

수치해석적 접근을 통한 불꽃점화 엔진의 냉각수 유동특성 개선

이상인¹, 박성영^{2*}

¹공주대학교 일반대학원 기계공학부, ²공주대학교 기계자동차공학부

Computational Approach to Improve Coolant Flow Characteristics for the SI Engine

Sang-In Lee¹ and Sung-Young Park^{2*}

¹Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University

²Div. of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

요약 불꽃점화 엔진의 냉각수 유동 특성을 개선하기 위하여 본 연구가 수행되었다. 배기밸브와 배기 포트의 냉각수 유로에서의 유동특성이 중점적으로 고려되었다. 베이스 모델의 수치해석적 분석에서 2번 실린더의 배기 밸브 사이에 유동 정체가 발견되었다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 관련된 냉각수 통로를 재설계하고 최적화 하였다. 또한 배기가스의 온도를 낮추는 냉각수 코어 모델을 설계하기 위하여 배기매니폴드 하부의 냉각수 통로를 보강 설계하였다. 본 연구를 통하여 실린더 헤드와 블록사이의 냉각수 유동을 제어하는 가스킷의 중요성을 확인하였으며, 질량 분포의 개선을 통하여 배기밸브 사이와 실린더헤드에서의 유동 특성을 개선하였다.

Abstract This study has been conducted to improve coolant flow pattern in the gasoline engine. Flow field has been calculated for the coolant passage mainly around the exhaust ports and valves. For the original model, a flow stagnant region has existed between exhaust valves of the second cylinder. To improve coolant flow characteristics, coolant passage area has been re-modeled and optimized. Furthermore, for the improved coolant core model, coolant passage under the exhaust manifold has been added to reduce exhaust-gas temperature. It was found that the flow through a gasket plays a critical role for the flow in the cylinder head and around exhaust valves. Finally, coolant flow around exhaust valves and in the cylinder head has been improved in terms of flow rate distribution.

Key Words : Coolant, CFD, Exhaust-gas temperature reduction, SI engine

1. 서론

냉각수는 엔진의 성능 및 부품의 신뢰성 확보를 위한 중요한 인자로, 엔진의 출력과 운전조건을 고려한 최적의 냉각수 유로 설계는 엔진 성능 증대와 배기가스 저감을 위해 필수적인 엔진 개발의 단계이다[1].

고성능, 고효율 그리고 경량화된 엔진을 설계하는 요즘 추세에 따라 엔진의 최적냉각온도의 제어는 점점 더 어려워지고 있다. 그리고 최근 들어 연비규제와 배기가스 규제가 강화됨에 따라, 연비저감 및 배기가스 저감에 관련된 냉각수 공급기술의 중요성이 증대되고 있다. 이러한 냉각수 기술의 필요성에 따라 가변 냉각, 전자제어 서보

스탯 및 분리냉각 등의 신 냉각기술의 개발이 활발히 진행되고 있다[2-5]. 또한 엔진의 출력증대를 위한 배기가스 온도 저감사양의 냉각수 코어의 개발도 실차에 적용되고 있다.

본 연구에서는 해석적인 기법을 이용하여 불꽃점화 엔진의 블록과 헤드에서의 냉각수 유동 특성을 분석하고 개선하고자 하였다. 최종 사양은 배기포트의 온도를 저감하기 위한 냉각수 돌출부를 포함한 사양으로, 특히 열집중이 발생하는 배기 포트주위의 냉각수 유동을 중심으로 유동 특성을 개선하였다.

*교신저자 : 박성영(sungyoung@kongju.ac.kr)

접수일 09년 08월 25일

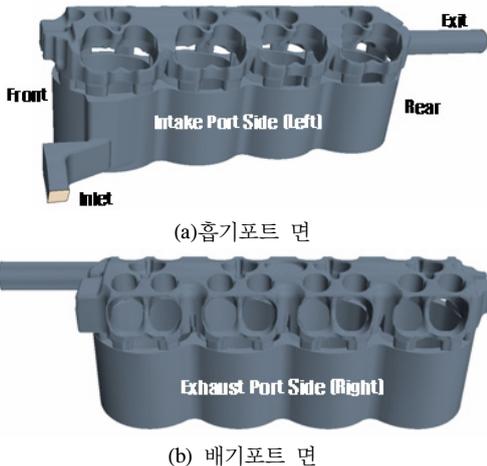
수정일 (1차 09년 11월 16일, 2차 09년 11월 24일)

계재확정일 09년 12월 16일

2. 냉각수 코어 모델 및 해석 방법

2.1 해석 모델

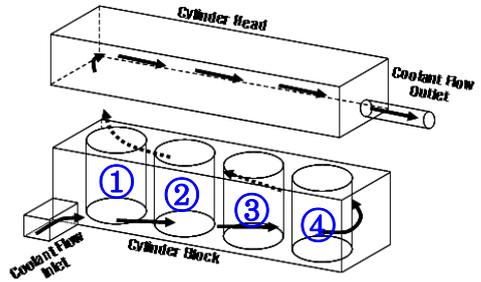
본 연구에서 사용한 엔진 모델은 4밸브 직렬 4기통 볼꽃점화 엔진으로 배기량은 1800cc이다. 그림 1은 엔진의 냉각수 코어 모델을 보여주고 있다. 해석 모델의 구조는 상부의 실린더 헤드의 냉각수 코어와 하부의 실린더 블록 코어부로 나누고, 그 사이에는 실린더 헤드부와 실린더 블록부를 나누어 주는 가스켓 부가 있다. 흡기 포트부가 삽입되는 좌측면 엔진블럭 냉각수 유로 전면 하단에는 냉각수유로의 입구가 있고, 후면 상단에는 출구가 있다. 본 모델에서는 냉각수 펌프를 제외한 코어 부분만을 해석의 대상으로 고려하였다. 실린더 헤드부에는 점화플러그 및 흡배기 밸브 주위 냉각수 유동을 위한 코어를 구성하고 있다.



[그림 1] Base model 냉각수 유동영역

본 연구에서 사용된 엔진의 냉각수 유동패턴은 1번 실린더 블록에 냉각수 입구가 설치되어있고(그림 2), 실린더 블록 좌측을 흘러 4번 실린더 블록에서 U턴을 하여 블록의 우측면을 흐르게 된다. 실린더 블록을 경유한 냉각수는 1번 실린더 블록 전면 상부의 네 개의 유동통로를 통하여 실린더 헤드로 유입된다. 이러한 실린더 블록 좌측과 우측면을 통한 냉각수 유동은 냉각수의 정체를 방지하고 실린더 보어 벽면의 온도를 일정하게 유지하는 것으로 알려져 있다[6]. 실린더 헤드로 유입된 냉각수는, 4번 실린더 헤드 후면으로 배출된다. 또한 실린더 블록과 헤드 사이의 가스켓 장착부에는 평균 직경 4 mm의 타원 홈을 가공하여 블록 사이의 냉각수 정체 및 과열을 방지하고 있다.

이러한 냉각수 유로 형태는 냉각수가 실린더 블록과 헤드를 순차적으로 흐름에 따라 냉각수 회로가 길어지고 유동저항이 증가하여 유속 및 압력 손실이 증가하는 단점이 있다. 반면에, 이러한 유동 방식은 Parallel 유동 방식 대비, 냉각수 총 유량을 줄일 수 있고 실린더헤드에 좀더 많은 냉각수를 공급할 수 있어 실린더 헤드내의 냉각수 유동속도를 증대시킬 수 있는 장점이 있다. 열부하가 집중되는 실린더 헤드 내로의 냉각수 유량 및 속도의 증대는 연소실 벽면의 온도를 저감할 수 있다.



[그림 2] 냉각수 유동 개략도

2.2 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서 유동해석은 상용유동해석 소프트웨어 (STAR-CCM+)를 사용하였으며, 약 300,000 여개의 poly-hederal 격자를 구성하였다. 코어의 벽면에 벽법칙을 적용하기 위하여 벽면에 2개의 격자를 추가로 삽입하여 해석을 수행하였다. 난류 모델은 Standard $k - \epsilon$ 모델을 사용하였으며, 냉각수 펌프를 포함하지 않고 170L/min의 평균 냉각수 체적 유량을 입구 경계 조건으로 부여하였다. 출구 경계조건은 $\partial P / \partial n = 0$ 을 적용하였다. 냉각수는 비압축성의 순수한 물로 고려하였으며, 이에 대한 물성치를 사용하였다. 본 연구에서는 순수 유동에 의한 효과만을 고려하여 유동해석을 수행하였으며, 연소실 벽면의 온도관련 데이터의 부재로 열전달은 고려하지 않았다. 냉각수 유동은 정상상태의 난류 유동을 가정하였으며 본 해석에서 사용된 상용소프트 웨어의 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식 및 난류운동에너지 방정식과 난류운동에너지 소산방정식은 식 (1) ~ (4)와 같이 표현된다.

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

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

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + S_\epsilon \quad (4)$$

3. 해석 결과 및 고찰

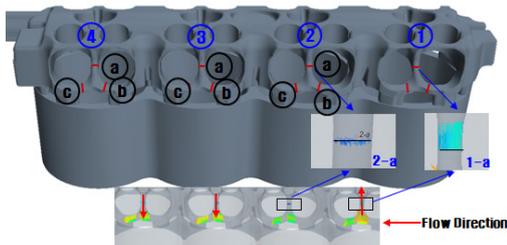
3.1 베이스 모델의 냉각수 유동 특성

일반적으로 연소실에서 화염전파면의 온도가 2000℃ 이상이므로 엔진의 냉각수의 역할은 엔진의 변형 및 내구성에 관련되는 중요한 인자이다. 특히 열이 집중되는 배기포트 주위와 연소실 상면 스파크플러그 주위의 냉각수 유동이 중요하다. 배기밸브사이의 좁은 유로 부분의 냉각수 유량 및 속도 성분은 중요하게 고려되어야 한다.

베이스 모델(그림 3)의 유동특성을 파악하기 위하여 유동해석을 수행한 결과, 베이스 모델의 가장 큰 문제점은 작은 유동 단면적을 가지는 배기포트 사이의 유동이다. 그림 3의 2번 실린더 배기 포트 사이 단면 ①의 유동을 보면 유동이 거의 정체되어있고 유동질량이 0.0023kg/s로 4번 실린더 배기포트 사이 단면 ④의 질량유량 0.0232kg/s 대비 약 10% 수준임을 알 수 있다.

반면에 1번 실린더 ①단면의 유동은 유동방향이 타 실린더 동일부위의 유동방향과 반대의 유동을 보이고 있다. 이러한 유동의 결과는 1번 실린더 전면에서 블록으로부터 상승하는 유동(그림 4)의 일부가 1번 실린더의 배기 포트 하부로 직접 유입되기 때문인 것으로 판단된다.

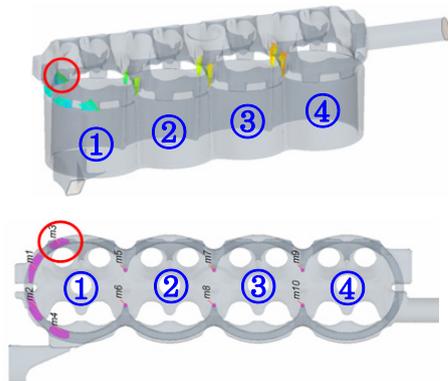
이러한 1번 실린더의 유동패턴은 실린더 헤드의 유동에도 영향을 미치게 되어 그림 5와 같이 1번 실린더에서 2번 실린더로의 유동이 스파크플러그와 흡기밸브 사이로 편향되는 유동이 형성된다. 특히 2번 실린더의 배기 포트 사이는 냉각수가 정체되는 부분으로, 이와 같은 부분들은 상대적인 냉각효율 저하로 열 집중이 발생하는 배기 포트 주위의 엔진 냉각 불균형을 초래할 수 있다.



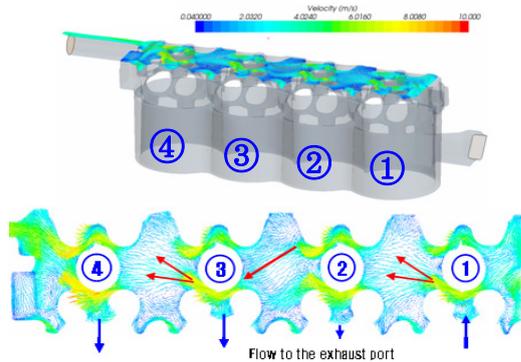
[그림 3] 배기포트사이에서의 냉각수 유동 (Base model)

[표 1] 배기포트사이 유동단면의 냉각수 유량 (Base model)

		Unit(kg/s)		
	Cylinder #	a	b	c
Base model	1	-0.0495	0.1791	0.1289
	2	0.0023	0.1321	0.1327
	3	0.0206	0.1533	0.1728
	4	0.0232	0.1483	0.1697



[그림 4] 가스켓을 통과하는 냉각수유동 (Base model)



[그림 5] Cylinder head에서의 유동 (Base model)

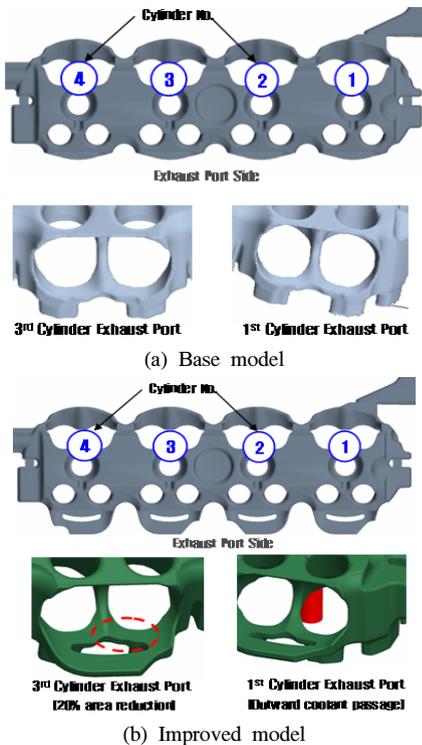
본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 냉각수 유동 방향을 제어하고, 냉각수 유동의 개선을 도모하였다. 냉각수 유동 질량 및 방향의 제어는 모델의 냉각수 통로 유동 단면적을 변수로 하여 수치적 계산을 수행하였다.

3.2 개선된 냉각수 코어의 유동특성

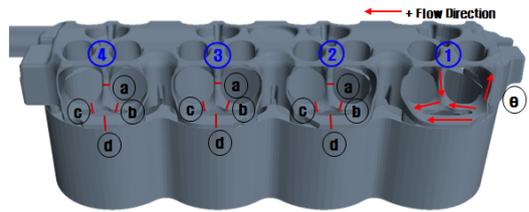
베이스 모델의 두 문제점을 해결하기 위해 새로운 냉

각수 코어를 설계하였다. 개선모델은 냉각수의 균등한 분배 외에도 배기의 온도를 낮추기 위해서 배기 포트 코어 하면에 냉각수 돌출 유로를 구성하여 냉각수에 의한 배기 온도 저감을 시도하였다. 또한 제안된 모델은 균등한 유량의 분배를 위해 다양한 유동 단면적 모델을 설계 및 해석하였다. 제안된 모델은 가장 우수한 냉각수 유동 특성을 보이고 있다. 그림 6의 배기 포트 하면의 돌출부는 돌출된 측면의 형태가 동일하지 않다. 이는 배기 포트 및 돌출부로의 냉각수 분배성을 향상시키고 유동의 정체를 최소화 하기 위하여 유동 단면적에 대한 설계 변경을 하였기 때문이다.

제안된 모델의 해석결과는 그림 7 - 그림 10에서 보여 주고 있다. 표 2를 통해 그림 7의 2번 실린더 ① 단면의 질량유량(0.0281kg/s)이 4번 실린더 ② 단면의 질량유량(0.0244kg/s)과 대등한 것을 확인 할 수 있으며, 1번 실린더 ③ 단면의 유동방향이 개선된 것을 확인하였다. 반면에 1번 실린더 ④ 단면의 유량(0.0407kg/s)이 타 실린더 동일 부위(0.1053kg/s) 대비 40% 정도 감소하였으나, 1번 실린더 ⑤ 단면의 유량이 0.24 kg/s로 충분한 유량 및 유속이 확보되어 1번 실린더 배기포트의 냉각이 가능할 것으로 예상된다.



[그림 6] 배기포트에서의 주요 형상변화

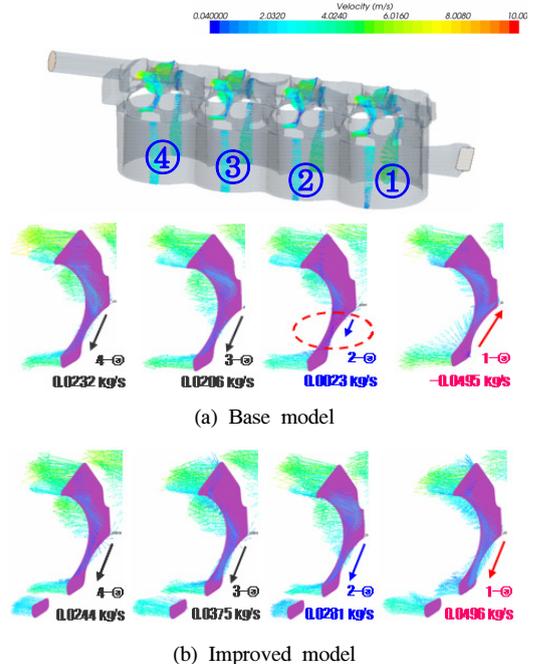


[그림 7] 배기포트 주변을 흐르는 냉각수 유동 (Improved model)

[표 2] 배기포트주변 유동단면의 냉각수 유량 (Improved model)

		Unit(kg/s)			
	Cylinder #	a	b	c	d
Improved model	1	0.0496	0.0407	0.0904	0.1477
	2	0.0281	0.1053	0.1332	0.1120
	3	0.0375	0.1033	0.1416	0.1459
	4	0.0244	0.1180	0.1417	0.1453

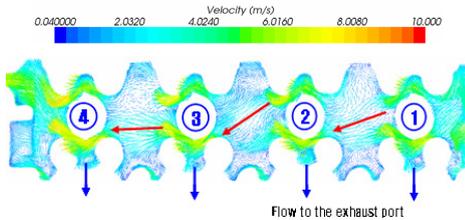
그림 8은 배기밸브사이의 유동 속도 벡터, 유동유량 및 유동 방향을 나타내고 있다. 개선된 포트 코어의 3번 및 4번 실린더부에서 더욱 많은 통과 유량을 가지며, 2번 실린더부의 0.0023kg/s에서 0.0281kg/s로의 유량 증대와 1번 실린더부의 유동방향 개선을 확인할 수 있다.



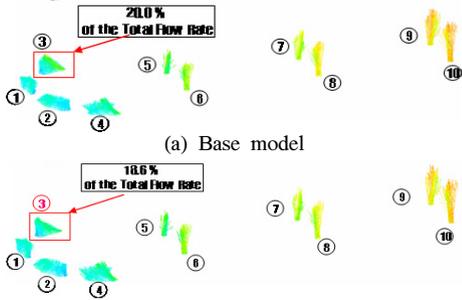
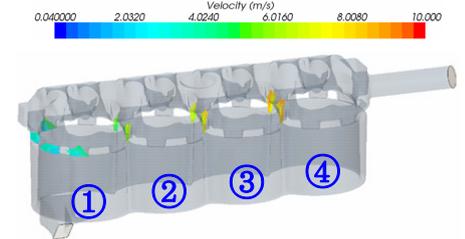
[그림 8] 배기포트사이의 냉각수유량

이상과 같이 배기포트측의 유동 특성이 개선되면서, 실린더 헤드부의 유동(그림 9)도 동반 개선되었다. 그림 5의 흡기 포트와 스파크플러그 방향으로 편향된 실린더 헤드부의 주 유동이 배기포트와 스파크플러그를 향하도록 개선되고, 강화되었다. 이는 1번 실린더 배기포트사이의 유동 방향이 변경되면서 실린더 헤드부의 유동이 개선된 것으로 판단된다.

실린더 블록에서 실린더 헤드로 유입되는 유동은 총 10개의 가스켓 통로를 통하여 유입되며, 그림 10의 ①~④ 흡을 통하여 주 유동이 이루어진다. 특히 ③흡의 유동량 및 방향은 배기 포트 주위와 실린더 헤드부의 유동에 가장 큰 영향을 미치는 주요 설계 인자가 된다. 이는 ③ 흡이 1번 실린더의 배기 포트 하면에 위치하고 있기 때문이다. 개선된 냉각수 코어에서는 그림 10의 ③흡 주위의 냉각수 통로 단면적을 설계 변경하여 ③흡을 통한 유동이 배기포트 외측으로 편향되어 유동하도록 하였다. 그 결과 1번 실린더 배기포트사이의 유동방향이 수정되었다. 표 3은 각 실린더에서 가스켓을 통과하는 유량 분포를 번호별로 나타낸 것으로 그림 10의 (a)와 (b)에 붙여진 번호와 같다.



[그림 9] Cylinder head에서의 유동형상 (Improved model)



[그림 10] 가스켓을 통과하는 냉각수의 유동

[표 3] 가스켓을 통과하는 냉각수의 유량

Flow rate ratio [%]

	Base model		Improved model	
	Rate [%]	Sub Total [%]	Rate [%]	Sub Total [%]
①	22.7%	81.7%	23.3%	82.1%
②	21.3%		21.8%	
③	20.0%		18.6%	
④	17.7%		18.3%	
⑤	2.4%	18.3%	2.3%	17.9%
⑥	2.6%		2.5%	
⑦	2.8%		2.8%	
⑧	3.4%		3.3%	
⑨	3.5%		3.4%	
⑩	3.6%		3.6%	

4. 결론

이상과 같이 냉각수 유로의 유동특성 해석을 통하여 냉각수 코어 모델의 문제점을 파악하고, 신규모델에 그 개선 방안을 적용하여 냉각효율을 개선할 수 있을 것으로 예상되는 냉각수 코어 모델을 제안하였다.

냉각수의 유동해석을 통하여 열 집중이 예상되는 배기 포트 주위의 유동 특성을 개선하였다. 특히, 1번 실린더 배기포트사이의 역류 현상을 개선하고, 2번 실린더 배기 포트 사이의 부족하던 냉각수 유량을 확보하였다. 이러한 유동의 개선은 배기포트의 열 집중 방지에 효과가 있을 것으로 예상된다. 또한 실린더 헤드내의 주 유동도 더불어 개선되었음을 확인하였다.

배기포트 하면의 돌출부는 배기온도 저감에 효과가 있을 것으로 예상되며, 추후 이에 대한 심도 깊은 열전달 실험과 해석을 진행할 예정이다.

참고문헌

- [1] 김성수, “가솔린 기관의 시동조건에 따른 HC의 배출 특성,” Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 3, 2004.
- [2] 위신환, 민영대, 이종태, “냉각수 공급방식 및 국부적인 물통로의 형상 변화에 따른 냉각수 유동특성 및 연소실 벽면의 냉각효과,” Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 1, 2003.
- [3] 이동균, 이교승, 이진호, “Numerical Analysis of 3-D Flow Field in the Engine Block Coolant Passage”, SAE-99370048, 2003.

- [4] 백경욱, 이상호, 조남효, “CFD 기법을 이용한 실린더 헤드 가스켓홀 통과 유량의 최적화,” 한국자동차공학 회논문집, 제8권, 제5호, pp. 121-128, 2000.
 - [5] 오창석, 이재현, 유태용, 신승용, 김우태, “분리냉각시스템을 도입한 신엔진의 연비향상 및 배기저감에 관한 실험적 연구,” 한국자동차공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 118-123, 2002.
 - [6] Shoji Adachi, Kimihide Horio, Yoshikatsu Nakamura, Kazuo Nakano and Akihito Tanke, "Development of Toyota 1ZZ-FE Engine", SAE-981087, 1998.
-

박 성 영(Sung-Young Park)

[정회원]



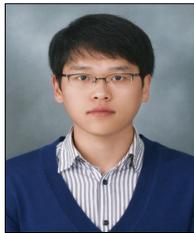
- 2002년 5월 : Texas A&M Univ., 기계공학과 (공학 박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교, 기계자동차공학부, 조교수

<관심분야>

열 및 유체 유동해석, 기관 성능개발

이 상 인(Sang-In Lee)

[정회원]



- 2009년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 졸업
- 2009년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 재학

<관심분야>

열 및 유체 유동, 기관 성능