

Test data 보정기법을 활용한 추진기관 공급계 설계/해석

조남경* · 정용갑* · 한상엽* · 김영목*

Feeding System Design/Analysis Using Test Data Correlation Method

Nam-Kyung Cho* · Yong-Gahp Jeong* · Sang-Yeop Han* · Young-Mog Kim*

ABSTRACT

An optimization algorithm is applied to a calibration task. In this paper, test data correlation, a reverse analysis method, is presented. With this method, flow rate and heat transfer rate, which are difficult to be measured are estimated using measured pressure and temperature data for helium pressurization system of launch vehicle.

초 록

본 논문에서는 역해석의 한 형태인 시험데이터 보정기법을 제시하였다. 이 방법을 적용하여 계측이 용이한 온도/압력 데이터로부터 상대적으로 계측이 어려운 유량, 열 전달율 등의 데이터를 도출할 수 있었다. 본 논문에서는 시험데이터 보정기법을 활용하여 발사체 가압시스템으로 널리 활용되는 극저온/고압 헬륨 토출시스템의 예비시험을 통하여 획득된 온도/압력 데이터로부터 유량, 열 전달율을 도출하는 방법 및 결과를 제시한다.

Key Words: Data Correlation(데이터 보정), Pressurization(가압), Helium(헬륨), 유량(flow rate), Heat Transfer Rate (열 전달율)

1. 서 론

통상적인 추진기관 공급계의 해석과정은 설정된 설계규격(설계형상, 전후단 압력, 압력강하, 열투입량 등)에 대하여 정상상태 또는 비정상 상태 해석을 수행하여, 요구되는 목표값 등을 만족시킬 수 있는지를 확인하는 방식으로 수행된다.

이와는 반대로 요구되는 목표치(최소 무게, 최

대 성능 등)를 가지고 이러한 목표치를 내기위한 설계 입력변수를 도출하고 이들 변수의 최적조합을 도출하는 것을 역해석(reverse analysis) 또는 보다 일반적인 말로 설계라 할 수 있다. 이러한 역해석의 발전된 형태로 시험데이터 보정에 의한 설계/해석 기법을 들 수 있다. 이 방법을 적용하여 계측이 용이한 온도/압력 데이터를 획득한 후, 이로부터 상대적으로 계측이 어려운 유량, 열전달량 등의 데이터를 도출할 수 있다. 본 논문에는 발사체 가압시스템으로 널리 활용되는 극저온 헬륨 토출시스템의 예비시험을 통하여

* 한국항공우주연구원 추진제어그룹
연락처, E-mail: cho@kari.re.kr

획득된 시간에 따른 온도/압력 선도로부터 유량, 열전달량을 도출하는 방법을 제시한다. 또한 도출된 유량/열전달 계수를 이용하여 부품의 특성을 도출하는 방법을 제시하였다.

2. 역해석 이론

통상적인 해석에서는 설계규격이 정해지면 이에 따른 성능을 도출하는 과정을 거친다. 예를 들어 열교환기 설계 시 냉각 및 가열 유체의 유량을 설정하고 이 때의 출구 온도를 예측하는 방식이다. 이 경우 열교환기 출구온도는 유량의 함수($T = T(F)$)로 표현된다. 이와는 반대로 설계자는 요구되는 출구온도를 만족시키기 위한 설계유량을 설정하고자 할 경우가 있다 ($F = F(T)$). 이러한 과정을 역해석이라 할 수 있으며, 최적화 알고리즘에 기반한 수치적 반복 계산에 의한 해석이 수행된다. Fig. 1 은 일반적인 최적화 해석의 원리를 보여준다. 보정변수(calibration variable)를 바꾸어가면서 제한조건(constraint)을 만족시키면서 계측치(T)와 예측치(P)의 차이로 정의된 목표값(O)이 최소가 되는 보정변수를 도출한다. 이러한 최적화 과정에 널리 쓰이는 방법으로 (1)식과 같은 최소자승 보정 기법(least-squares fit)을 들 수 있다 [1].

$$O = \sqrt{\sum_i (T_i - P_i)^2} \quad (1)$$

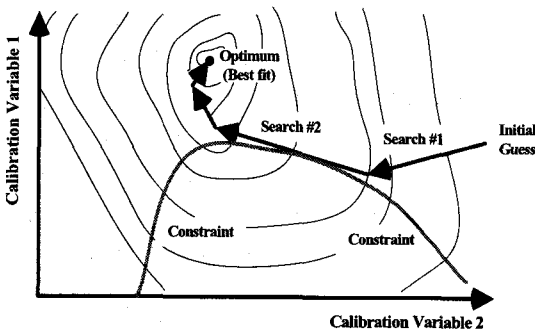


Fig. 1 Calibration as an optimization process

Figure 2는 전통적인 설계점 해석(point-design simulation)을 어떻게 최적화 기반 해석으로 전환할 수 있는가를 보여준다. 특정한 설계점에 대해 해석을 수행한 후 목표변수(object variable)가 최소가 될 때까지 보정변수(calibration variable)를 바꾸어 가면서 특정설계 모사를 수행하는 과정이라 할 수 있다.

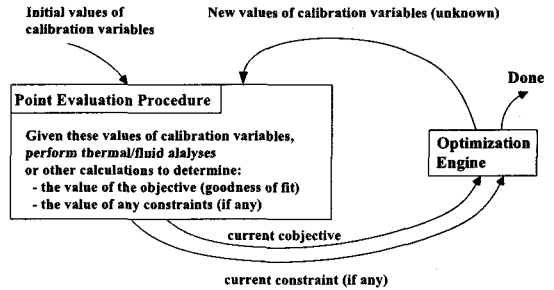


Fig. 2 Thermal/fluid point simulations as an iterative subprocess of calibration

3. 가압시스템에의 적용

3.1 해석 시스템 개요

해석에 적용된 가압시스템은 고압 헬륨(압력 207 bar, 용적 132 liter)을 액체산소 탱크 내에 극저온(약 90 K)으로 저장한 후 토출하는 방식이다. 극저온 고압 헬륨은 레귤레이터에 의해 44 bar로 감압되며 오리피스를 거쳐 대기로 토출된다. 가압 헬륨의 토출량은 탱크의 압력/온도와 가압 라인에 들어가는 오리피스, 밸브 등의 압력 손실(pressure loss)에 의존한다. 일반적인 상온/저압 시스템에서는 압축성 기체에 대한 신뢰성 있는 보정식이 제시되어 있으나, 극저온 고압 헬륨의 경우 실제기체 효과(real gas effect)가 지배적이고, 압력 손실, 압력회복(pressure recovery) 등이 상온/저압의 경우와 상이함에 따라 개발 초기단계부터 특별한 주의가 필요하다. 대상 가압 시스템에서 극저온/고압 헬륨은 열교환기 전단까지 토출되므로, 오리피스, 밸브 등의 정확한 부품 선정을 위해 토출유량의 정확한 예측이 필

수적이다. 헬륨의 토출량은 유량계로 측정할 수 있으나, 압축성 기체 유량의 경우 유량계 측정이 비압축성 액체에 비하여 쉽지 않고, 부품과 시스템간의 상호작용을 정확히 파악하기 위해서는 측정과 연계된 해석이 필수적이다.

헬륨 토출량을 예측하는 방법의 하나로 기존 예비시험 데이터를 활용하는 방법을 들 수 있다. 본 논문에서는 헬륨 탱크 내의 헬륨의 온도/압력이 헬륨 토출량에 의존한다는 사실에 착안하여, 액체산소로 냉각된 헬륨 탱크내의 헬륨의 시간에 따른 압력/온도 데이터를 활용하여 토출량을 제시하는 방법을 정립하고자 하였다.

3.2 이론적 고찰

Figure 3과 같이 탱크내의 헬륨을 제어체적으로 잡는다면 탱크 내 헬륨의 압력과 온도는 헬륨의 토출량 및 액체산소로부터의 열전달량으로부터 결정된다. 만일 열전달량을 무시할 경우에는 탱크 내 헬륨의 압력/온도는 토출에 의한 단열 팽창에 의해 예측된다. 헬륨 탱크 내에서 헬륨은 (1)식과 실제기체 방정식과 (2)식과 같은 질량 보존 방정식을 만족한다.

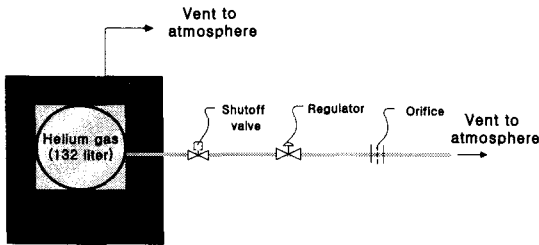


Fig. 3 Pressurization system for analysis

$$P = Z\rho RT \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \quad (2)$$

Fig. 3에서 보는바와 같이 헬륨의 토출만 존재하므로 (2)식에서 $\sum \dot{m}_{in} = 0$ 이 된다.

헬륨탱크내의 헬륨에 대한 에너지 관계식은 (3)식과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= \frac{d(mC_v T)}{dt} = \sum h_{in} \dot{m}_{in} - \sum h_{out} \dot{m}_{out} + \dot{Q} - P \cdot (dV/dt) \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \text{comp} \frac{\partial P}{\partial t} \\ (*\text{comp}) &= \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P} \end{aligned} \quad (3)$$

(3)식을 살펴보면, 역시 시스템에서 헬륨의 토출만 존재하므로 $\sum h_{in} \dot{m}_{in} = 0$ 이 되며, 헬륨 탱크의 체적이 고정되어 있으므로 $\partial V/\partial t = 0$ 이 된다. compressibility $(\partial V/\partial P)/V$ 는 헬륨의 물성치에 의해 결정되는 값이다.

즉 시간에 따른 압력변화를 $\partial P/\partial t$ 가 주어졌을 때 온도변화율 dT/dt 는 (4)식과 같이 토출유량 \dot{m}_{out} 와 열전달량 \dot{Q} 에 의해 결정된다.

$$\frac{dT}{dt}, \frac{dP}{dt} = f(\dot{Q}, \dot{m}_{out}) \quad (4)$$

(4)식을 역으로 생각하면 주어진 온도/압력의 측정치를 가지고 토출유량과 열전달량을 변화시키면서, 시험치와 가장 일치할 경우의 토출량 및 열전달량을 반복계산으로 수치적으로 도출할 수 있다.

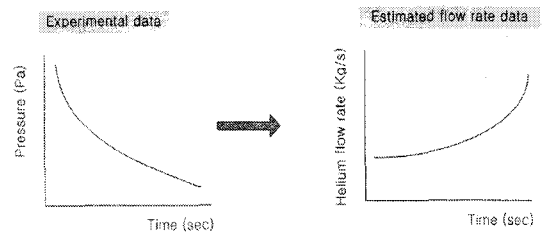


Fig. 4 Flow rate estimation concept from measured data

3.3 해석결과

본 연구의 해석을 위해 범용 열/유체 해석 소프트웨어인 SINDA/FLUINT를 활용하였다 [2]. Fig. 5는 계측된 압력 데이터로부터 도출된 헬륨 토출 유량을 보여준다. 약 50 초간의 계측 압력 데이터에 대하여 헬륨토출 유량을 변화시켜 가면서 계산된 압력과 계측 압력과의 차이가 최소가 되는 토출유량을 도출하였다. 탱크 내 헬륨 가스의 열전달은 고려하지 않았으며, 이에 따라 단열팽창에 의해 탱크 내 헬륨의 온도/압력이 변화된다. 50초 구간동안 평균적인 헬륨 토출 유량은 0.102 Kg/s로 예측되었다.

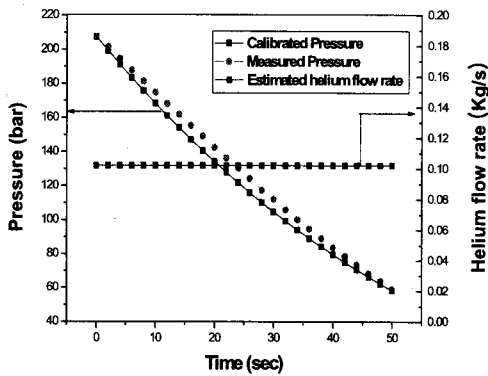


Fig. 5 Helium flow estimation from measured pressure

Figure 6은 계측된 압력/온도 데이터로부터 도출된 헬륨 토출 유량을 보여준다. 이 때 헬륨토출 유량을 변화시켜 가면서 계측된 온도와 예측 온도와의 차이가 최소가 되는 토출유량을 도출하였다. 이 때 압력은 제한치(constraint)로 설정하여 계측압력과 예측압력이 3 bar 이내에서 유지되도록 하였다. 압력/온도 두 개의 계측 데이터로서 보정을 하였음에도 불구하고, 압력만을 보정데이터로 활용한 Fig. 5의 결과와 비교하여 계측데이터와 훨씬 잘 일치하는 보정압력(Fig. 5) 및 보정온도 데이터(Fig. 6)를 얻을 수 있었다. 이는 실제 현상에서 헬륨탱크로의 열전달이

존재하므로 이를 고려하여 보정을 수행하였을 때 추가적인 보정데이터를 이용하는데 따른 수치적인 오차요인에도 불구하고, 물리적인 현상과 호응되므로 인해 개선된 결과를 얻을 수 있음을 보여준다. 이 때 50초간의 평균적인 유량은 0.114 kg/s로 예측되었다.

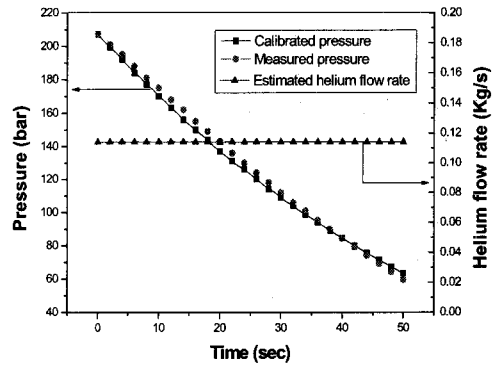


Fig. 6 Helium flow estimation from measured pressure and temperature

Figure 7은 계측된 압력/온도 데이터로부터 도출된 열전달율을 보여준다. 계측된 온도/압력 데이터와 보정된 압력/온도 데이터와의 차이를 최소화 하였을 경우 열전달율은 약 10.5 KW로 예측되었다.

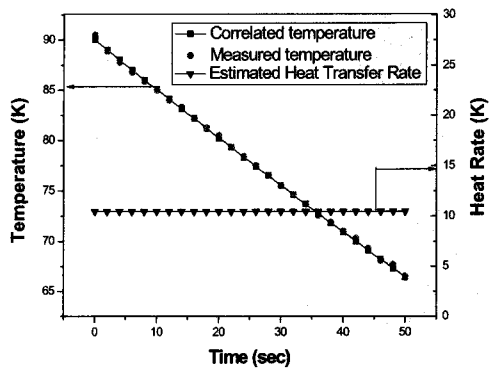


Fig. 7 Heat Transfer estimation from measured pressure and temperature

Figure 6에서 예측된 헬륨 토출유량은 실제로 오리피스, 밸브 등의 압력 손실(pressure loss)에 따라 결정된다. 역으로 헬륨 토출 유량을 알 경우 이로부터 토출배관에서의 압력손실을 유추할 수 있다. 일반적으로 압력손실과 유량의 관계는 (5)식과 같이 표현되며[3], 이 때 K는 압력손실계수로 정의된다. 본 연구와 같이 오리피스가 장착된 시스템에서 레귤레이터 후단에서의 대부분의 압력손실은 Fig. 8에 도시된 오리피스에서 발생하므로, 유량 데이터로부터 도출된 압력손실로부터 오리피스의 손실계수 K를 근사적으로 구할 수 있다. 오리피스 손실계수 K를 변화시키면서 Fig. 6에서 도출된 유량과 보정유량의 차이를 최소화하였을 때, 오리피스의 손실계수 K는 223으로 예측되었다.

$$\Delta P = K \cdot (\dot{m}/AF)^2/2\rho \quad (5)$$

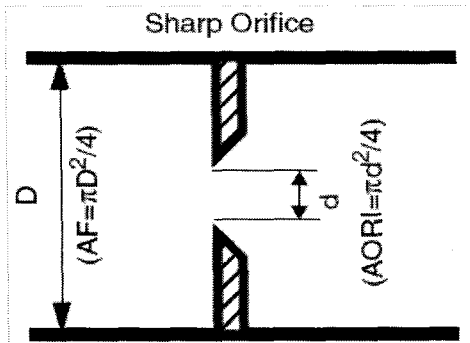


Fig. 8 Schematic diagram of orifice

4. 결 론

극저온 헬륨 토출시스템의 예비시험을 통하여 예측된 온도/압력 선도로부터 유량, 열전달율을 도출하였다. 또한 도출된 유량을 이용하여 오리피스의 손실계수를 예측하였다. 이 때 추가적인 보정데이터를 이용하는 것이 수치적인 오차요인에도 불구하고 물리적인 현상과 더욱 호응되므로 인해 개선된 예측결과를 도출함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정연구개발사업인 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Brent A. Cullimore, "Dealing with Uncertainties and Variations in Thermal Design", Proceedings of InterPack '01 Pacific Rim International Electronic Packaging Conference, July 2001, Kauai, Hawaii
2. Cullimore et al, SINDA/FLUINT Version 4.7 User's Manual, www.crtech.com, 11, 2005
3. D..N. Roy "Applied Fluid Mechanics", Ellis Horwood Limited, 1988