

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.4.249

터보펌프 조립체의 수력 성능 시험

홍순삼[†] · 김대진* · 김진선* · 김진한*

(2007년 7월 19일 접수, 2008년 2월 13일 심사완료)

Hydrodynamic Performance Test of a Turbopump Assembly

Soon-Sam Hong, Dae-Jin Kim, Jin-Sun Kim and Jinhan Kim

Key Words: Turbopump(터보펌프), Pump(펌프), Turbine(터빈), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Hydrodynamic Performance(수력 성능)

Abstract

Hydrodynamic performance test of a turbopump for a liquid rocket engine is carried out. The turbopump is composed of an oxidizer pump, a fuel pump and a turbine, and the two pumps are driven by the turbine. In the test, water is used for the pumps as working media and air is used for the turbine. Performance parameters of pumps and a turbine are drawn, and a power balance between the pumps and the turbine are calculated. The calculation shows a good power balance, which implies that the pump component tests, the turbine component test and the assembly test are reliably performed. At the starting period of the test, pressure rise-flow rate curve of a pump gradually approaches the ideal curve which could be obtained by very slow starting.

기호설명

c_{is} : 터빈 단열 속도
 c_p : 유체의 정압 비열
 FP : 연료펌프
 k : 비열비
 \dot{m} : 터빈의 질량 유량
 OP : 산화제펌프
 p_{01} : 터빈 입구 전압력
 p_2 : 터빈 출구 압력
 P_{is} : 터빈의 등엔트로피 동력
 PR : 터빈 압력비, p_{01}/p_2
 Q : 펌프의 유량
 T_{01} : 터빈 입구의 전온도
 TB : 터빈

U : 펌프, 터빈 날개의 끝속도
 Δp_0 : 펌프의 전압력 상승
 ϕ : 유량계수
 ϕ_d : 설계 유량계수
 η : 펌프, 터빈의 효율
 ψ : 양정계수, $\Delta p_0/(\rho U^2/2)$

1. 서론

터보펌프는 액체로켓에서 추진제를 가압하여 연소실로 공급하는 역할을 한다. 현재 한국항공우주연구원(이하 항우연)에서는 액체산소(liquid oxygen, 또는 LOX)와 케로신을 추진제로 하는 30톤급 가스 발생기 사이클의 액체로켓에 적용 가능한 터보펌프개발을 추진 중이다.^(1,2) 이 터보펌프는 단단 원심형의 산화제펌프와 연료펌프, 그리고 단단 충동형 터빈으로 구성되어 있으며 한 개의 터빈이 동일 축에 있는 두 개의 펌프를 구동한다.(Fig. 1 참조) 두 펌프 사이에는 두 추진제가 만나서 반응하는 것을 방지하기 위하여 기

[†] 책임저자, 회원, 한국항공우주연구원 터보펌프팀
 E-mail : sshong@kari.re.kr
 TEL : (042)860-2739 FAX : (042)860-2679
 * 한국항공우주연구원 터보펌프팀

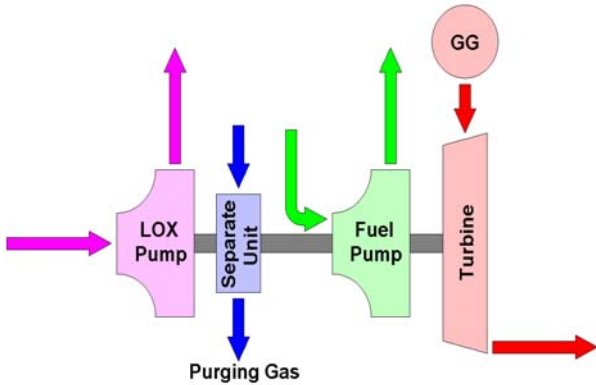


Fig. 1 Typical layout of a single-shaft turbopump assembly



Fig. 2 Picture of turbopump assembly under test

체 헬륨으로 퍼지하는 분리 기구(separate unit)가 있다. 터보펌프에서 연소실로 공급되는 추진제의 일부가 가스발생기로 공급되며 여기서 연소되어 생성된 고온/고압 가스가 터빈으로 공급되어 터보펌프가 구동된다.

Table 1에 본 연구에 적용된 터보펌프의 설계 요구조건을 제시하였으며 이는 30톤급 엔진의 시스템 해석을 통하여 도출된 값이다. 이 요구조건으로 설계되어 제작된 터보펌프가 Fig. 2에 제시

Table 1 Turbopump design requirements

Item	LOX pump	Fuel pump	Turbine
Flow rate (kg/s)	64.1	29.1	<4.4
Inlet total pressure (MPa)	<0.475	<0.28	5.78
Outlet total pressure (MPa)	9.81	13.24	0.4
Inlet total temperature (K)	95	288	900
Density (kg/m ³)	1,117	796.7	-
Power (kW)	836	751	1,620
Efficiency (%)	>64	>63	>51
Axial thrust (kN)	<2	<2	

되어 있으며 이 사진에는 산화제펌프, 연료펌프, 터빈이 위에서 아래로 배치되어 있다. 각 구성품들에 대하여 단품 성능시험이 이루어진 후 조립체 성능시험이 수행되며 이 성능시험은 모두 항우연의 터보펌프 성능시험설비에서 수행된다.^(3,4)

펌프 단품 성능시험에서는 상온의 물을 매질로 하고 전기 모터로 펌프가 구동되며 펌프의 양정-유량 특성, 효율-유량 특성, 그리고 캐비테이션 성능이 얻어진다.^(5,6) 터빈 단품 성능시험에서는 상온의 공기를 매질로 하며 터빈의 압력비에 따른 효율-속도비 곡선이 얻어진다.⁽⁷⁾

터보펌프 조립체 시험에서는 산화제펌프-연료펌프-터빈 조립체의 동력 균형이 검증되며 또한 실(seal) 및 베어링의 작동, 터보펌프의 진동 특성이 점검된다. 본 연구에서는 개발 중인 추력 30톤급 터보펌프의 조립체를 대상으로 하여 수행된 성능시험의 개요와 그 시험 결과에 대하여 고찰한다. 시험의 편의를 위하여 상온⁽⁸⁾ 공기로 터빈을 구동하여 터보펌프를 운전하였다.

2. 성능시험 설비

터보펌프 조립체 시험은 펌프와 터빈에서 실패할 대신에 각각 물과 공기를 사용하는 상사매질 시험으로 수행되었다. 조립체 성능 시험 설비의 구성도를 Fig. 3에 제시하였다. 두 펌프, 즉 산화제펌프와 연료펌프의 경우 펌프가 각각의 3m³ 용량의 물탱크로부터 물을 흡입하여 다시 물탱크로 배출하는 폐회로 형식을 취한다. 펌프 수두 측정을 위하여 펌프의 입구와 출구 배관에 압력계가 설치되며 유량 측정을 위하여 펌프 하류에 터빈 유량계가 설치된다. 펌프 출구 배관에 오리피스

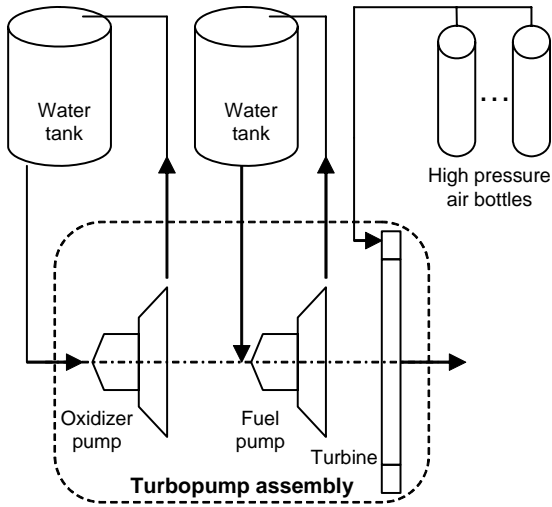


Fig. 3 Schematic of turbopump assembly test facility

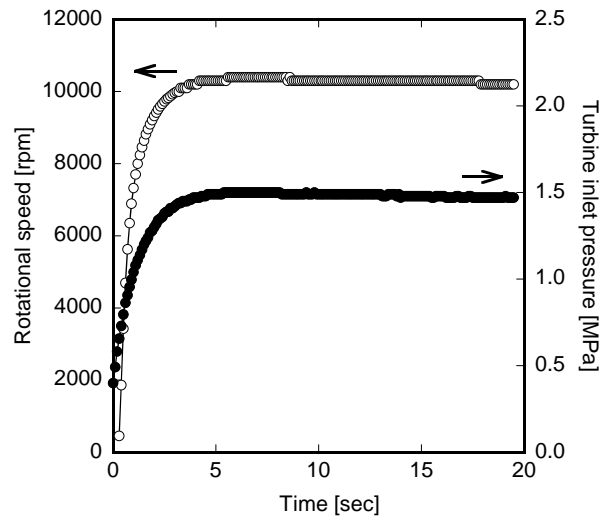


Fig. 5 Variation of rotational speed of turbopump and turbine inlet pressure with time

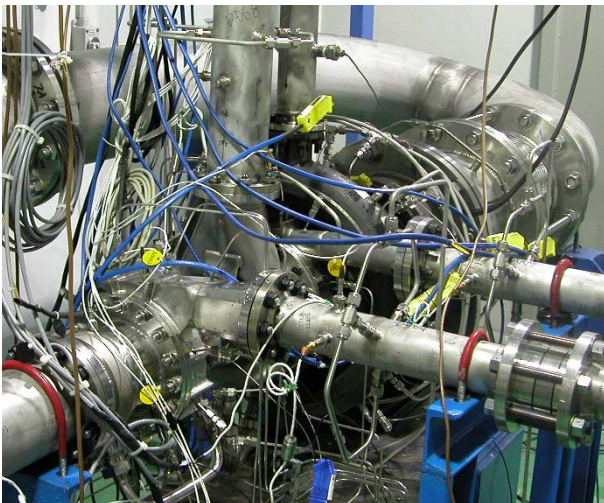


Fig. 4 Turbopump assembly test

를 설치하여 운전 중 유량계수가 고정되도록 하였다. 설계 유량계수가 되도록 몇 번의 시행착오를 거쳐 오리피스 내경이 결정된다.

터빈의 경우 작동 유체는 상온의 고압 공기, 혹은 고온의 고압 공기이며 본 시험에서는 상온의 고압 공기를 사용하였다. 320bar, 0.9m³ 용량의 공기탱크 44개에 저장된 고압공기가 압력조절기를 거쳐서 터빈에 공급된다. 터빈의 입구와 출구 배관에 온도계와 압력계가 설치되며 질량 유량은 공기 가열기 상류에 설치된 초킹 노즐에서 측정된다.

시험장면을 Fig. 4에 제시하였으며 좌측 하단에

산화제펌프 입구 배관이, 우측 상단에 터빈 출구 배관이 위치하고 있다. 이 그림에는 많은 측정부와 센서 케이블이 보이는데 펌프와 터빈의 입구와 출구 배관에서 측정하는 주요 성능 파라미터에 추가하여 펌프와 터빈 본품에서 여러 가지 측정이 이루어진다. 펌프의 경우 볼류트 압력, 2차 유로 압력, 베어링 온도, 출구 압력 섭동, 케이싱 진동 등이 측정되며 터빈의 경우에도 메니폴드와 로터 후방의 압력 및 온도, 터빈 출구 압력 섭동 등이 측정된다.

3. 성능시험 결과

시험 중 회전수 및 터빈 입구 압력의 시간에 대한 변화를 Fig. 5에 제시하였다. 설계 회전수는 20,000rpm 이지만 본 시험은 상사시험으로서 시험 회전수를 10,250rpm으로 설정하였다. 시험 시간은 약 20초이며 시험 시작 후 약 5초 동안 가속되며 그 이후는 회전수가 10,250rpm으로 일정하다. 터보펌프 구동원은 터빈에 공급되는 가스이며 따라서 터빈 입구 압력과 터보펌프 회전수의 시간에 대한 변화가 서로 유사한 형태를 가진다.

정상 상태에 이른 후 펌프의 양정과 유량을 Fig. 6에 제시하였다. 여기에는 펌프 단품시험에서 도출된 성능 곡선도 같이 제시되어 있다. 이 그림을 보면, 터보펌프 조립체 시험의 펌프의 양

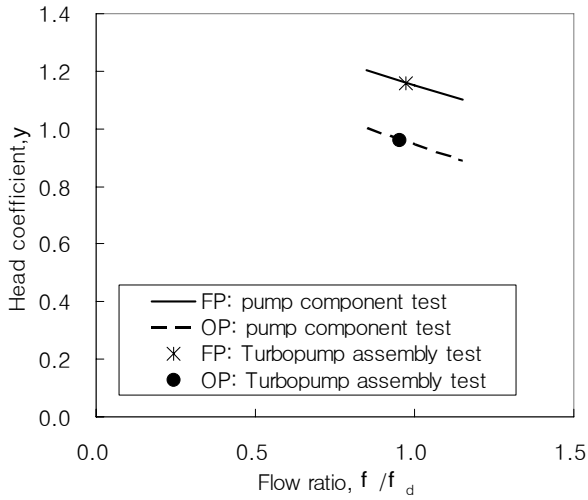


Fig. 6 Head coefficient vs. flow ratio for pumps

정-유량 작동점은 펌프 단품시험의 양정-유량 특성 곡선을 잘 따르는 것을 알 수 있다.

3.1 펌프-터빈 동력 균형

펌프와 터빈의 동력 균형을 점검하여 보았다. 터빈에서 공급하는 동력은 펌프에 소요되는 동력과 기계적 손실의 합이며, 기계적 손실은 매우 적으므로 이를 무시할 때 본 터보펌프의 경우 터빈의 동력은 두 펌프, 즉 산화제펌프와 연료펌프에 소요되는 동력과 같게 되며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{Q\Delta p_0}{\eta}\right)_{OP} + \left(\frac{Q\Delta p_0}{\eta}\right)_{FP} = (\eta P_{is})_{TB} \quad (1)$$

여기서 P_{is} 는 터빈에서 생성되는 이상적인 동력으로서 유체가 터빈 입구에서 출구까지 등엔트로피 팽창될 때 얻을 수 있는 터빈 동력으로서 다음 식으로 표현된다.

$$P_{is} = \dot{m} c_p T_{01} \left(1 - PR^{\frac{1-k}{k}}\right) \quad (2)$$

터보펌프 조립체 성능시험 결과를 이용하여 식 (1)로부터 터빈의 효율을 계산하였다. 식 (1)에서 펌프의 경우 유량과 전압력 상승량은 시험에서 측정된다. 터빈의 경우 식 (2)의 동력 P_{is} 는 측정된 터빈 입구의 온도 및 압력, 터빈 출구의 압력,

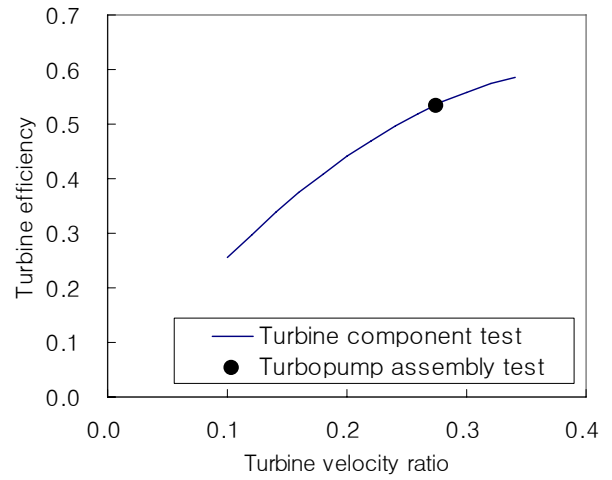


Fig. 7 Efficiency vs. velocity ratio for turbine

터빈 질량 유량으로부터 계산된다. 한편, 펌프 단품 성능시험의 결과로서 펌프의 효율은 유량의 함수로 표현된다.

$$\eta_{OP} = f(Q) \quad (3)$$

$$\eta_{FP} = f(Q) \quad (4)$$

따라서 조립체 시험 중 펌프에서 측정된 유량에 해당하는 펌프 효율을 얻을 수 있다. 펌프 효율을 식 (1)에 대입하면 터빈의 효율이 계산되며 이 값을 Fig. 7에 한 점으로 표시하였다. 그리고 터빈 단품 성능시험의 결과로서 터빈 효율은 속도비와 압력비의 함수로 표현되며 이를 또한 Fig. 7에 곡선으로 표시하였다. 이 곡선은 압력비가 일정한 조건이며 터빈 효율식에 조립체 시험 중의 터빈 압력비를 대입하여 얻은 것이다.

$$\eta_{TB} = f(U/c_{is}, PR) \quad (5)$$

여기서 터빈 속도비 (U/c_{is})는 터빈 날개끝 속도와 유체가 터빈 입구에서 출구까지 등엔트로피 팽창할 때의 유속의 비율이고, 터빈 압력비 (PR)는 터빈 출구 정압력 대비 입구 전압력이다. Fig. 7을 보면 해당 속도비에서 두 효율의 차이는 1% 이하였다. 이 결과는 펌프 단품 성능시험, 터빈 단품 성능시험, 터보펌프 조립체 성능시험이 신뢰성 있게 수행되었다는 것을 의미한다.

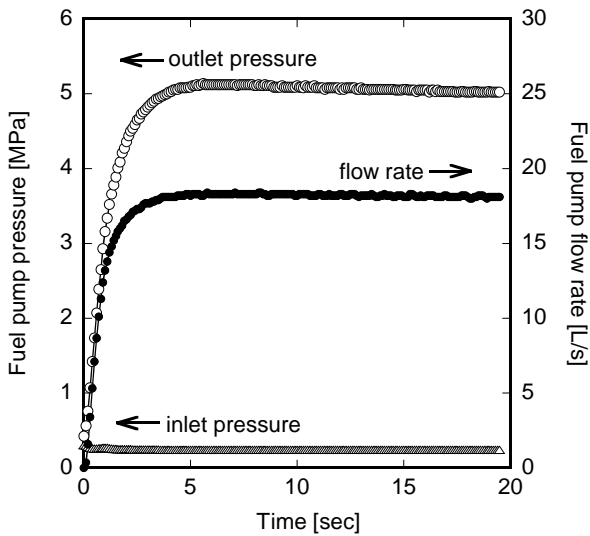


Fig. 8 Variation of pressure and flow rate of fuel pump with time

3.2 시동 중 펌프의 압력상승-유량 특성

시동 중에 펌프의 양정-유량 관계가 어떻게 변화하는지 고찰하여 보았다. 이는 차후 시동 특성을 예측하는 데 기본적인 데이터로 활용될 수 있을 것이다. 여기서는 그 예로서 연료펌프에 대한 특성을 고찰한다. 시험 중 시간에 따른 연료펌프의 입구압력, 출구압력, 유량의 변화를 Fig. 8에 제시하였다. 펌프 출구 압력, 유량은 시동 후 5초 이내에 정상상태에 이른다. 시동 후 5초까지의 연료펌프의 입구에서 출구까지의 압력 상승량과 유량의 관계를 Fig. 9에 제시하였다. 이 그림에서 은선은 5초 이후 정상상태의 압력상승량과 유량을 바탕으로 하여 계산된 임의 회전수에서의 압력상승량과 유량의 관계이다. 이는 모든 회전수에서 정상상태에 이른 경우이며 이것은 충분히 천천히 회전수를 상승시킬 때 얻을 수 있는 이상적인 경우이다. 실제 시험 결과는 이상적인 경로를 따르지 못하고 있다. 물론 시동 중에 천천히 가속시킬수록 이상적인 경로를 더 잘 따를 것이다. 임의 유량에서 압력상승량의 시험값은 이상적인 압력상승량보다 더 큰 값을 보이며 시동 후 정상상태에 가까워지면서 압력상승-유량의 관계는 이상적인 선에 매우 가까워진다. 산화제펌프에 대하여도 Fig. 9 형식의 그림을 그려보았는데 그 특성이 연료펌프의 경우와 유사하였다. 원심 펌프 시동과정의 천이 특성을 연구한 Tsukamoto 등⁽⁹⁾도 위와 유사한 결과를 얻었고 관성에 의한

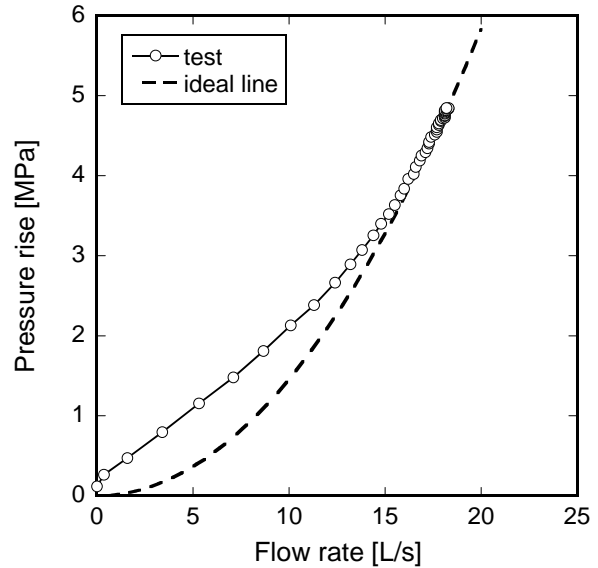


Fig. 9 Pressure rise vs. flow rate during starting period for fuel pump

압력 상승을 제외한 펌프의 압력상승에 대하여 비정상 해석을 통해서 그 이유를 설명하였다.

4. 결론

개발 중인 터보펌프 조립체에 대한 수력 성능 시험이 수행되었으며 그 주요 시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 조립체 시험에서 펌프의 양정-유량 작동점은 펌프 단품성능시험으로부터 얻은 양정-유량 곡선상에 존재하는 것을 확인하였다.

둘째, 조립체 시험에서 펌프의 소요 동력과 터빈의 공급 동력의 차이는 1% 이하로서, 펌프-터빈의 동력 균형이 잘 이루어지는 것을 알 수 있었다. 그리고 이는 펌프 단품 성능시험, 터빈 단품 성능시험, 그리고 조립체 성능시험이 신뢰성 있게 수행되었음을 의미한다.

셋째, 연료펌프의 경우 시동 중 펌프의 압력상승-유량 곡선은 회전수가 증가하면서 이상적인 특성 곡선과 가까워지며 정상상태에 이르면 두 곡선은 일치하였다.

참고문헌

(1) Kim, J., Hong, S. S., Jeong, E. H., Choi, C. H. and Jeon, S. M., 2005, "Development Status of a

- Turbopump for 30-ton Thrust Level of Engine," *Proceedings of Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, Daejeon, Korea, pp. 375~383.
- (2) Kim, J., Lee, E. S., Choi, C. H. and Jeon, S. M., 2004, "Current Status of Turbopump Development in Korea Aerospace Research Institute," *Proceedings of 55th International Astronautical Congress*, IAC-04-S. P. 17, Vancouver, Canada.
- (3) Hong, S. S., Lim, H., Kim, D. J., Cha, B. J., Kang, J. S., Lim, B. J. and Kim, J., 2004, "Turbopump Performance Test Facility," *Proceedings of the Third National Congress on Fluids Engineering*, Jeju, Korea.
- (4) Lee, K. H., Kim, K. H. and Woo, Y. C., 2004, "Development of a High-Pressure Turbopump for a Liquid Propellant Rocket Engine," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 7, No. 3, pp. 51~56.
- (5) Kim, D. J., Hong, S. S., Choi, C. H. and Kim, J., 2005, "Performance Tests of a Fuel Pump for a Turbopump Unit," *Proceedings of the Sixth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, EA05, Jeju, Korea.
- (6) Hong, S. S., Kim, D. J., Kim, J. S., Choi, C. H. and Kim, J., 2005, "Effect of Inducer on Hydraulic Performance of a Turbopump," *Proceedings of 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, AIAA 2005-3947, Tucson, Arizona.
- (7) Jeong, E. H. and Kim J., 2005, "Experiments on Supersonic Impulse Turbine," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 8, No. 6, pp. 26~32.
- (8) Kinefuchi, K., Uchiumi, M., Inoue, M. and Hirata, K., 2005, "LE-7A FTP Full Load Cold Run," *Proceedings of Asian Joint Conference on Propulsion and Power*, AJCPP2005-22033, Kitakyushu, Japan.
- (9) Tsukamoto, H and Ohashi, H., 1982, "Transient Characteristics of a Centrifugal Pump During Starting Period," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 104, pp. 6~14.