

전산유체해석을 통한 RE엔진 흡기포트의 개발

김창수¹, 박성영^{2*}

¹공주대학교 일반대학원 기계공학과, ²공주대학교 그린카기술연구소

Development of Intake Port for Range Extender Engine Using CFD Simulation

Chang-Su Kim¹ and Sung-Young Park^{2*}

¹Mechanical Engineering Dept., Graduate School, Kongju National University

²Research Institute of Green-Car Technology, Kongju National University

요약 본 논문에서는 RE엔진에 적용하기 위한 흡기포트를 CFD 기술을 활용하여 개발하였다. 3차원 모델링을 진행 하고 전산유체해석을 진행하였으며, 계산된 유량계수와 스윌계수를 실험결과와 비교 분석하였다. 흡기포트의 convex 및 concave부 곡률을 최적화하여 Recirculation의 발생과 유동저항을 저감하였다. 결과적으로, 계산된 평균 유량계수는 0.383이고, 평균 스윌수는 1.544로 일반적인 2밸브 엔진 시스템의 평균성능에 상회하는 우수한 성능을 나타내었다.

Abstract An intake port for Range Extender engine has been developed using CFD technique. Three dimensional intake port model has been built and computational analysis has been performed. Computed non-dimensional flow coefficient, swirl ratio and swirl number have been compared with the experimental result. Convex and concave curvature of the intake port have been optimized to reduce recirculation flow and flow resistance. Finally, the mean flow coefficient is 0.383 and the mean swirl number is 1.544. The intake port shows relatively excellent performance compared with those of general 2 valve engine system intake ports.

Key Words : Flow coefficient, Intake port, Range Extender, Swirl number, Swirl ratio

Nomenclature

A	: Area
C_f	: Flow coefficient
c_m	: Piston velocity
$c(\alpha)$: Actual piston speed
ISD	: Inner Seat Diameter
\dot{m}	: Mass flow rate
N_{pad}	: Rotational speed of paddle wheel
N_{mot}	: Fictitious engine speed
n	: Engine speed
ΔP	: Pressure difference
s	: Engine stroke
α	: Crank angle

1. 서론

최근 들어 하이브리드 자동차가 보편화되면서 관련기술이 활발히 개발되고 있다. 특히, Plug-In 하이브리드와 RE(Range Extender)엔진이 도입되어 기술적인 완성도를 높여가고 있다. RE엔진이라는 개념은 미국에서 열린 전기자동차 컨퍼런스에 처음 도입되었으며, 이는 전기자동차에서 엔진을 발전기로 사용하여 주행거리를 연장시키는 엔진이라는 개념으로 사용되고 있다. 현재 RE엔진은 전기자동차의 단점인 주행거리와 비상시 사용동력 등을 보조할 수 있는 중요한 에너지 발생장치로 인식되어 개발이 활발히 진행되고 있다. 발전용 RE엔진의 개발에서 핵심은 고효율의 엔진을 최소의 제작비로 만드는 것이라

*Corresponding Author : Sung-Young Park(Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9275 email: sungyoung@kongju.ac.kr

Received February 12, 2013

Revised (1st March 12, 2013, 2nd April 6, 2013)

Accepted June 7, 2013

할 수 있다. 엔진의 효율을 높이는 방법 중에 흡기포트의 개발이 매우 중요하며, 이미 자동차 엔진의 경우 흡입 효율을 높이기 위해 다양한 기술의 적용이 시도되어 왔다 [1]. 특히, 가솔린 엔진에서 흡입공기의 유동은 연료와 공기의 혼합에 있어서 필수적으로 연구되어야 하는 요소이며, 이는 연소속도 및 연소안정성에 직접적인 영향을 미친다[2]. 따라서 흡기포트 형상은 엔진 개발에 있어 개발 초기에 기본적으로 고려되어야 하는 설계인자이다. 흡기포트의 설계변수로는 포트각도, 플랜지 면적, 밸브 각도 및 포트높이 등 많은 요소가 있으며, 이들 변수들은 유동 특성과 밀접한 상관성을 가지고 있다[3,4]. 최적의 흡기포트 설계를 위해 흡기포트 성능 변수간의 상관성을 파악하고 유동 특성의 변화를 파악하여야 한다[5]. 이러한 유동 특성 및 흡입성능은 유량계수(C_f , Flow coefficient)로 평가될 수 있다[6].

흡기포트의 형상과 스윙유동의 상관관계에 대한 연구 등이 신규엔진을 위주로 진행되었다. 이러한 흡기포트의 개발은 인젝터 등의 연료계 신기술과 병행하여 엔진의 성능을 향상시키기 위하여 수행되었다.

본 연구의 목적은 RE엔진 흡기포트의 유량계수와 Swirl Ratio의 성능해석, 실험결과 비교 및 실린더 내 유동 특성 분석을 통하여 흡기포트 형상을 최적화하는데 있다.

2. 본론

2.1 계산격자 및 해석 방법

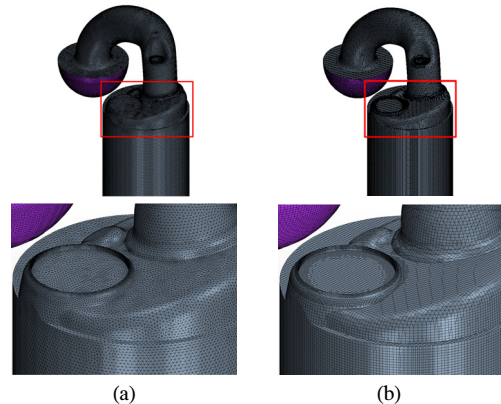
Fig. 1은 본 연구에 적용된 RE엔진의 흡기포트 형상을 보여주고 있다. 본 모델은 최대 밸브 리프트가 9mm인 흡기포트로 흡기부의 유동을 실제 구동 상황과 동등하게 유지하기 위하여 벨로우즈를 설치하였으며, 해석을 위한 반구형의 흡기부를 추가하였다.



[Fig. 1] Intake port of RE engine

Fig. 2는 유동해석을 위해 계산 격자를 생성한 모습이

다. 150만개 이상의 직육면체 계산격자를 적용하였으며, 유동해석은 상용 소프트웨어인 Star-CCM+[7]를 사용하였다. 해석을 위한 난류 모델로는 Standard K-Epsilon Turbulence model을 적용하였다. 입구 경계조건으로는 101,325Pa의 전압력을 적용하였으며, 실린더측 출구조건은 95102Pa의 정압력 조건을 적용하여 압력 차이를 6223Pa로 설정하였다. 또한, 포트 하면의 출구에서 발생하는 reverse flow를 방지하기 위하여 실린더의 길이를 보여 크기의 5배 정도로 연장하여 해석을 진행하였다[8].



[Fig. 2] Calculation Grid (a) Surface mesh (b) Volume mesh

흡기포트의 흡기능력을 판단하기 위하여 일반적으로 유량계수가 사용된다. 유량계수는 흡기밸브의 ISD 면적을 기준으로 특성속도 (V_0)로 공기가 흡입된다고 가정하였을 때 유입되는 이론유량과 실제 질량유량의 비로서 정의된다.

$$C_f = \frac{\dot{m}}{\rho V_0 A} \quad (1)$$

여기서 특성속도 $V_0 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$ 이고, 단면적 A는 ISD를 기준으로 계산된 면적이다. \dot{m} 은 측정된 공기의 질량유량이고, ΔP 는 입출구의 압력차이고, ρ 는 공기의 밀도이다.

본 연구에서는 밸브리프트(Valve lift)별 유량 계수를 기초로 표준밸브 프로파일에 대한 평균유량계수(Mean flow coefficient)를 다음과 같이 정의하였다[2].

$$C_{f\ mean} = \int_{\alpha 1}^{\alpha 2} C_f d\alpha / (\alpha 2 - \alpha 1) \quad (2)$$

여기서 α 는 크랭크 각도, α_1 은 크랭크 각도 기준의 흡기밸브 열림시기(Intake valve opening), α_2 는 흡기밸브 닫힘시기(Intake valve closing)를 의미한다. 표준밸브 프로파일(SVP, Standard valve lift profile)을 사용하면 밸브 리프트가 상이한 흡기포트들의 상대적 성능 비교가 가능하다는 장점이 있다. 적분을 위하여 사용된 표준밸브프로파일은 다음과 같다[9].

$$SVP = \text{Maxlift} \cdot \text{ISD} / 29.3 \cdot \left(1.0 - \beta_1 \cdot [2 \cdot (\alpha - \alpha_1) / (\alpha_2 - \alpha_1)]^2 - \beta_2 \cdot [2 \cdot (\alpha - \alpha_1) / (\alpha_2 - \alpha_1)]^7 - \beta_3 \cdot [2 \cdot (\alpha - \alpha_1) / (\alpha_2 - \alpha_1)]^{30} - \beta_4 \cdot [2 \cdot (\alpha - \alpha_1) / (\alpha_2 - \alpha_1)]^{40} \right) \quad (3)$$

여기서 $\beta_1 = 1.50$, $\beta_2 = -0.56$, $\beta_3 = 0.05$ 및 $\beta_4 = -0.015$ 이다.

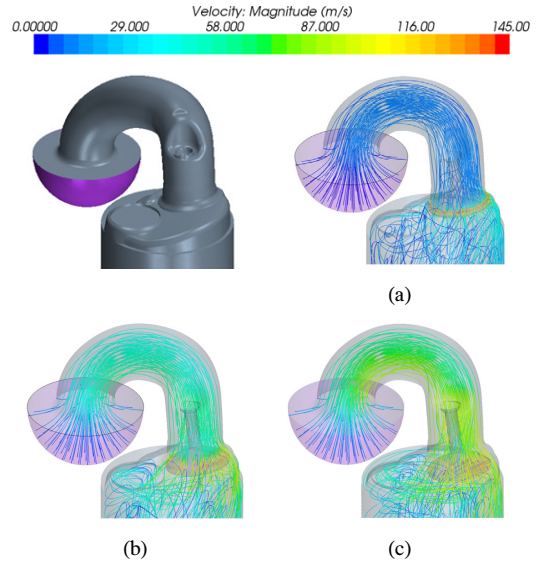
유량계수와 함께 흡기포트에서 중요시되는 Swirl Ratio(SR)에 중점을 두고 해석을 진행하였다. Swirl Ratio는 와류의 회전수와 엔진의 회전수의 비로써 Swirl Ratio가 높을수록 스웰강도가 증가하고 실린더 내에서의 연료 혼합을 촉진하여 연소 성능을 향상시킨다[10,11]. Swirl Ratio와 밸브 리프트별 Swirl Ratio를 적분한 대표값인 Swirl Number(SN)에 사용된 계산식은 다음과 같다. 여기서 피스톤 속도 $c_m = \frac{\pi n}{30}$ 이다.

$$SR = \frac{N_{pad}}{N_{mot}} = \frac{N_{pad}}{\left(\frac{30m}{\rho AS} \right)} \quad (4)$$

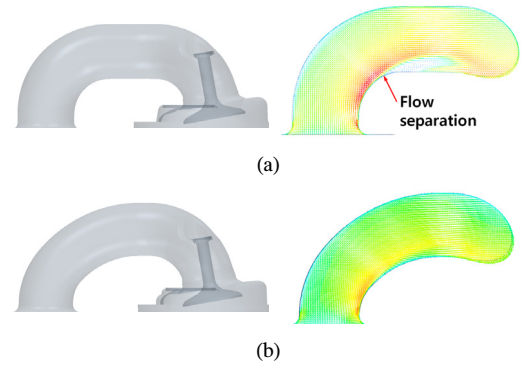
$$SN = \left(\frac{N_{pad}}{N_{mot}} \right)_m = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{N_{pad}}{N_{mot}} \left(\frac{c(\alpha)}{c_m} \right)^2 d\alpha \quad (5)$$

2.2 해석 결과

Fig. 3은 밸브 리프트 1mm, 5mm 및 9mm의 입구부와 밸브헤드 최소목의 유동 속도 및 유선을 보여주고 있다. 밸브 리프트 상승에 따라 유동이 강화되는 것을 확인할 수 있었으며, 흡기 밸브헤드에서 최대 속도가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 또한, 흡기포트 convex부 곡률을 최적화하여 Recirculation의 발생을 억제하였다. Fig. 4는 초기의 흡기포트 형상과 최적화된 최종모델을 보여주고 있다. 최종모델은 흡기포트에서 자주 발생하는 convex 부위의 유동박리현상을 억제하기 위하여 최적화하였다. 초기 모델에서 convex 부위의 유동박리현상이 최종 모델에서는 발생하지 않는 것을 볼 수 있다.

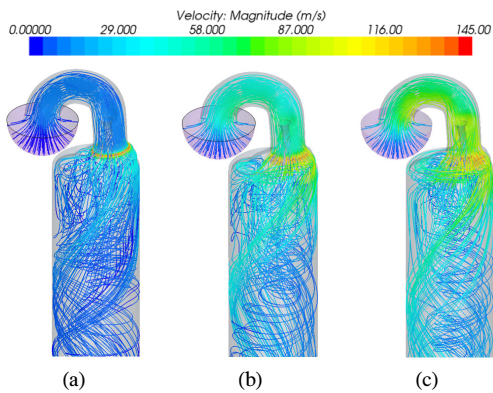


[Fig. 3] Velocity distribution and streamline
(a) Valve lift = 1mm (b) Valve lift = 5mm
(c) Valve lift = 9mm



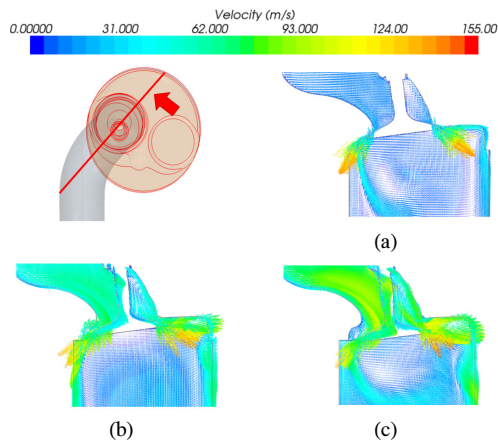
[Fig. 4] Intake port curvature and flow distribution
(a) Initial model (b) Final model

Fig. 5는 밸브 리프트 1mm, 5mm 및 9mm의 실린더부 유동 속도와 유선을 보여주고 있다. 밸브헤드와 마찬가지로 밸브 리프트 상승에 따라 실린더내 스웰 유동이 강화되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 실린더의 접선방향으로 메인 유동이 유도되며, 스웰과 텀블 유동이 생성되는 것을 확인할 수 있었다.



[Fig. 5] Velocity distribution and Streamline in the Cylinder
 (a) Valve lift = 1mm (b) Valve lift = 5mm
 (c) Valve lift = 9mm

Fig. 6은 밸브 리프트 1mm, 5mm 및 9mm에서 흡기밸브 단면에서의 유동 및 속도 분포를 보여주고 있다. 흡기포트 concave부의 최적화로 High lift의 흡입 공기량이 극대화되었으며, 밸브 리프트의 증가에 따른 흡입유량이 증대되는 것을 확인할 수 있다.

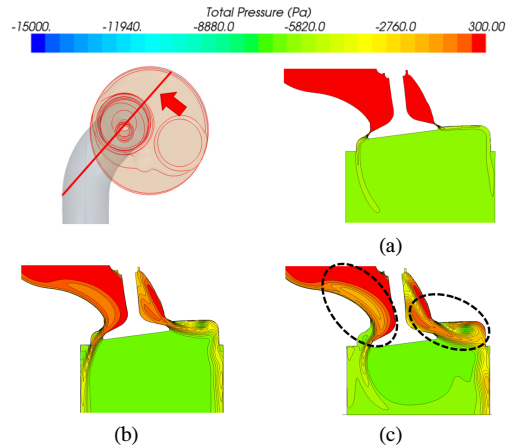


[Fig. 6] Velocity distribution near intake valve
 (a) Valve lift = 1mm (b) Valve lift = 5mm
 (c) Valve lift = 9mm

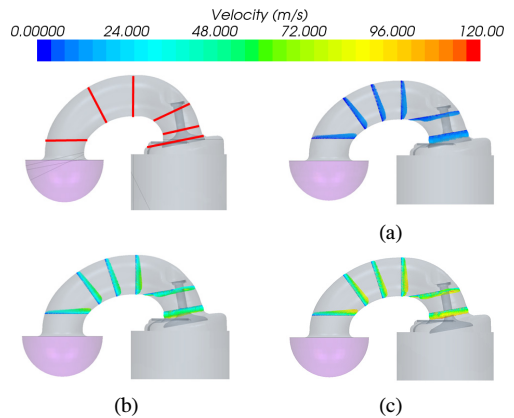
Fig. 7은 밸브 리프트 1mm, 5mm 및 9mm에서 흡기밸브 단면에서의 전압력 분포를 보여주고 있다. 밸브리프트가 증가함에 따라 전압력구배가 발달하는 것을 볼 수 있었다. 특히, 밸브시스템 후면과 연소실 초입부에서 급격한 전압력 구배를 보였으나, 이는 흡기포트 convex 끝단의 곡률을 최적화하여 전압력 구배를 최소화하도록 설계된

것이다. 이러한 설계는 흡기포트의 유동박리를 방지하거나 지연시킬 수 있어 흡기 유량계수의 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 밸브 리프트 1mm, 5mm 및 9mm에서 흡기포트 입구부와 밸브 부근의 속도 성분과 유동방향을 보여주고 있다. 흡기포트 convex면 곡률 최적화를 통해 Recirculation flow 형성을 방지하였다.

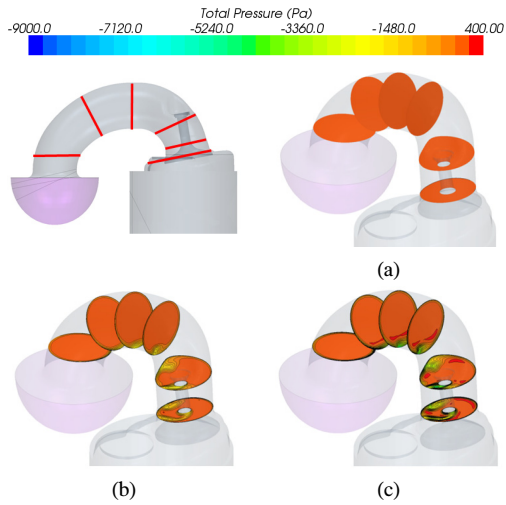


[Fig. 7] Total pressure gradient near intake valve
 (a) Valve lift = 1mm (b) Valve lift = 5mm
 (c) Valve lift = 9mm



[Fig. 8] Velocity of intake port
 (a) Valve lift = 1mm (b) Valve lift = 5mm
 (c) Valve lift = 9mm

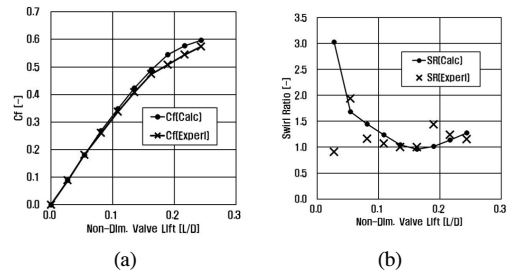
Fig. 9는 밸브 리프트 1mm, 5mm 및 9mm에서 흡기포트 입구부와 밸브 부근의 전압력 분포를 보여주고 있다. 밸브 리프트 증가에 따라 전압력 분포도 발달하는 것을 확인할 수 있다. 밸브리프트가 증가함에 따라 전압력이 증가하기는 하지만 흡기포트 convex면 곡률 최적화를 통해 급격한 전압력 구배가 발생하는 것은 방지하였다.



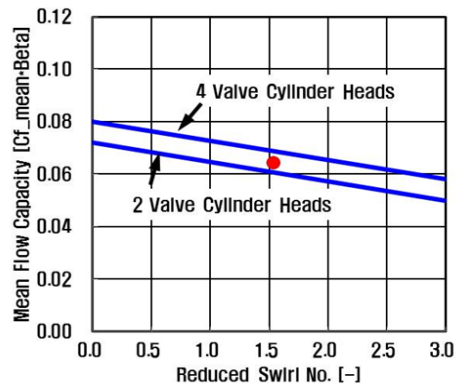
[Fig. 9] Total pressure gradient of intake port
 (a) Valve lift = 1mm (b) Valve lift = 5mm
 (c) Valve lift = 9mm

Fig. 10은 앞서 설명한 식(1)과 (4)를 적용하여 계산된 유량계수와 Swirl Ratio를 그래프화한 것이다. 실험결과 는 해석과 동일한 조건에서 플로우 리그에서 수행된 결과이다. 실험은 Performance Trend사의 Superflow를 사용하여 유량계수와 Swirl Ratio를 획득하였으며, 실험장치의 제원, 실험 방법 및 관련수식은 기존의 문헌에 상세하게 기록되어 있어 본 논문에서는 생략하였다[5,12,13]. Fig. 10(a)에서 해석치와 실험치의 공기유량계수가 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 이때, 표준밸브 프로파일로 계산한 무차원 평균 흡기유량계수는 해석치가 0.383, 실험치가 0.366으로 계산되었으며 4.5% 정도의 오차가 있으나 밸브 리프트별 경향을 우수하게 추종하고 있다. Fig. 10(b)의 Swirl Ratio그래프의 경우 밸브리프트 1mm에서 상당한 오차를 보이고 있다. 이는 실험을 진행시에 밸브 리프트 1mm의 유량이 매우 작아 측정에 오차가 생긴 것으로 사료되며, 밸브 리프트 1mm를 제외한 나머지 영역에서는 상당히 유사한 경향을 보인다. 평균 Swirl Number는 해석치의 경우 1.544, 실험치의 경우 1.534로 계산되어 오차값이 1% 이내로 나타났다.

Fig. 11은 일반적인 4밸브 및 2밸브 엔진 시스템의 흡기포트 성능을 나타낸 그림이다. 무차원 유량계수와 평균 Swirl Number를 대입하였을 때, 4밸브 시스템의 성능에는 미치지 못하지만, 동일한 2밸브 시스템 대비 우수한 성능을 나타내고 있다.



[Fig. 10] Flow coefficient and swirl ratio
 (a) Flow coefficient (b) Swirl ratio



[Fig. 11] Performance positioning of the intake port

3. 결론

본 논문에서는 최근 개발이 활발히 진행되고 있는 RE 엔진에 적용하기위한 흡기포트를 개발하고자 유동해석을 진행하였다. 이에 따라 3차원 모델링을 진행하고 전산유체해석을 수행하여 흡기포트별 유량계수 및 Swirl Ratio를 비교하였다. 또한, 최적화된 흡기포트의 해석치를 실험치와 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 밸브헤드의 최소목의 유동 및 유선을 분석하여 흡기 밸브헤드에서 최대속도가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 흡기포트의 convex부 곡률을 최적화하여 Recirculation의 발생을 억제하였다.
- 2) 흡기포트 concave부 최적화로 High lift의 흡입 공기량이 극대화되었으며, 밸브 리프트의 증가에 따른 흡입유량이 증대되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 곡률 최적화 설계는 흡기포트의 유동 박리를 방지하거나 지연시킬 수 있어 흡기 유량계수의 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

3) 무차원 흡기유량계수는 해석치의 경우 0.383, 실험치의 경우 0.366으로 계산되었으며, 4.5% 정도의 오차가 발생하였으나 벨브리프트별 경향을 우수하게 추종하고 있다. 또한, 평균 Swirl Number는 해석치는 1.544이고, 실험치는 1.534로 오차값이 1% 이내로 나타났으며, 이는 4밸브 시스템의 평균성능에 가까운 매우 우수한 성능이다.

References

- [1] S. J. Lee, S. C. Kim, D. S. Kim, I. Y. Ohm, Y. S. Cho, "Numerical analysis of flow characteristics with intake port and valve design", KSME 01F29B, pp.921-927, 2001.
- [2] W. G. Kang, C. H. Lee, D. S. Kim, Y. S. Cho, "Correlation of Flow Characteristics and Flow Coefficient with Intake Port Design", KSAE 04-F0012, pp.70-76, 2004.
- [3] B. H. Lee, Y. J. Chang, C. H. Jeon, "A Numerical Study on the Characteristics of Tumble and Internal Flow According to Intake Port for Marine Engine", KOSME, pp.498-505, 2008.
- [4] D. S. Kim, Y. J. Yoo, I. S. Shin, S. H. Hwang, Y. S. Cho, "Relation between flow coefficient and intake design through computational flow analysis", KSAE03-S0005, pp.27-32, 2003.
- [5] Y. S. Park, D. S. Choi, J. H. Lee, P. W. Shin, S. Y. Park, "Performance Development of 400cc Small Engine Intake Port", Journal of KAIS, Vol. 13, No. 3, pp. 977-985, 2012.
- [6] C. G. Park, H. K. Park, M. T. Lim, "Numerical Analysis of the Flow characteristics in Intake-Port Piston Head Configurations in a Gasoline Direct-Injection Engine", KSCFE 4-5 pp.21-27, 1999.
- [7] CD-adapco, "Star-CCM+ V5 User's Manual", 2010.
- [8] H. S. Kwon, H. Y. Choi, K. D. Min, J. W. Son, W. T. Kim, "A CFD Analysis on the Flow Characteristics of Engine Exhaust Port", KSAE04-S0030, pp.186-191, 2004.
- [9] J. W. Son, S. H. Lee, B. H. Han, W. T. Kim, "A Correlation between Re- Defined Design Parameters and Flow Coefficients of SI Engine Intake Ports", SAE Paper No. 2004-01-0998, 2004.
- [10] S. W. Kwak, K. W. Yi, "Steady State Flow CFD Analysis of the Intake Port in Euro-3 Diesel Engine", KSAE06-F0065, pp.423-428, 2006.

- [11] C. H. Lee, J. H. Lee, D. S. Kim, Y. S. Cho, "Numerical Analysis of Flow Coefficient and Swirl Flow Characteristics with Intake Port Design Parameters", KSAE05-S0029, pp.184-190, 2005.
- [12] Performance Trends Inc., "Engine Analyzer for Windows", 2008.
- [13] Performance Trends Inc., "SF-110/120FC Flow bench Operator's Manual", 2008.

김 창 수(Chang-Su Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 (공학사)
- 2011년 2월 : 공주대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>

열유체 해석, 재생에너지, 내연기관 성능개발

박 성 영(Sung-Young Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 5월 : Texas A&M Univ., 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교, 기계자동차공학부, 부교수

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발