

SIMULINK를 이용한 연료 이송용 제트펌프 기본 설계에 관한 연구

공창덕* · 박종하** · 한동주***

Study on Preliminary Design of Fuel Transfer Jet Pump Using SIMULINK

Chang Duk Kong* · Jong Ha Park** · Dong Joo Han****

ABSTRACT

In the present study, preliminary design and analysis 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 항공우주 부품 기술 개발 사업 중 연료 이송용 제트펌프 개발의 일환으로 제트펌프의 기본 설계 및 해석을 수행하였다. 제트펌프는 항공기 연료탱크 내에 위치하여 격막 간 또는 라인 간 연료 이송을 위하여 설치되는 연료 계통 이송 기능을 위해서 소요되는 핵심 부품이다. 제트펌프의 기본 설계를 위해 SIMULINK를 이용하여 계산식들을 모델링하였고 이를 바탕으로 제트펌프의 기본 설계 및 유동장 해석을 수행하였고 해석 결과 1차 노즐 출구에서 유체의 압력은 감소하면서 속도는 증가하고 유체가 디퓨저로 빠져나가면서 유체의 압력은 증가하고 속도는 감소하는 경향을 확인하였다.

Key Words: Jet Pump(제트펌프), Preliminary design(예비 설계), Fuel transfer(연료 이송), SIMULINK

1. 서 론

항공기 연료계통은 항공기 성능 및 운용에 필

수적으로 소용되는 핵심계통으로서 엔진과 함께 항공기의 비행 성능을 좌우하는 주요계통으로 평가되고 있다. 현재 항공기 연료계통은 엔진과 연료탱크 사이의 공급계통과 연료탱크 내의 격막간의 연료분배 및 이송을 위한 탱크 내 이송계통으로 크게 구분된다. 이 중 제트펌프는 항공기 연료탱크 내에 위치하여 격막 간 또는 라인

† 2005년 12월 19일 접수 ~ 2006년 2월 24일 심사완료

* 중신회원, 조선대학교 항공조선공학부

** 정회원, 조선대학교 항공우주공학과

*** 정회원, (주)썬에어로시스 기술연구소
연락처, E-mail: cdgong@chosun.ac.kr

간 연료 이송을 위하여 설치되는 연료계통 이송 기능을 위해서 소요되는 핵심 부품이다.

본 연구에서는 제트펌프의 기본적인 설계절차를 정립하고 SIMULINK를 이용하여 제트펌프의 모델링 한 후 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. 제트펌프는 작동하는 동안 고압을 요구한다. 1차 유체는 부스터 펌프에 의해 고압으로 유지되면서 제트펌프의 노즐로 들어가고 고속으로 빠져 나간다. 1차 유체는 연료 탱크로부터 2차 유체를 끌어온다. 1차와 2차 유체는 혼합실에서 혼합되고 디퓨저를 통해 빠져나간다. 디퓨저는 속도에너지를 정압으로 변환시킨다.

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

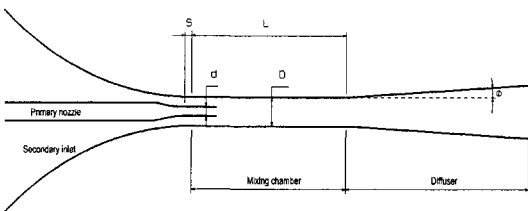


Fig. 1 Layout of Jetpump

2.2 제트펌프의 모델링 절차

제트펌프는 엔진이 요구하는 최대 연료 유량

조건을 만족하도록 설계해야한다. 설계 요구가 없었기 때문에 참고 문헌 등을 이용하여 최대 유량 조건을 결정하였다. 최대 연료유량 조건은 $0.998Kg/s$ 이다[1].

면적비(R)(노즐 출구와 혼합실의 면적)를 가정해야 한다. 일반적으로 0.02~0.9 사이가 고려되는데 면적비가 작으면($R \approx 0.1$)이면 저압력 고유량 특성을 갖게 되고 면적비가 크면($R \approx 0.6$)이면 고압력 저유량 특성을 갖는다. 본 논문에서는 면적비를 0.1로 가정하였다.

손실계수를 가정해야 한다. 손실계수는 레이놀즈수에 따라 결정 되어진다. 1차 노즐 손실계수 (K_n)=0.03, 2차 입구의 손실계수 (K_s)=0.1, 혼합실의 손실계수 (K_m)=0.1 그리고 디퓨저의 손실계수 (K_d)=0.1이다.

유량비(M)는 1차 노즐을 통과하는 유량과 2차 입구를 통과하는 유량비(M)이다. 식은 다음과 같다[2].

$$M = \frac{Q_s}{Q_p} = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p}$$

제트펌프의 특성은 압력비로 표현되어지는데 압력비(N) 계산은 면적비, 유량비, 밀도비(C) 그리고 손실계수들의 함수로 정의된다[2].

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

유량비와 압력비를 이용하여 제트펌프의 효율(η)을 계산하게 된다[2].

$$\eta = \frac{Q_s(P_d - P_s)}{Q_p(P_p - P_d)} = M \cdot N$$

노즐의 출구면적(A_n)계산은 유량비, 면적비, 압력, 밀도와 손실계수 등으로 계산되어진다. 다음 식과 같다[2].

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

노즐의 출구면적 계산식과 면적비로부터 혼합

실의 면적을 계산하게 되고 혼합실 직경의 7배인 혼합실의 길이를 계산한다. 혼합실 길이와 직경의 비율이 7인 경우에 디퓨저의 확산각은 최대효율을 갖기 위해 6~8도여야 하고 디퓨저 입구면적에 대한 출구면적의 비가 5를 초과할 수 없다[2].

2.3 제트펌프 설계 고려 사항

제트펌프는 거의 모든 구조적인 재료를 이용하여 만들 수 있는데 마모에 대한 저항, 강도, 부식 그리고 비용 등에 따라 선택되어 진다. 제트펌프에서 가장 중요한 점은 내부 표면의 마찰 손실을 줄이기 위해 매끄러워야하고 펌프의 교체가 용이해야 된다. 제트펌프는 많은 변수들로 인해 제트펌프의 최적의 값을 묘사하기는 어렵고 이로 인해 각 부품간의 공간 구속 사이즈의 한계를 가져온다.

2.3.1 1차 노즐 영역

1차 노즐은 내부와 외부의 윤각의 특성을 고려해야 한다. 노즐은 일반적으로 원뿔꼴의 윤각 보단 완만하고 오목한 외부 윤각을 가지고 있고, 이는 2차 유동의 저항을 최소화한다. 만약 외부 형상에 날카로운 면이 존재하면 2차 유동의 터블런스와 손실이 증가하게 된다. 1차 노즐은 가능한 얇은 팁을 가지고 있어야 반류를 최소화한다. 반류는 혼합영역에서 터블런스를 증가시키고 공동화 현상을 쉽게 일으킨다.

2.3.2 2차 유동 입구와 혼합실 입구 영역

2차 유동 입구영역에서 가장 중요한 것은 제트펌프의 공동화 특성을 최적화 하는 것이다. 1차 노즐 외부와 2차 입구 사이의 유체의 충돌은 마찰에 의한 에너지의 손실과 2차 유동의 유입을 방해할 것이고 입구 부분이 날카로우면 공동화 특성을 일으킨다. 이러한 손실을 줄이기 위해서 원뿔꼴 형태로 만들었다.

2.3.3 1차 노즐 출구에서 혼합실 입구 사이 공간 영역

1차 Nozzle 출구와 혼합실 입구 사이의 최적

화된 공간은 '0'일 때 이상적이면서 공동화 현상이 없고 최대의 효율을 갖는다. 그러나 액체 제트펌프의 경우 혼합실 공간이 '0'이 되면 혼합실 입구에 압력이 떨어지는 원인이 된다. 작동 효율과 공동화 현상을 고려하여 1차 노즐 팁으로부터 혼합실 입구까지의 거리를 $s/d=1.0$ 로 하였다. 면적비가 크면 긴 혼합 길이를 요구하므로 적절한 공간이 필요하다.

2.3.4 혼합실

혼합실은 유체가 디퓨저에 들어가기 전에 에너지 분할을 위해 필요하다. 혼합실은 원형 실린더로 가정했고 길이가 짧으면 에너지 분할은 손실과 유체의 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 혼합실은 더욱 길어진다. 높은 속도와 터블런스가 발생하기 때문에 최적의 조건을 찾아야한다.

2.3.5 디퓨저

디퓨저에서는 입구 속도와 각도에 따라서 경계에서 흐름 분리가 일어난다. 디퓨저 입구에서 과도한 믹싱이 일어나게 되면 유동의 분리를 야기 시킨다. 만약 7배율의 혼합실 길이가 조합된다면 최적의 효율을 위한 각도는 6~8° 이다. 디퓨저 각이 커야된다면 혼합실의 길이는 일정한 속도 조건을 얻기 위해 더 길어져야한다. 혼합실이 과도하게 길면 디퓨저에서 유동 흐름의 분리를 가져올 수 있다. 디퓨저 입구 면적과 출구면적의 비는 5배를 초과하게 되면 손실이 일어난다. 트럼펫 모양의 디퓨저는 같은 길이와 출구면적비의 원뿔 모양의 디퓨저보다 두드러지게 더 높은 효율을 제공한다.

3. 제트펌프 모델링

제트펌프 설계 절차에 의해서 SIMULINK를

이용하여 모델링을 수행하였다. 가정된 값을 입력값으로 하여 압력비, 효율, 1차 노즐출구의 면적, 혼합실의 면적과 길이 그리고 디퓨저의 면적과 길이 등을 계산하였다.

Figure 2, 3은 SIMULINK를 이용하여 압력비와 1차 노즐 출구의 면적을 계산하는 서브시스템들이다. 제트펌프의 모델링과 설계절차를 이용하여 제트펌프의 기본 설계를 수행하였다. Fig. 4는 CATIA를 이용하여 제트펌프의 기본 설계 모형을 구성하였다.

SIMULINK를 사용함으로써 설계 요구 조건이 변하게 되면 그에 따른 모델링을 용이하게 할 수 있다. 유량비가 '2'인 조건과 '3'인 조건에서 제트펌프의 효율, 압력비, 1차 노즐의 면적, 혼합실의 면적과 길이 그리고 디퓨저의 출구면적과 길이 등의 값들을 알 수 있다. Table 1은 제트펌프 모델링 결과 값들이다.

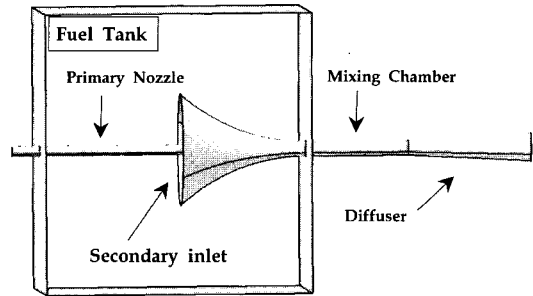


Fig. 4 Preliminary Design of Jetpump using CATIA

Table 1. Results of Jet Pump Modeling

	Result	
	0.1	0.1
Area ratio (R)	0.1	0.1
Flow ratio (M)	2	3
Pressure ratio (N)	0.149	0.1044
Efficiency	0.2982	0.3131
Primary flow $Q_p(m^3/s)$	6.25E-4	6.25E-4
Secondary flow $Q_s(m^3/s)$	1.25E-3	1.875E-3
Diffuser flow $Q_d(m^3/s)$	1.88E-3	2.5E-3
Primary pressure $P_p(KPa)$	197.555	197.555
Secondary pressure $P_s(KPa)$	101.325	101.325
Diffuser pressure $P_d(KPa)$	113.8	110.4
Primary nozzle area $A_n(m^2)$	3.955E-5	3.815E-5
Primary nozzle dia $D_n(m)$	7.096E-3	6.97E-3
Mixing chamber area $A_m(m^2)$	3.955E-4	3.815E-4
Mixing chamber dia $D_m(m)$	2.244E-2	2.204E-2
Mixing chamber length $L_m(m)$	0.153	0.1543
Diffuser outlet/inlet ratio	3.5	3.5
Diffuser exit area $A_d(m^2)$	1.384E-3	1.335E-3
Diffuser exit dia $D_d(m)$	4.19E-2	4.12E-2
Diffuser length $L_d(m)$	0.1625	0.1599

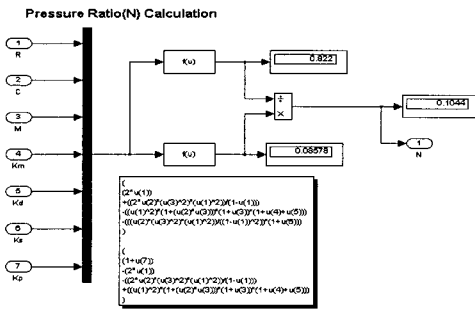


Fig. 2 Pressure Ratio(N) Subsystem

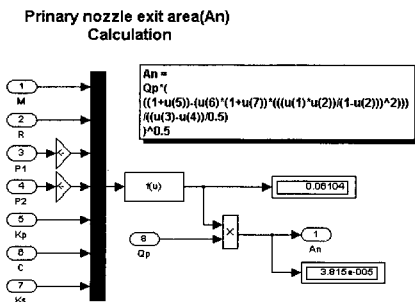


Fig. 3 Primary Nozzle Exit Area(An) Subsystem

4. 제트펌프 유동장 해석

추후 제트펌프 실험을 하기 전 제트펌프의 설계 결과를 확인하기 위해 상업용 CFD 해석 코드인 FLUENT를 이용하여 제트펌프의 유동장 해석을 수행하였다. 제트펌프 모델링의 유동장 해석을 통해 제트펌프 유동장의 변화를 알 수 있다. 제트펌프의 최대 효율을 위해선 공동화 현

상을 최적화해야 하고 유동 흐름의 분리가 발생되지 않아야 한다.

모델링 결과를 토대로 Table 2와 같은 해석 조건을 수립하고 유동장 해석을 수행하였다.

Figure 5는 유동장 해석의 속도 분포이고 Fig. 6은 압력 분포이다. Table 3은 모델링 해석 결과와 유동장 해석 결과 비교이다.

Table 2. Analysis Condition of Flow Field

Input Condition	Ps(KPa)	197.55
	V(m/s)	1.35
Design Results	An(mm)	7
	Dm(mm)	21
	Lm(mm)	152
	Dd(mm)	35
	Ld(mm)	130
	Diffuser Area Ratio	3.5

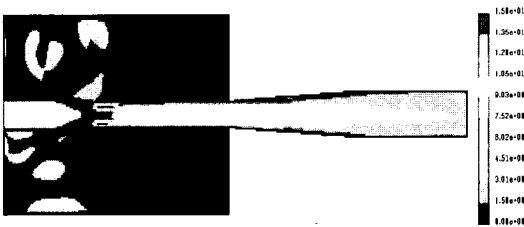


Fig. 5 Analysis Result of Flow Field - Velocity

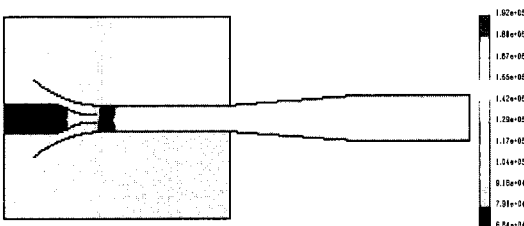


Fig. 6 Analysis Result of Flow Field - Pressure

Table 3. Analysis Result of Flow Distribution

	Modeling Results	Flow Field Analysis Results
Vn(m/s)	15.779	15
Vd(m/s)	1.761	1.5
Pd(Kpa)	113.8	114

유동장 해석 결과 1차 노즐 출구에서 유체의 압력은 감소하면서 속도는 증가하고, 유체가 디퓨저로 빠져나가면서 유체의 압력은 증가하고 속도는 감소하는 경향을 확인하였다. Table 3과 같이 유동장 해석 결과와 모델링 결과는 거의 유사함을 확인 하였다.

5. 결 론

제트펌프는 항공기 연료탱크 내에 위치하여 격막 간 또는 라인 간 연료 이송을 위하여 설치되는 연료계통 이송 기능을 위해서 소요되는 핵심 부품으로써 제트펌프의 기본설계 절차를 정립하였다.

SIMULINK를 이용하여 제트펌프의 관계식들에 대한 모델링을 수행하였고 유량비가 '2'인 조건과 '3'인 조건에서 제트펌프의 효율, 압력비, 노즐의 면적 혼합실의 직경 등의 값들을 알 수 있다. 제트펌프의 기본 설계 절차를 정립하였고 이를 바탕으로 제트펌프의 기본 설계 및 모델링을 수행하였다.

제트펌프가 최대효율을 갖기 위해선 유동 흐름이 안정적이어야 하고 공동화 현상을 최적화해야 한다. 이를 확인하기 위해 제트펌프의 유동장 해석을 수행하였고 해석 결과 유동이 안정적이고 속도 분포 및 압력 등이 설계값과 유사함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 “항공우주 부품 기술 개발 사업”의 연구 결과 중 일부입니다.

참 고 문 헌

1. Demil Y. Djafri, " T-91 Advanced Traniner 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 Traniner Non-pressurised Fuel System", Msc Thesis, Cranfield Univ. U.K., 1992
6. D.A. Phillips, "U-2000 Uninhabited Air Vehicle Fuel System", Msc Thesis, Cranfield Univ. U.K., 2001
7. Math Works, 1997, "SIMULINK: Dynamic System Simulation for MATLAB, Ver.2", The Math Works, Inc., USA