

수중으로 방출되는 유류의 유적화에 관한 실험연구

송무석⁽¹⁾

An Experimental Investigation of the Underwater Oil Drop Formation

by
Museok Song⁽¹⁾

요 약

수중에서 방출되는 기름의 유적화 현상을 축대칭 실험을 통하여 살펴보았다. 노즐의 직경과 방출속도를 변화시키며 생성되는 유적과 제트의 크기 및 형상, 그리고 생성된 유적의 상승 거동을 관찰하였다. 노즐의 직경을 이용하는 레이놀즈수가 증가하면서, 유적의 크기는 감소하다가 증가하며 다양한 크기의 유적이 폭발적으로 생성되는 영역으로 변해간다. 동시에 제트의 길이는 유동의 축대칭이 유지되는 한계까지는 증가하다가 축대칭이 무너지는 영역에서는 감소하는, 유적의 크기와는 반대의 현상을 나타낸다.

Abstract

Oil drop formation during the underwater oil discharge is investigated experimentally. The focus is placed on the size of the drops formed with the variation of discharge speed and nozzle diameter. As the Reynolds number based on the nozzle diameter increases, the droplet size decreases first and then increases until an explosive atomization occurs. The length of the jet attached to the nozzle increases with the Reynolds number and then decreases. The transition occurs when the flow becomes asymmetry.

Keywords: Oil Spill(누유), Drop Formation(유적생성), Drop Rising Speed, Flow Visualization (유동가시화), PIV.

1. 서 론

수중에서의 기름 유출은 기름탱크가 파손된 선박의 침몰이나 해저 송유관의 파손 시 발생할 수 있다. 근본적으로 이러한 오염원을 제거하기 전에는 연속적인 기름의 유출이 예상되는데, 이

러한 유출유는 유출의 환경에 따라 특정 형태를 띠며 기름 방울로 (oil drop) 발달하고 이러한 기름 방울은 부력과 주위 유동과 기름 방울의 상대 속도에 따른 저항력의 결과로 수중에서 3차원 거동을 보이며 일반적으로 수면으로 상승한다 (McDougall[1978], Lemckert et al.[1993], Rye

(1) 정희원, 홍익대학교 조선해양공학과, msong@hongik.ac.kr

et al.[1997]). 기름 방울의 상승과 수평 유동의 속도는 그 크기와 방울 균에 의하여 조성된 주위 유체의 거동에 관련이 있는데 거의 중립 부력을 갖는 미세한 방울의 경우에서 초당 수십 센티미터씩 상승하는 경우까지 매우 다양하다(Clift et al.[1978]). 이러한 이유에서 기름 방울의 크기는 기름 균의 3차원 확산을 예측하기 위하여 제공되어야 할 필수적인 정보로 이해되고 이의 부정확성이 야기하는 문제는 사고가 수일 이상 경과된 후에 예상치 못하였던 해역에서 다량의 기름이 발견되는 경우이다(Spaulding[1988]).

노즐에서 방출되는 유적플룸(droplet plume 혹은 droplet train)의 문제는 오랜 역사를 지닌 다양한 형태의 응용분야를 포함하는 영역이긴 하지만(Lin and Reitz[1998]) 대부분이 공기 속으로 액체를 분사하여 미세한 액체 입자를 구성하는 경우(atomization)이거나, 2상 액체의 경우 초기 버블 발생시의 instability를 다루는 경우이다(Richard et al.[1995], Hilbing et al.[1996]). Meister[1966]의 경우 노즐의 크기를 변화시키며 유적의 크기를 계측하였으나 노즐의 최대 직경이 3.44 mm의 경우이며 유적의 무차원 크기도 노즐의 직경과 레이놀즈 수에 따라 심한 변화를 보이고 있다. 기름의 해양 유출의 관점에서 이러한 노즐의 크기는 의미가 없으며 또한 작은 규모의 실험에서 상사성이 증명되지 않은 상황에서 비교적 큰 노즐의 경우의 유적의 크기 예측은 어려운 상황이다. 유적의 크기가 결정되면 다양한 모델을 이용하여 환경에 따른 유적의 거동 예측이 가능해지는데 예로 Lee, Kang and Cho[1998] 등이 있다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 수중에서 유출되는 기름의 3차원 확산 예측에 필요한 기초 정보를 제공하기 위하여 침수된 선박이나 해저 파이프의 손상 부위에서 새어 나오는 기름의 유적화 과정을 모델화하여 실험적으로 살펴보았다. 노즐의 크기와 기름의 방출 속도를 조절하며 다양한 형태의 유적형성을 관찰하였고 이를 레이놀즈수를 중심으로 정리하였다.

2. 본 론

일반적으로 유적의 거동은 주위 유체의 점도와 두 유체간의 표면장력의 비를 나타내는, 즉 유적

의 크기나 속도가 포함되지 않은 Morton number($Mo = g\mu_c^4 \Delta\rho / \rho_c^2 \sigma^3$, g : gravity, μ : dynamic viscosity, $\Delta\rho$: density difference, σ : interfacial tension, subscript c: continuous phase) 와 유적의 크기가 포함되는 중력과 표면장력의 비를 나타내는 Eotvos number ($E_o = g\Delta\rho d^2 / \sigma$, g : gravity, $\Delta\rho$: density difference, d : bubble diameter, σ : interfacial tension)의 지배를 받는다(Clift et al.[1978]). 이들 무차원 수는 Navier Stokes 방정식을 E_o 에서 뽑아낸 길이 차원과 무력과 관성력의 비에서 구해지는 속도차원 그리고 이 둘을 이용하여 얻는 시간차원을 이용하여 무차원화 하면 나타나는데, Mo 는 유효 점성 계수의 형태로 나타나지만 E_o 는 식에 포함되지는 않는다. 이들 두 무차원 수가 정해지면, 즉 유적의 (혹은 버블) 크기를 안다면, Fig. 1에 인용한 결과를 이용하여 버블 레이놀즈 수 ($Re_b = \rho_c d U_b / \mu_c$, U_b : bubble rising speed)를 결정할 수 있고 따라서 버블의 상승 속도를 구할 수 있다.

유적의 크기는 서론에서 언급한 바와 같이 실험 결과가 없는 가운데 수치적 해석이 시도되지만(Hilbing[1996]) 노즐에서의 유속에 가하는 교란의 크기와 주기가 절대적인 영향을 미치고 따라서 실험 결과를 놓고 이들을 튜닝해 나가는 방식을 취하고 있고 더욱이 난류성 제트로 유동이 발달하는 경우의 예측은 불가능하다. 결론적으로 생성되는 유적의 특성은 특성 무차원 수가 동일한 경우의 실험을 통하여 결정되어야 하며 다음의 절에서는 이를 위하여 본 연구에서 수행된 실험과 결과 정리하였다.

2.1 실험 장치 및 실험 방법

사용된 실험 시설을 Fig. 2에 보였다. 물과 경유를 저장하는 용기와 노즐들의 크기는 Table 1과 2에 정리하였다. 노즐의 직경은 제작 가능한 최소 직경으로부터 점차적으로 증가시키며 Rayleigh Taylor instability로 노즐 내에 경유가 노즐의 윗면이 열린 상태로 가두어져 있을 수 없는 크기까지 변화 시켰다. 경유 탱크의 수위를 원하는 높이로 조정하고 노즐의 하단에 위치한 솔레노이드 밸브를 10초에서 20초까지 개방하고 그때 발생하는 현상을 Photron사의 Fastcam 고

수중으로 방출되는 유류의 유적화에 관한 실험연구

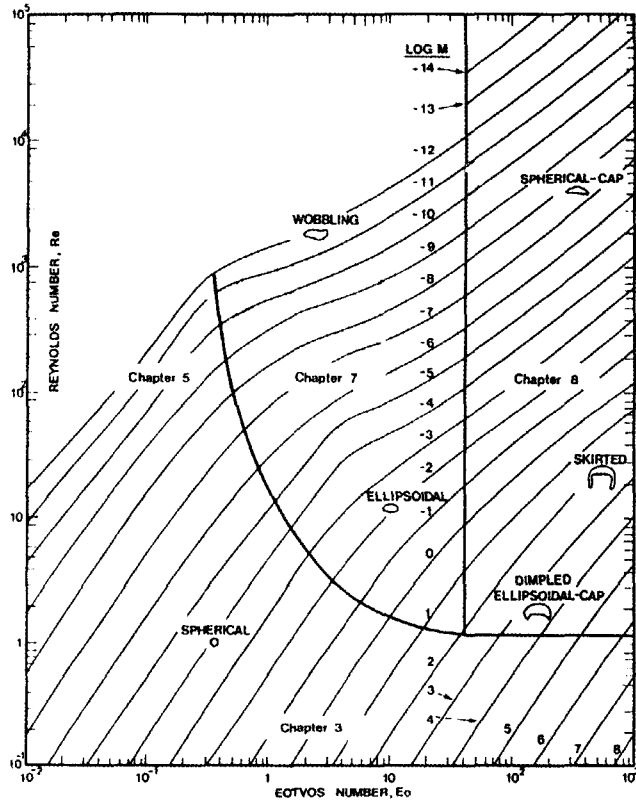


Fig. 1 Shape regimes for bubbles in gravitational motion through liquids(Cliff et al. [1978]).

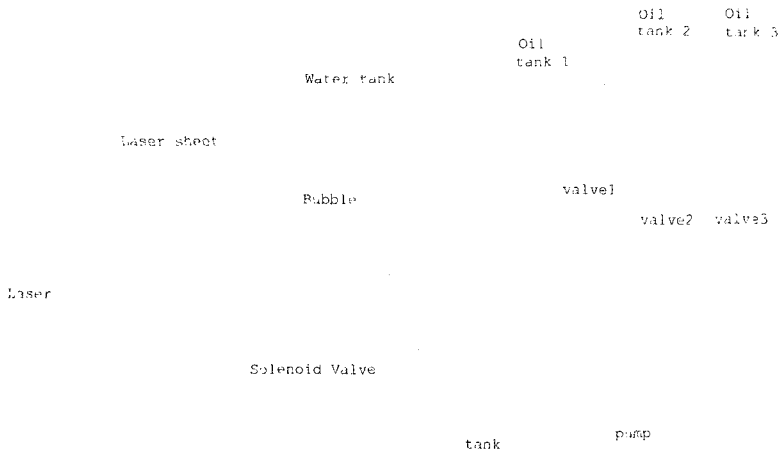


Fig. 2 Schematic experimental setup.

속 카메라와 Panasonic사의 movie camera, 그리고 경우에 따라 PIV용 CCD카메라에 녹화하였다. PIV와 관련된 자세한 사항은 송무석 등[1997]을 참조하면 된다. 노즐 끝에서의 경유 유속은 실험 전후의 경유탱크 수위 차를 시간으로 나누어 평균적인 개념으로 사용하였고 유동을 관찰하는 순간은 충분히 정상적인 상태가 도달되었다고 믿어지는 시기로 하였다. 고속카메라는 화상의 화질을(resolution) 고려하여 초당 400 프레임을 잡는 것으로 고정하였는데 느린 동작으로 재생하였을 때에 유적의 표면이 충분한 선명도를 나타내었다. 결과의 정리는 촬영된 고속의 영상을 VCR에 저장하고 미리 정해 놓은 기준자를 겹쳐서 느린 속도로 재생하며 버블 플룸의 전체적인 형상과 유적의 크기 및 상승 속도, 그리고 가능한 경우 단위 시간당 방출되는 버블의 수를 계측하였다.

실험에 사용된 물은 실험실의 수도물이고 경유는 오일뱅크 주유소에서 구입하였다. 두 액체의 물적 특성은 18.5°C에서 실린더와 구슬을 사용하는 점도계와 백금침을 사용하는 표면장력계를 이용하여 계측하고 Table 3에 정리하였다.

2.2 결과 및 고찰

Fig. 3은 직경이 6 mm인 노즐의 경우 유속에 따라 생성되는 버블 플룸의 형태를 보여준다. 레이놀즈 수가 매우 낮은 경우($Re_n=220$, $\rho U_n D/\mu$, U_n 은 노즐에서의 유속이고 D 는 노즐의 직경) 노즐의 끝단에서 End Pinching Mechanism에 의해 매우 규칙적으로 기름 방울이 떨어져 나가고 있음을 볼 수 있다. 이들 유적은 생성 당시 층류 상태임이 명확하나 버블의 후류에 발생하는 불규칙적인 유동에 의해 축대칭이 깨어지고 뒤따르는 버블은 연속적으로 앞서간 버블의 반류를 추적해 가기 때문에 결국 전체적으로 나선형의 이동 경로를 그린다고 볼 수 있다. 레이놀즈 수가 증가하면($Re_n=480$) 제트의 길이가 길어지고 제트의 끝단에서는 2 혹은 3개의 파정을 갖는 불안정성이(instability) 성장하여 2개나 3개의 유적이 하나의 세트르 생성되는 Reyleigh Mechanism의 형태를 보인다. 이들 유적은 생성되면서 서로 간에 충돌과 회전(tumbling)을 반복하나 유사한 크기의 버블들이 결합하는

Table 1 Dimension of tanks.

Water Tank	Dia. 584mm Height 900mm
Oil Tank 1	B295mm × L470mm
Oil Tank 2	Dia. 93.0mm
Oil Tank 3	Dia. 42.5mm

Table 2 Dimension of nozzles.

Nozzle No.	inner Dia.(mm)	Length(mm)
0	0.85	33.9
1	3.0	59.5
2	6.0	156.5
3	9.4	152.5
4	15.0	151.5

Table 3 Measured material properties of the liquids used at 18.5°C.

	Diesel Oil	Tap Water	Oil/Water
Density (Kg/ms)	809.8	992.0	
Dynamic Viscosity (cP)	2.301	1.043	
Surface Tension (N/m)	0.0320	0.0797	0.0365

(merging) 경우는 매우 드물다. 유속의 계속적인 상승으로 세 번째 그림에서는 축대칭이 깨어진 진형적인 난류 제트의 양상으로서의 발전을 보여주고 있으며 이때에 발생하는 버블은 오히려 유속의 증가와 더불어 커지는 경향을 보인다. 비대칭의 제트로의 발전은 노즐의 크기에 영향을 받는데 노즐의 크기가 커질수록, 즉 표면장력의 영향이 상대적으로 클수록 천이는 지연된다. 레이놀즈 수가 900을 넘어 서면서 생성되는 유적의 크기는 다양성을 보이고 여기서 더 유속이 증가하면 제트의 끝단은 폭발하듯 부서지며 매우 작은 유적군을 생산해 낸다. 이들 소규모의 유적들은 상승하며 결합하여 상당히 큰 규모의 기름방



Fig. 3 Bubble plumes with Reynolds number variation. $Re_n=220, 480, 840$ (1st row), $900, 2200$ and 3000 (2nd row) from left to right.

울로 성장하기도 하지만 평균적으로 충분히 발달한 난류 제트의 경우 버블의 크기는 점점 작아진다. 마지막 경우는 ($Re_n=3000$) atomization을 연상시키는 그림으로 더 이상의 유속 증가는 전 반적인 유동 특성의 면에서 큰 영향을 주지 않는다.

Fig. 4는 레이놀즈수가 매우 낮은 경우 소위

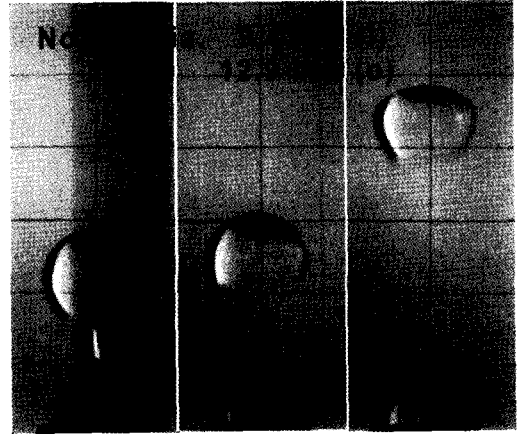


Fig. 4 Sequence of satellite drop formation. $T=0, 0.0225, 0.1475$ sec from the left. $Re_n=20$.



Fig. 5 Bubble plumes with varying nozzle diameter. $D=0.85, 3.0, 6.0$ and 9.4 mm, and $Re_n=500, 460, 480$ and 600 from left to right.

위성 유적의(satellite drop) 생성 과정을 보여주는데 이러한 매우 깨끗한 유적의 경우도 반류에 의하여(potential wake와 같은 반류) 후방의 위성 유적이나 유사한 크기의 유적을 끌어 당겨 충돌과 같은 상호작용이나 나선형 궤적을 보이는 과정을 겪는다.

Fig. 5는 유사한 레이놀즈수에서 노즐 크기의 영향을 살펴보고자 보였는데, 이는 결국 유적생성의 또 다른 중요한 무차원 인자인 웨버수

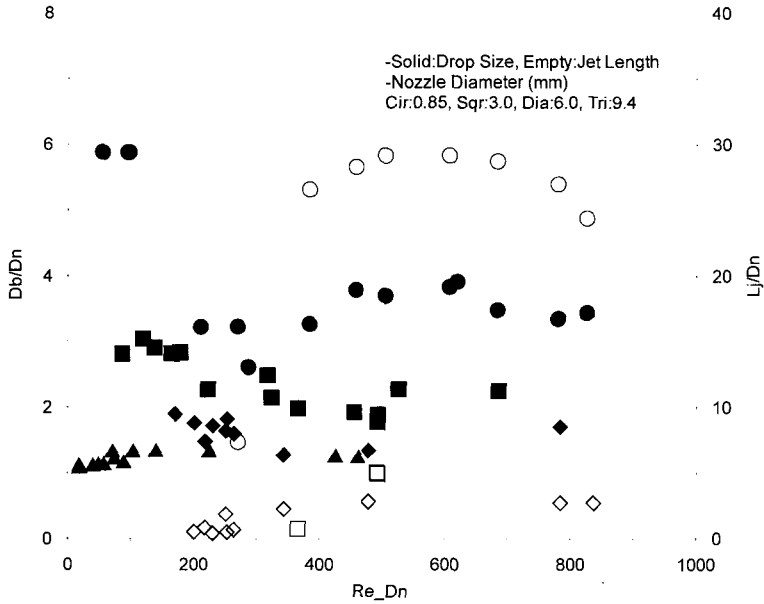


Fig. 6 Measured drop size and jet length vs Re_n .

(Weber number, $We = \rho U_n^2 D / \sigma$)의 영향을 보는 것이다. 레이놀즈수가 같은 경우에 노즐의 직경이 작으면 웨버수는 반비례하여 커지고 표면장력의 영향이 상대적으로 약해짐을 의미한다. 비대칭 난류 제트로의 천이가 발생할 수 있는 레이놀즈 수로 500을 택하여 각 노즐의 실험 중 가까운 경우를 택하였으나 가장 큰 노즐의 경우 레이놀즈 수는 600이다. 가장 작은 노즐의 경우 이미 축대칭이 깨어진 난류 제트로의 천이가 발생하고 있음을 알 수 있는데, 이는 생성된 버블들의 크기에 균일성이 부족한 것으로 판단할 수 있다. 노즐의 크기가 커질수록 생성되는 버블의 크기는 증가하지만 작은 노즐의 경우에서 보는 다양한 크기의 버블은 보이지 않고 Fig. 3에서 본 층류의 제트 끝단이 불안정해지고 따라서 2개나 3개의 버블이 이어서 생성되는 Reyleigh 영역으로 파악된다.

Fig. 6에는 계측이 가능하였던 경우의 유적크기와 제트의 길이를 노즐의 직경으로 무차원화하여 레이놀즈 수의 함수로 정리하였다. 노즐의 크기에 따라 변하지만 축대칭이 깨어지며 난류 제트가 발생하는 레이놀즈 수에서 대체로 유적의 크기는 최소가 되고 제트의 길이는 최대가 됨을 알 수 있다. 노즐의 크기 변화에 따른 표면

장력의 변화를 체계적으로 고려하지 못하였지만 이들의 경향을 정리하면 Fig. 7과 같이 요약할 수 있다. 표면장력의 효과 등에 관한 엄밀한 연구는 파라메타의 변화가 용이한 수치해석적 방법을 통하여 가능하리라 생각된다.

Table 4에는 계측된 값들을 정리하여 보았다. 물적 특성치인 Mo 는 우리의 경우 일정하고 Eo 가 1.18에서 13까지 변한다. Fig. 1을 참조하면 버블 레이놀즈 수가 대략 100에서 1000까지 변하는데 우리가 정리한 레이놀즈 수와 거의 유사하고 관찰된 버블의 형태도 구형에서 전체적으로 찌그러지는(wobbling) 형태임을 알 수 있었다. 계측된 버블의 상승속도는 버블의 크기의 증가와 함께 커지는 단일 버블의 경우와는 달리 뚜렷한 경향을 보기 어렵는데, 이는 거의 모든 경우에서 버블간의 상호 작용이 동반되기 때문이다. 결과적으로 버블 크기의 정확한 예측이 요구됨을 다시 확인하게 되는데 적극적인 차원해석과 직접 시뮬레이션을 통한 연구가 필요하다 하겠다.

노즐의 크기가 6 mm인 경우 주위 유체의 유입을 (entrainment) 포함한 전체적인 유동을 파악하고자 PIV 계측을 함께 하였다(Fig. 8). 레이저 출력의 부족과 버블에 의한 산란으로 만족스

Table 4 Summary of the measured variables.

D(mm)	U _n (m/s)	Re _n	d(mm)	d/D	E _o	Mo	We	U _b (cm/s)	Re _b
0.85	0.181	5.42E+01	4.90	5.76	1.18E+00	4.44E-11	7.59E-01	15.38	7.17E+02
3.00	0.081	8.58E+01	8.80	2.93	3.79E+00	4.44E-11	5.39E-01	15.63	1.31E+03
3.00	0.156	1.64E+02	8.80	2.93	3.79E+00	4.44E-11	1.98E+00	17.24	1.44E+03
3.00	0.347	3.66E+02	6.00	2.00	1.76E+00	4.44E-11	9.80E+00		
3.00	0.468	4.94E+02	4.90	1.63	1.18E+00	4.44E-11	1.79E+01		
3.00	0.650	6.86E+02	6.50	2.17	2.07E+00	4.44E-11	3.45E+01		
6.00	0.103	2.18E+02	9.50	1.58	4.42E+00	4.44E-11	1.74E+00	22.5	2.03E+03
6.00	0.227	4.78E+02	8.20	1.37	3.29E+00	4.44E-11	8.38E+00		
6.00	0.399	8.42E+02	13.40	2.23	8.80E+00	4.44E-11	2.60E+01		
6.00	0.429	9.06E+02	16.30	2.72	1.30E+01	4.44E-11	3.00E+01		
9.40	0.006	1.97E+01	12.70	1.35	7.90E+00	4.44E-11	9.04E-03	15.85	1.91E+03
9.40	0.012	4.00E+01	11.50	1.22	6.48E+00	4.44E-11	3.74E-02	9.7	1.06E+03
9.40	0.017	5.77E+01	11.90	1.27	6.94E+00	4.44E-11	7.78E-02	16.32	1.85E+03
9.40	0.042	1.40E+02	14.30	1.52	1.00E+01	4.44E-11	4.57E-01	18	2.45E+03

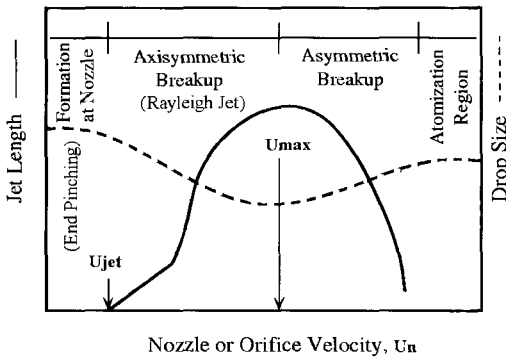


Fig. 7 Drop formation regimes as exit velocity variation.

러운 결과를 얻을 수는 없었으나 전체적으로 축 중심에서의 빠른 상승류와 버블을 감싸는 환형의 유동층이 축 중심으로 빨려 들며 상승하는 모습을 확인할 수 있다. 동반 상승류의 크기는 난류 제트의 경우 기름이 작게 쪼개어질 경우 커지는 것으로 관찰되었으나 정량적인 평가는 현재 가능하지 않다.

3. 결 론

노즐의 크기와 경유의 분사 속도를 변화시키며

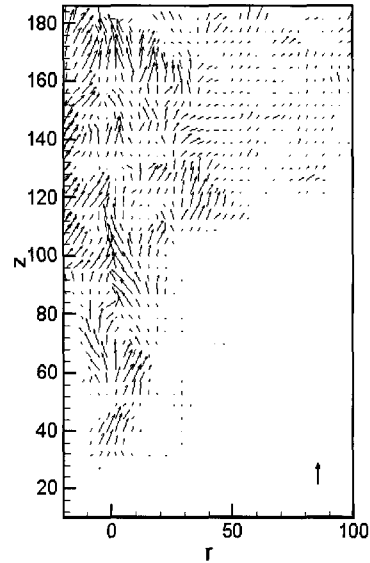


Fig. 8 Measured velocity field by PIV. Re_n=3000. The reference arrow is 1m/s.

수중에서 발생하는 기름 방울의 특성을 실험적으로 살펴보고 결과를 분사속도와 노즐의 직경을 이용한 레이놀즈 수를 중심으로 정리하였다. 레이놀즈 수의 증가하면서 버블 폭은 노즐 직경의 1~6배 크기의 single bubble train에서 1.5~2.0배의 크기를 갖는 버블들로 이루어지는 천

이 구간을 거치고 결국 작은 버블 군으로 이루어지는 난류 제트의 특성을 보인다. 이때에 버블의 크기는 노즐 직경의 2~3배 정도까지도 되지만 대부분의 기름은 잘게 분산된 형태로 상승한다. 난류로의 천이는 노즐의 직경이 커질수록 지연되고 레이놀즈 수 500~1500 영역에서 일어난다. PIV 계측을 통하여 버블의 상승이 주위의 유체에, 특히 작은 버블군의 경우에 상승 모멘텀을 공급함을 확인하였다. 신뢰성 있는 버블 크기의 예측을 위한 직접계산을 통한 엄밀한 연구가 필요하다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] 송무석 · 이상대, 1997, "진동하는 원형주상체 주위의 유동에 관한 실험적 연구", 대한조선학회 추계학술회의 논문집, 361~364.
- [2] Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., 1978, Bubbles, Drops, and Particles, Academic Press.
- [3] Hilbing, J. H. and Heiser, S. D., 1996, "Droplet size control in liquid jet breakup", Phys. Fluids, Vol. 8, No. 6, 1574~1581.
- [4] Lee, C. M., Kang, K. H. and Cho, N. S., 1998, "Trapping of leaked oil with tandem oil fences with Lagrangian analysis of oil droplet motion", Trans. of the ASME, J. Offshore Mech. & Arctic Eng., Vol. 120, 50~55.
- [5] Lemckert, C. J. and Imberger, J., 1993, "Energetic bubble plumes in arbitrary stratification", J. Hydraulic Eng., Vol. 119, No. 6, 680~703.
- [6] Lin, S. P. and Reitz, R. D., 1998, "Drop and spray formation from a liquid jet", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 30, 85~105.
- [7] McDougall, T. J., 1978, "Bubble plumes in stratified environments", JFM, Vol. 85, Part. 4, 655~672.
- [8] Meister, B. J., 1966, "The formation and stability of jets in immiscible liquid systems", Ph. D. thesis, Cornell Univ., Ithaca, NY.
- [9] Rallison, J. M., 1984, "The deformation of small viscous drops and bubbles in shear flows", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 16, 45~66.
- [10] Richard, J. R., Beris, A. N. and Lenhoff, A. M., 1995, "Drop formation in liquid-liquid systems before and after jetting", Phys. Fluids, Vol. 7, No. 11, 2617~2630.
- [11] Rye, Henrik and Brandvik, P. J., 1997, "Verification of subsurface oil spill models", Proc. Int. Oil Spill Conf., Port Lauderdale, Florida, 551~557.
- [12] Spaulding, M. L., 1998, "A state-of-the-art review of oil spill trajectory and fate modeling", Oil and Chem. Poll., Vol. 4, 39~55.