

밀도 차를 이용한 경액과 중액의 연속 순간 원심분리기 개발

Development of the Continuous and Instantaneous Light liquid-Heavy liquid Centrifugal Separator using Density Difference

김영환, 윤지섭, 정재후, 홍동희, 박기용
한국원자력연구소

Young-Hwan Kim, Ji-Sup Yoon, Jae-Hoo Jung, Dong-Hee Hong, Gi-Yong Park
(Korea Atomic Energy Research Insitute)

Abstract

Resident time of the continuous and Instantaneous centrifugal separator using that separates the light and heavy liquids by use of density difference is the orptical factor that affects significantly the chemical metial extraction and the productivity in the chemical and mechanical process. In this paper, the overflow of the device is investigated under consideration of the relationships between inclination angle of liquid feeding screw and the centrifugal force. From the design of the length of a centrifugal separator, the radiuses of rotor and housing, theoretical formulation on the contact radius of separation weir is established through the experiments. From the experiments, it is identified that how much the capacity of inlet impeller and the emulsion phenomenon depend on the screw angle of inlet impeller. Also, we invetigate the separation condition and the resident times that are functions of the phase ratio and density.

Key Words : Centrifugal separator, Density, Resident time

1. 서론

원자력 분야나 산업계의 극한환경에서 사람이 접근할 수 없는 오염지역에는 신속한 유독 물질의 분리/제거 및 저장/처리가 주요한 관건이 된다. 본 연구에서는 액체의 밀도 차를 이용한 연속 순간 액체-액체 원심 분리기를 개발과 실험을 통해서 일반 산업의 화학기공정에 주로 사용되는 원심 고온접촉 분리기 그리고 실험실용 용매추출 원심접촉 분리기와 장치 내 체류시간(residence time)을 비교하고자 한다. 이 체류시간은 화공정이나 기계공정에 있어서 화학 반응 속도와 제품의 생산성에 중요한 변수가 된다. 때문에, 1차 적으로 체류시간을 단축하기 위해서 경액(light liquid) 과 중액(heavy liquid)의 분리를 위한 이송 스크류(feed screw)의 경사각과 흡입 임펠라의 흡입각, 덮개(housing)와 화

전체(rotor)의 간격 그리고 분리독의 직경에 따른 분리도 등을 고려하여 설계를 하였다. 그리고 개발된 장치의 성능 실험을 위해 혼합된 두 액상이 유상액(emulsion)과 사각지역(dead zone)이 발생되지 않으면서, 신속하게 두 액상을 흡입하여 분리하는 분리 성능과 고준위 방사선 폐액 내의 금속원소를 추출하는 원심 고온접촉 분리기(Centrifugal pyro-contactor)나 실험실용 용매추출 원심접촉 분리기(Centrifugal contactor for laboratory-scale solvent extraction tests)의 체류시간 분포를 본 실험장치와 비교 실험하고자 한다. 이러한 실험비교를 바탕으로 연속적이고, 짧은 시간 안에 밀도차가 다른 두 액상을 분리함으로써 원자력과 일반산업의 극한환경에서의 원격 분리기술의 적용가능성을 보여주고자 한다.

2. 본론

2.1 실험 방법

연속 순간 액체-액체원심 분리기 개발을 위해서 덮개와 회전체의 간격 상수 값과 회전체 길이 무차원 상수 값을 결정하였다. 그리고 유체의 흘러 넘침을 방지하고 유체를 아래방향으로 이송하기 위한 나팔 덮개 내경 내벽과 회전체 외벽에 유체이송 스크류를 설계하였으며, 유체 스크류 경사각에 따른 유상액 발생정도를 조사하였다. 그리고 흡입되는 두 액상의 유량과 회전체의 원심력에 관계되는 분당 회전수와 비교 하여 두 혼합 액상의 유량에 대한 흘러 넘침(overflow) 정도와 공급유량에 대한 범위를 설계 요건으로 고려하였다. 분리독의 경액과 중액의 집축반경을 설계하였고, 실험장치를 제작하여, 분리정도를 검증하였다. 이 분리 독에 대한 성능실험을 위해서 유량의 상비(경액/중액) 변화에 따른 분리상태와 밀도 변화에 따른 분리독 성능을 조사하였다. 그리고 두 액상을 흡입되게 하고, 소용돌이를 없애는 동시에 체류시간(residence time)을 단축하며, 아울러 신속한 상 분리를 위해 흡입 임펠라를 설계하였다. 흡입 임펠라의 개발을 위해서는 회전 날개 각의 변화에 따른 흡입력의 상태를 조사하였다. 끝으로 흡입 임펠라의 유·무에 따른 체류시간 비교와 종래 유사장치인 실험실용 용매추출 원심집축기와 본 장치의 체류시간 비교를 하였다.

2.2 실험

흡입된 두 액상은 덮개의 유체이송 스크류와 회전체의 유체이송 스크류에 의하여 덮개와 회전체 사이로 넘쳐흐르지 않고, 이랫부분으로 이송되기 위한 덮개와 회전체 간격의 무차원 상수 값은 식(1)과 같이 결정된다.

$$C = \frac{r_{H1} - r_{Ro}}{r_{Ro}} \quad (1)$$

여기서, r_{H1} : 덮개 내경 반지름, r_{Ro} : 회전체외경반지름, C 의 값은 덮개나 회전체길이의 변수에 대한 기준 값이 된다. 그리고 회전체 길이에 대한 무차원 상수 값 RL 은 식(2)와 같이 결정된다.

$$RL = \frac{L}{2r_{Ro}} \quad (2)$$

여기서, L 은 분리영역의 길이(회전체입구에서 독 시차점까지의 거리), r_{Ro} 은 회전체외경반지름, 여기서 회전체길이 상수 값(RL)은 분리영역길리와 회전체 외경의 변수에 대한 기준 값이 된다. 그림 1과 같이 유체이송 스크류의 성능 실험을 위해 흡입 임펠라를 사용하지 않고 유체 이송 스크류의 회전체의 분당 회전 수에 따른

덮개와 회전체 사이에서 유상액 발생과 혼합액상 유량의 흘러 넘침 정도를 알아보았다. 그리고, 식(3)의 관계에서 유체이송 스크류의 경사각 실험을 수행하였다.

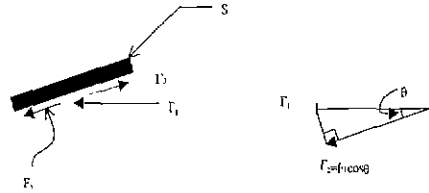


그림 1 유체 이송 스크류의 경사각에 미치는 힘

$$F_1 = \frac{W \cdot V^2}{g \cdot R} \quad (3)$$

여기서 S : 덮개내벽의 사각스크류 깃, F_1 : 회전체의 원심력, F_2 : 유체의 사각스크류에 의한 아래방향 힘, F_3 : 유체의 원심력에 의한 상승하는 힘, θ : 스크류 경사각, W : 혼합액 중량, $V = D \cdot N / 60$: 회전체속도, g : 중력가속도, R : 회전체바깥반경이되며, 유체가 상승하여 넘쳐흐르는 조건은 $F_1 = F_2 + F_3$, $F_2 < F_3$ 이 된다.

분리독에 대한 각각에 대한 반경은 그림 2와 같다. 여기서 분리독의 두께 결정을 위해서 경액과 중액 간의 집축반경 값은 식 4와 같다.

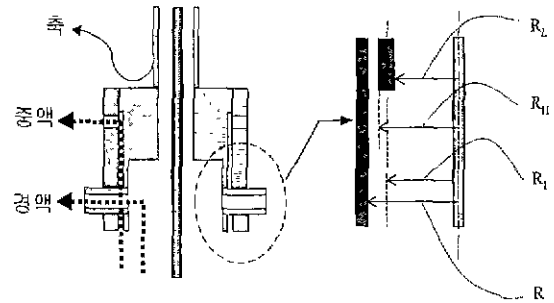


그림 2 경액과 중액의 집축반경 결정을 위한 분리독

$$R_1 = \sqrt{\frac{\rho_L R_L - \rho_H R_2^H}{\rho_L - \rho_H}} = \sqrt{\frac{R_2^H - \frac{\rho_L}{\rho_H} R_2^L}{1 - \frac{\rho_L}{\rho_H}}} \quad (4)$$

여기서, ρ_L =캐로신 밀도, ρ_H =물의 밀도, R_H =독의 바깥반경, R_L =독의 안쪽반경, R_1 = 경액과 중액의 집축반경, R = 회전체 내경이다. 분리독 두께 실험 값은 흡입 임펠라를 설치하지 않고, 정량펌프 두대도 각각의 두 액상을 분당 10ml씩 공급하여 실험하였다. 분리독의 최

초 외경값을 29.6mm, 그리고 회전수를 6000rpm으로 고정시키고 내경을 22.5mm (재질은 스테인레스, 회전수가 15000rpm 일 경우 이론 값) 에서 0.25mm씩 확장하여 두 액상이 분리되는 최적값을 정하였다. 이상의 설계요건으로 실험액체의 밀도차를 이용한 연속 순간 액체-액체원심 분리를 개발하였으며, 실험장치는 그림 3 과 같다.

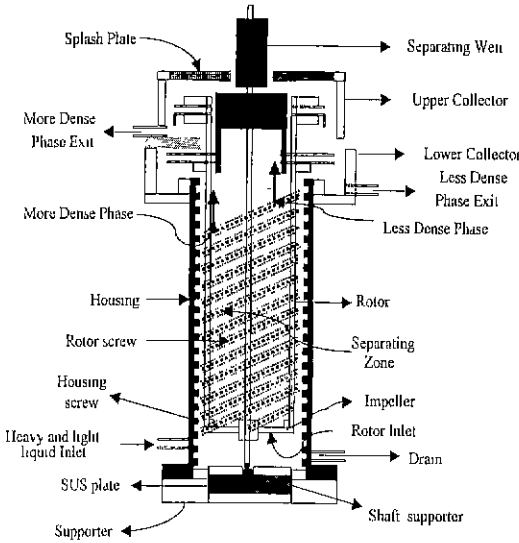


그림 3 연속 순간 액체-액체원심 분리기

실험실용 용매추출 원심 접촉기의 상비 범위(유기상/수용상)는 0.67~1.25로서 본 장치의 상비에 대한 비교 실험을 수행하였다. 상비 범위를 알기 위해서 경액과 중액의 흡입구에서 유량계(flow meter)를 설치하여 유량을 조절하고 총 흡입유량을 30ml로 하였다.

밀도변화에 따른 분리특 성능을 조사하기 위해서 실험 조건은 상온에서 실시하였다. 경액으로는 유기상 용액인 케로산(등유), 사염화탄소, 등유+사염화탄소가 사용되었다. 중액으로는 수용상 용액인 일반 물을 사용하였다. 물의 색깔을 구분하기 위하여, 유기상에는 녹지 않고, 수용상에는 녹는 황갈색의 페릭나이트(철분)을 수용액에 첨가하여 실험을 수행하였다. 본 실험 장치의 주재질은 내성이 강한 아크릴로 제작되었으며, 모터의 회전속도는 3000~7000rpm 범위에서 사용하였다.

흡입 임펠라의 회전 날개 각의 변화에 따른 흡입상태가 조사되었는데, 그림4와 같이 혼합액상의 날개면에 부딪치는 힘은 식(5)와 같다.

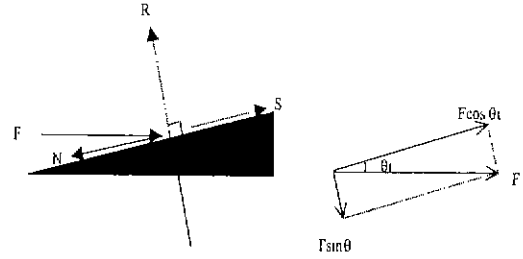


그림 4 흡입 임펠라 날개에 혼합액상이 부딪치는 힘. F : 혼합액상의 날개면에 부딪치는 힘, R : 날개면에 수직으로 작용하는 힘, N, S : 힘의 분력, R' : 날개면에 수직으로 작용하는 힘, θ : 흡입 임펠라 날개 각 이다

$$F = \frac{W \cdot V^2}{g \cdot R} \quad (5)$$

여기서, $R = F \sin$, $V = DN/60$, ρ : 밀도, Q : 유량, V : 속도, R : 날개직경/2, N : 회전 수, W : 혼합액 총량, $V = D \cdot N/60$: 회전체속도, g : 중력가속도, R : 회전체반경
흡입 임펠라 유·무에 따른 체류시간(residence time)을 비교하였다. 흡입 임펠라가 없을 때 이론 체류시간은 식(6)과 같고, 회전체의 회전수를 5000rpm 이상으로 하고, 흡입 임펠라와 펌프(ISMATEC, Model. REGLO DIG MS-4/8)의 사용시 평균 체류시간은 식(7)과 같다.

$$T = \frac{V}{Q} \quad (6)$$

$$\bar{t}_1 = \frac{\sum (mA_i) \cdot t_i}{\sum (mA)} \quad (7)$$

여기서 T :이론체류시간, V :평균순간체적, Q :유량, \bar{t}_1 : 흡입 임펠라 있을때 평균체류 시간, mA : 전류전도도, t_i : 순간 체류시간이다. 용매추출 원심접촉 분리기와 본 실험 장치의 체류시간을 비교하였다. 체적이 14ml 작은 용매추출 원심접촉 분리기의 평류 체류 시간은 10~30초이다. 본 장치의 평균체류시간을 실험하기 위해서 염화나트륨(NaCl) 1몰 60cc를 주사기로 유입구에 매우 조용히 순간적으로 주입하여 평균체류시간 유동상태를 실험하였다. 단, 여기서 염화나트륨의 농도는 50V의 전압을 걸어 전류(Current) 상태로 표기하였다.

2.3 실험 결과

실험결과 그림 5와 같이 유채이송 스크류의 경사각을 15도 이상으로 할 때는 두 혼합 액상이 탈개의 바닥에 충돌하는 힘이 강하여 유상액(emulsion) 현상이 발생된다. 그림 6에서와 같이 유체의 이송스크류는 흡입임펠라를 사용하지 않은 상태에서 원심력작용으로 3000rpm에서는 270ml/min 이상, 그리고 7000rpm에서는 50ml/min 이상에서 혼합액상이 흘러 넘치는 것을 알 수 있다.

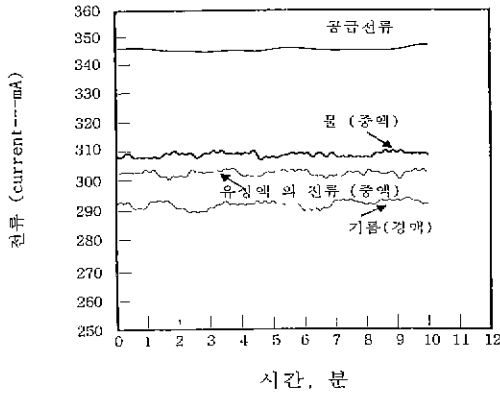
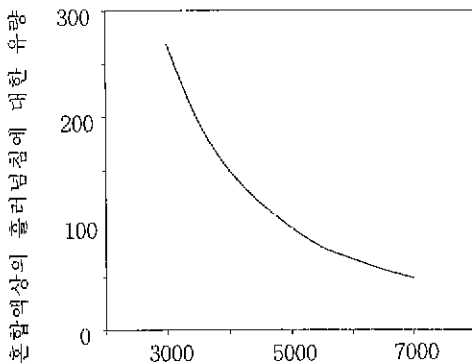


그림 5 스크류 날개 각이 15도 이상일 때 유상액 전류.



회전체의 분당 회전수 (r.p.m.)

그림 6 회전체(rotor)의 분당 회전 수에 따른 두 혼합액상 유량의 흘러 넘침

표 1에서 보던 24.75에서 27.5mm의 분리дук 내경은 분리가 잘되지만 상대적으로 얇은 두께 때문에 상비의 범위가 24.5mm보다 적다. 결과적으로 최적의 분리дук의 내경은 24.5mm 고정하였으며, 둑(weir)의 두께는 2.5mm로 결정되었다.

표 1 분리дук(separation weir)의 내경 크기에 따른 최적 분리 실험값.

분리дук의 내경mm	분리정도	분리дук의 내경mm	분리정도
직경22.5	분리 안됨	직경 24	분리는 되나 서로 많이 섞여나옴
직경22.75	분리 안됨	직경 24.25	분리는 되나 서로 조금 섞여나옴
직경23	분리 안됨	직경 24.5	분리 잘됨
직경23.25	분리 안됨	직경 24.75	분리 잘됨
직경23.5	분리 안됨	직경25~27.5	분리 잘됨
직경23.75	분리 안됨	직경27.5이상	분리 안됨

표2와 같이 상비 비교실험 결과를 보면 중래의 실험실용 용매추출 원심 접촉기의 상비 0.69~1.25보다 더 넓은 범위의 상비(0.42~1.5)의 성능을 보여 주었다.

표 2 상비 변화에 따른 분리도.

경액 (등유)	중액 (물)	상비 (경액/중액)	분리상태
8ml/분	22ml/분	0.36(경/중)	경액 출구에서 일부 등유 혼출
9ml/분	21ml/분	0.42(경/중)	분리양호
10ml/분	20ml/분	0.5(경/중)	분리양호
12ml/분	18ml/분	0.66(경/중)	분리양호
14ml/분	16ml/분	0.87(경/중)	분리양호
16ml/분	14ml/분	1.14(경/중)	분리양호
18ml/분	12ml/분	5(경/중)	분리양호
19ml/분	11ml/분	1.72(경/중)	중액 출구에서 일부 물 혼출

표 3에서 보던 경액과 중액의 혼합용액은 밀도차이에 관계없이 잘 분리됨을 알 수 있었다.

표 3 밀도의 변화에 따른 분리дук의 분리능력.

경액밀도	중액밀도	분리 상태
등유	물	양호
0.8	1	
등유+	물	양호
사염화탄소		
1.2	1	양호
사염화탄소	물	
1.6	1	양호

표 4와 같이 날개각이 30도일 때 넓은 범위의 회전수인 3000~7000rpm에서 흡입력이 좋고 분리가 잘됨을 알 수 있었다.

표 4 임펠라의 날개각과 회전수에 따른 흡입 상태.

날개각	회전수(rpm)	흡입상태
10도	4000 이하	두액상을 흡입하지 못함
20도	5000 이하	흡입력 약함, 소용돌이 육안관찰
30도	3000~7000사이	흡입력 좋음
30이상	3000~7000사이	흡입력은 좋으나 분리가 안됨

흡입 임펠라가 없을 때 이론체류시간 T는 2.23분으로 산출되었고, 그림 7과 같이 흡입 임펠라가 있을 때 평균체류시간 \bar{t}_1 은 4.14초가 걸렸다.

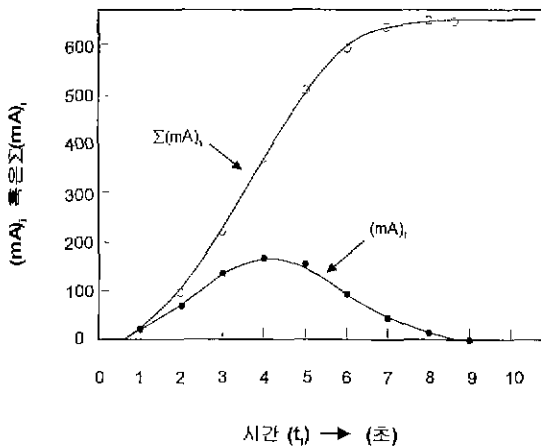


그림 7 평균 체류시간 계산을 위한 실험농도 값 (전류 전도도)

4. 결론

밀도차를 이용한 연속 순간 액체-액체원심 분리기는 실험실 등에서 서로 다른 밀도의 두 액체가 섞여서 오염되었을 때 화학적 독성 등이 강하여 인체에 흡입될 위험과 주변 환경오염 가능성이 있다. 이러한 노출될 위험과 빠른 오염 확산 가능성을 방지하기 위하여 신속하고 정확하게 두 액상, 즉, 경액과 중액을 분리하는 데 그 목적을 두고 있다. 아울러 본 장치는 산업의 응용 가능성으로는 해양이나 강등에서 수질의 기름 오염 시에 물과 기름을 빠른 시간 내에 분리 수거하여 환경문

제를 해결하고자 하에 긍정적인 목적이 있다. 본 연구는 펌프나 강제적인 힘의 작동없이 계속적으로 짧은 시간 안에 일정한 유량을 이송하는 액체-액체원심 분리기 장치 내의 유체이송 스크류와 흡입 임펠라의 설계요건과, 아울러 같은 실험 장치 내의 중액과 경액을 분리하는 분리독 개발을 위해 분리도 실험을 하였다. 전체적인 구성을 보면 동력을 전달하는 구동부와 이송 흡입 장치부와 분리장치부로 구성되어있다.

본 밀도차를 이용한 연속 순간 액체-액체원심 분리기는 현재 사용되고 있는 외국의 유사 장치인 고준위 방사선 폐액 내의 금속원소를 추출하는 원심 고온접촉기(Centrifugal pyrocontactor)나 실험실용 용매추출 원심 접촉기(Centrifugal contactors for laboratory-scale solvent extraction tests)와 비교해서 본 실험장치는 이송스크류와 흡입임펠라, 분리독(separation weir)의 최적 설계요건으로 체류시간을 단축하였고, 화공정이나 기계공정에 있어서 화학 반응 속도와 제품의 생산성 향상에 적용가능성을 보여주었다.

참고 문헌

1. A. Ralph Leonard, B. David, "Centrifugal contactors for laboratory scale solvent extraction tests" Separation Science and Technology, 32(1-4), pp. 193-210, 1997
2. A. Ralph Leonard, "Recent Advances in Centrifugal Contactor Design" Separation Science and Technology, 23. (12&13), pp1473-1487,19882.
3. A. Hamad, F. Imberton, H. H Bruun " An optical for measurements in liquid-liquid two-phase flow" Meas. Sci Technol. 8(1997) 1122-1132.
4. A. Winter,"Hydraulic Turbine Development," Proc. A.S.C.E., Vol. 65, pp. 1553-1589, 1939; abstracted in Mech. Eng., Vol. 62, P. 27, 1940.
5. R. V. Terry,"Development of the Automatic Adjustable Blade-Type Propeller Turbine,"Trans. A.S.M.E., Vol. 63, pp. 394-409, 1941.
6. H. Foettinger, "Untersuchungen uber Kavitation und Korrosion " Hydraulische Probleme, Berlin, Verein Deutscher Ingenieure, p. 14, 1926.
7. H.F. Schmidt, "Some Screw Propeller Experiments,"J. Am. Soc. Naval Engrs., Vol. XL, p. 16, February 1928.