

액체로켓 연소기 재생냉각 채널 상온 구조해석

류철성* · 정용현** · 최환석* · 이동주***

Structural Analysis of Liquid Rocket Thrust Chamber Regenerative Cooling Channel at Room Temperature

Chul-Sung Ryu* · Yong Hyun Chung** · Hwan-Seok Choi* · Dong-Ju Lee***

ABSTRACT

The structural analysis and water pressure tests are performed for liquid rocket thrust chamber regenerative cooling channel specimens at room temperature condition. Material properties of copper alloy to be used in the elastic-plastic structural analysis are obtained by uniaxial tension test at room temperature. The plate-type cooling channel specimens are manufactured and performed water pressure test to verify the analysis results. The results of elastic-plastic structural analysis and water pressure test show reasonable agreements though with minor differences and it is revealed that structural stability of regenerative cooling channel is highly affected by the manufacturing tolerances due to very thin cross-sectional thickness of the cooling channel.

초 록

재생냉각형 액체로켓 연소기 챔버 냉각 채널부의 상온상태의 구조해석과 검증시험을 수행하였다. 재생냉각 연소기 냉각 채널부에 사용하는 구리 합금의 상온 인장시험을 수행하여 재료의 탄소성 물성 값을 확보하였으며 냉각 채널의 탄-소성해석은 이 물성 값을 이용하여 수행하였다. 해석결과와 검증을 위해서 평판형태의 냉각채널 시편을 제작하여 강도시험을 수행하였다. 탄-소성 구조해석 결과와 시편의 수압시험 결과 사이에 약간의 차이는 있지만 비교적 잘 일치하였으며 채널의 단면 두께가 작기 때문에 제작상의 가공오차가 채널의 구조적인 안정성에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Key Words: Liquid Rocket Thrust Chamber(액체로켓 연소기), Regenerative Cooling Channel(재생 냉각 채널), Elastic-Plastic Structural Analysis(탄-소성 구조해석)

1. 서 론

액체로켓 연소기의 개발에 있어서 고온/고압에서 작동하는 연소기 재생냉각 챔버의 설계는 매우 중요한 요소이다. 연소기의 작동시간이 길

† 2005년 9월 12일 접수 ~ 2005년 12월 5일 심사완료

* 정희원, 한국항공우주연구원 연소기그룹

** 정희원, 한국항공우주연구원 엔진그룹

*** 정희원, 충남대학교 기계공학과

연락처, E-mail: csryu@kari.re.kr

어지고 연소압력이 증가하면 복합재료를 이용한 흡열냉각 방식의 연소기 챔버는 재료의 삭마현상이 크게 발생하기 때문에 사용상의 한계가 있다. 따라서 고온/고압의 연소가스에 재료가 견딜 수 있도록 연소기 챔버의 내측 벽에 연료를 유동시켜 고온의 연소가스에 재료가 용융되거나 손상되지 않도록 한다. 일반적으로 재생냉각 방식의 액체로켓 연소기 챔버 내측 벽에 사용하는 재료는 열전도성이 좋으며 가격이 비싸지 않고 제작이 용이한 구리 계열의 금속을 사용한다. 선진 외국의 경우 순수한 무산소동(OFHC copper)은 재료의 강도가 일반적인 금속에 비하여 작기 때문에 사용하지 않고 크롬, 은 또는 지르코늄등을 포함시켜 재료의 물리적, 기계적인 성능을 향상시킨 구리합금(copper alloy) 재료를 사용한다[1].

현재 국내에서는 크롬과 기타 성분을 조절하여 제작한 구리합금을 이용하여 재생냉각 방식의 연소기 챔버의 제작에 사용하고 있다. 본 연구에서는 이 재료를 이용하여 상온 인장시험을 수행하여 재료의 기계적인 물성을 획득하고 이 데이터를 이용하여 재생냉각 챔버 채널부의 상온 상태의 탄-소성해석을 수행하였다. 이 해석 데이터는 간단한 형태의 시편을 제작하고 수압 시험을 수행하여 해석 결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 구리합금 재료시험

재생냉각형 연소기 챔버의 구조설계를 하기 위해서는 사용하고자 하는 재료의 정확한 기계적인 물성 값들과 물리적인 물성 값들이 필요하다. 외국의 경우 액체로켓 연소기 챔버에 사용하기 위한 최적의 재료를 선정하기 위하여 여러 가지 재료를 선정하고 제작하여 각 재료별 특성에 대하여 연구하였다[1,2]. 본 연구에 사용된 재료는 크롬이 함유된 구리합금이다. 재료시편은 ASTM A 370-96 규격[3]에 따라 제작하였으

며 15톤 용량의 UTM4206으로 1 mm/min 속도로 인장시험을 수행하였다. 변형률 측정은 게이지 길이 25 mm의 익스텐소메타(extensometer)를 이용하여 측정하였다.

재생냉각 챔버의 제작에는 브레이징(brazing) 공정이 포함된다. 이 브레이징 공정은 접합하고자 하는 모재사이에 필러 금속(filler metal)을 넣고 약 1000℃로 진공로에서 가열하여 접합하는 제작 공정으로 사용하는 구리합금이 거의 재료의 용융온도에 근접하기 때문에 재료의 연화현상이 발생한다. 따라서 브레이징 공정을 거친 재료와 열적인 영향을 받지 않은 본래의 재료 사이에 기계적인 물성의 변화가 발생하는데 이를 측정하기 위하여 각각 6개씩의 시편에 대하여 인장시험을 수행하였다. 브레이징 제작공정 전의 크롬동 구리합금의 최대응력 평균값은 507.8 MPa이다. 0.2% 오프셋(offset)한 평균 항복응력 값은 464.1 MPa이다. 그리고 평균 탄성계수 값은 143.3 GPa이다. 브레이징 후 재료의 평균 항복응력 값은 49.9 MPa이며 최대응력 값은 191.9 MPa이다. Table 1에 브레이징 공정 전의 구리합금에 대한 기계적인 물성 값들을 나타내었으며 Table 2에 브레이징 공정 후 구리합금의 기계적인 물성 데이터들을 나타내었다.

Table 1. Mechanical Properties of Copper Alloy before Brazing at Room Temperature

Specimen No.	Tensile stress (MPa)	0.2% Offset yield stress(MPa)	Young's modulus (GPa)
1	503.8	461.6	140.5
2	507.5	466.1	150.5
3	508.2	462.5	151.5
4	507.7	466.4	149.4
5	507.8	465.38	127.8
6	507.5	462.7	139.9
Average	507.8	464.1	143.3

Table 2. Mechanical Properties of Copper Alloy after Brazing

Specimen No.	Tensile stress (MPa)	0.2% Offset yield stress(MPa)	Young's modulus (GPa)
1	189.3	44.41	73.36
2	196.2	49.49	91.24
3	189.5	47.38	77.68
4	195.4	65.46	78.87
5	189.1	43.23	77.34
Average	191.9	49.9	79.70

인장시험 결과 브레이징 공정 전후 재료의 기계적인 물성 값들의 변화가 매우 크다는 것을 알 수 있다[4, 5]. 재료의 항복응력은 약 90% 정도 감소하였으며 탄성계수 값은 44.4% 감소하였다. 구조물의 설계에서 가장 중요한 요소인 재료 물성 값이 이와 같이 크게 변화하므로 재생냉각 챔버의 설계에서 냉각 채널부는 변화된 물성 값들을 이용함으로써 구조적으로 안정하고 신뢰할 수 있는 구조물이 될 수 있다.

Figure 1과 Fig. 2는 브레이징 전후 구리합금의 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다. 브레이징에 의한 열처리를 받지 않은 구리합금의 항복응력 값은 앞에서 언급하였듯이, 매우 큰 값을 가지며 항복이후 변형 경화의 정도는 크지 않다. 그러나 브레이징 후 재료는 Table 2에서 나타난 것처럼 항복응력 값이 매우 낮아지고 재료가 소성 변형을 하면서 변형 경화가 매우 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 무산소동 또는 구리 금속에서 나타나는 일반적인 경향이다[6-9]. 브레이징 전 재료의 최대 변형률은 최소 16.4%에서 최대 16.8%의 범위를 갖고 있으며 브레이징 후 재료는 최소 값이 30.4%이며 최대 값은 37.8%이다. 이는 구리 금속에 크롬(Cr)을 첨가하여 재료 경도와 내마모성 그리고 강도는 크게 향상되나 재료의 취성(brittleness)이 커지기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 재료가 브레이징과 같은 고온의 열처리 과정을 거

치면 풀림(annealing) 현상이 발생하여 Fig. 2와 같이 연성(ductility)이 증가하는 것으로 사료된다.

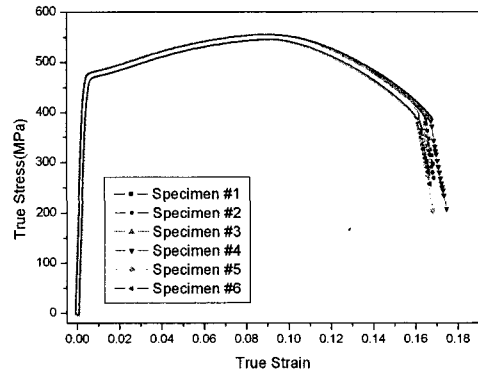


Fig. 1 Tension Test Results of Copper Alloy before Brazing

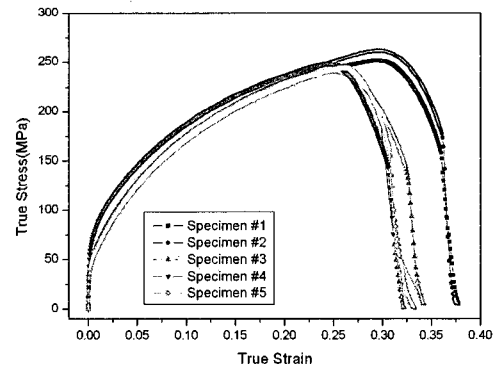


Fig. 2 Tension Test Results of Copper Alloy after Brazing

2.2 재생냉각 연소기 채널부 탄소성 구조해석

Figure 3은 현재 국내에서 개발하고 있는 재생냉각형 연소기의 형상이다. 연소기 헤드부에 산화제인 액체산소(LOx)가 공급되며 노즐 출구(nozzle exit) 부에서 연료를 공급하여 냉각 채널을 통하여 연소기 헤드부의 연료 매니폴드(manifold)로 유동한다. Figure 4는 Fig. 3에서 단면 B-B의 형상이다. 연소가스의 내부 압력에 챔버가 구조적으로 견딜 수 있도록 채널 외피는 강도 값이 큰 금속 재료인 STS329J1을 사용하며

내측은 냉각을 위해서 사각형 형태의 냉각 채널이 있으며 열전도도가 좋은 구리합금을 사용한다. 일반적으로 재생냉각형 연소기 챔버의 탄소성 구조해석은 고온/고압에서 작동하는 특성 때문에 기계적인 하중뿐만 아니라 열적인 하중을 고려하여 수행한다[10-14]. 그러나 본 연구에서는 상온 상태에서 냉각 채널의 구조적인 안정성에 대하여 고찰하였다.

재생냉각 챔버의 제작 후 제작 결함 유무를 판정하기 위한 검사는 방사선 투과검사(R/T)와 채널 내부의 수압시험으로 확인한다. 비파괴 검사를 통하여 채널 내부에 브레이징 공정 중에 필러 메탈이 흘러 냉각 유체의 유동에 영향을 주는지 확인한다. 수압시험은 브레이징이 모든 채널 리브(rib)에 결함 없이 잘 접합되었는지, 연소기가 작동할 때 구조적인 손상이 발생하는지 여부를 확인하는 방법이다. 만약 리브가 챔버 외피부와 부분적으로 접합 결함이 있다면 채널 압력에 의하여 심한 변형이 발생한다. 또한 연소기가 초기에 작동할 때 매우 짧은 시간이지만 매우 높은 압력이 냉각 채널에 가해진다. 이러한 이유 때문에 연소기 챔버의 제작 완료 후 수압시험이 필수적이며 상온 탄-소성 해석이 구조적인 안정성을 확보하기 위하여 필요하다.

Figure 4에 나타내었듯이 재생 냉각 채널부의 단면은 동일한 형태의 채널 형상이 반복적으로 배치되기 때문에 1개 채널에 대한 형상을 모델링 하였다. 냉각 채널 두께는 1 mm로 설계하였으나 가공오차에 의하여 제작 완료된 평판 시편의 채널 두께가 위치에 따라 변화하였다. 따라서 냉각 채널의 상온 탄-소성 구조해석은 스트레인 게이지 부착 위치에서 측정된 냉각 채널 두께를 기준으로 수행하였다. 냉각 채널의 높이는 4.0 mm로 가로세로비(aspect ratio)는 2.0, 1.82, 1.6 그리고 가장 작은 값은 1.05이다. 냉각 채널의 가로세로비는 단면 형상 때문에 구조적인 안정성에 영향을 미치고 채널의 리브가 냉각 핀(fin)의 역할을 하기 때문에 냉각 측면에서도 영향을 미친다[15]. 탄-소성 구조해석에는 상용 유한요소해석 프로그램인 Marc를 사용하였으며

입력 데이터로 사용한 재료의 물성 값들은 단축 인장시험에서 얻은 하중-변위 데이터를 진응력(true stress) 진변형률(true strain) 데이터로 변환하여 탄성계수 및 초기 항복응력 값을 구하였다. 초기 항복 이후 재료의 소성 변형 거동을 모사하기 위하여 소성 변형률에 대한 유동 응력 값을 구하여 입력 데이터로 사용하였다. 해석조건으로 Von-Mises 항복조건을 사용하였으며 재료는 항복 이후 등방경화(isotropic hardening)를 한다고 가정하였다.

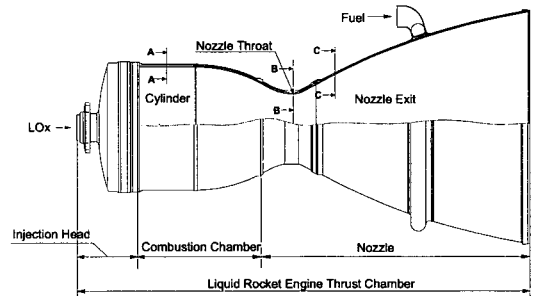


Fig. 3 Configuration of liquid rocket engine thrust chamber

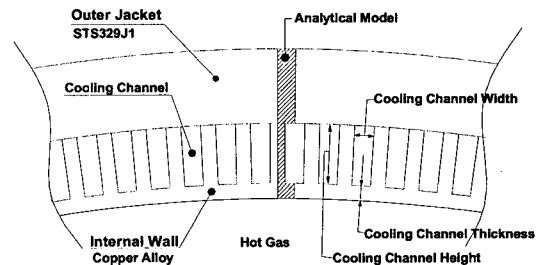


Fig. 4 Section view of combustion chamber

2.3 평판 시편 강도시험

연소기 챔버의 상온 탄-소성 구조해석 결과를 검증하기 위하여 채널 폭이 2.0 mm, 2.2 mm, 2.5 mm 그리고 3.8 mm인 강도시험 시편을 제작하였다. 시편의 형상은 제작의 용이성 및 비용을 고려하여 평판형태로 제작하였다. 이 평판

형태의 시편 제작은 연소기 챔버 제작 공정과 동일하게 하여 평판 시편과 실물형 연소기 챔버 사이에 제작공정에 따른 차이점이 발생하지 않도록 하였다. 이 평판 시편을 수압시험을 하기 위하여 물을 공급하는 입구와 출구라인을 부착하였으며 수압시험 중 가압압력을 측정하기 위하여 압력측정 라인 1개를 물 공급 라인에 부착하였다. 압력에 따른 채널부의 변형을 측정하기 위하여 Kyowa의 2축 스트레인 게이지를 채널의 중앙에 부착하였다. 압력에 따른 변형률은 평판 시편에 총 6개 또는 12개의 스트레인 게이지를 부착하여 측정하였다. Figure 5은 강도시험에 사용한 강도/기밀시험 장치 그림이며 Fig. 6은 평판 시편에 스트레인 게이지를 부착하여 수압시험한 후의 그림이다. 시편의 상부에서 브레이징의 결함으로 매우 심한 변형이 발생하였다.



Fig. 5 Configuration of Water Pressure Test Facility

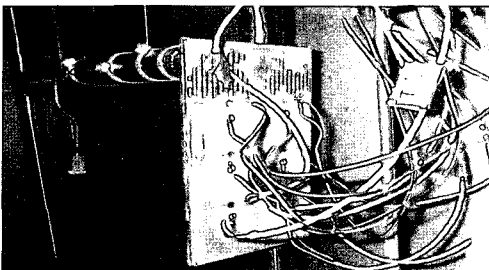


Fig. 6 Configuration of Plate Specimen with Attached Strain Gage

3. 결과 및 검토

3.1 평판 시편 탄소성 구조해석 결과 및 검토

네 가지 형태의 재생냉각 채널 폭에 대하여 수행한 탄-소성 해석 결과를 Table 3~6에 나타내었다. 앞에서 언급하였듯이 해석에 사용한 채널의 두께는 수압시험 후 평판 시편을 절단하여 측정된 데이터를 사용하였다. 탄-소성 해석 결과 재생냉각 채널의 두께가 매우 작기 때문에 약간의 채널 두께 변화가 구조해석 결과에 큰 영향을 미친다. 또한, 탄성 영역에서는 해석결과가 강도시험 결과보다 총 변형률을 크게 예측하였으나 초기 항복이후 소성 영역에서는 해석결과가 강도시험 결과보다 작게 예측하였다. 이러한 현상은 인장시험에 사용한 재료와 평판시편 제작 재료 사이에 변형경화 특성이 서로 다르기 때문에 같은 변형률에서 유동응력 값이 어느 정도 차이가 발생한 현상으로 판단된다.

응력-변형률 곡선에서 순수 구리금속 또는 다른 성분들을 첨가한 구리합금은 탄성 영역에서도 재료가 비선형적인 거동을 나타나기 때문에 정확한 탄성 한계 값을 얻기 힘들다. 따라서 재료의 항복 값은 상쇄 항복 강도(offset yield stress) 값을 사용하거나 총 변형률이 예를 들어 0.2% 또는 0.5%일 때 이에 대응하는 유동응력을 항복강도로 규정한다[16]. 본 연구에서 탄-소성 구조해석 결과 총 변형률이 0.2%일 때의 유동응력을 항복강도로 가정하면 채널 내부에 작용하는 압력이 채널 폭 2.0 mm에서 약 20.0 MPa까지 상온 상태에서 구조적으로 안정하며 2.2 mm인 경우 약 16.0 MPa, 2.5 mm는 15.0 MPa까지 안정하다. 채널 폭이 가장 큰 3.8 mm는 약 10.0 MPa 까지 냉각 채널이 구조적으로 안정함을 탄-소성 구조해석 결과를 통하여 알 수 있다. 물론, 이러한 결과는 채널 형상을 가공할 때 발생하는 가공 오차를 고려한 결과이다. 만약 가공 오차를 매우 작게 유지하여 가공한 시편의 경우에는 위에서 제시한 압력 값보다 높은 압력까지 냉각 채널이 안정할 수 있을 것이다. 그러나 높은 정밀도를 갖도록 가공하면 가

공시간이 길어지고 제작비용이 증가한다. 따라서 연소기 연소 압력을 약 7.0 MPa로 가정하면 냉각 채널 두께 1.0 mm를 기준으로 가공 오차를 냉각 채널 폭 2.2 mm에서 32%까지 허용할 수 있음을 구조해석 결과로부터 알 수 있다. 냉각 채널의 폭은 연소실부에서는 일정하지만 노즐 목을 지나 노즐 확대부로 이동하면 챔버의 기하학적인 영향 때문에 채널의 폭이 점점 넓어져서 원주 방향의 총 채널 개수를 조정해야 한다. 이때 허용 가능한 최대 폭은 연소 압력을 기준으로 안전을 및 가공오차를 고려하여 3.8 mm를 초과하지 않도록 설계해야 한다.

Table 3. Analysis Results of Total Strain of Channel Width 2.0 mm

Pressure (MPa)	Thickness (0.78 mm)	Thickness (0.85 mm)
4.98	3.04813E-4	2.59399E-4
10.02	6.31567E-4	5.35689E-4
15.00	0.00109	8.74558E-4
19.86	0.00191	0.00143

Table 4. Analysis Results of Total Strain of Channel Width 2.2 mm

Pressure (MPa)	Thickness (0.68 mm)
5.14	4.05138E-4
10.02	0.00106
15.74	0.00205
20.58	0.00536

Table 5. Analysis Results of Total Strain of Channel Width 2.5 mm

Pressure (MPa)	Thickness (0.81 mm)	Thickness (0.85 mm)
5.05	4.1756E-4	3.7867E-4
10.01	9.13582E-4	8.06449E-4
15.00	0.00195	0.00161
20.00	0.00421	0.00326

Table 6. Analysis Results of Total Strain of Channel Width 3.8 mm

Pressure (bar)	Thickness (0.92 mm)	Thickness (0.94 mm)
4.93	6.4706E-4	6.2051E-4
10.10	0.0023604	0.00211313
15.00	0.00798426	0.00706616
20.23	0.0176551	0.0159372

3.2 평판 시편 강도시험 결과 및 검토

냉각 채널의 구조설계를 검증하기 위하여 채널 폭이 서로 다른 4개의 평판 시편을 제작하여 수압시험을 수행하였다. Figure 7은 채널 폭 2.2 mm인 평판 시편의 수압시험 후 단면 형상이다. 시험 압력이 증가함에 따라 시편의 중앙부와 양 끝단에서 변형이 심하게 발생하였다. 앞에서 언급하였듯이, 채널 리브가 브레이징 공정을 통하여 결합 없이 접합되면 내부 압력을 리브가 균일하게 받지만 어느 부분에서 결합이 존재하면 매우 큰 하중이 주변의 리브에 작용하기 때문에 그림과 같이 구조물의 손상이 발생한다. 이와 같이 수압시험을 통하여 제작 결합의 유무 및 구조적인 안정성을 확인할 수 있다. Figure 8~11은 채널 폭이 2.0 mm, 2.2 mm, 2.5 mm와 3.8 mm인 평판 시편의 수압시험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 평판시편에서 재료의 변형률 크기가 탄성한계를 초과하면서 소성 변형률의 크기가 증가할수록 변형 정도가 구조해석 결과보다 급격하게 증가하였다.

Table 7~10에 각각의 채널 폭에 대한 강도시험 결과를 나타내었다. 강도시험 결과 4개의 평판시편에 대한 탄성 영역에서의 해석결과 변형률이 강도시험 결과보다 크게 나타났다. 즉, 인장시험을 통하여 얻은 탄성계수보다 평판 시편의 제작에 사용한 재료의 탄성 계수가 크다는 것을 알 수 있다. 평판 시편의 변형이 탄성한계를 초과한 변형률은 채널 폭 3.8 mm를 제외하고 나머지 평판 시편에서 구조해석 결과보다 크게

나타났다. 이러한 현상은 변형경화의 정도가 재료시험에 사용한 재료 시편에서는 크게 나타나고 평판시편의 제작에 사용한 재료는 작기 때문이다. 이와 같이 서로 상반된 결과를 보이는 이유는 재료의 불균일성에 기인한다고 판단된다. 결국, 국내에서 생산하는 구리합금을 이용하여 연소기 챔버를 제작하기 위해서는 위와 같은 재료 불균일성을 설계단계에 반영해야한다. 그러나 재료 불균일성을 구조설계에 반영하면 안전율(safety factor)이 감소하므로 연소기의 무게 증가 및 냉각 성능 저하의 원인이 된다. 따라서 재료가 일관된 성능 특성을 갖도록 지속적인 품질 개선 노력을 기울이고 재료시험을 통하여 검증하는 과정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

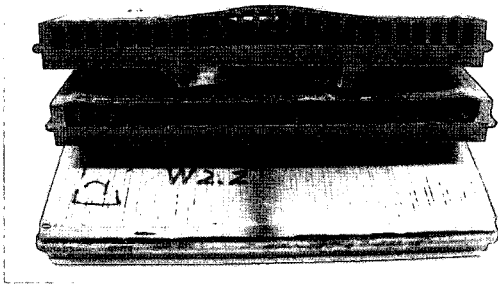


Fig. 7 Section View of Plate Specimen after Water Pressure Test

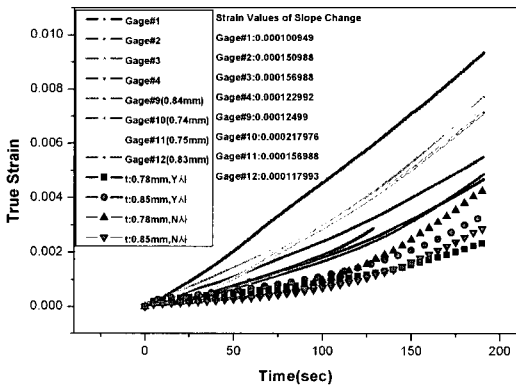


Fig. 8 Comparison of Water Pressure Test with Analysis Results(width : 2.0 mm)

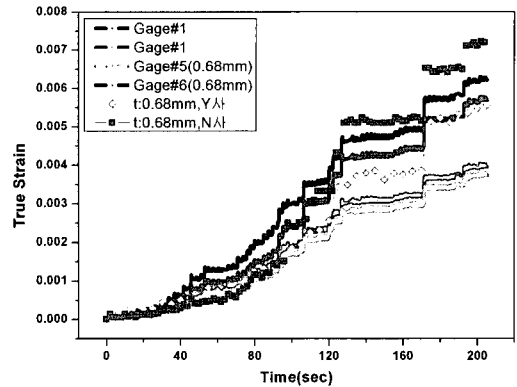


Fig. 9 Comparison of Water Pressure Test with Analysis Results(width : 2.2 mm)

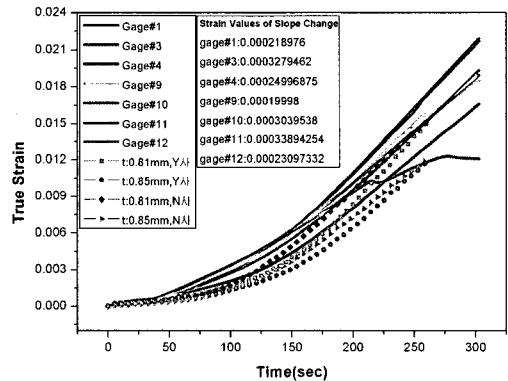


Fig. 10 Comparison of Water Pressure Test with Analysis Results(width : 2.5 mm)

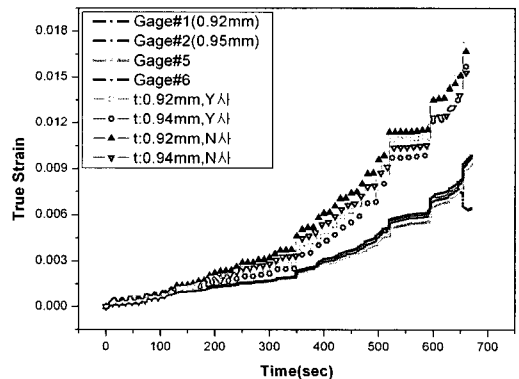


Fig. 11 Comparison of Water Pressure Test with Analysis Results(width : 3.8 mm)

Table 7. Strength Test Results of Total Strain of Channel Width 2.0 mm

Pressure (MPa)	Min. Value	Max. Value	Average Value
4.98	1.2400E-4	4.5190E-4	2.40225E-4
10.02	7.3573E-4	0.00221	0.00124
14.99	0.00162	0.00444	0.00258
19.86	0.00287	0.00674	0.00444

Table 8. Strength Test Results of Total Strain of Channel Width 2.2 mm

Pressure (MPa)	Min. Value	Max. Value	Average Value
5.14	2.26974E-4	3.96921E-4	3.00453E-4
10.02	9.01593E-4	0.00169	0.00125
15.74	0.00209	0.00353	0.00275
20.58	0.00377	0.00624	0.00493

Table 9. Strength Test Results of Total Strain of Channel Width 2.5 mm

Pressure (MPa)	Min. Value	Max. Value	Average Value
5.05	1.59987E-4	2.81960E-4	2.17404E-4
10.01	0.00115	0.00174	0.00147
15.01	0.0024	0.00384	0.00336
20.00	0.00464	0.00657	0.00609

Table 10. Strength Test Results of Channel Width 3.8 mm

Pressure (MPa)	Min. Value	Max. Value	Average Value
4.93	4.24910E-4	4.52897E-4	4.40403E-4
10.10	0.00168	0.00171	0.0017
15.00	0.00408	0.00454	0.00437
20.23	0.00637	0.00973	0.00872

4. 결 론

재생냉각형 액체로켓 연소기 챔버의 상온 구조설계를 수행하였다. 연소기 챔버의 제작에 사용할 구리합금의 물성 값들을 인장시험을 통하여 획득하였으며 이 데이터들을 이용하여 4가지 형태의 냉각 채널에 대하여 탄-소성 해석을 수행하였다. 구조해석 결과의 검증은 평판 형태의 강도시험 시편을 제작하여 수압시험을 통하여 확인하였다. 재료시험 및 해석, 검증시험 결과를 통하여 재생냉각 채널부의 상온 구조설계 절차 및 기법을 아래와 같이 확립하였다.

1) 크롭이 함유된 구리합금은 브레이징 공정 후 재료의 물성 저하가 매우 크기 때문에 변화된 물성을 재료시험으로 얻고 설계에 반영한다.

2) 액체로켓 연소기의 재생냉각 챔버는 고온에서 작동하기 때문에 냉각 채널이 받는 열 하중을 줄이기 위해서는 상온 상태에서 구조적으로 안정한 범위에서 채널의 두께를 최소화해야 한다. 따라서 채널의 두께를 작게 설계하기 때문에, 제작 공정 중 발생하는 가공 오차가 작은 채널 두께에 비하여 상대적으로 크다. 이러한 가공오차는 구조물의 안정성에 영향을 미치므로 설계에 반영한다.

3) 평판 시편의 강도시험 결과에서 스트레인 게이지 부착 위치에 따라 변형률의 변화가 매우 크게 나타났다. 이는 재료의 불균일성에 기인한 것으로 사료된다. 이러한 재료의 특성을 냉각 채널의 두께를 결정할 때 반영한다.

위의 세 가지 고려사항을 반영하여 구조설계를 수행함으로써 구조적으로 안정한 채널 설계를 할 수 있다.

본 연구 결과는 국내에서 개발하는 액체로켓 연소기 재생냉각 챔버의 냉각 채널에 대한 구조설계를 수행하는데 활용할 수 있을 것으로 사료되며 향후에는 실제 연소기 재생냉각 채널에 대하여 고온 열/구조해석을 수행할 예정이다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. J. J. Esposito, R. F. Zabora, "Thrust Chamber Life Prediction-Mechanical and Physical Properties of High Performance Rocket Nozzle Materials," NASA CR-134806, March 1975
2. J. J. Esposito, R. F. Zabora, "Thrust Chamber Life Prediction. Volume 1: Mechanical and Physical Properties of High Performance Rocket Nozzle Materials", NASA-CR-134806, May 1975
3. Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Product (ASTM A 370-96)
4. 정용현, 류철성, "액체로켓엔진 연소기 챔버 구조 설계," 한국추진공학회지, 제8권, 4호, 2004, pp.36-42
5. 정용현, 류철성, 최민수, "액체 로켓엔진 사용재료의 상온 브레이징부 인장 강도 특성," 한국추진공학회지, 제7권, 제4호, 2003, pp. 73-79
6. S. R. Bodner and A. Merzer, "Viscoplastic Constitutive Equations for Copper with Strain Rate History and Temperature Effects," ASME J. Engng. Materials Techn., Vol. 100, 1978, pp.388-394
7. A. B. Tanner, R D. McGinty, and D. L. McDowell, "Modeling Temperature and Strain Rate History Effects in OFHC Cu," International Journal of Plasticity Vol. 15, 1999, pp.575-603
8. R. Khen and M. B. Rubin, "Analytical Modelling of Second Order Effects in Large Deformation Plasticity," International Journal of Solid Structures, Vol. 29, 1992, pp.2235-2258
9. S. R. Bodner, I. Partom, and Y. Partom, "Uniaxial Cyclic Loading of Elastic-Viscoplastic Materials," Journal of Applied Mechanics Vol. 46, 1979, pp. 805-810
10. W. H. Armstrong and E. W. Brogren, "Thrust Chamber Life Prediction," Volume II-Plug nozzle Centerbody and Cylinder Life Analysis, NASA CR-134822, May 1975
11. W. H. Armstrong and E. W. Brogren, "Thrust Chamber Life Prediction," Volume III-Fatigue Life Parametric Study, NSAS CR-134823, May 1975
12. W. H. Armstrong, "Structural Analysis of Cylindrical Thrust Chambers," Final Report Volume I, NASA CR-159522, March 1979
13. W. H. Armstrong, "Structural Analysis of Cylindrical Thrust Chambers," Final Report Volume II, NASA CR-165241
14. W. H. Armstrong and E. W. Brogren, "3-D Thrust Chamber Life Prediction," NASA CR-134979, March 1976
15. R. J. Quentmeyer, "Rocket Combustion Chamber Life-Enhancing Design Concepts," AIAA/SAE/ASME/ASEE 26th Joint Propulsion Conference, AIAA-90-2116, July 1990
16. George E. Dieter, "Mechanical Metallurgy," chap. 5, McGraw-Hill, Inc. 1986