75°C, 0.5kg/cm²)

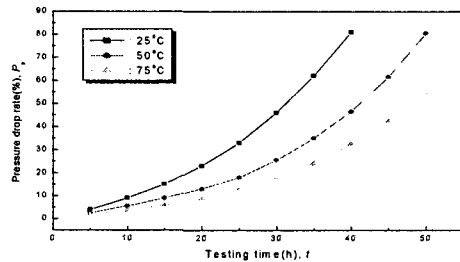


Fig 3-4 Pressure drop rate between filtering element with 100 mesh filter under 0.5kg/cm² pumping pressure.

Fig. 5 Pressure drop rate at 100 mesh filter (0.5kg/cm²)

온도가 25°C에서 75°C로 증가할수록 압력저하율은 감소하고 실험시간이 경과할수록 온도에 따른 감소 폭은 크다. 그리고 40시간 실험에서는 유온이 25°C일 때 압력저하율은 81% 정도, 50°C에서는 46%정도, 75°C에서는 32%정도를 보인다. 이와 같은 영향은 슬러지유(SFO)도 온도를 증가시키면 점성이 감소하면서 슬러지분의 파괴에 따른 유동성이 증가하고 난용성분인 슬러지 입자가 용해되면서 밀도도 약화되기 때문이다 따라서 펌핑압력이 같더라도 슬러지유의 여과성능을 증가시키는 데는 유온의 증가가 큰 영향을 미친다고 하겠다.

3.2 1.5kg/cm² 유압에서의 유온 및 여과입도에 따른 여과 성능비교

Fig. 6은 슬러지유의 유온 25°C, 펌프압력 1.5kg/cm²인 조건에서 여과입도를 150, 100 및 50 매쉬(mesh)로 변화시키면서 실험시간에 따른 압력저하율(%)을 정리한 것이다. 실험시간이 경과하면서 매쉬가 증가할수록 압력강하율은 급격히 증가하여 150매쉬의 경우에는 35시간정도에서 84%의 압력저하율을 보인다. 그리고 150매쉬에서가 50매쉬에 비교하여 증가폭이 슬

형시간의 경과에 따라 크게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 슬러지유내의 고형물과 유화된 슬러지분의 결합에 따른 슬러지상의 입자가 150매쉬를 통과하기 어렵기 때문이고, 150매쉬에서의 통과 저항이 강하기 때문이다. 또한 실험시간이 경과될수록 급격히 여과통과 성능이 저하하고 입도가 적을수록 저하율이 크게 증가하는 것은 슬러지의 끈끈한 슬러지 성분이 겹치면서 입경을 폐쇄하기 때문이라고 하겠다.

Fig. 7은 Fig. 6에서와 같은 조건에서 단지 유온을 50℃로 증가시켜서 슬러지유의 점도값을 저하시켜 여과기의 통과성을 시험한 것이다. 이에 의하면 압력저하율이 유온 25℃에서 보다는 감소하고, 실험시간에 따른 압력저하율의 상승도 다소 둔화된 경향을 보인다. 이러한 현상은 유온증가에 의해서 점도가 낮다는 것은 슬러지의 끈끈한 액상태(일명 Mousse 상태라 함.)의 고형분에 결합력이 약화되고, 폴리머(Polymer)의 결합 조밀상태가 조대화[9]되기 때문이다.

Fig. 8은 유온을 75℃로 가열시킨 상태에서 여과성능 실험을 실험시간에 따라 압력저하율로 정리한 것이다.

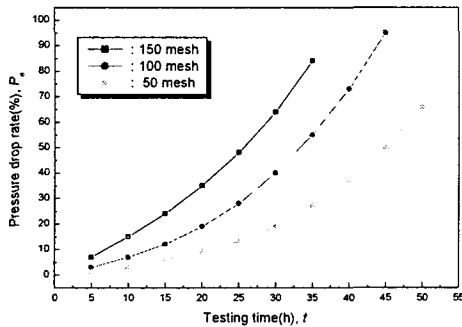


Fig 3-5 Pressure drop rate between filtering element in SFO under 25°C oil temp. and 1.5kg/cm² pumping pressure

Fig. 6 Pressure drop rate of SFO (25°C, 1.5kg/cm²)

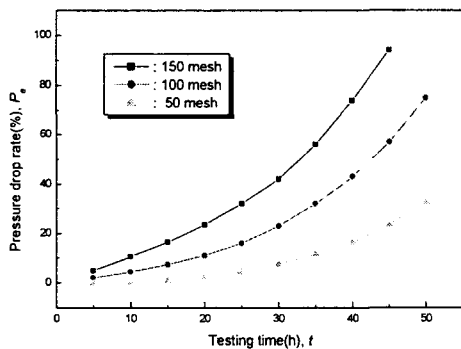


Fig.3-6 Pressure drop rate between filtering element in SFO under 50°C oil temp. and 1.5kg/cm² pumping pressure.

Fig. 7 Pressure drop rate of SFO (50°C, 1.5kg/cm²)

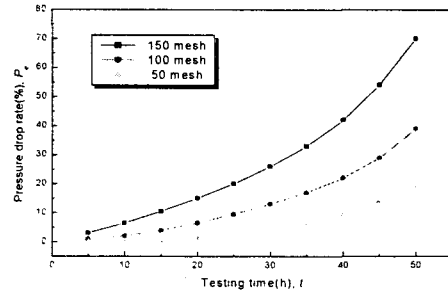


Fig 3-7 Pressure drop rate between filtering element in SFO under 75°C oil temp. and 1.5kg/cm² pumping pressure.

Fig. 8 Pressure drop rate of SFO (75°C, 1.5kg/cm²)

이에 의하면 Fig. 6, Fig. 7의 유온 25℃ 및 50℃에 비하여 실험시간에 따른 압력저하율이 상당히 감소된 것을 볼 수 있고, 압력저하율의 폭도 많이 둔화된 추세이다.

이러한 유온 25℃, 50℃ 및 75℃에서의 변화추이를 좀더 명확하게 관찰·정리하고자 Fig. 9는 100 매쉬(mesh) 여과기에 유온변화에 따른 압력저하율을 정리한 것이다. 이에 의하면 압력저하율은 25℃ > 50℃ > 75℃에 따라 나타나고, 저하율의 증가폭도 75℃에서 크게 둔감된 경향을 보이고 있다.

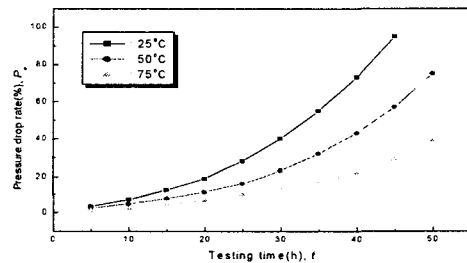


Fig 3-8 Pressure drop rate between filtering element with 100 mesh filter under 1.5kg/cm² pumping pressure.

Fig. 9 Pressure drop rate at 100 mesh filter (1.5kg/cm²)

즉, 실험시간 40시간 일 때 유온 25℃인 경우 73%, 50℃인 경우 43%, 75℃인 경우 22%와 같이 크게 차이를 보이고 있다. 따라서 같은 압력과 같은 여과입도라고 하더라도 슬러지의 점성 및 밀도에 크게 영향을 미치는 유온의 증가가 여과성능을 크게 향상시킨다.

3.3 유압 2.5kg/cm²에서의 SFO 유온변화에 따른 여과 특성

Fig. 10, 11 및 12는 펌프압력을 2.5kg/cm²로 고정하고, 슬러지유(SFO)의 유온을 25℃, 50℃ 및 75℃로 변화시키고, 또한 여과기의 여과입도를 150, 100 및 50 매쉬(mesh)로 변화시키면서 여과성능을 평가한 그래프들이다. Fig. 10 및 Fig. 11에 의하면 실험시간이 경과하면서 여과입경의 대소에 따라 압력

저하율은 크게 증가하고, 증가폭은 150mesh > 100mesh > 50mesh에 따라 크게 차이를 나타낸다. 물론 유온이 50℃인 Fig. 11에서가 유온 25℃인 Fig. 10의 압력저하율의 값과 비교하여 증가폭은 다소 둔화된 경향을 보인다. 이와 같이 실험시간이 경과하면서 여과입경인 매쉬에 따라 압력저하율 폭이 증가하는 것은 입경의 고형물에 의한 입경의 폐쇄작용과 슬러지분의 누적된 퇴적 현상 때문이다.

또한 Fig. 10 및 Fig. 12에서와 같이 유온이 증가한 환경에서 실험한 결과를 비교하면 유온이 가장 큰 75℃에서는 저하율이 실험시간 경과에 따라 다르지만 유온이 25℃인 환경에 비하여 3%~60%의 차이를 보이고, 유온이 증가할수록 큰 차이를 보인다. 따라서 슬러지유(SFO)는 적절한 유온 가열에 의해 여과성능을 어느 정도 증가시켜서 슬러지내 고형물의 여과도 가능하다고 하겠다. 하지만 연속적인 펌핑은 잦은 여과기의 소제로 인하여 다소 비경제적이라고 할 수 있으므로 보다 더 우수한 여과방법이 고려되었으면 한다.

3.4 유온 또는 유압변화에 따른 여과 특성

Fig. 13은 유압 2.5kg/cm²에서 100매쉬 여과기의 압력저하율을 나타낸 것으로 유온에 의한 여과성능효과를 잘 보이고 있다. 이에 의하면 유온 25℃과 50℃에서의 압력저하율의 폭은 유온 50℃ 및 75℃에 비교하여 큰 증가폭을 실험시간의 경과에 따라 보이고 있으며, 실험시간이 경과함에 따라 유온이 낮을수록 압력저하율은 증가하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 연료유 슬러지는 유온증가에 따른 점도저하가 큰 즉, 점도지수가 작기 때문이고, 유온증가와 동시에 슬러지의 분산·분포 현상이 상승하기 때문으로 사료된다. 따라서 연료유 슬러지는 온도를 증가시키며 난용성인 고형분을 제거한다면 연료로서 재사용 가능성을 충분히 보여주고 있다.

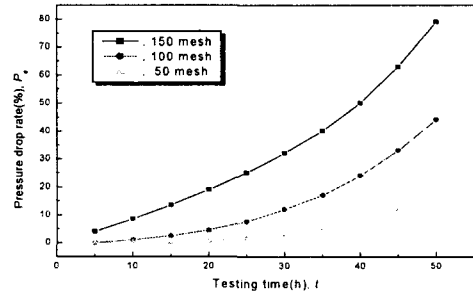


Fig 3-10 Pressure drop rate between filtering element in SFO under 50°C oil temp and 2.5kg/cm² pumping pressure

Fig. 11 Pressure drop rate of SFO (50℃, 2.5kg/cm²)

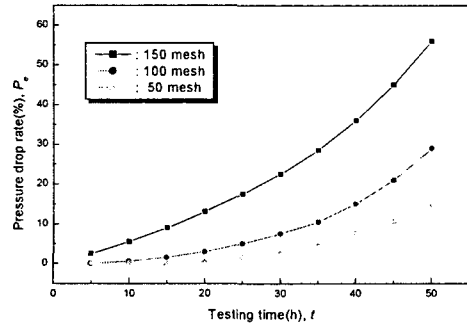


Fig 3-11 Pressure drop rate between filtering element in SFO under 75°C oil temp and 2.5kg/cm² pumping pressure.

Fig. 12 Pressure drop rate of SFO (75℃, 2.5kg/cm²)

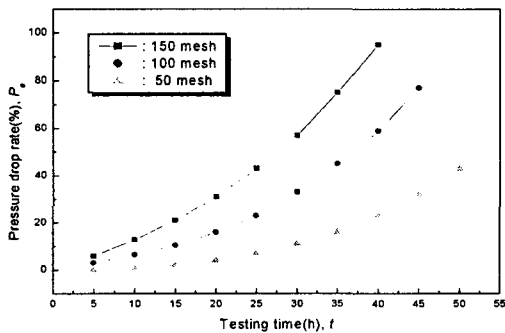


Fig 3-9 Pressure drop rate between filtering element in SFO under 25°C oil temp and 2.5kg/cm² pumping pressure.

Fig. 10 Pressure drop rate of SFO (25℃, 2.5kg/cm²)

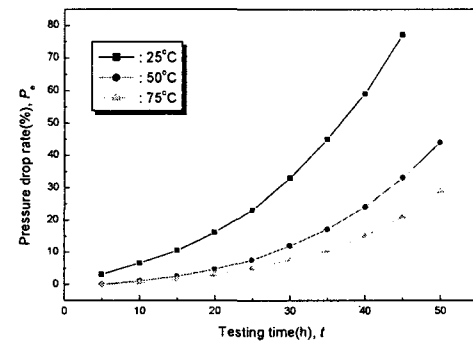


Fig 3-12 Pressure drop rate between filtering element with 100 mesh filter under 2.5kg/cm² pumping pressure in SFO.

Fig. 13 Pressure drop rate at 100 mesh filter(2.5kg/cm²)

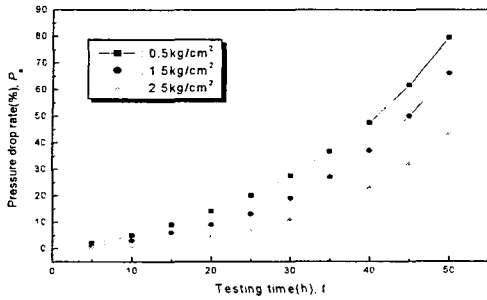


Fig D3 Pressure drop rate of filtering element in SFO under 50 mesh filter, 25°C oil temperature

Fig. 14 Pressure drop rate at 100 mesh filter (50°C)

Fig. 14는 유온 50°C, 여과입경 100매쉬 조건에서 유압력 0.5 kg/cm², 1.5kg/cm² 및 2.5kg/cm²을 비교 검토한 그래프이다. 이에 의하면 펌프의 압력이 0.5kg/cm²에서 2.5kg/cm²로 증가하면서 압력저하율은 크게 둔화된 것을 볼 수 있고, 실험시간이 경과할수록 압력차에 의한 저하율폭도 증가되는 것을 알 수 있다. 특히 0.5kg/cm²와 1.5kg/cm²사이에서보다 1.5kg/cm²와 2.5kg/cm²에서가 큰 폭으로 압력저하율이 둔화되는 현상을 보인다. 이와 같은 현상은 압력이 증가할수록 여과입경을 신속히 통과하고, 슬러지유의 젤(gel)화와 내부점성마찰이 감소하기 때문이다. 또한 실험시간이 경과하면 압력에 따른 저하율폭이 증가하는 것은 여과입경에 통과하는 시간이 길수록 입경에 슬러지의 젤성분이 많이 누적되어 부착하기 때문이고, 유압이 증가할수록 금속망의 통과저항과 침전시간이 적어지기 때문이다.

4. 결 론

금속망 여과장치에서 슬러지유의 유온과 압력변화 또는 여과입도의 대소에 따른 여과성능을 압력저하율로 나타낸 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 펌핑압력 0.5kg/cm²에서의 슬러지유의 여과성능은 여과입도가 150매쉬에서 50매쉬로 증가할수록 압력저하율이 낮으며, 온도가 25°C에서 50°C로 증가할 때의 압력저하율의 하락폭이 50°C에서 75°C로 증가할 때의 하락폭보다 크게된다.
- (2) 펌핑압력 1.5kg/cm²에서의 슬러지유의 압력저하율은 펌핑압력 0.5kg/cm²에서 보다 같은 온도와 매쉬의 크기에서 비교하면 상당히 낮게 나타난다. 하지만 펌핑압력 1.5kg/cm²에서 온도증가에 의한 압력저하율의 폭은 펌핑압력 0.5kg/cm²에서의 압력저하율의 폭과 거의 비례하여 낮아진다.
- (3) 펌핑압력 2.5kg/cm²에서의 압력저하율은 같은 유온에서 여과입도가 클수록 낮아지고, 또한 같은 여과입도하에서

의 압력저하율은 온도의 증가에 따라 큰 폭으로 낮아지고, 그 하락폭은 온도가 25°C에서 50°C로 증가할 때 보다 50°C에서 75°C로 증가할 때 크게 나타난다.

- (4) 같은 유온 및 여과입도의 크기 하에서의 압력저하율은 펌핑압력이 0.5kg/cm²에서 1.5kg/cm²으로 증가할 때 낮아지는 폭보다 1.5kg/cm²에서 2.5kg/cm²로 증가할 때의 압력저하율의 낮아지는 폭이 더욱 크게 나타난다.

참 고 문 헌

- [1] 田大熙(1990), “船舶油類管理”, 中社, pp 61~63.
- [2] 李鎮烈(1999), “油類工學”, 曉星出版社, pp 90~93.
- [3] 今村弘人(1995), “船用ディーゼル機關(燃焼・潤滑・損傷)”, 山海堂, pp 38~43.
- [4] 韓元熙(2002), “캐비티 流體流動의 應用에 의한 船舶 廢油 處理에 關한 研究”, 韓國海洋大學校 博士學位論文, pp 13~14.
- [5] 배중욱(1992), “선저폐유·슬러지의 보일러내 소각을 위한 연료 전처리장치의 개발에 관한 연구”, 해사산업연구소 논문집 제2권, pp 217~224.
- [6] 李鎮烈·河萬植·韓元熙(1999), “船舶油類 粒子的 均質效果에 미치는 超音波 分碎作用”, 海洋環境·安全學會誌, 第5卷 第2號, pp 67~78.
- [7] 이진열·정지선·하만식·한원희(2001), “선박 슬러지유 환경에서의 초음파 진동자 선단의 침식손상(1)”, 해양환경·안전학회지 제7권 제2호, pp1~11.
- [8] 前掲書 [1], pp 418~419.
- [9] 林祐助·李鎮烈(1996) “潤滑工學”, 螢雪出版社, pp 96~101.

접수일 : 2003년 4월 10일
채택일 : 2003년 6월 20일