

## 측추력기 Shutter의 단방향 유체-구조 연성해석에 관한 연구

고준복<sup>\*\*</sup> · 서민교<sup>\*</sup> · 이경호<sup>\*\*</sup> · 백기봉<sup>\*</sup> · 조승환<sup>\*</sup>

\* ㈜한화 종합연구소, \*\* 국방과학연구소

### A Study on the 1-Way FSI Analysis for Shutter of Side Jet Thruster

Jun Bok Ko<sup>\*\*</sup>, Min Kyo Seo<sup>\*</sup>, Kyeong Ho Lee<sup>\*\*</sup>, Ki Bong Baek<sup>\*</sup> and Seung Hwan Cho<sup>\*</sup>

\* Hanwha Corporation R&D Center

\*\* Agency for Defense Development

(Received June 17, 2014 ; Revised August 20, 2014 ; Accepted September 3, 2014)

**Key Words:** Side Jet Thruster(측추력기), Shutter(셔터), Fluid Structure Interactions(유체 구조 연성해석), Thermal Structural Analysis(열구조 해석), Computational Fluid Dynamics(유동해석)

**초록:** 본 연구에서는 측추력기 구성품인 Shutter의 열구조 안전성을 평가하기 위해 단방향 유체-구조 연성해석을 수행하였다. Shutter는 측추력기에서 노즐을 개방시키기 위한 구동 토크와 연소가스의 고온, 고압 열하중을 받는 부품으로 연소가 진행되는 동안 열구조 안전성을 확보하여야만 한다. 유체-구조 연성해석을 위해 측추력기의 연소시간동안 내부 유동장에서 발생하는 연소가스의 압력 및 온도 분포, 대류 열전달계수 값을 유동해석을 통해 도출하였고, 이 결과 값을 맵핑 방식을 이용하여 열구조 해석의 하중 조건으로 부가하였다. 연소시간동안 Shutter에서 발생하는 최대 응력 및 취약위치, 온도분포를 단위 시간 단위로 분석하여 온도에 따른 소재의 인장강도 값과 비교하여 열구조 안전성을 평가 하였다. 또한 반경 방향 변형량을 분석하여 셔터와 노즐목 간의 적정 간극을 설정하는 근거로 활용하였다.

**Abstract:** In this study, 1-way fluid structure interaction analysis(FSI) for the shutter, component of side jet thruster was performed to evaluate the safety. Driving torque to open nozzle, thermal and high pressure load of hot gas was applied to shutter. Thus, the shutter must be designed to endure this load during combustion. We carried out computational fluid dynamics analysis to obtain the pressure, temperature, and heat transfer coefficient of hot gas of side jet thruster. We then used the data as the load condition for a thermal structural analysis using a mapping method. The locations with the maximum stress and temperature distributions were found. We compared the maximum stress with the tensile stress of shutter material according to temperature to evaluate the safety. We also analyzed the radial deformation of the shutter to set the proper interface gap with the side jet thruster parts.

- 기호설명 -

$\sigma$  : 응력 (MPa)

E : 탄성계수(MPa)

$\epsilon$  : 변형률

$\alpha$  : 열팽창계수(1/K)

$\Delta T$  : 온도변화 (K)

$\epsilon^{th}$  : 열변형률

h : 대류열전달 계수 ( $W/m^2K$ )

$T_{wall}$  : 벽면 온도(K)

$T_{\infty}$  : 연소가스 온도(K)

$Q_{wall}$  : 열 유속( $W/m^2$ )

$\rho, c, k$  : 밀도, 비열, 열전도도

$P_0$  : 유입 초기압력(MPa)

$T_0$  : 유입 초기온도(K)

R : 기체상수

M : 마하수(Mach number)

† Corresponding Author, firstko77@hanwha.com

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 1. 서론

측추력기는 Hot gas를 작동유체로 사용하기 때문에 밸브 유로를 흐르는 고온/고압의 가스와 구조물 사이에서 대류 열전달이 발생하게 되고, 이 열에너지는 전도를 통해 각 부품 사이로 전달되게 된다. Shutter는 측추력기에서 nozzle을 개방시키기 위한 구동 토크와 Hot gas의 고온/고압 열하중을 받는 부품으로 연소시간동안 열구조 안전성을 확보하여야만 한다. 따라서 본 연구에서는 열구조 해석을 통해 Shutter의 응력, 온도 및 변위 분포도를 계산하여 열구조 안전성을 평가하고 측추력기 주변 구성품과의 적정 간극(interface gap)을 설정하는데 기초 자료로 활용하고자 한다. Shutter의 열구조 해석을 위해서는 연소시간동안 내부 유동장에서 발생하는 Hot gas의 압력 및 온도 분포, 열전달 대류계수 값을 계산하는 유동해석이 선행되어야 한다. 열구조 해석은 1차 유동해석을 통해 계산된 결과 값들을 Mapping 방식으로 적용하는 1-way FSI 방식으로 진행하였다.

1-way FSI 기법은 대상모델의 변위가 유체의 흐름에 큰 영향을 미치지 않을 때, 즉 지속적인 반복계산이 필요없는 기법<sup>(1)</sup>으로 측추력기의 경우 Shutter에서 발생하는 변위가 크지 않아 유동에 미치는 영향이 작기 때문에 본 연구에 적용하였다. 1-way FSI 기법은 김윤기 등<sup>(1)</sup>이 블레이드에 대한 FSI 해석에 적용한 일반화된 기법이다.

## 2. 본론

### 2.1 관련이론

외부의 물리적 하중과 온도의 변화에 의한 응력 발생은 다음과 같이 계산 된다.

$$\{\sigma\} = \{E\} \{\epsilon - \alpha \Delta T\} \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ 는 응력,  $E$ 는 탄성계수,  $\epsilon$ 는 변형률,  $\alpha$ 는 열팽창 계수, 그리고  $\Delta T$ 는 온도 변화를 나타낸다. 열에 의한 변형률  $\epsilon^{th}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon^{th} = \alpha(T)(T - T_{ref}) - \alpha(T_0)(T_0 - T_{ref}) \quad (2)$$

Shutter의 열전달은 Hot gas의 대류열전달 및 제품 내부에서의 전도 열전달로 이루어지게 된다.

대류열전달 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{wall} = hA(T_{wall} - T_{\infty}) \quad (3)$$

여기서  $h(W/m^2K)$ 는 대류열전달 계수,  $T_{wall}$ 와  $T_{\infty}$ 는 구조물의 벽면온도, 연소가스의 온도를 나타내며 각 항목들은 유동해석을 통해 계산된 결과값을 적용 하였다.  $\dot{Q}_{wall}$ 은 구조물 벽면을 통과하는 열유속( $W/m^2$ )을 나타낸다.

전도열전달의 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \sum_{i=1}^3 \frac{\partial T}{\partial x_i} \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

여기서  $\rho, c, k$ 는 재료 물성치로서 밀도, 비열, 전도도를 나타내며 본 연구에서는 온도의 함수로써 적용하였다. 두 부품간의 Interface부에서 발생하는 열전달은 열구조 해석에서 중요한 요소중의 하나이다. 본 해석에서는 Gap Conduction 값을 고려한 Surface-surface contact을 적용하여 이러한 효과를 해석에 반영 하였다. 두 부품간에 이루어지는 열전달 에너지량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = k_b(\theta_A - \theta_B) \quad (5)$$

여기서  $k_b$ 는 Gap Conduction 값으로 Interface 부의 Clearance 또는 Pressure의 함수로 나타낼 수 있으며 본 연구에서는 Clearance의 함수로 적용하였다.

### 2.2 유동해석

#### 2.2.1 해석 모델

본 연구에서는 유동해석에 사용되는 H/W의 성능과 해석시간을 고려하여 측추력기 형상을 Fig. 1과 같이 3차원 1/4 symmetric으로 단순화한 모델을 적용하였다. 측추력기 하단의 가스발생기에서 생성된 고온, 고압의 연소가스는 상단으로 유입되어 완전 개방된 상태의 Shutter를 지나 90° 간격으로 배치된 4개의 사각 노즐을 통해 초음속으로 외부로 분사 된다. 유동해석을 위해 비정렬 Tetra 격자를 적용하였으며, 점성의 압축성 유동

**Table 1** CFD analysis conditions

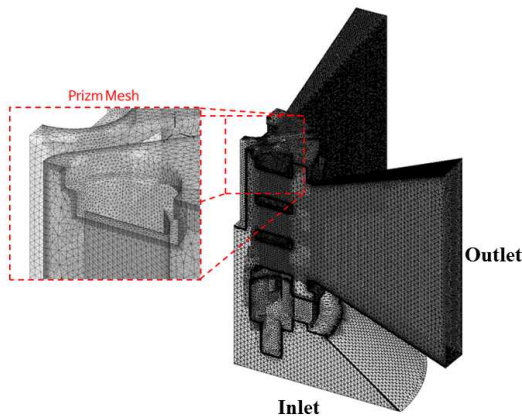
Space	3D(1/4 Periodic)
Solver	Density-Based Solver
Time	Steady State
Turbulence	$k-\omega$ SST
Flow	Ideal-Gas

**Table 2** Material property of hot gas

Density	Ideal-Gas
Cp(Kg-K)	1822.5
Thermal Conductivity (W/m.K)	0.2392
Viscosity(kg/m-s)	7.66e-05
Molecular Weight (kg/kgmol)	23.366

**Table 3** Mass flow rate(theory VS. analysis)

	theory	analysis
mass flow rate(kg/s) (Normalized value)	1	1.15
error(%)	-	0.15



**Fig. 1** CFD analysis domain

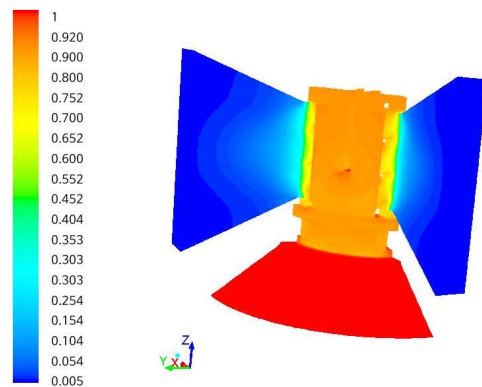
을 해석하기 위해 벽면에서의 경계층 효과를 고려하여 prizm 격자(Fig. 1 확대부)를 생성하였다. 해석 모델의 격자 수는 2,637,005개 이다. 난류 모델은  $k-\omega$  SST 모델을 적용하였으며, automatic wall function을 사용하여  $y^+$ 는 8 이하로 적용하였다.<sup>(6)</sup> 유동해석에 적용된 해석조건을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

2.2.2 경계조건

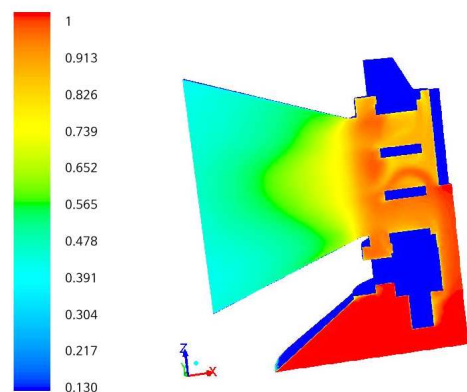
본 연구에서는 상용해석코드인 FLUENT를 이용해 계산을 수행하였다. 정상 상태를 가정하였으며 압축성 유동과 난류 유동조건( $k-\omega$  SST 모델)을 적용하였다. 입구 조건은 2,500psi(17.2MPa), 2,297K의 고온, 고압 상태의 연소가스가 유입되는 경우를, 출구 조건은 대기압을 적용하였다. 측추력기의 몸체와 노즐은 벽면 경계조건을 사용하였고, 이 벽면 경계에서 대류 열전달 계수를 도출하기 위해 벽면의 열 경계조건은 300K의 온도로 설정하였다. 유입되는 고온, 고압의 연소가스는 Table 2의 물성치를 적용하였다.

2.2.3 해석결과

유동해석의 타당성을 검증하기 위해 측추력기 사각 노즐 출구에서 분출되는 연소가스의 질량



**Fig. 2** Contours of pressure(Normalized value)



**Fig. 3** Contours of temperature(Normalized value)

유량을 도출하여 이를 이론적으로 계산한 결과와 비교하여 Table 3에 나타내었다. 노즐 출구에서 분출되는 연소가스의 질량 유량은 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\dot{m} = \frac{P_0}{\sqrt{RT_0}} A \sqrt{\gamma} M \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (5)$$

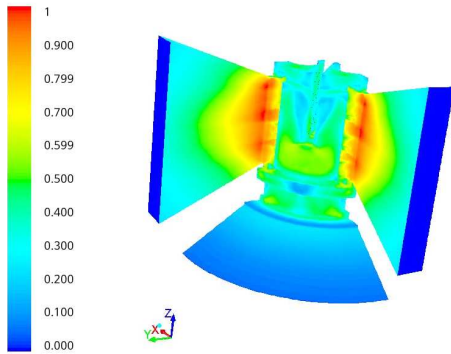


Fig. 4 Contours of heat transfer coefficient(h) (Normalized value)

여기서  $P_0$ 는 유입 초기압력,  $T_0$ 는 유입 초기 온도,  $R$ 은 기체상수,  $A$ 는 노즐면적,  $\gamma$ 는 비열비,  $M$ 은 마하수(Mach number)를 의미한다.

이론 질량유량값과 해석값은 약 0.15%의 차이를 보이는데, 이는 유로에서 발생하는 일부 압력 강하와 해석을 위해 유동장 일부를 단순화 시키는 과정에서 발생된 오차라 판단된다.

Fig. 2는 측추력기에서 발생하는 압력 분포, Fig. 3은 연소가스의 온도 분포, Fig. 4는 대류열 전달 계수값을 정규화 하여 나타낸 것이며 각각 열구조 해석의 하중조건으로 적용하였다.

2.3 열구조 해석

2.3.1 해석 개요 및 모델

Shutter의 열구조 해석을 위해 사용한 모델은 Fig. 5와 같다. Shutter는 상/하부에서 측추력기의 Chamber와 베어링으로 조립되어 회전 운동이 가능하다. 최상단부에는 Moment arm과 조립되어 Nozzle을 Open시키기 위한 구동토크를 부가 할 수 있도록 설계되어져 있다. 격자크기는 해석결과의 신뢰성에 영향을 미치는 요소로 본 연구에서는 mesh Size별 (0.5,1,1.5,2mm) 간단한 Case Study를 통해 응력값이 mesh size에 합리적으로 수렴하는 1mm를 기준 크기로 적용하였다. Shutter의 길이는 약 149mm, 직경은 19mm로 전체 Element 총갯수는 187,610개이다. 본 연구에서는 구조해석 상용 S/W인 Abaqus 6.12를 이용하여 열구조 해석을 수행하였고, Element type으로는 Tetra 4절점 열구조 요소인 C3D4T를 적용하였다. 열구조 Transient 해석시 시간 증분(dt) 조건은 Abaqus에서 제공하는 Automatic 기능을 이용하였다.

2.3.2 재료 물성치

Shutter는 약 2,200K의 Hot gas내에서 작동되는

Table 4 Material Property of TZM

(a) Thermal property

Temp. (K)	Young's Modulus (MPa)	Conductivity (W/m.K)	Specific heat (J/Kg.K)	mean CTE (1/K,e-6)
373	289,610	125.7	278.18	3.26
473	282,900	123.2	276.58	3.78
573	277,070	120.65	275.9	4.23
673	271,800	118.04	276.16	4.61
773	266,750	115.39	277.33	4.90
873	261,600	112.71	279.42	5.13
973	256,030	110.01	282.43	5.27
1073	249,710	107.28	286.34	5.34
1173	242,310	104.54	291.16	5.33
1273	233,510	101.80	296.88	
1373	222,980	99.06	303.49	
1473	210,390	96.33	310.99	
1573	195,420	93.62	319.38	
1673	177,740	90.93	328.65	
1773	157,020	88.28	338.80	
1873	132,940	85.67	349.82	
1973	105,180	83.10	361.71	
2073	73,403	80.50	374.46	

(b) Mechanical property

Temp.(K)	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)
293	811.5	886.9	10.8
393	730.7	781.3	8.25
493	673.6	710.4	6.33
593	635.8	667.0	4.95
693	612.9	644.3	4.02
793	600.5	635.3	3.44
893	594.1	633.1	3.12
993	589.4	630.6	2.96
1093	581.9	621.0	2.87
1193	567.2	597.3	2.76
1273	547.4	563.4	2.58

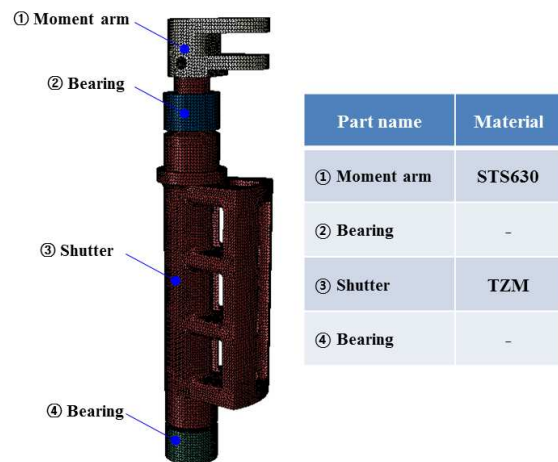


Fig. 5 Shutter analysis model

부품으로 열구조 안전성을 확보하기 위하여 폴리브텐의 합금인 TZM으로 설계되었다. TZM 소재는 우수한 전도도 특성으로 고융점 합금중에서

가장 실용화 되어 있는 소재로서 1,300도 이상의 온도에서 강도가 순수 몰리브덴의 2배에 이른다. 온도에 따른 Young's Modulus, Conductivity, Specific heat, Thermal Expansion를 적용하였다. Table 4는 열구조 해석에 적용한 온도에 따른 재료 물성치<sup>(2,3)</sup>를 나타낸다.

2.3.3 경계조건

Shutter 열구조 해석 경계조건은 연소시험(열구조 해석조건)전 유사한 경계조건에서 실시되는 공압시험 조건에서의 해석/시험 결과를 비교/분석하는 과정을 통해 설정하였다. Fig. 6은 Trial & Error 과정을 거쳐 확정한 공압시험 조건에서의 Shutter의 경계조건을 나타낸다. Shutter는 초기에 Nozzle Close 조건에 위치하여 유로부는 전체적으로 약 2,500psi(17.2MPa)의 내압을 받게 되며 이때 유로부 상단부중 한쪽면은 대기압 조건에 노출되게 된다. 축 최상단부는 구동력 부가를 위해 Moment arm과 조립되며, 링크 구조장 U3=0의 경계조건에서 구동력이 부가된다. Shutter는 유로부에서 내압 2,500psi(17.2MPa)의 압력을 받게 되면 반경방향으로 변형이 발생되어 상/하부 베어링부에서 Shutter 축 끼임 현상이 발생할 수 있다. 이를 구현하기 위하여 Shutter 하단부에 경계조건 U1, U2=0을 부가하였다.

Fig. 6의 Shutter 경계조건에서 해석 결과는 공압시험 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 열구조 해석에 적용할 경계조건으로 타당성이 있는 것으로 판단 된다. Fig. 7은 해석/시험 결과를 나타낸다.

Shutter의 열구조 해석은 앞서 공압시험 조건에서

검증된 경계조건을 기준으로 1차 유동해석을 통해 계산된 결과값을 열구조 해석에 Mapping 방식으로 적용하는 1-way FSI 방식으로 수행하였다. Fig. 8은 전체적인 해석 Flow를 나타낸다. 유동해석을 통해 연소시간동안 Steady-state 상태에서의 유동장 내부의 열대류계수값(h) 및 hot gas 온도, 압력 분포도를 계산하였고, 이 값들을 열구조 해석에 하중 경계조건으로 적용하였다. Shutter는 열에 의한 영향과 압력에 의한 영향을 동시에 받기 때문에 해석 solver type으로는 열구조 연성 기법을 적용하였다.

제품 초기의 온도로는 상온조건으로 293K을 부여하였고, 연소시간동안 유동장 내부에서는 대류 및 전도 열전달이 이루어진다는 조건을 부여하였다. 각 부품의 Interface부는 제품의 조립조건과 유사하게 면과 면을 하나의 몸체처럼 거동을 묶는 tie 또는 gap을 고려한 thermal contact으로 적용하였다. 해석은 연소 시간에 따른 제품의 응력/온도 분포 및 거동을 분석하기 위하여 1초 동안 transient 해석으로 진행하였다.

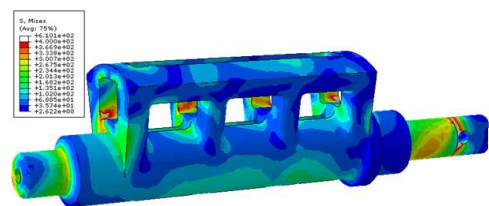


Fig. 7 Analysis/Test results of shutter

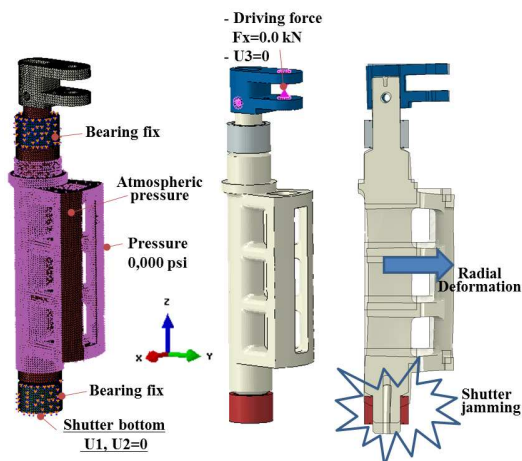


Fig. 6 Boundary condition for air test

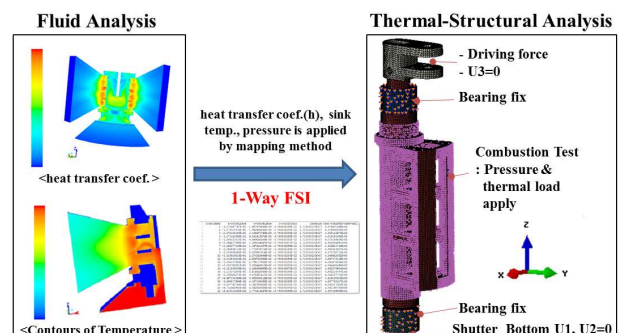


Fig. 8 1-way FSI flow

2.3.4 해석결과

주요 해석 결과로는 연소시간 1초동안 제품의 온도 및 응력/변위 분포도를 계산하였다. Fig. 9는 연소시간 1초 동안의 Transient 열구조 해석 결과를 나타낸다. 연소시간 1초 동안 Shutter에서 발생하는 최대 응력 및 취약 위치는 결과에서 보는 바와 같이 크게 3구간으로 분석되었다. 구동토크에 의해서 Shutter 목부분 ㉠부에서 응력이 높게 나타났으며, 유로부 열팽창에 의해 ㉡, ㉢부가 취약 위치로 분석되었다. 최대 응력 발생부위에서의 온도값을 0.1초 단위로 계산하여 온도에 따른 소재의 인장강도 값과 발생된 최대 응력값을 비교하여 안전율을 산정하였다. 안전율 분석결과 Shutter는 ㉡, ㉢위치에서 안전율을 1이상의 강도를 확보하고 있는 것으로 분석되어 연소시험(열구조 해석 조건)에서 강도상 문제 없을

Time(sec)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Location	- ㉠ -	㉠ -	㉠ -	㉠ ㉡ ㉢	㉠ ㉡ ㉢	㉠ ㉡ ㉢	㉠ ㉡ ㉢	㉠ ㉡ ㉢	㉠ ㉡ ㉢	㉠ ㉡ ㉢
Max. Stress (MPa)	696 621 593 621 568 621 563 621 558 621 560 620 561 620 560 619 558 618 549									
Temperature (K)	444 293 840 293 1089 293 1906 293 1806 293 1881 293 1922 293 1986 294 1956 294 1946									
Tensile Stress(MPa)	748 887 634 887 622 887 563 887 563 887 563 887 563 887 563 887 563 887 563									
Safety Factor	1.08 1.43 1.07 1.43 1.10 1.43 1.00 1.43 1.01 1.43 1.01 1.43 1.00 1.43 1.01 1.43 1.01 1.43 1.03									

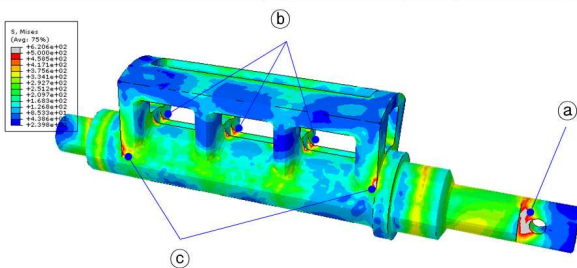


Fig. 9 Analysis results

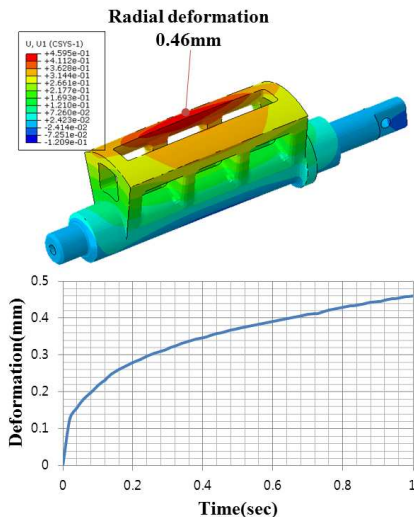


Fig. 10 Radial deformation of shutter

것으로 분석 되었으며 시험을 통해 검증하였다. 연소시험 결과 Shutter는 해석결과 예측대로 균열, 파손등의 현상이 발생하지 않고 열구조 안전성을 확보하고 있는 것으로 검증되었다.

Fig. 10은 연소시간 동안 Shutter의 반경방향 변위 값으로 연소시간 1초후 최대 0.46mm의 변위가 발생하는 것으로 분석되었다. 반경방향 최대 발생 변위값은 측추력기의 노즐부와 Interface gap을 설정하는 근거 자료로 활용되었다.

3. 결론

본 연구에서는 측추력기 Shutter의 열구조 안전성을 평가하고 연소 시간에 따른 온도/변위 분포도를 계산하기 위해 단방향 유체 구조 연성해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 정립된 사항은 다음과 같다.

(1) 유동해석 데이터를 이용한 1-way FSI 열구조 해석 절차를 정립하여 측추력기 Shutter의 구조 안전성을 평가할 수 있었다.

(2) 열구조 해석 경계조건은 연소시험전 유사한 경계조건에서 실시되는 공압시험 및 해석결과를 비교/분석하여 설정함으로써 해석 결과의 신뢰성을 높일 수 있었다.

- Shutter의 축 끼임 조건을 반영하여 시험과 유사한 해석결과를 재현할 수 있었음.

(3) 열구조 해석결과는 0.1초 단위로 최대 응력 및 온도를 분석하여, 해당하는 온도의 소재 인장강도 값과 발생된 최대 응력값을 비교하여 안전성을 판단하였다.

- 구동토크에 의해 Shutter의 목부분에 높은 응력이 발생함.

- Shutter 열팽창에 의해 유로부 끝단부에서 높은 응력이 발생함.

(4) 열구조 해석결과는 연소시험을 통해 검증하였고, Shutter는 균열 및 파손이 발생하지 않아 열구조 안전성을 확보 하였음을 확인하였다.

참고문헌  
(References)

(1) Kim, Y. G. and Kim, K. C., 2007, "FSI Analysis on Wind Turbine Blade," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, pp. 2368~2371

(2) Briggs, J. Z. and Barr, R. Q., 1971, "Arc-Cast Molybdenum-Base TZM Alloy : Properties and

- Applications," *High Temperatures-High Pressures*, Vol. 3, pp. 363~409.
- (3) Coskeram, R. V., 2002, "Metallurgical and Materials Transactions A," Springer Boston, Vol. 33, p. 3685.
- (4) Abaqus 6.12 User's Manual
- (5) Fluent 14.0 User's Manual
- (6) Menter, F. R., Ferreira, J. C., Esch, T. and Konno, B., 2003, "The SST Turbulence Model with Improved Wall Treatment for Heat Transfer Predictions in Gas Turbines," *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*, pp. 2~7.