

기포탑에서 절연유 중 용존가스 추출 특성

남창현[†] · 이태원 · 강 용*

전력연구원 재료부식연구소

*충남대학교 화학공학과

(1997년 2월 24일 접수, 1997년 11월 8일 채택)

Extraction Characteristics of Gases Dissolved in Insulating Oil in a Bubble Column

Chang-Hyun Nam[†], Tae-Won Lee and Yong Kang*

Materials & Corrosion Research Laboratory, KEPRI

*Department of Chemical Engineering, Chungnam National University

(Received 24 February 1997; accepted 8 November 1997)

요 약

연속 액상인 전기절연유에 분산상인 기상(공기)이 주입되는 기-액상 회분식 기포탑을 이용하여 절연유 중에 용해되어 있는 용존가스의 추출특성을 고찰하였다. 기포탑의 자유공간과 유(油)의 체적비, 기상유속, 추출시간, 액상점도 등의 주요 실험변수가 절연유 중 용존 추출가스 농도에 미치는 영향을 실험을 통하여 고찰하였다. 실험결과는 용존가스의 종류와 양을 매우 효율적으로 측정할 수 있는 기술을 제시할 수 있어서 기포탑 추출기의 설계뿐 아니라 효과적인 변압기 예방진단기술을 확립하는데 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract—Extraction characteristics of gases dissolved in insulating oil have been investigated in a batch type bubble column. Effects of the volume ratio of insulating oil to freeboard in the bubble column, gas velocity, liquid viscosity and bubbling time on the concentration of gases extracted from the insulating oil have been determined. The results can be utilized to obtain the important informations on the design of bubble column extractor as well as the development of fault diagnosis technology for the electric transformers.

Key words: Extraction of Dissolved Gases, Bubble Column, Insulating Oil

1. 서 론

전력설비 중 변압기내에서 전기적 절연과 냉각을 위해 사용되는 각종 절연물의 열열화(熱劣化)현상은 열분해에 의해 가스를 발생시키고 이들 가스는 절연유 중에 용해하기도 하고 일부는 유면상의 공간으로 방출된다. 일반적으로 열분해가스로는 수소, 저급 탄화수소가스(CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$, C_2H_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , C_2H_2), 일산화탄소, 탄산가스 등 10여종에 이르며, 이들 가스의 성분 및 양을 분석하여 운전 중인 변압기 내부에서 발생하는 부분방전이나 국부과열과 같은 이상현상을 사전에 예측함으로써 사고를 미연에 방지하고 있다. 그러나 이러한 진단법은 복잡한 절차와 숙련된 전문가를 필요로 하기 때문에 이를 개선하고자 선진국을 중심으로 많은 연구가 진행되어 온 결과, 최근에는 상시 감시장치를 개발하고 이를 변압기에 직접 설치하여 on-line으로 진단이 가능토록 하는 장치가 개발되어 실용화 중에 있으나 정밀도와 장치의 안정성 면에서는 만족스럽지 못한 문제점을 안고 있는 실정이다.

다. 이는 가스추출 및 검지방식 때문인 것으로 알려져 있는데 특히, 절연유 중 용존가스 추출이 주원인으로 지적되고 있다[1]. 이러한 자동형 분석장치의 가스추출기(gas extractor)로 응용이 기대되고 있는 기포탑 추출기(bubble column extractor)는 다른 추출방식에 비해 장치가 간단해서 운전이 쉽고, 유지보수비가 적게 들뿐만 아니라 특히, 추출기내에서 상(phase)들간의 접촉이 효율적이기 때문에 열전달 및 물질전달 효과가 커서 최근 많이 응용되고 있다[2, 3]. 그러나 가스추출용의 기포탑 추출기는 액체 연속상(continuous liquid phase)에 기포가 분산상(dispersed phase)으로 존재하기 때문에 기포의 크기 및 상승속도와 기체체류량 등은 기상과 액상의 접촉현상과 그 흐름특성에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 연속상인 액상내에서 기체의 흐름형태 또한 액상의 물리적 성질인 점도, 표면장력 및 밀도의 영향을 받기 때문에 반응기의 조작조건 결정과 성능 및 효율 등에 중요한 영향을 미치는 요소라 할 수 있다. 그러나 이러한 영향들은 다른 변수와 함께 복합적으로 나타나기 때문에 일정하고 단순한 경향성을 보이지는 않는다고 알려져 있다[4].

따라서 본 연구에서는 연속 액상에 분산 기상이 주입되는 회분식

[†]E-mail: chnam@kepri.re.kr

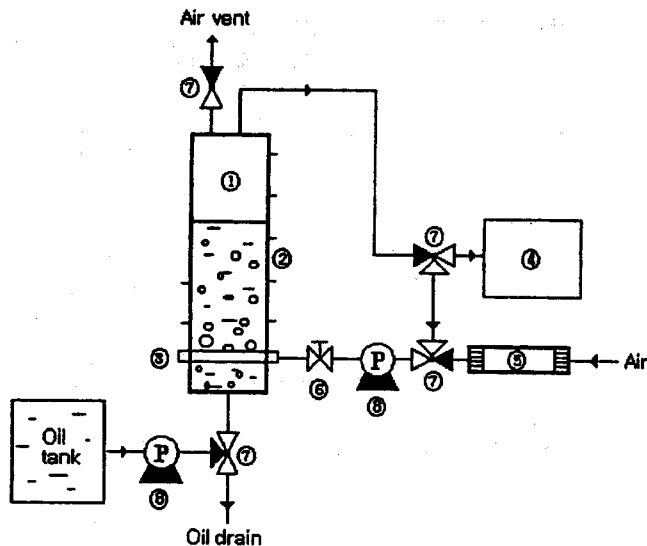


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- ① Bubble column
- ② Pressure taps
- ③ Gas chromatography
- ④ Distributor
- ⑤ Filter
- ⑥ Control valve
- ⑦ Solenoid valve
- ⑧ Pump

(batch type)의 기포탑에서 실험변수인 자유공간의 체적비, 기상유속, 액상의 점도, 추출시간(bubbling time) 등이 기체체류량 및 추출가스 농도에 미치는 영향 등을 실험을 통해서 고찰하고, 기포탑 추출기의 최적 설계조건을 제시하여 보다 효과적인 변압기 예방진단 기술을 확립하는데 필요한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 시료채취부와 투명 아크릴관을 가공하여 제작한 내경 30mm(높이는 액상의 부피와 유면 상부공간의 체적비를 고려하여 유동적으로 설계)의 기포탑으로 구성되어 있는 가스추출부, 추출된 가스의 농도를 측정하는 가스검지부, 그리고 혼합가스(공기+추출가스)의 순환시스템으로 구성되어 있다. 기포탑내에는 추출용 가스가 액상 중에서 균일하게 분산될 수 있도록 다공성 분산판(distributor)을 사용하였다. 또한 혼합가스 농도를 평형에 도달시킬 수 있도록 하기 위하여 검량관 출구에 0.1-2 l/min의 순환용 펌프(recirculation pump)를 설치하였으며, 혼합가스 중의 추출가스 농도는 정밀가스 분석기를 사용하여 측정할 수 있도록 구성하였다. 각 배관에 설치된 밸브는 전자식을 사용하여 자동으로 작동과 제어가 되도록 하였다.

2-2. 실험방법

용존된 가스의 양이 동일한 시료를 사용하여 실험을 수행하였으며, 온도에 의한 영향을 최소화하기 위해서 기포탑과 가스분석기내에 하터를 설치하여 측정기 내부의 온도 편차가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 가 되도록 일정하게 유지시켰다. 시료채취관의 밸브를 열어 일정량의 시료를 채취한 다음 펌프를 작동시켜 분산판을 통해 발생된 기포를 액상 중에 분산시켜 시료에 용존된 가스를 추출하였다. 추출된 가스와 carrier gas인 공기의 혼합가스는 탐상부에 연결된 배관을 통하여 검량관과 순환펌프를 거쳐 다시 탐의 하부로 주입되게 하여 액상과 유면공간의 가스가 평형에 도달될 때까지 일정시간 동안 재순환을 시켜 추출이 완료되면 가스분석기로 연결된 밸브를 열어 추출가스의 농도를

Table 1. Physical properties of liquid phase(Insulating oil)

Solution	Specific gravity (15/4 $^\circ\text{C}$)	Kinematic viscosity(cSt)	Temperature($^\circ\text{C}$)
OT(1)	0.8876	13.2	30
OT(2)	0.8961	10.55	45
OT(3)	0.9133	3.76	75

측정하였다.

실험에 사용된 액상의 절연유는 KS 1종 4호의 광유계로서 물리적 특성값들은 Table 1과 같으며, 실험변수인 온도에 따른 점도의 변화를 고려하여 OT(1): 30°C , OT(2): 45°C , OT(3): 75°C 를 사용하였고, 추출용으로 주입되는 기체분산상으로는 공기를 사용하였으며, 기상의 유속범위는 3.4-11.5 m/s로 하였다.

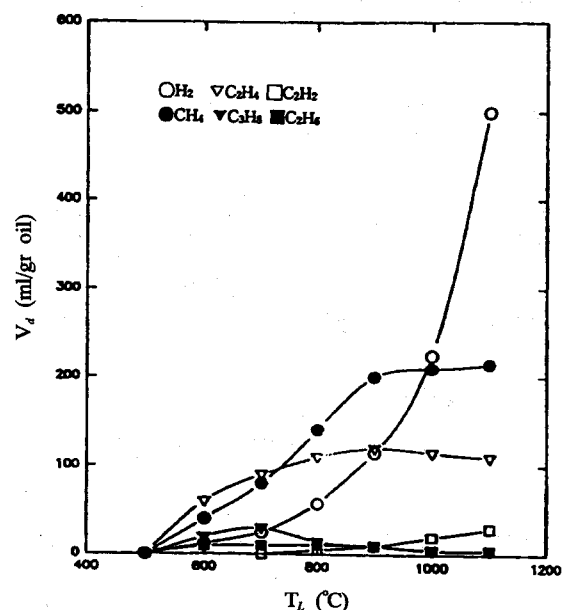
본 실험에서 액상으로 사용한 절연유는 비뉴턴 유체의 그 점도는 온도와 압력의 영향을 받는데 전단응력(shear stress)과 속도구배는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[5]. 즉, 절연유는 전단응력 $\tau_0=0$, $n>1$ 인 dilatant 흐름거동을 하는 점성유체이었다.

$$(\tau - \tau_0)_{gc} = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 변압기용 절연유의 물리적 특성

Fig. 2는 본 연구에서 액상으로 사용된 변압기용 절연유의 온도(T_L)에 따른 열분해가스의 발생량(V_d)과의 관계를 나타낸 것이며, 일정 압력에서 액상의 온도와 기상의 용해도(S_G)와의 관계를 나타낸 Fig. 3에서는 H_2 , N_2 , CO 와 같은 용해도가 낮은 가스는 온도의 상승에 따라 용해량이 증가하는 특징이 있음을 알 수 있다[6]. 기상유속과 반응온도가 증가함에 따라 기체의 체류량은 증가하지만, 액상인 절연유는 온도변화에 대한 점도변화가 비교적 적은 즉, 점도지수가 큰 액체이기 때문에 기체체류량에 큰 영향을 미치지 않아 0°C 이상의 액상온도에서는 가스추출률에도 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나

Fig. 2. Effects of T_L on V_d in transformer oil.

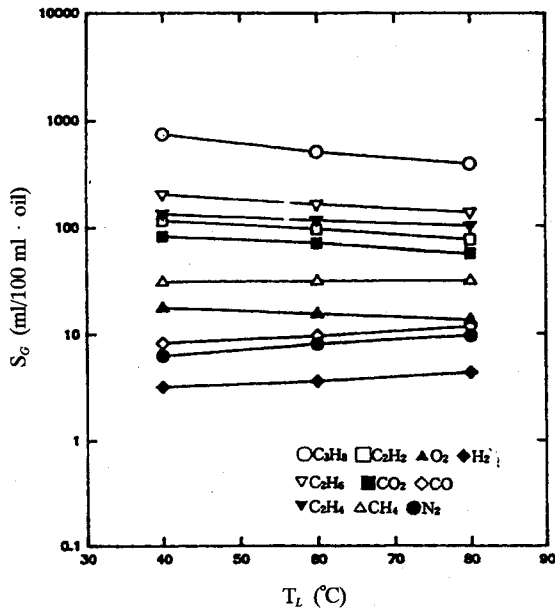


Fig. 3. Effects of T_L on S_G ($P=760$ mmHg).

타났다. 그러나 보다 고온의 조건에서는 액상의 점도변화 때문에 반응온도가 증가함에 따라 기체체류량이 증가하여 가스추출률에도 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[7].

3-2. 기체체류량

기포탑내에서 용존가스를 효과적으로 추출하기 위해 주입되는 기체의 체류시간은 기체체류량(E_G)과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 용존가스가 추출되는 부피물질전달계수는 접촉상 경계에서 접촉면적에 큰 영향을 받기 때문에 부피물질전달계수를 크게 하기 위해서는 기체의 체류량과 체류시간 등을 증가시키는 것이 유리하다[8]. 기포탑에서 분산상으로 존재하는 기체의 체류량은 또한 기포탑의 수력학적 특성을 결정하는 중요한 인자들 중의 하나라 할 수 있다.

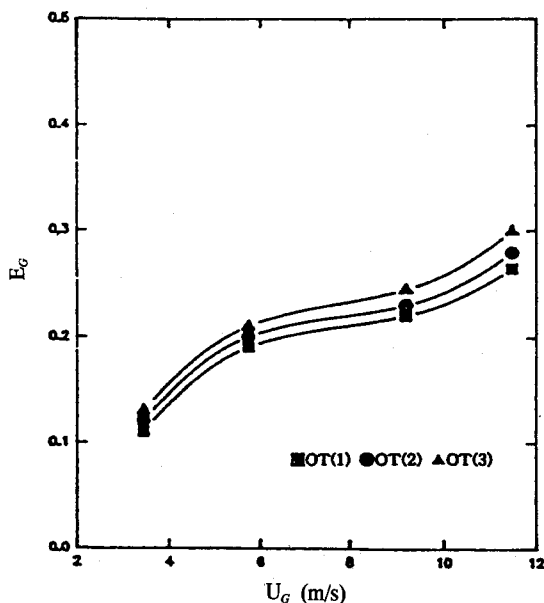


Fig. 4. Effects of U_G on E_G in a bubble column extractor ($V_G/V_L=0.8$, $t_b=5$ min, $V_L=50$ ml).

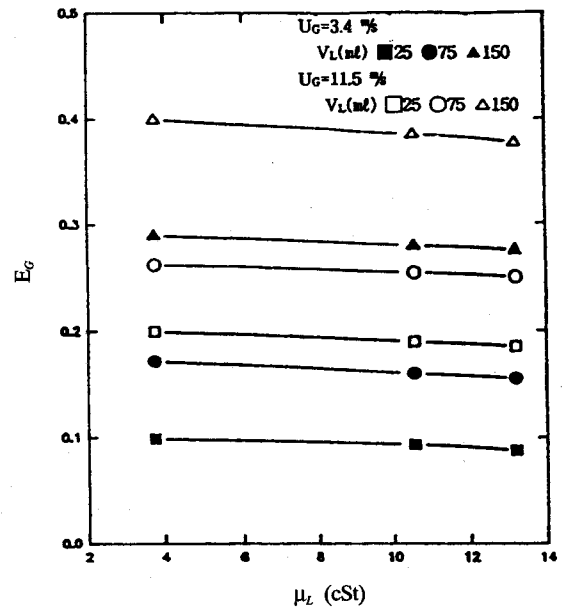


Fig. 5. Effects of μ_L on E_G in a bubble column extractor ($V_G/V_L=0.8$, $t_b=5$ min).

Fig. 4는 공기를 3.4-11.5 m/s의 유속범위로 기포탑에 주입시키고 기포탑내 자유공간(freeboard, V_G)과 유(油)의 체적비(V_L)가 0.8이며, 추출시간(t_b)이 5분, 액상부피(V_L)가 50 ml일 때의 기상유속(U_G)이 기체체류량에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 기체체류량은 기상유속이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 액상온도가 증가함에 따라서도 기체체류량은 증가하였고 온도가 증가함에 따라 그 증가폭도 커지는 경향을 보였다. 기포탑에서 기상유속의 증가는 탑내에 많은 기포의 생성을 가져오고, 생성된 많은 기포들은 상호간의 접촉 및 상승방해효과 때문에 기포의 상승속도가 기상유속의 증가에 비례하여 증가할 수 없기 때문에 결과적으로 기체체류량을 증가시키는 것으로도 설명할 수 있다[9]. 즉, 기상유속의 증가는 기포의 크기 및 상승속도의 증가를 가져오며, 기상유속의 증가에 따라 상승하는 기포는 합체되어 기포의 크기가 커지고 기체체류량은 증가하기 때문에 보다 효과적인 기-액의 접촉이 일어나 높은 추출률을 기대할 수 있다[10]. 절연유의 점도(μ_L)가 기포탑 추출기내의 기체체류량에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었는데, 이 그림에서 보는 바와 같이 액상의 점도가 증가함에 따라 기체체류량은 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 액체상(절연유)의 점도가 증가할수록 기포탑내에 존재하는 기포의 크기가 증가하기 때문에 기포의 상승속도도 증가하여 결국 기체의 체류시간을 감소시키고 기체체류량의 감소를 가져온다고 할 수 있다[11]. Fig. 4에서 절연유의 온도가 상승함에 따라 기체체류량이 증가하는 이유도 Table 1에서 볼 수 있듯이 절연유의 온도가 증가하면 절연유의 점도가 감소하기 때문으로 해석할 수 있다.

본 연구의 실험범위에서 기포탑 추출기에서의 기체체류량은 실험 변수에 의하여 식 (2)와 같은 상관식을 나타내었다. 이 식의 상관계수는 0.954이었다.

$$E_G = 0.023 U_G^{0.5393} \mu_L^{-0.0513} \quad (2)$$

3-3. 기상유속과 추출시간의 관계

Fig. 6은 일정 실험조건에서 기상유속과 액상 중의 용존가스가 분산상의 공기에 의해 일정농도이하로 완전히 추출되는데 소요되는 추

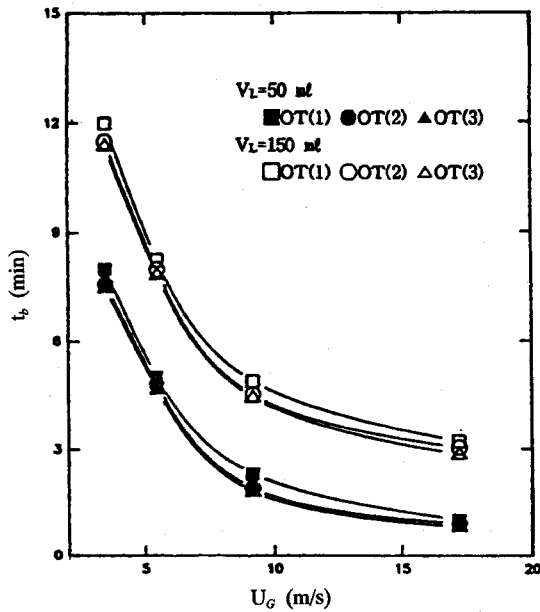


Fig. 6. Relation between U_G and t_b in a bubble column extractor ($V_G/V_L=0.8$).

출시간(bubbling time, t_b)과의 관계를 나타낸 것으로써, 이는 기포탑 추출기의 운전시간을 결정하는데 중요한 요소가 된다고 할 수 있다. 일정온도에서 기상유속이 증가할수록 액상 중 일정 농도의 용존가스를 추출하는데 걸리는 시간은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 기상유속이 증가함에 따라 기포탑 추출기내의 기체체류량이 증가하여 기상과 액상의 접촉효과가 좋아져서 용존기체의 추출에 소요되는 추출시간이 감소하는 것으로 설명할 수 있다. 그러나 기상유속이 약 10 m/s 이상에서는 추출시간이 1-2분으로서 추출시간의 감소변화가 완만해져 일정유속 이상에서는 용존가스의 완전추출에 소요되는 시간에 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 기상유속과 추출시간과의 관계를 실험변수에 의하여 식 (3)과 같이 상관식으로 나타내었다. 이 식의 상관계수는 0.934이었다.

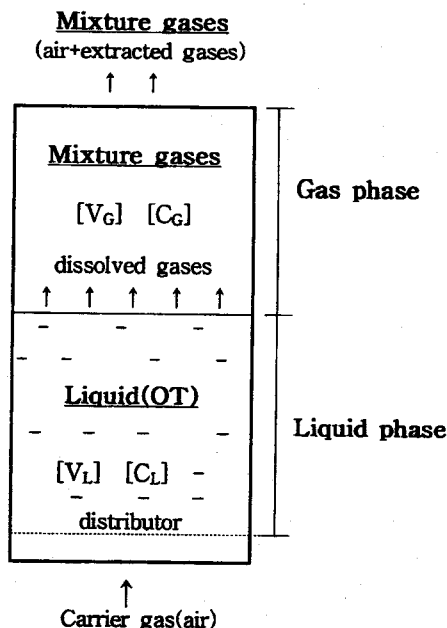


Fig. 7. Bubble column extractor system.

$$t_b = 34.34 U_G^{-1.0172} \quad (3)$$

3-4. 추출가스 농도

본 연구의 실험결과 기포탑내 자유공간과 절연유의 체적비, 기상유속, 추출시간 및 액상점도가 추출가스의 농도에 미치는 영향을 Fig. 7과 같은 계에서 고찰하였다. 액상의 절연유로부터 추출된 가스의 농도는 가장 추출률이 높은 것으로 알려진 진공탈기방식(toepler pump type)에 의해서 추출한 가스농도에 대한 비로 나타내었다.

3-4-1. 기포탑내 자유공간과 유의 체적비(V_b)의 영향

기포탑내 자유공간에서의 가스농도가 절연유 중 가스농도와 평형에 도달할 때까지의 시간은 기포발생 및 기포탑내에 주입방법, 주입시의 공기유속 등에 따라 달라지며, 가스농도가 평형에 도달한 때의 자유공간과 절연유 중에서의 가스농도와와의 관계는 다음 (4)식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{L1} = C_G \left(\frac{V_G}{V_L} + \frac{1}{ah} \right) \quad (4)$$

여기서, V_L , V_G , a 및 h 는 주어지는 값이므로 평형시 기포탑내 자유공간에서의 가스농도를 측정해서 절연유 중 가스농도를 구하였다. 기포탑내 자유공간에서의 가스농도는 V_G/V_L 의 값이 적을수록 고농도로 측정이 가능하기 때문에 정밀도면에서 유리하였다.

기포탑 추출기의 dimension 결정시 추출된 가스의 최종농도에 가장 큰 영향을 미치는 것이 추출조작시 장치내에 잔존하면서 추출가스와 혼합되어 장치내를 순환하는 공기량이다. 이는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 액상에 용존되어 있는 가스가 자유공간으로 추출될 때 추출공간을 제공하기 위한 자유공간의 부피에 해당하는 양으로서, 액상의 부피와 기체체류량 등을 고려해서 결정이 되며, 체적비 V_b 는 추출가스 농도에 큰 영향을 미치기 때문에 추출칼럼을 설계하는데 있어서 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 이 그림에서와 같이 체적비, V_b 가 증가함에 따라 추출가스 농도의 회색률이 증가하게 되어 추출가스 농도 C_L 는 감소하게 된다. 또한, $V_b=0.8$ 일 때 가스추출률은 약 90%가 되어 $C_L=0.9$ 가 됨을 알 수 있다. 그러나 $V_b<0.8$ 일 때는 C_L 가 더욱 커지게 되며, V_b 를 최대한 적게 설계하여 불필요한 공간을 제거함으로써 추출된 가스의 회색을 줄여 추출가스의 농도비 C_L 를

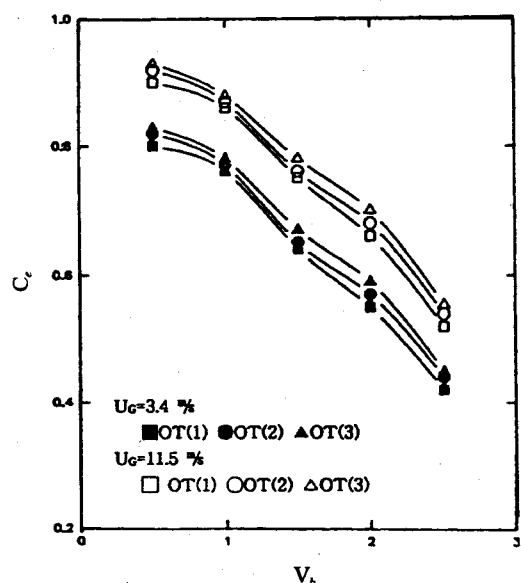


Fig. 8. Effects of V_b on C_L in a bubble column extractor ($V_L=50$ ml, $t_b=5$ min).

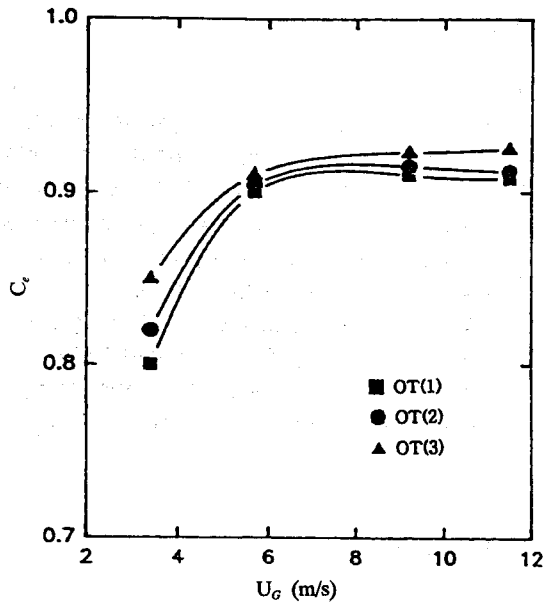


Fig. 9. Effects of U_G on C_e in a bubble column extractor ($V_G/V_L=0.8$, $V_L=50$ ml, $t_b=5$ min).

1에 보다 접근시킬 수는 있으나, 너무 적어지면 체류되어 있는 기포가 가스의 흐름을 방해할 뿐 아니라 추출된 가스가 액상에 재용해되어 효과적인 추출공정이 이루어 질 수 없기 때문에 $V_G=0.8-1$ 의 범위 내에서 액상의 부피와 기상유속, 기체체류량 등을 고려하여 적절한 설계가 이루어져야 한다. 따라서 V_G 와 추출물 C_e 와의 상관관계는 추출가스 농도에 큰 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 설계자료라 할 수 있다.

3.4.2. 기상유속의 영향

앞에서도 설명한 바와 같이 일정한 점도의 액상에서 기상유속이 증가함에 따라 기포탐내에서는 기체체류량과 난류의 증가를 가져오고 기체-액체의 유효접촉면적이 증가하기 때문에 기-액 부피물질전달계수가 증가하여 액상에 용존된 기상의 추출률이 높아지게 된다. 또한 기포탐에 유입되는 에너지는 기상과 액상의 흐름에 의한 것인데, 벽면마찰, 기-액의 접촉 및 기포후면의 wake에 의해 소멸되는 에너지는 기상유속에 따라 증가하며, 이는 탐내에서 큰 에너지를 갖는 작은 규모의 eddy형성을 증가시켜 기-액 계면의 물질전달을 지배하게 된다. 난류영역에서 난류 eddy의 규모와 속도는 다음과 같은 식들로 나타낼 수 있는데 [12], 식 (5) 및 식(6)으로부터 기포탐에서 에너지 소멸속도, E_D 는

$$L_e = \left(\frac{\mu_L^3}{E_D \rho_L^3} \right)^{1/4} \quad (5)$$

$$U_e = \left(\frac{E_D \mu_L}{\rho_L} \right)^{1/4} \quad (6)$$

기상유속이 증가하면 증가하게 되며 이에 따라 난류 eddy의 규모는 작아지고 속도는 증가함을 알 수 있다. 따라서 Fig. 9에서와 같이 기상유속의 증가에 따라서 추출가스 농도는 증가하는 것을 알 수 있다.

3.4.3. 추출시간의 영향

추출시간(t_b)은 추출공정에서의 기-액상의 접촉시간을 나타내므로 추출가스 농도는 일정한 기상유속의 범위내에서 추출시간이 증가할수록 Fig. 10에서 보는 바와 같이 증가하는 경향을 나타내었으나 일정시간 이후에서는 더 이상의 증가는 없는 것을 알 수 있다. 즉, 추출

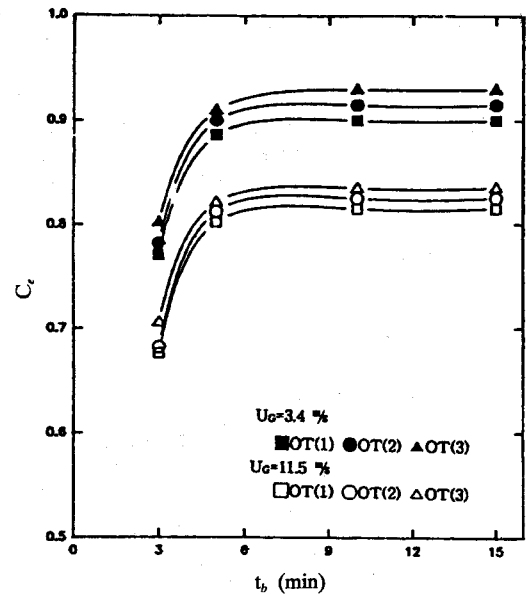


Fig. 10. Effects of t_b on C_e in a bubble column extractor ($V_G/V_L=0.8$).

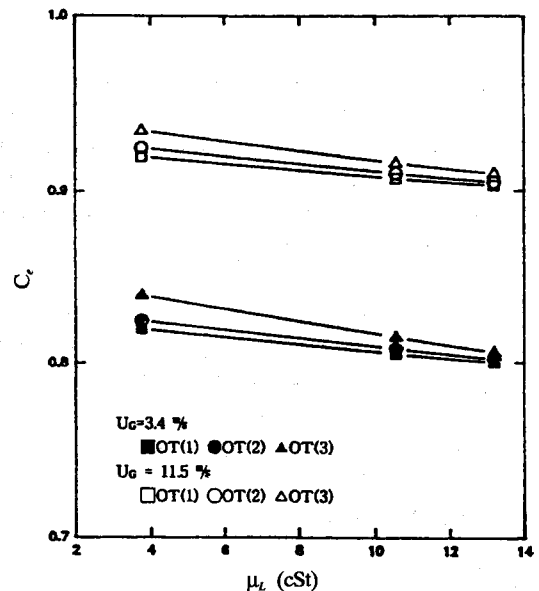


Fig. 11. Effects of μ_L on C_e in bubble column extractor ($V_G/V_L=0.8$, $V_L=50$ ml, $t_b=5$ min).

의 초기단계에서는 기포탐내 자유공간에서의 가스농도가 유 중의 농도보다 낮아 추출에 사용되는 공기와 치환이 활발하게 일어나기 때문에 추출가스 농도는 급격히 상승하게 되나, $t_b=5$ min 이후에서는 자유공간과 절연유 중에 용존하는 가스 상호간의 농도가 평형을 이루어 더 이상의 농도변화가 없는 것을 알 수 있다.

3.4.4. 액상점도의 영향

액상의 점도가 추출가스 농도에 미치는 영향에 대해서는 Fig. 11에 나타내었다. 액상의 점도가 증가함에 따라 추출기내에 존재하는 평균체류시간이 감소하여 추출가스의 농도가 감소하였다. 즉, 액상의 점도가 증가함에 따라 기포의 크기가 증가하고 따라서 기포 상승속도가 증가하게 되어 기체가 기포의 상태로 추출기내에 존재하는 평균체류시간(mean residence time)이 감소함으로써 기-액의 유효접촉면적과 유효접촉시간을 감소시켜 기체체류량과 부피물질전달계수가 감소하게 되고 따라서 액상내에 존재하는 기체가 기포상태로 전

달되는 양이 감소하여 추출가스의 농도 또한 감소하는 것으로 나타났다. 또한 액상점도의 증가는 기체체류량의 감소뿐 아니라 난류영역에서 식 (5)에서와 같이 기-액 부피물질전달계수를 감소시키는데 주된 영향을 미치는 eddy 규모의 증가를 초래함을 알 수 있다.

3-4-5. 추출가스 농도의 예측 상관식

본 연구의 실험범위에서 얻은 추출가스 농도는 각 실험변수에 따라 식 (7)과 같은 상관식을 얻을 수 있었다. 이 식의 상관계수는 0.9290이었다.

$$C_e = 1.777 t_b^{0.049} V_b^{-0.0126} \mu_L^{-0.0209} V_L^{0.2068} U_G^{0.0876} \quad (7)$$

4. 결 론

본 연구에서는 연속상의 액상에 분산상인 기상이 주입되는 기-액상의 회분식 기포탑 추출기를 이용하여 기포탑내의 자유공간과 유체의 체적비, 기상유속, 추출시간, 액상의 점도 등이 기체체류량과 추출가스 농도에 미치는 영향 등을 실험을 통하여 고찰함으로써 기포탑 추출기의 최적 설계조건을 제시하여 보다 효과적인 변압기 예방 진단기술을 확립하고자 하였다. 본 연구의 주된 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 기상유속이 증가할수록 기체체류량과 추출가스 농도는 증가하였으며, 추출에 소요되는 시간은 감소하였다.

(2) 액상점도가 증가함에 따라 기체체류량은 감소하는 경향을 나타내었으나, 그 증감량은 극히 적었다.

(3) 추출가스 농도는 기포탑내 자유공간과 유(油)와의 체적비가 증가함에 따라 감소하였고, 추출시간이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으나 일정시간 이상에서는 자유공간의 가스농도와 절연유 중의 가스농도가 평형을 이루어 더 이상의 증가는 없었다.

(4) 본 연구의 실험범위에서 기체체류량은 $E_G=0.023U_G^{0.5393} \mu_L^{-0.0513}$ 와 같은 상관식으로, 기상유속과 추출시간과의 상관관계는 $t_b=34.34U_G^{-1.0172}$, 그리고 추출가스 농도는 $C_e=1.777 t_b^{0.049} V_b^{-0.0126} \mu_L^{-0.0209} V_L^{0.2068} U_G^{0.0876}$ 와 같은 상관식으로 나타낼 수 있었다.

사용기호

- a : constant [1/cmHg]
- C_b : gas concentration ratio of freeboard to insulating oil, C_G/C_L
- C_e : gas concentration ratio of bubbling type to toepler pump type, C_G/C_L
- C_G : gas concentration in freeboard [ppm]
- C_L : gas concentration in insulating oil [ppm]
- C_{L1} : initial gas concentration in insulating oil [ppm]
- E_D : energy dissipation rate [m^2/s^3]
- E_G : phase holdup
- g : gravitational acceleration [m/s^2]
- h : Henry constant [cmHg/ppm]

- k : constant
- L_e : scale of eddy [m]
- n : constant
- S_G : gas solubility on insulating oil
- t_b : bubbling time [min]
- T_L : temperature of insulating oil [$^{\circ}C$]
- V_d : amount of generated gases [ppm]
- U_e : eddy velocity [m/s]
- U_G : gas velocity [m/s]
- V_b : volume ratio of insulating oil to freeboard in the bubble column, V_G/V_L
- V_G : volume of freeboard [ml]
- V_L : volume of insulating oil [ml]

그리스 문자

- μ_L : viscosity of insulating oil [cSt]
- τ_0 : shear stress
- ρ_L : density of insulating oil [kg/m^3]

하첨자

- L : liquid
- G : gas
- b : bubbling
- e : effectiveness

참고문헌

1. 月岡 淑郎, 菅原 悽夫: "變壓器 油中水素 常時監視裝置의 研究", 電氣學會論文誌, 1, Jan, 9(1980).
2. Shah, Y. T., Kelkar, B. G., Godbole, S. P. and Deckwer, W.-D.: *AIChE J.*, 28, 353(1982).
3. Deckwer, W.-D.: *Int. Chem. Eng.*, 19, 21(1979).
4. Kang, Y., Min, B. T., Nah, J. B. and Kim, S. D.: Proc. 2nd Asian Conf. on Fluidized-Bed and Three Phase Reactors, Taiwan, 299 (1990).
5. Cova, D. R.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 5, 292(1974).
6. Fallou, B.: *Electa*, 42, 31(1975).
7. 小松, 關本他: "變壓器 油中가스 檢出裝置의 開發", 電氣學會全國大會, 平成元年.
8. Kang, Y., Lim, W. M. and Shah, Y. T.: *AIChE J.*, 31, 700(1985).
9. Henriken, H. K. and Ostergard, K.: *Chem. Eng. J.*, 7, 141(1974).
10. Kelkar, B. G. and Shah, Y. T.: *AIChE J.*, 31, 700(1985).
11. Kang, Y. and Kim, S. D.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 25, 717(1986).
12. Deckwer, W.-D., Durckhart, R. and Zoll, G.: *Chem. Eng. Sci.*, 29, 2177(1974).