

초고온 동압을 받는 제트 베인의 구조 안전성 평가에 대한 연구

박성한* · 이상연** · 박종규*** · 김원훈* · 문순일*

A Study on Structural Safety Evaluation of Jet Vane under very High Temperature and Dynamic Pressure

Sunghan Park* · Sangyeon Lee** · Jongkyoo Park*** · Wonhoon Kim* · Soonil Moon*

ABSTRACT

To evaluate structural safety factor of the jet vane for the thrust deflection system under the dynamic pressure and very high temperature(2700°C) of the combustion gas flow, the high temperature tension tests of refractory metals and 3-D nonlinear numerical simulations are performed. Through the analysis of high temperature structural behavior for jet vane, the structural safety of jet vane is evaluated, and numerical results are compared with static ground tests of jet vanes. It has been found that most of structural and thermal loading is concentrated on the vane shaft which worked as safe under 1400°C. From the comparison of static ground tests and numerical results, the evaluation criterion using the vane load and shaft displacement is more useful to estimate the structural safety than using the equivalent stress.

초 록

초고온(2700°C) 연소가스에 직접 노출된 상태에서 가스유동에 의한 동압을 받는 추력편향장치용 제트 베인의 열구조 안전성을 평가하기 위하여 내열합금의 초고온 인장시험 및 3차원 비선형 수치해석을 수행하였다. 고온 구조거동을 분석하여 제트 베인의 구조안전성을 평가하였으며 구조해석결과를 지상 연소시험결과와 비교하였다. 구조 및 열 하중의 대부분은 제트 베인 축에 집중되었으며, 축은 1400°C 이하에서 구조적으로 안전한 것으로 밝혀졌다. 지상연소시험결과와 구조해석결과와의 비교를 통하여 베인 하중과 축의 변위를 기준으로 구조안전계수를 평가하는 것이 등가응력에 의한 평가기준보다 더 유용한 기준으로 판단되었다.

Key Words: Thrust Deflection System(추력편향장치), Jet Vane(제트 베인), Deflection Angle(편향각), Dynamic Pressure(동압), Structural Safety Evaluation Criterion(구조 안전 계수 평가기준), High Temperature Tension Test(초고온 인장시험)

† 2005년 5월 27일 접수 ~ 2005년 8월 4일 심사완료

* 국방과학연구소 기-4-4

** 국방과학연구소 기-4-9

*** 국방과학연구소 기-5-4

연락처, E-mail: psh4534@empal.com

유도탄의 추력방향을 조종하기 위해 사용되는 제트 베인은 추진기관의 노즐 후방에 설치된 4개의 제트 베인으로 구성되며, 제트 베인의 표면은 추진제가 연소하는 동안 약 2700℃의 고온 연소가스에 직접 노출되고 특히 연소가스에 의한 높은 동압을 받는다. 이러한 초고온 및 고압에서의 구조안전계수를 평가하기 위해서는 약 2000℃ 까지 고온 인장시험이 요구된다. 인스트론 및 간접 가열로를 사용하면 1000℃까지의 인장시험을 수행할 수 있다. 또한, 고온용 재료시험장비인 Gleeble 로는 최대 1500℃까지 인장시험이 가능하나 구속에 의한 열응력 때문에 시험 결과의 신뢰성은 낮다. 그 이상의 온도에서 재료시험은 간접가열 방식의 특수 재료시험장비에서 가능하나 국내의 경우 발표 사례는 전무하다 [1-3].

제트 베인에 대한 구조안전계수를 규명하기 위한 구조해석은 제트 베인의 형상이 복잡하고 부품간의 고온 열전달이 수반되며 접촉이 발생하기 때문에 열, 재료 및 접촉 비선형성을 모두 고려하는 3차원 비선형 수치해석이 필수적이다. 그러나 제트 베인의 작동중에 내부온도가 2000℃ 까지 상승함으로 재료의 온도증가에 의한 요소의 강성저하로 수치해의 수렴성에 문제가 많으며 세계적으로도 연구가 시도되어 왔지만 아직까지 이렇다 할 구조안전계수 평가기준이 제시되지 않는 상황이다[4].

본 연구에서는 이와 같은 초고온 및 고압의 환경에 노출되는 제트 베인의 구조안전계수를 평가하기 위하여 내열 합금의 초고온 인장시험과 병행하여 제트 베인의 구조시험 및 지상연소시험을 실시하였으며 이에 대한 수치해석적인 검증은 시도하였다. 내열 합금 재료인 TZM (Titanium-Zirconium-Molybdenum), CIT(Copper-Infiltrated-Tungsten) 및 Ta (Tantalum)을 대상으로 2000℃ 까지 고온 인장시험을 실시하여 비선형 해석 프로그램인 "MARC"의 입력자료로 활용함으로써 제트 베인의 열구조 비선형 해석을 수행 하였다. 특히 고온에서의 강성 저하로 인한 수치해석상의 수렴성 문제를 해결하기 위

하여 재모델링 등을 통하여 반복적으로 구조해석을 수행하여 극한 열구조 환경에 노출되는 제트 베인의 구조안전계수 평가기준을 제시하였다.

2. 초고온 인장시험 및 구조시험

2.1 초고온 재료인장시험

제트 베인용 내열합금 재료에 적용된 초고온 인장시험기의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 내열합금 전용 고온 재료시험기(Instron Model 4482)를 이용하여 초고온 인장시험을 실시하였다 [3]. ASTM 규격을 기준으로 하여 표점거리만을 제한적으로 가열할 수 있도록 인장시편을 이중 dog-bone형으로 설계하였다[5, 6]. 시편가열시 구속에 의해 열응력이 발생하지 않도록 시편의 그립부를 썬기형으로 설계하여 시편의 상하 이동을 자유롭게 하였다. 또한 아르곤(Ar) 가스를 주입하여 로내의 산화 분위기를 방지하였다. 시편은 분당 300℃로 가열하였으며 시편 중간에 부착된 C-형 열전대로 표점길이 중앙부 온도를 2000℃까지 측정하였다. 인장시험은 상온부터 2000℃까지 200℃ 간격으로 각 온도에서 5회씩 실시하였다.

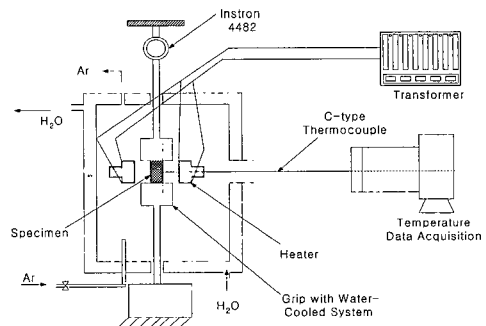


Fig. 1 Schematic Diagram of a very High Temperature Tension Tester

2.2 구조시험

제트 베인은 베인, 축, 내열판 및 스크루로 구성되어있다. 베인(CIT)은 추진가스의 동압을 받고, 베인에 조립되어 있는 축(TZM)은 동압으로

부터 베인 조립체를 지지하는 구조적 역할을 하며 스크루(Ta)는 축과 베인 및 내열판과 체결되어 제트 베인의 회전을 방지하는 역할을 한다. 또한 내열판(TZM)은 초고온 가스가 축을 따라 유입되는 것을 차단하는 역할을 한다.

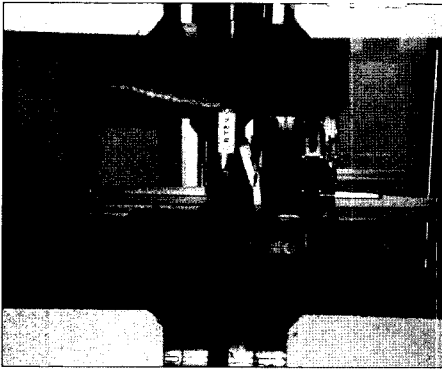


Fig. 2 Structural Test for Jet Vane Assembly

제트 베인의 구조시험은 만능인장시험기에서 수행되었으며 구조시험장면을 Fig. 2에 나타내었다. 직경이 20mm인 원상의 치구로 축의 루트부를 기준하여 베인 스팬(span) 길이의 45% 위치에 하중을 가하면서 축 변형과 하중을 계측하였다. 베인 동압은 유동해석 결과로부터 획득된 값으로 베인 스팬 길이의 45% 위치가 압력 중심점(center point of pressure)이다. 또한 추진기관의 지상연소시험을 실시하여 제트 베인에 대한 열구조 해석결과와 비교하였다. 한편, 연소시험시 추진기관 후방에 제트 베인을 장착한 후, 축에서 응력이 가장 많이 걸리는 루트부로부터 아래쪽으로 7mm 위치 떨어진 축의 중심부에 열전대를 설치한 후 베인을 10°, 15°, 20°, 25°로 편향시킨 상태에서 축의 온도를 계측하였고 지상연소시험 완료 후 축의 변형량을 계측하여 제트 베인의 변형 여부를 판단하였다.

3. 구조해석 및 열해석

3.1 상온 구조 해석

구조해석모델은 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 제트 베인을 대상으로 하였다.

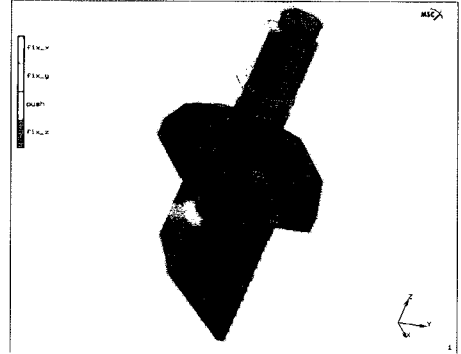


Fig. 3 Modeling and Boundary Conditions for Jet Vane Assembly

열전달 초기치 문제와 연관된 대변형 탄소성 문제를 풀기 위하여 Updated Lagrangian 접근 방법을 사용하였다. 해석 대상인 제트 베인의 정확한 형상을 표현하기 위하여, 8개의 절점을 가지는 육면체 솔리드 선형 유한요소로 모델을 구성하였다. 선형 요소보다 정확도가 있는 것으로 알려진 20 절점 이차 요소는 응력해석과 열해석의 결과 변환에는 문제가 없으나 접촉하중의 전달에 사용할 수 없어 선형 요소로만 구성하였다. 몇 번의 예비해석을 통하여 굽힘 하중이 급격하게 전달되는 요소와 접촉이 발생하는 요소는 크기를 미세하게 하여 응력 구배를 완만하게 하였다. 이는 고온 및 순간적인 접촉해석에서 수렴성을 확보하기 위한 주요 인자임이 해석 결과에서 확인되었다. 베인에 작용하는 동압을 압력중심점에 등가의 집중하중으로 적용하였다. 집중하중은 베인 스팬 길이의 45% 위치에 적용되도록 하였다.

3.2 열해석 및 고온 구조해석

베인 표면에는 약 2700°C의 연소가스가 직접 부딪히면서 통과하므로 대류경계조건이 적용되어야 한다. 대류 경계조건은 베인 좌표, 연소시간 및 편향각에 따라 변하며 사용자 부프로그램 "film"을 작성하여 적용하였다. 열해석에 사용된

조건은 연소시험중 가장 혹독한 대류경계조건인 최대 편향각 25°를 적용하였다.

열해석에서는 온도에 따라 변하는 비열, 열전도계수 및 밀도를 사용하였다. 부품들이 접촉할 경우 접촉계면에서의 온도강하를 무시할 수 없으며 이를 열접촉 저항으로 정의하여 적용했다 [7]. MARC 에서는 접촉에서의 열전달을 Eq. 1로 표시하며 축의 내부에 설치된 열전대로부터 측정된 온도곡선과 일치하도록 열통과율을 조정하였다.

$$q = H_d \cdot (T_s - T_d) \quad (1)$$

여기서, H_d 는 열통과율이고, T_s 는 접촉하는 면의 온도이며, T_d 는 접촉된 면에서의 온도이다.

열 해석에서 얻어진 온도분포를 입력 값으로 사용하여 상온 구조해석에 사용된 동일한 해석모델을 대상으로 고온 구조해석을 수행하였다. 고온 구조해석에 사용된 재료모델은 탄소성 모델이며 등방성 가공경화를 고려하였다. 진응력-변형률 선도는 온도의 함수로 적용하였다. 열전달에 의해 축의 온도가 고온으로 증가하면서 강성의 급격한 저하 때문에 해의 수렴성을 확보할 수 없어 지속적인 해석의 수행이 불가능하였다. 따라서 반복적인 해석모델의 재구축을 통하여 수렴성을 확보하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 초고온 재료인장시험

대부분의 시편들이 균일한 온도가 유지되는 표점거리 이내에서 파괴되어 신뢰할만한 고온 강도를 얻었다. 그러나 초고온에서의 변형률은 계측이 용이하지 않기 때문에 상온에서 측정된 변형률과 변위의 비를 고온에 적용하는 정규화(normalizing) 방법을 통하여 응력-변형률 선도를 확보하였다[8]. Fig. 4는 제트 베인의 구조하중을 지지하는 축 재료인 TZM의 온도에 따른

인장 및 항복 강도의 변화를 나타낸 것이다. TZM의 강도는 온도의 상승으로 완만히 낮아지다가, 1400°C에서 급격히 저하되므로 TZM은 그 이상의 온도에서 고압 연소가스의 구조하중을 지탱하는 역할을 수행하기가 어려울 것으로 판단되었다. 즉 이 온도가 축의 사용 한계 온도라고 판단되며, 이 온도 이상에서 축에 구조안전계수가 발생될 것으로 예측되었다.

Figure 5는 1400°C에서 TZM의 진응력-변형률 선도이며 변형률 산출 기법을 적용하여 변형률을 계산하였다.

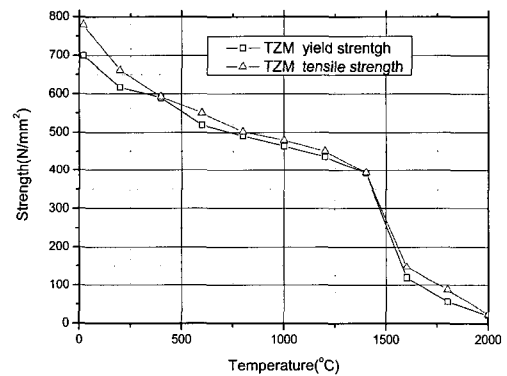


Fig. 4 Effect of Temperature on the Tensile Strength of TZM

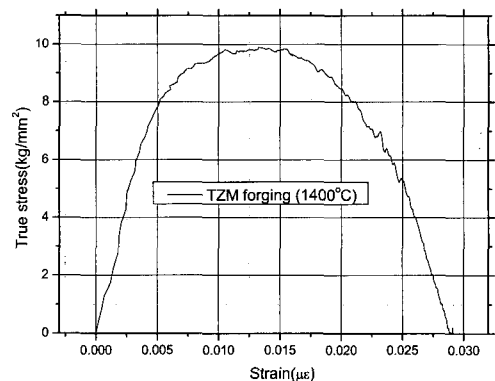


Fig. 5 Typical True Stress-Strain Curves for TZM at Temperature of 1400°C

4.2 구조시험과 구조해석

Figure 6은 상온에서 베인 하중과 압력중심점에서의 축 변위에 대한 구조시험결과와 구조해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 구조시험결과에서 초기변위 0.4mm는 부품의 조립공차 등의 원인으로 판단된다. 구조시험결과는 원상의 치구를 직접 모델링한 구조해석결과와 일치하고 있다. 치구를 사용한 해석결과는 집중하중을 적용시킨 해석결과 보다 강성이 상대적으로 크게 평가되는데 이는 축 변형이 커짐에 따라 원상의 치구와 베인 표면이 접촉하는 위치가 계속 바뀌어 따라 모멘트 길이가 감소하였기 때문으로 판단된다.

그러나 실제 지상연소시험시 동일한 편향각에서 베인의 압력중심점은 변하지 않으므로 치구를 사용한 제트 베인의 구조시험결과는 실제 연소시험하중 조건과 차이가 있으며 베인에 작용하는 하중은 축이 변형하더라도 압력중심점에 그대로 작용되어야 한다. 따라서 제트 베인의 구조안전계수를 평가하기 위해서 압력 중심점에 집중하중을 적용해야 한다.

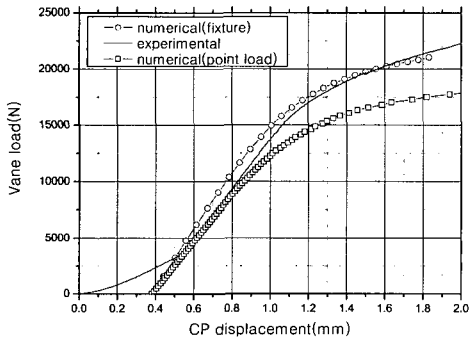


Fig. 6 Comparison of Structural Test Results and Numerical Results for Vane Load-Shaft Displacement at CP

4.3 온도 측정 및 열 해석

Figure 7은 지상 연소 시험중에 측정한 온도값과 열해석 결과를 비교한 것이며 연소시간 6.5초

이상에서의 온도 측정값은 해석결과와 비교적 일치하는 경향을 보이고 있다. 그러나 연소시간 6.5 이하에서는 베인 표면에 부착된 내열피막의 영향으로 측정온도의 상승속도가 해석결과보다 상당히 늦게 나타난다. 보다 안전한 구조설계 관점으로 고온 구조해석을 수행하기 위하여 편향각 25°의 온도해석 결과를 고온 구조해석의 입력값으로 사용하였다.

4.4 고온 구조안전계수 평가 기준

제트 베인의 손상은 축이 변형하여 제트 베인의 요구 성능이 만족되지 않거나 응력에 의한 파괴로 평가될 수 있다. 연소 말기 10.5초에서 구조해석결과와 지상연소시험 결과를 비교분석한 후 위의 2가지 판단기준으로 제트 베인의 구조안전계수를 비교 평가하였다.

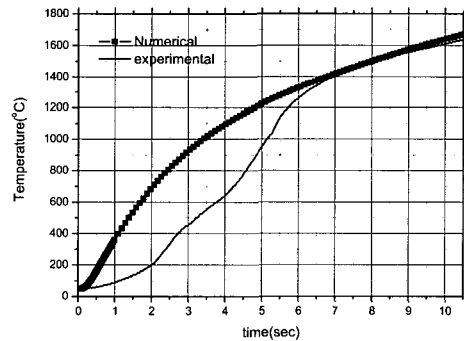


Fig. 7 Comparison of Measured and Numerical Temperature during Burning Time

베인의 구조하중을 주로 지탱하는 축의 루트부 한 개의 요소에 걸리는 Von Mises 등가응력과 고온 항복강도의 비를 분석하기 위하여 사용자 부프로그램 "PLOTV"를 작성하여 적용하였다. Fig. 8에 나타낸 편향각 15°에서 축 베인 하중이 1551N 일 때 응력을 최대로 받는 축의 루트부 요소의 고온 구조안전계수는 고온 항복강도기준 1.17로서 축은 안전한 것으로 나타났다.

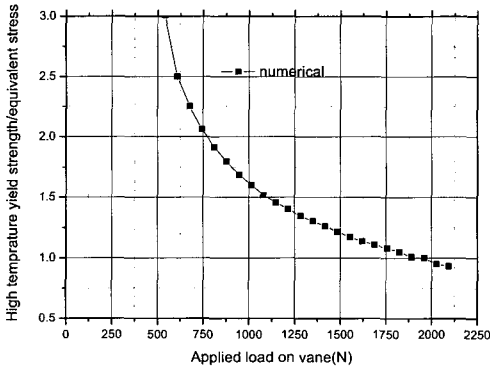


Fig. 8 Ratios between High Temperature Yield Strength and Equivalent Stress in Root of Shaft (Burning Time of 10.5 Second)

Figure 9는 편향각 15°에서 압력중심점에서의 축 변위와 베인 하중에 대한 구조해석결과를 나타낸 것이다. 편향각 15°, 베인 하중이 1551N 일 때 지상시험 결과 축의 변형은 0.2mm로 구조해석결과와 거의 일치하였다. 제트 베인의 전체 강성은 베인, 축, 내열판 및 스크루의 조합강성으로 구성된다. Fig. 9의 해석 결과는 제트 베인의 전체 강성을 나타내며 곡선의 비선형성이 시작되는 변위 0.23mm 이상에서 제트 베인은 하중이 작게 증가하여도 변위가 크게 증가하므로 제트 베인의 축력 요구 조건도 만족할 수 없으며 구조적으로도 불안정하게 된다. 따라서 제트 베인의 전체 강성의 비선형성이 시작되는 변위에 대응하는 하중이 제트 베인의 항복 변형을 일으키는 하중(yield load)으로 정의하였다. 이 평가 기준을 적용할 경우 편향각 15° 즉 베인 하중이 1551N 일 때 제트 베인이 지탱할 수 있는 하중이 1621N이므로 구조안전계수는 1.05로 나타났다.

2개의 평가기준으로 계산된 초고온 구조안전계수와 지상시험결과를 Table 1에 비교하여 나타내었다. 편향각 15°에서 축 변위-하중에 대한 구조안전계수는 1.05로 고온 항복강도와 등가응

력 비에 의한 구조안전계수 1.17 보다 작게 나타났다. 지상시험결과를 잘 반영하였다. 제트 베인의 경우 축이 변형하면 베인의 편향각에 따른 축력 (side force)이 바뀌므로 제트 베인의 구조안전계수를 축 변위-하중 기준의 1.05로 판단하는 것이 타당하다고 생각된다.

따라서 제트 베인과 같은 추력 편향 장치의 경우 축력 요구조건을 만족하기 위해서는 조립체의 전체 강성을 나타내는 축 변위-하중 기준으로 구조안전계수를 평가하는 것이 등가응력 평가기준보다 유용하다고 판단된다.

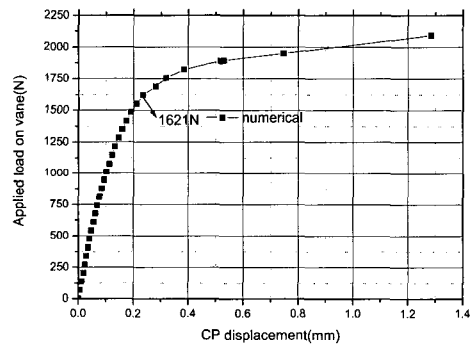


Fig. 9 Numerical Results on Vane Load-Shaft Displacement at CP (Burning Time of 10.5 Second)

Table 1. Comparison of Safety Factors for Vane Deflection Angle of 15 Degree (Burning Time of 10.5 Second)

vane deflection angle (deg)	15
applied load on vane(N)	1561
ground tests	shaft deformed
equivalent stress criterion	1.17
applied load vs CP displacement criterion	1.05

5. 결 론

제트 베인의 고온 구조안전계수를 평가하기 위하여 초고온 인장시험, 열해석, 고온 구조해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고온 구조해석을 수행하기 위하여 2000℃ 까지 내열합금의 인장시험을 성공적으로 수행하였다.
- 2) 구조하중의 부담률이 높은 축(TZM)의 구조강도는 1400℃ 부근에서 급격하게 감소하며 그 이상의 온도에서는 구조역할을 기대하기 어려운 것으로 판명되었다.
- 3) 상온에서 구조해석결과는 구조시험결과와 거의 일치하며 축 내부의 온도해석결과 역시 6.5초 이상에서 온도측정결과와 일치하는 경향을 나타내었다.
- 4) 베인 하중과 축의 변위 관점에서의 평가기준은 초고온 및 구조하중을 동시에 받는 추력 편향 장치용 제트 베인의 구조안전계수를 평가하는데 유용한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 강석봉, "A study on the effects of a coating treatment on the high temperature mechanical properties on microstructure in a nickel-base superalloy", KAIST thesis, 1986
2. Lohr, R.D. and Steen, M. (Eds.), Ultra High Temperature Mechanical Testing, Woodhead Publishing Ltd., 1995
3. Y. Sawada, N. Iwashita and K. Fujita, ACCM-1, 520-1, 1998
4. James Nabity, Peter Hudson, and James Loundagin, "Development testing of Fasthawk combustor", AIAA 99-0431, 1999
5. Shell, M.B., Composites, Vol. 9 (3), pp167-171, 1978
6. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens ASTM C-496-85
7. MARC General Purpose Finite Element Program Volume A, 2004
8. Russia's technical report, Description of test and analysis methods, test equipment results of testing, pp29-45, 2003