

이중펄스 로켓모타의 격막형 펄스분리장치 설계 및 성능평가

김진용¹⁾ · 권태하¹⁾ · 이원복¹⁾ · 조원만¹⁾ · 이방엽²⁾ · 정규동²⁾ · 이영우^{*,3)}

¹⁾ (주)한화 대전사업장 개발팀

²⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부 1부

³⁾ 충남대학교 에너지과학기술대학원

The Design & Analysis of Pulse Separation Device with Thermal Barrier Type for Dual Pulse Rocket Motor

Jinyong Kim¹⁾ · Taeha Kwon¹⁾ · Wonbok Lee¹⁾ · Wonman Cho¹⁾ · Bangeop Lee²⁾ · Gyoodong Jung²⁾ · Youngwoo Rhee^{*,3)}

¹⁾ Development Team, Daejeon Plant, Hanwha Corporation, Korea

²⁾ The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

³⁾ Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University, Korea

(Received 30 June 2014 / Revised 15 December 2014 / Accepted 30 January 2015)

ABSTRACT

The dual pulse rocket motor(DPRM) distributes the propellant energy effectively via pulse separation device(PSD) to improve the range and terminal velocity of the missile. There are two types of PSD such as bulk head type and thermal barrier type. A subscale thermal barrier type DPRM was designed, manufactured, and tested. The results showed good understanding of the characteristics of the PSD and will be applied to the design of the full scale DPRM.

Key Words : Dual Pulse Rocket Motor(이중펄스로켓모타), Pulse Separation Device(펄스분리장치), Bulkhead(격벽), Thermal Barrier(격막)

1. 서론

이중펄스 로켓모타(dual pulse rocket motor)는 1단 펄스모타와 2단 펄스모타 사이에 존재하는 펄스분리장치(PSD : Pulse Separation Device)에 의해 효과적인 추력

배분을 통하여 사거리 및 종말 속도를 증가시킬 수 있어 미사일의 기동성 및 명중률을 향상시킨다. 이러한 고체 로켓 모타의 펄스분리장치 설계 능력은 향후 차세대 추진기관을 위한 첨단 기술이므로 향후 발전적인 무기체계에 적용하기 위해서는 많은 연구가 수행되어야한다. 보통 펄스분리장치는 격벽형(bulkhead type)과 격막형(thermal barrier type)의 두 가지로 분류하며 이는 두개의 분리된 추진제 그레이인이 순차적으로 연소를 할

* Corresponding author, E-mail: ywrhee@cnu.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

수 있도록 하는 역할을 한다. 격벽형 추진기관의 경우, 격벽 펄스분리장치의 복잡한 설계와 구조물 때문에 추진기관의 무게가 증가한다. 2단 펄스모타가 작동할 때 1단 펄스모타 내열재의 삭마가 크게 증가되어 내열설계에 어려움이 있어 보강설계가 요구되지만 그레인 설계에 제한이 없다는 것이 큰 장점이다. 격막형 추진기관은 돔 형태의 격벽 구조물을 갖지 않고 내열소재만으로 설계되어 추진기관 무게를 최소화 시킬 수 있다. 하지만 2단 펄스모타 그레인 설계에 큰 제한을 갖는다^{1~3)}. Fig. 1에서는 단일추력형과 이중추력형 추진

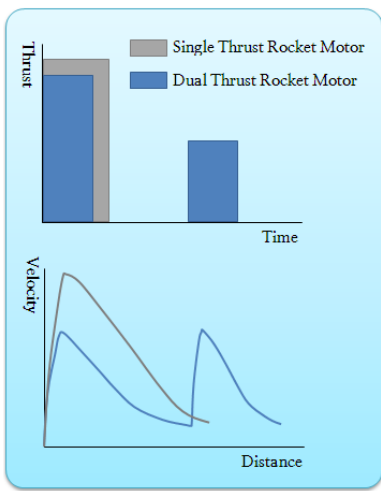
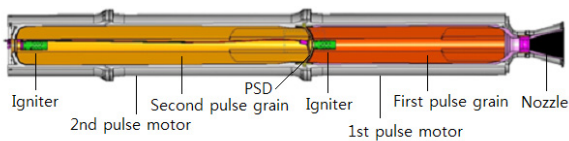
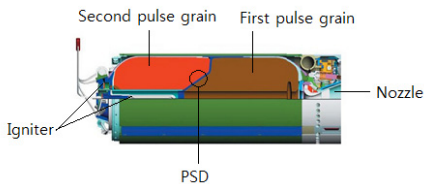


Fig. 1. Performance comparison of the single thrust and dual thrust rocket motor



Bulkhead type



Thermal barrier type

Fig. 2. Schematic drawing of dual pulse rocket motor of bulkhead and barrier type^{4,5)}

기관의 추력과 사거리를 비교하였으며 Fig. 2는 현재 개발된 격벽형(국방과학연구소와 ㈜한화 주관 개발, 응용연구단계)과 격막형(Thiokol, SM-3 유도탄 TSRM) 펄스분리장치를 갖는 이중펄스로켓모타 형상을 나타내었다. SM-3 이중펄스모타의 경우 형상부분만이 알려져 있으며 성능분배에 대한 내용은 알 수 없다. 일반적으로 이중펄스모타는 추력배분을 시간에 따라 조절할 수 있어 단일추력모타보다 사거리 및 종말속도를 향상시킬 수 있다. 특히 격막형은 1단 펄스모타가 연소시 고온, 고압가스에 직접적으로 노출되어 2단 펄스모타 추진제가 자연발화되는 것을 방지해야하며 2단 펄스모타가 연소될 경우, 격막 내열소재가 특정 압력에서 분리되어 떨어져나가는 현상없이 파열되어야한다^{4~9)}. 따라서 격막형 펄스분리장치를 갖는 이중펄스모타는 격막형상과 내열소재의 열적특성이 중요한 설계인자이며 이는 개발단계에서 충분히 검증, 분석되어야 한다. 본 연구에서는 기존에 발표한 소형 격막형 이중펄스분리장치 연구^{10,11)}를 바탕으로 모타 크기 및 격막 형상을 변경하였으며 그 연구결과를 본문에 서술하였다. 직경 400mm급 격막형 이중펄스모타를 설계하였고 격막의 파열특성을 분석하기 위하여 1단 펄스모타와 2단 펄스모타를 각각 시험하였다. 내열소재의 열적특성을 분석하기 위하여 격막 내부의 온도를 측정하였다. 또한 1, 2단 펄스모타를 연속적으로 연소(delay time : 2sec and 60sec)시켜 본 연구에서 설계한 격막형 펄스모타를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 격막형 이중펄스모타 설계

본 연구에서 격막에 적용된 내열소재는 1차 폴리머로 EPDM(Ethylene-Propylene Diene Termonomer), 2차 폴리머로 CR(Chloroprene) 조성으로, EPDM은 에틸렌 함량이 53.0~60.0wt%, ENB 함량이 6.9~8.9wt%인 급호 폴리캡에서 생산되는 KEP-330을 사용하였다. CR은 Dupont에서 생산되는 NEOPRENE® GRT M 시리즈를 적용하였으며 삭마특성을 향상시키기 위하여 Kevlar를 첨가하였고, 기계적인 특성은 Table 1에 나타내었다. 각각의 펄스 그레인인 HTPB(Hydroxyl-Terminated Polybutadiene)/AP(Ammonium Perchlorate)계 복합추진제를 적용하여 설계하였으며 Table 2와 같은 물성값을 갖는다. 이중펄스모타 형상은 Fig. 3과 같으며 2단 펄

Table 1. Mechanical properties of vulcanized rubber

Item	Value
Tensile strength(kgf/cm ²)	82
Elongation at break(%)	600
Hardness(Shore A)	70
Density(g/cm ³)	1.078

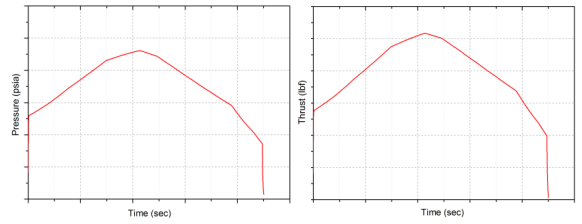


Fig. 5. P-T and T-T curves of 2nd stage design

Table 2. HTPB/AP propellant mechanical properties

Item	1st stage propellant	2nd stage propellant
Sm(Bar)	11.6	10.0
EM(%)	47.65	42.33
Er(%)	51.46	44.56
D(g/cc)	1.796	1.719
Hardness(shoreA)	64.0	64.0

※ Shore A(hardness testing machine) widely used to test common rubber. It is available in ASTM D240, JIS R7215 and so on.



Fig. 6. Fabricating process of dual pulse motor

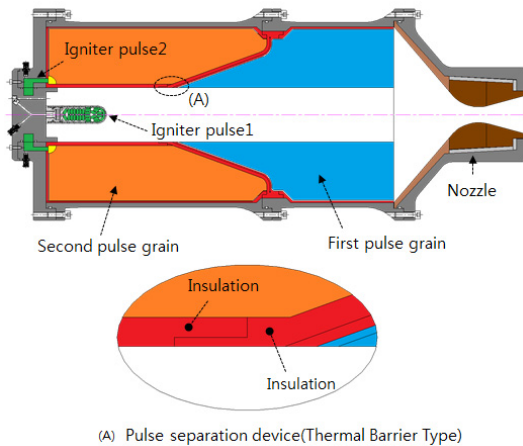


Fig. 3. Design of dual pulse motor with thermal barrier type PSD

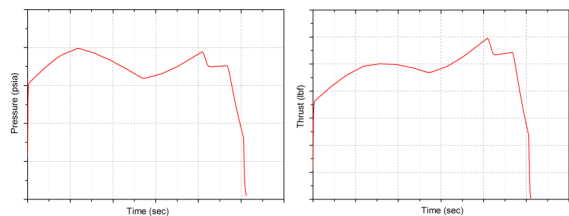


Fig. 4. P-T and T-T curves of 1st stage design

스모타 추진제 그레이인은 격막(내열소재)으로 둘러싸여 있는 구조이다. Fig. 4, 5는 성능설계를 통해 나타난 1, 2단 펄스모타의 압력/시간 및 추력/시간에 따른 프로파일을 보여준다. 1단 펄스 그레이인은 연소시간이 약 15sec 수준으로 평균압력이 1,000psi, 총역적은 30,000 lbf-sec이고 2단 펄스 그레이인은 연소시간이 약 9sec 수준으로 평균압력이 700psi, 총역적은 35,000lbf-sec로 각각 설계하였다. 이중펄스모타는 직경이 400mm인 형상으로 설계하였다. 격막 내열재 제작을 비롯한 이중펄스모타의 추진제 충전제 및 조립과정은 Fig. 6에 나타내었다.

2.2 지상 연소시험

2단 펄스모타 연소시 격막의 파열특성을 분석하기 위하여 Fig. 7과 같이 1단 펄스 그레이인을 배제하고 2단 펄스 그레이인만을 연소시켜 연소시험을 수행하였다. 이는 2단 점화기가 연소되면 2단 펄스모타 내부에 압력이 형성되며 이로 인하여 격막 소재가 파열되는 구조이다. 또한 Fig. 8과 같이, 1단 펄스모타는 추진제를 충전하고, 2단 펄스모타는 inert그레이인을 충전한후 1단 펄스모타 연소시험을 실시하였다. 이때 1단 펄스모타 연소시 격막 내열소재의 열적특성을 분석하기 위하여 격막 내부에 온도센서를 부착하여 내열소재의 온도변화를 측정하였다. 각 연소시험에 대하여 추력/압력은

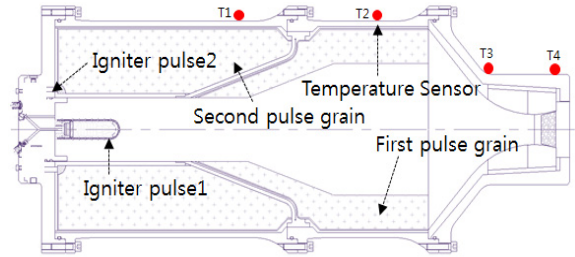


Fig. 9. Static Ground Test of 1st and 2nd Pulse Motor



Fig. 10. Ground Static Test

1채널, 온도센서는 격막 펄스분리장치를 대칭으로 10채널을 측정하였다. 위와 같이 1, 2단 단별 시험을 통하여 본 연구에서는 설계에 대한 1차 검증을 하였고, Fig. 9와 같이 연속시험(delay time : 2sec and 60sec)을 통하여 최종검증을 수행하였다. Fig. 10은 이중펄스모타의 지상연소시험 장면을 나타낸다.

3. 시험결과

2단 펄스모타 시험의 경우 Fig. 11에서와 같이 압력선도를 얻을 수 있었으며 Fig. 12와 같이 펄스분리장치 해체 후 격막내열재의 상태는 불규칙한 삭마경향을 나타내었다. 또한 1단 펄스모타 연소시 격막 내열재가 심하게 삭마되어 steel 부위가 노출되기도 하였다. 이는 연소와 동시에 격막 내열재가 전체적으로 노출 방향으로 파열되지 않아 불규칙한 연소가스 흐름에 의해 발생하는 현상으로 판단된다.

1단 펄스모타 시험결과 Fig. 13의 압력선도를 얻을 수 있었고, Fig. 14와 같이 격막 내부의 온도는 연소시

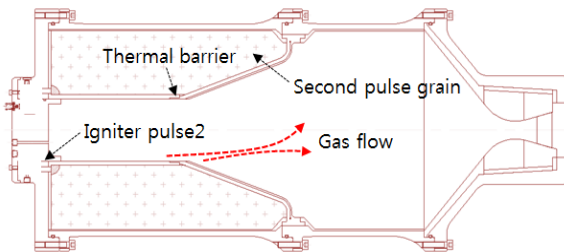


Fig. 7. Static Ground Test of 2nd Pulse Motor

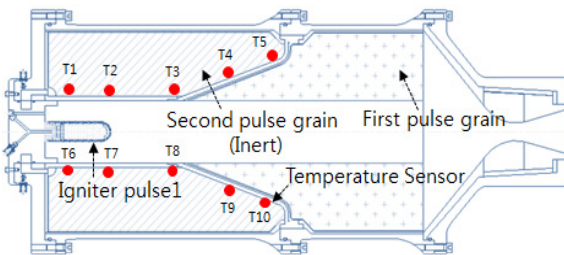


Fig. 8. Static Ground Test of 1st Pulse Motor

간 동안에는 온도상승이 없으나 140초 후에 120°C 이내의 값을 나타내는 것으로 분석되었다. 이는 보통의 추진제 발화온도(204~250°C)에 못미치는 온도로서 본

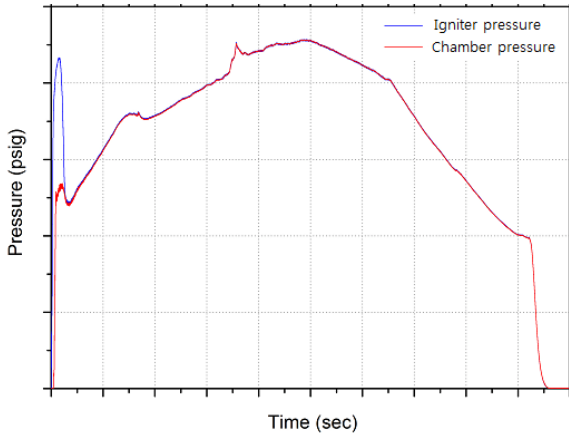


Fig. 11. P-T curve of test for 2nd pulse motor

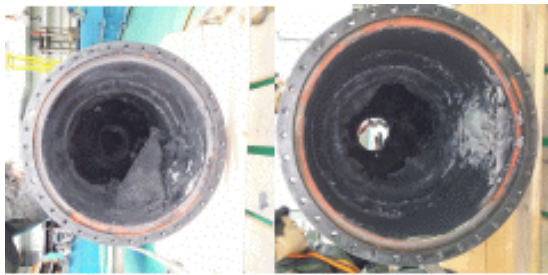


Fig. 12. Thermal barrier after test for 2nd pulse motor design

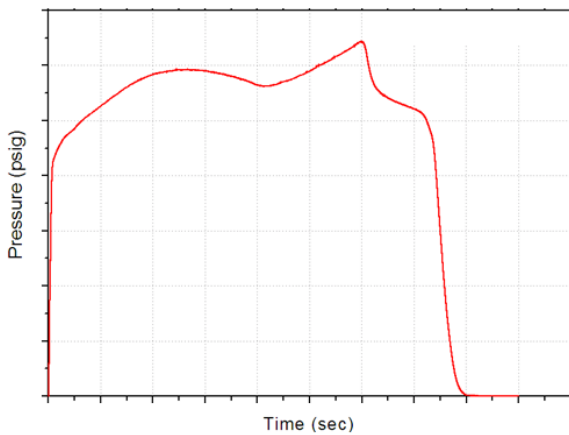


Fig. 13. P-T curve of test for 1st pulse motor

이중펄스모타에서는 안전한 수준으로 판단된다. 이러한 시험 및 분석 데이터를 바탕으로 연속시험을 실시하여 Fig. 15, 16(delay time : 2sec)와 Fig. 17, 18(delay time : 60sec)과 같은 압력과 추력선도를 얻을 수 있었다. 초기 추력이 높게 올라가는 것은 내부 격막 내열재가 떨어져 나가면서 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 19(delay time : 2sec)와 Fig. 20(delay time : 60sec)의 온도 데이터에서 볼 수 있듯이 펄스모타(delay time : 60sec)에서는 연소종료 후 2단 펄스모타 외부의 온도가 상당히 상승(T2 : max.230°C)하는 것을 알 수 있다. 이는 Slag와 불규칙한 유동현상으로 인하여 내열재가 상당부분 삭마된 것으로 보이며 결과적으로 연소실 스틸부위가 노출된 것으로 판단된다.

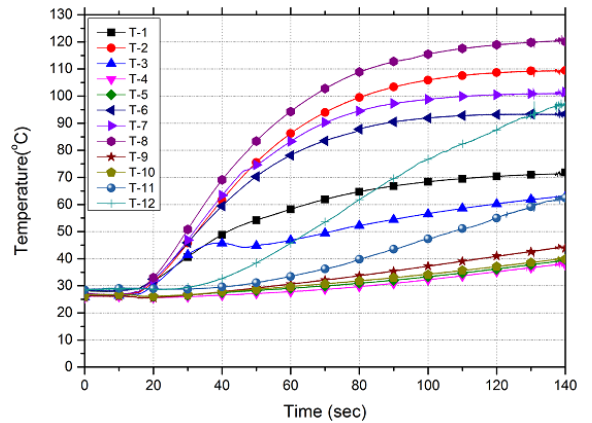


Fig. 14. Temperature sensor value of 1st pulse motor

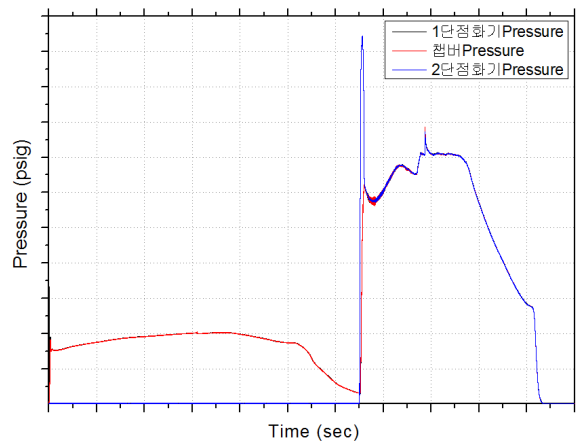


Fig. 15. Pressure curve of test for 1st/2nd pulse motor (delay time : 2sec)

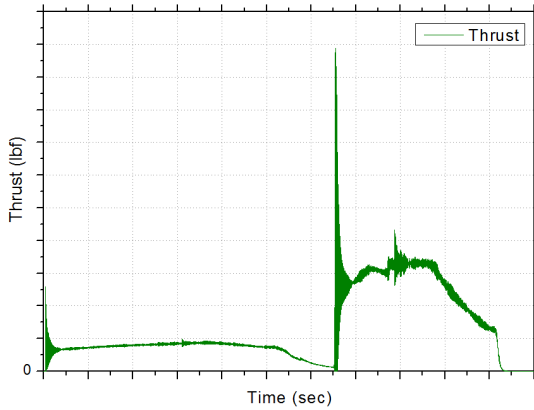


Fig. 16. Thrust curve of test for 1st/2nd pulse motor (delay time : 2sec)

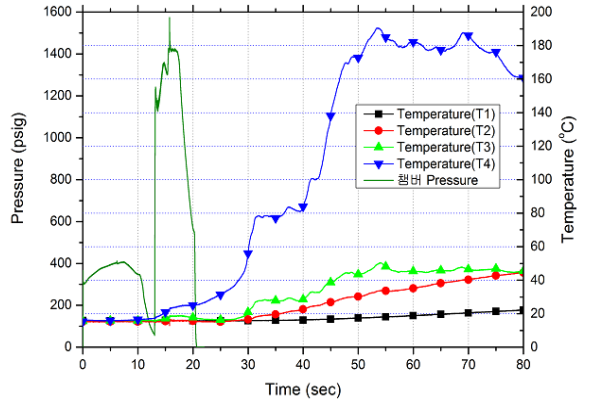


Fig. 19. Temperature history of 1st/2nd pulse motor (delay time : 2sec)

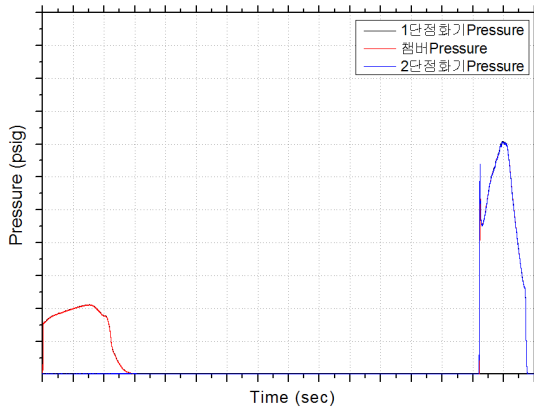


Fig. 17. Pressure curve of test of 1st/2nd pulse motor (delay time : 60sec)

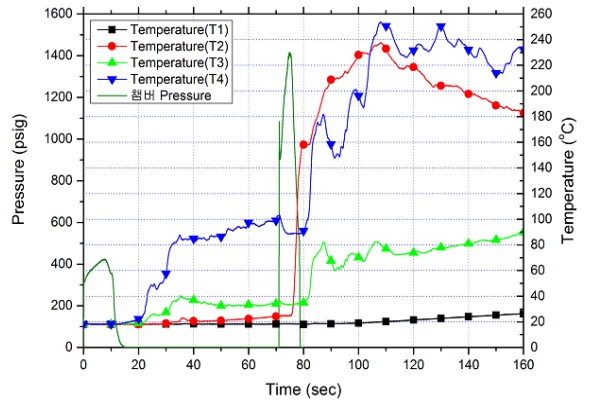


Fig. 20. Temperature history of 1st/2nd pulse motor (delay time : 60sec)

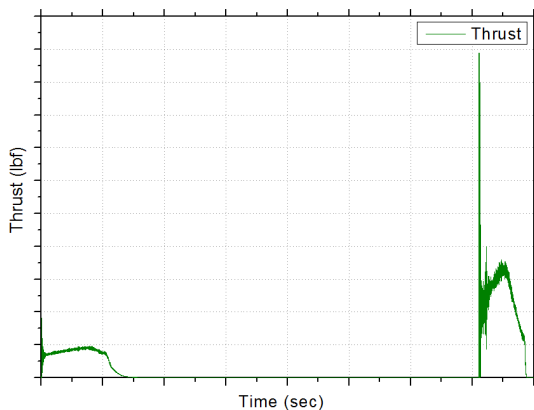


Fig. 18. Thrust curve of test of 1st/2nd pulse motor (delay time : 60sec)

연소 종료 후 각각의 펄스모타 연소실 및 격막 내 열재의 경우 Fig. 21(delay time : 2sec)과 Fig. 22(delay time : 60sec)에 나타난 형상과 같다. 원통부 격막은 삭마 또는 탄화되어 일부 또는 전체가 떨어져 나가는 현상이 나타났고 경사부 격막은 연소 초기에 노즐 방향으로 펼쳐지면서 삭마되거나 후출된 것으로 판단된다. 또한 1단 펄스모타 연소실은 180도 부위에 Slag가 묻쳐 쌓여 있어 내열재 삭마량이 증가하였으며 노즐수렴부 근접부위는 국부적으로 연소실 스틸부위가 노출되어 있는 것으로 분석되었다. 이는 연소시 추진체에 포함되어있는 금속입자가 산화되어 노즐을 통해 바깥으로 빠져나가지 못하고 연소 말기까지 펄스모타 내부에 존재하다가 밀부분(180도부위)으로 쌓여 발생한 것으로 판단된다.



Fig. 21. Ablation of the pulse motor case and PSD after test of 1st/2nd pulse motor(delay time : 2sec)



Fig. 22. Ablation of the pulse motor case and PSD after test of 1st/2nd pulse motor(delay time : 60sec)

4. 결론

본 연구에서는 1단 펄스모타의 경우 연소시간이 약 15sec 수준, 총역적은 30,000lbf-sec이고 2단 펄스모타는 연소시간이 약 9sec 수준, 총역적은 35,000lbf-sec로 각각 설계하여 시험평가를 실시하였다. 직경 400mm 수준인 이중펄스모타에 적용가능한 격막형 펄스분리장치를 설계하였으며 결과적으로 격막 펄스분리장치는 적절한 압력(200psi 이하)에서 파열되어 연소시험을 성공적으로 완료하였다. 또한 1, 2단 펄스모타를 연속적으로 연소(delay time : 2sec and 60sec)를 수행하여 격막형 이중펄스모타의 설계에 대해 검증하였고, 향

후 F-type 이중펄스모타를 설계할 때 기초 자료로 활용가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Stadler, L. J., Trouillot, P., et al., "The Dual Pulse Motor for LFK NG," AIAA, 2006-4762.
- [2] Naumann, K. W., Stadler, L. J., "Double-Pulse Solid Rocket Motor Technology-Applications and Technical Solutions," AIAA, 2010-6754.
- [3] Schilling, S., Trouillot, P., et al., "On the Development and Testing of a 120 mm Caliber Double Pulse Motor(DPM)," AIAA, 2004-3387.
- [4] Kong, J. A. et al., "Multimission Propulsion Technology-Advanced Technology Demonstration (MMPT-ATD) Final Program Summary of Test Results and Conclusions," CPIA, Pub. 630, 1995.
- [5] Cho, W. M., Kim, W. H., et al., "Study on Pulse Separation Device of Bulkhead Type for Solid Rocket Motors," KSPE Spring Conference, pp. 187-190, 2009.
- [6] Naumann, K. W. et al., "Double-pulse Solid Rocket Technology at BAYERN-CHEMIE/PROTAC," AIAA, 2006, 2006-4761.
- [7] Kim, J. Y., Rho, T. H., et al., "The Case Thermal Design of Dual Pulse Rocket Motor with Bulkhead Pulse Separation Device," KIMST Conference, 2011.
- [8] Ryu, J. H., Lee, W. B., et al., "Design, Manufacture and Test of Subscale Solid Rocket Motor with Pulse Separation Device," KSPE Spring Conference, 2010.
- [9] Kim, W. H., Lee, B. E., et al., "Study on the Technical Trend of a Pulse Separation Device with Thermal Barrier Type," KSPE Fall Conference, pp. 225-228, 2010.
- [10] Kim, J. Y., Kwon. T. H., et al., "Study on the Pulse Separation Device with Thermal Barrier Type for Dual Pulse Motor(I)," KSPE Spring Conference, pp. 10-13, 2013.
- [11] Kim, J. Y., Kwon. T. H., et al., "Study on the Pulse Separation Device with Thermal Barrier Type for Dual Pulse Motor(II)," KSPE Fall Conference, pp. 204-207, 2013.