

복합재 케이스의 실린더 변형률을 이용한 킥모터 연소 압력 계산

이무근* · 길경섭* · 이경원*

Combustion Pressure Calculation of Kick Motor using Strain on Cylinder Section of Composite Case

Mookeun Yi* · Kyoungsub Kil* · Kyoungwon Lee*

ABSTRACT

A method for the calculation of the combustion pressure of Kick-Motor was proposed, which is based on the circumferential direction strain on the cylinder of Kick-Motor. At first, polynomials which approximate the ratio of strain and Combustion Pressure during Combustion Time was calculated from ground firing tests. Then strain data during flight time was plugged into the polynomials to get Combustion Pressure of the Kick-Motor. Compared with the measured pressure data during flight the converted showed similar trend. Pressure difference between them was about 10psi.

초 록

실린더 중앙 원주방향 변형률을 바탕으로 킥모터의 연소 압력을 계산하는 방법을 제안하였다. 지상 연소시험으로부터 연소시간 동안의 변형률-압력 비(strain ratio)를 근사하는 다항식을 계산하였다. 이 다항식에 비행 중 측정된 변형률을 대입하여 비행 중 연소압력으로 변환하였다. 실제 비행 중에 측정된 압력과 비교한 결과 전체적인 변화 양상이 일치함을 확인하였으며 최대 약 10psi 수준의 차이가 나타난 것을 볼 수 있었다.

Key Words: Combustion Pressure (연소압력), Kick Motor(킥모터), Composite Case(복합재 연소관), Strain(변형률),

1. 서 론

킥모터는 KSVL-I의 2단 고체추진기관으로서 위성을 의도된 궤도에 투입시키는 목적으로 운

용된다. 킥모터의 실제 운용 중에는 정상작동 여부를 판단하기 위해 연소 중 내부 압력을 측정하도록 되어있다. 압력 데이터는 2개의 센서를 이용하여 측정하는데 두 센서의 계측 값이 상이하거나 1개의 센서가 작동하지 않는 경우를 대비하는 수단의 필요성이 제기되었다.

킥모터가 비행하는 중에는 압력 이외에 온도

* 한국항공우주연구원 추진제어팀
연락처, E-mail: mkyi@kari.re.kr

와 변형률을 측정하는데, 이 중에서 변형률은 복합재 케이스의 표면에 부착되기 때문에 연소압력과 동일한 변화양상을 보여주기 때문에 연소압력을 간접 평가하는데 가장 유용한 데이터로 볼 수 있다. R. A. Ellis 등도 고체 추진기관 케이스의 돔 영역에서 측정된 변형률을 이용하여 연소압력을 계산하였다고 간략히 언급하였다[1].

본 문서에서는 지상연소시험으로 구한 변형률-압력 관계 및 비행 중 획득한 변형률을 이용하여 킥모터 비행 중 압력을 계산한 과정을 소개하였다.

2. 복합재 케이스의 변형률과 압력의 관계

변형률은 복합재 케이스 표면에 4개가 부착된다. 이들 중 실린더 중앙의 변형률(이후 ch15라 함)은 제작 편차가 적을 뿐만 아니라 압력 변화에 대해 가장 안정적으로 계측되기 때문에 압력으로 변환하기에 가장 적합한 것으로 판단하였다.

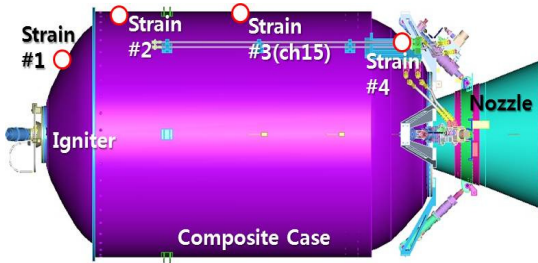


Fig. 1 Locations of Strain Measurement of Kick-Motor

변형률을 이용하여 연소압력을 평가하기 위해서는 압력-변형률 관계 정립이 필요하다. 본 논문에는 strain ratio[2]를 이용하여 Fig. 2의 과정을 거쳐 최종적으로 원하는 값을 도출하는 과정을 설명하고 있다. strain ratio란 변형률을 압력으로 나눈 값을 의미한다.

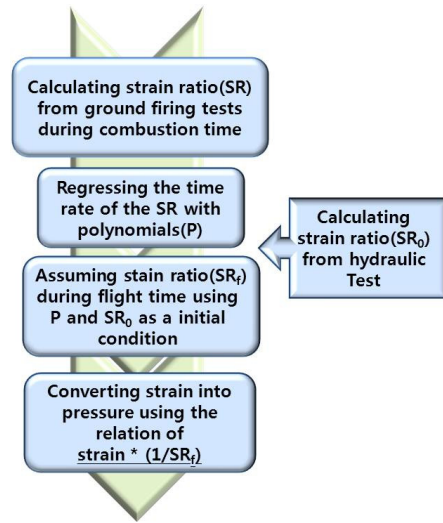


Fig. 2 Procedure for Converting Strain into Pressure

2.1 수압시험에서 얻은 변형률-압력 관계

Fig. 3은 수압시험으로부터 구한 가압 동안의 실린더 변형률(ch15)과 압력 관계(SR_0)를 보여주고 있다. 두 값의 관계를 선형으로 근사가 가능함을 확인할 수 있다.

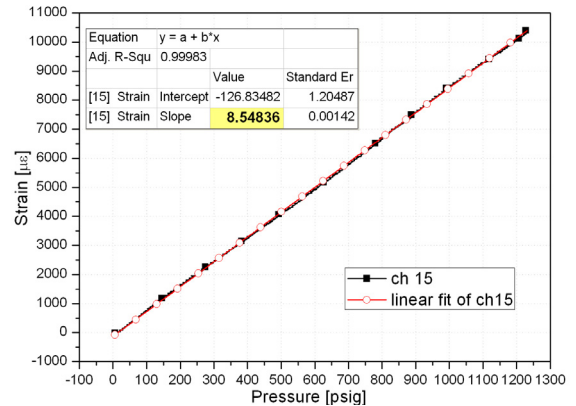


Fig. 3 Strain-Pressure Relation from Hydraulic Test

2.2 연소 중 변형률-압력 관계

지상연소시험으로부터 킥모터의 연소 과정동안의 strain ratio를 계산하였으며 그 결과를 수압시험에서 구한 것과 비교하였다. 수압시험은 2.1절에 언급한대로 strain ratio를 선형으로 근사

하는 것이 가능함을 볼 수 있다. 하지만 지상연소시험은 시간에 따른 변화량이 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 연소가 진행됨에 따라 고체추진제가 소모되면서 구조체로서의 역할이 점차 줄어들어 가는 것이 가장 큰 원인으로 판단된다.

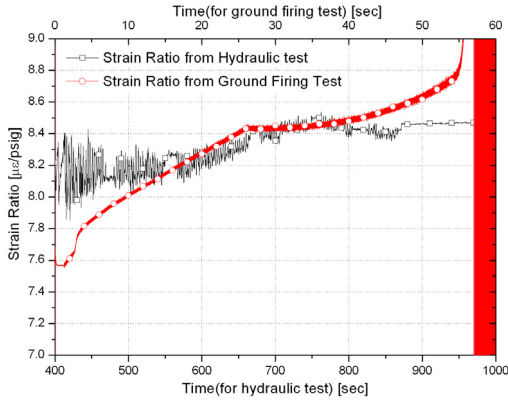


Fig. 4 Comparison of Strain Ratio

3. 변형률을 압력으로 환산

비행 시험에서 얻은 변형률로부터 압력을 환산하는 과정에서 다음 2가지 변수를 정해야함을 앞서 언급하였다.

- ① 연소 중 strain ratio(SR)의 변화
- ② 수압시험으로부터 구한 strain ratio(SR₀)

연소 시간동안의 SR변화를 정하기 위해 3개의 지상연소시험 데이터를 활용하였다. 개별 지상연소시험으로부터 시간에 따른 SR 변화량에 대한 근사 다항식을 계산한 후 다항식의 계수를 평균하는 방식을 취하였다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 연소시간에 따른 SR 변화 양상이 일정하지 않기 때문에 1개의 다항식으로 근사하는 것은 결과의 정확성을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 연소 구간을 5개의 소 구간으로 나눈 후 각 구간별로 서로 다른 다항식을 추출하였다.

이상의 방식으로 구한 연소 시간 중의 SR 근사식에 개별 케이스에 대한 SR₀를 초기조건으로 대입하면 해당 케이스의 SR_t를 구하게 된다. 초

기조건의 적용 지점은 4번과 5번 구간의 경계지점(Fig. 5의 A 지점)이며 크기는 SR₀*0.98 이다. 해당 지점은 연소 후 25초 이후에 나타나는 경계로서 연소압 및 변형률이 안정적으로 나타나기 때문에 초기조건이 갖는 오차를 줄일 수 있다. 0.98은 앞서 다항식 추출에 사용된 3개의 지상연소시험에 대해 A지점에서 계산한 strain ratio와 대응하는 케이스의 수압시험의 SR₀의 관계를 바탕으로 평균값을 취한 것이다.

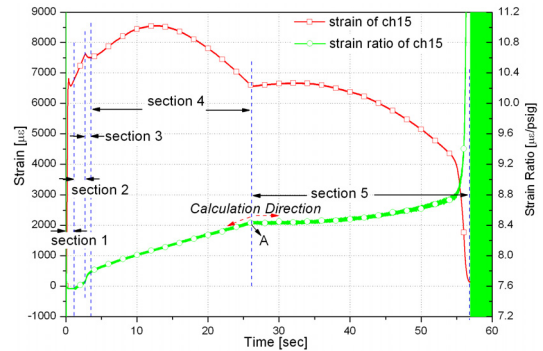


Fig. 5 Division of Whole Combustion Time into Five Sections

Table 1 Polynomials Regressing the Rate of Strain Ratio during Combustion time

section	fitting polynomials
1	constant
2	0.057
3	$5.98-3.30t+0.456t^2$
4	0.025
5	$-0.138+0.00984t-0.237*10^{-3}t^2+0.206*10^{-5}t^3$

계산 진행은 A지점을 시작으로 두 방향으로 진행되며 구간 #4→구간 #3→구간 #2→구간 #1 방향과 구간 #5방향이 그것이다.

이상의 과정을 통해 실제 비행에 적용된 복잡한 케이스에 대한 연소시간에 따른 SR_t를 추측한다. 이후 비행과정동안 획득한 변형률을 Eq. 1 관계식에 대입하면 종국에는 비행 중 연소압력

을 얻을 수 있다.

$$\text{Pressure} = \text{Strain during Flight} * 1/\text{SR}_i \quad (1)$$

4. 비행시험 결과와의 비교

비행시험을 통해 획득한 변형률을 이용하여 연소압력을 계산한 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 제시된 방법의 효용성을 검토하기 위해 압력 센서로 측정된 결과와 비교하였으며 그 결과 최대 약 10psi까지 차이가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 차이에는 근사 다항식이 갖는 오차와 초기 조건으로 활용되는 수압시험의 strain ratio 오차에 의한 것이며 그 외에 텔레메트리로 수신되는 변형률의 분해능도 영향을 준 것으로 추측된다.

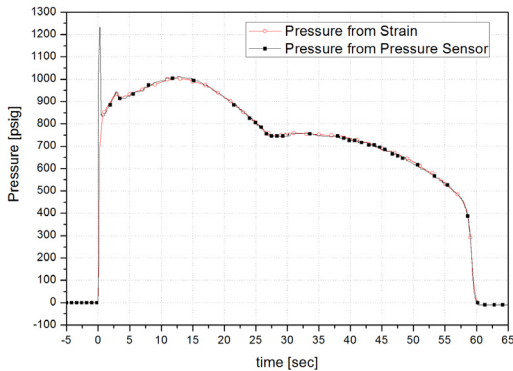


Fig. 6 Pressure Comparison from Strain and Pressure Sensor

5. 결 론

KSLV-I의 2단 고체추진기관이 운용되는 기간 동안 계측되는 연소압력 데이터의 신뢰도를 보완하는 목적으로, 복합재 케이스의 변형률을 압력으로 환산하는 방법을 제시하였다.

- 3개의 지상연소시험으로부터 구한 strain ratio 근사식에 수압시험의 strain ratio를 초기조건으로 대입하여 연소기간 동안의 strain ratio를 추측하는 방법을 설명하였다.
- 비행시험을 통해 획득한 변형률에 대하여 위 방식으로 구한 strain ratio를 적용하여 연소압력을 계산했으며 압력센서를 통해 측정된 값과 최대 약 10psi 차이를 보여주었다.

이상의 결과를 통해 본 논문에서 제시한 방법이 활용가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. R. A. Ellis, M. Berdoyes, "Supersonic Splitline(SSSL) Flexseal Nozzle Technology Evaluation Program" AIAA 97-2721, 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference&Exhibit, 1997
2. 노태호, 김중석, 조인현, "연소관 변형률 분석을 통한 파이로젠 점화기 작동현상 연구," 군사과학기술학회 2007년 종합학술대회 논문집, 2007