

진공 증발에 의한 폐윤활유 속의 수분 제거에 관한 실험적 연구

정상현* · 박성제* · 홍원석* · 김용진* · 구경희**

*한국기계연구원 환경기계기술연구부, **(주)삼영필텍

E-mail : shjeong@kimm.re.kr

An Experimental Study on the Dewatering from the Waste Lubrication Oil by Vacuum Evaporation

S.H. Jeong*, S.J. Park*, W.S. Hong*, Y.J. Kim* and K.H. Goo**

Korea Institute of Machinery & Materials, Yuseong, P.O. Box 101, Daejeon, 305-343, Korea

*Korea Institute of Machinery and Materials

**SYFT Co.

요 약

실험실 규모의 진공 증발 수분 제거 시스템을 이용하여, 압력, 윤활유의 온도, 초기 수분농도 및 윤활유 분사 노즐의 형태 등 폐윤활유 속에 포함된 수분 제거 성능에 영향을 미치는 각각의 운전 변수들에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. 연구의 결과 압력 및 폐윤활유 온도의 증가는 수분 제거 성능에 매우 중요한 변수임을 확인하였으며, 또한 진공 증발실로 폐윤활유를 분사하기 위한 노즐의 형태는 다공성 매질의 노즐 형상인 경우가 가장 우수한 수분 증발 성능을 나타내었다.

Abstract — An experimental study on the characteristics of a dewatering due to vacuum evaporation in the waste lubrication oil were performed using a lab scale system. Evaporation characteristics were investigated for various performance factors. Results of evaporation characteristics as a function of vacuum pressure, oil temperature, initial water concentration, and nozzle type were obtained. Increasing the oil temperature and altering the nozzle type were found to increase the evaporation rate without increasing vacuum pressure requirement. The best performance is achieved for the nozzle which made porous material.

1. 서 론

유압장치, 공작기계 등의 기계장치 구동에 필연적으로 사용되는 윤활유는 그 오염도에 따라 교체 주기가 달라지며, 또한 사용 중인 윤활유 오염 방지는 윤활유의 수명 증가뿐만 아니라, 폐윤활유의 배출량 증가를 사전에 방지하는 방안이 될 수 있다.

윤활유의 수명 증가는 상대적으로 윤활유의 소모량을 감소시키는 역할을 하기 때문에 에너지 절약 측면에서 매우 큰 효과를 나타낼 수 있고, 또한 오염된 폐윤활유를 정화하여 윤활유로서 다시 사용할 수 있다면 경제적 측면에서 매우 큰 이득을 기대할 수 있으나, 정화 기술의 부족으로 대부분의 폐윤활유는 폐기물화되거나, 저급의 재생유로 정화되어 연료유로 사용되는 것이 일반

적이다.

윤활유가 폐기물로 되는 경로는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 열화 등의 원인으로 윤활유의 화학적 조성이 변하여 윤활유로서의 가치가 없어진 경우이며, 두 번째의 경우는 윤활유속에 수분, 입자상 물질 등의 오염물이 기계에 물리적인 손상을 줄 정도로 증가하여 윤활유로서의 가치를 상실하여 폐유가 되는 경우이다.

일반적으로 윤활유가 화학적으로 변화된 경우에는 재생 후 연료유로 사용되며^[1] 재생 방법으로는 활성백토처리법, 감압증류법, 이물질의 제거^[2], 부상원심분리법^[3], 및 유동층 열분해 장치를 이용하여 재생유를 수거하는 방법^[4] 등의 연구 결과가 있으나, 재생과정에서 새로운 환경 오염물질의 발생과 처리 과정에 필요한 공정에서 소요되는 과도한 에너지 소비로 인한 경제성 문제, 그리

고 재생 후의 유허유의 품질 등 많은 문제점들이 있다.

한편 화학적인 변화(열화)가 문제가 되지 않는 경우에 유허유를 오염시키는 주된 원인은 수분과 입자상 물질이다. 특히 유압작동장치, 공작기계의 작동유 및 일반 산업기계의 작동유 등이 교체/폐기되는 경우는 대부분이 수분과 입자상 물질의 증가로 인한 물리적인 오염으로 인하여 유허유로서의 기능을 상실한 경우이다. 한 예로 기계장치 속에서 작동 중인 유허유에 수분이 포함되어 있으면 부식, 유허 특성의 감소, 유체 파손, 유전 강도의 감소, 그리고 유허유의 산화 등 유허 시스템의 내구성에 매우 치명적인 영향을 미칠 수 있다.

이와 같은 관점에서 보면 유허유 속에 포함된 수분의 제거에 의하여 폐유허유를 재사용이 가능한 고품질의 재생유로의 정화 공정은 환경적인 측면은 물론이고 에너지 소모 측면과 에너지 복원 측면에서 그 중요성을 가지며, 액체에서 액체를 제거하는 건조 기술의 일종이다.

한편 유허유에 포함된 수분은 유허유와 독립적으로 분리되어 있어 쉽게 제거가 가능한 자유수(free water)와 유허유와 결합된 상태로 존재하는 수분인 용해수(dissolved water)로 구분할 수 있다. 자유수의 경우에는 간단한 기계적인 방법에 의하여 쉽게 유허유로부터 분리가 가능하지만, 유허 작용 저하의 주된 요인이 되는 용해수의 완전 분리는 쉽지가 않다.

유허유에서 수분의 제거를 위한 가장 간단한 방법은 가열 증발을 이용하는 방법이지만, 이 방법은 과도한 에너지의 소비가 필연적으로 수반되어 경제성에서 매우 불리한 공정이며, 따라서 에너지 소비량의 감소와 수분 증발율의 증가가 동시에 이루어져 경제성이 충분히 확보됨과 동시에 고품질의 재생유의 생산이 가능한 수분 제거 기술에 대한 연구의 필요성은 매우 높다.

일반적으로 유허유 속에 포함된 수분을 제거하기 위한 방법은 가열증발 방법이 첫 번째로 고려될 수 있으나, 이 방법은 고온, 고압의 시스템 구성이 필요하고 또한 과도한 에너지의 소비가 필연적으로 수반되어 경제성에서 매우 불리하고, 연속적인 처리 공정이 어렵기 때문에 처리 효율이 낮다는 단점이 있다. 또한 감압 증발 방법의 경우는 가열증발 방법에 비하여 에너지 소모 측면에서는 유리하지만, 연속적인 처리가 이루어지지 않는다는 점에서, 폐유허유, 또는 작동 중인 유허유의 수분 제거 공정으로는 부적당하다.

이와 같이 방법에 비하여 에너지 소모의 감소 및 수분 제거효율의 증가 그리고 장치의 콤팩트화 등이 동시에 고려된 방법의 하나로 유허유와 수분의 포화 증기압과 포화 증기 온도 사이의 상관 관계를 이용하면, 저온의 상태에서도 유허유 속에 포함된 수분을 매우 효율적으로 증발시킬 수 있다. 그러나 이와같은 저온 진공 증

발 방법은 유허유의 연속적인 흐름 상태에서 수분을 증발시킬 수 있으며, 장치의 구성이 단순하고 에너지 소모량도 작아 경제성 측면에서도 매우 유리한 방법이나, 수분의 증발 성능은 압력, 온도, 수분 농도 등 장치의 운전 변수들에 영향을 받는다^[5].

이에 따라 본 연구에서는 폐유허유 속에 포함된 수분의 연속적인 제거가 가능한 진공 증발 시스템 설계 기초 자료의 확보를 위하여, pilot 진공 증발 시스템에서, 압력, 유허유 온도, 유허유의 분사 형태 등의 시스템 운전 변수가 유허유속에 포함된 수분의 증발 성능에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 고찰하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

폐유허유 속의 수분 제거 시 각각의 성능 변수에 대한 영향 평가를 위한 실험 장치는 진공증발실(evaporation chamber), 배출실(exhaust chamber), 응축기(condenser), 응축수 탱크(water tank), 히터, 진공펌프, 오일펌프 그리고 오일 탱크로 크게 구성되며, Fig. 1에 장치의 개략도를 나타내었다. 진공증발실 및 배출실은 각각 70리터 및 30리터의 체적을 가지는 SUS 재질의 진공 탱크이며, 유허유의 분무 상태 및 배출 상태를 관찰할 수 있는 관찰창이 부착되어 있다. 진공증발실과 배출실에는 각각 내면의 유허유 수위 조절을 위한 수위 조절기가 부착되어 있고, 진공증발실의 상부에는 압력 및 온도 측정을 위한 진공 압력계와 열전대를 설치하였으며, 배출실의 상부에는 압력 측정을 위한 진공 압력계 및 내부 압력 조

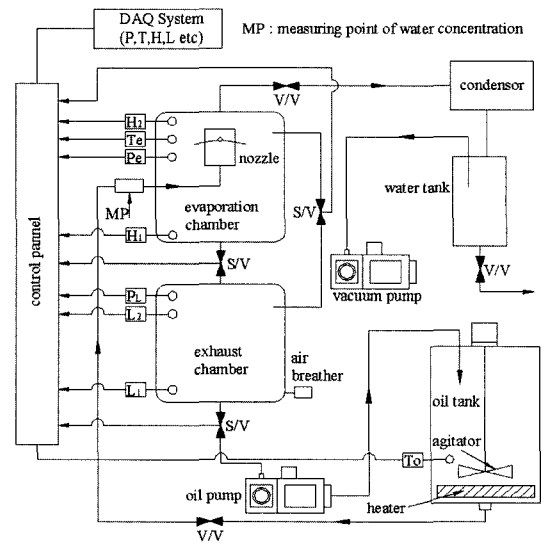


Fig. 1. Schematic diagram of pilot dewatering system.

질을 위하여 통기관(air breathing tube)을 설치하였다. Fig. 1에서 H_2 , H_1 , P_e 및 T_e 는 진공 증발실의 상,하부 수위 조절기, 진공 압력 및 온도를 각각 나타내고, L_2 , L_1 및 P_L 은 배출실에서의 상,하부 수위 조절기, 진공 압력 및 온도를 각각 나타낸다.

배출실에 저장된 윤활유는 오일 펌프에 의하여 오일 저장 탱크로 이송되며, 오일저장 탱크 내부에는 저장된 윤활유를 실험 온도로 가열하기 위한 히터(10 kW) 및 윤활유와 수분의 혼합을 촉진시키기 위한 교반기를 설치하였다. 가열된 수분 증기를 포화 온도 이하인 실내 온도로 냉각시킨 후 포집하기 위하여 공랭식 응축기를 사용하였으며, 응축기에서 응축된 수분은 응축탱크에 저장되어 수위가 일정량 이상이 되면 하부의 드레인 밸브를 열어 외부로 배출한다.

실험 장치의 운전 원리는 다음과 같다. 먼저 진공 펌프의 작동에 의하여 응축탱크, 응축기 및 진공증발실 내부는 진공 상태가 되고, 이때 오일 탱크의 윤활유는 노즐을 통하여 진공증발실 내부로 분사된다. 노즐로부터 분사된 윤활유 액적들은 진공으로 인하여 수분 및 오일의 포화 증기 온도의 차이에 의하여 수분을 윤활유로부터 증기상의 형태로 분리할 수 있다.

이때 진공증발실에 저장된 윤활유는 일정량 이상이 되면 배출실로 이송되며, 이때 각각의 관로에 설치된 솔레노이드 밸브의 작동에 의하여 증발실 내부 압력이 유지될 수 있도록 제어되며, 따라서 윤활유의 배출 과정 동안에도 노즐에서는 연속적인 분사가 일어난다.

윤활유를 진공증발실 내부로 분사시키는 노즐은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 직경 100 mm의 원통의 외면에 직경 2 mm의 구멍을 60개 뚫은 단순 분무형 노즐, 직경 100 mm의 원통형이며 외면이 다공성 재질로 제작되어 다공성 재질의 공극을 통하여 윤활유가 분사되는 필터형 노즐, 그리고 분사되는 윤활유의 형태가 필름 형태를 가지는 필름형 노즐 등 3종류의 노즐이 사용되었다.

윤활유의 외부 이송을 위한 임시 저장소인 배출실의 1회 순환시의 유량은 약 19 l이며, 60 l/h의 처리 유량으로 운전하기 위하여 1시간에 약 30번의 순환을 하였다. 또한 배출실로부터 오일탱크로 윤활유를 이송하기 위하

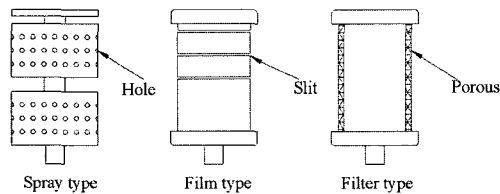


Fig. 2. Type of nozzle used in experiment.

여 500 l/h 용량의 오일 펌프를 사용하였고, 유량의 측정은 적산 유량계를 사용하였다.

진공증발 시스템에서 압력은 윤활유를 노즐에서 분사시키는 동력으로 작용함과 동시에 수분의 증발 상태에 직접적인 관계가 있으므로, 진공증발실, 배출실 및 응축수 탱크의 내부 압력을 실시간으로 측정하기 위하여 디지털 진공 압력계를 설치하였고, 또한 진공증발실, 응축기 입,출구, 응축수 탱크 및 오일 탱크에는 온도 측정을 위한 K-Type의 열전대를 설치하여, 각각의 압력 및 온도는 DAQ(Data logger, Agilent Model 34970A) 시스템에 의하여 실시간으로 계측하였다. 폐윤활유 속에 포함된 용해수 농도는 진공증발실로 유입되는 관로에서 용해수 농도 측정기(Infrared Spectroscope, UCC, Model 7160)를 사용하여 실시간으로 측정하였으며, DAQ 시스템 및 수분 측정기는 컴퓨터와 연결하여 데이터를 분석하였다.

실험 조건의 수분 초기농도 설정을 위하여 수분이 포함되지 않은 신윤활유를 오일저장 탱크에 저장한 후, 탱크 내부 윤활유의 온도가 실험 온도에 도달할 때까지 시스템을 예비 운전시킨 후, 실험 조건의 수분 함유량이 되도록 일정한 수분을 탱크 내부에 공급하고 1 사이클을 공회전 시킨 후 온도, 압력, 유량 및 수분 함유량 등의 작동 실험 결과 데이터를 수집하여 처리하였다.

3. 결과 및 고찰

윤활유에 포함된 수분의 증발에 대한 실험의 수행을 위하여는 실제적으로 윤활 시스템에서 수거한 폐윤활유를 실험 대상으로 하는 것이 가장 이상적이나, 실험의 조건을 만족하는 일정한 수분 함유량을 가지는 동종의 폐윤활유를 지속적으로 공급받기는 현실적으로 매우 어려운 일이다. 이와 같은 이유로 인하여 본 연구에서는 점도에 따라 분류된 산업용 윤활유 중에서 ISO VG-32의 윤활유를 선택하여 오일저장 탱크에 저장하여 실험 대상 윤활유로 사용하였다.

실험 대상 윤활유의 수분 농도는 오일 탱크에 저장된 일정량의 윤활유에 각각의 수분 농도 조건과 일치하는 물을 혼합하여 초기 수분 농도를 설정하였다. 즉 본 연구에서의 초기 수분 농도의 의미는 오일탱크 속의 윤활유와 물이 혼합된 초기 상태에서의 수분 농도를 나타낸다.

오일 저장 탱크에서의 수분은 윤활유에 흡수되어 용해수 상태로 존재하는 수분과 윤활유와 분리되어 오일 탱크의 하부에 저장되는 자유수 상태의 수분이 공존하게 되며, 자유수와 용해수 및 윤활유가 노즐을 통하여 진공증발실로 유입된다. 따라서 시스템의 운전 시작 시점에서 진공압력에 의하여 진공증발실로 유입되는 윤활

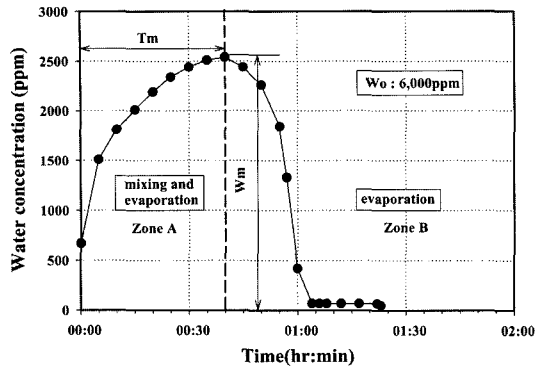


Fig. 3. Data for water concentration at evaporation chamber inlet.

유의 수분 농도는 오일 탱크 속에서의 초기 수분 농도가 아니고, 용해수와 일부의 자유수에 의한 임의의 수분 농도를 가지는 유허유 상태이며, 따라서 진공증발실로 유입되는 유허유의 수분 농도는 오일 탱크 속의 초기 수분 농도에 비하여 매우 낮은 수분 농도를 나타낸다.

Fig. 3은 진공증발실로 유입되는 유허유의 수분 농도의 변화를 설명하기 위하여, 오일 탱크에서의 초기 수분 농도가 6,000 ppm인 경우, 운전 시간의 증가에 따른 수분 농도 데이터의 예를 나타낸다. 그림에서 장치의 운전 시작과 동시에 측정된 진공증발실 입구에서의 유허유 수분 농도는 약 500 ppm으로 오일 저장 탱크에서의 초기 수분 농도(W_o)인 6,000 ppm에 비하여 매우 낮은 값을 나타내지만, 운전 시간의 증가에 따라 점점 증가하는 경향을 가짐을 볼 수 있다.

이와 같이 초기 운전 시에 진공증발실 입구에서의 수분 농도의 변화는 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉 오일 탱크로부터 진공증발실로 유허유가 유입될 때, 초기에는 오일 탱크 속에서는 유허유와 물의 혼합이 충분하게 이루어지지 못한 상태에서 진공증발실로 유입되나, 이후 장치의 운전 시간의 증가에 따라 유허유의 순환 회수의 증가로 인하여 오일탱크에서 유허유와 수분의 혼합은 점점 활발하여지고 그 결과 진공증발실로 유입되는 유허유의 수분 농도는 점점 증가하게 된다. 그림에서 증발실로 유입되는 유허유의 수분 농도가 최대가 될 때까지의 운전 시간 및 최대 수분 농도를 각각 T_m 과 W_m 으로 나타내었으며, 이 때까지의 시간 영역을 영역 A로 나타내었다. 한편 그림에서 볼 수 있듯이 운전 시간이 T_m 을 지나면 진공증발실로 유입되는 유허유의 수분 농도는 운전 시간의 증가에 따라 점점 감소함을 볼 수 있으며, 이 시간 영역을 영역 B로 나타내었다.

영역 A와 영역 B의 물리적인 의미는 다음과 같다. 영역 A에서 초기에 진공증발실로 유입되는 유허유는 다

량의 자유수와 소량의 용해수를 포함하고 있으며, 진공 증발실 내의 진공 압력에 대응하는 포화증기 온도에서 수분들은 증발하고, 순환 회수의 증가에 따라 영역 A에서 유허유에 포함된 자유수의 농도는 점점 낮아지고 상대적으로 용해수의 농도는 점점 증가하여 최대의 수분 농도인 W_m 에 도달하게 된다.

따라서 시스템의 운전 초기인 영역 A에서는 자유수의 농도는 용해수의 농도에 비하여 매우 높지만, 시간 T_m 동안 대부분의 자유수는 증발되었음을 나타내고, 이것은 시간 T_m 이후의 오일 탱크 내부의 유허유에는 용해수만 포함되어 있음을 나타내며, 최대 수분 농도 W_m 을 기점으로 하여 운전 시간의 증가에 따라 수분 농도는 감소하게 된다. 즉 자유수는 유허유와 완전히 분리되어 있기 때문에, 용해수에 비하여 농도가 높을 지라도 진공 압력과 포화증기 온도에서 매우 쉽게 증발이 될 수 있음을 나타내고, 용해수인 경우에는 유허유와 결합되어 있기 때문에 자유수에 비하여 상대적으로 증발이 어려워, 장치의 운전에 따른 유허유의 순환에 의하여 영역 A에서 증발과 혼합이 동시에 발생되었음을 예측할 수 있다.

한편 장치의 운전 시간이 T_m 이후, 즉 영역 B에서는 진공증발실로 유입되는 유허유에는 용해수만 포함되어 있음을 예측할 수 있고, 운전 시간의 증가에 따라 용해수도 점점 증발되어 유허유 속의 수분이 제거된다. 이와 같은 운전 시간의 증가에 따른 수분의 증발 경향은 초기 수분 농도 및 각각의 운전 조건에 따라 다를 수 있으며, 그 차이는 T_m 및 W_m 의 차이로 나타난다. 본 연구에서는 장치의 운전 변수가 수분 증발 성능에 미치는 영향에 대한 고찰이 목적이기 때문에, 각각의 실험 조건에 대하여 진공증발실로 유입되는 유허유 수분 농도의 비교 분석을 용이하게 하기 위하여, 영역 B에서의 수

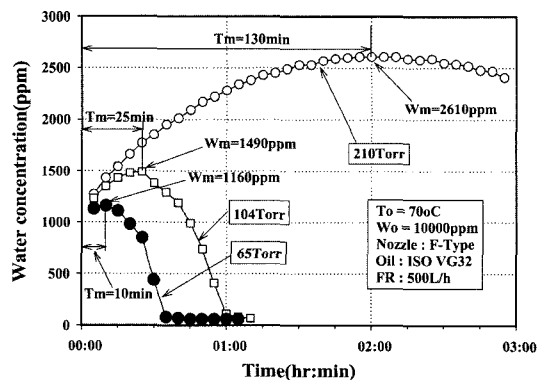


Fig. 4. The effect of vacuum pressure on the dewatering performance.

분 농도를 관심의 대상으로 하여, 증발실 유입구에서 윤활유의 기준 수분 농도를 W_m 로 선택하고, 각각의 운전 변수에 대한 수분 농도를 W_m 에 대하여 무차원화 하였다.

Fig. 4는 진공증발실로 유입되는 윤활유의 온도는 70°C , 오일 탱크에서의 초기 수분 농도는 1% 그리고 필터형 분무 노즐을 사용한 경우, 진공증발실 압력이 65 Torr, 104 Torr, 210 Torr인 각각에 대하여 운전 시간의 증가에 따른 윤활유 수분 농도의 변화를 나타낸다.

그림으로 부터, 진공증발실의 압력이 65 Torr일 때, 자유수의 증발 시간 T_m 은 10분 소요된 반면에 104 Torr, 210 Torr인 경우에는 각각 25분과 130분이 소요되었음을 볼 수 있고, 또한 최대 용해수 농도는 증발실의 압력이 65 Torr인 경우에는 1160 ppm인 반면에 104 Torr, 210 Torr인 경우에는 각각 1490 ppm과 2610 ppm을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

이것은 앞에서 언급된 바와 같이 진공증발실의 압력이 65 Torr로 이때의 수분의 포화 증기 온도는 매우 낮기 때문에 초기 수분 농도(W_o)의 윤활유가 진공증발실로 유입됨과 동시에 운전 시간의 증가에 따라 자유수 및 용해수가 매우 빠르게 증발되었음을 알 수 있고, 이와 반면에 진공증발실의 입력이 210 Torr인 경우에는 65 Torr인 경우에 비하여 수분의 포화증기 온도가 상대적으로 높기 때문에 수분의 증발 속도는 매우 느려짐을 알 수 있다.

한편 자유수가 모두 제거된 이후 즉 운전 시간이 T_m 이후, 윤활유에 용해수만 남은 경우 역시 증발실의 압력이 낮을수록 용해수의 증발 속도는 빠르게 진행됨을 볼 수 있으며, 진공증발실의 압력이 210 Torr인 경우에는 용해수의 증발 속도는 매우 느리게 진행되고 있음을 볼 수 있다. 따라서 진공을 이용한 수분의 증발 시스템에서, 만일 진공증발실의 압력이 너무 낮으면 수분의 증발 속도는 매우 빠르게 되지만 낮은 압력으로 인하여 윤활유 역시 증발될 가능성이 있고, 반면에 압력이 수분의 증발에 필요한 압력을 유지하지 못하면 수분 증발 효율은 매우 낮게 될 것이다. 이러한 이유로 인하여 수분 증발실에서의 압력은 시스템의 성능에 매우 큰 영향을 미치고, 최적 운전 압력의 선택은 시스템 설계 시에 첫 번째로 고려되어야 할 사항이다.

윤활유의 분사 상태가 수분의 증발에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 2절에서 언급된 3 종류의 노즐을 사용하여 진공증발실에 윤활유를 분사한 경우, 각각의 경우에 대하여 운전 시간의 증가에 따른 무차원 수분 농도를 Fig. 5에 나타내었다.

그림에서 무차원 수분 농도는 앞의 Fig. 3에서 서술한 영역 B에서의 수분 농도를 기준 수분 농도인 W_m 에 대하여 무차원화시킨 수분 농도를 나타낸다. 노즐의

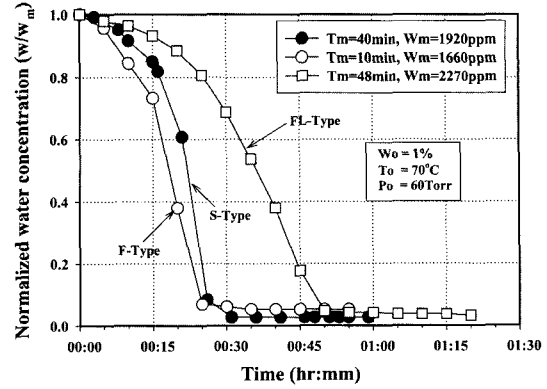


Fig. 5. The effect of nozzle type on the dewatering performance (FL : Film type, S : Spray type, F : Filter type).

종류에 대한 실험 조건은 Fig. 5에 표시된 바와 같이 오일 탱크에서의 초기 수분 농도는 1%, 윤활유의 온도 70°C , 증발실 압력 60 Torr의 동일한 조건으로 실험을 하였다. 먼저 수분과 윤활유의 혼합과 증발이 복합적으로 일어나는 시간 및 최대 수분 농도인 T_m 과 W_m 의 비교에서 나타나는 바와 같이, 필름 형상의 노즐인 경우에는 자유수의 증발 시간이 48분으로 매우 길며, 또한 이때의 최대 수분 농도는 2,270 ppm으로 높은 값을 보인다. 반면에 단순 분무 형상의 노즐인 경우에는 필름 형상의 노즐에 비하여 T_m 과 W_m 이 각각 약 18% 및 약 15% 정도 감소하였으며, 필터 형상의 노즐인 경우에는 자유수의 증발 시간과 최대 수분 농도는 더욱 더 감소하여 필름 형상의 노즐에 비하여 각각 20% 및 73%로 감소하였다.

이것은 다음과 같은 의미를 가진다. 즉 노즐에서 분사되는 윤활유의 분사 형상이 필름 형상인 경우는 다수의 물줄기 형상의 분사에 비하여 상대적으로 증발에 필요한 전열 면적이 작고, 이 결과 자유수의 증발 시간이 길기 때문에 용해수 역시 증발에 비하여 혼합이 더 크게 나타나므로 최대 수분 농도가 높은 값을 나타낸다.

이에 비하여 필터형의 노즐인 경우에는 무수히 많은 구멍을 통하여 액적 형태의 분사가 이루어지므로 필름 형상이나 단순 분무 형상의 분사 형태에 비하여 액적의 표면적이 매우 크고, 이 결과 매우 넓은 증발 표면적으로 인하여 자유수의 증발 시간이 매우 짧고 또한 용해수의 증발도 혼합에 비하여 상대적으로 크게 나타나기 때문에 최대 수분 농도 역시 필름형이나 단순 분무형에 비하여 낮은 값을 나타낸다. 한편 자유수의 증발 영역을 지나 용해수의 증발 영역에서도 역시 동일한 현상이 나타나며, 필터형 노즐인 경우 운전 시간 약 15분 정도

에서 무차원 수 농도의 값이 0.1 이내가 되고, 단순 분무형의 노즐인 경우와 필터형 노즐인 경우에 비하여 순수 용해수의 증발 시간만 약간 증가한 결과로 나타나, 자유수 증발 시간까지 포함하면 약 2배 정도의 증발 시간이 소요되었다. 반면에 필름형 노즐인 경우에는 용해수 증발 영역 역시 매우 긴 시간이 소요되어 수분의 제거에 필요한 총 시간은 필터형에 비하여 약 3배 정도 소요되어 이 경우의 노즐 형태는 시스템의 성능 증가를 위하여는 불리함을 알 수 있으며, 따라서 분사되는 유허유 액적의 형상을 결정짓는 노즐의 분사 구조는 진공 증발을 이용한 수분의 증발 성능에 매우 큰 영향을 미칠 수 있다.

유허유의 온도가 수분의 증발에 미치는 영향에 대한 고찰을 하기 위하여, 단순 분무형 노즐인 경우, 초기 수분 농도가 10,000 ppm이고 진공증발실의 압력이 60 Torr 인 경우 유허유 온도 50°C, 60°C 및 70°C에 대한 용해수 증발 영역에서의 무차원 수분 농도 분포를 운전 시간의 증가에 대하여 Fig. 6에 나타내었다.

유허유의 온도가 증발에 미치는 영향은 두 가지의 형태로 나타난다. 첫 번째는 유허유 온도의 증가에 따른 포화 증기압의 증가, 즉 다시 말하면 일정한 진공 압력에서의 유허유의 온도는 포화증기 온도보다 높을수록 증발이 쉬우며, 두 번째는 유허유의 온도가 높을수록 유허유 점도가 낮아지는 영향으로 인하여 수분 증발에 유리하다. 그림에서 유허유의 온도가 50°C인 경우에는 자유수 증발 시간이 1시간 55분이고, 이때의 최대 수분 농도 역시 2,720 ppm으로 높은 값을 나타냄을 볼 수 있다. 반면에 유허유 온도가 70°C인 경우에는 50°C인 경우에 비하여 T_m 과 W_m 모두 크게 감소하였음을 알 수 있으며, 또한 용해수 증발 영역에서도 역시 유허유 온도의 증가에 따라 수분의 제거 시간은 급격하게 짧아짐

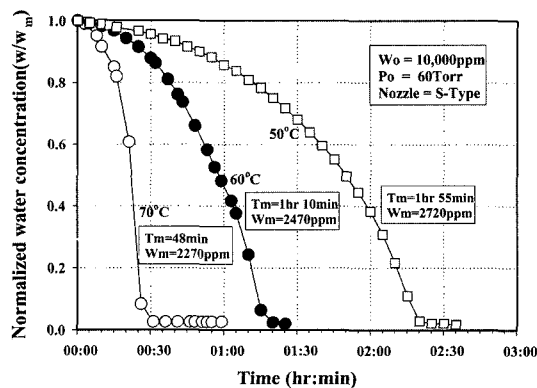


Fig. 6. Effect of oil temperature on the dewatering performance.

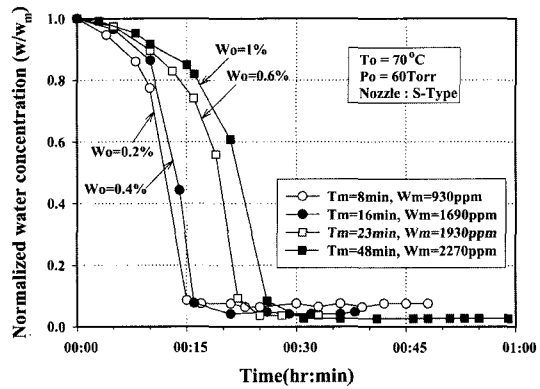


Fig. 7. Effect of initial water concentration on the dewatering performance ($T_o=70^\circ\text{C}$).

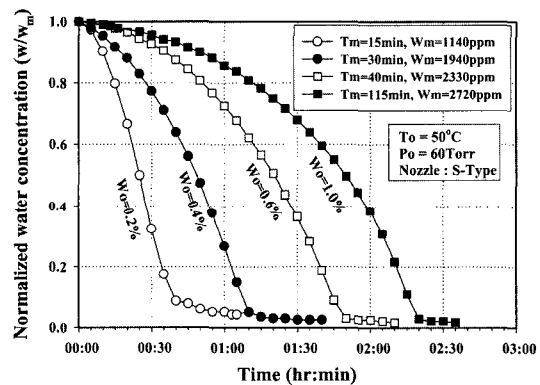


Fig. 8. Effect of initial water concentration on the dewatering performance ($T_o=50^\circ\text{C}$).

을 볼 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 유허유의 온도가 각각 70°C 및 50°C인 경우에 대하여, 오일 탱크에서 유허유와 수분의 인위적인 혼합에 의한 초기 수분 농도(W_o)가 진공증발실에서의 수분 증발 성능에 미치는 영향에 대한 결과이다. 그림에서 나타나듯이 유허유 온도가 70°C 및 50°C 두 경우 모두, 자유수의 증발 시간인 T_m 의 크기는 초기 수분 농도가 증가할수록 증가하는 경향을 보임을 볼 수 있으며, 또한 용해수의 최대 농도(W_m) 역시 초기 수분 농도의 증가에 따라 증가하는 경향을 보임을 볼 수 있다. 한편 유허유의 온도가 70°C 및 50°C의 경우에 대한 T_m 과 W_m 의 변화를 살펴보면, 70°C인 경우가 50°C인 경우에 비하여 자유수의 증발 시간은 약 절반 정도의 시간이 요구됨을 볼 수 있고, 각각의 초기 수분 농도에 대한 W_m 의 크기 역시 70°C인 경우가 작게 나타남을 볼 수 있다. 특히 Fig. 7에서 유허유 온도가 70°C이고 초기 수분 농도가 1.0%인 경우와, Fig. 8에서 유허유 온

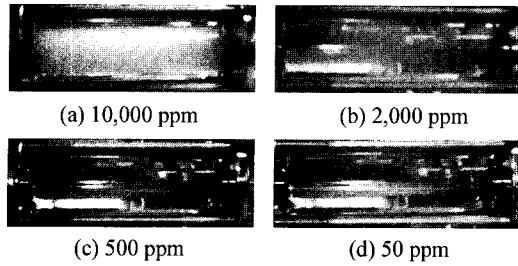


Fig. 9. Visualization of oil for different water concentration at oil tank inlet.

도가 50°C이고 초기 수분 농도가 0.6%인 두 경우를 비교하여 보면, 비록 기준 수분 농도(Wm)의 크기가 비슷한 조건이지만 윤활유 온도가 70°C인 경우에는 50°C인 경우에 비하여 초기 수분 농도가 높더라도 증발 속도는 더 빠르게 나타남을 볼 수 있다. 따라서 Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8의 결과로부터 윤활유의 온도는 초기 수분 농도의 크기에 비하여 수분 증발 성능에 더욱 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

윤활유의 수분 제거 과정을 가시적으로 관찰하기 위하여, 노즐에서 분사되어 진공증발실에서 수분이 제거된 후 오일 탱크로 유입되는 부분에서의 윤활유 청정 상태를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 (a)의 10,000 ppm인 경우는 오일탱크에서 인위적으로 수분을 함유하여 증발실을 1회 순환하여 오일 탱크로 유입되는 순간의 윤활유 상태이며, 이 후 진공증발실의 유입구에서의 수분 농도가 2000 ppm, 500 ppm 및 50 ppm을 나타낼 때의 윤활유 상태를 각각 (b), (c) 및 (d)에 나타내었다. 그림으로부터 볼 수 있듯이 수분의 농도가 초기 10000 ppm인 경우에는 매우 혼탁한 상태이지만, 운전 시간의 증가로 수분 농도가 점점 감소함에 따라 윤활유의 투명도는 점점 높아지고, 수분 농도가 50 ppm인 경우 신유 등급의 투명도를 가지는 매우 청정한 상태로 복원되었음을 볼 수 있다.

3. 결 론

진공 증발을 이용하여 윤활유 속에 포함된 수분의 제거에 대한 실험적인 연구를 수행하였으며, 연구의 결과

를 요약하면 다음과 같다.

(1) 진공 증발에 의한 수분 제거 시스템의 운전 초기에는 자유수와 용해수의 혼합 및 동시 증발이 이루어지고, 이후 자유수의 완전한 제거에 소요되는 시간까지 윤활유에 포함된 용해수의 농도는 증가하는 운전 특성을 보였다.

(2) 윤활유의 온도가 높을수록, 진공증발실의 압력이 낮을수록 수분 증발 성능은 증가한다.

(3) 초기 수분 농도가 낮을수록 수분의 제거에 필요한 시간은 짧아지고, 최적의 수분 증발 성능을 위하여는 분사되는 윤활유 액적의 표면적이 최대가 되는 노즐의 형상이 필요하다.

(4) 윤활유의 초기 수분 농도의 크기에 비하여 윤활유 온도가 더욱 지배적인 변수이다.

수분제거 시스템의 최적 설계를 위하여는 향후 각각의 시스템 운전 변수들의 복합적인 영향 및 수분의 제거 후 정화된 윤활유의 물성 특성 등에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 환경부 차세대 환경 신기술 개발 과제에서 수행되었으며, 환경부 및 환경기술진흥원 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 도갑수, 백경일, 최균범: "폐유의 연료화 가능성에 관한 연구", 한국폐기물학회지, 제7권, 2호, 101-107 (1990).
2. 김동수: "유류 정제시 이물질 제거 방안에 대한 연구", 한국자원재생공사 보고서 (2003).
3. Gambhir, S.P.: "Resource Recovery-Oil from Sludge", Proceeding of the Industrial Waste Conference, 23 (1980).
4. 한국동력자원연구소: "신 재생 에너지 기술 동향", 동력자원부 보고서 (1989).
5. Litchfield, R.J. and Lipis, A.I.: "Cycled pressure and near-optimal pressure for a freeze dryer", J. Food Tech., 16(6), 637-646 (1981).