



## 강제와류 유수분리기의 개발

### Development of a Forced-Vortex Oil-Water Separator

박 외 철\*·이 광 진\*\*

Woe-Chul Park · Kwang-Jin Lee

(1997년 1월 24일 접수, 1997년 6월 10일 채택)

#### ABSTRACT

A small scale centrifugal oil separator consisted of two concentric tubes was fabricated for spill oil recovery. With speed control of the inner tube, its performance of oil separation was investigated. Oil-water mixture is separated by forced vortex motion with the rotating inner tube. Velocity and pressure distributions in the tubes were calculated. Control of rotating speed, which is the most influencing parameter, showed an optimum value 946rpm corresponding to the acceleration of 20g at the inner tube surface. Separation performance was suddenly deteriorated at rotating speed higher than 1200rpm.

#### 1. 서 론

환경문제에 관한 관심이 높아지고 있는 가운데 유출된 기름이 해양오염 뿐만 아니라 상수원 오염의 문제를 초래하고 있다. 기름이 유출되면 이를 제거하는데 흔히 유화제를 사용하지만, 유화제는 자체의 독성으로 2차 오염을 유발하므로, 가능하면 그 사용을 억제하여야 한다. 1967년 영국 Cornish 해안에서 Torrey Canyon호의 원유 유출사고가 발생했을 때, 생태계 파괴의 원인은 유출기름을 제거하는데 사용된 유화제였다<sup>1)</sup>. 유출기름을 물리적으로 제거하는데 사용하는 여러 가지 기

회수기 중에서 흡입 회수기는 구조가 간단하고 휴대용으로 사용하기에 적합하다. 그러나 흡입 회수기는 적은 양의 기름이 섞인 물을 흡입하므로, 물과 기름을 분리하는 유수분리장치와 함께 사용해야 한다<sup>2)</sup>.

유수분리는 여과, 비중차 분리, 그리고 원심 분리로 나눌 수 있다. 여과법은 물과 기름이 필터를 통과하면서 기름만 흡착되는 것으로, 선박에서 많이 사용되고 있으나 필터의 값이 비싸고 수명이 짧은 단점이 있다. 비중차 분리는 물-기름 혼합물에서 밀도가 낮은 기름을 위로 떠오르게 하여 물과 분리하는 방식이다. 비중차 분리가 이루어지기 위

\* 부경대학교 안전공학과

\*\* 안성여자기능대학 기계설계과

해서는 기름 입자가 수면으로 떠오르는데 방해되지 않도록 물의 흐름이 거의 없어야 한다. 이러한 비중차 분리는 구조가 간단하지만, 큰 공간과 많은 시간이 필요하게 되므로, 유출 기름 회수용으로는 부적합하다. 물과 기름의 혼합물에 원심력을 가하면 비중이 낮은 기름이 중심에 모이게 되는데, 이것을 응용한 것으로 하이드로사이클론(hydrocyclone)<sup>3-5)</sup>을 들 수 있다. 고압으로 혼합물을 접선 방향으로 유입하면서 회전하게 하여, 원심력으로 비중이 낮은 기름은 중앙에 모이게 하는 방법이다. 하이드로사이클론은 구조가 간단하여 2개 이상을 직렬로 배치하면 입자가 작은 기름도 분리할 수 있으나, 중량이 크고, 높은 원심력을 필요로 한다.

유수분리 시간이 짧고 구조가 간단한 유수분리기를 개발하기 위해 본 연구자들은 두개의 동심원통으로 구성된 유수분리기의 모형실험을 수행하였다<sup>6)</sup>. 하이드로사이클론은 고압 발생장치를 필요로 하지만, 내통의 회전에 의한 강제 소용돌이 운동으로 높은 가속도를 얻을 수 있다. 따라서 고압 발생장치를 사용하지 않고도 유수분리가 가능함을 보였다. 또 본 실험에서는 동심원통의 수직배열보다는 수평배열이 유수분리에 유리함을 확인하였다.

본 연구는 유출기름 회수용 소형 유수분리기를 설계-제작하기 위한 기초 연구로서, 유수분리기 모형의 제작과 성능시험에 관해 기술한다. 유수분리기 내부의 속도 및 압력분포를 계산하고, 내통의 회전속도 변화와 유입 혼합물의 기름 함유량의 변화에 대하여 유수분리성능을 조사하였다.

## 2. 이 론

Fig. 1과 같이 두개의 수평 동심 원통 속에 유체가 차 있고, 내통이 회전하고 있을 때, 비압축성 축대칭 흐름의 Navier-Stokes방정식은  $r$  및  $\theta$  방향에 대하여 각각

$$\rho \frac{v^2}{r} = \frac{dp}{dr} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{d^2v}{dr^2} + \frac{d}{dr} \frac{v}{r} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

이다. 여기서  $v$ 는  $\theta$  방향의 속도성분, 즉 접선속도이고,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $p$ 는 압력이다.

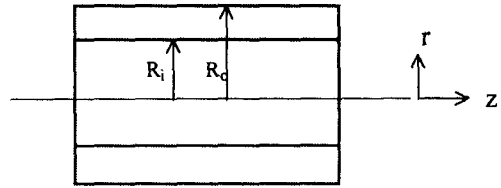


Fig. 1 Schematic of rotating cylinders and coordinates

식 (2)를  $r$ 에 대하여 적분하면

$$v = C_1 r + C_2 / r$$

이 된다. 경계조건은  $r < R_1$ 일 때  $v = r\omega$  ( $\omega$ 는 내통의 각속도),  $r = R_1$ 에서  $v = R_1\omega$ , 그리고  $r = R_0$ 에서  $v = 0$ 이므로, 이로부터 적분상수  $C_1$ 과  $C_2$ 를 구하여 이 식에 대입하고 정리하면

$$v = r\omega, \quad 0 < r \leq R_1 \dots\dots\dots (3)$$

$$v = \frac{\omega R_1^2 (R_0^2 - r^2)}{r(R_0^2 - R_1^2)}, \quad R_1 < r \leq R_0 \dots\dots\dots (4)$$

를 얻는다. 이 식을 무차원화하면

$$v^* = \eta, \quad 0 < \eta \leq 1 \dots\dots\dots (5)$$

$$v^* = \frac{1}{\eta} \frac{\alpha^2 - \eta^2}{\alpha^2 - 1}, \quad 1 < \eta \leq \alpha \dots\dots\dots (6)$$

가 된다. 여기서  $v^* = v/R_1\omega$ ,  $\eta = r/R_1$ ,  $\alpha = R_0/R_1$ 이다.

원통속의 압력분포는 식 (3)과 (4)를 식 (1)에 대입하여 적분하면

$$p - p_1 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - R_1^2), \quad 0 < r \leq R_1 \dots\dots\dots (7)$$

$$p - p_1 = - \frac{\rho \omega^2 R_1^4}{2(R_0^2 - R_1^2)^2} \left[ \left( 1 + \frac{R_0^4}{R_1^2 r^2} \right) (R_1^2 - r^2) + 4R_0^2 \ln \frac{R_1}{r} \right], \quad R_1 < r \leq R_0 \dots\dots\dots (8)$$

가 된다.  $p_1$ 는  $r = R_1$ 에서의 압력이다. 이 식으로부터 무차원 압력에 관한 식

$$p^* = \eta^2 - 1, \quad 0 < \eta \leq 1 \dots\dots\dots (9)$$

$$p^* = - \frac{1}{(\alpha^2 - 1)^2} \left[ \left( 1 + \alpha^2 \frac{R_0^2}{r^2} \right) (1 - \eta^2) + 4\alpha^2 \ln \eta \right], \quad 1 < \eta \leq \alpha \dots\dots\dots (10)$$

를 얻는다. 여기서  $p^* = (p - p_1) / 0.5 \rho R_1^2 \omega^2$ 이다.

무차원 가속도는

$$a = R_1 \omega^2 / g \dots\dots\dots (11)$$

이다. 각속도  $\omega$ 는  $2\pi n / 60$ 이고,  $n$ 은 분당 회전수 (rpm),  $g$ 는 중력가속도이다.

### 3. 실험장치와 실험방법

Fig. 2는 유수분리기 모형을 포함한 실험장치의 사진이고, Fig. 3은 실험장치의 개략도로, 유수분리기와 직류전동기, 전동기 제어장치, 펌프로 구성되어 있다. 전동기는 직류 90V, 200W이고, 펌프의 용량은 1ℓ/min이다. 유수분리기 모형은 외통이 수평으로 고정되어 있고 내통이 고속으로 회전할 수 있도록 볼베어링으로 양쪽을 지지하였다. 외통의 치수는 안지름 80mm, 두께 10mm, 길이 300mm이고, 내통의 치수는 안지름 40mm, 두께 5mm, 길이 180mm이며, 내부의 상태를 관찰할 수 있도록 아크릴 수지관으로 제작하였다. 원심력에 의해 분리된 물이 내통과 외통사이의 공간으로 쉽게 빠질 수 있도록 내통에 지름 5mm의 구멍을 약 10mm 간격으로 뚫었다.

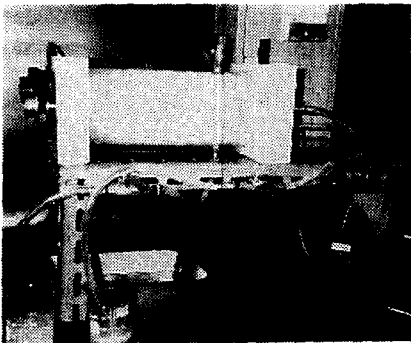


Fig. 2 Photograph of experimental apparatus

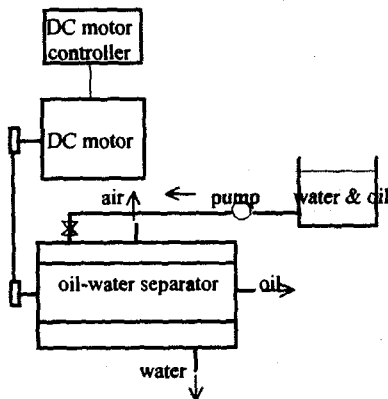


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

내통의 회전속도는 직류전동기의 회전속도로 조절하였다. 물-기름 혼합물의 흡입구와 분리된 물과 기름의 배출구에 각각 밸브를 부착하였으며, 혼합물의 흡입구와 분리된 물의 배출구는 외통에 대하여 접선 방향이 되게 하고, 기름 배출구의 안지름은 4.5mm로 하였다. 물과 기름 혼합물을 채울 때 공기를 제거하기 위해 외통의 중앙 상부에는 공기 배출구를 설치하였다. 내통의 회전속도는 비접촉식 회전속도계(tachometer)로 측정하였다. 흡입회수기로 흡입하는 물-기름 혼합물에는 보통 10%이하의 기름이 섞여 있으므로, 기름(유압작동유 ISO VG32, 비중 0.866)의 함유량이 각각 6%, 9%, 12%가 되도록 물과 기름을 섞어 내통과 외통에 채운 후 각 함유량에 대하여 실험하였다.

내통의 회전속도를 변화시켜 내통속 중앙에 분리된 기름띠가 나타났을 때, 내통의 내부 기준 가속도는 약 20g였다. 이에 따라 본 연구에서는 내통 내면에서의 가속도를 10g, 20g, 30g, 40g, 50g로 하여 각 가속도에 해당하는 내통의 회전속도를 유지하면서 물-기름의 분리상태를 조사하였다. 기름 배출구에서 물과 기름이 각각 몇 % 함유되어 있는가를 조사하였다.

이 실험에 사용된 가속도와 기름 함유량은 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters tested

acceleration (rpm)	10g(669)
	20g(946)
	30g(1158)
	40g(1337)
	50g(1495)
oil concentration	6vol%
	9vol%
	12vol%

### 4. 결과 및 고찰

내통의 안지름과 외통의 안지름은 각각 40mm와 80mm이므로,  $R_i=20\text{mm}$ ,  $R_o=40\text{mm}$ 로부터  $\alpha (=R_o/R_i)$ 는 2.0이다. 이를 값을 식 (5)와 (6), (9)와 (10)에 대입하면 무차원 속도분포  $v^*(=v/R_i\omega)$ 와 무차원 압력분포  $p^*[(p-p_0)/0.5\rho R_i^2\omega^2]$ 를 얻는다.

Fig. 4는 내통과 외통에 물을 채운 후 내통을 회

전시켜 정상상태가 되었을 때의 속도분포를 나타낸다. 무차원 속도는 중심에서 내통의 안쪽 반지름( $R_i$ )인 20mm까지는 반지름에 비례하여 증가하지만, 반지름이 이 보다 클 때는 속도가 급격히 감소함을 볼 수 있다. 여기서 내통의 두께는 무시하였다. 내통의 표면에서 속도가 최대이고, 외통 쪽으로 갈수록 속도가 급격히 감소하여 0이 되므로, 분리된 물이 원심력에 의해 외통의 안쪽면으로 모이게 된다.

내통에서의 가속도가 증가하면 접선 속도가 증가하며, 최대 접선속도는  $r=20\text{mm}$ 에서 10g일 때 1.4m/sec, 50g일 때 3.2m/sec였다.

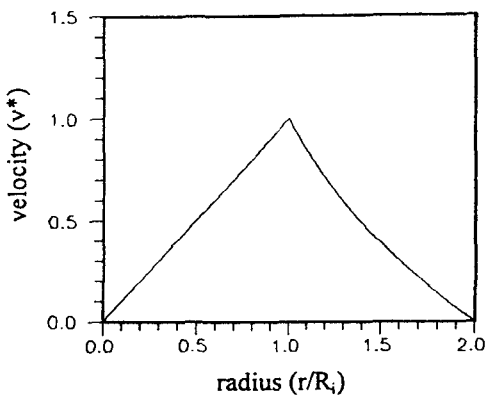


Fig. 4 Velocity distribution in separator

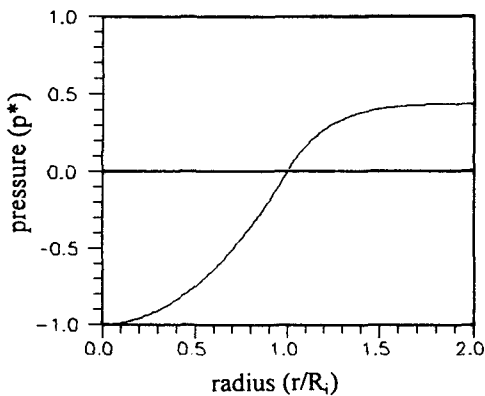


Fig. 5 Pressure distribution in separator

유수분리기 내의 무차원 압력분포는 Fig. 5와 같다.  $r \leq 20\text{mm}$ 일 때, 즉 내통 내부의 압력은 내통 안쪽면에서의 압력  $p_i$ 보다 낮고, 원심력에 의하여 중심에서 압력이 가장 낮다. 내통속에서는 압력이

반지름의 제곱에 비례하여 증가한다. 내통과 외통 사이( $20\text{mm} < r \leq 40\text{mm}$ )의 공간에서는  $p_i$ 보다 크지만 반지름이 증가하면 일정치 0.434로 접근한다.

Fig. 6은 유입 혼합물 속의 기름 함유량에 따라 내통의 회전속도가 유수분리에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 기름 함유량이 각각 6%, 9%, 12%인 혼합물을 일정한 유량으로 유수분리기에 유입하면서 기름 배출구 밸브를 열고 비이커에 받아두었다가 물과 기름이 분리된 후에 기름의 함유량을 표시하였다. 이때 물 배출구는 일정한 유량이 배출되게 하였다. 내통의 안쪽면에서의 가속도가 20g일 때 세가지 기름 함유량에서 모두 좋은 유수분리 효과를 보이고 있다. 특히 기름 함유량이 9%와 12%일 때 기름 배출구에서의 유출상태는 기름이 약 90%, 물이 약 10%로 기름이 비교적 잘 분리되었음을 볼 수 있다. 가속도가 30g이상일 때는 가속도가 클수록 유수분리 효과가 급격히 떨어지고 있다. 내통의 회전속도(또는 가속도)가 아주 낮은 경우에는 원심력이 작아 내통의 중앙에 기름띠가 잘 형성되지 않았다. 회전 속도가 너무 높은 경우에는, 유수분리기 내부의 유동이 불안정하게 되어, 중심에 기름띠가 형성되지 않고 오히려 물과의 섞임이 일어나 뿌옇게 나타났다.

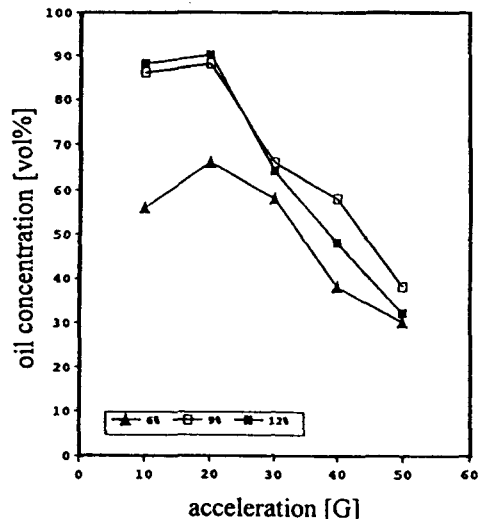


Fig. 6 Oil concentrations at oil outlet

유수분리성능은 가속도의 크기에 비례하는 것이 아니며, 따라서 내통의 회전속도와 지름의 크기가 중요한 변수임을 알 수 있다. 본 연구에서는 내통

의 안지름이 40mm인 하나의 관을 사용하였으나 지름의 크기에 대한 연구가 필요하다. 또한 안정된 유동을 얻기 위해 회전부위의 정밀가공-조립이 필요하다.

### 5. 결 론

원심 분리식 유수분리기의 모형을 제작하여 회전속도의 변화에 따라 유수분리 효과에 대한 실험을 수행한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 유수분리기 속의 속도와 압력분포는 내통속에서 반지름에 비례하고, 내통 밖에서의 급격히 감소하여, 분리된 물이 원심력에 의해 외통으로 모이며, 기름은 낮은 압력의 중심으로 모인다.
- 2) 시험 가속도중 20g에서 기름이 가장 잘 분리되었고, 이 때 내통의 회전속도는 946rpm이었다.
- 3) 가속도가 낮을 때는 원심력이 부족하여 기름이 잘 분리되지 않았고, 클 때에는 섞임이 일어났다.
- 4) 내통의 회전속도와 지름의 크기가 중요한 변수이므로 지름의 크기에 대한 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

- 1) R. B. Clark, Marine Pollution, Oxford University Press, pp. 33~64, 1989.
- 2) 박외철, "진공청소기를 이용한 휴대용 유출기름 회수기의 개발", 한국산업안전학회지, Vol. 10, No. 1, pp. 41~49, 1995.
- 3) D. A. Colman and M. T. Thew, "Correlation of Separation Results from Light Dispersion Hydrocyclone", Chem. Eng. Res. Des. Vol. 61, pp. 233~240, 1983.
- 4) H. D. Parker and G. D. Pitt, Pollution Control Instrumentation for Oil and Effluents, Graham & Trotman, pp. 175~209, 1987.
- 5) K. R. Bitting, A. B. Nordvik and M. Fickel, "Tests of Lightweight Oil/Water Separators for Spilled Oil Recovery Operations", 2nd Int'l Oil Spill Research and Development Forum, Vol. 1, pp. 95~102, London, UK, 1995.
- 6) 박외철, 이광진, "유출기름 회수용 유수분리기의 개발( I )-개념설계와 모형실험", 부경대학교 열유체공학연구소, 연구논문집, 제2집, pp. 21~29, 1995.