

연료 이송용 제트펌프 기본 설계 및 유동장 해석

공창덕* · 박종하** · 김영광** · 한동주***

Preliminary Design on Jet Pump for Fuel Transfer and Analysis of Flow Distribution

Chang Duk Kong* · Jong Ha Park** · Young Kwang Kim** · Dong Joo Han***

ABSTRACT

In the present study, preliminary design and analysis of flow distribution for a jet pump, which is able to transfer fuel from the tank to the engine, were performed as an aerospace component technology development project. The jet pump is a core part, which is normally installed in the fuel tank, to supply the fuel from the tank to the engine feed pump, or to transfer the feed between tanks. In order to design preliminarily installed in the jet pump, equations for design were modelled using SIMULINK, and the design was carried out based on the simulation model.

초 록

본 논문에서는 항공 우주 부품 기술 개발 사업 중 연료 이송용 제트펌프 개발의 일환으로 제트펌프의 기본 설계 및 유동장 해석을 수행하였다. 제트펌프는 항공기 연료 탱크 내에 위치하여 격막 간 또는 라인 간 연료 이송을 위하여 설치되는 연료 이송 기능을 위해 소요되는 항공기 핵심 부품이다. 제트펌프의 기본 설계를 위해 SIMULINK를 이용하여 계산식들을 모델링 하였고 이와 설계절차를 바탕으로 제트펌프의 기본 설계를 수행하였다. 또한 기본 설계를 바탕으로 설계 조건에 따라 ALGOR를 이용하여 유동장 해석을 수행하였다. 설계 결과와 유동장 해석 결과는 유사한 경향을 보였다.

Key Words: Jet Pump(제트펌프), Preliminary design(기본 설계), Fuel transfer(연료 이송), SIMULINK, Flow Distribution(유동장)

1. 서 론

항공기 연료 계통은 항공기 성능 및 운용에

절대적으로 소용되는 핵심 계통으로서 엔진과 함께 항공기의 비행 성능을 좌우하는 핵심 계통으로 평가되고 있다. 현재 항공기 연료 계통은 엔진과 연료 탱크 사이의 공급 계통과 연료 탱크 내의 격막간의 연료 분배 및 이송을 위한 탱크 내 이송 계통으로 크게 구분된다. 이 중 제트 펌프는 항공기 연료 탱크 내에 위치하여 격막

* 조선대학교 항공조선공학부

** 조선대학교 항공우주공학과

*** (주)썬에어로시스 기술연구소

연락처자, E-mail: cdgong@chosun.ac.kr

간 또는 라인 간 연료 이송을 위하여 설치되는 핵심 부품이다.

이전 연구에선 제트펌프의 기본 설계 절차를 정립하고 성능 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 설계 절차를 바탕으로 하여 추후 시험 장치 구성을 위해 실험 조건에 따른 설계를 수행하였고 ALGOR를 이용하여 제트펌프 내부의 유동장 해석을 수행하였다.

2. 제트펌프 모델링

2.1 제트펌프의 개념

제트펌프는 Primary Nozzle(1차 노즐), Secondary inlet(2차 입구), Mixing Chamber(혼합실) 그리고 Diffuser(디퓨저)로 구성되어 있다.

제트펌프에서 1차 유체는 부스터 펌프에 의해 고압으로 유지되면서 1차 노즐로 빠져나간다. 1차 유체는 연료 탱크로부터 2차 유체를 끌어오게 되고 1차와 2차 유체는 혼합실에서 혼합되고 디퓨저를 통해 빠져나간다.[1]

제트펌프는 모멘텀 변환 장치인데 제트펌프의 기본적인 작동 원리는 1차 유체와 2차 유체간의 에너지와 모멘텀 전달이다. 이러한 에너지와 모멘텀의 전달은 1차와 2차 유체의 혼합 지역인 혼합실에서 일어난다. 두 유체의 혼합은 터블런스 과정이므로 정확한 해석이 어렵고 혼합실의 길이와 출구에서 유체가 완전히 혼합되어 나오는가는 매우 중요하다.[1] Fig 1은 제트펌프의 구성도이다.

2.2 제트펌프 설계 시 고려 사항

제트펌프는 내부의 마찰 손실을 줄이기 위해 매끄러워야하고 펌프의 교체가 용이해야 되며

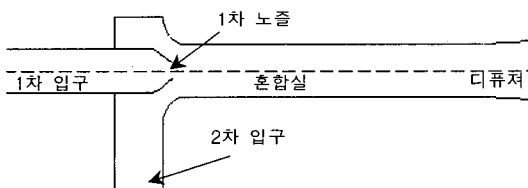


Fig. 1 Construction of Jet-pump

제트펌프는 많은 변수들로 인해 제트펌프의 최적의 값을 찾기는 어렵고 이로 인해 각 부품간의 공간 구속 사이즈의 한계를 가져온다. 1차 노즐은 일반적으로 완만하고 오목한 외부 형상을 가져야만 2차 유동의 저항을 최소화한다. 만약 외부 형상에 날카로운 면이 존재하면 2차 유동의 손실이 증가하게 된다. 얇은 노즐 팁을 가지고 있어야 반류를 최소화 할 수 있다.[2]

2차 유동 입구 영역에서 가장 중요한 것은 제트펌프의 공동화 특성을 최적화 하는 것이다. 1차 노즐 외부와 2차 입구 사이의 유동의 충돌은 마찰에 의한 에너지의 손실과 2차 유동의 유입을 방해할 것이고 입구 부분이 날카로우면 공동화 특성을 일으킨다.[2]

1차 노즐 출구와 혼합실 입구 사이의 최적화된 공간은 '0'일 때 이상적이면서 공동화 현상이 없고 최대의 효율을 갖지만 액체 제트펌프의 경우 혼합실 공간이 '0'이 되면 혼합실 입구에 압력이 떨어지는 원인이 되고 공동화 현상을 일으키게 된다. 작동 효율과 공동화 현상을 고려하여 1차 노즐 팁으로부터 혼합실 입구까지의 거리를 $s/d=1.0$ 로 하였다.[2]

혼합실은 유동이 디퓨저에 들어가기 전에 에너지 분할을 위해 필요하고 길이가 짧으면 에너지 분할은 손실과 유동의 분리를 유발하고 디퓨저까지 지속된다. 또한 혼합실의 구간이 길면 마찰 손실을 가져온다. 최적의 혼합실의 길이는 디퓨저의 외형과 관계있는데 디퓨저가 큰 각을 가지고 있다면 유동의 분리를 예방하기 위해서 혼합실는 더욱 길어진다. 높은 속도와 터블런스가 발생하기 때문에 최적의 조건을 찾아야한다.[2]

디퓨저에서는 입구 속도와 각도에 따라서 경계에서 흐름 분리가 일어난다. 디퓨저 입구에서 과도한 혼합이 일어나게 되면 유동의 분리를 야기 시킨다. 만약 7배율의 혼합실 길이가 조합된다면 최적의 효율을 위한 각도는 $6\sim 8^\circ$ 이다. 디퓨저 입/출구 면적의 비는 5배를 초과하게 되면 손실이 일어난다.[2]

2.3 제트펌프의 설계 절차

제트펌프는 엔진이 요구하는 최대 연료 유량

조건을 만족하도록 설계해야 한다. 설계 요구가 없었기 때문에 참고 문헌 등을 이용하여 최대 유량 조건을 결정하였다. 최대 연료 유량 조건은 0.998 Kg/s이다.

면적비(R)(노즐 출구와 혼합실의 면적)를 가정한다. 일반적으로 0.02~0.9 사이가 고려되는데 면적비가 작으면($R=0.1$)이면 저압력 고유량 특성을 갖게 되고 면적비가 크면($R=0.6$)이면 고압력 저유량 특성을 갖게 된다. A_n 은 노즐 출구 면적이고 A_t 는 혼합실 면적이다.[1]

$$R = \frac{A_n}{A_t} = \left(\frac{1}{1+M} \right)^2 \quad (1)$$

손실계수를 가정해야 하는데 이는 레이놀즈수에 따라 결정 되어진다. 1차 노즐 손실계수 (K_p)=0.03, 2차 입구의 손실계수 (K_s)=0.1, 혼합실의 손실계수 (K_m)=0.1 그리고 디퓨저의 손실계수 (K_d)=0.1이다.[2]

유량비(M)는 1차 노즐을 통과하는 유량과 2차 입구를 통과하는 유량비이다. Q_s 는 2차 입구 유량이고 Q_p 는 1차 입구 유량이다.[2]

$$M = \frac{Q_s}{Q_p} = \frac{m_s}{m_p} \quad (2)$$

제트펌프의 성능 특성은 압력비(N)로 표현된다. 면적비(R), 유량비(M), 밀도비(C) 그리고 손실계수(K_s, K_p, K_m, K_d)등으로 계산되어진다.[2]

$$N = \left(2R + \frac{2CM^2R^2}{1-R} - R^2(1+CM)(1+M) \right) \frac{(1+K_m+K_d) - \frac{CM^2R^2}{(1-R)^2}(1+K_s)}{(1+K_p)} \quad (3)$$

$$- 2R - \frac{2CM^2R^2}{1-R} + R^2(1+CM)(1+M) \quad (1+K_m+K_d)$$

유량비(M)와 압력비(N)를 이용하여 제트펌프의 효율(η)을 계산하게 된다.[2]

$$\eta = \frac{Q_s(P_d - P_s)}{Q(P_p - P_d)} = M \times N \quad (4)$$

노즐의 출구 면적(A_n) 계산은 식(5)와 같다.[2]

$$A_n = Q_p \left[\frac{(1+K_p) - C(1+K_s) \left(\frac{MR}{1-R} \right)^2}{(P_p - P_s) / \left(\frac{1}{2} \rho_p \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$L_t = 10.75 (d_t - d_n) \quad (6)$$

$$L_d = 8.35 (d_5 - d_t) \quad (7)$$

제트펌프 설계 및 실험 장치 구성을 위해 1차 입구 영역, 2차 입구 영역 그리고 디퓨저 출구의 면적을 가정한다. 연속 방정식과 모멘텀 방정식 등을 이용하여 각 부분의 압력, 속도 그리고 유량 등을 계산한다. 식(6),(7)을 이용하여 혼합실과 디퓨저의 길이를 계산한다. 혼합실 길이(L_t), 디퓨저 길이(L_d), 디퓨저 직경(d_t) 그리고 디퓨저 출구 직경(d_5)이다.[1,3]

3. 제트펌프 모델링

제트펌프 설계 절차에 의해서 SIMULINK를 이용하여 모델링을 수행하였다. 가정된 값을 입력값으로 하여 압력비, 효율, 1차 노즐 출구의 면적, 혼합실의 면적과 길이 그리고 디퓨저의 길이 등을 계산하였다. 또한 각 섹션에서의 유동의 속도를 계산하였다. 실험 장치의 펌프의 용량, 파이프 사이즈 그리고 게이지 사이즈 등의 제한으로 인해 1차 입구(3/4")와 디퓨저 출구(1")의 직경을 선정하였다.

Fig 2는 제트펌프 전체 모델링을 SIMULINK를 이용하여 구성하였다. Fig 3은 압력비를 계산하는 서브시스템이다. SIMULINK를 사용함으로써 설계 요구 조건이 변하게 되면 그에 따른 모델링을 용이하게 할 수 있다. Table 1은 제트펌프 모델링 결과이다. Fig 4는 제트펌프 모델링 결과를 이용한 실험장치 구성도이다.

JETPUMP MODELING

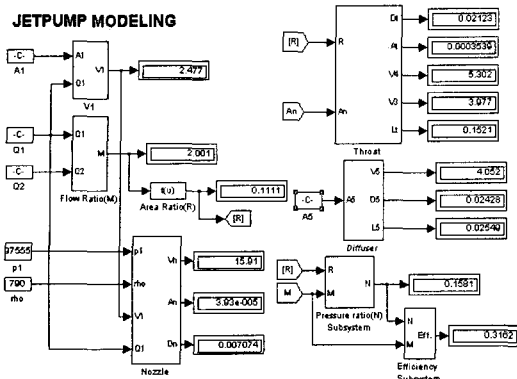


Fig. 2 Jet-pump Modeling

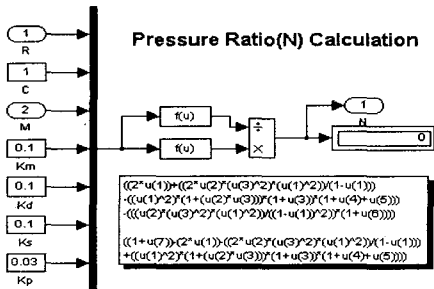


Fig. 3 Pressure Ratio Subsystem

Table 1 Result of Jet-pump Modeling

	Result
Area ratio (R)	0.1111
Flow ratio (M)	2.001
Pressure ratio (N)	0.1581
Efficiency	0.3162
Primary flow $Q_p (m^3/s)$	0.0006253
Secondary flow $Q_s (m^3/s)$	0.001251
Diffuser flow $Q_d (m^3/s)$	0.001876
Primary pressure $P_p (KPa)$	198.88
Secondary pressure $P_s (KPa)$	101.4
Diffuser pressure $P_d (KPa)$	114.6
Primary nozzle area $A_n (m^2)$	3.93E-5
Primary nozzle dia $D_n (m)$	0.007074
Mixing Chamber area $A_m (m^2)$	0.0003539
Mixing Chamber dia $D_m (m)$	0.02123
Mixing Chamber length $L_m (m)$	0.1521
Diffuser area $A_d (m^2)$	0.000463
Diffuser dia $D_d (m)$	0.02428
Diffuser length $L_d (m)$	0.02529

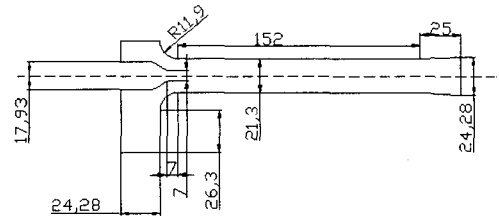


Fig. 4 Construction of Jet-pump Test Rig

4. 제트펌프 유동장 해석

제트펌프의 설계 절차를 통해 모델링을 수행한 후 제트펌프의 유동장 해석을 수행하였다. 유동장 해석을 수행함으로써 제트펌프의 유동의 흐름을 파악할 수 있다. 모델 구성은 모델링 결과를 바탕으로 구성하였고 유체의 특성은 밀도 $790Kg/s$, 동점성 $0.002765N \cdot s/m^2$ 이다. 해석 결과 1차 노즐 팁에서 유체의 속도가 $16.69m/s$ 이고, 1차 노즐의 평균 속도는 $14m/s$ 정도이다. 유체가 1차 노즐을 빠져나오면서 연료 탱크로부터 유체를 끌어오는 현상을 볼 수 있었고 혼합실에서 유체가 혼합되고 디퓨저로 빠져나가는 현상을 볼 수 있었다. Fig 5는 제트펌프 유동장을 보여주고 있다. Table 2는 모델링 결과와 유동장 해석 결과 비교이다.

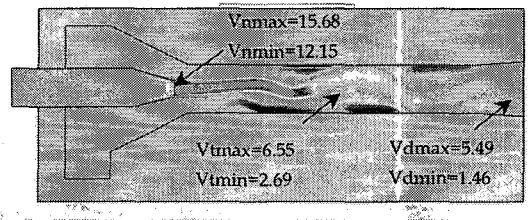


Fig. 5 Result of flow distribution of jet-pump

Table 2 Result of compare modeling with flow distribution analysis

Analysis	Condition		Modeling	Flow Distribution
A_1	0.0002525	V_1	2.4765	2.4765
A_n	0.0000393	V_n	15.909	14
A_t	0.003537	V_t	5.3031	5.23
A_d	0.000463	V_d	4.0517	4.1

5. 결 론

항공기 연료 탱크 내에 위치한 제트펌프는 격막 간 또는 라인 간 연료 이송을 위하여 설치되는 연료 이송 기능을 위해서 소요되는 핵심 부품이다. 설계 절차를 바탕으로 하여 시험 장치 구성을 위해 실험 조건에 따른 설계를 수행하였고 ALGOR를 이용하여 제트펌프 내부의 유동장 해석을 수행하였다.

제트펌프의 기본 개념, 설계 절차, 제트펌프 설계 시 고려 사항 그리고 실험 장치 구성에 따른 제약 등을 고려하여 제트펌프 모델링 및 실험 장치 설계를 수행하였다. SIMULINK를 이용하여 제트펌프를 모델링 함으로써 실험조건 및 장치 구속조건의 제한이 주어질 경우 이에 설계 변경이 용이하다

제트펌프 모델링 및 설계를 바탕으로 모델링 해석 결과와 유동장 해석 결과를 비교하였다. 비교 결과 1차 노즐 팁에서 최고 속도를 보였고 모델링 결과보다 속도가 저하되는 경향을 보였다. 이는 작동 유체의 점성과 내부 표면의 마찰 손실에 의한 것으로 판단된다. 또한 실험시에 작동 유체의 특성을 고려하여 해야 될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 “항공우주 부품기술 개발사업”의 연구 결과 중 일부입니다.

참 고 문 헌

1. Demil Y. Djafri, " T-91 Advanced Trainer Non-pressurised Fuel System", Msc Thesis, Cranfield Univ. U.K., 1992
2. ESDU 85032, "Ejectors and jet Pumps- Design and Performance for Incompressible Liquid flow", 1985
3. C.T., Lee, "Basic Military Trainer Fuel System", Msc Thesis, Cranfield Univ. U.K., 1985
4. 공창덕 외 2인, “스마트 무인기 연료 시스템 설계에 관한 연구”, 한국추진공학회지 제9권, 제2호, 2005, pp54~61
5. Demil Y. Djafri, " T-91 Advanced Trainer Non-pressurised Fuel System", Msc Thesis, Cranfield Univ. U.K., 1992
6. Math Works, 1997, "SIMULINK: Dynamic System Simulation for MATLAB, Ver.2", The Math Works, Inc., USA
7. Samwon Millennia, 2005, "ALGOR User's Guide for Release 2005", Samwon Millennia, Korea