

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 staged combustion in the high performance liquid rocket engine is being developed and strength experiments and finite element analyses on specimens, which simulate the brazing joint of the preburner, were performed and the results were compared. One specimen simulate the joints near oxygen injectors of head by the furnace brazing and two specimens the joints of the combustion chamber cooling channel by vacuum brazing. The experiments were burst ones with strain gauges.

초 록

고성능 로켓엔진에 사용되는 다단연소사이클의 주요 부품인 예연소기 개발 과정에서 브레이징 접합부를 모사하는 시편에 대한 강도 시험을 수행하고 유한 요소 해석 결과와 비교하였다. 용광로 브레이징되는 헤드의 산화제 분사기 및 진공 가압 브레이징되는 냉각채널 접합부를 모사할 수 있는 시편을 설계 및 제작하고 스트레인 게이지를 붙여 파단 시험을 수행하였다.

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

1. 서 론

다단연소사이클 엔진은 가스발생기사이클 엔진과는 달리 터빈구동에 사용되는 추진제를 외기로 보내지 않고 다시 연소실에서 연소시켜 비추력의 향상을 기대할 수 있다. 지금까지 개발된

RD170, RD180, F1, 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 엔진은 액체산소를 사용하여 예연소기를 냉각시키게 된다[1].

예연소기 개발 과정에서 헤드부, 냉각 채널로 구성된 연소실부 및 전체 예연소기 구조물의 강

* 한국항공우주연구원 발사체미래기술팀
연락처, E-mail: tonup@kari.re.kr

도 시험이 수행된다. 전체 구조물은 미리 정해진 증명 내압 조건에서 수행되며 헤드부 및 연소실부의 강도 시험 압력은 구조 해석을 통하여 항복이 발생하지 않도록 결정된다. 이러한 강도 시험뿐만 아니라 연소시험 및 운용 조건에서의 강도 요구 조건을 만족시키기 위해서 설계 단계에서 다양한 구조 해석을 수행한다. 그러나 브레이징 접합부의 강도는 해석만으로는 예측하기 어려운 면이 있어 접합부에 대한 시편 시험을 수행할 필요가 있다.

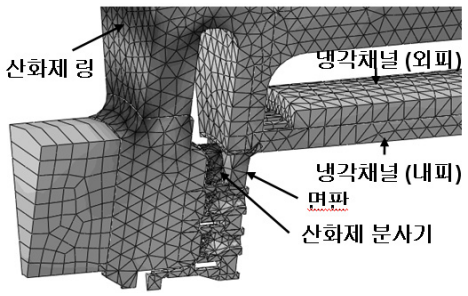


Fig. 1 Von-Mises Contour of a Preburner FE Analysis

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. 원주 방향 대칭 경계 조건을 적용하여 전체 구조물의 1/12 모델에 대하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus v6.9로 정적 비선형 탄소성 해석을 수행한 결과이다. 소성 해석을 위해 Von-Mises 항복 조건과 항복 이후 등방 경화(isotropic hardening)를 가정하였다.

연소가스와 접촉하는 냉각채널 내피와 면판(faceplate)이 열전도 계수가 높은 크롬동[2]으로, 이외의 부분은 상대적으로 강도가 높은 STS 316L으로 구성되어 있다. 316L 재질의 인장 강도는 크롬동의 2배 수준이다. 예연소기 헤드부는 일반 용광로 브레이징으로, 연소실부는 진공 가압 브레이징 방식으로 두 재질이 이종 접합되며 일반적으로 용광로 브레이징에 비해 진공 가압 브레이징이 보다 높은 접합 강도를 가지는 것으로 알려져 있다.

로 알려져 있다.

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.

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 면판과 브레이징 접합 된다. 크롬동 면판을 제외하고 모두 316L 재질이다.

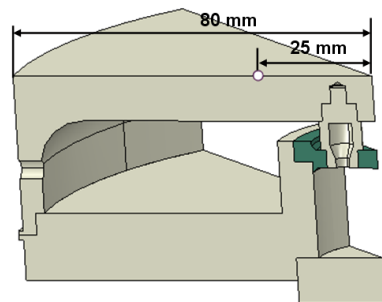


Fig. 2 Head Specimen (1/8 model, O : strain gauge position)

Figure 3과 같이 강도 시험 시의 변형을 측정 을 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.

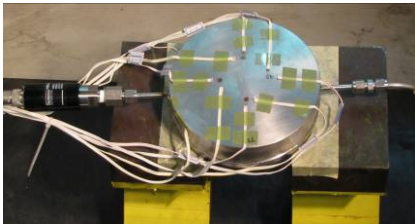


Fig. 3 Configuration of Head Specimen with Attached Strain Gauge

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 스며들어 접합되는 구조로 되어 있어 3-4번 사이에 브레이징이 잘 되지 않아 발생한 것으로 추정된다.

구조 해석 모델링에서 용접 및 브레이징 접합부는 모두 강체 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. 참고로 면판과 분사기의 접합면

에서 응력은 여기에서 나타내지는 않았지만 해석 수렴성 테스트를 수행하면 요소의 크기가 작아질수록 최대 응력이 감소하며 범위는 넓어지는 특성이 있다.

Figure 5은 100 bar에서 유한 요소 해석으로 얻어진 Von-Mises 등가 응력 분포를 보이고 있다. 짙은 색은 높은 응력을 의미한다. 해석을 위해 인장시험에서 네킹 발생 이전의 진응력-진변형율 데이터를 사용하였다. 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%이며 100 및 150 bar에서 해당 부위의 주 변형율은 각각 약 20과 50%였다. 접합부를 강체 결합으로 가정한 해석 결과에서 Fig.4(b)의 크랙이 발생한 부분에서 응력이 높게 나타나지 않았다.



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

Fig. 4 Head Specimen after the Experiment

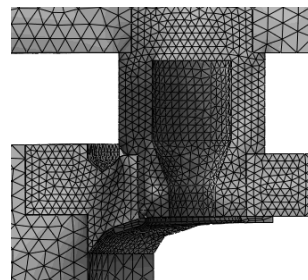


Fig. 5 Von-Mises Stress Contour of 1/4 Head Specimen Analysis Results at 100 bar

Table 1은 커버에 부착된 4개 스트레인 게이지의 반경(r) 방향 변형율 해석 및 시험 결과를

비교한 표이다. 해석과의 차이 (%)는 (시험-해석) / 해석 x 100 으로 계산하였다. 두 결과 모두 압력이 증가할수록 변형율이 증가한다. 시험 결과에서 대칭적인 4개의 게이지는 항상 동일한 결과를 나타내야 하나 시험 결과에서는 3, 4, 2, 1 번 순서로 변형율이 크게 나타났다. 이러한 현상의 주요한 원인 중의 하나로 Fig. 4(b)와 같은 크랙과 이를 발생시키는 원주 방향 브레이징 접합의 비대칭성을 추정할 수 있다. 시편 제작 전에 제작 경험으로 추정해볼 때 해당 부위에 브레이징 필터가 다소 적게 스며 들 수도 있다고 예측되었다. 이러한 게이지간의 차이는 1번과 3번을 기준으로 약 20 % 수준에서 압력이 커질수록 증가하며 약 130 bar에서 급격히 증가한다. 해석-시험 결과 차이에서 추정해 볼 때, 100~130 bar에서 Fig. 4(b)의 크랙이 발생한 것으로 추정된다. 예연소기 강도 시험에서는 시편상에 나타난 Fig. 4(b)와 같은 크랙 발생 부위를 설계에서 제거하게 되므로 비대칭성으로 인한 이러한 현상은 시편에서 발생하는 수준 이하일 것으로 예상된다.

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

압력 (bar)	변형율 (μ)				해석 결과
	시험 결과				
	해석과의 차이 (%)				
	#1	#2	#3	#4	
20	117	137	148	137	132
	-11	4	12	4	
50	337	403	461	436	421
	-20	-4	10	4	
70	548	653	764	722	628
	-13	4	22	15	
80	731	865	1049	968	737
	-1	17	42	31	
100	1408	1653	2073	1865	972
	45	70	113	92	
130	4425	6335	9524	8589	1490
	197	325	529	476	
150	5644	-	15366	12189	2200
	157	-	598	454	

시험과 해석과의 차이는 70 bar 이하에서는 2, 4번이 1, 3번에 비해 적었으며 2, 3, 4 번은 대부분 시험이 해석보다 높게 변형율이 측정되었다. 그리고 1, 2, 3, 4 번 모두 고압으로 갈수록 차이가 커졌다. 특히 100 ~130 bar 에서 해석과의 오차가 커진다. 이러한 이유는 게이지 부착 위치와 각도 차이와 제작 공차, 나사산 결함, 재질의 불균일성, 인장 시험 데이터의 necking 이후의 부정확성과 같은 일반적인 원인과 앞서 언급한 Fig. 4(b)에 나타난 접합부의 크랙을 원인으로 추정할 수 있다.

3. 연소실부 강도 시편

연소실부 강도 시편은 채널의 형상이 다른 2개가 제작되었으며 시편 2번의 대칭면을 고려한 1/4 모델의 형상은 Fig.7과 같다. 게이지 부착 위치가 원으로 표시되었으며 시편 1 중심 원점을 기준으로 x 축 0, 10과 -10에, y 축 0, -9.5와 9.5에 모두 9 개의 게이지가, 시편 2번은 x 축 0, 10, -10 에, y 축 0, 8, -8에 모두 9 개의 게이지가 부착되었다. 강도 시험전에 해석을 통하여 변형율이 비교적 크며 구배가 적은 곳으로 부착 위치를 선정하였다. 그러나 약 1~2 mm의 채널과 리브가 교차되는 시편의 기하학적 특성으로 인해 게이지 크기와 부착 위치에 따른 해석-시험 간 차이가 헤드부 시편에 비해 상대적으로 클 것으로 예측된다. 여기에 나타내지 않았지만 해석 결과에서 위치 변화에 따라 변형율의 변화가 헤드부 시편에 비해 상대적으로 컸다.

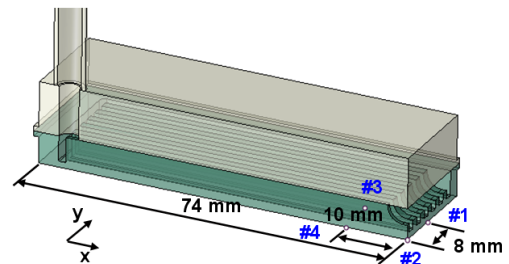


Fig. 7 Cooling Channel Specimen (1/4 model, O : strain gauge position)

상판은 STS 316L, 하판은 헤드부에서 사용된 크롬동 재질이다. 시편 1번은 리브 두께, 채널 너비, 채널 높이, 채널 개수가 각각 1.6 mm, 2.2 mm, 4 mm, 10이며 시편 2번은 1.6, 1.6, 5, 11이다. 제작 후 치수 검사를 수행한 결과, 리브 두께가 약 3% 감소하였다.

Figure 8에 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.

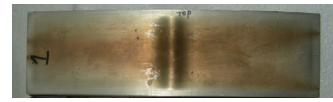


Fig. 8 Configuration of Cooling Channel Specimen with Attached Strain Gauge

Figure 9에 나타난 것처럼 시편 1번을 시험 후, 외형 및 x축 대칭면에 대해 와이어 커팅한 단면을 육안 검사한 결과 파단이 발생하지 않았다. Figure 10에는 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 노치 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, 시편 2번도 500 bar까지 내부 파단이 없었을 것으로 추정된다.

Figure 11은 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.

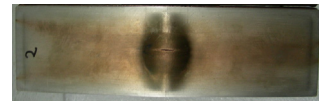


(a) Full View

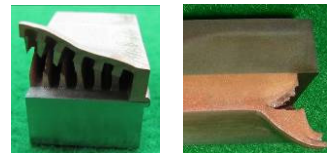


(b) Section View of 1/2

Fig. 9 Cooling Channel Specimen #2 after the Experiment



(a) Full View



(b) Section View of 1/4

Fig. 10 Cooling Channel Specimen #2 after the Experiment

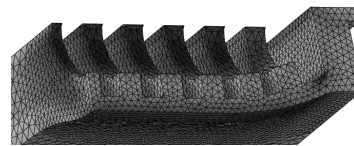


Fig. 11 Von-Mises Stress Contour of 1/4 Cooling Channel Specimen #2 Analysis Results at 500 bar

Table 2는 60~500 bar에서 시편 1번 및 2번의 4개 스트레인 게이지의 변형율 해석 및 시험 결과를 비교한 표이다. 시험 과정에서 시편 1번은 140 bar 부근에서 1, 2번 게이지가, 시편 2번은 200 bar 부근에서 1, 2번 게이지가, 600 bar 부근에서 3, 4번 게이지가 시편과 부착이 떨어진 것으로 추정되어 이후 데이터는 표시하지 않았다.

강도 시험 결과에서 대칭적인 위치에 있어 해

석상 동일한 결과를 나타내는 게이지 간의 변형률 차이는 여기에는 나타내지 않았지만 압력에 상관없이 대부분 일정한 값을 유지하며 일부 작은 변형률 시험값을 제외하고 약 30% 수준이었다. 이는 Fig. 4(b)의 크랙의 원인이 되는 접합 비대칭성이 있는 헤드 강도 시편의 80 bar 이하 결과와 유사한 수준이다. 평판 강도 시편에서는 이러한 접합 불균일성이 발견되지 않았으므로 평판 시편은 측정 위치에 따른 측정값의 민감도가 큰 것을 추정할 수 있다.

Table 2. Comparisons of Plate Specimen Strains between Experiments and Analyses

압력 (bar)	방향	시편 1번 변형률 (μ)							
		#1		#2		#3		#4	
		시험	해석	시험	해석	시험	해석	시험	해석
60	x	477	292	422	260	-39	-23	-40	-24
	y	33	13	100	116	10	14	120	128
100	x	1702	546	1532	485	-142	-50	-155	-53
	y	24	18	309	209	36	26	240	215
200	x	-	10109	-	8936	-1556	-702	-1654	-749
	y	-	-1549	-	2816	116	80	1198	678
300	x	-	32606	-	32027	-3797	-2728	-4001	-2814
	y	-	-5337	-	9373	79	-23	3195	2420
400	x	-	67096	-	61982	-7257	-6255	-7469	-6450
	y	-	-10575	-	19337	49	-100	6952	6548
500	x	-	118952	-	108627	-12136	-11457	-11799	-11834
	y	-	-18181	-	34305	-221	-224	12012	12974

압력 (bar)	방향	시편 2번 변형률 (μ)							
		#1		#2		#3		#4	
		시험	해석	시험	해석	시험	해석	시험	해석
60	x	208	182	200	192	-23	-19	-26	-18
	y	65	91	53	53	54	56	55	98
100	x	487	310	514	326	-60	-33	-70	-34
	y	124	153	96	88	101	94	106	164
160	x	1458	761	1759	798	-210	-112	-270	-106
	y	199	290	179	113	187	153	222	270
200	x	-	2027	-	2159	-590	-360	-762	-322
	y	-	298	-	-44	339	218	439	370
290	x	-	10774	-	10983	-1832	-1664	-2171	-1588
	y	-	3051	-	-937	859	472	1120	1130
400	x	-	28478	-	28599	-4359	-4405	-5011	-4342
	y	-	8212	-	-1934	2181	1648	2872	3743
500	x	-	50056	-	50457	-7005	-7944	-8233	-7862
	y	-	14664	-	-2613	3551	3297	4814	7628

해석-시험간의 평균 차이는 시편 1번의 1, 2, 3, 4 게이지의 (x, y) 방향이 %로 각각 (138, 94),

(139, 17), (73, -90), (73, 19), 시편 2번의 1, 2, 3, 4 게이지는 (54, -26), (61, 22), (36, 28), (71,-15)이며, 시편 1번 전체로는 (75, -27), 시편 2번은 (53, 11) 이었다. 시편 1번의 차이가 시편 2번에 비해 38% 까지 차이가 크게 발생하였다. 시편 1번에서 1, 2번 게이지가 다른 게이지에 비해 라운드 노치로 인해 변형률이 크며 해석이 시험에 비해 작게 예측되었다. 1, 2번의 해석-시험간 차이가 3, 4번에 비해 컸다. 변형률이 클수록 시험이 크게 예측하며 차이가 커지는 이러한 경향은 헤드 시편 결과와 유사하였다. 두 개의 시편 모두 x 방향은 시험이 크게 예측하였으나 y 방향은 게이지에 따라 달랐다.

3. 결론 및 향후 계획

예연소기 브레이징 접합부의 강도 특성을 알아보기 위하여 용광로 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 응력이 발생하는 부위에서 파단이 발생한 것을 확인하고 등가 응력 및 변형률의 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. 류철성, 정용현, 최환석, 이동주, “액체로켓 연소기 재생냉각 채널 상온 구조해석”, 한국추진공학회지, 제9권 4호, 2005, pp.39-47
3. Dassault Systems, Abaqus Analysis User's Manual, 2009