

## 액체로켓엔진 연소기 챔버 구조 설계

정용현\* · 류철성\*

### The Structural Design for Combustor Chamber of Liquid Rocket Engine

Yong-Hyun Chung\* · Chul-Sung Ryu\*

#### ABSTRACT

The Properties of material, C18200 which is used for development of high performance liquid rocket engine combustor chamber were obtained by tension tests. The specimen for regenerative combustor was designed by structural analysis using that properties. After the designed specimen was manufactured by the same manufacturing process of regenerative combustor, the yielding stress and yielding strain were obtained by strength tests. The properties of C18200 was degraded very much after brazing. The estimation of yielding pressure by structural analysis was almost same as that of strength test. The collector part was yielded and failed previously than that of cooling channel part during strength test.

#### 초 록

고성능 액체로켓엔진 연소기 개발을 위해 연소기 챔버 재료로 사용되는 크롬동 소재에 대해서 인장시험을 수행하고 재료 물성치를 확보하였다. 확보한 크롬동 재료 물성치를 이용하여 구조해석을 수행해서 재생냉각형 연소기 시편을 설계하였다. 설계한 시편을 연소기 챔버 제작 공정과 동일한 공정으로 제작 후 강도 시험을 수행하여 시편의 항복압력과 파손 압력을 얻을 수 있었다. 크롬동 소재는 브레이징 후에는 상당한 기계적 물성 저하가 있었고 구조 해석을 통해 예측한 항복 압력이 실제 시험한 결과와 거의 같게 나타났다. 강도 시험 결과에서는 유로 연결부가 유로부보다 먼저 항복과 파손이 일어났다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Regenerative Combustor(재생냉각형 연소기), Combustor Strength(연소기 강도)

#### 1. 서 론

† 2004년 10월 11일 접수 ~ 2004년 11월 22일 심사완료  
\* 정회원, 한국항공우주연구원 엔진그룹  
연락처, E-mail: cyh01@kari.re.kr

고성능 액체로켓엔진 연소기 설계 기술에 있어서 연소기 챔버에 재생냉각 방식의 사용은 거

의 필수적이다. 이 재생냉각 방식의 연소기에서 내벽재료로 사용되는 재료는 고온의 연소가스와 냉각유로 사이에서 매우 좋은 열전도성이 있어야 하며 구조적으로 견딜 수 있는 재료이어야 한다. 발사체 분야의 선진국에서는 연소기 사용 재료에 대해 많은 연구 개발이 이루어져 연소기 전용 재료가 개발되어 있고 연소기 구조설계에 대해서도 많은 연구가 진행되어져 있다. 이에 비해 국내에서는 연소기용 재료 연구 및 개발이 전무하며 연소기 구조 설계도 앞으로 많은 연구가 진행 되어야 하는 상황이다. 해외 발사체 선진국의 연소기용 재료는 여러 여건 상 수입이 거의 불가능하므로 본 연구에서는 국내에서 생산되는 크롬동(C18200) 소재를 연소기 내벽재료로 사용하기 위한 타당성여부를 확인하기 위해 수행되었다. 이를 위해 연소기 제작 공정에 있어서 필수적인 고온의 브레이징 공정 후 나타나는 재료의 물성 변화도 확인하여 재료의 물성치를 확보하고 재생냉각 방식의 시편을 제작하여 강도 시험을 거쳐 국내 생산 재료 사용의 타당성 여부를 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 크롬동 재료 시험

크롬동(C18200) 재료의 인장 시험을 통한 재료 물성치를 확보하기위해 먼저 Fig. 1과 같이 ASTM A 370-96[1] 규격에 따라 브레이징을 하기 전과 후 재료로 각각 6개의 시편을 제작하였다. Fig. 2는 인장 시험을 하기 위한 15톤 용량의 UTM 4206으로 각 시편에 대해 1 mm/min의 변위 속도로 스트로크 제어 방식을 사용하고 정확한 변위 및 변형량 측정을 위해 25 mm 길이의 익스텐소미터(extensometer)를 사용하였다. 시편 파단 후에는 전자현미경으로 파단면을 분석하였다.

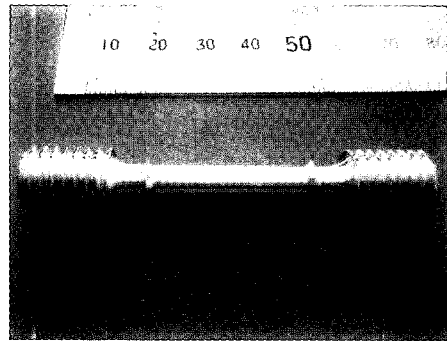


Fig. 1 Specimen for tension test of C18200



Fig. 2 UTM 4206 material tester

### 2.2 강도 시험 시편 설계, 구조해석 및 제작

재생냉각형 연소기 챔버의 강도 시험을 위한 시편을 설계하기 위해 기존의 문헌[2]을 참고로 하여 Fig. 3과 같이 크롬동 재료가 들어가는 내벽부분을 설계하였다. 그림에서와 같이 냉각 유로 폭을 2.5 mm, 내벽 두께는 1 mm, 리브(rib)두께를 1 mm, 유로 높이를 4 mm, 냉각 유로 연결부(collector) 폭을 2 mm로 하였다. 총 22개의 리브와 23개의 냉각 유로로 구성이 된다.

내벽 부분과 브레이징으로 접합이 되는 외벽은 4 mm 두께의 SUS329J1 재료를 사용하였다. 이와 같은 설계의 타당성을 확보하기 위해 재료 물성시험을 통해 확보된 물성치를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 기존의 전처리 및 후처리 상용 프로그램인 MSC/PATRAN과 유한요소 구조해석 프로그램인 MSC/NASTRAN을 이용하였다. 구조해석으로 설계의 타당성을 확보한 후 내벽 부분과 외벽 부분을 기계가공한 후 브레이징 공정으로 두 부분을 접합하였고, 가장 자리 부분은 티그(tig)용접하였다. Fig. 4는 제작완료 된 강도 시험 시편 형상이다.

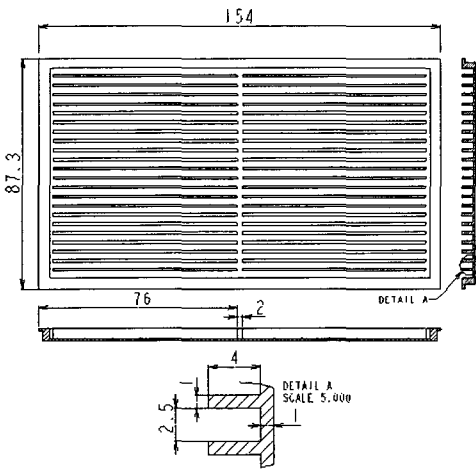


Fig. 3 Configuration of inner part wall

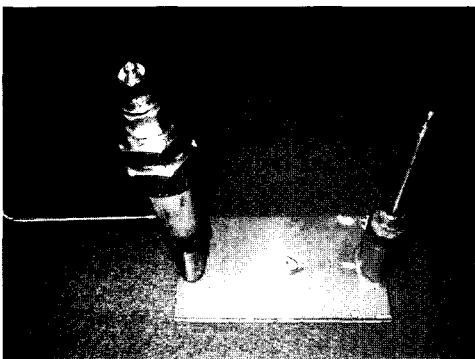


Fig. 4 Specimen for the strength test of combustor

### 2.3 연소기 챔버 시편 강도 시험

연소기 챔버 시편 강도 시험 시 변형률 (strain) 측정을 위해 스트레인게이지(strain gage)를 부착하였다. Fig. 3에서 시편 중앙부분에 유로 연결부를 기준으로 왼쪽 유로부 중간에 4개, 유로 연결부에 4개, 오른쪽 유로부 중간에 4개, 모두 12곳에 2축 스트레인게이지를 부착하였다.

강도 시험 시 안전성을 위해 수압으로 시편을 가압하였고 가압장치의 특성으로 인한 압력 변동을 줄이기 위해 레저버(reservoir)를 거쳐 시편으로 압력이 전달 되도록 시험 장치를 구성하였다. 압력은 시편에서 파손이 일어날 때 까지 가압하였고 시편 파손 시 비상버튼으로 가압을 중지 하였다. Fig. 5은 스트레인게이지 및 레저버를 부착한 연소기 강도 시험 시편이다.

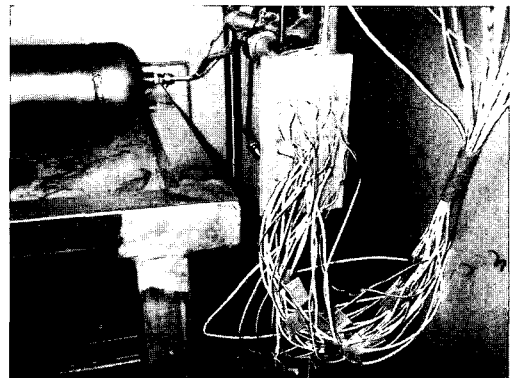


Fig. 5 Configuration of specimen with strain gages and reservoir

## 3. 결 과

### 3.1 크롬동 재료 시험 결과

크롬동 재료의 인장 시험을 통해 확보한 물성치를 Table 1에 나타내었다. 브레이징 후의 시편중 2개는 데이터를 얻는 데 실패해 4개의 데이터만 나타내었다. 대부분의 연성 재료와 같이 브레이징 공정을 거친 연성화된 크롬동 재료는 탄성한계 내에서도 비선형성을 나타내므로 항복응력(yielding

stress)과 항복변형율(yielding strain)은 변형율-응력 선도에서 탄성계수(elastic modulus)의 기울기로 원점은 지나는 직선을 변형율 축방향으로 0.2% 평행 이동시켜 구하였다. Table 1에서 보면 브레이징 전과 후에 많은 물성치의 차이를 나타낸다. 브레이징 공정을 거친 후에는 브레이징 전에 비해 인장강도(tensile strength)는 약 40%로 떨어졌고, 탄성계수는 약 50%, 항복응력은 거의 10%, 항복변형율은 50%로 떨어졌다. 이와 같은 결과는 향후 연소기 구조 설계 시 많이 고려해야 할 사항으로 판단된다.

Table 1. Result of tension tests for C18200

Before Brazing				
Specimen No	Tensile Strength [MPa]	Elastic Modulus [GPa]	Yielding Stress [MPa]	Yielding Strain[%]
1	503.8	140.504	461.645	0.53
2	507.5	150.472	466.122	0.52
3	508.2	140	464.555	0.53
4	507.7	141	467.45	0.52
5	507.8	127	463.751	0.56
6	507.5	125	465.2	0.56
Average	507.083	137.329	464.787	0.537
After Brazing				
Specimen No.	Tensile Strength [MPa]	Elastic Modulus [GPa]	Yielding Stress [Mpa],0.2 %	Yielding Strain[0.2%]
1	189.3	54.6	44.6	0.28
2	196.2	70	47.9	0.27
3	189.5	63.5	47.9	0.27
4	195.4	65	65.69	0.3
Average	192.600	63.275	51.523	0.280

Figure 6, 7은 각각 브레이징 전과 후의 인장 시험 후 파단면을 전자 현미경으로 5000배 확대한 그림이다. 브레이징을 하게 되면 온도가 약 1000℃ 까지 올라가게 되므로 재료의 재결정이 일어나 재료의 연질화 되어 브레이징 후의 Fig. 7이 Fig. 6에 비해 연성재료의 파괴에서 나타나는 덩골형상이 더 조대함을 알 수 있다. 이와 같은 이유로 Table 1과 같은 결과가 나온 것으로 판단된다.

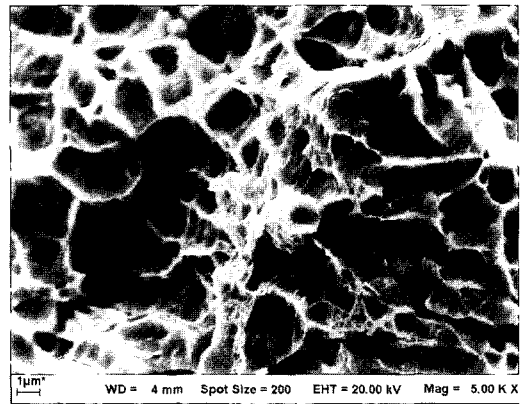


Fig. 6 Fracture section of C18200 before brazing (×5000)

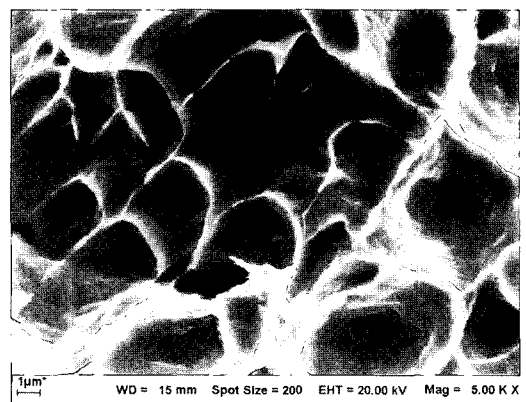


Fig. 7 Fracture section of C18200 after brazing (×5000)

### 3.2 강도 시험 시편 구조해석 결과

시편의 강도 시험은 상당히 고압까지 가압을

하므로 설계된 시편의 구조적 안정성을 확인함과 동시에 수치적 해석 모델링 결과와 시험 결과의 비교를 통해 향후 연소기 구조설계를 위한 구조 해석 모델링 정립을 위해 구조 해석을 수행하였다. 구조해석을 위해 Table 1의 브레이징 후의 재료 물성치를 사용하였고, 3차원 사면체 유한요소(3-D, tetra element)을 사용하였다. 외벽 부분은 내벽 재료인 크롬동에 비해 상당히 강도가 높고 두께도 훨씬 두꺼우므로 따로 외벽 부분을 해석을 위한 모델링에 넣지 않고 내벽의 리브 및 가장자리를 고정하는 것으로 경계조건을 주었다. 연소기 설계압[3]을 52.5 bar로 하고 연소기 헤드부의 인젝터 차압을 15 bar로 가정할 경우 67.5 bar가 냉각 유로 및 유로 연결부에 작용한다. 항복응력을 기준으로 구조적 안전계수를 1.5로 하면 설계하중은 약 100 bar가 된다. 실제의 연소기는 고온의 연소가스로 인해 상당히 높은 온도까지 올라가고 이로 인해 연소기 내벽에 열응력이 발생한다. 그러나 이와 같은 열응력을 고려하기 위해서는 많은 고온 상태에서 열팽창 계수 및 재료의 기계적 물성치를 확보해야 하므로 많은 비용과 시간이 요구된다. 따라서 이는 향후에 계속된 연구로 진행되어야 할 것이다. Fig. 8는 구조 해석 결과로 폰 미세스 응력(Von-mises stress)[4]을 나타낸 것이다. 유로 연결부에 최대 응력이 약 52.3 MPa로 나타났다. 이는 Table 1에서 항복응력 51.523 Mpa과 거의 같으므로 구조적으로 100 bar 이하로는 항복을 기준으로 안정적이라고 할 수 있고 약 100bar 주위에서 항복이 일어날 것으로 예측할 수 있다.

3.3 연소기 시편 강도 시험 결과

Figure 5 과 같이 스트레인게이지와 레저버를 부착한 시편에 수압으로 압력을 가하면서 동시에 변형을 데이터를 받았다. Fig. 9, Fig. 10은 각각 유로부와 유로연결부(collector)의 압력에 대한 변형율을 나타낸 것으로 유로부에서는 파손이 일어나지 않고 유로연결부에서는 갑자기 변형율이 증가하는 파손이 일어남을 알 수 있고, 두 곳 모두 Table 1에서의 브레이징 후의

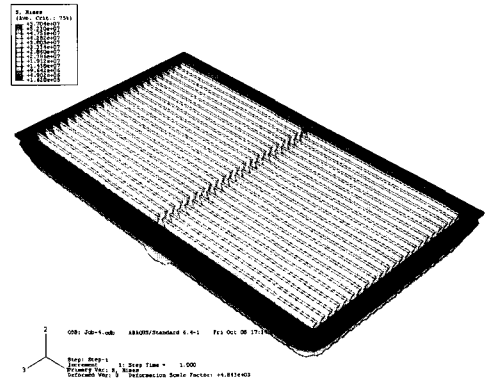


Fig. 8 Von-mises stress distribution of the specimen (P=100 bar)

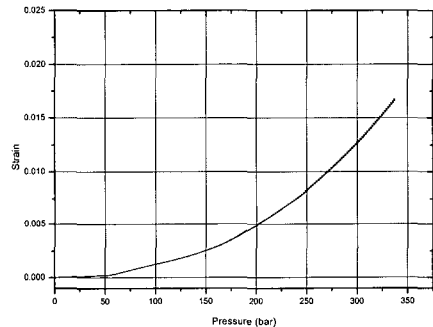


Fig. 9 Strain vs pressure curve of P1 x-dir

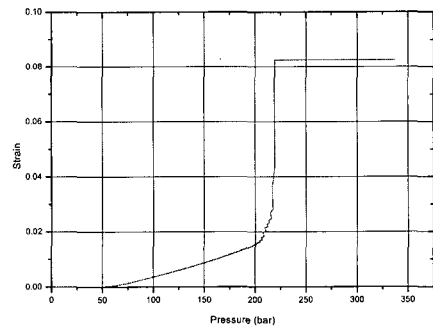


Fig. 10 Strain vs pressure curve of P6 y-dir

크롬동 항복변형율인 0.28%를 특정 압력이후로는 모두 넘어 선 것을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 변형을 센서 부착 위치에서의 항복, 파손이 일어나는 압력 값을 정리하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Yielding pressure & ultimate pressure of the specimen

Upper Channel Part					
Location	P1	P2	P3	P4	Average
Yielding Pressure[bar]	170	156	143	143	153
Collector Part					
Location	P5	P6	P7	P8	Average
Yielding Pressure[bar]	97	97	97	95	96.5
Ultimate Pressure[bar]	225	212.5	210	196	211.6
Lower Channel Part					
Location	P9	P10	P11	P12	Average
Yielding Pressure[bar]	142	134	132	149	139.3

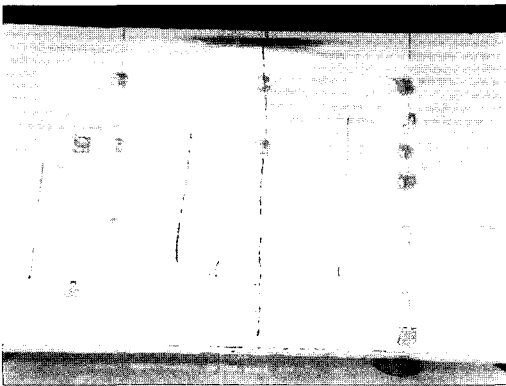


Fig. 11 Specimen after failure 1

Table 2에서 보는 바와 같이 각 위치에서 측정된 변형율이 차이가 나는 것은 크롬동 재료의 생산과정에서 재료의 불균일성과 브레이징 공정과정에서 위치에 따라 브레이징 접합율의 차이가 생겨 발생한 것으로 판단된다. 이는 향후 연소기 제작에 있어서 개선되어야 할 공정이다. 유

로연결부의 항복이 일어나는 압력이 평균 96.5 bar로 앞서 구조해석에서 약 100 bar에서 항복이 일어나는 것으로 예측한 것과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

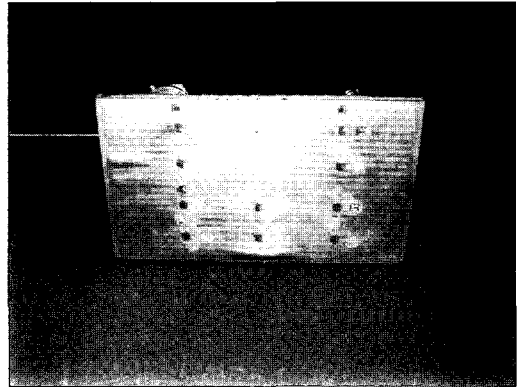


Fig. 12 Specimen after failure 2

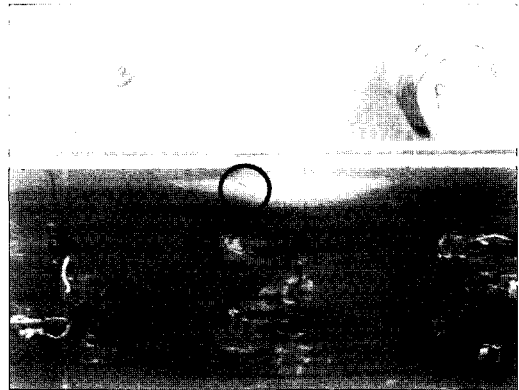


Fig. 13 Specimen after failure 3

Figure 11 ~ 13는 강도 시험 시편이 파손이 일어난 후의 형상이다. Fig. 10, 11에서는 유로연결부가 많이 불룩하게 변형된 것을 볼 수 있고, 유로부는 유로연결부보다는 조금 덜 불룩하게 변형된 것을 볼 수 있다. 부분적으로 불룩하게 많이 솟아 오른 부분을 볼 수 있는 데, 크롬동과 SUS316L은 제대로 브레이징이 되었을 경우 브레이징 접합강도가 모재인 크롬동 보다도 높으므로[5] 이 부분은 브레이징 접합이 제대로 되지 않아서 발생한 것으로 생각된다. Fig. 12에서 표시한 부분은 재료가 파손되어 찢어진 부분

으로 재료의 불균질 또는 결함으로 인해 약한 부분이 파손된 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

고성능 액체로켓엔진용 연소기를 개발하기 위하여 챔버에 사용되는 재료의 재료 시험을 통한 물성치를 확보하였다. 기존의 자료를 바탕으로 연소기 챔버 강도 시편을 설계 및 구조 해석을 수행하였다. 설계된 강도 시험 시편을 연소기 챔버 제작 공정과 동일하게 제작하였으며 강도 시험을 통하여 구조 해석 결과와 비교 검토하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 연소기 내벽 재료인 크롬동은 브레이징을 거치면서 상당한 물성 저하가 있었다.
2. 재생냉각연소기의 유로부 및 유로연결부에 대한 상온에서의 구조 해석 모델링을 정립하였다.
3. 연소기 강도시험을 통해 항복과 파손이 일어나는 압력을 알 수 있었고 향후 연소기 제작에 있어서 재료의 균질성 확보와 접합율이 높은 브레이징 공정의 개선이 요구되었다.
4. 연소압 52.5 bar의 연소기에 대해서 상온에서 항복응력 기준으로 안전계수 1.5로 구조

설계를 하였으며 향후에 연소 시 열응력을 고려한 설계 및 실제 연소시험을 통한 검증을 진행할 계획이다.

#### 후 기

본 연구는 “소형위성 발사체(KSLV-I) 개발사업”의 일부분으로 진행된 연구결과입니다

#### 참 고 문 헌

1. Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Product (ASTM A 370-96)
2. Huzel, D.K. and Huang, D.H., Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1992
3. 조광래 외, 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업(I), 한국항공우주연구원, 2003
4. 김영석, 소성역학, 시그마프레스, 2001
5. 정용현, 류철성, 최민수, “액체 로켓엔진 사용재료의 상온 브레이징부 인장 강도 특성,” 한국추진공학회지, 제7권, 제4호, 2003, pp.73-79