

## 키크모터 점화기 개발 및 성능 시험

고현석\*, 길경섭\*\*, 김병훈\*\*\*, 조인현\*\*\*\*

### Development and Performance Test of the Kick Motor Igniter

Hyeonseok Koh\*, Gyoung-Sub Kil\*\*, Byung-Hun Kim\*\*\*, In-Hyun Cho\*\*\*\*

#### Abstract

A pyrogen type igniter was designed to satisfy the requirements of KSLV-I Kick Motor system. To insure the reliability of the igniter before the production of the flight model, we have been performed the structure, environmental, combustion tests. The hydraulic test was carried out to confirm the strength of the components of the igniter. The shock and vibration tests were considered to check whether the igniter operates normally under the severe environmental condition. The combustion tests were also performed to understand the ignition characteristics with the variation of initial condition. Finally, we confirmed that the igniter could provide the acceptable energy to ignite the propellant of kick motor at the ground test.

#### 초 록

파이로젠 형 점화기를 KSLV-I 키크모터 시스템 요구 조건을 만족하도록 설계하였다. 비행 모델 제작에 앞서 신뢰성을 확보하기 위해 구조시험, 환경시험, 연소시험을 수행하였다. 점화기 구성품들의 구조적 강도를 확인하기 위해 수압 시험을 수행하였다. 극심한 환경 조건에서 점화기가 정상적으로 작동하는 지를 확인하기 위해 충격 및 진동 시험을 고려하였다. 그리고 초기 조건의 변화에 따른 점화 특성을 이해하기 위해서 연소시험을 수행하였다. 최종적으로 지상 시험을 통해 키크모터 추진제를 점화시키기에 충분한 에너지를 공급할 수 있다는 것을 검증하였다.

키워드 : 키크모터(kick motor), 점화기(igniter), 수압시험(hydraulic test), 환경시험(environmental test), 연소시험(combustion test), 지상시험(ground test)

#### 1. 서 론

점화기의 주 기능은 키크모터의 주 추진제를 연

소시키는 것이므로 이에 부합하는 에너지를 전달해야 한다. 점화 시 안정적인 에너지 공급이 가능한 파이로젠 형(pyrogen type)의 점화기를 설계하였으며 착화기(initiator), 보조 장약(booster

\* 추진제어팀/hkoh@kari.re.kr

\*\*\* 추진제어팀/bhk@kari.re.kr

\*\* 추진제어팀/kgs@kari.re.kr

\*\*\*\* 추진제어팀/ihcho@kari.re.kr

charge), 주 장약(main charge)으로 연쇄 점화를 하는 expulsive train으로 구성하였다.

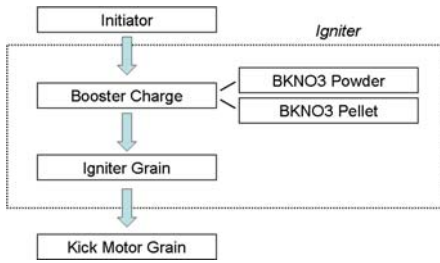


그림 1. 점화 연쇄 절차

점화기의 설계는 경험식 및 관련 자료를 기준으로 용량을 결정한 후 내탄도 해석 및 점화지연시간을 예측하였다. 구조시험, 환경시험, 연소시험을 통해 설계된 점화기의 신뢰성을 확보하였다.

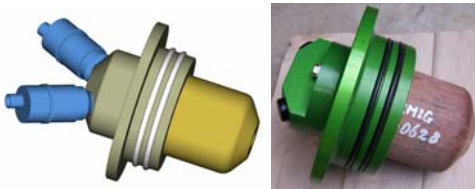


그림 2. 점화기 설계 형상 및 제작 후 사진

## 2. 본 론

### 2.1 점화기 제작 공정

점화기는 그림 3과 같은 공정을 거쳐 제작한 후 개발, 인증시험을 수행하였고 지상시험 및 EM, QM 등으로 납품하고 있다. 그리고 개발과정에서 구조시험, 환경시험, 연소시험을 진행하여 요구조건을 1차적으로 만족하였다.

구조시험으로는 제작과정에서 각 부품에 대한 인증 차원에서 수압시험을 수행하고 있으며 추진제를 충전한 후에 NDT 검사, 최종 점화기 조립 후에 기밀시험을 수행하고 있다. 환경시험으로는 진동, 충격시험을 진행하여 통과하였고 비활성

챔버를 이용하여 진공 환경에서 성능 검증을 수행하였다. 연소시험으로는 점화안전장치 연계시험을 통해 점화성능을 점검하였고, 실물형 지상 연소시험을 통해 점화지연시간의 요구조건을 만족하는지를 판별하고 있으며, 향후 고고도 연소 시험에 적용할 예정이다. 연소관과의 체결 후 기밀시험은 현재 제작 공정 상 어려움이 있으며 대신 점화기 자체의 기밀시험과 연소관-노즐 조립 후의 기밀시험으로 대체하고 있다. 점화기는 시험, 납품 이외에 점화구동부 신뢰성을 높이기 위한 환경시험 및 성능시험을 지속적으로 계획하고 있다.



그림 3. 점화기 제작 공정

점화기는 내부에 추진제가 충전되어 있고 점화 시 충격이 상당하기 때문에 환경시험을 위해서는 방폭 설비가 필요하다. 국과연이나 한화 공장 등이 방폭 설비를 갖추고 있으나 일정 및 설비 규격 문제로 시험에 어려움이 많은 실정이다. 현재까지 진행된 점화기 주요 환경시험 결과는 표 1과 같다.

**표 1. 점화기 인증시험 진행 결과**

항목	내용	결과	비고
진공	10~20 Torr (대전산화) 추진제 연소 확인	Pass	점화 성능 확인
충격	반정현파: 50g, 11ms (국과연)	Pass	점화기 이상 유무 확인
진동	랜덤(AT): 12grms 정현(QT): 5~2000Hz, Disp. 10mm/12g (국과연)	Pass	점화기 이상 유무 확인

## 2.2 점화기 수압시험

점화기의 경우 수압시험은 연소관 케이스와 헤드 두 부품에 대해서 수행한다. 추진제를 충전해야 하기 때문에 연소관 케이스는 충전하기 전에 별도로 수압시험을 수행한다. 점화기 헤드와 점화기 연소관을 연결한 후 수압시험을 할 경우 연소관이 연결되는 헤드 안쪽 부분에 대해서만 기밀 및 내압 특성을 확인할 수 있다. 하지만 개발 과정에서는 헤드 안쪽 부분보다 KM 연소관 전방 보스와 연결되는 헤드 오링부에서의 기밀 및 내압 특성이 더욱 중요하다. 따라서 점화기 헤드는 알약 컵과 내열재 등을 조립하기 전에 점화기 연소관을 모사할 수 있는 치구에 연결하고 수압시험을 수행하게 된다.

수압시험 중 구조물의 변형 정도를 확인하기 위하여 스트레인 게이지를 점화기 구조물에 부착하였다. 2축 3선식의 일반용 게이지를 총 2곳에 부착하여 축 방향과 원주 방향의 변형률을 측정하였으며 그 위치는 다음 표 2, 3과 같다.

**표 2. 점화기 연소관 케이스부 변형률 센서 목록 및 측정 위치**

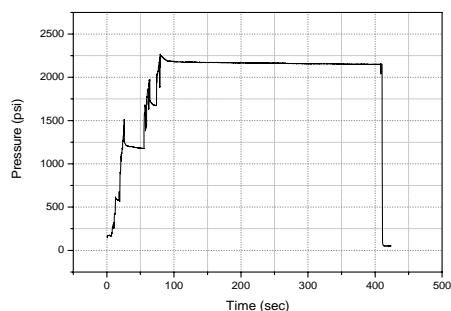
CH	측정위치	센서타입
1	점화기 연소관 실린더 축방향	2축, 3선식,
2	점화기 연소관 실린더 원주방향	일반용
3	점화기 연소관 돔 부 축방향	"
4	점화기 연소관 돔 부 원주방향	

**표 3. 점화기 헤드부 변형률 센서 목록 및 측정 위치**

CH	측정위치	센서타입
1	헤드 절삭부 반경방향	2축, 3선식, 일반용
2	헤드 절삭부 원주방향	
3	연소관 체결부 반경방향	"
4	연소관 체결부 원주방향	

스틸 재질의 연소관 케이스는 현재 전체 납품된 수량 중 일부만을 샘플링하여 검사하고 있다. 이러한 샘플링 검사방법은 수압시험으로 인한 케이스 구조물의 외관 손상을 줄이고 지금까지 수행한 수압시험결과를 바탕으로 샘플링하여 검사해도 충분하다고 판단하였기 때문이다.

연소관 수압시험의 경우 2040psi 이상으로 가압한 상태에서 2분 이상 압력을 유지하며 누설 및 특이사항을 확인한다. 그리고 게이지를 이용하여 측정된 변형률을 통해 구조물의 안전성을 확인한다. 점화기 연소관 27호기 수압시험에서는 2269psi로 가압하였을 때 최대 변형률은 연소관 실린더 원주 방향으로 823 $\mu\epsilon$ 이었다.


**그림 4. 점화기 연소관 수압시험**

**그림 5. 점화기 연소관 케이스부 압력 변화**

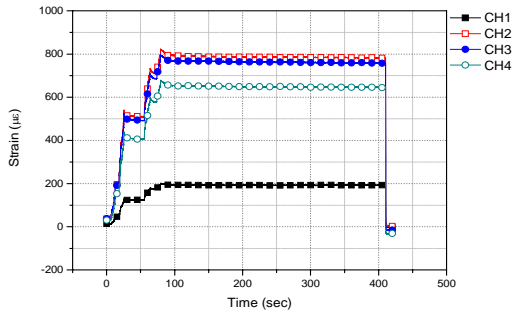


그림 6. 점화기 연소관 케이스부 변형률 변화

헤드 수압시험의 경우 2040psi까지 가압한 상태에서 2분간 압력을 유지하였으며 누설 및 특이 사항은 발견되지 않았다. 게이지를 이용하여 측정된 변형률은 연소관 전방 보스에 체결하는 부분에서 반경 방향으로 최대 1650 $\mu\epsilon$ 이었다. 수압 시험 결과 제작한 점화기는 구조적으로 문제가 없다고 판단하였다.



그림 7. 점화기 헤드 수압시험

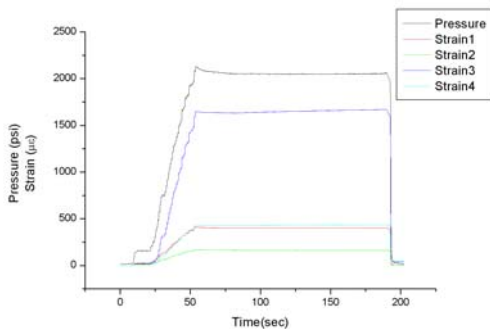


그림 8. 점화기 헤드 압력 및 변형률 변화

### 2.3 점화기 환경시험

점화기에는 추진제가 충전되어 있기 때문에 진동 및 충격시험을 수행할 경우 방폭 설비가 필수적이다. 따라서 점화기의 진동 환경시험은 국방과학연구소의 설비를 이용하여 시험을 수행하였다. 점화기는 랜덤 진동과 정현 진동 두 항목의 진동시험을 실시하였고 3축 방향에 대하여 시험하였다. 랜덤 진동은 20~2000Hz에 걸쳐 12g에 해당하는 AT기준으로 수행하였으며, 정현 진동은 5~2000Hz의 QT기준에 맞추어 시행하였다. 그리고 반정현과 충격시험을 3축에 대하여 수행하였다.



그림 9. 점화기 진동시험

점화기의 진동시험과 충격시험 결과를 그림 10~12에 각각 나타내었다. 환경시험 후 점화기의 성능 저하 여부는 점화기-점화안전장치 연계시험을 통하여 확인하였다.

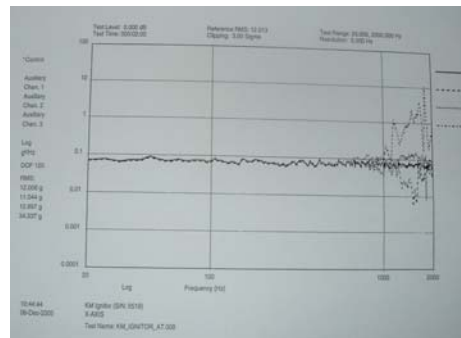


그림 10. 랜덤 진동(AT규격) 시험 결과

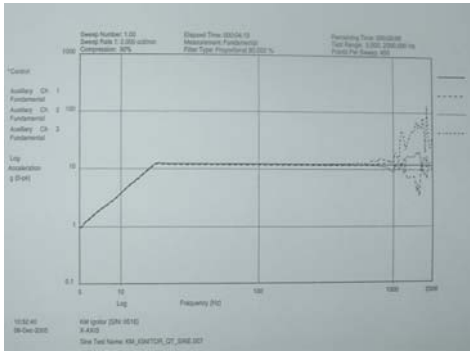


그림 11. 정현 진동(QT규격) 시험 결과

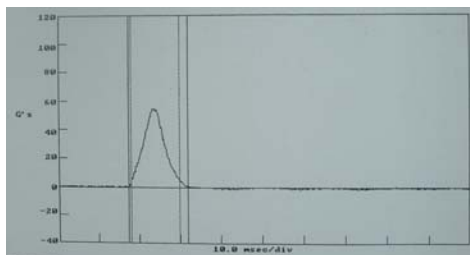


그림 12. 반정현파 충격시험 결과

점화안전장치 연계시험은 점화기에 1기의 점화안전장치를 연결하여 수행하였다. 이번 시험은 환경시험 후 점화기와 점화안전장치의 성능을 확인하기 위한 시험으로서 점화안전장치 32호기로 점화기 21호기를 착화시켰다. 점화기 노즐마개와 비활성 챔버 노즐마개를 모두 장착하였고 점화기에서의 압력과 비활성 챔버에서의 압력을 측정하여 점화 성능을 확인하였다.

점화기 21호기와 점화안전장치 32호기를 이용한 연계시험에서 측정된 압력을 그림 14에 표시하였다. 점화기의 압력 변화를 보면 45ms에 221.4psia까지 상승한 후 약간 떨어졌다가 66ms에 1723.7psia까지 올라간 후 0.3초 정도 1000psia로 유지되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 0~45ms의 구간에서는 점화기의 압력이 200psia 이상까지 상승하는 구간이고, 45~66ms에서는 점화기 마개가 터지고 압력이 약간 떨어지지만 추진제의 연소로 점화기의 압력은 1700psia까지 지속적으로 올라가고 비활성 챔버의 압력도

50psia 부근까지 증가하는 구간으로 볼 수 있다. 66ms 이후에는 비활성 챔버의 노즐 마개가 떨어져 나가면서 점화기의 압력이 떨어지고 비활성 챔버의 압력은 50~60psia로 0.3초 이상 유지되는 것을 알 수 있다. 따라서 점화안전장치와 점화기는 환경시험을 겪고 난 이후에도 KM을 정상 점화시킬 수 있는 성능을 발휘하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

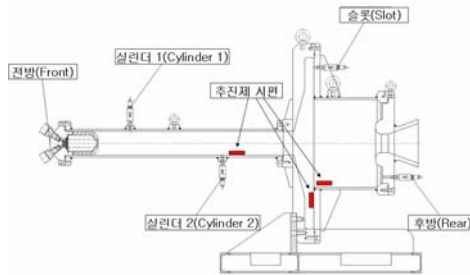


그림 13. 비활성 챔버 구성

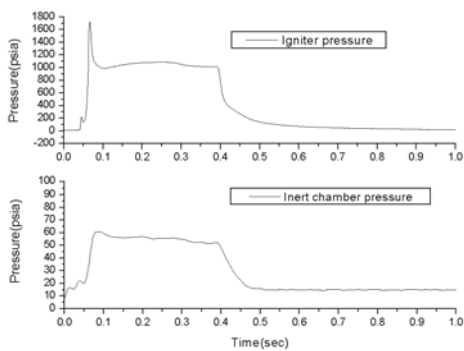


그림 14. 점화기-점화안전장치 연계시험 시 압력 변화

## 2.4 점화기 성능시험

점화기 성능시험은 외부 조건에서 동일한 규격을 갖고 있는 점화기 5기(9호기~13호기)를 시험하였다. 점화기 9호기와 10호기는 노즐 마개 유무에 따른 챔버 압력상승을 측정하기 위해 추진제 시편을 부착하지 않고 시험을 하였다. 노즐 마개가 챔버 압력 형성에 주는 효과가 어느 정도

되는지 판단하기 위한 시험으로 노즐 마개가 예기치 못한 사고로 제 기능을 하지 못하였을 때를 가정한 시험이다.

키크모터 추진체의 점화는 점화기로부터 추진체로 전달되는 압력과 열량에 의해 결정되어진다. Arc-image 시험결과에 따르면 약 0.7psia이하에서는 열량과 상관없이 점화가 일어나지 않는 구간이 형성된다. 이 구간에서는 아무리 열량을 많이 전달하더라도 점화가 일어나지 않게 된다. 그리고 50psia이상에서는 압력이 증가하여도 점화 지연시간이 거의 변하지 않는 구간이 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 점화기로부터 충분한 열량(837369W/m<sup>2</sup> 이상)을 공급 받는다는 가정하에 추진체 표면으로 압력이 14.5psia(1bar) 이상 200msec동안 공급 되면 정상 점화될 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서 노즐 마개가 없을 경우에도 점화기가 설계점(1bar) 이상의 압력과 열량을 추진체에 점화지연시간 이상동안 공급하면 정상 점화가 가능하다.

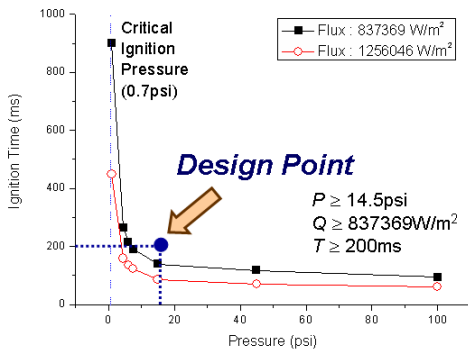


그림 15. 열유속에 따른 Arc-image 시험

점화기 11~13호기는 점화기 노즐 마개 및 키크모터 노즐 마개의 누설이 발생하여 내부압력이 대기압 보다 적을 경우에도 추진체를 정상 점화시킬 수 있는지 판단하기 위해 시험을 수행하였다. 정상 점화를 위해서는 추진체에 1bar 이상의 압력과 자동점화온도에 도달하기 위해 필요한 열량을 공급할 수 있어야 한다. 압력 상승은 압력 센서로 측정하였고, 자동점화온도에 도달하는 지여부는 비활성 챔버 안에 장착한 추진체 시편의

연소 여부로 확인하였다. 키크모터 내부의 압력에 따른 점화기 성능시험조건은 표 4와 같다.

표 4. 점화기 시험조건

	점화기 노즐마개	챔버 노즐마개	추진체	초기 챔버 압력
9호기	○	○	×	1bar
10호기	○	×	×	1bar
11호기	○	○	○	1bar
12호기	○	○	○	10torr
13호기	×	○	○	20torr

### 2.4.1 외부 환경에 따른 점화기 내부 압력 특성

점화기 외부 환경에 따른 점화기 내부압력 특성을 살펴보기 위해 점화기 11~13호기의 내부압력을 그림 16에 도시하였다. 점화기 외부 환경은 표 4에 나타난 바와 같이 비활성 챔버의 초기 압력을 3가지로 변화시켰다. 13호기의 경우 점화기 노즐마개를 제거하여 점화기 내부까지 진공상태에서 시험을 수행하였다.

점화기 내부 압력은 초기 0~150msec에는 뚜렷한 압력 차이를 보이고 있지만, 주 추진체가 연소하는 150 msec 이후에는 11, 12, 13호기가 비슷한 압력 형상을 보이고 있다. 초기 압력은 12호기가 가장 높고, 13호기는 1200psi 정도 밖에 올라가지 않았다. 13호기는 점화기 노즐 마개 없이 점화기 내부가 진공인 상태에서 시험했기 때문에, 초기에 점화기 내부에서 연소가스가 노즐로 빠져나가 압력을 제대로 형성해주지 못하여 11, 12호기에 비해 초기 압력이 낮은 것으로 보인다. 12호기가 11호기보다 초기에 압력이 높은 이유는 단순한 시험 오차인지, 환경에 따른 요인인지 더 고찰할 필요가 있다. 따라서 점화기 내부 압력상승은 점화기 노즐 마개 파열 압력에 따라 매우 민감하게 변화하는 것을 알 수 있으며, 비활성 챔버의 초기압력에 따라서는 판단하기 어렵다.

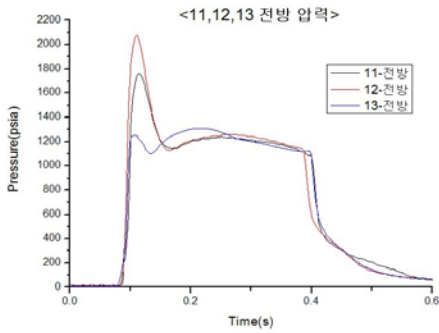


그림 16. 점화기 내부 압력 변화

### 2.4.2 노즐마개 유무에 따른 비활성 모터 압력특성

비활성 챔버의 노즐마개 유무에 따라 챔버 내 압력변화를 살펴보기 위해 표 4와 같은 조건에서 두 번의 연소시험을 수행하였다. 그림 17을 보면 챔버 내 압력이 10호기가 9호기에 비해 대체적으로 10psi 정도 낮은 것을 알 수 있다. 이는 10호기가 챔버 노즐 마개가 없는 상태에서 시험했기 때문에 9호기에 비해 초기 챔버 내부 압력 형성에 불리했던 것으로 보인다. 하지만 arc-image test data 기준으로 볼 때 노즐 마개가 없을 때에도 14.5psia 이상으로 압력이 상승하여 약 0.3sec 동안 유지하는 것으로 볼 때 현재 설계된 점화기는 고고도 환경에서도 킥모터를 점화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

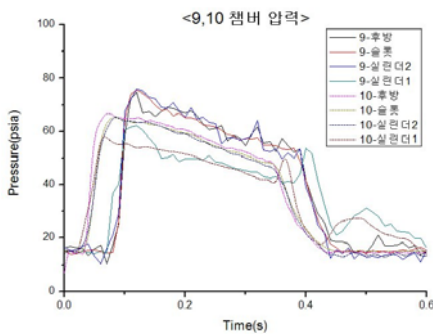


그림 17. 비활성 챔버 압력 변화

## 3. 지상시험 결과

### 3.1 압력 계측 결과

압력 센서로부터 계측한 압력 결과로부터 주요 계측값을 표 5에 비교하였다. GT 2-1호기의 경우 점화신호 인가 후 0.273초일 때 점화기의 최고 압력이 90.0bar로 나타났으며 0.593초 이후에는 점화기의 연소가 끝나고 연소관만의 압력을 측정하였다. 점화기 최고 압력은 내탄도 해석 결과치인 82.0bar에 비해서 9.8%정도 높게 나타났다.

표 5. 지상시험 시 주요 압력 계측값

구분	GT #1		GT #2		GT #2-1	
	Time (sec)	P (bar)	Time (sec)	P (bar)	Time (sec)	P (bar)
점화기 최고압력	0.300	86.2	0.293	85.1	0.273	90.0
점화기 연소 종료 후 연소관압력	0.631	58.7	0.622	55.8	0.593	59.0
연소관 최고압력	13.0	70.6	11.6	67.8	12.1	72.4

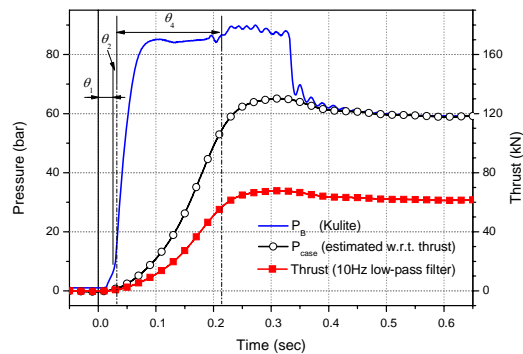


그림 18. 추정 연소관 압력과 점화지연시간 (GT #2-1)

점화지연시간을 구하기 위해 각 단계를 측정

한 압력, 추력 곡선으로부터 다음과 같이 정의하였다. 내탄도 해석 시 사용했던 연소관의 설계압력(60.3bar)과 측정된 점화기 최고 압력을 기준값으로 사용하였다.

- $\theta_1$ (1단계) : 점화기 최고 압력의 10% 도달시간
- $\theta_2$ (2단계) : 고속카메라로부터 획득한 노즐마개 파열시간
- $\theta_3$ (3단계) : 노즐마개 파열 후 주 추진제 연소 직전 시간 ( $\theta_3=0$ 로 가정)
- $\theta_4$ (4단계) : 추정 연소관 압력이 연소관 설계 압력의 90%에 도달하는 시간

표 6. 각 단계별 점화지연시간

초기챔버압력		$\theta_1$ (ms)	$\theta_2$ (ms)	$\theta_3$ (ms)	$\theta_4$ (ms)	점화지연 시간 (ms)
내탄도 계산결과	진공	15	32	0	145	192
	1bar	15	40	0	130	185
GT #1		24	48	0	157	229
GT #2		22	26	0	188	236
GT #2-1		27	5	0	182	214

GT 2-1호기 시험 시 고속카메라에서 측정된 노즐마개 파열 시간은 점화 신호 인가 후 32ms가 지나서였으며 점화지연시간은 214ms였다. 따라서 추정 연소관의 압력 변화를 이용하여 계산하였을 때 점화 지연 시간은 350ms 이내로 점화기 성능 요구사항을 충분히 만족하는 것으로 볼 수 있다. 그리고 GT 1호기, 2호기 시험 결과와 비교하였을 때 7~10% 정도 빨라지기는 하였으나 큰 차이를 보이지 않고 있다. 한편 '점화신호가 인가된 후부터 KM 연소 압력이 750psia (51.7bar)에 도달하는 시간'을 점화지연시간으로 정의할 경우, 추정 연소관 압력을 참고로 하여 계산한 점화지연시간은 GT 1호기는 222ms, GT 2호기가 221ms, GT 2-1호기가 207ms로 계산할 수 있었다.

### 3.2 온도 및 변형률 계측 결과

GT 2-1호기 연소시험 과정 중 점화기 헤드의

온도 변화를 측정하기 위하여 PT 100 $\Omega$  접촉식 RTD 센서를 점화기 헤드에 부착하고 10Hz로 데이터를 수집하여 점화기 헤드에서 일어나는 열전달 특성을 파악하였다.

GT 1호기에 적용한 점화기는 19호기로서 티타늄으로 헤드를 제작하였다. 헤드 표면의 온도 변화는 연소관 쪽과 가까운 헤드 표면에서 측정하였다. GT 2호기(점화기 18호기), 2-1호기(점화기 16호기)에 적용한 점화기는 무게 감량을 위해 헤드 일부를 절삭하여 형상을 변경하였다. 이 때 형상 변경 후 온도 특성의 변화를 측정하기 위해 1호기보다 연소관 쪽으로 가까운 절삭부 안쪽으로 온도센서를 부착하여 헤드 온도 변화를 파악하였다. GT 1호기에서 점화기 헤드 표면의 최대 온도는 점화 후 300 초 동안 초기 온도에서 13.8 $^{\circ}\text{C}$ 만큼 상승하였다. GT 2호기에서는 정상적으로 계측이 이루어진 33.5초까지 표면 온도는 16.1 $^{\circ}\text{C}$  상승한 것으로 나타났다. GT 2-1호기의 경우는 점화 신호 인가 후 66.9초에 30.1 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였다가 표면 온도가 잠시 내려가 이후 300초 이후에는 초기온도에서 24.1 $^{\circ}\text{C}$ 상승한 것으로 나타났다.

표 7. 지상시험 시 점화기 헤드 최대 온도 변화

	GT #1	GT #2	GT #2-1
최대 온도 상승 ( $^{\circ}\text{C}$ )	13.8	16.1	30.1
시간 (sec)	300	33.5	66.9

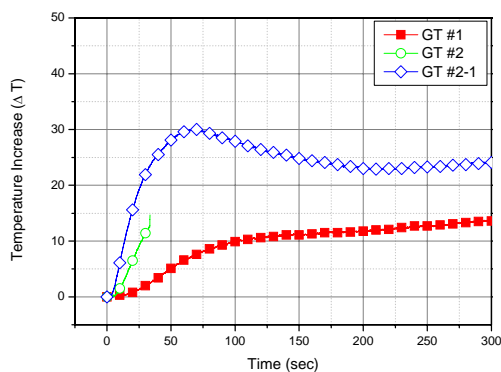


그림 19. 점화기 헤드 온도 변화 비교



GT 2호기 이후에는 GT 1호기에서 무게를 줄이기 위해 형상을 변경한 점화기를 사용하였다. 이러한 형상 변경에 따른 구조적 안정성을 확인하기 위하여 변형률센서를 부착하여 점화 구동부에서 일어나는 구조 특성을 파악하였다.

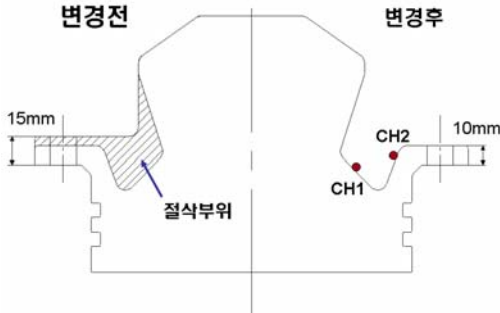


그림 20. 점화기 헤드 형상 변경

표 8. 지상시험 시 점화기 헤드 최대 변형률 변화

CH	측정위치	GT #2	GT #2-1
1	헤드 절삭부 180도 (반경방향)	-191.0 $\mu\epsilon$ (11.0s)	567.4 $\mu\epsilon$ (14.3s)
2	연소관 연결부 0도 (반경방향)	329.2 $\mu\epsilon$ (10.2s)	620.3 $\mu\epsilon$ (14.4s)

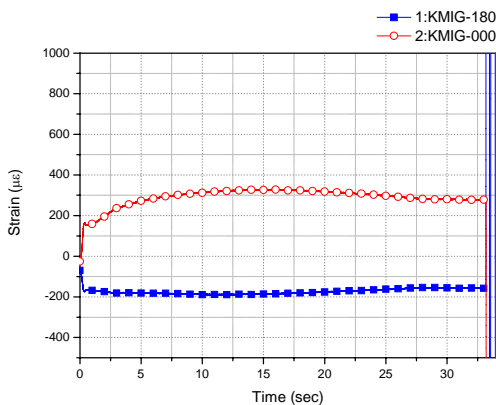


그림 21. GT 2호기 점화기 헤드 변형률 변화

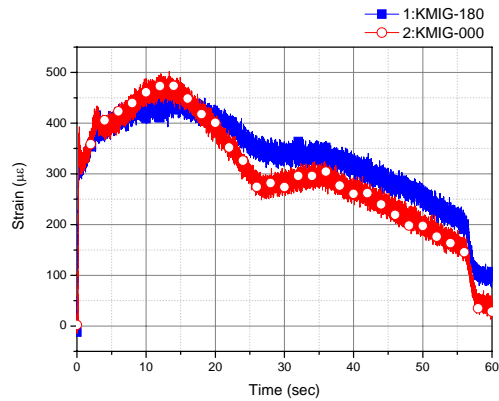


그림 22. GT 2-1호기 점화기 헤드 변형률 변화

점화기 헤드의 변형률 특성은 연소관 전방돔 체결부 근방(CH2)에서 크게 나타났으며 절삭부(CH1)의 경우 약간 낮게 나타났다. 그리고 연소 시험 중 두 위치에서 모두 인장을 받는 것으로 나타났다. 절삭부의 경우 GT 2호기에서는 압축을 받는 것으로 나타났지만 GT 2-1호기에서는 인장을 받는 것으로 나타났다. 절삭부의 경우 수압시험에서도 18호기(GT 2호기 적용)의 경우 약한 압축, 16호기(GT 2-1호기 적용)의 경우 약한 인장을 받는 것으로 나타났다. 따라서 GT 2-1호기 지상연소시험에서는 UD보강을 통해 연소관 전방돔이 GT 2호기보다 인장을 강하게 받으면서 점화기 헤드가 인장을 더 받게 되었고 절삭부에도 인장을 받게끔 영향을 미친 것으로 생각된다.

### 3.3. 삭마 특성

점화기의 제작이 완료된 후 무게를 측정하고 지상연소시험이 종료된 후 무게 변화를 측정하였다. 지상연소시험 후 점화기 무게는 GT 1호기가 11.16kg에서 10.41kg으로, GT 2-1호기는 9.08kg에서 8.33kg으로 동일하게 750g 정도 줄어들었다. 무게 감소 요인으로는 추진제 및 보조장악의 연소, 스티로폼 마개 및 노즐 마개 파열, 외부내열재 탄화 부분 등을 들 수 있다. GT 2호기 지상연소시험에서는 정상 연소 종료가 이루어지지 않아 무게 측정은 수행하지 않았다.

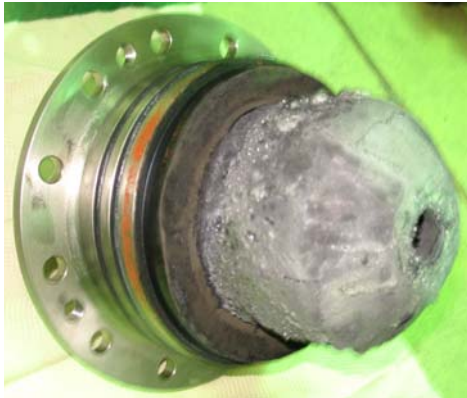


그림 23. GT 2-1호기 시험 후 점화기 형상

점화기 케이스 조립체에 적층된 슬래그(Slag)를 탄화된 외부내열재와 함께 제거한 후 점화기를 90°-270° 면을 따라 1/2로 절개하여 내부 구성품의 연소시험 후 이상 유무 및 삭마 특성을 살펴보았다.

GT 2-1호기 지상연소시험 후 점화기 각 구성품을 육안으로 확인해 본 결과 GT 1호기의 삭마 특성과 유사하게 나타났다. 외부내열재는 헤드내열재 안쪽 부분은 표면에 변형이 보이지 않는 것으로 연소 시 거의 영향을 받지 않은 것으로 보인다. 그리고 후방실린더 및 노즐 부 뚝쪽은 화염에 직접 노출되어 상당부분 탄화되었다. 헤드내열재는 일부 삭마가 되었으나 상당부분이 남아 있으며 헤드 및 연소관 등 금속 부품에 열에 의한 변형 및 파손 등은 발견되지 않았다. 오링은 열에 의해 변형되거나 파손되지 않고 연소시험 중 기밀을 정상적으로 유지하였다.

점화기 헤드내열재의 연소시험 후 두께를 살펴보면 GT 1호기와 비교하였을 때 3~5mm 정도로 다소 삭마가 많이 되었다. 정확한 결과를 알기 위하여 버니어캘리퍼스로 헤드내열재 바깥쪽부분, 안쪽부분을 각각 30도 간격으로 측정하였다.

평균값을 비교하여 보면 안쪽부분 삭마량이 바깥쪽부분 삭마량보다 GT 1호기, 2-1호기 각각 0.14, 1.4mm 씩 크게 측정되었다. 측정상의 어려움으로 바깥쪽과 안쪽부분만을 측정하였지만, 실제로는 가운데 부분이 가장 많이 삭마되었고, 그

양은 1~2mm 정도였다. 각도별로 삭마량을 비교하여 보면 GT 1호기에서는 0°부근에서 삭마가 많이 되었으나 GT 2-1호기에서는 180°부근에서 삭마가 많이 되었다.

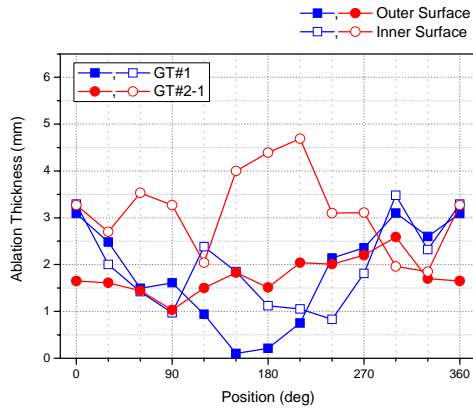


그림 24. 점화기 헤드내열재 삭마량 비교

연소관 충전체의 케이스는 절개단면이 깨끗하고 금속 본래의 색을 가지고 있는 것으로 보아 연소 시 영향을 거의 받지 않은 것으로 판단된다. 외부내열재의 경우는 삭마 특성을 파악하기 위해 숯 층의 두께를 측정하였다.

외부내열재 중에서 탄화되지 않고 연소 후에도 원형을 보존하고 있는 층(Virgin Layer)과 숯 층은 그림 25와 같은 분포를 보인다. 여기서 탄화된 층의 두께는 내열재 표면에 붙어 있는 슬래그를 제거한 후 남아 있는 부분만을 측정하였다.

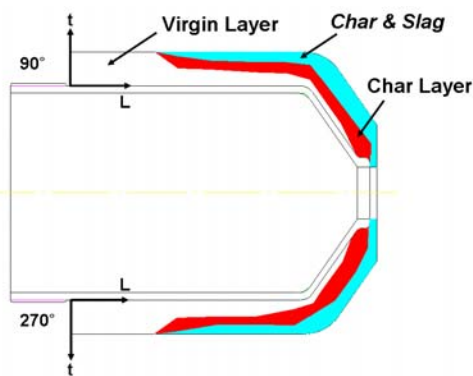


그림 25. 연소시험 후 외부내열재 삭마 특성

외부내열재의 두께는 설계치가 14mm로, 점화기 헤드에 감싸이는 35mm 근방까지는 전혀 영향을 받지 않았다. 그 이후부터 연소관 내 추진제의 연소에 노출되어 원형을 보존하는 층의 두께가 점차 줄어들었고 실린더 끝단에서는 90° 면에서는 2.81mm, 270° 면에서 2.32mm까지 감소하였다. 그리고 후방 돔부분에서 노즐목에 이르는 구간에서는 외부내열재가 탄화되어 노즐 목에서는 숯 층만 2.6mm 두께로 남아있었다. GT 2-1 호기 연소관 외부내열재는 GT 1호기와 비교하여 원형이 남아있는 정도를 고려해 볼 때 거의 유사한 정도로 삭마되었다고 볼 수 있다.

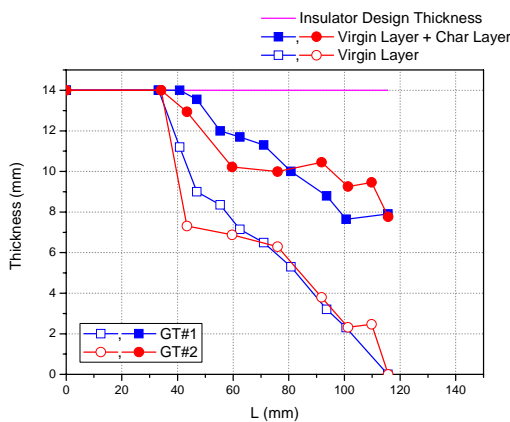


그림 26. 점화기 연소관 외부내열재(270°) 삭마두께 변화

#### 4. 결 론

제작한 점화기의 성능을 확인하기 위하여 인증시험을 수행하고 지상시험을 통하여 최종적으로 요구조건을 충족하는 지를 확인하였다.

지상연소시험에서 측정된 압력-추력 특성을 통하여 GT 2-1호기를 기준으로 할 때 점화기 최고 압력은 90.0bar, 추정 연소관 압력으로부터 계산한 점화지연시간은 214ms로 요구조건인 350ms를 만족하였다. 형상을 변경하여 경량화한 티타늄 재질의 점화기 헤드는 연소 과정에서 표면 온

도가 점화 후 66.9초에 초기 온도에서 30.1℃까지 높지 않게 상승하였다. 연소 중 최고 변형률은 620.3με이하로 연소 과정에서 약한 인장을 받는 것으로 나타났다.

지상연소시험 후 점화기 연소관과 티타늄 헤드는 내, 외부는 물론이고 절개 단면 또한 형태 및 조직 상태 등이 잘 유지되어 있었으며 가스켓, 리테이너, 알약캡 등도 시험 전 형태를 그대로 유지하고 있어 연소가스로부터 큰 영향을 받지 않았다.

점화기는 제작 및 인증시험, 지상시험을 통하여 킥모터의 추진제를 정상 점화할 수 있음을 확인하였다. 비행모델 제작에 앞서 향후 수차례의 지상시험과 고고도시험을 통하여 요구조건을 만족하는 지를 추가 검증할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

1. 고현석, 길경섭, 조인현, "KM 점화기 성능 연구", 제8회 우주발사체기술 심포지움, 2007년 2월 22일, 한국과학기술원, pp.74-79.
2. 홍용식, "우주추진공학", 청문각
3. Alain Davenas "Solid Rocket Propulsion Technology", Pergamon press, 1993.
4. Anon, "Solid Rocket Motor Igniters", NASA SP-8051.
5. Anon, "Solid Rocket Motor Performance Analysis And Prediction", NASA SP-8039.
6. George P. Sutton, "Rocket propulsion elements", John Wiley&Sons, 1992.