

技術論文

액체로켓 엔진 성능 보정용 제어밸브의 고유유량특성 계산

박순영* · 조원국** · 설우석*

Evaluation of the Inherent Flow Coefficient of the Control Valve in the Liquid Propellant Rocket Engine

Soon-Young Park* · Won-Kook Cho** · Woo-Seok Seol*

ABSTRACT

When a liquid rocket engine - specifically for the gas-generator cycle engine has throttle valves to control the thrust level and mixture ratio of the engine, it is possible to adjust the inherent flow characteristics of the control valves in order to secure a linearized correlation between the control-process-parameters like the thrust or mixture ratio of an engine and the throttle angle of valve. These linearities can reduce the complexity of the control process and make the process more explicit by ensuring the intuitive control. In this point, we proposed an algorithm within the frame of the in-house-developed program to obtain the control valves' inherent flow characteristics which satisfy the linearity, and calculated the sensitivities of control valves with respect to the throttle angle. Also, we compared the obtained inherent flow characteristics with the existed data and concluded the results are satisfactory.

초 록

가스발생기 사이클 액체로켓 엔진의 보정이나 제어를 위해 제어밸브를 적용하는 경우 제어밸브의 고유유량특성을 제어 대상값인 추력이나 혼합비와 선형적인 관계를 가지도록 선정함으로써 제어를 간단하면서도 예측가능한 형태로 가져갈 수 있다. 이에 본 연구에서는 기존에 개발된 엔진 모드해석 프로그램을 응용하여 추력 제어밸브와 혼합비 제어밸브의 고유유량특성을 계산하기 위한 알고리즘을 제안하였으며, 제어밸브의 스로틀 각에 따른 민감도를 계산하였다. 계산된 제어밸브의 고유유량특성을 해외 사례와 운용범위에서 그 곡선의 형태를 비교하여 결과의 타당성을 검토하였다.

Key Words: Liquid Propellant Rocket Engine(액체로켓 엔진), Control Valve(제어밸브), Inherent Flow Characteristics(고유유량특성)

접수일 2010. 12. 2, 수정완료일 2011. 6. 13, 게재확정일 2011. 6. 17

* 정회원, 한국항공우주연구원 발사체엔진팀

** 종신회원, 한국항공우주연구원 발사체엔진팀

† 교신저자, E-mail: psy@kari.re.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 25-26, 제주 샤인빌리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

액체로켓 엔진은 발사체 임무를 만족시킬 수 있도록 요구되는 정확한 추력과 혼합비를 만족

시켜야 한다. 발사체의 핵심 추진 장치로써 액체 로켓 엔진은 임무설계에서 요구되는 추력 범위를 만족한 상태의 운전이 가능해야 하며, 또한 비행 종료 시점까지 산화제 및 연료 추진제를 혼합비에 맞추어 소진하여 추력 생성과는 상관 없는 추진제 탱크 잔류 추진제의 양을 최소화할 수 있도록 혼합비를 예측 가능한 범위로 조정할 수 있어야 한다. 엔진은 연소기, 터보펌프, 가스발생기 및 밸브 등 여러 서브시스템의 조합체이다. 따라서 정확한 추력이나 혼합비 성능을 발휘하는데 있어 엔진 입구 조건의 변동에 의한 '외부요인 분산' 이외에 엔진 내부 구성품의 성능 분산에 의한 '내부요인 분산'이 존재하게 된다. 이러한 내부요인 분산은 RL10A-3-3[1], SSME[2] 및 LE-7[3] 엔진 등과 같이 실제 비행 중에 폐회로 제어를 수행하여 외부요인 분산과 함께 추력이나 혼합비를 공칭 조건으로 유지하는 경우가 있으며, 또는 지상 시험을 통하여 내부요인 분산을 보정하여 비행 중에는 능동제어를 수행하지 않는 F-1 엔진과 같은 사례가 있다[4]. 여기서 더 나아가 지상 보정 개념 중 오리피스를 이용한 F-1 엔진과는 달리 시험의 편의성과 보정의 용이성을 위해 제어밸브를 지상 시험에 적용하여 보정을 수행한 후 제어밸브의 구동기 부분을 제거한 후 발사함으로써 비행 중 일정한 밸브 개도를 유지하는 HM-7 엔진의 혼합비 보정 사례도 있다[5].

이러한 관점에서 액체로켓 엔진의 제어밸브는 보정이나 제어의 핵심 요소이며, 특히 제어밸브의 고유유량특성(inherent flow characteristics)은 엔진의 정적인 작동 특성과 연관되어 매우 중요한 설계 인자이다. Y. Naruo 등[6]은 expander cycle 엔진의 추력제어밸브(Thrust Control Valve, TCV)에 대해서 추력 제어의 선형성을 위해 밸브 스트로크에 대해서 선형적인 고유유량 곡선을 선정하였다. 하지만 스트로크와 유량계수가 선형적이더라도 스트로크와 추력과의 상관관계는 포물선 형태의 비선형적인 관계가 형성된다. 즉, 단순히 제어밸브의 고유유량특성을 스트로크에 따라 선형적으로 선정하는 것 보다는 실제 엔진의 정적 작동 특성을 반영하여 고유유량

계수를 선정할 수 있다면 스트로크에 따른 연소압 혹은 혼합비의 선형적인 관계를 도출할 수 있을 것이다. 이처럼 스트로크와 제어 목표인 추력이나 혼합비가 선형적인 관계를 가질 때 제어의 선형성은 훨씬 더 직관적이며, 제어의 예측 가능성을 증가시킬 수 있으며, 제어로직이나 보상기 설계가 용이해질 수 있다.

이에 본 연구에서는 이러한 제어밸브의 고유유량특성을 계산하기 위한 방법론을 제시하고자 한다.

2. 해석 방법

2.1 해석의 대상

Figure 1에 일반적인 가스발생기 사이클 엔진을 표시하였다. 그림에 제시되어 있는 것과 같이 엔진 추력을 제어하기 위해 TCV가 가스발생기 산화제 라인에 위치하며, 엔진 혼합비 제어용 밸브(Mixture Ratio Control Valve, MRCV)가 주연소기 연료 라인에 위치하게 된다. 또한 가스발생기 연료 라인에는 가스발생기 혼합비를 일정하게 유지시켜주기 위한 밸브(GG mixture ratio stabilizer, STB)가 위치한다. 본 연구에서는 TCV와 MRCV의 고유유량특성이 제어의 선형성을 확보할 수 있도록 다음과 같은 조건을 만족시켜야 하는 것으로부터 논의를 전개하였다.

"제어밸브의 개도(opening ratio) 또는 제어밸브 구동용 액추에이터의 회전수(rotational angle, θ)와 제어 목표값인 연소압(P_{ex}) 또는 혼합비(O/F)가 선형적인 관계를 가짐으로써 제어의 선형성을 획득할 수 있도록 한다. 이는 제어의 비선형성을 줄여줌으로써 제어 난이도를 줄여주고, 신뢰성을 높여줄 수 있다."

본 연구에서는 위의 가정에 따라 기존에 개발된 엔진 모드해석 프로그램을 바탕으로 제어밸브의 고유유량특성을 계산하는 방법을 제시하였으며, 이를 이용하여 실제 밸브 개발에 활용될 수 있는 고유유량특성 곡선을 도출하였다[7]. 고

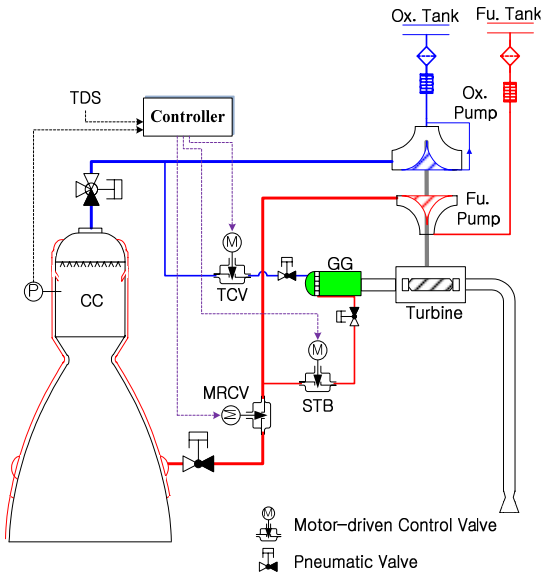


Fig. 1 Schematic of Hydraulic Control Scheme of a Gas-Generator Cycle Liquid Rocket Engine : CC = Combustion Chamber, GG = Gas-Generator, TDS = Tank Depletion Signal, TCV = Thrust Control Valve, MRCV = Mixture Ratio Control Valve, STB = GG Mixture Ratio Stabilizer

유유량특성을 계산하기 위한 기본 해석 도구가 되는 모드해석 프로그램은 엔진을 구성하는 연소기/가스발생기/터보펌프/밸브 등의 엔진 구성품 성능 특성을 입력으로 하여 이들의 압력/유량/파워 밸런스를 계산함으로써 전체 엔진 시스템 차원의 작동 모드를 계산하는 프로그램으로 이에 대한 자세한 설명은 참고문헌 [7]에 제시되어 있다.

2.2 고유유량특성 계산 알고리즘

Figure 2에 제시되어 있는 것과 같이 먼저 제어밸브의 θ 에 따른 고유유량특성을 계산하기 위해서 입력값으로 제어밸브의 공칭 저항계수 (ξ_{nom}), 밸브 최대 작동점에서의 최소 저항계수 (ξ_{min}) 및 각각에 해당하는 스톨 회전수(θ_{nom} , θ_{max})를 정의한다. 이후 모드해석 프로그램을 이용하여 엔진의 공칭 작동점(nominal value)을 먼저 계산하고, 여기에서 얻은 $P_{cc,nom}$ (혹은 $(O/F)_{nom}$)을

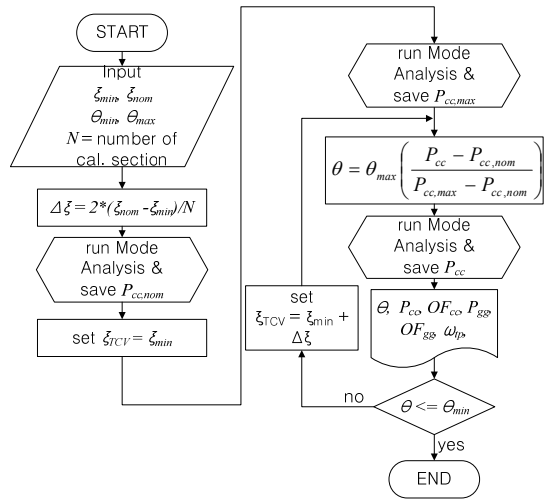


Fig. 2 Calculation Procedure to Determine the Inherent Characteristics of the TCV

저장한다. 다시 제어밸브를 최대로 열었을 때의 엔진 작동점($P_{cc,max}$ 혹은 $(O/F)_{min}$)을 모드해석 프로그램을 이용하여 계산하고, 이로부터 최대값과 중간값을 $N/2$ 개의 섹션으로 나누어 각각의 ξ_i 에 해당하는 $P_{cc,i}$ 를 계산한다. 최종적으로 계산된 $P_{cc,i}$ (혹은 $(O/F)_i$)와 θ_i 를 선형적으로 매칭시켜 제어밸브의 고유유량특성을 계산할 수 있다. 즉, 제어밸브의 거동에 따른 엔진의 정적인 모드 변화에 대한 관계를 도출하고, 이를 제어밸브의 개도나 액추에이터의 회전수와 매칭함으로써 제어밸브의 고유유량특성을 계산할 수 있다.

3. 해석 결과

3.1 TCV 고유유량특성

Figure 3과 같이 θ_{TCV} 에 대하여 선형적인 관계의 P_{cc} 가 되도록 Fig. 4와 같은 TCV의 고유유량특성을 도출할 수 있다. 스톨 축의 회전각이 -180° 에서 $+180^\circ$ 로 변할 때 제어밸브의 손실계수는 15 ~ 1.0 범위로 변해야 하는 것을 알 수 있으며, 그 형태는 2차 함수형태가 될 때 제어 대상 값인 P_{cc} 는 선형적으로 변하는 것을 확인할 수 있다. 이때의 제어 민감도는 다음과 같다.

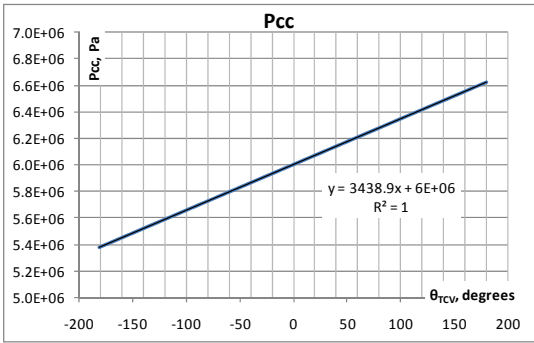


Fig. 3 Correlation Between P_{cc} and TCV Throttle Angle (θ_{TCV})

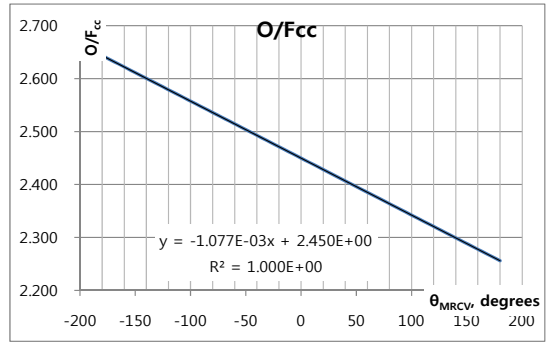


Fig. 6 Correlation Between O/F_{cc} and MRCV Throttle Angle (θ_{MRCV})

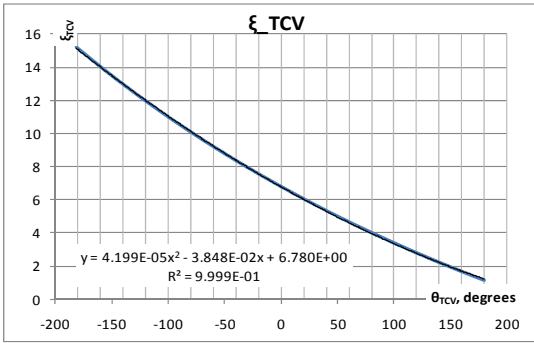


Fig. 4 Inherent Flow Characteristics of TCV

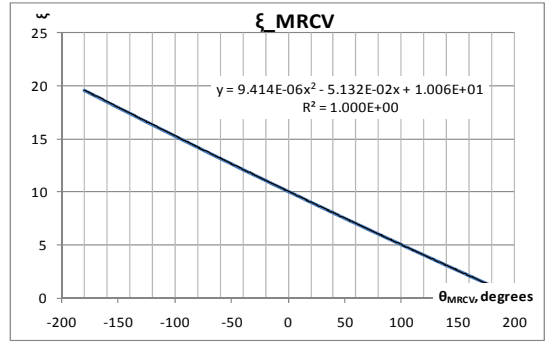


Fig. 7 Inherent Flow Characteristics of MRCV

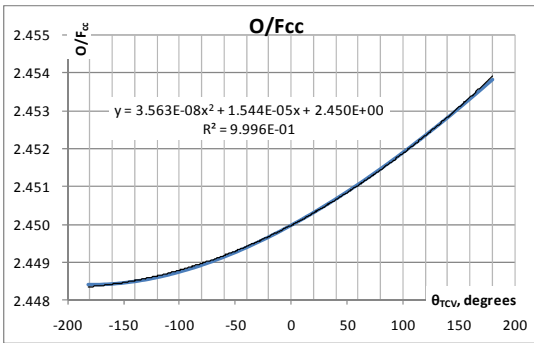


Fig. 5 Correlation Between O/F_{cc} and TCV Throttle Angle (θ_{TCV})

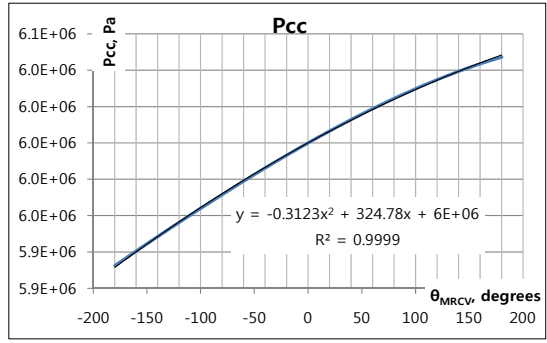


Fig. 8 Correlation Between P_{cc} and MRCV Throttle Angle (θ_{MRCV})

$$\frac{d\Delta P_{cc}}{d\Delta \theta_{TCV}} = 0.0344 \text{ bar/deg}$$

또한, -180° 에서 $+180^\circ$ 의 스로틀 축 회전을 통해 연소압은 $\pm 10\%$ 의 범위로 조정이 가능함을 알

수 있다. 그리고 Fig. 5는 이때의 혼합비 변화를 나타내고 있으며 추력 보정용 제어밸브만 구동할 경우에 혼합비의 변화율은 $\pm 0.2\%$ 이내로 미미하다는 것을 알 수 있다.

3.2 MRCV 고유유량특성

TCV와 마찬가지로 Fig. 6과 같이 θ_{MRCV} 에 대하여 선형적인 관계의 O/F_{α} 가 되도록 Fig. 7와 같은 고유유량특성을 가지는 제어밸브를 개발할 수 있다. 스로틀 축의 회전각이 -180° 에서 $+180^{\circ}$ 로 변할 때 제어밸브의 손실계수는 19 ~ 2.0 범위로 변해야 하는 것을 알 수 있으며, 그 형태는 2차 함수형태가 될 때 제어 대상값인 O/F_{α} 는 선형적으로 변동되는 것을 확인할 수 있다. 다만 이때의 비선형성은 앞의 TCV에 비하여 그 폭이 좁음을 알 수 있다. 또한, 이때의 제어 민감도는 다음과 같다.

$$\frac{d\Delta O/F_{\alpha}}{d\Delta\theta_{MRCV}} = -0.001077 \text{ deg}^{-1}$$

즉, 이는 혼합비 보정 밸브를 10° 회전하였을 때 연소기의 혼합비가 0.01077만큼 변동함을 의미한다. 또한 -180° 에서 $+180^{\circ}$ 의 스로틀 축 회전을 통해 혼합비는 $\pm 9.6\%$ 의 범위로 조정이 가능함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8은 이때의 연소압 변화를 나타내고 있으며, 혼합비 보정용 제어밸브만 구동할 경우 연소압은 $-1.36\% \sim +0.9\%$ 의 범위로 변동하는 것을 알 수 있다.

3.3 해석 결과에 대한 검토

Figure 9에서 본 연구에서 제안한 방식으로 얻은 TCV의 고유유량특성(K_s)을 참고문헌[8]에 제시한 TCV의 고유유량특성과 비교하였다. 여기서 K_s 의 정의는 $(\rho\Delta P)/\dot{m}^2$ 이며, ρ 는 밀도(kg/m^3), ΔP 는 밸브의 차압(bar), \dot{m} 은 밸브를 통과하는 질유량(kg/sec)을 의미한다. 상대적인 비교를 위해 정격 유량에서의 K_s 값을 이용하여 무차원화하였으며, 밸브의 θ 를 공칭 작동점 기준으로 0° 에서 $0.147 \sim 2.606$ 까지를 각각 $\pm 180^{\circ}$ 로 사상(mapping)하여 비교하였다. 이는 제어밸브의 실질 사용 구간에서의 θ 에 따른 곡선의 형태를 비교하기 위한 것이다. 즉, 엔진의 추력 스로틀을 위한 운용 범위가 주어졌을 때 이를 구현하기 위한 θ - K_s 직교 좌표에서의 두 점 (θ_{\min} , $K_{s_{\max}}$)

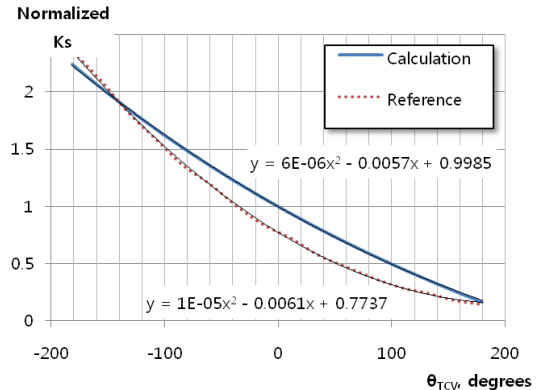


Fig. 9 Comparison of Calculated TCV Flow Coefficient(K_s) with Reference[8]

와 (θ_{\max} , $K_{s_{\min}}$)을 연결하는 곡선의 형태를 비교하는 것이 가장 적절한 비교가 될 것이다. 이는 현재의 비교가 엔진의 추력 차이에 따른 밸브의 크기나 정격 유량의 차이 및 실제 운용 범위의 차이와 무관하게 밸브의 고유유량특성 - 정격 그대로의 밸브 개도에 따른 유량특성을 비교하기 위한 변환 과정이다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 해석결과와 참고문헌에 제시되어 있는 TCV의 고유유량특성은 θ 에 따른 2차 함수의 형태로 나타남을 알 수 있다. 이는 곧 제어의 선형성을 위해 제어밸브의 고유유량특성을 직관적으로 선형화하는 것보다는 2차 함수의 형태로 고유유량특성을 선정할 경우 오히려 θ 와 제어의 목적값인 추력이 선형성을 가짐을 알 수 있다. 계산 결과와 기존 사례와의 곡선의 기울기 차이는 엔진 시스템의 스로틀 응답특성 차이에 따른 것으로 볼 수 있으며, 이러한 응답특성 차이는 주로 터보펌프의 탈설계 영역에서의 양정이나 효율의 변동 특성 - 즉, 양정곡선 및 효율곡선의 차이에 따른 것으로 판단된다.

4. 결 론

액체로켓 엔진의 보정이나 제어를 위한 제어밸브의 경우 초기 개발 과정에서 그 고유유량특성을 적절히 선택하면 보정 과정에서의 제어시

스텝 비선형성을 보상하여 제어의 선형성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 이러한 제어밸브의 고유유량특성을 엔진 모드해석 프로그램을 이용하여 도출할 수 있는 알고리즘을 제안하였으며, 이를 통해 실제로 가스발생기 사이클 엔진의 추력 보정용 제어밸브와 혼합비 보정용 제어밸브의 고유유량특성을 계산하였다. 계산 결과로 도출된 고유유량특성 곡선은 기존의 액체로켓 엔진에 적용되는 제어밸브의 그것과 유사한 형태를 가지는 것으로 확인되었다.

향후 이러한 제어밸브의 고유유량특성을 적용한 엔진 동력학 모델을 이용하여 제어밸브의 고유유량특성이 엔진의 동특성에 미치는 영향에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Pratt & Whitney Aircraft, "RL10A-3-3 Rocket Engine Design Report," NASA CR-80920, 1966
2. Honeywell, "Space Shuttle Main Engine Controller Assembly Phase C-D," NASA-CH-135947, 1973
3. Y. Fukushima and et. Al., "Development Status of LE-7A and LE-5B Engines for H-IIA Family," Acta Astronautica, Vol. 50, No. 5, 2002, pp.275-284
4. Rocketdyne, "F-1 Rocket Engine Data Manual," 1972
5. J. Grilla, and et. Al., "Status of Ariane 5 Cryogenic Upper Stage Program - Propulsion System," AIAA-2000-3785, 2000
6. Y. Naruo, and et. Al., "Throttling Dynamic Response of LH2 Rocket Engine for Vertical Landing Rocket Vehicle," 7th ISCOPS, 1997, pp.97-421
7. 박순영, 조원국, "가스발생기 사이클 액체로켓 엔진의 모드 해석 프로그램 개발," 2008, KSPE Autumn Conference. pp.366-370
8. KBKha, "Technical Note for Thrust Control Valve Mathematical Modeling Results and Preliminary Analysis of Its Possible Operation in KBKha Engine," Contract No. KARI-06-072