

## 技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.5.081>

## 액체로켓엔진 터보펌프 알루미늄합금 주조케이싱 파열시험

윤석환\* · 전성민\* · 김진한\*\*

## Burst Test of Cast Al-Alloy Casing for Liquid Rocket Engine Turbopump

Suk-Hwan Yoon\* · Seong Min Jeon\* · Jinhan Kim\*\*

## ABSTRACT

Turbopump is a key component in liquid rocket engines, and reducing weight while maintaining structural safety is one of the major concerns of turbopump designers. To reduce the weight aluminium alloy castings instead of steel casings are introduced. The casting process is especially useful for enhancement of productivity and for reduction of product costs. But, since castings are used in space vehicle engines, reliability cannot be compromised. Therefore, proper design, production process and thorough investigation should be performed to ensure structural integrity. In this study inlet casings for a fuel pump were casted with A356.0-T6 alloy and using one of them a burst test was conducted to ensure structural integrity. Structural analysis is performed for simulation, and with multiple strain gages strains are measured and compared with predictions.

## 초 록

액체로켓엔진의 핵심부품인 터보펌프의 경량화를 위하여 케이싱에 알루미늄 합금 소재를 도입하였고 생산성 향상 및 생산 단가의 절감을 위하여 주조 공법을 도입하였다. 부품의 신뢰도가 생명인 액체로켓엔진에 주조를 사용하기 위하여 올바른 주조 규격 수립 및 주조 공법의 최적화, 그리고 주조된 제품의 다방면에 걸친 철저한 검증을 실시하는 것이 필수적이다. 이번 연구에서는 알루미늄 합금인 A356.0-T6 합금을 이용하여 연료펌프 입구케이싱을 주조하였으며 주조 품질의 기본적인 구조 검증을 위하여 파열시험을 수행하였다. 주조된 형상에 맞추어 구조해석을 실시하여 파열 시점을 예측하였으며 파열시험 시 제품에 부착된 스트레인게이지를 이용하여 해석을 통한 변형률 예측과 비교하였다.

Key Words: Turbopump(터보펌프), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Casting(주조), Burst Test(파열시험), Structural Analysis(구조해석), Aluminum Alloy(알루미늄 합금)

접수일 2012. 5. 24, 수정완료일 2012. 7. 27, 게재확정일 2012. 8. 2

\* 정회원, 한국항공우주연구원 터보펌프팀

\*\* 종신회원, 한국항공우주연구원 터보펌프팀

† 교신저자, E-mail: shyoon@kari.re.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 춘계학술대회(2012. 5. 17-18, 금오공과대학교) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

## 1. 서 론

액체로켓의 엔진의 핵심 구성품으로서 연료와 산화제를 가압하여 연소실로 공급하는 터보펌프

는 요구되는 성능을 만족시키면서도 중량을 최소화하여 가반하중을 확보하는 것이 매우 중요하다[1, 2]. 이러한 노력의 일환으로 각국의 터보펌프에는 기존의 철강 소재에서 벗어나 알루미늄 합금이나 티타늄 합금 등 비강도가 높은 소재가 적극적으로 사용되고 있으며, 많은 부품에서 기존의 스테인리스강이나 내열강을 대체하는 성과를 거두고 있다[3, 4]. 한국항공우주연구원에서도 이러한 경량 소재의 채용을 위하여 여러 곳에 적용 가능성을 탐색하였으며 운전 조건이 상대적으로 평이한 연료펌프에 이러한 소재를 사용하는 것이 가장 용이하다고 판단되었다. 연료펌프 케이싱은 크게 입구 케이싱과 벌류트 케이싱으로 나눌 수 있는데, 이 중 입구 케이싱의 내부 작동 압력이 매우 낮은 수준으로서 기존의 스테인리스강에서 알루미늄 합금으로의 대체가 적절할 것으로 생각되었다.

알루미늄 합금을 이용하여 터보펌프 케이싱을 제작하는 방법은 단조 소재를 절삭 후 용접 및 정삭을 통하여 제작하는 방법과 주조 소재를 주조하여 정삭하는 방법으로 크게 나눌 수 있다. 통상적으로 알루미늄 주조 기술은 알루미늄 용접 기술보다 안정적이며 주조를 통해 내부 복잡한 유로를 효과적으로 구현함과 동시에 구조적으로 중요한 곳에 효과적으로 충분한 벽 두께를 구현할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 주조를 통하여 연료펌프 입구케이싱을 설계 및 제작하였다. 알루미늄 주조 소재로는 적절한 강도를 가지면서도 주조성이 우수한 A356.0-T6 소재를 선정하였다. 주조 방법으로는 내부 유로 구현에는 셸 주조 방법을 선택하였으며, 외형 구현에 로스트 왁스 주조 방법을 적용하였다. 제작된 주조품의 기본적인 주조 품질을 검증하고 케이싱의 구조 강도를 파악하기 위하여 정적 3차원 구조해석 및 파열시험을 실시하였다. 파열시험은 전용 수압시험설비에서 수압을 이용하여 수행하였다. 케이싱의 외벽에 변형률을 실시간으로 측정하기 위한 스트레인게이지를 부착하였으며, 측정된 변형률과 구조해석에서 예측된 변형률을 비교하였다[5-7].

## 2. 주조 케이싱 파열시험

### 2.1 파열시험 방법

Table 1에 개발된 펌프의 간략한 정보를 수록하였으며, 운전 조건에 대한 구조 설계 및 해석을 통하여 완성된 연료펌프 입구 케이싱의 3차원 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 구조 해석에서 고려하는 운전 조건에서의 압력은 입구 케이싱의 경우 입구 플랜지 부근은 약 0.2~0.3 MPa, 벌류트 케이싱과 조립되는 부분의 압력은 약 10~12 MPa 정도이다.

A356.0-T6 소재를 사용한 주조 공정으로 완성된 입구 케이싱의 건전성 및 강도를 실험적으로 확인하기 위하여, 실제 제작된 케이싱에 대하여 수압을 이용한 파열시험을 실시하였다. Fig. 1의 케이싱 형상에 플랜지를 부착하여 파열시험을 실시하게 된다.

준비된 입구 케이싱의 개구부를 적절한 플랜지와 실(seal)을 이용하여 밀폐한 후 내부 전체 공간에 대하여 균일 압력으로 가압하여 케이싱

Table 1. Turbopump specification

		Oxidizer pump	Fuel pump
Type		centrifugal	centrifugal
Medium		LOx	kerosene
Stages		single	single
Material	shaft	stainless steel / superalloy	stainless steel
	casing	stainless steel / superalloy	stainless steel

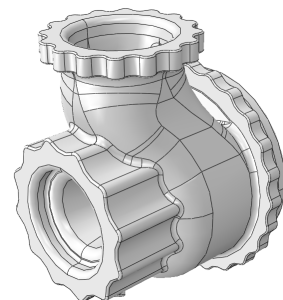


Fig. 1 Designed shape of inlet casing for fuel pump

의 건전성을 확인하였다. 가압 도중 케이싱의 항복 여부를 확인하기 위하여 케이싱 외벽에 4개 소를 선정하여 3축 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 실시간으로 측정하였으며, 후에 이 지점에서의 변형률을 해석결과와 비교하였다.

파열시험은 파열 시점까지 케이싱 내부 압력을 점차 증가시켜야 하는데, 항복 시점 및 파열 시점을 보다 효율적으로 파악하기 위하여 가압 및 해압을 반복하면서 점차 가압량을 늘이는 방법을 선택하였다. 이 때, 각 단계의 해압 시 변형률이 원점으로 복귀하는지의 여부를 관찰하여 케이싱의 소성 변형 양상을 파악하고자 하였다. 입구 케이싱의 시간에 따른 가압 패턴을 Fig. 2에 나타내었다. 그래프에서 최초 0.5 MPa의 수압으로 가압하여 주요 체결 부위의 누수 여부를 확인한 후 해압하였다. 이후 1 MPa에서부터 가압과 해압을 반복하며 매 가압 시점에서

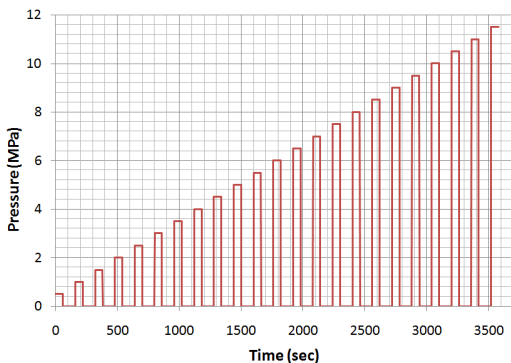


Fig. 2 Pressurizing pattern for the burst test

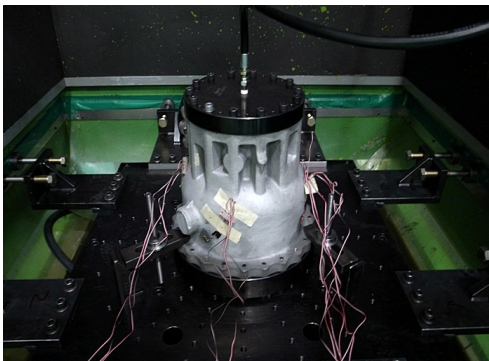


Fig. 3 Inlet casing ready for burst test

0.5 MPa씩 압력을 증가시켜 파열 시점까지 진행하였다. 매 가압 및 해압 단계에서 스트레인 게이지들의 변형률을 실시간으로 관찰, 기록하였다.

Figure 3에 수압시험 치구에 고정되어 시험 준비가 완료된 입구 케이싱 모습을 나타내었다. 준비된 입구 케이싱은 안전을 고려하여 마련된 전용 수압시험기를 이용하여 시험을 진행하였다.

앞서 기술하였듯이 입구 케이싱의 외벽에 3축 스트레인 게이지를 부착하였는데, 부착 위치를 Fig. 4에 나타내었다. 입구 케이싱은 굴곡이 많고 보강재인 림(rib)이 많이 분포하고 있어 스트레인 게이지를 임의로 부착하기가 어려운 편에 속한다. 따라서 부착의 편의성을 고려하여 입구 케이싱의 콜렉터(collector)외벽에 적절한 각도를 가지고 떨어져 있는 네 지점을 선정하여 부착하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 게이지 1번과 3번, 그리고 게이지 2번과 4번은 각각 케이싱 정면에서 보았을 때 좌우대칭을 이루는 위치에 부착되었다. 한편 게이지의 부착 방향은 펌프 축 방향에 맞추어 축 방향(axial) 및 직교 방향인 원주 방향(circumferential)으로 정의하였다.

위와 같이 시험 조건을 설정하고 스트레인 게이지를 부착한 후, 수압을 이용한 가압 시험을 실시하였다. 스트레인 게이지는 스트레인 앰프와 연결하여 실시간으로 가압 및 해압에 따른 변형률의 변화를 측정하고 기록하였다.

## 2.2 파열시험 결과

앞 절과 같은 방법을 통하여 입구 케이싱의 파열시험을 실시하였으며, Fig. 5와 Fig. 6에 입구 케이싱의 시간에 따른 변형률 측정 결과를

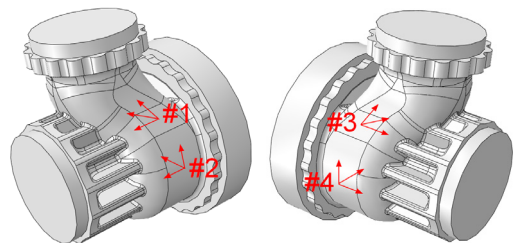


Fig. 4 Points of strain measurement for casing #1

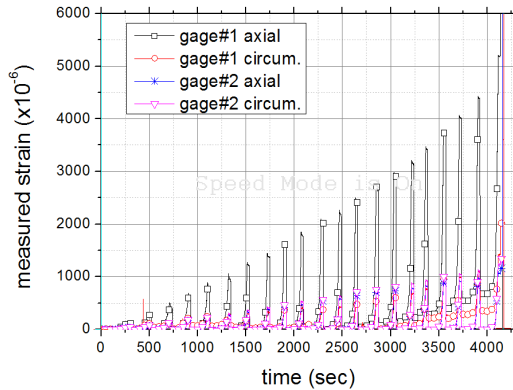


Fig. 5 Measured strains for gage #1 and #2

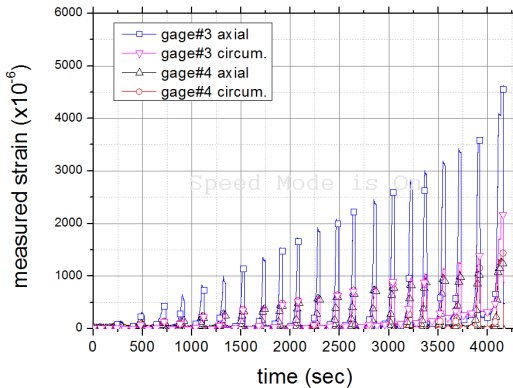


Fig. 6 Measured strains for gage #3 and #4

정리하여 나타내었다. Fig. 5는 1번과 2번 게이지, 그리고 Fig. 6은 3번과 4번 게이지의 변형률 측정값을 표시하였다.

위의 그래프에서, 입구 케이싱의 변형률은 가압 및 해압 패턴에 맞추어 즉각적으로 변화가 일어나고 있음을 볼 수 있다. 1, 2번 게이지와 3, 4번 게이지가 좌우 대칭을 이루고 있으므로 두 그래프도 거의 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 게이지의 각 축 방향 변형률은 약간의 편차가 있으나 크게 보아 내부 압력에 비례하여 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 다만 시간상으로 대략 3000초 이상에서는 여러 축의 신호에서 동시다발적으로 해압 시 눈에 띄게 잔류 변형량이 증가하였으며, 최대 변형량의 기울기도 선형 증가에서 벗어나 점차 커지는 것을 알 수

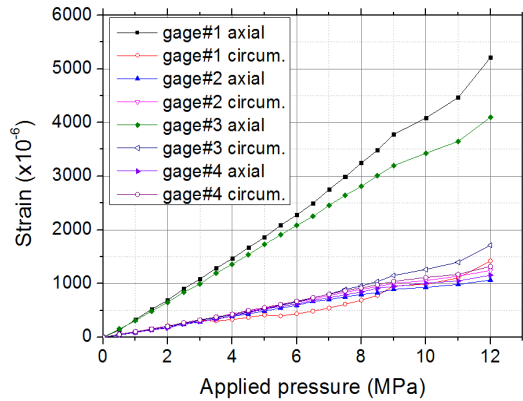


Fig. 7 Measured strains vs. applied pressure for inlet casing #1

있다. 이것으로 보아 대략 이 시점에서 케이싱의 거시적인 소성 변형 거동이 발생하고 있음을 유추할 수 있으며, 이때의 내부 압력은 대략 10 MPa 수준인 것으로 파악되었다.

한편 축 방향 및 원주 방향 변형률을 비교해 보면, 네 곳에 부착된 스트레인 게이지 모두 축 방향 변형률이 내부 압력에 따라 가장 민감하게 반응하고, 원주 방향 변형률은 항상 둔감하게 반응하는 것으로 나타났다. 이것은 케이싱의 구조적인 형상 때문인 것으로 파악되며, 이것으로 보아 구조된 입구 케이싱은 원주 방향 강성보다 축 방향 강성이 작은 것으로 유추할 수 있다.

이와 같은 축 방향 민감도의 차이는 가압 상태일 때의 변형률 값만 추출하여 내부압력과 변형률의 관계를 도식한 Fig. 7의 그래프에서 보다 뚜렷하게 확인이 가능하다.

Figure 7은 구조 입구 케이싱의 내부압력과 변형률의 관계를 나타내고 있다. 내부압력에 대한 민감도에 따른 변형률의 변화는 탄성 영역에서는 크게 보아 선형적인 관계를 유지하고 있음을 알 수 있다. 앞서 기술하였듯이 1번 게이지와 3번 게이지, 그리고 2번 게이지와 4번 게이지는 각각 정면에서 보았을 때 케이싱의 좌우 대칭 위치에 부착되어 있으므로 신호의 크기 및 경향이 매우 유사하다. 다만 좌우 신호에서 민감도의 차이는 약간씩 발생하고 있으나 이는 시험품과 동시에 구조된 다른 구조 케이싱의 절단 검사

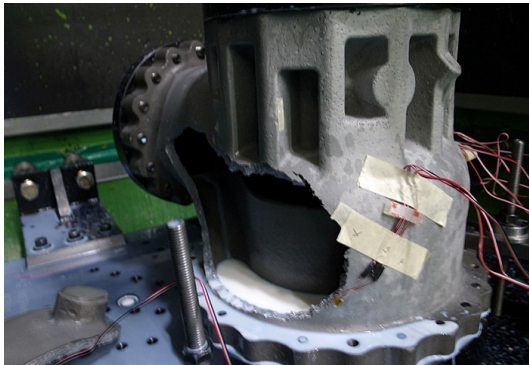


Fig. 8 Burst shape of inlet casing

결과 주조에서 발생하는 케이싱의 형상 및 두께 공차가 주요 원인인 것으로 판단되었다.

거의 모든 케이싱에서 대체적인 선형 증가 추세는 대략 내부압력 9 MPa 정도 시점까지 지속되며, 이후로는 소성 변형으로 인해 눈에 띄게 기울기가 변화하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 8에 입구 케이싱의 파열 형상을 나타내었다. 케이싱의 최종 파열은 내부 압력 12.4 MPa 근처에서 일어났으며, 파열 지점은 케이싱의 측면 콜렉터 부분으로서, 이 지점은 다음 절의 구조 해석 결과에서 예측한 취약 지점과 일치하는 것으로 나타났다.

### 3. 파열시험조건에 대한 구조해석

#### 3.1 해석 방법

터보펌프 케이싱의 초기 구조 설계는 3차원 모델링과 각종 하중을 고려한 구조 해석을 반복함으로써 최적화가 이루어진다. 구조 해석은 유동 해석 결과로부터 나온 내부 압력 분포를 사실적으로 고려하여 이루어지며 이를 토대로 최종 3차원 형상이 결정된다.

그러나 이렇게 실제 운전 조건에 맞게 설계된 케이싱에 내압/기밀시험이나 파열시험을 실시할 경우, 이 조건에 대하여 다시 구조 해석을 실시하여야 한다. 그 이유는 실제 운전 조건에서는 내부에 복잡한 압력 분포를 고려하여 설계가 이루어지지만, 내압/기밀시험이나 파열시험은 시험

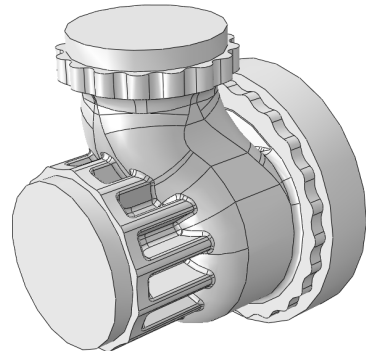


Fig. 9 Modified shape of inlet casing for finite element analysis

Table 2. Mechanical properties of A356.0-T6

	$\sigma_y$ , MPa (0.2% offset)	$\sigma_{ut}$ , MPa	%EL ( $l=50\text{mm}$ )	E, GPa
A356.0 -T6	186	228	3.0	72.4

의 특성상 대부분 단일 압력으로 내부가 채워지므로 하중 조건이 크게 달라지기 때문이다. 또한 이러한 시험 시 케이싱의 개구부를 차단하는 플랜지가 설치되는데, 플랜지 면적으로부터 내부 압력에 의한 추가적인 외력이 상당량 발생하기 때문에 이것 역시 해석에 고려하여야 한다.

따라서 구조 해석은 플랜지가 모두 체결된 상태에서의 3차원 모델을 생성하여 내부에 균일 압력 하중을 가하는 방법으로 진행하였다. Fig. 9에 개구부에 모두 플랜지가 모델링된 입구 케이싱의 3차원 형상을 나타내었다.

파열시험은 금속의 특성상 필연적으로 소성 변형을 동반하게 되므로 소재 기계적 성질의 탄성 영역 및 소성 영역까지 고려하는 탄소성 해석을 실시하였다. 아울러 모재인 A356.0-T6의 주조품에서 채취하여 가공한 인장시험편에 대한 인장시험을 실시하여 기계적 성질을 파악한 후 이를 해석에 고려하였다. Table 2에 기계적 성질의 대략값을 수록하였다.

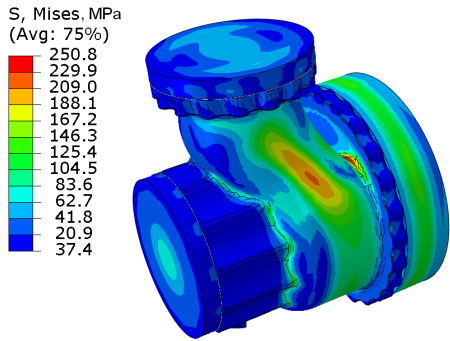


Fig. 10 Distribution of Von Mises equivalent stresses of inlet casing at 8 MPa

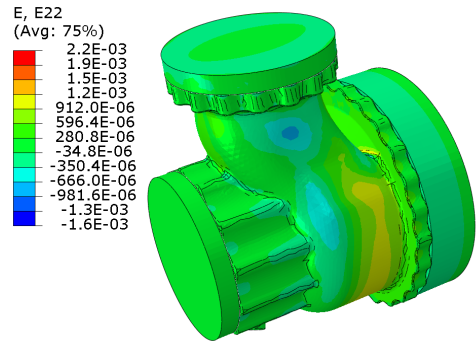


Fig. 12 Distribution of circumferential strains at 8 MPa

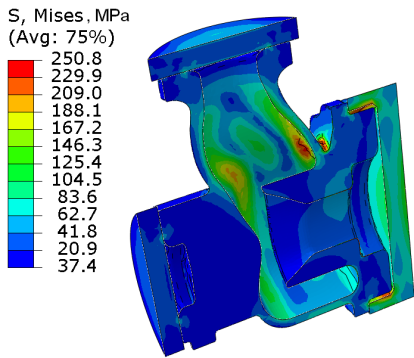


Fig. 11 Max. equivalent stress area at the inner wall of inlet branch

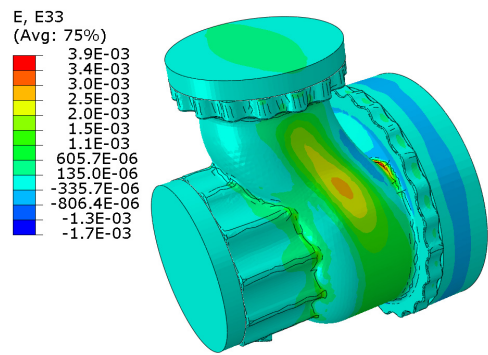


Fig. 13 Distribution of axial strains at 8 MPa

3.2 해석 결과

내부 압력이 존재하고 있을 때 입구 케이싱에 나타나는 미세스 등가응력의 분포의 한 예를 Fig. 10에 나타내었다. 파열 시험에서 적용하였던 여러 수준의 균일 압력 하중을 모두 고려하여 해석한 결과 중 한 예로서 내부 압력이 8 MPa 일 때의 응력 분포를 나타낸다.

다양한 수준의 내부 압력을 하중으로 적용하여 해석을 수행한바 등가 응력 분포는 거의 동일한 패턴으로 나타났다. Fig. 10에서 최대 응력은 입구 콜렉터 뒷부분의 오목한 곳에서 발생하는 것처럼 보이고 있으나, 실제 최대 응력 발생 지점은 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 해당 부분의 안쪽 내벽에서 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 파열 시험 시 최초의 파단은 최대 응력 지점에서 발생하여, Fig. 10에서 볼 수 있는 케이싱

측면 콜렉터 외벽의 폭넓은 고응력 부위를 따라 진행되는 것으로 예측할 수 있다. Fig. 8의 실제 파단 형상과 비교하면 이러한 예측이 타당함을 확인 가능하다.

한편 파열 시험에서 측정된 각 축 방향 변형률과 비교할 수 있도록 펌프 축 방향 및 원주 방향 변형률을 분리하여 나타내었다. Fig. 12 및 13은 그 예인데, 같은 내부 압력 8 MPa에서 원주 방향 변형률보다 축 방향 변형률이 크게 우세하게 나타난다. 이러한 결과는 Fig. 13의 축 방향 변형률 분포는 Fig. 10의 등가 응력 분포와 매우 유사한 분포를 나타낸다는 사실과 일맥상 통한다.

이렇게 각 축 방향으로 나누어 조사한 변형률을 내부 압력에 따라 그래프로 표시한 후 파열 시험에서 측정된 변형률과 비교하여 보았다. 실제 게이지는 네 지점에 부착되어 있으나 각각

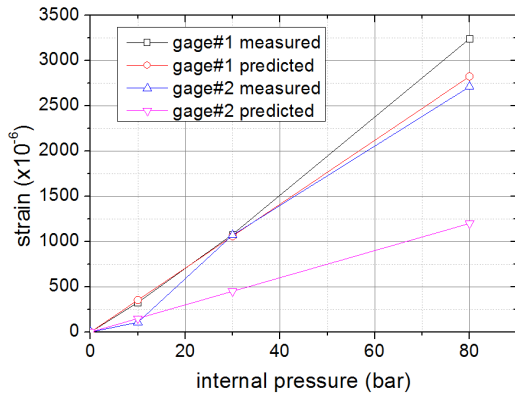


Fig. 14 Measured vs. predicted axial strains at gage #1 and #2

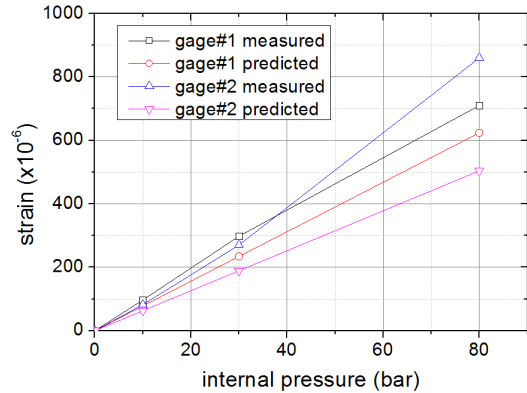


Fig. 15 Measured vs. predicted circumferential strains at gage #1 and #2

두 지점씩 좌우 대칭이므로 이론적으로 1번과 3번, 2번과 4번 게이지의 측정값 및 예측값은 같아야 한다. 이러한 대칭성을 감안하여 1번 및 2번 게이지에서의 변형률을 비교하여 보았다. 다만 실제 부착위치 오차나 기타 제작 형상 오차, 소재의 불균일성 등으로 다소의 차이는 발생할 수 있다.

Figure 14와 15에서, 스트레인게이지 부착 지점에서의 축 방향 및 원주 방향 변형률의 측정값과 예측값이 비교적 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 두 그래프 모두 1번 게이지에서의 변형률을 잘 맞는 편이며, 2번 게이지의 변형률에서 다소 오차가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 1번 게이지는 비교적 고응력 부위로서 변형률의 분포 패턴이 뚜렷하여 해석 및 측정이 용이하였던 반면, 2번 게이지는 응력이 낮은 부위에 속해 각종 오차에 민감할 수밖에 없는 것으로 판단된다. 이러한 오차의 원인으로는 주조 소재에서 흔히 발생하는 소재 기계적 성질의 편차, 주조 공차에 따른 형상 및 두께의 편차, 그리고 게이지 측정 위치 및 측정 오차 등이 있는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

액체로켓엔진 터보펌프의 경량화 달성 및 추

후 양산성을 고려하여 연료펌프 입구케이싱을 A356.0-T6소재 알루미늄 합금을 이용하여 설계 및 제작하였다. 제작된 주조 케이싱의 기본적인 구조 검증을 위하여 파열시험을 실시하였다. 파열시험은 스트레인게이지를 부착하여 실시간으로 변형률을 측정함으로써 해석을 통한 예측과 비교를 실시하였다. 시험 수행 결과 게이지 부착 지점에서 예측값과 비교적 잘 일치하는 데이터를 얻을 수 있었다. 파열 지점 및 형상 또한 해석을 통한 예측과 잘 일치하는 것을 확인하였으며 이를 통해 연료펌프 입구 케이싱의 설계 및 제작 건전성을 검증할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. Kim, J., Lee, E. S., Choi, C. H. and Jeon, S. M., "Current Status of Turbopump Development in Korea Aerospace Research Institute," International Astronautical Congress(IAC-04-S.P.17), 2004
2. 김진한, 홍순삼, 정은환, 최창호, 전성민, "30톤급 액체로켓엔진용 터보펌프 개발현황," 한국추진공학회 제25회 추계학술대회 논문집, 2005, pp.375-383
3. Kim, J., Hong, S. S., Jeong, E. H., Choi, C. H. and Jeon, S. M., "Development of a

- Turbopump for a 30 Ton Class Engine," 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA Paper 2007-55516, 2007
4. 김진한, "국내 터보펌프 개발 현황," 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2008, pp.73-78
  5. 윤석환, 전성민, 김진한, "액체로켓 터보펌프 벌류트 케이싱의 파열시험," 유체기계저널, 제14권, 제4호, 2011, pp.12-18
  6. 윤석환, 전성민, 김진한, "액체로켓 터보펌프 벌류트 케이싱의 구조설계 및 시험," 한국추진공학회 제35회 추계학술대회 논문집, 2010, pp.775-776
  7. 윤석환, 전성민, 김진한, "터보펌프 케이싱의 구조해석 및 측정," 항공우주기술, 제5권, 제2호, 2006, pp.174-180