

소형엔진 흡기포트의 유동특성

이주형*, 박성영**

*공주대학교 기계자동차공학부

e-mail : sungyoung@kongju.ac.kr

Flow Characteristics of a Small Engine Intake Port

Joo-Hyung Lee* and Sung-Young Park*

*Div. of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

요 약

본 연구는 해석적인 접근을 통하여 소형엔진 흡기포트 설계인자의 변화에 따른 유량계수를 고찰하였다. 기존모델을 Valve Lift별 유량계수들을 해석하였으며 그 중 유량계수가 일정해지는 구간의 Valve Lift를 기준으로 설계인자 변화에 따른 성능해석을 수행하였다. 결론적으로, 흡기포트 유량계수를 결정하는 중요한 인자는 포트각도와 유선형상임을 확인하였고 이들 값의 최적화를 수행하였다. 흡기포트의 유량계수를 결정하는 설계인자로는 포트각도, 흡기포트의 유선형상, Port Height_Guide, Flange 면적이 있다. 포트각도의 상승이 유량계수를 상승시키지만 그에 따른 굴절 및 Dead Volume의 발생으로 오히려 유량계수 측면에서는 불리한 조건이 되기도 한다. 급격한 형상변화 부분에서 박리현상이 발생되는데 이에 유동을 위한 곡률을 적용하여 급격한 형상변화를 줄여 박리현상을 감쇄시키고, Dead Volume 삭제하여 원활한 유동특성을 만들 수 있다.

1. 서론

엔진의 성능을 결정하는 요인으로는 흡기 시스템 및 배기 시스템으로 나눌 수 있다. 가솔린엔진의 효율을 높이기 위해 우선적으로 흡기 시스템의 성능 향상이 가장 중요하여 이미 자동차분야 엔진의 경우 효율을 높이기 위해 흡기시스템에 관한 활발한 연구가 진행되어왔다. 하지만 소형엔진의 경우 복잡하고 다양한 구조설계의 제약이 따르기 때문에 연구개발이 주춤해왔다. 요즘 들어 다양한 분야에서 소형 엔진의 사용이 증가함에 따라 낮은 효율을 증대할 필요성을 갖게 되었다. 기관의 성능을 좌우하는 요소 중 유동특성 및 흡입성능은 유량계수 Cf(Flow coefficient)로 평가할 수 있으며, 이 들은 흡기포트, 연소실, 흡기밸브 형상 등에 의해 제어된다. 특히 흡기포트의 형상은 실린더 안으로 들어가는 흡입공기량에 밀접한 관계가 있으며, 형상에 대한 유동특성도 제어되기에 매우 중요한 요소다.

본 연구에서는 흡기포트 설계인자인 포트각도 변화에 따른 흡입효율을 알아보고, 자동차에 적용된 최적화 요소를 소형엔진에 적용하므로써 연관성을

파악하고 최적화 모델을 찾기 위해 CAE 해석의 경우 Cosmos사의 FloWorks CFD (Computational Fluid Dynamics) 프로그램을 이용 설계인자와 유량계수의 상관 관계를 찾아내고 압력분포와 속도벡터 비교 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 유동해석에 적용된 지배방정식

흡기포트 내부의 유동은 정상 상태의 난류 유동으로 가정하였으며, 본 연구에서 사용된 상용 소프트웨어에서 작용된 연속방정식, 운동량방정식 및 에너지 방정식의 표현은 식(1)~(3)와 같다. 또한 난류운동에너지방정식과 난류운동에너지 소산방정식은 식(4) 및 (5)로 표현된다. 난류 모델로서 표준 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [\mu_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i] + \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

$$- \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \epsilon + S_i u_i + Q_H$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + S_\epsilon \quad (5)$$

유동을 기술하는 지배방정식의 수렴조건은 사용된 소프트웨어 (FloWorks)[1] 에서 제공되는 자동목표치 수렴방식을 사용하였다. 이 방법은 목표치를 설정하고, 일정수렴기간동안 목표치의 최대값과 최소값의 차로써 정의 되는 분산값을 계산하여 수렴의 여부를 결정하는 방식이다.

2.2. 경계조건 및 무차원 변수 정의

본 연구의 해석에서는 입,출구측의 질량유동율, 속도, 정압력, 전압력, 및 온도를 목표치로 설정하여 수렴 조건을 제어하였다. 입구 경계조건으로는 101,325Pa의 전압력(Total Pressure) 을 흡기포트의 Flange Area에 입구 조건으로 적용 하였으며, 실린더측 출구조건은 97403Pa 의 정압력(Static Pressure) 조건을 적용하여 압력 차이를 16inH₂O (3,922pa) 으로 설정하였다.

2.3. 무차원변수

흡기포트의 흡입능력을 비교하기 위해 유량 계수 정의를 도입하였다. 유량계수는 ISD 면적에 특성 속도(V₀)로 흡입된다고 가정하였을 때 이상적으로 흐를 수 있는 이론유량과 실제 질량유량의 비로써 정의된다.

$$Cf = \frac{\dot{m}}{\rho V_o A} , V_o = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (6)$$

여기서

$$A = \frac{\pi D^2}{4} , D = ISD \text{ (Inner Seat Diameter)}$$

$$\Delta P = 3,922pa$$

본 논문에서는 Valve Lift별 유량 계수를 기초로 표준 밸브 프로파일에 대한 평균유량계수 (mean Flow coefficient)는 다음과 같이 정의된다.[2]

$$Cf = Q / (A \cdot V_0) \quad (7)$$

Q : Measured Flow Rate

A : ISD Area

V₀ : Theoretical Velocity of Compressible flow

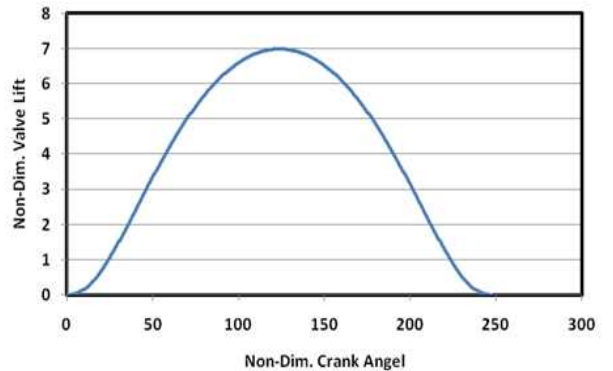
$$Cf_{\text{mean}} = \int_{\alpha 1}^{\alpha 2} Cf d\alpha / (\alpha 2 - \alpha 1) \quad (8)$$

α : Crank Angel
 $\alpha 1$: IVO (Intake Valve Open)
 $\alpha 2$: IVC (Intake Valve Close)

사용된 Standard Valve Lift Profile은 다음과 같다.

$$\text{Valve Lift} = 7 \cdot ISD / 29.3 \cdot \{ 1 - \beta 1 \cdot [2 \cdot (\alpha - \alpha 1) / (\alpha 2 - \alpha 1)]^2 - \beta 2 \cdot [2 \cdot (\alpha - \alpha 1) / (\alpha 2 - \alpha 1)]^7 - \beta 3 \cdot [2 \cdot (\alpha - \alpha 1) / (\alpha 2 - \alpha 1)]^{30} - \beta 4 \cdot [2 \cdot (\alpha - \alpha 1) / (\alpha 2 - \alpha 1)]^{40} \}$$

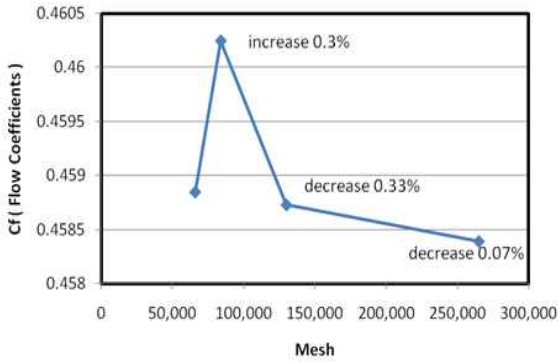
Where $\beta 1 = 1.50$ $\beta 2 = -0.56$
 $\beta 3 = 0.05$ $\beta 4 = -0.015$



[그림 1] 표준 밸브 프로파일

2.4. Grid Independence

본 논문은 유량계수를 해석적으로 접근한 논문 으로서 실험결과와의 오차가 발생할 것이 예상되어 Grid Independence를 수행하여 오차율이 가장 적은 적절한 Mesh를 적용하였다.

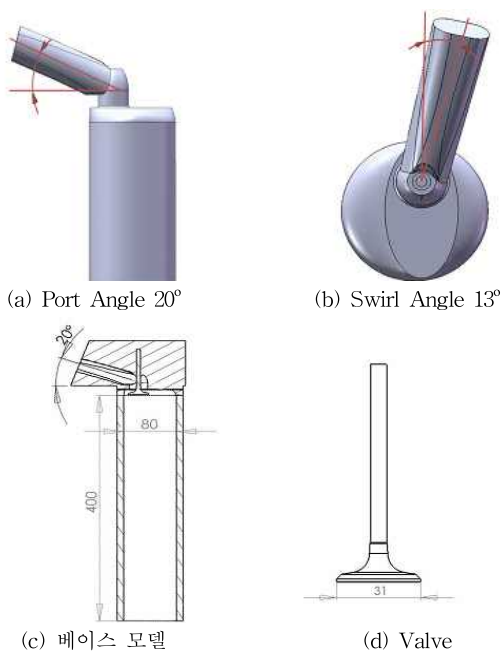


[그림 2] Grid Independence

3. 해석모델

3.1. 베이스 모델

본 연구의 대상은 모델GM29인 300CC 소형엔진 흡기 포트이며, 실 모델을 정확한 제원으로 모델링 하여 해석하였다. 베이스 모델의 구성은 공기가 흡입 되는 흡기 포트 (Intake Port), 유량을 제어하는 흡기 밸브 (Intake Valve), 그리고 연소실과 실린더 로 구성되어 있다. 본 연구에 적용된 베이스 모델은 그림 3과 같은 형상으로 이루어졌으며 포트각도 (Port Angle) 20°의 내각, 스윙각도 (Swirl Angle) 13°의 내각을 가진다. 그리고 역류 (Reverse Flow)가 발생하여 실린더의 직경(D) 80mm를 기준으로 5배의 길이(L)로 늘려 설계하였다. 본 연구에 사용 된 흡기 포트의 설계 제원은 표 1에 명시된 바와 같다.



[그림 3] 베이스 모델의 개략도

[표 1] 베이스 모델의 설계 제원

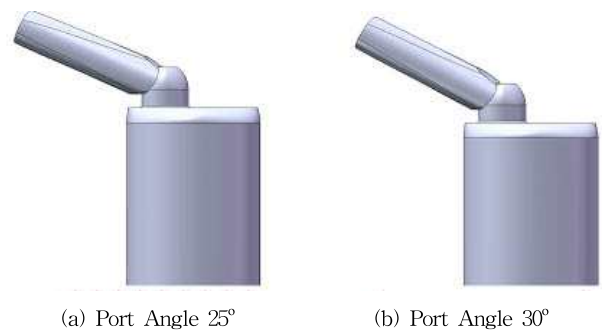
Parameter	Symbol [unit]	Dimensions
Port Angle	[°]	20
Swirl Angle	[°]	13
Cylinder diameter	[mm]	80
Cylinder length	[mm]	400
Inner Seat diameter	[mm]	31

유동해석은 SolidWorks의 통합 환경을 지원하는 상용 유동해석 소프트웨어(FloWorks)를 사용하였으며 총 13만개 이상의 유체 유동 격자로 구성하여 계산을 수행하였다.

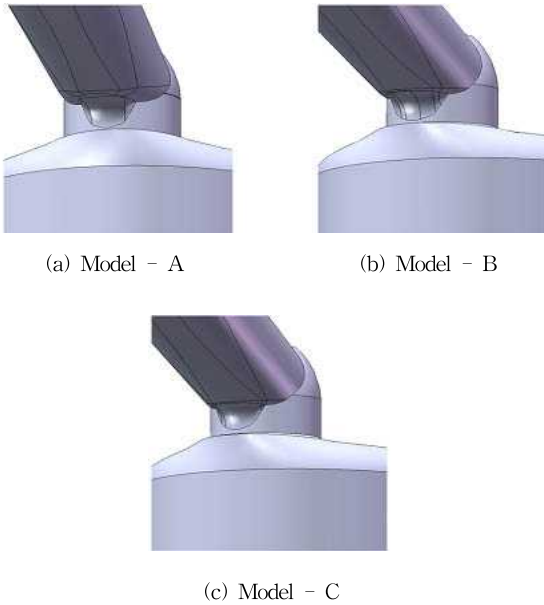
3.2. 흡기포트 변경모델

본 연구에서는 포트의 설계변수로 포트각도 (Port Angle)와 Dead Volume을 줄이기 위한 R값을 적용하였다. 그림 4는 해석을 위한 변경조건으로 베이스 모델을 기준으로 포트각도 25°, 30°로 변경하였고, 스윙 각도는 베이스 모델과 동일하게 적용하였다.

그림 5는 흡기포트 내에 Dead Volume 이 발생하는 지점을 찾아 R값을 준 형상이다. Model-A, Model-B, Model-C 에 동일한 조건의 R값을 적용하였고, 모델 순서에 따라 포트각도는 20°, 25°, 30°로 설명하였다. 두 설계변수를 포트 변위각에 따라 적용하여 유동특성 찾아내고 최적화모델을 찾기 위해 해석을 수행하였다.



[그림 4] Port Angle의 변화에 따른 변경모델



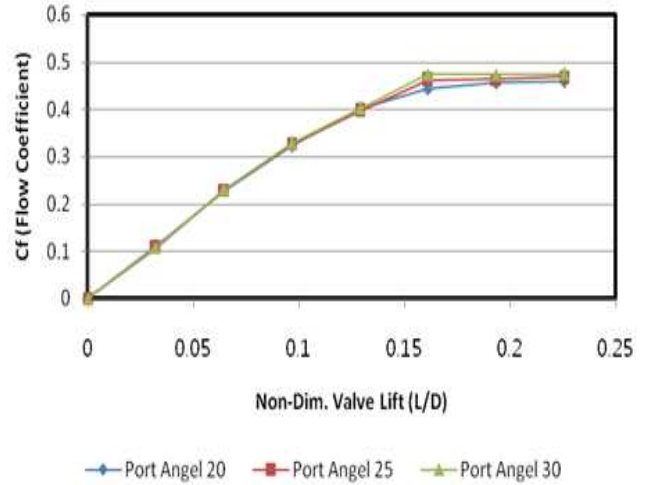
[그림 5] Port Angle에 따른 유선형상 변경모델

4. 해석 결과 및 고찰

4.1. 포트 각도에 따른 성능특성

그림 6은 설계인자 중 스윙각도가 일정할 경우에 대해서 포트각도를 20°, 25°, 30° 변화시키면서 유량계수를 나타낸 것이다. 베이스 모델인 포트각도 20°의 경우 완만한 Cf곡선을 이루고 있다. 무차원 밸브리프트(Non-Dim. Valve Lift) 0에서 0.16 구간에서는 유량계수가 선형적 상승변화를 이루고 있는 반면 0.13 이후 부터는 점차적으로 유량계수가 일정해지는 경향을 보였다. 변경모델인 포트각도 25°, 30° 모델에서는 무차원 밸브리프트 0에서 0.16 구간에서는 유량계수가 선형적 상승변화를 이루었지만 0.16 이후부터는 거의 일정한 유량계수로 유지되는 경향을 보인 것으로 보아 포트각도 변화에 의해 무차원 밸브리프트 0.16 에서 최소목이 결정된 것으로 사료된다.

또한 포트각도가 증가함에 따라 전영역에서의 유량계수도 상승하였다. 이러한 경향으로 적절한 포트각도의 상승이 흡기포트 흡입효율에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.



[그림 6] 포트 각도 별 유량계수

포트각도 변화에 따른 전 영역 유량계수의 차이가 크지 않기에 비교하기가 쉽지 않다. 위에서 언급한 바와 같이 표준 밸브 프로파일에 대한 평균유량계수를 표 2로 표현하면, 포트각도 상승에 따라 유량계수도 증가하는 것을 알 수 있다.

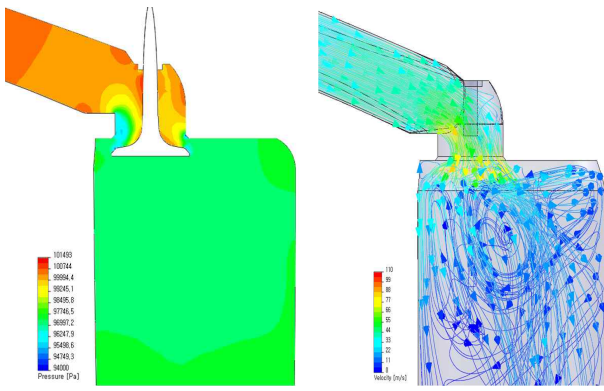
[표 2] 평균 Cf 값

Port Angle	20°	25°	30°
Int Cf(CA)/CA	0.324	0.328	0.333

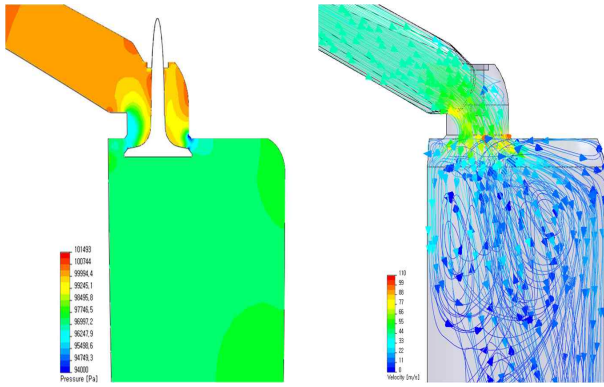
또한 그림 7에서 유량계수의 변화가 적어지는 구간인 압력분포와 속도벡터를 확인할 수 있다. 포트각도가 상승함에 따라 밸브 주변의 압력이 전반적으로 낮아지는 것을 확인할 수 있으며 텀블을 형성하는 속도벡터도 증가하는 것을 볼 수 있다.

4.2. 곡률(Rounding)에 의한 성능특성

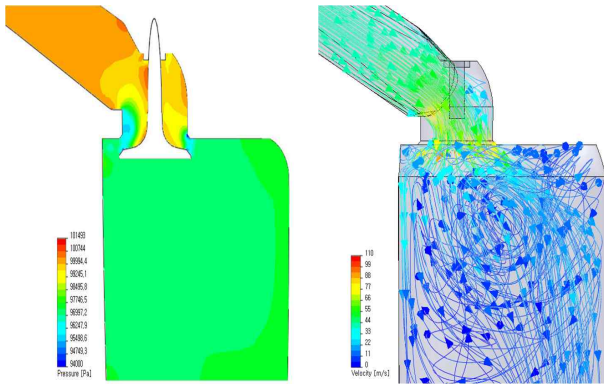
상기에서 해석한 경향을 이용하여 최소목이 되는 부분과 Dead Volume이 발생하는 지점이 유사하다는 것을 알 수 있었다. 그림 8은 이러한 결과를 재확인하고 최적화된 모델을 찾고자 Dead Volume이 발생하는 지점에 일정한 반경 값을 적용하여 유량계수를 비교한 결과이다. 역시나 유량계수는 포트각도에 의존하는 하는 경향을 볼 수 있으며, 동일한 포트 각도에 곡률 값의 유무로 해석한 결과 곡률이 적용된 흡기포트에서 우세한 유량계수를 보임을 확인할 수 있다.



(a) Port Angle 20°

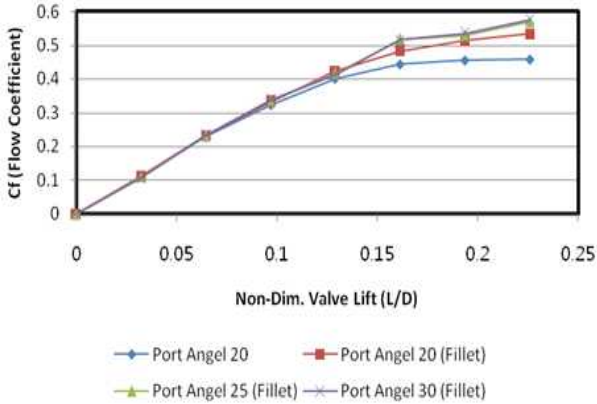


(b) Port Angle 25°



(c) Port Angle 30°

[그림 7] Port Angle 변화별 압력 분포 및 속도벡터

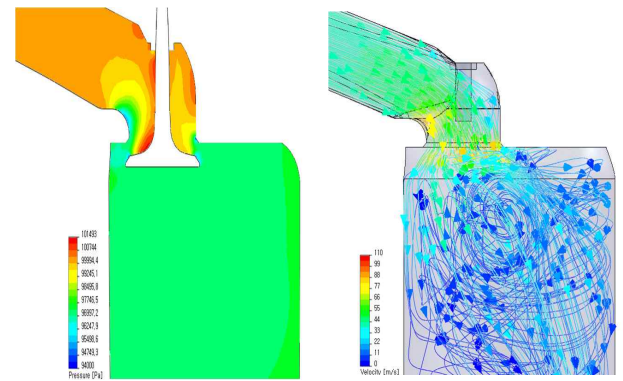


[그림 8] 곡률이 적용된 포트 각도 별 유량계수

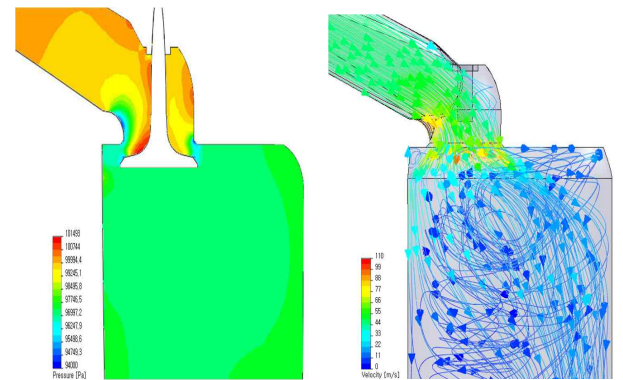
포트각도의 증가는 유량계수의 상승효과를 가져왔으며, 곡률을 적용함에 따라 급격한 형상변화부분을 저감하여 속도벡터 유동방향이 변경됨을 표 3과 그림 9에서 확인할 수 있다.

[표 3] 평균 Cf 계산적분값

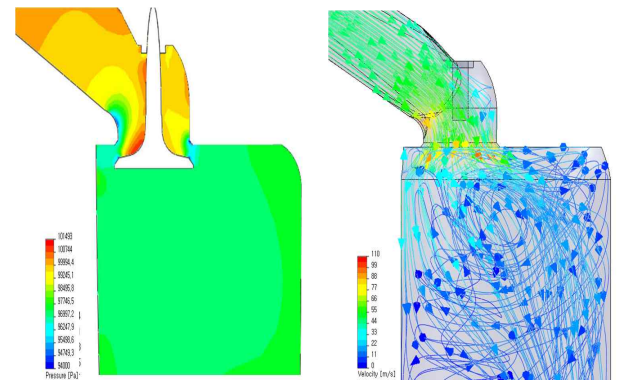
Port Angle	20°	25°	30°
Int Cf(CA)/CA	0.324	0.328	0.333
Model	Model-A	Model-B	Model-C
Int Cf(CA)/CA	0.356	0.368	0.369



(a) Model - A



(b) Model - B



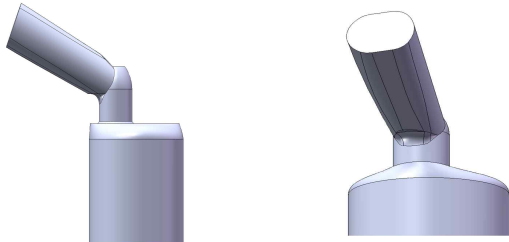
(c) Model - C

[그림 9] 곡률이 적용된 Port Angle 변화별 압력 분포 및 속도벡터

5. 최적화 모델

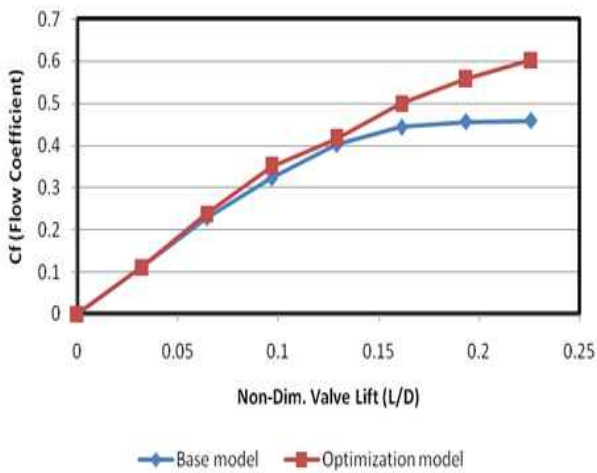
5.1. 최적화 모델의 성능 특성

최적화 모델을 찾기 위해 설계인자 중 포트각도의 변화와 R값을 적용하여 변화에 따른 유동특성을 알 수 있었다. 이를 인용하여 적절한 포트각도와 R값을 적용한 최적화 모델을 제작하였으며 Port Height_Guide값을 ISD 크기의 1.15배, Flange Area를 ISD면적의 90%[3]으로 적용 하였다.



[그림 10] 최적화 모델

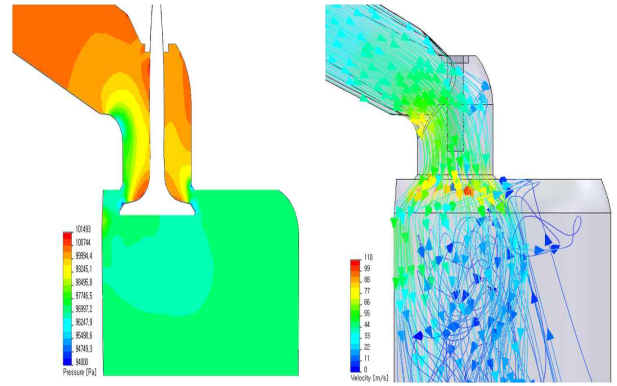
그림 11은 베이스 모델과 최적화 모델 유량계수를 전 영역 비교한 것으로 최적화 모델이 베이스 모델보다 월등한 유량계수를 나타낸다. 즉, 포트각도, 곡률 적용, Port Height_Guide 값 및 Flange 면적을 최적요소들로 적용하면 어느 모델의 흡기포트에도 최적화가 가능할 것으로 판단된다.



[그림 11] 베이스 모델과 최적화 모델 Cf 비교

[표 4] 평균 Cf 계산적분값

Port Angle	베이스 모델	최적화모델
Int Cf(CA)/CA	0.324	0.379



[그림 12] 최적화 모델의 압력분포와 속도벡터

6. 결론

본 연구에서는 흡기포트 설계인자와 유량계수의 상관관계를 파악하고 효과적인 설계인자 선정작업을 통하여 최적화 모델을 찾았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 흡기 포트의 유량계수를 결정하는 설계인자로는 포트각도, 흡기포트의 유선형상, Port Height_Guide, Flange 면적이 있다.
- 2) 포트각도의 상승이 유량계수를 증대시키지만 이에 따른 굴절 및 Dead Volume의 발생으로 오히려 유량계수 측면에서는 불리한 조건으로 작용할 수도 있다.
- 3) 급격한 형상변화 부분에서 발생하는 박리현상은 곡률 적용을 통하여 감소시킬 수 있고, Dead Volume을 삭제하여 원활한 유동특성을 형성할 수 있다.

참고문헌

- [1] NIKA GmbH, "COSMOS-FloWorks User's Manual", 2007.
- [2] Jin-Wook Son, Sihun Lee, Bonghoon Han, Wootae Kim, "A Correlation between Re-Defined Design Parameters and Flow Coefficients of SI Engine Intake Ports", SAE Paper No. 2004-01-0998, 2004.
- [3] 이시훈, 손직욱, 광영홍, 한봉훈, 김우태, "가솔린엔진의 흡기유량계수와 포트설계인자의 상관성에 관한 연구" 한국자동차공학회 2003년도 추계학술대회 논문집, pp.86-94, 2003.