

2. 유체, 열공학, 동력공학 및 기계역학

(1) 특집기사

터보펌프의 氣液二相流 特性

Characteristics of Turbo Pumps Operating in Air-Water Two-Phase Flow



김유태
Y-T Kim

- 1990년 한국해양대학교 기관공학과 졸업
- 1996년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업 (공학석사, 유체공학)
- 2000년 큐슈공업대학 대학원 정보공학연구과 졸업 (공학박사, 유체공학 · 유체기계)
- 1990년-1993년 SK해운, 엔지니어
- 2000년-2001년 큐슈공업대학 SVBL 강사
- 2001년-현재 한국해양대학교 재직 (해사대학, 기관시스템공학부 전임 강사)
- kimyt@hanara.knaritime.ac.kr



이영호
Y-H Lee

- 1980년 한국해양대학교 기관공학과 졸업
- 1982년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업 (공학석사, 유체공학)
- 1992년 동경대학 대학원 기계공학과 졸업 (공학박사, 유체공학)
- 1980년-현재 한국해양대학교 재직 (공과대학, 기계 · 정보공학부 교수)
- 2000년-현재 조선 · 해양기자재 센터 소장
- lyh@pivlab.net

1. 머리말

펌프, 송풍기, 압축기, 수차 등 유체와 기계간의 상호 에너지 변환을 행하는 유체기계는 인간 생활, 산업활동에 있어서 필요 불가결한 존재이다. 선박에 있어서도 급수펌프, 순환수펌프, 냉각수펌프, 각종 압축기 · 송풍기 등 중요한 보조기계의 대부분을 차지하고 있다. 유체기계가 사용되는 플랜트에 있어서 유체기계의 정지는 전체 조업의 정지를 의미하는 경우가 많으며 그 때문에 고도의 신뢰성 확보가 매우 중요하다.

일반적으로 유체기계는 발명이나 고안에 의해 기계의 설계 · 제작이 선행된 후 많은 사람들에 의해 개량연구가 이루어짐과 동시에 그 뒷받침으로서 이론적 설명이 이루어지는 과정을 거치는 것이

대부분이다. 현재에도 많은 종류의 유체기계가 이와 같은 과정의 순환을 거치면서 그 구조나 성능 면에서 고도로 향상되고 있으며 앞으로도 이러한 연구는 끊임없이 지속되어야 할 것이다.

유체기계 중에서도 임펠러의 翼작용을 이용한 터보기계는 고효율, 쉬운 보수관리, 적은 소음 등의 장점이 있어, 그 대부분을 차지하고 있다. 원래 터보기계는 單相流 상태에서 사용되는 것으로서 二相流 상태가 되면 임펠러의 작용이 악화되어 운전이 불가능하게 되는 경우가 많다. 따라서 이상류 상태에서의 사용은 피하도록 고려되어 있다. 그러나, 흡입관 접합부의 불량에 의한 공기의 흡입, 보일러의 급수 등과 같이 증기포를 포함하는 경우, 펌프 흡입파이프에 생기는 공기흡입渦(air entraining vortex)에 의한 공기의 혼입 뿐만 아니라, 최근에는 로켓 엔진용 터보펌프, 원자로의

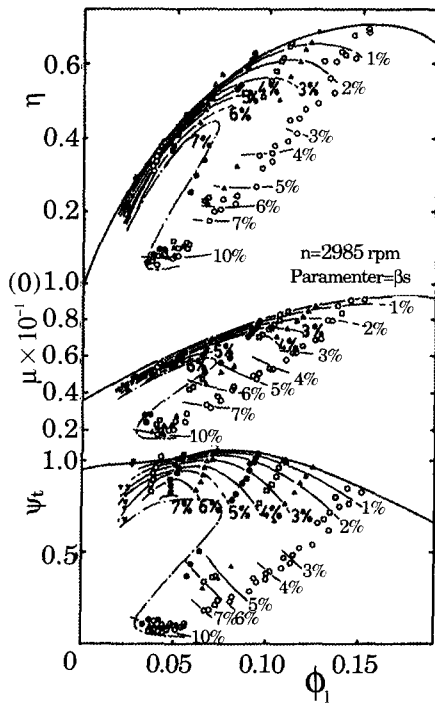


Fig. 1 Vertical-shaft centrifugal pump characteristics operating in air-water two-phase flow (n=2985rpm, Number of blades : 8 blades)

안전해석, 해양유전개발 등의 문제와 관련해서 펌프를 기액이상류 상태에서 작동시킬 필요성이 강하게 부각되었으며, 선박에 있어서도 고성능화·저비용화라는 상반된 요구를 충족하기 위해 소형화·고속화가 추진되면서 펌프의 흡입압력 저하에 의한 공기흡입 및 캐비테이션 발생 가능성의 증가로 인하여 이 방면에서의 연구도 활기를 띠기 시작했다.

그러나, 이러한 터보기계내의 이상류는 직관내 이상류와 비교하여 ①유속이 빠르고, 압력구배가 크다. ②유동이 정지계에서 회전계, 다시 정지계로 이동하는 복잡한 좌표계에 관계된다. ③코리올리력에 의해 유동과 직각방향에 커다란 힘이 작용한다. 등의 회전계 고유의 문제도 있어 직관내 이상류의 성과를 그대로 이용하여도 만족할만한 성과를 얻지 못한다. 이 때문에 많은 연구가 행해지고 있지만 아직 미확립된 이론이 많고 해결되어야 할 많은 문제점을 갖고있다.

본 해설에서는 입형 원심펌프 (vertical-shaft

centrifugal pump), 횡형 원심펌프 (horizontal-shaft centrifugal pump), 사류펌프 (mixed flow pump), 축류펌프 (axial flow pump), 볼텍스펌프 (vortex pump) 및 스크류식 원심펌프 (screw-type centrifugal pump) 등 터보펌프의 기액이상류시의 성능특성을 소개하고자 한다. 이상류에 있어서 터보펌프의 성능은 유동양식(flow pattern)에 의해 크게 지배되는 데 그 역학 관계가 매우 복잡하고 펌프의 종류에 따라 다르다. 본 해설에서는 펌프 성능과 유동패턴과의 관계는 생략하고자 한다. 여기에서 소개하는 6종류의 펌프는 크기, 임펠러 익수 및 회전수 등이 틀리므로 정량적인 비교는 불가능하므로 정성적인 특성만을 비교 검토하고자 한다.

2. 입형 원심펌프

Fig. 1은 임펠러 익수 8매, 회전수 2985rpm시의 입형 원심펌프^[1]에 있어서 단상류시의 각각의 유량계수 ϕ 로부터 공기를 주입시킨 경우의 양정계수 ψ_t , 축동력계수 μ , 효율 η 의 펌프 흡입측 보이들 (기액이상류의 단위 체적 중에서 기체가 차지하는 체적비, void fraction) β_s 에 대한 변화를 나타낸 것이다. 그림중의 일점쇄선은 양수불능 한계선이다. 전체적으로 저유량역에서 등보이드율 선이 조밀하지만 (양정저하의 비율이 적다) 최고 효율점 부근의 고유량역에서 양정저하의 비율이 크게 뒨을 알 수 있다. 또한 이상류시의 펌프 성능은 반드시 연속적으로 변화하는 것은 아니고 불연속적으로 변화하는 영역이 있음을 알 수 있다.

3. 횡형 원심펌프

Fig. 2는 임펠러 익수 5매, 회전수 1750rpm시의 횡형 원심펌프의 기액이상류 특성을 나타낸 것이다. 그림중의 Q 는 펌프 토출 수량을, q_s 는 펌프 입구측 흡입공기의 체적유량을 의미한다. 공기량이 적은 범위인 $q_s/Q=0.04$ 이하에서는 등보이드율 선이 단상류시의 곡선과 거의 평행하다. 이보다 q_s/Q 가 증가하면 성능 저하량이 크고 등보이드율선도 불연속이 나타나며, 이는 임펠러 내의 유동상태의

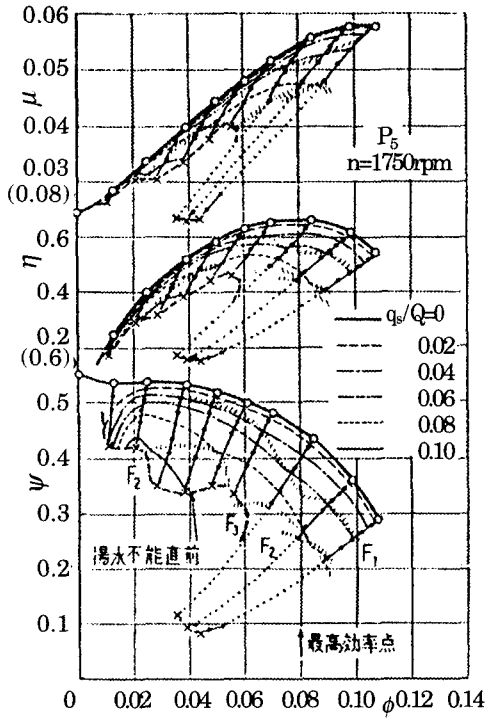


Fig.2 Horizontal-shaft centrifugal pump characteristics operating in air-water two-phase flow ($n=1750$ rpm, Number of blades : 5 blades)

변화에 기인함을 보고하고 있다. 전체적으로 입형 원심펌프의 기액이상류 특성인 Fig.1과 매우 비슷한 결과를 나타내고 있으며 최고 효율점 부근의 고유량역에서의 성능 저하량이 크을 알 수 있다.

4. 사류펌프

Fig. 3은 임펠러 익수 4매, 회전수 1000rpm시의 사류펌프의 기액이상류 특성¹³⁾을 나타낸 것이다. 그림중의 λ 는 임펠러 간극비를, α_s 는 펌프입구에서의 기액체적 유량비를 의미한다. 펌프입구에 있어서 α_s 가 증가하면, 양정, 효율, 축동력 모두 일률적으로 저하한다. 굵은 파선 C-C로 나타낸 값 이상으로 α_s 를 증가시키면 성능은 D-D선으로 나타낸 굵은 파선 이하의 상태로 급저하 하지만 그 상태에서도 펌프는 안정한 작동을 한다. 그러나, 아무리 보이드율을 조절해도 C-C선과 D-D선 사이의 사선영역에서는 작동점이 얻어지지 않는다. 원심펌

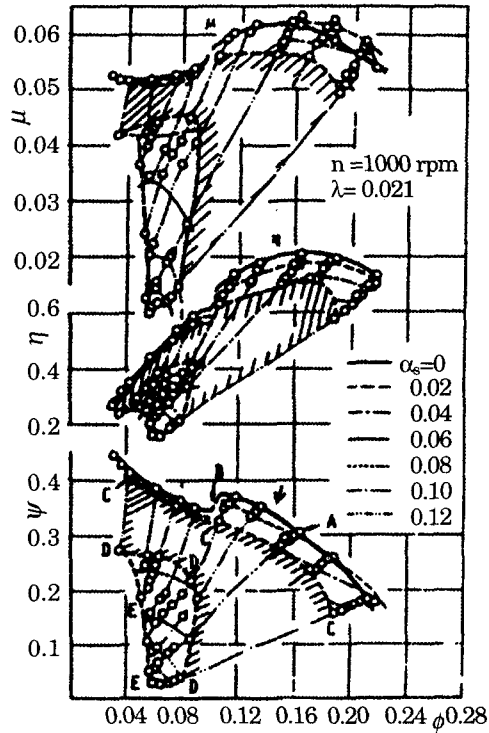


Fig. 3 Mixed flow pump characteristics operating in air-water two-phase flow ($n=1000$ rpm, Number of blades : 4 blades)

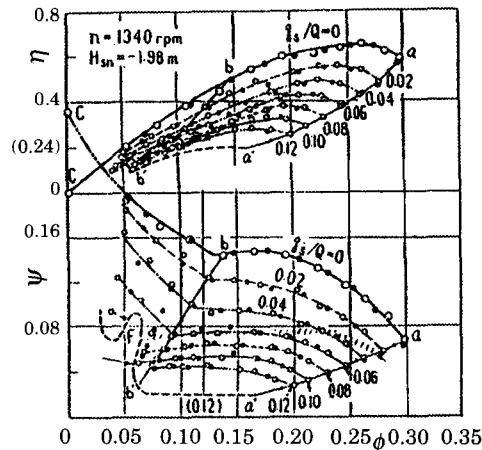


Fig. 4 Axial flow pump characteristics operating in air-water two-phase flow ($n=1340$ rpm, Number of blades : 4 blades)

프에서도 고유량역의 고보이드율 영역에서 이와 같은 성능 급저하 현상이 보였지만 소량의 공기의 혼입으로 전유량역에 있어서 성능급저하 현상이

발생하는 것은 사류펌프 특유의 현상이다. 전체적으로 최고효율점 부근의 고유량역에서 양정저하 비율이 원심펌프에서와 마찬가지로 큼을 알 수 있다.

5. 축류펌프

Fig. 4는 임펠러 익수 4매, 회전수 1340rpm시의 축류펌프의 기액이상류 특성⁽⁴⁾을 나타낸 것이다. 그림중의 H_{sn} 은 저수탱크내 압력수두를, Q 는 펌프 토출 수량을, q_s 는 펌프 입구측 흡입공기의 체적유량을 의미한다. q_s/Q 가 같은 점을 연결한 곡선은 액단상류시($q_s/Q=0$)의 성능에 거의 평행하고, 공기량이 증가함에 따라 곡선의 간격은 좁아진다(성능 저하량이 감소한다). 그림에는 다른 공기주입 방법, 즉 단면 외주상의 소공에서 공기를 주입한 경우(그림중의 ○표시)와 흡입관에 직각으로 위치한 공기관으로부터 주입한 경우(그림중의 ●표시)의 결과도 병기하고 있지만, 공기흡입방법에 따른 차이는 거의 보이지 않는다. 또한, 공기흡입에 따른 성능 저하량은 적은 공기량의 범위($q_s/Q \leq 0.03$)에서는 축류펌프가 크지만, 공기량이 더 증가하면 원심펌프와 비교해서 작아짐을 알 수 있다. 전체적으로 최고효율점 부근의 고유량역에서 양정저하 비율이 원심펌프, 사류펌프와 마찬가지로 큼을 알 수 있다.

6. 볼텍스펌프

볼텍스펌프는 固液二相流에 적합한 펌프로 주목받고 있으며, 임펠러 전면에서 커다란 自由渦 공간을 갖고있기 때문에 오수의 배수처럼 고형물을 동반한 흐름에 있어서도 임펠러 유로가 폐쇄되지 않고 운전 가능한 논클로그(non-clog) 펌프의 일종이다. Fig. 5는 임펠러 익수 8매, 회전수 1400rpm시의 볼텍스펌프의 기액이상류 특성⁽⁵⁾을 나타낸 것이다. 그림중의 β 는 펌프 입구측에 있어서의 보이드율을 의미한다. 미소량의 공기가 혼입된 $\beta \leq 0.4$ 에서는 단상류의 경우와 비슷하지만 이 이상 공기를 흡입하면 양정, 효율 모두 저하한다. 그리고 이러한 성능 저하량은 원심, 사류, 축류펌프와는 다

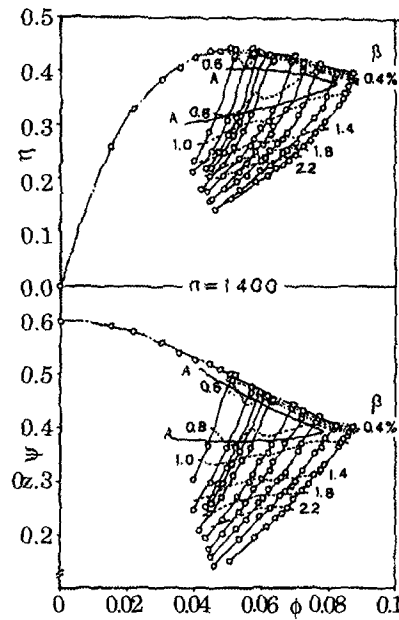


Fig. 5 Vortex pump characteristics operating in air-water two-phase flow ($n=1400$ rpm, Number of blades : 8 blades)

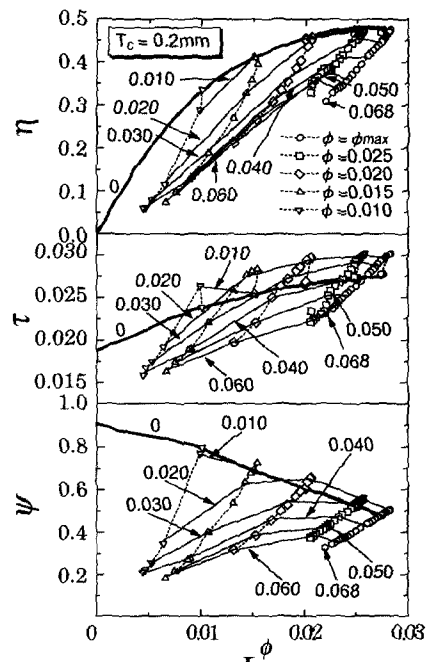


Fig. 6 Screw-type centrifugal pump characteristics operating in air-water two-phase flow ($n=3000$ rpm, Number of blades : 1 blade, bolded solid line indicates single-phase flow characteristics)

르게 고유량역일수록 적다. 그러나 최고효율점 부근의 유량역에 있어서 펌프성능은 연속적으로 변화하지 않고 그림중의 A-A 영역에 있어서 운전은 불가능하다. 게다가 전체적으로 양정저하의 비율이 크고 불과 보이드율 3% 이하에서 양수가 불가능하게 된다.

7. 스크류식 원심펌프

스크류식 원심펌프도 논클로그 펌프의 일종으로, 유럽에서 어류의 유체수송 목적으로 개발되었다. 현재는 고형물의 수송뿐만 아니라, 슬러리(slurry), 고형물이 함유된 액체, 흙탕물을 양수하는 등 산업의 여러 분야에서 사용되고 있다. 이 펌프는 흡입케이싱 (suction cover casing) 내에서의 용적작용, 볼루트 (volute) 케이싱 내에서의 원심작용에 의해 유체를 양수하는 구조로 되어 있으며 임펠러는 고형물의 수송이라는 목적에 맞게 유로가 폐쇄되지 않도록 넓은 것이 특징이다.

Fig. 6은 임펠러 익수 1매, 회전수 3000rpm시의 소형 스크류식 원심펌프의 기액이상류 특성¹⁶⁾을 나타낸 것이다. 그림중의 T_c 는 임펠러 간극비를 의미한다. 기액이상류시의 특성실험은 유량조절밸브에 의해 유량계수를 단상류시의 각각의 유량계수 $\phi = \phi_{max}, 0.025, 0.020, 0.015, 0.010$ 에 있어서 공기를 20 l/hr에서 유로폐쇄까지 20 l/hr씩 증가시키면서 측정하였다. 그림중의 굵은 실선은 단상류 특성을 의미하며, 유량계수에 관계없이 보이드율이 같은 경우를 가는 실선으로 표시하였다. 소형임에도 단상류시는 50% 가까운 효율을 보이고 있어 일반적인 원심펌프와 비슷한 성능을 보임을 알 수 있다. 축동력계수는 전 양정에 걸쳐 완만한 변화를 보이므로 과부하에 대한 염려가 없고 모터에 큰 여유를 줄 필요가 없어 경제적임을 알 수 있다. 양정곡선은 비교적 우하강곡선을 그리므로 양정 변화에 따른 유량의 변화가 적고 미세한 유량제어가 용이함을 알 수 있다. 원심, 사류, 축류 및 볼텍스펌프 모두 최고효율점 부근에서 단상류로부터 유로폐쇄까지의 성능저하가 컸으나 스크류식 원심펌프는 최고효율점 부근에서 저유량 영역보다도 오히려 양정저하량이 작게 됨을 알 수 있다. 따라서,

스크류식 원심펌프는 종래의 일반적인 펌프들보다 최고효율점 부근에서 공기량 증가에 따른 성능저하가 완화되므로 기액이상류의 양수에 적합함을 알 수 있다. 그러나, $\beta=0.07$ 근방에서 양수가 불가능하게 된다. 따라서 넓은 유로를 갖는 임펠러형상이 유로폐쇄 지연에의 효과는 크게 기대되지 않음을 알 수 있다.

8. 맺는 말

국외에서는 터보형 펌프에 있어서 기액이상유동에 관한 연구가 1970년대 주목받기 시작하여, 가압수형 원자로에 있어서 LOCA시의 안전해석과 관련하여 기액이상류시의 완전특성 등 기액혼합시의 특성예측문제가 연구되기 시작하였다. 1980년대에 와서는 소규모 유전 등의 원유 생산시스템과 관련하여 어떻게 하면 높은 기액혼합비까지 운전이 가능할까라고 하는 기액이상류시의 운전가능한계에 관한 문제가 클로즈업되었다. 현재까지 기액이상류시의 양수성능 개선 및 기액이상류시 펌프내에서 발생하는 제반 현상의 규명에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 아직도 해결해야될 많은 문제점을 갖고 있다.

국내에서도 모든 산업의 기간적 존재인 터보펌프의 이상류시의 성능예측법의 확립, 에너지 절감의 관점에서의 이상류 터빈의 개발, 해양석유, 가스 유전의 개발과 관련된 이상류 펌프의 개발 등 유체기계학의 이상류 문제에 관한 연구가 보다 활발히 진행되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] M. Kaneko and H. Ohashi, 1981, Self-Excited Oscillation of a Centrifugal Pump System under Air/Water Two-Phase Flow Condition, Proceedings of the 11th Symposium of IAHR, pp.36.1~36.14.
- [2] M. Murakami and K. Minemura, 1974, JSME (in Japanese) 40-330, pp. 459~470.
- [3] K. Minemura, M. Murakami, I. Hayafuji, and W. Yoshida, 1986, Performance of a Mixed-Flow Pump Handling Air-Water Two-Phase Mixtures, JSME (in Japanese) 52-478, pp. 2404~2411.

- [4] M. Murakami and K. Minemura, 1978, JSME (in Japanese) 44-380, pp. 1292~1300.
- [5] K. Kikuyama, M. Murakami, K. Minemura, E. Asakura, and T. Ikegami, 1986, *The Effect of Entrained Air upon a Vortex Pump Performance*, JSME (in Japanese) 52-473, pp. 393~400.
- [6] You-Taek Kim, K. Tanaka, and Y. Matsumoto, 1999, *Tip Clearance and Bubble Size of a Screw-type Centrifugal Pump Operating in Two-phase Flow*, Proceedings of The Third ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM99-7207.