

# 콜레이서를 이용한 배기가스 세정수 처리 성능에 관한 연구

하신영\* · † 김인수

\* 한국해양대학교 해사산업연구소 전임연구원, † 한국해양대학교 환경공학과 교수

## A Study on the Treatment Performance of Coalescer to Treat Exhaust Gas Cleaning Water

Shin-Young Ha\* · † In-Soo Kim

\* Research Institute of Maritime Industry of Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

† Professor Division of Environment Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

**요 약 :** 본 연구에서는 선박에서 발생하는 대기오염물질을 처리하기 위해 사용되는 습식 스크러버를 이용한 배기가스 세정시스템(EGCS: Exhaust Gas Cleaning System)에서 발생하는 폐수를 재이용 할 수 있는 순환시스템을 개발하기 위해 진행되었다. 선박 배기가스 DePM, DeSOx 순환처리장치 (Recycle system)의 세정수의 입자성물질과 분산유를 효과적으로 제거할 수 있는 수 처리 시스템을 개발한 결과 원심 분리형 Purifier만으로는 미세한 분산유의 처리가 어렵다는 결과가 도출되어 원심분리형 Purifier 후처리로 유수분리 경사 분리판을 이용한 유수분리기의 일종인 Coalescer를 본 시스템에 적용하였다. Coalescer는 2차 분산 상태의 에멀전화 된 미세 기름입자를 합착시켜 분리하는 기술이다. 선박 배기가스 DePM, DeSOx 순환처리장치 (Recycle system)에서 배출되는 세정수를 Purifier와 Coalescer를 이용하여 처리한 결과 입자성물질은 55% 분산유는 유입수 대비 99%이상 처리되는 것을 확인하였다. 따라서 선박 대기오염 저감을 위한 습식세정탑 시스템에 본 세정수 처리시스템을 도입하면 세정수로서 재사용이 가능하다고 판단된다.

**핵심용어 :** 유수분리 경사판, 선박 배기가스 세정시스템, 세정수 순환시스템, 미세 분산유 처리, 선저폐수

**Abstract :** This study was conducted on a circulation system which can recycle waste water from EGCS(Exhaust Gas Cleaning System) using a wet scrubber that is used to treat air pollutants from ships. Though we developed a water treatment system that could remove effectively particulate matters and dispersed oil included in cleaning water for Ship Exhaust Gas Recycle System(DePM & DeSOx), we found that it is difficult to treat minutely dispersed oil only by means of centrifugal-typed purifier. Therefore, to this system, we applied a coalescer that coalesces emulsified minute oil particles in the 2nd phase of dispersion state after being filtered through the centrifugal-typed purifier. After we treated cleaning water drained out of Ship Exhaust Gas Recycle System(DePM & DeSOx) by using both purifier and coalescer, we found that particulate matters and dispersed oil were removed more than 55% and 99%, respectively, in comparison with those contained in cleaning water influent. Putting the results together, we conclude that the treated cleaning water can be recycled as normal cleaning water if this cleaning water treatment system is employed by the wet cleaning tower system for the reduction of air pollutants from ships.

**Key words :** Coalescer, Bilge, EGCS, Circulation water, Wet scrubber

### 1. 서론

국제해사기구(IMO)의 해양오염 방지 협약(MARPOL73/78)을 통해 지구 오존층을 파괴하는 CFC계 냉매와 Halon가스 등의 사용을 금지하고, 배기가스 중에 포함된 황산화물(SOx)과 질소산화물(NOx)의 배출을 줄이기 위해 황 함유량이 낮은

연료유 사용을 유도하고 질소산화물의 배출허용치를 만족하는 기관 사용을 의무화하고 있다(Johansson et al, 2013). 아울러 IMO 해양환경보호위원회(MEPC; Marine Environment Protection Committee)에 선박에서 배출되는 입자상물질 (Particulate Matter, PM) 규제의 필요성에 대한 문건이 많이 제출되고 있는 실정이다(Choi et al, 2014).

† Corresponding author : 연희원, iskim@kmou.ac.kr 051)410-4416

\* 연희원, hsy4625@kmou.ac.kr 051)410-4255

(주) 이 논문은 “IMO 규정 대응 선박 배기가스 DePM, DeSOx 순환처리장치(Recycle system) 개발”이란 제목으로 “2015년 한국항해항만학회 추계학술대회 논문집(부산관광공사 아르피나, 2015. 10. 21-23, pp. 64-65)”에 발표되었음.

SOx 배출규제에 대응 방안으로는 황 함량이 적은 연료 사용, DF(Dual Fuel)엔진 사용, LNG 연료 사용, Scrubber를 이용한 배기가스 세정시스템(EGCS: Exhaust Gas Cleaning System)등의 방법이 있다. 그러나 황 함량이 적을수록 연료유 가격이 상승하는 문제가 발생하기 때문에 현시점에서 SOx규제 대응방법으로는 EGCS가 현실적이며, 이는 고가의 저황 연료유를 사용하지 않아도 되며, 폐기관의 개조를 통해 기존선박에도 적용가능한 장점이 있다.

배기가스에 포함된 PM(Particulate matter)은 SCR 촉매의 기공을 막아 그 활성 및 배관의 배압을 높여, 엔진이 멈추게 되는 원인이 되기도 하는 문제점이 있어 PM의 제거를 위해 습식세정탑(Wet scrubber)를 이용한 세정 시스템이 고려되고 있으며 습식세정탑의 경우 배기가스에 포함된 PM 및 분진을 약 96% 정도 저감이 가능하다고 알려져 있다(Lee et al, 2002). 본 연구에서는 입자상물질(PM)과 황산화물(SOx)를 효과적으로 저감시킬 수 있는 습식 세정기에서 배출되는 세정수의 재순환을 위해 배기가스 세정수 내 미세 기름입자를 분리할 수 있는 콜레이서를 개발하고 실제 습식 세정기 실험장치에 도입하여 세정수의 순환가능성을 분석하였다.

### 1.1 선저폐수의 일반적 특성

해양오염방지법 및 선박으로부터의 기름오염방지를 위한 국제협약에서 규정한 Bilge 폐수란 선박에서 발생하는 유성혼합물의 광의적 해석에서 기관실 저면이나 화물 펌프실과 타기실 등과 같은 장소에서 기름과 물 등이 흘러내려 물과 기름이 임의의 비율로 혼합된 상태를 말하고 있다. 선저폐수 중에 포함되어 있는 기름은 대부분이 자유 상태, 분산 또는 에멀전 등의 형태로 존재한다. 분산의 경우 기름입자의 면적과 그 안정도에 의해 1차적 분산 상태와 2차적 분산 상태로 나누어 생각할 수 있다.

1차적 분산 상태는 기름입자의 평균직경이 약 50 μm 이상으로서 난류와 대류흐름에 의해 물속에 불안정하게 분산되어 있는 상태이며 이 경우 단지 중력에 의해 쉽게 분리할 수 있다. 2차적 분산 상태는 평균직경 1~10 μm 정도의 기름입자들이 브라운 운동과 정전기력에 의해 비교적 안정되게 분산되어 있는 상태로 에멀전화된 기름을 의미하며 이 상태는 물리적 방법인 비중 차에 의한 분리는 불가능하다.

### 1.2 유수분리 경사판 분리이론

콜레이서(Coalescer)는 밀지중에 2차적 분산상태인 에멀전화된 기름입자들을 합착시켜 분리하는 것으로서 미세하게 흩어져 있는 기름 또는 물을 Coalescer 에 의해 1~2mm C의 크기로 성장시켜 용기 내에서 순간적으로 비중 처리 할 수 있는 장치이다.

기름입자들은 충전물들 사이의 비틀어진 통로를 진행하면서 충전물의 거친 표면에 부착되며 물의 흐름에 의한 견인력이 이들의 부착력보다 더 클 때 까지 다른 입자들과의 합착에

의해 성장하게 된다. 결과적으로 2차 분산상태의 기름입자들은 콜레이서를 거침으로써 1차 분산상태의 입자크기로 성장하게 된다.

콜레이서의 사용에 있어서 그것의 성능은 밀지 중 부유하고 있는 고형물의 존재에 의해 크게 영향을 받는다. 고형물이 있으면 그것은 콜레이서에 의해 걸러져 그 틈들을 막게 되며 따라서 콜레이서의 이용 가능 한 통로수가 감소하게 된다. 그 결과 콜레이서를 지날 때 압력강하가 심하게 될 뿐만 아니라 나머지 틈들에서의 유속이 증가하게 되어 결국 기름입자들이 콜레이서를 통하여 물과 함께 빠져 나가거나 유량이 상당히 감소하게 된다. 일반적으로 이러한 문제를 해결하기 위하여 고형물을 제거하기 위한 필터를 전처리 장치로서 설치하거나 또는 충분한 물로써 고형물을 역으로 씻어내도록 하는 백플러시 설비를 갖추고 있다. 백플러싱을 할 경우 백플러시 동작은 일정한 시간간격 또는 일정한 압력강하가 검지되었을 때 자동으로 수행되는 시스템이 구성되어 있다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험장치 및 실험방법

선박 배기가스 DePM, DeSOx 순환처리장치 (Recycle system)의 세정수의 PM과 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH)를 효과적으로 제거할 수 있는 수 처리 장치의 개념도는 Fig. 1과 같다.

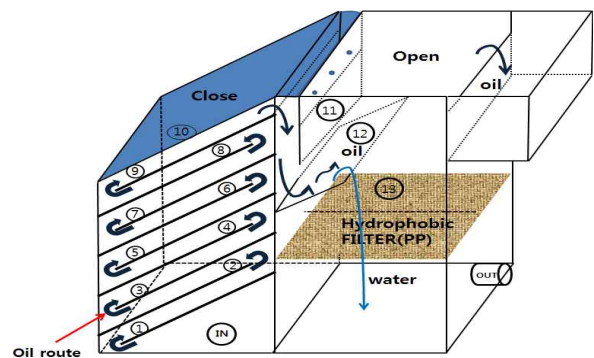


Fig. 1 Schematic diagram of Coalescer Filter

Wet-Scrubber에서 배출된 유분이 포함된 폐수는 원심분리형 Purifier에서 1차적으로 유수분리가 이루어지게 된다. 원심분리형 Purifier에서 처리된 처리수는 작은 입자의 분산유를 부상유로 바꾸어 유수분리를 도우며, 습식세정탑 순환수로 사용할 수 있는 배출수를 생산하기 위해 2차적으로 본 연구진이 고안한 콜레이서(Coalescer)로 유입하여 총 10개의 경사분리판을 통과하며 기름의 입자가 분산유에서 부상유로 전환하여

쉽게 부상 될 수 있도록 했으며, 부상된 기름입자는 기름 분리관에서 기름과 물로 분리되게 되고 상단의 기름은 오일 저장탱크에 유입되고, 하단의 처리수는 마지막 활성탄을 통과하여 NaOH를 이용한 pH조절 후 유출구로 배출되어 습식세정탑으로 재사용되는 원리이다.



Fig. 2 Photograph of Coalescer in this study

2.2 분석방법

DO, pH, 탁도는 측정기기를 사용하여 측정하였으며, 해양환경공정시험법을 이용하여 T-N, T-P, COD, SS과 같은 수질분석실험을 진행하였다. GC-MS (Agilent Technologies 6890N Network gas chromatograph / Agilent Technologies 5973Network mass selective detector)를 사용하여 16종 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH)를 정량 · 정성 분석하였다. 분석에 사용된 실험방법과 장비는 Table 2에 가스크로마토그래프와 검출기의 조건은 Table 3에 나타내었다. 실험기간은 선박 배기가스 DePM, DeSOx 순환처리장치 (Recycle system)의 시운전 기간 10일 동안 3회 샘플링 및 분석하여 Sigmaplot 12.0을 이용하여 통계 처리하였다.

Table 2 Analytical method

Test item	Analytical method
pH	Standard method 4500 (YSI 63)
COD	Standard method 5220
SS	Standard method 2540
T-N	Standard method 4500 (Hitachi U3000)
T-P	ES 04362.0
DO	Standard method 4500 (YSI 58)

Table 3 Gas chromatography analysis conditions for 16-PAHs

GC condition	
Column	HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm Film)
Temperature program	Initial @ 70°C (4 min) Ramp (10°C/min to 300°C) Final @ 300°C (7 min)
Carrier gas	He 1.0 mL/min
Injection port Temp	300°C
Injection mode	split (10:1)
Injection volume	2 μl
MS condition	
MS Source	230°C
MS Quad	150°C

3. 결과 및 고찰

3.1 선박 배기가스 DePM, DeSOx 순환처리장치 (Recycle system)의 PM, PAH 제거효율 산정

1) 부유물질(suspended solid) 제거효율

습식세정탑 세정수 시스템 단계별 부유물질 제거효율을 Fig. 3에 나타내었다. 유입수의 부유물질이 4.68 - 5.01 mg/L(4.865±0.163 mg/L)로 나타났으며, 선박 배기가스 습식세정 후 11.78 - 11.82 mg/L(11.80±0.020 mg/L)로 PM의 농도가 증가한 것을 확인할 수 있다. 이후 원심분리를 통해 수층과 입자가 분리되어 Purifier에서 배출되는 세정수는 유입수와 유사한 27.6 - 28 mg/L(27.80±0.190 mg/L)이었으나, 습식세정 이후 pH가 평균 5.8정도로 감소하여 세정수의 재사용을 위해서는 배출수의 pH조절이 필요하다 판단하여 한차례 더 Coalescer(유수분리기)와 pH Mixer로 중화시킨 결과 배출수의 부유물질이 2.01 - 2.05 mg/L(2.04±0.0265 mg/L)으로 재사용하기 적합한 결과가 나타났다.

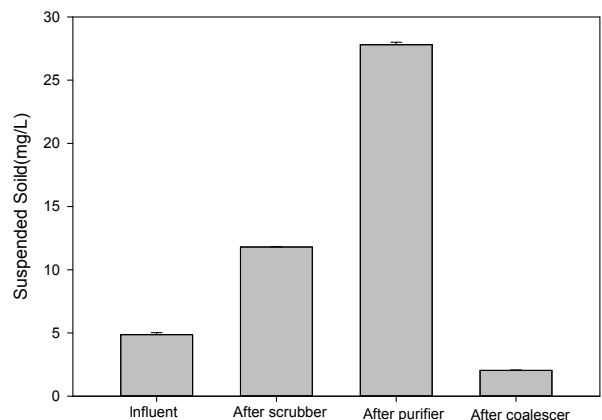


Fig. 3 Comparison of suspended solids on circulated water

2) 16-PAH 제거효율

습식세정탑 세정수 시스템 단계별 PAH 제거효율을 Fig. 4에 나타내었다. 유입수인 일반해수의 PAH는 검출되지 않았으며, 선박 배기가스 습식 세정 후 2.71 - 2.80 mg/L(2.7558±0.045 mg/L)정도로 PAH의 농도가 증가한 것을 확인할 수 있다. 이후 Purifier장치에서 원심분리를 통해 수층과 입자가 분리되어 Purifier에서 배출되는 세정수는 유입수와 유사한 0.41-0.45 mg/L(0.4325±0.020 mg/L)정도이었으나, 습식 세정 이후 pH가 평균 5.8정도로 감소하여 세정수의 재사용을 위해서는 배출수의 pH조절이 필요하다 판단하여 한차례 더 Coalescer(유수분리기)와 pH Mixer로 중화시킨 결과 배출수의 PAH가 불검출 되었다.

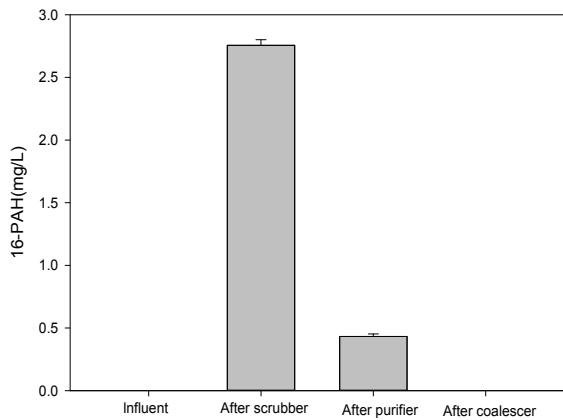


Fig. 4 Comparison of 16-PAH on circulated water

3) 세정수 중화율 (pH 조절) 측정

습식 스크러버 세정수 시스템의 단계별 산도 변화 및 중화효율을 Fig. 5에 나타내었다. 유입수의 pH는 7.86로 나타났으며, 습식 세정 후에 배출되는 세정수의 pH는 5.64로 습식 세정 공정중 수소이온의 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 이후 세정수를 처리하는 1차공정인 Purifier장치 이후에도 습식 세정 후 세정수와 유사하게 pH 5.82로 나타났다. 세정수의 재사용을 위해서 pH의 중화가 필요하며, 2차공정인 Coalescer(유수분리기)와 pH Mixer를 통해 세정수를 중화시켜 최종적으로 배출되는 배출수의 pH농도는 평균 7.58로 중화되어 배출되는 것을 확인하였다.

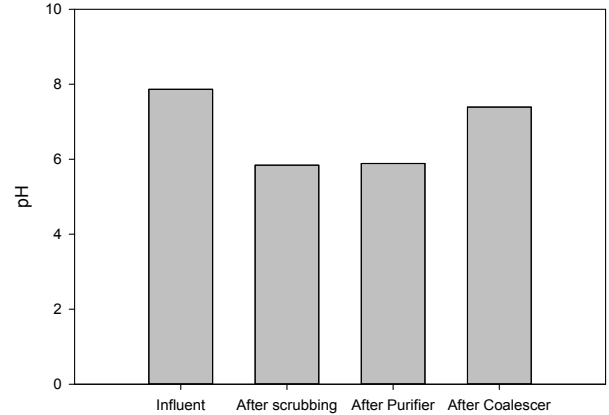


Fig. 5 Comparison of pH on circulated water

3.2 배출수 수질분석

1) 탁도(NTU)

각 단계별 탁도를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 유입수의 탁도는 2.1 NTU로 나타났으며, 습식 세정 후에 배출되는 세정수의 탁도는 16.2 NTU로 습식 세정 공정 중 탁도의 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 이후 세정수를 처리하는 1차공정인 Purifier장치 이후의 탁도의 농도는 2.3 NTU으로 습식 세정 이후 세정수 보다는 감소되었으며, 2차공정인 Coalescer(유수분리기)와 pH Mixer를 통해 최종적으로 배출되는 배출수의 탁도는 평균 1.8 NTU로 초기 유입해수보다 탁도가 낮아 충분히 재사용 가능한 것으로 판단하였다.

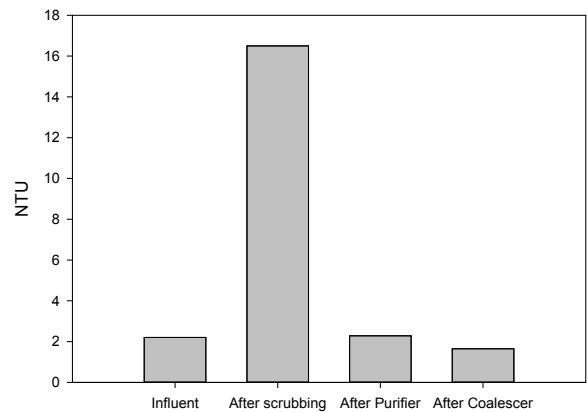


Fig. 6 Comparison of NTU on circulated water

2) 화학적산소요구량(COD)

각 처리단계별 화학적산소요구량(COD)의 농도를 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 유입수의 COD는 0.395 - 0.410

mg/L(0.4045±0.007 mg/L)로 나타났으며, 습식 세정 후에 배출되는 세정수의 COD는 5.27 - 5.31 mg/L(5.2892±0.019 mg/L)으로 습식 세정 공정 중 COD의 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 이후 세정수를 처리하는 1차공정인 Purifier장치 이후의 COD의 농도는 2.28 - 2.32 mg/L(2.3037±0.019 mg/L)의 농도로 습식 세정 이후 세정수 보다는 감소되었으나 세정수의 재사용을 위해서 COD의 처리가 필요하며, 2차공정인 Coalescer(유수분리기)와 pH Mixer를 통해 최종적으로 배출되는 배출수의 COD의 농도는 1.05 - 1.51 mg/L(1.2096±0.260 mg/L)정도로 유입해수보다 다소 높긴 하나 재사용 할 수 있는 농도로 배출되는 것을 확인하였다.

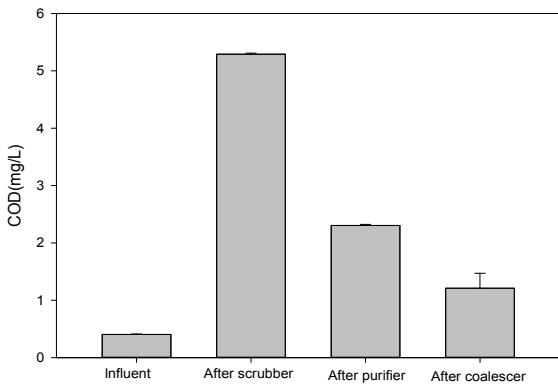


Fig. 7 Comparison of COD on circulated water

3) 총질소(T-N)

각 단계별 총 질소 농도를 측정한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 유입수의 총질소는 0.392 - 0.421 mg/L(0.4039±0.008 mg/L)정도로 나타났으며, 습식 세정 후에 배출되는 오염수의 총질소는 4.46 - 4.68 mg/L(4.5590±0.113 mg/L)로 습식 세정 공정 중 총 질소의 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 이후 세정수를 처리하는 1차공정인 Purifier장치 이후의 총질소의 농도는 1.79 - 1.95 mg/L(1.8823±0.083 mg/L)의 농도로 세정수 재이용에 적합한 수질이었으며 2차 공정 이후 총질소의 농도는 1.82 - 1.88 mg/L(1.853±0.030 mg/L)로 2차 공정은 총질소 농도에 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다.

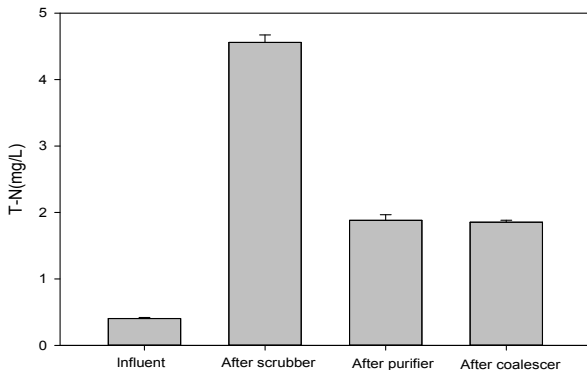


Fig. 8 Comparison of T-N on circulated water

4) 총인(T-P)

각 단계별 총인농도를 측정한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 유입수의 총인은 0.032 - 0.0355mg/L(0.034±0.0016 mg/L) 정도로 나타났으며, 습식 세정 후에 배출되는 세정수의 총인은 0.235 - 0.271 mg/L(0.254±0.0181 mg/L)로 습식 세정 공정중 총인의 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 이후 세정수를 처리하는 1차공정인 원심분리장치(Purifier) 이후 총인의 농도는 0.098 - 0.114 mg/L(0.105±0.0081 mg/L)의 농도로 습식 세정 이후 세정수 보다는 감소되었으나 세정수의 재사용을 위해서 총인의 감소가 필요하며, 2차공정인 Coalescer와 pH Mixer를 통해 최종적으로 배출되는 배출수의 총인의 농도는 0.045 - 0.048 mg/L(0.046±0.0017 mg/L)로 재사용하기 적합한 농도로 배출되는 것을 확인하였다.

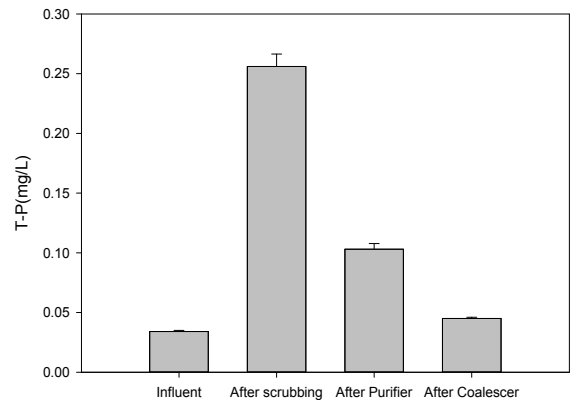


Fig. 9 Comparison of T-P on circulated water

4. 결론

선박 배기가스 DePM, DeSOx 순환처리장치 (Recycle system)의 세정수의 PM과 PAH를 효과적으로 제거할 수 있는 수처리 시스템을 고안한 결과 원심분리형 Purifier만으로는 미세한 분산유의 처리가 어렵다는 결과가 도출되어 경사분리판을 이용한 유수분리기의 일종인 Coalescer Filter를 2차처리로 이용하여 그 효과를 검증해보았다.

원심분리형 Purifier에서 처리된 처리수의 성상은 대부분 유류가 에멀전화 된 2차 분산 상태이기 때문에 작은 입자의 분산유를 경사분리판을 통과하며 부상유(Free Oil)로 바꾸어 유수분리를 가능한 입자로 응집시켜주고, 이때 부상된 기름입자는 기름 분리판에서 기름과 물로 분리되게 되고 상단의 기름은 오일 저장탱크에 유입되는 시스템이다.

선박 배기가스 DePM, DeSOx 순환처리장치 (Recycle system)에서 배출되는 세정수를 Coalescer Filter를 이용하여 2차 분산유의 처리효과를 16-PAH 농도비교를 통해 분석한 결과 16-PAH의 농도가 유입수와 같이 불검출 되는 것을 확인하여 콜레이서가 분산유의 처리의 효과가 있는것으로 판단

된다. 또한 습식세정기에서 배출된 오염수를 1차 원심분리형 Purifier, 2차 Coalescer로 처리한 결과 SS는 55%, 대표적인 수질인자인 COD, T-N, T-P가 약 76%, 60%, 81% 처리되어 재사용이 가능한 유입수의 수준으로 분석되었다.

따라서 본 세정수 처리시스템을 이용하면 배기가스 세정시스템(EGCS: Exhaust Gas Cleaning System)에서 발생하는 폐수를 순환하여 재이용이 가능한 것으로 사료된다.

## References

- [1] Choi, J. H., Choi, S. C., Kim, D. Y., Lee, J. and Park, S. H.(2014), "An Experimental Study on Optical and Physical Properties of Particulate Matter produced from F-76 Marine Diesel and JP-8 Aviation Fuels", The Korean Society Of Marine Environment & Safety, Vol. 20 No. 6, pp. 781-787.
- [2] IMO MAPOR 73/78(1973,1978), Annex VI of Prevention of Air Pollution from Ships (entered into force 19 May 2005).
- [3] IMO MAPOR 73/78(1973,1978), Annex I Regulations for the Prevention of Pollution by Oil (entered into force 2 October 1983).
- [4] Johansson, L., Jalkanen, J. P., Kalli, J., Kukkonen, J.(2013), "The evolution of shipping emissions and the costs of regulation changes in the northern EU area", Atmos. Chem. Phys., Vol. 13, pp. 11375-11389.
- [5] Lee, H. J., Kwon, M. H., Shin, C. K., Lee, W. S., Hwang, S. H., Chung, I. R., Kim, S. C., Song, G. J., Song, S. H. and Jeon, J. J.(2002), "A study on the Performance Improvement of Wet Scrubber in Waste Incinerators", Report of NIER, Korea, Vol. 24, pp. 359 - 373.
- [6] Marine Environment Management Act(2015), Ministry of Oceans and Fisheries of Korea.
- [7] Marine Environmental process test(2015), Ministry of Oceans and Fisheries of Korea

---

Received 8 October 2015

Revised 19 February 2016

Accepted 22 February 2016