

技術論文

예연소기 헤드 및 냉각채널 시편 강도 시험

유재한* · 문인상* · 이수용**

Strength Experiments on Head and Cooling Channel Specimens of a Preburner

Jaehan Yoo* · Insang Moon* · Soo Yong Lee**

ABSTRACT

A preburner for the high performance, staged combustion cycle liquid rocket engine is being developed. For the structural design processes, strength experiments and finite element analyses on specimens simulating the brazing joints of the preburner, were performed and compared. Total two kinds of the specimen were manufactured for the tests. One simulated the joints between the oxygen injectors and the head junctioned by the conventional vacuum brazing. The another was made to test the brazing surfaces by vacuum compression between the combustion chamber cooling channel and the outer wall. During the burst experiments, it was observed that the fractures were occurred not at the brazed joining but in the middle of the face plate and the cooling wall. In addition, the analysis showed that the predicted fracture locations and the strains were well matched with the experiment results.

초 록

고성능 로켓엔진에 사용되는 다단연소사이클의 주요 부품인 예연소기 개발 과정에서 브레이징 접합부를 모사하는 시편에 대한 강도 시험을 수행하고 유한 요소 해석 결과와 비교하였다. 진공 브레이징되는 헤드의 산화제 분사기 및 진공 가압 브레이징되는 냉각채널 접합부를 모사할 수 있는 시편을 설계 및 제작하고 파단 시험을 수행하였다. 두 시편 모두 접합부가 아닌 모재에서 파단이 발생하였다. 그리고 해석을 통하여 예측된 파단 부위와 변형율이 시험 결과와 잘 일치하였다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Preburner(예연소기), Head(헤드), Cooling Channel(냉각 채널), Strength Experiment(강도 시험), FE Analysis(유한요소 해석)

접수일 2010. 12. 2, 수정완료일 2011. 2. 3, 게재확정일 2011. 2. 10

* 정희원, 한국항공우주연구원 발사체미래기술팀

** 종신회원, 한국항공우주연구원 발사체미래기술팀

† 교신저자, E-mail: tonup@kari.re.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 25-26, 제주 샤인빌리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

다단연소사이클 엔진은 가스발생기사이클 엔진과는 달리 터빈구동에 사용되는 추진제를 외

기로 보내지 않고 다시 연소실에서 연소시켜 비추력의 향상을 기대할 수 있다. 지금까지 개발된 RD-170, RD-180, F-1, SSME와 같은 대부분의 고성능 로켓엔진은 다단연소사이클 엔진을 채택하고 있다. 예연소기는 다단연소사이클 엔진에서 주요한 구성품으로 가스발생기와 동일한 역할을 하나 다른 구조로 되어있다. 매우 높은 압력이 요구되며 케로신-액체산소 엔진의 경우, 액체산소를 사용하여 예연소기를 냉각시키게 된다[1].

로켓 연소기의 냉각채널 설계에 많은 해석과 시험이 수행되는 것[2,3]과 마찬가지로 예연소기 개발 과정에서도 헤드부, 냉각 채널로 구성된 연소실부 및 전체 예연소기 구조물의 강도 시험이 수행된다. 이러한 강도 시험뿐만 아니라 연소시험 및 운용 조건에서의 강도 요구 조건을 만족시키기 위해서 설계 단계에서 다양한 구조 해석을 수행한다. 특히 브레이징 접합부의 강도는 제작 과정과도 연관이 있어 해석만으로는 예측하기 어려워 접합부에 대한 시편 시험을 수행할 필요가 있다[4,5,6]. 기존에 작동 형상 및 외피 재질 등이 다르나 본 연구에서 수행된 시험과 유사한 냉각 채널 접합 강도 시험이 수행되었다[7].

본 연구에서 고려된 예연소기 연소실의 직경과 길이는 각각 약 70 및 215 mm 이다. 연소가스와의 접촉하는 냉각채널 내피와 면판(face plate)이 열전도 계수가 높은 크롬동[7]으로, 이외의 부분은 상대적으로 강도가 높은 STS 316L로 구성되어 있다. 예연소기 헤드부는 일반 진공 브레이징으로, 연소실부는 진공 가압 브레이징 방식으로 두 재질이 이중 접합되며 일반적으로 진공 브레이징에 비해 진공 가압 브레이징이 보다 높은 접합 강도를 가지는 것으로 알려져 있다.

Figure 1은 수압 강도 시험 조건에서의 예연소기 헤드 및 냉각 채널 일부의 Von-Mises 등가 응력 해석 결과를 보여주고 있다. 짙은 색은 높은 응력을 의미하며 산화제 링 부분 및 산화제 분사기 부근에 높은 응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 헤드 분사기, 냉각채널 및 연소실의 산화제 분사 홀의 대칭성을 고려하여 전체 구조물의 1/12 모델에 대하여만 해석이 수행되었다. 원

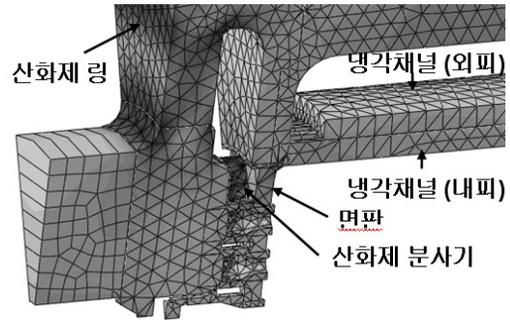


Fig. 1 Von-Mises Contour of a Preburner FE Analysis

주 방향 대칭 경계 조건을 적용하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus v6.9 [8]로 정적 비선형 탄소성 해석을 수행하였다. 소성 해석을 위해 Von-Mises 항복 조건과 항복 이후 등방 경화(isotropic hardening)를 가정하였다. 상온에서 헤드, 냉각채널 및 연소실에 대하여 수압이 하중으로 작용하였고 재료 비선형성만이 고려되었으며 접합부는 강체 결합으로 가정하였다.

예연소기는 연소실 압력에 의해 발생하는 큰 분리력을 산화제 링 및 면판과 산화제 분사기의 브레이징 접합면이 지지한다. 해석 결과에서 알 수 있듯이 산화제 링과 분사기에 높은 응력이 발생한다. 이 접합면은 인장력이 작용하게 된다. 또한 예연소기 제작 과정에서 연소실부만의 강도 시험시에 접합부는 인장 하중을 받게 되어 이 부분의 접합 강도 시험이 필요하다.

강도 시험 시편은 헤드부 및 연소실부 냉각채널의 접합부 응력 특성을 반영하고 동일한 재질과 접합 방식을 적용하나 제작이 용이하도록 설계하였다. 예를 들어 헤드부 시편은 응력이 적게 걸리는 연료 분사기를 제외하고 산화제 분사기의 개수를 4개로 축소하였으며 연소실부는 실린더 형상에서 대칭으로 나타는 1/6 형상 부분만 평판으로 제작하였다. 예연소기가 비교적 소형이므로 시편의 분사기 및 냉각 채널의 단면 형상의 크기는 축소되지 않았다.

각각의 시편은 파단 시험 전에, 구조 해석을 통하여 파단 부위 및 파단이 발생할 수 있는 최소 압력을 개략적으로 예측하여 압력을 높여가며 파단 시험을 수행하였다.

2. 헤드 강도 시편

헤드부 강도 시편의 1/8 모델의 형상은 Fig. 2와 같다. 총 4개의 산화제 분사기가 상단 커버와 나사산 연결 및 브레이징 접합이 되며 면판과도 브레이징 접합 된다. 크롬동 면판을 제외하고 모두 316L 재질이다.

Figure 3과 같이 강도 시험 시의 변형을 측정할 위해 시편의 커버에 4개 및 옆면에 1개로 총 5개의 2축 스트레인게이지가 부착되었다. 게이지 부착 위치는 시험전에 해석을 통하여 게이지 크기 및 부착 위치에 따른 해석-시험간 결과값 차이를 줄이기 위해 변형율이 비교적 크며 범위가 넓어 구배가 적은 곳으로 선정하였다.

압력은 단계적으로 상승시켜 최대 압력 159 bar에서 외부 누설없이 압력이 급격히 130 bar 수준으로 감소하여 시험을 중단하였다. 이 때, 커버의 변형율은 급감하였으며 옆면의 변형율은 급증하였다.

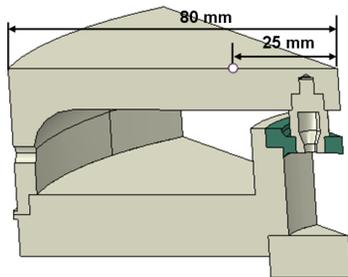


Fig. 2 Head Specimen (1/8 model, O : strain gauge position)

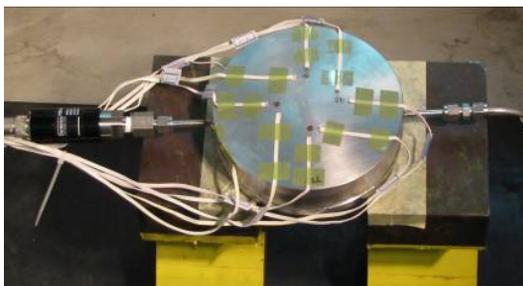


Fig. 3 Configuration of Head Specimen with Attached Strain Gauge

Figure 4는 시험 후, 원점을 중심으로 1/4로 와이어 커팅된 단면(a)과 아래쪽에서 관찰한 면판(b)을 보여주고 있다. Fig. 4(a)를 보면 분사기와 면판의 브레이징 접합면은 분리되지 않았으며 분사기 코킹 구조 부근의 크롬동 면판 부위에서 파단이 일어났다. Fig. 4(b)를 보면 3, 4번 분사기 사이와 4번 분사기 부근에 면판과 하판 구조물의 브레이징 접합부 일부가 분리된 것을 볼 수 있다. 이러한 크랙의 비대칭성은 크랙이 발생한 해당 부분에 직접 필러(filler)를 넣지 않고 부근의 필러가 스며들며 접합되는 구조로 되어 있어 3-4번 사이에 접합이 완전하지 않아 발생한 것으로 추정된다. 시편 제작 전에 제작 경험으로 추정해볼 때 해당 부위에 브레이징 필러가 다소 적게 스며 들 수도 있다고 예측되었다. 접합부를 강제 결합으로 가정한 해석 결과에서도 Fig. 4(b)의 크랙이 발생한 부분에서는 응력이 높게 나타나지 않았다.

구조 해석 모델링에서 용접 및 브레이징 접합부는 모두 강제 결합으로 가정하였고 면판과 분사기 부근에는 생성이 용이한 약 0.5 mm의 2차 삼각 요소가 사용되었다. 그리고 원주 방향 대칭 경계 조건을 사용하여 1/8 모델에 대하여 해석을 수행하였다. 물성치는 네킹(necking) 발생이 후에는 진변형율이 증가하여도 거의 일정한 진응력이 유지되도록 가정하였다. 참고로 면판과 분사기의 접합면에서 응력은 여기에서 나타내지는 않았지만 해석 수렴성 테스트를 수행하면 요소의 크기가 작아질수록 최대 응력이 감소하며 범위는 넓어지는 특성이 있다.



(a) Section View of 1/4 (b) Bottom View

Fig. 4 Head Specimen after the Experiment

Figure 5는 100 bar에서 유한 요소 해석으로 얻어진 Von-Mises 등가 응력 분포를 보이고 있다. 짙은 색은 높은 응력을 의미한다. 시험상에서 파단이 발생한 면판 부분에서 해석적으로 최대 응력이 발생하는 것을 알 수 있으며 이때 해석에서 얻어진 등가 응력은 크롬동의 인장시험에서 얻어진 최대 진응력 값인 260 MPa 부근이다. 크롬동의 연신율은 진변형율로 약 40%이고 네킹은 진변형율 약 18%에서 발생하였으며 100 bar에서 해당 부위의 주 변형율 해석 결과는 약 20% 였다.

Table 1은 커버에 부착된 4개 스트레인 게이지의 반경 방향 변형율의 해석 및 시험 결과를 비교한 표이다. 해석과의 차이 (%)는 (시험-해석) / 해석x100 으로 계산하였다. 두 결과 모두 압력이 증가할수록 변형율이 증가한다. 시험 결과에서 대칭적인 4개의 게이지는 항상 동일한 결과를 나타내야 하나 시험 결과에서는 3, 4, 2, 1번 순서로 변형율이 크게 나타났다. 이러한 현상의

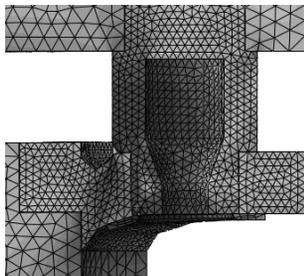


Fig. 5 Von-Mises Stress Contour of 1/4 Head Specimen Analysis Results at 100 bar

Table 1. Comparisons of Head Specimen Strains between Experiments and Analyses

압력 (bar)	변형율				해석 (μ)
	해석과의 차이 (%)				
	#1	#2	#3	#4	
20	-11	4	12	4	132
50	-20	-4	10	4	421
70	-13	4	22	15	628
80	-1	17	42	31	737
100	45	70	113	92	972
130	197	325	529	476	1490
150	157	-	598	454	2200

주요한 원인 중의 하나로 Fig. 4(b)와 같은 크랙과 이를 발생시키는 원주 방향 브레이징 접합의 비대칭성을 추정할 수 있다. 예연소기 설계에서 이러한 부위를 제거하면 비대칭성으로 인한 이러한 현상은 감소할 것으로 예상된다.

분사기 모두 고압으로 갈수록 해석이 변형율을 작게 예측하며 해석과 시험간의 차이가 커졌다. 특히 80 bar 부근 에서 이러한 차이가 커지며 크롬동에서의 균열이 시작된 것으로 추정된다.

3. 연소실부 강도 시편

연소실부 강도 시편은 채널의 형상이 다른 2개가 제작되었으며 시편 2번의 대칭면을 고려한 1/4 모델의 형상은 Fig. 6과 같다. 게이지 부착 위치가 원으로 표시되었으며 시편 1 중심 원점을 기준으로 x 축 0, 10과 -10 에, y 축 0, -9.5와 9.5 에 모두 9 개의 게이지가, 시편 2번은 x 축 0, 10, -10 에, y 축 0, 8, -8 mm에 모두 9 개의 게이지가 부착되었다. 여기에 나타내지 않았지만 해석 결과에서 약 1~2 mm의 채널과 리브가 교차되는 시편의 기하학적 특성으로 인해 게이지 크기와 부착 위치에 따른 변형율의 변화가 헤드부 시편에 비해 상대적으로 커서 게이지 부착에 주의가 필요하다.

상판은 316L, 하판은 헤드부에서 사용된 크롬동 재질이다. 시편 1번은 리브 두께, 채널 너비, 채널 높이, 채널 개수가 각각 1.6, 2.2, 4 mm, 10 이며 시편 2번은 1.6, 1.6, 5, 11이다. 제작 후 치

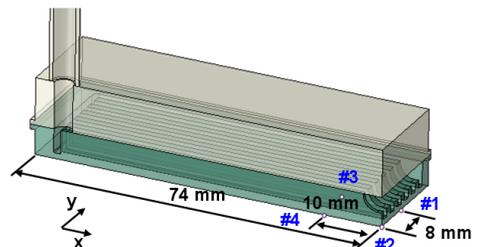


Fig. 6 Cooling Channel Specimen (1/4 model, O : strain gauge position)

수 검사를 수행한 결과, 리브 두께가 약 3% 감소하였다.

Figure 7에 나타난 강도 시험에서 시편 2번은 외부 파단이 생기는 750 bar 까지 내부 압력을 올렸으나 시편 1번은 접합면의 상태를 보기 위해 파단이 발생하지 않은 것으로 예상되는 500 bar 까지만 압력을 올리고 시편을 절단하여 접합부를 관찰하였다.

Figure 8에 나타난 것처럼 시편 1번을 시험 후, 외형 및 x축 대칭면에 대해 와이어 커팅한 단면을 육안 검사한 결과 파단이 발생하지 않았다.

Figure 9에는 시편 2번의 시험 후의 외형 및 x축 및 y축 대칭면에 대해 1/4로 커팅된 단면이 나타나 있다. 외부 파단은 크롬동 채널에서 발생하였으며 내부 파단은 크롬동 채널의 라운드 노

치 부위에서 발생하였고 접합부에서는 발생하지 않았다. 내부 파단 부위는 외부 파단이 발생하기 전에 진행 중이었을 것으로 추정된다. 그리고 채널 너비가 더 넓어 하중이 크게 작용하는 시편 1번이 500 bar 까지 내부 파단이 없었던 것으로 볼 때, 1번에 비해 채널 너비가 더 작아 하중이 적은 시편 2번도 500 bar까지 내부 파단이 없었을 것으로 추정된다.

Figure 10은 500 bar에서 시편 2번의 Von-Mises 등가 응력 해석 결과를 나타내고 있다. 시험상에서 파단이 발생한 라운드 노치 부분에서 해석적으로 최대 응력이 발생하는 것을 알 수 있으며 파단이 발생한 부분의 응력은 260 MPa 부근, 주 변형율은 약 15% 이었다. 향후 해석을 통해 예연소기 본품의 파단이 일어나지 않는 최소 압력을 예측할 경우에 마진을 고려하여 주 변형율이 15% 이하로 선정하면 타당할 것이다.



Fig. 7 Configuration of Cooling Channel Specimen with Attached Strain Gauge



(a) Full View

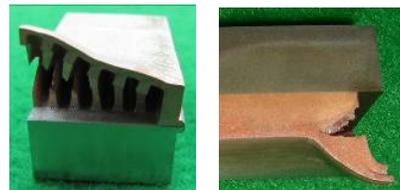


(b) Section View of 1/2

Fig. 8 Cooling Channel Specimen #2 after the Experiment



(a) Full View



(b) Section View of 1/4

Fig. 9 Cooling Channel Specimen #2 after the Experiment

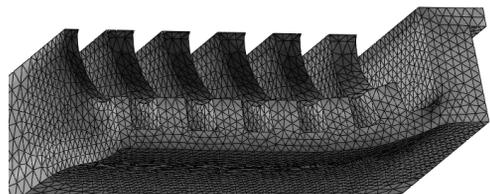


Fig. 10 Von-Mises Stress Contour of 1/4 Cooling Channel Specimen #2 Analysis Results at 500 bar

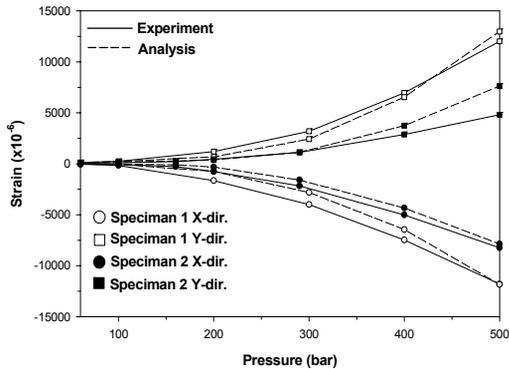


Fig. 11 Comparisons of Strains between Analyses and Experiments at Strain Gauge #4

Figure 11은 두 시편의 측정점 #4의 X 및 Y 방향 변형을 해석 및 시험 결과를 비교한 그림이다. X방향 변형율은 해석 결과가 시험 결과에 비해 작게 측정되었으나 Y방향은 반대인 경우도 있다. 그리고 약 1%의 변형율까지도 해석과 시험 결과가 비교적 잘 일치한다.

여기에 나타내지 않았지만 측정점 #3은 #4와 유사한 경향을 나타내었다. 그리고 #1과 #2의 변형율은 해석상 유사한 경향을 나타내었고 시험값은 부근의 라운드 노치로 인한 큰 변형과 불룩한 변형 현상으로 인해 해석값과 큰 차이를 보여 게이지가 모재와 완전히 부착되지 않은 것으로 추정되어 표시하지 않았다.

4. 결론 및 향후 계획

예연소기 브레이징 접합부의 강도 특성을 알아보기 위하여 진공 브레이징 되는 헤드부와 진공 가압 브레이징 되는 연소실부의 냉각채널 평판 시편을 제작하여 수압 시험을 수행하고 구조 해석 결과와 비교하였다.

본 연구에서 고려된 두 가지 시편의 형상에 대하여 접합부가 아닌 크롬동 모재에서 주요한 파단이 발생하였다. 그리고 해석적으로 높은 응

력이 발생하는 부위에서 파단이 발생한 것을 확인하고 탄소성 해석에서 파단이 발생하지 않는 주변형을 조건을 확인하였다. 변형율의 해석-시험간 비교를 통하여 해석 예측의 신뢰성을 높였다. 또한 헤드부의 크랙이 발생하는 접합 취약부를 확인하고 원인을 분석하였으며 이를 향후 예연소기 설계에 반영할 것이다.

참고 문헌

1. 문인상, 신강창, "소형 액체로켓엔진용 예연소기 냉각채널 유동 해석", 한국추진공학회 춘계학술대회, 2010
2. Cook, R. T., Fryk, E. E., and Newell, J. F., "SSME Main Combustion Chamber Life Prediction," NASA CR-168215, 1983
3. Min, J. B. and Spanyer, K. L., "A Study on Strength Evaluations of EDNi/EDCu/NARloy-Z Bonded Joints" NASA TM-108418, 1993
4. Ingram, C. M., Cote B., Pech, G. J., vanGiessen, R. and Derkach, G., "Initial Results from a Demonstration of U.S. Capability to Manufacture an RD-180 Preburner and Stator," AIAA Paper 2007-5487, 2007
5. Gustafson, K. L., "Development and Evaluation of Braze Alloys for Vacuum Furnace Brazing", NASA CR-514
6. Schwartz, M., Brazing, ASM International, 2003
7. 류철성, 정용현, 최환석, 이동주, "액체로켓 연소기 재생냉각 채널 상온 구조해석", 한국추진공학회지, 제9권, 제4호, 2005, pp.39-47
8. Dassault Systems, Abaqus Analysis User's Manual, 2009