

## 소형위성 발사체용 액체 추진제 곡관 배관 설계 및 유동 성능 해석

이희준\* · 한상엽\* · 하성엽\*\* · 김영목\*\*

### Design and Evaluation of Vaned Pipe Bends of Liquid Propellant for Satellite Launch Vehicles

Hee Joon Lee\* · Sang Yeop Han\* · Sung Up Ha\*\* · Young Mog Kim\*\*

#### ABSTRACT

The use of pipe-bends brings about non-uniform flows at the exit of them due to the velocity difference between inner and outer flows inside the bend. These phenomena may cause turbopump of satellite launch vehicle to run off-design and reduce its efficiency, and also introduce unstable influx of propellants to engine manifold after passing through a turbopump. In order to improve the uniformity of flow at the bend exit, certain turning vanes are set up in the bend pipe normally. Correspondingly the design is an 90° and 45° bend pipes that incorporate with the maximum three turning vanes. All designs were analyzed with numerical analysis by solving the Navier-Stokes equations in three dimensions in case of each respective fuel and oxidizer. Evaluations of the vaned pipe bends designs were accomplished by the velocity magnitude distributions and the predicted pressure drops. We could find that the more vaned bend pipe and larger angle pipe under consideration effectively, the more uniform velocity magnitude of the bend and pressure losses.

#### 초 록

소형위성 발사체 추진제 공급계 배관의 구부러짐으로 인하여 배관내부의 추진제 유동은 불균일하며 이는 터보펌프 전단의 블레이드의 파괴 및 후단의 가압된 추진제의 불안정성을 야기시킨다. 따라서 추진제의 효율적인 공급을 위하여 vane이 장착된 곡관 배관이 필요하며 내부에서의 유동장을 수치해석으로 규명하여 그 문제점을 해결할 수 있는 지 연구하였다. 따라서, 본 연구에서는 각각 90도와 45도로 구부러진 3인치 산화제 배관과 2.5인치 연료 배관의 구부러진 부분에는 0~3개의 vane을 등 간격으로 설치하였다. 3차원 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위하여 상용코드를 이용하였으며, 곡관 배관 설계를 평가하기 위하여 각 90, 45도의 vane이 설치되지 않은 곡관과 1~3개의 vane이 장착된 곡관을 비교하였다. vane의 개수에 의한 배관 설계의 영향을 알아보기 위하여 90, 45도의 곡관에 vane이 0, 1, 2, 3개가 등 간격으로 장착이 되었을 때의 결과를 비교하였다. 배관내의 유동 균일성과 차압을 알기 위하여 속도크기와 압력분포를 계산하였다. vane이 많을수록 곡관의 각도가 클수록 곡관을 지난 유동은 더 균일해졌으나 배관 차압은 더 증가하였다.

Key Words: Pipe-bends(곡관), Vane(베인), Launch Vehicle(발사체), CFD(전산유체역학)

† 2005년 2월 7일 접수 ~ 2005년 3월 15일 심사완료

\* 정회원, 한국항공우주연구원 추진제어그룹

\*\* 종신회원, 한국항공우주연구원 추진제어그룹

연락처, E-mail: joellee@kari.re.kr

착된 연소실에서 위성발사체의 주동력인 추력을 발생시키기 위하여 추진제 탱크에 저장되어 있는 추진제를 엔진의 연소실로 공급하는 추진제 공급계의 설계를 필요로 하게 된다. 이러한 추진제 공급계는 그 구성이 각종 밸브, 필터, 오리피스, 센서, 배관 등으로 이루어져 있다. 이상의 다종 다량의 유공압 부품을 위성발사체의 무게와 공간의 제약으로 추진제 공급계 내부에서 유동하는 추진제의 유동특성을 고려하여 효과적으로 배치하는 것이 쉽지 않게 된다. 이러한 상황에 따라 각 유공압 구성품을 배치하는 과정에서 곡관의 적용은 지상설비를 구성하는 경우보다 더 많은 부분에 필수적으로 발생하게 된다.

위성발사체의 추진제 공급계에 적용하는 곡관의 경우, 특히 터보펌프 전단의 불균일 유동으로 터보펌프 성능 저하 그리고 추진제의 고압 고속 유동을 수반하는 엔진부(터보펌프에서 연소실까지)에서는 유동 박리(flow separation) 및 공동현상(cavitations) 등의 발생으로 균일하게 추진제를 공급하기가 불가능하게 된다. 이러한 터보펌프 후단에서의 불균일한 추진제 유동은 연소실 manifold 및 연소실 내부에 불균일한 유량 유입으로 엔진 효율의 감소 및 연소불안정을 유발시킬 수도 있기 때문에 엔진부 연소에까지 중대한 영향을 미칠 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 곡관에서의 불균일한 유동현상을 고찰하고, 곡관에서의 유동균일성을 회복시키기 위하여 곡관부에 곡관 vane를 장착한 후 유동 균일화 정도를 수치해석을 통하여 계산해 보았다.

본 연구의 목적이 곡관유동에 대한 vane의 효과를 고찰하기 위하여 수치해석의 결과에 대한 정성적인 분석에 있으므로, 수치해석의 수행은 각각의 추진제에 대하여 일반적으로 수행 결과의 신뢰도를 확보하고 있는 상용코드인 FLUENT 6.0™을 이용하였다. 수치해석의 수행 결과로부터 곡관에 vane이 없을 때와 있을 때의 곡관 출구에서의 속도 구배 및 입출구 압력 차이를 비교하여 각각의 추진제 배관에 가장 최적의 vane 개수를 고찰하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 문제정의 및 계산조건

이상에서 소개한 연구를 수행하기 위하여 위성발사체에 사용되는 연료인 kerosene의 유동이 발생하는 연료배관의 곡관 내경을 2.5 inches, 산화제인 액체산소의 유동이 발생하는 산화제배관의 곡관 내경은 3.0 inches로 가정을 하였으며 90°와 45°의 곡관에 vane이 0 ~ 3개까지 등 간격으로 있을 때를 고려하였다.

소형 위성발사체에 설치된 추진제 공급 곡관 내부의 유체특성을 수치적으로 계산하기 위하여 연료배관은 내경을 2.5 inches, 산화제배관을 3.0 inches로 가정을 하였다. 연료배관과 산화제배관을 흐르는 유체는 각각 kerosene과 액체산소이며 액상으로 비압축성유체를 가정하였다. 각각의 물성치는 Table 1과 같다. 각각의 추진제를 엔진의 연소실로 공급하기 위하여 압력 및 유량을 증가시키는 터보펌프를 지난 뒤 추진제 공급 압력은 연료와 산화제가 동일하게 9.0 MPa로 승압되며, 연료배관을 흐르는 연료의 유량은

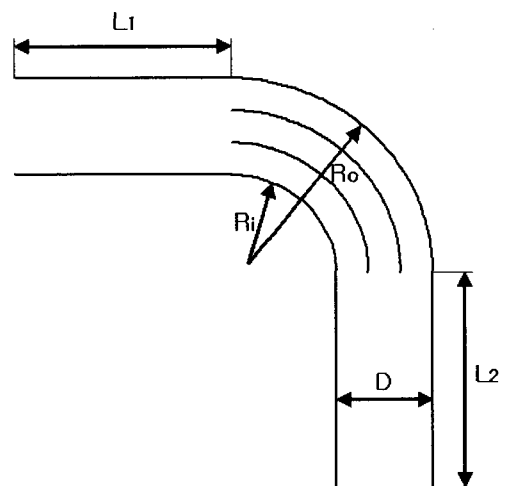


Fig. 1 90° 곡관 vane의 형상

Table 1. Kerosene과 액체산소의 화학식과 물성치

화학식	온도 (K)	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	열전도도 (W/mK)	Cp (J/kgK)	점성 (kg/ms)
C <sub>12</sub> H <sub>23</sub>	300	780.0	0.149	2090	0.0024
LOx	95	1137.6	0.15179	1667.2	0.00184

Table 2. 2개 vane이 장착된 곡관 형상 수치 (Fig. 1 참조)

	L <sub>1</sub> (m)	L <sub>2</sub> (m)	D(m)	R <sub>i</sub> (m)	R <sub>o</sub> (m)	(R <sub>i</sub> +R <sub>o</sub> )/2D
C <sub>12</sub> H <sub>23</sub>	0.2	0.2	0.0635	0.03175	0.09525	1.0
LOx	0.2	0.2	0.0762	0.0381	0.1143	1.0

29.486 kg/sec이고, 산화제배관을 흐르는 산화제의 유량은 63.0 kg/sec이다. 연료인 kerosene의 유동 온도는 288.15 K이고, 액체산소의 온도는 95 K이다.

해석될 곡관의 기하학적 형상은 Fig. 1과 같은 형상이며, 곡관의 각도는 한쪽 배관에서 다른 한쪽 구부러진 배관의 외각을 기준으로 정의한다. 그에 따른 형상자료는 Table 2에 주어졌다. 곡관에 장착되는 vane은 등 간격으로 배치되며, 그 두께는 1.0 mm이다.

기존에 수행된 시험결과[1]를 바탕으로 본 연구에서 해석될 곡관의 최적화된 vane 개수와 차압을 이론적으로 계산하여 보았다. 기존의 시험결과[1]에 따르면 Reynolds 수가  $2 \times 10^5$  이상일 경우 Table 3에 주어진 데이터와 같이 vane 개수를 최적화시킬 수 있으며, vane 개수에 따른 차압은 식(1)으로부터 Table 4를 이용하여 계산할 수 있는 방법이 제시되어 있다[1].

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U^2} = K + \frac{f(L_1 + L_2)}{D} \quad (1)$$

Table 3. 압력손실을 최소화하기 위한 최적의 vane 개수(n)

(R <sub>o</sub> +R <sub>i</sub> )/2D	0.5~0.6	0.6~0.9	0.9~1.5	>1.5
n	3~4	2	1	0

(단,  $Re \geq 2 \times 10^5$ )

Table 4. 보정된 손실계수(K<sub>mod</sub>)

곡관 각도	K	K <sub>mod</sub>	f	차압 p(Pa)
연료 45°	0.15	0.144	0.0149	$1.322 \times 10^4$
연료 90°	0.31	0.297	0.0149	$2.173 \times 10^4$
산화제 45°	0.15	0.122	0.0127	$1.582 \times 10^4$
산화제 90°	0.31	0.251	0.0127	$2.663 \times 10^4$

여기서 K는 손실계수(Loss Coefficient)를 의미한다. 최소 압력손실을 위한 최적 vane 개수를 결정하기 위하여 각 추진제의 Reynolds 수를 계산하여야 한다. Reynolds 수를 계산하기 위해서는 각 추진제 배관의 작동유체 유속이 필요한데 이는 각 추진제의 질유량과 Table 1의 밀도 및 Table 2의 배관 내경을 이용하여 구할 수 있다. 계산 결과 2.5 inches 연료배관을 흐르는 kerosene (C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>)의 속도는 11.94 m/sec, 3.0 inches 산화제배관을 흐르는 액체산소 (LOx)의 속도는 12.14 m/sec 이다. 각 추진제의 Reynolds 수는 kerosene일 때는  $2.46 \times 10^5$ , 액체산소일 때는  $5.72 \times 10^5$  이다. 각 추진제의 Reynolds 수가 모두  $2 \times 10^5$  이상이므로 Table 3 으로부터 최적의 vane 개수를 기존 시험자료로 산출할 수 있다. 2.5 inches 및 3.0 inches로 설계된 곡관의 (R<sub>i</sub>+R<sub>o</sub>)/2D 값은 1.0 이다. Table 3에 의하면 압력 손실을 줄이기 위한 최적의 vane 개수는 1개인 것을 알 수 있다. 이 때의 압력 손실은 식(4)에서와 같이 손실계수(Loss Coefficient) K를 계산한 후 식(1)을 이용하여 계산할 수 있다. 식(1)에서 f는 마찰계수(friction factor)를 의미하는데 일반적으로 난류일 경우

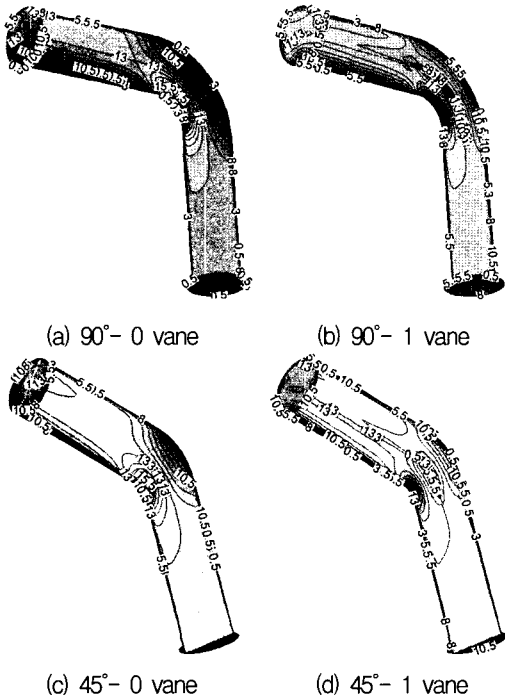


Fig. 2 3차원 산화제 곡관 velocity magnitude

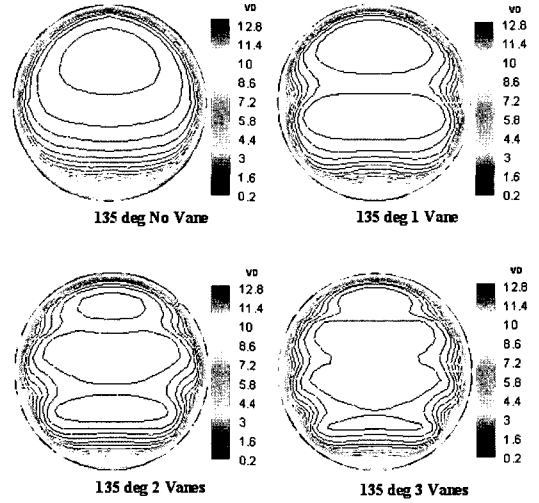


Fig. 4 45°산화제 곡관 vane 개수에 따른 출구 velocity magnitude

Reynolds 수와 배관의 거칠기  $\epsilon$  (pipe roughness), 내경의 함수로 나타내어진다. Moody Chart[3]에 의하면 식(2)와 같은 함수로 나타낼 수 있고, 배관이 hydraulically smooth인 경우 식(3)과 같은 근사식으로 구할 수 있다.

$$f = \left[ 1.14 - 2 \log_{10} \left( \frac{\epsilon}{D} + \frac{21.25}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (2)$$

( $\epsilon$  : pipe roughness)

$$f \approx \frac{0.308}{[0.842 - \log_{10} Re]^2} \text{ for } 5 \times 10^3 < Re < 10^8 \quad (3)$$

$$K |_{Re} = (K |_{Re=2 \times 10^5}) \left( 2 \times 10^5 / Re \right)^{0.2} \text{ for } Re > 2 \times 10^5 \quad (4)$$

90°와 45°곡관일 경우 Reynolds 수가  $2 \times 10^5$ 일 때 K는 참고문헌[1]의 시험 결과로부터 구할 수 있다. 그 값은 각각 0.15과 0.31이다. 손실계수를 식(4)를 이용하여 보정하고 차압을 계산하면 Table 4와 같다.

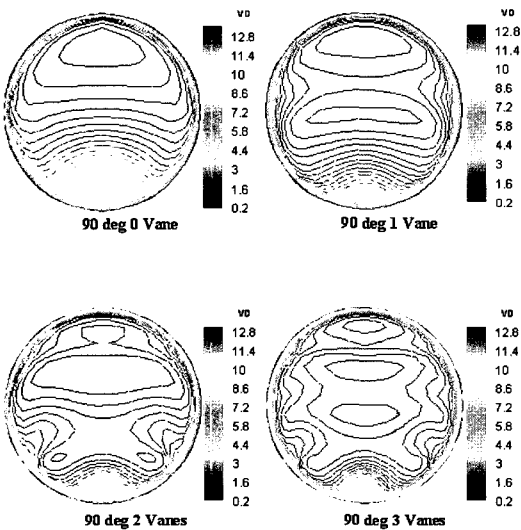


Fig. 3 90°산화제 곡관 vane 개수에 따른 출구 velocity magnitude

참고문헌[1]에 의해 추진제 곡관의 압력손실을 최소화하기 위한 vane 개수는 1개이고 차압은 Table 4와 같이 연료 90°와 45°일 때 각각  $2.173 \times 10^4$  Pa와  $1.322 \times 10^4$  Pa이고, 산화제 90°와 45°일 때 각각  $2.663 \times 10^4$  Pa와  $1.582 \times 10^4$  Pa이다.

이전의 시험 결과를 이용하여 설계된 곡관을 수치해석을 통하여 검증하였다. 계산 형상은 Fig. 1의 형상을 3차원으로 90°, 45°로 모델링하였으며 vane은 1개에서 3개까지 thin wall 조건을 이용하여 모사하였다. 계산시간 단축과 빠른 수렴을 위하여 정렬격자를 이용하였다. 작동 유체는 비압축성 난류 조건이며, 난류모델링은  $k-\epsilon$  2 방정식을 이용하였다. 경계조건은 출구 압력을 9 MPa로 고정, 입구 속도를 연료 11.94 m/sec 산화제 12.14 m/sec로 고정하였을 때 입구의 압력을 계산하였으며, 벽면은 adiabatic wall 경계조건을 주었다.

2.2 해석결과 및 분석

Figure 2는 90°, 45°일 때 3차원 산화제 곡관 속도 계산결과 contour를 나타낸다. 곡관 내부의 유동장을 알기 위하여 입출구면과 대칭면(symmetric plane)만을 표시하였다. Fig. 2-a 및 Fig. 2-c와 같이 vane을 사용하지 않았을 경우 곡관 입구로 균일한 유동장이 유입되면 곡률 반경이 긴 곡관영역에서 유동이 가속되며, 반대로 곡률 반경이 짧은 영역에서는 속도가 줄어들어 Fig. 5와 같이 벽면에 유동박리 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 90° 산화제 곡관에서 유동이 곡관을 지난 후 안쪽 벽면에서 발

생하는 유동박리 현상을 나타낸다. 이러한 현상으로 곡관 입구 및 출구에서의 압력차이가 증가되고 출구에서의 유동장은 불안정하게 된다. Fig. 2-a는 Fig. 2-c보다 곡관 각도가 더 크며, 계산 결과로부터 곡관 각도가 클수록 유동박리 정도가 심해진다.

Figure 2-b 및 Fig. 2-d는 곡관에 vane을 한 개 장착하였을 때이며, vane이 존재하지 않았을 때보다 곡관 안쪽에서의 유동박리가 완화된 것

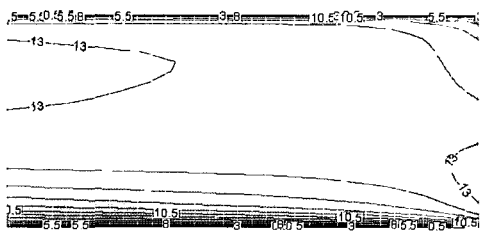


Fig. 5 90° 산화제 곡관 벽면 유동박리

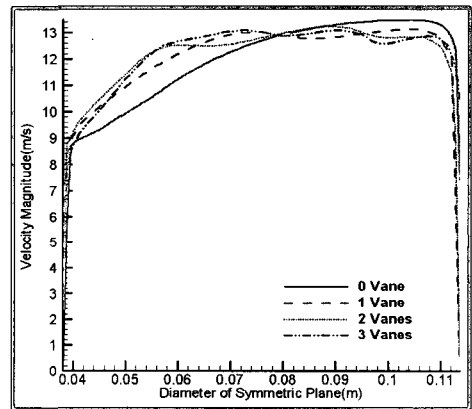


Fig. 6 90°산화제 곡관 vane 개수 증가에 따른 출구 velocity magnitude

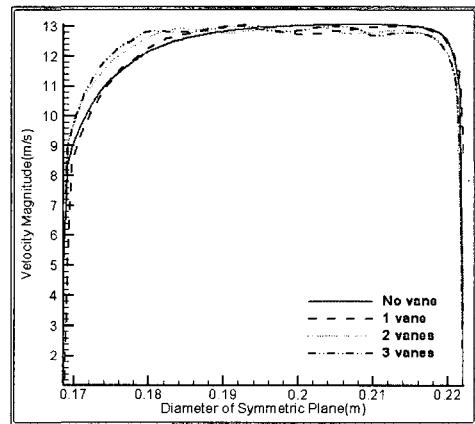


Fig. 7 45°산화제 곡관 vane 개수 증가에 따른 출구 velocity magnitude

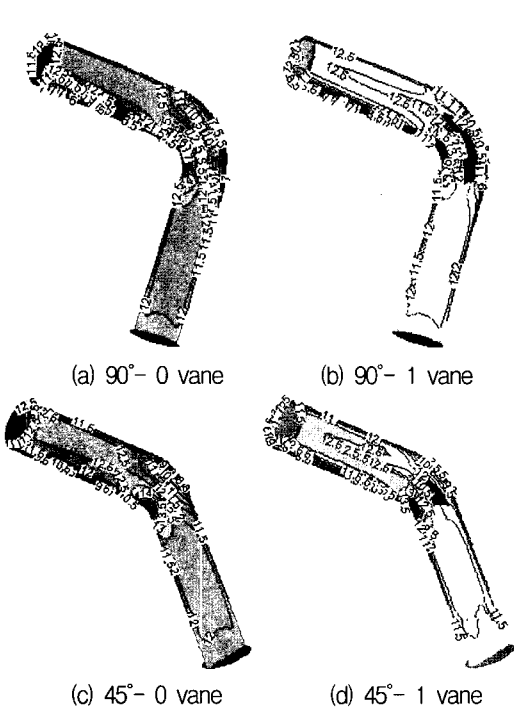


Fig. 8 3차원 연료 곡관 velocity magnitude

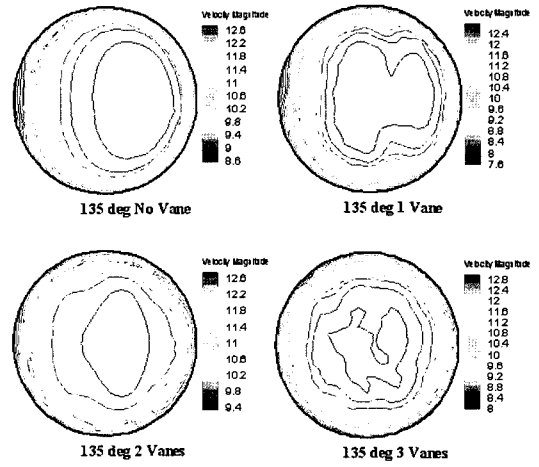


Fig. 10 45°연료 곡관 vane 개수 증가에 따른 출구 velocity magnitude

을 볼 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 90°, 45° 곡관일 경우 vane 개수에 따른 출구 면에서의 속도 분포를 나타내고 있으며, 2개 이상의 vane 을 이용하였을 경우 곡관 부분에서 유동이 통과 할 수 있는 면적이 줄어들어 유동박리 없이 출구에서의 유동장을 균일하게 만들 수 있지만, vane 개수가 많아질수록 입/출구 차압은 증가 하게 된다. 90°곡관에서는 vane 개수를 증가시 킴에 따라 유동박리로 인한 속도 감소의 영향을 효율적으로 개선할 수 있음을 확인 하였다. 반면 45°곡관에서는 vane이 2개 이상 장착된 결과 를 1개 장착된 결과와 비교하였을 때 비교적 큰 차이는 없었다. 이러한 결과는 Figs. 6~7의 출구대칭선 기준으로 속도를 나타낸 그래프로 확인할 수 있으며, vane 개수가 증가됨에 따라 유동의 균일화 정도에는 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 설계된 결과와 같이 45° 곡관일 경우 1개의 vane이 적절하다.

Figure 8은 90°, 45°일 때 3차원 연료 곡관 속도 계산결과 contour를 나타낸다. 곡관 내부의 유동장을 알기 위하여 산화제의 경우와 마찬가지로 입출구면과 대칭면(symmetric plane)만을

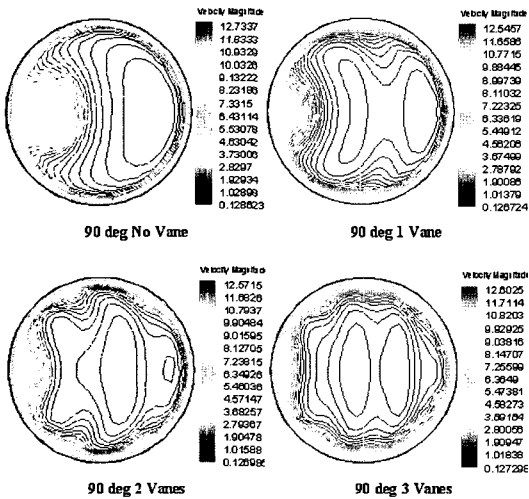


Fig. 9 90°연료 곡관 vane 개수에 따른 출구 velocity magnitude

표시하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 90°, 45° 곡관일 경우 출구 면에서의 속도 분포를 나타내고 있는데 산화제의 경우와 마찬가지로 2개 이상의 vane을 이용하였을 경우 곡관 부분에서 유동이 통과할 수 있는 면적이 줄어들어 유동박리 없이 출구에서의 유동장을 균일하게 만들 수 있지만, vane 개수가 많아질수록 입/출구 차압은 증가하게 될 것이다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 산화제와 마찬가지로 연료도 90° 곡관에서는 vane 개수를 증가시킴에 따라 유동박리로 인한 속도 감소의 영향을 효율적으로 개선할 수 있음을 확인 하였다. 반면 Fig. 12의 45° 연료 곡관 출구 속도 분포에서 봤을 때 45°에 vane을 설치 유무는 유동 균일성 확보에 큰 변화를 야기시키지 않는다. 따라서 설계된 결과와 같이 45° 곡관일 경우 1개의 vane이 적절하다.

연료와 산화제 90°곡관인 경우 Table 5와 같이 입구 압력을 계산하여 보았다. vane 개수가 많아질수록 계산결과에서와 같이 차압이 증가하게 된다. 하지만 90°연료 곡관의 경우 vane 개수에 따른 압력 증가를 계산하여 보면 1.91%, 5.25%, 12.66%로 1개의 vane이 있을 때에는 vane이 없을 때보다 차압이 크게 증가하지 않았으나 2개 이상부터는 차압이 크게 증가하였다. 90°산화제 곡관의 경우에도 2.0%, 4.9%, 10.94%로 마찬가지로 양상을 보였다. 따라서 2절에서 설계된 곡관 vane 개수 결과와 같이 1개의 vane이 장착될 경우 유동박리도 줄여주면서 압력 손실이 크지 않은 것으로 계산되었다.

### 3. 결 론

곡관 출구의 유동을 균일화시키기 위하여 90°, 45° 산화제 곡관과 90°, 45° 연료 곡관에 대하여 기존 시험 결과[1]로 vane을 설계하고, 이를 수치 해석적 방법으로 검증하여 보았다. 곡관 vane 개수가 많아질수록 유동은 더 균일해지는 반면 곡관 입/출구의 차압은 증가하게 된다. 기존 시험

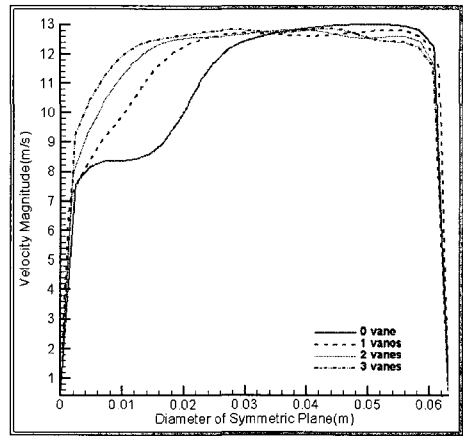


Fig. 11 90°연료 곡관 vane 개수 증가에 따른 출구 velocity magnitude

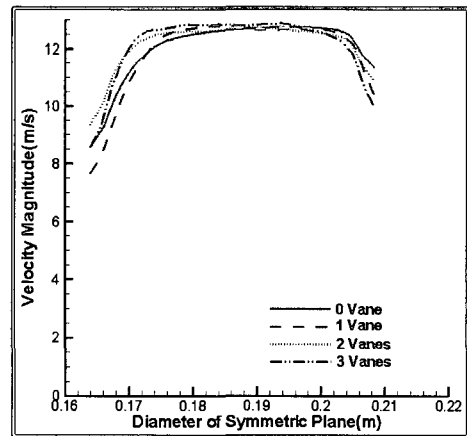


Fig. 12 45°연료 곡관 vane 개수 증가에 따른 출구 속도

Table 5. 곡관 입구에서의 압력

	0 vane	1 vane	2 vanes	3 vanes
연료 90°	$9.0126 \times 10^6$	$9.0128 \times 10^6$	$9.0133 \times 10^6$	$9.0142 \times 10^6$
연료 45°	$9.0 \times 10^6$	$9.0 \times 10^6$	$9.0 \times 10^6$	$9.0 \times 10^6$
산화제 90°	$9.0194 \times 10^6$	$9.0198 \times 10^6$	$9.0203 \times 10^6$	$9.0215 \times 10^6$
산화제 45°	$9.0124 \times 10^6$	$9.0142 \times 10^6$	$9.0144 \times 10^6$	$9.0149 \times 10^6$

(단위:Pa, 출구압력  $9.0 \times 10^6$ )

결과[1]에 의하면 유동을 균일화 시키면서 차압을 최소화시키는 vane 개수는 1개로 제시되었으며, 수치해석 결과로부터 이를 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 터보펌프 전단의 불균일 유동으로 터보펌프 성능 저하 그리고 추진제의 고압 고속 유동을 수반하는 엔진부에 균일하게 추진제를 공급하기 위한 곡관 vane의 설계의 필요성을 제시하였으며, 아울러 우주 발사체용 곡관 vane 배관의 설계의 이론적인 근거를 제시하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Blevins, R. D., "Applied Fluid Dynamics Handbook," Van Nostrand Reinhold Company, 1984, pp.61-65
- [2] Haskew, J. T., Sharif, M. A. R., "Performance evaluation of vaned pipe bends in turbulent flow of liquid propellants," Appl. Math. Modeling, Vol. 21, 1997, pp.48-62
- [3] Robert, W. F., Alan T. M., "Introduction to Fluid Mechanics," John Wiley & sons, Inc., 1994, pp.333
- [4] 이희준, 한상엽, 하성엽, 김영목, "발사체용 추진제 곡관 배관 설계 및 해석", 제3회 한국유체공학 학술대회 논문초록집, 제주라마다호텔, 2004.8

[1] Blevins, R. D., "Applied Fluid Dynamics