한국산학기술학회논문지
Vol. 12, No. 3, pp. 1111-1116, 2011

듀얼셀 모델을 이용한 오일쿨러의 방열성능 연구

박상준[1], 이영림[1*]
[1]공주대학교 기계자동차공학부

A Study on the Thermal Performance of an Oil Cooler with Dual-cell Model

Sang Jun Park[1] and Young Lim Lee[1*]
[1]**Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University 330-717, Korea**

요 약 열교환기는 자동차, 공조시스템 및 기타 다양한 산업시설에 이용되고 있어 그 수요가 매우 넓다. 보통 고효율의 루버핀 열교환기는 비오염 환경에 많이 사용되고 파형핀 열교환기는 건설 현장 등 오염이 문제가 되는 곳에 사용된다. 본 논문에서는 공기측과 오일측에 각기 다른 형태의 격자를 사용할 수 있는 듀얼셀 모델을 이용하여 오일쿨러나 연료쿨러에 쓰이는 전형적인 열교환기에 대한 방열 성능을 수치해석하였다. 먼저 풍동 실험을 통한 열교환기 방열성능 실험을 수행하여 1차원 방열성능 데이터를 확보하였다. 다음으로 3차원 수치해석 듀얼셀 열교환기 모델을 이용하여 통과 풍량에 따른 열교환량을 예측하였다. 이러한 모델은 통과 풍속의 불균일도에 따른 열교환량을 예측할 수 있어 방열설계 정확성 향상에 크게 기여할 수 있다.

Abstract Heat exchangers have been used for the automotive, HVAC systems, and other various industrial facilities, so the market is very wide. In general, high-efficiency heat exchangers with louver fins are used in the dust-free environment while heat exchangers with wavy fins are used for dusty environment such as construction site, etc. In this study, numerical analysis has been performed for typical heat exchangers, used as oil coolers or fuel coolers, with dual cell model that can handle different grids for the air-side and oil-side of heat exchangers. First wind tunnel tests were conducted to obtain one-dimensional thermal performance data of heat exchangers. Then, heat release rates with varying air flows were numerically predicted using the three-dimensional dual-cell model. The model can greatly enhance the accuracy of thermal design since it includes the effects of nonuniformity of air flows across heat exchangers.

Key Words : Heat exchanger, Heat release rate, Dual cell method, Oil cooler, CFD

1. 서론

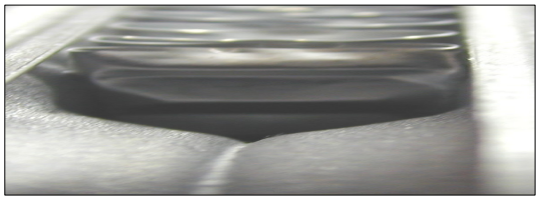
열교환기는 자동차 산업이나 여러 산업시설에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있어 그 수요처가 매우 많다. 핀-관형태의 열교환기는 일체로 브레이징(brazing)하여 제작하기 때문에 접촉열저항이 없어서 고성능의 소형 열교환기 제작에 용이하다. 이 방법을 이용하게 되면 열교환기의 부피도 최소화할 수 있고 방열량도 극대화할 수 있다.

보통 고효율의 루버핀(louver fin) 열교환기가 선호되지만 건설현장의 건설기계 및 중장비의 경우 루버핀을 사용하게 되면 분진으로 핀의 오염으로 인해 방열성능이 현저히 떨어지므로 관리가 용이한 파형핀(wavy fin)이 선호되고 있다. 그림 1은 열교환기에 쓰이는 전형적인 파형핀과 루버핀의 형상을 보여준다.

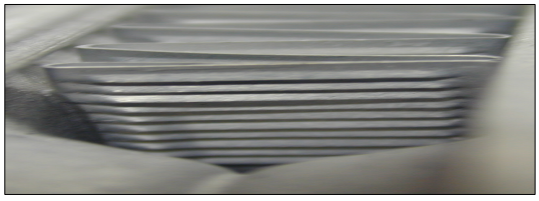
핀-관(fin-tube) 열교환기 분야에 관한 연구는 오래전부터 수행되어 많은 연구가 진행되어 왔다. 먼저 Kays와 London [1] 등은 수많은 형상을 가진 열교환기의 열전달과 압력강하에 대한 실험 데이터를 발표하였다. Archaichia[2] 등은 루버핀 열교환기에 대하여 핀 피치(pitch), 루버 피치, 루버 각도 및 튜브 피치 등을 변화시

*교신저자 : 이영림(ylee@kongju.ac.kr)
접수일 11년 01월 17일 수정일 11년 02월 22일 게재확정일 11년 03월 10일

켜가며 유동 및 열교환기의 특성을 알아보았다.



(a) 파형핀



(b) 루버핀

[그림 1] 전형적인 파형핀과 루버핀 형상

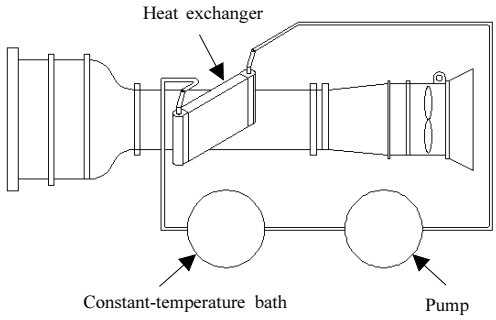
Kajino[3] 등은 염료주입법을 이용하여 Re_{LP}가 103까지는 유동이 층류임을 보였으며 Hucho[4] 등은 불균일도가 50%인 차량인 경우 통과풍량을 약 6% 감소시켜 결과적으로 방열율은 11%까지 감소시킨다는 것을 보여주었다. 한편 Park[5] 등은 수치 해석을 사용하여 루버 핀을 가진 증발기의 열 성능 해석을 성공적으로 수행 하였고, Kim[6] 등은 루버핀형 열교환기의 루버각도 및 핀 피치에 따른 열교환기의 성능 특성을 연구 하였으며 Chang[7] 등은 루버핀 열교환기의 압력강하량과 열전달량을 측정하여 설계에 필요한 f-factor와 j-factor의 상관식을 구하였다. Lee[8] 는 엔진냉각 성능 예측을 위한 라디에이터 모델에 불균일도 효과를 포함시켰으나 공기와 냉각수 격자가 일치해야하는 단점을 갖고 있어 격자 생성에 제약이 따른다.

본 연구에서는 루버핀 및 파형핀의 오일쿨러에 대한 풍동 실험을 통하여 1차원 성능 데이터를 확보하고 이를 이용하는 3차원 듀얼셀 수치모델을 통해 오일쿨러의 방열성능을 예측하였다. 또한 통과 풍속의 불균일도에 따른 열교환기의 방열 성능 변화도 알아보았다.

2. 실험 및 수치해석 방법

2.1 실험방법

그림 2는 파형핀과 루버핀 열교환기의 방열성능을 실험 개략도이다. 물의 입구와 공기입구 온도의 차는 50℃



[그림 2] 풍동실험장치 개략도

이며, 물의 유량은 1～3 lpm으로 1 lpm간격으로, 전면 풍속은 2～7 m/s로 1 m/s의 간격으로 실험을 하였다.

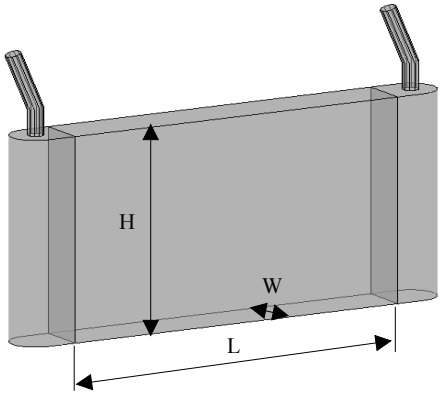
전、후면 1 cm위치에 속도 센서를 부착하여 전면풍속을 일정하게 유지 시켜 주었고, 열교환기 입구와 출구쪽에 온도 센서를 부착하여 입、출구 온도를 기록하였다. 또한 항온조를 부착하여 물의 온도를 일정하게 하였으며 펌프로 물의 유량을 일정하게 하였다.

이러한 열교환기의 방열율 성능실험 데이터를 토대로 덕트 부분을 묘사하지 않고 균일풍속과 불균일 풍속에서의 수치해석 결과를 예측하기 위함이다.

2.2 수치해석

그림 3은 해석에 사용된 열교환기 모델을 나타내었다. 오일쿨러 코어(core)의 크기는 L 220 mm× H 154 mm × W 32 mm이며 22개의 오일튜브가 있다. 핀의 피치(pitch)는 4 mm 폭 32 mm 높이 7 mm이다.

오일의 유량은 2 lpm으로 가정하였고 오일의 입구 온도는 75 ℃로 가정하고 통과하는 공기의 입구 속도는 2～7 m/s로 각각 1 m/s간격으로 해석하였으며 입구온도는 25 ℃로 하였다.



[그림 3] 열교환기 개략도

열교환기 모델은 공기와 오일의 격자를 따로 사용하는 Dual cell model[10]을 사용하였는데 이 모델의 장점은 육면체 셀이 아닌 사면체 셀에서도 사용가능 하다는 것이다. 따라서 공기와 오일 격자는 각각 따로 생성하여 Tgrid[9]를 이용하여 서로 병합하였다. 그림 4는 균일 풍속에 사용된 열교환기를 그림 5는 불균일 풍속에 사용된 격자시스템을 나타냈다.

본 연구에서 열교환기 방열율은 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$Q = \dot{m}_a (h_{a-outlet} - h_{a-inlet}) \quad (1)$$

여기서, $\dot{m}_a$,$h_{a-inlet}$ 및 $h_{a-outlet}$은 오일의 질량유량 및 입구와 출구에서의 엘탈피를 각각 나타낸다.

또한, 불균일도 i는 균일한 통과풍속 분포에 비해 얼마나 불균일하게 풍속이 분포되었는지를 나타내주는 척도로 방열기 면적을 n 개의 면적요소로 분할했을 때 다음과 같이 정의 되어진다[8].

$$i = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n} \frac{\dot{m}_k \frac{A_R}{A_K} - \dot{m}_{tot}}{\dot{m}_{tot}} \quad (2)$$

여기서,

$\dot{m}_K$ = 한 개의 셀(cell)을 통과하는 질량유량

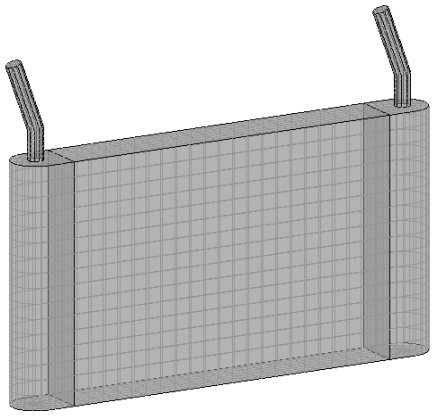
$\dot{m}_{tot}$ =전체 질량유량

A_k =한 개의 셀 크기

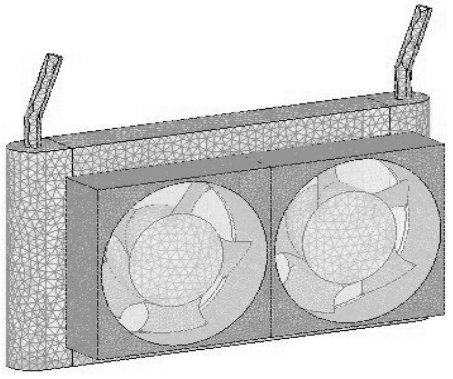
A_R = 방열기 코어(core)의 면적

따라서 균일 풍속일 경우 i=0이 되며 불균일하게 될수록 i값은 증가하게 된다.

열교환기의 코어(core)부분은 다공성 매질(porous media)로 단순화 시켜 덕트를 묘사하지 않았다. 그림 5는 불균일한 통과풍속 분포를 위해 열교환기 후방 1cm에 직경 11 cm인 팬 2개를 이용하여 각각 각속도 700 rad/s로 회전시켜 주었다. 균일 풍속과 불균일 풍속에 사용된 격자수는 각각 2만 개와 70만개를 사용하였고 3차원 형상설계에는 Catia[9], 격자생성에는 Gambit[10], 3차원 CFD 해석에는 상용프로그램인 Fluent[11]를 사용하였다.



[그림 4] 균일 풍속 격자 시스템



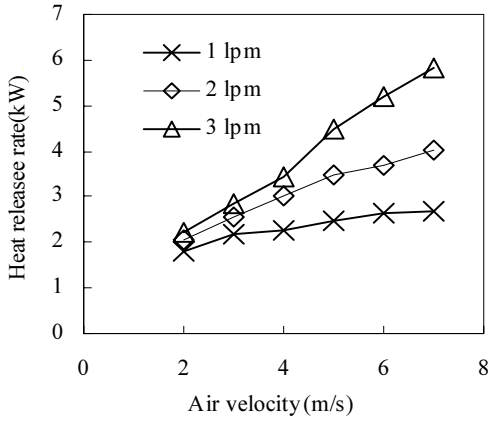
[그림 5] 불균일 풍속 격자 시스템

3. 결과 및 토론

3.1 오일쿨러 방열성능 풍동실험

풍동실험을 통하여 전면 풍속 및 오일유량에 따른 오일쿨러의 열교환량을 측정하였는데 그림 6에 이러한 방열율 변화를 나타냈다. 방열율은 전면풍속이 증가함에 따라 대체로 선형적으로 증가하나 고속에서는 기울기가 다소 감소하는 경향을 보여준다. 또한, 오일 유량이 증가하면 방열율의 증가속도는 더욱 가파르게 상승한다. 오일유량이 1 lpm인 경우 전면 풍속 7 m/s일 때의 방열량은 2 m/s 일 때와 비교하여 약 22 %의 상승을 보인 반면 오일유량 3 lpm인 경우 약 163 % 상승하였음을 알 수 있다.

1 lpm에서는 기울기가 완만한 반면 3 lpm일 때는 1 lpm보다 곡선의 기울기가 급증 하였다. 이것은 오일 쿨러의 방열성능이 전면 풍속 영향을 미치며 3 lpm에서 공기의 속도가 7 m/s일 경우 2 m/s일 때보다 약 62 %정도 방열 성능이 우수 하였다.



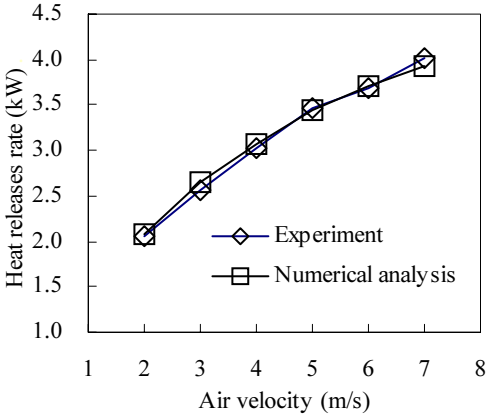
[그림 6] 전면풍속 및 오일유량에 따른 방열율 변화

3.2 균일 전면풍속 방열성능 수치해석

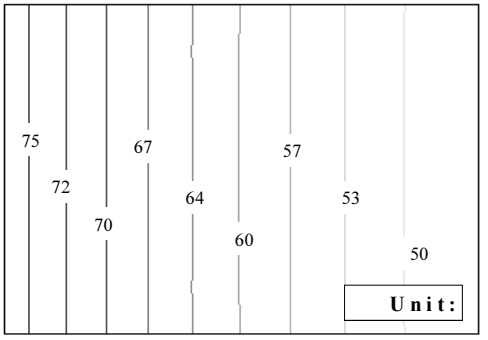
듀얼셀을 이용한 방열 성능 수치해석 모델이 정확히 작동되는지를 알아보기 위하여 풍동실험에서와 같이 전면 풍속이 일정한 경우를 고려하여 수치해석과 실험 결과를 비교하여 보았다.

그림 7은 오일유량 2 lpm일 때 전면풍속에 방열량 변화를 보여준다. 실험 결과와 비교하기 위하여 전면풍속을 1 m/s 간격으로 2 m/s에서 7 m/s까지 고려하였다. 수치해석으로 예측된 방열율은 실험결과 대비 최대오차가 2.7 %를 보여주고 있어 듀얼셀 모델이 정확함을 알 수 있다.

그림 8은 풍속 분포가 균일할 때의 오일온도 분포를 보여준다. 오일온도는 통과풍속이 오일쿨러 코어의 모든 곳에서 균일하므로 열교환량 또한 어디서나 동일하게 된다. 따라서 오일이 열교환기를 통과함에 따라 오일온도는 선형적 감소를 겪게 된다.



[그림 7] 실험과 수치해석의 비교

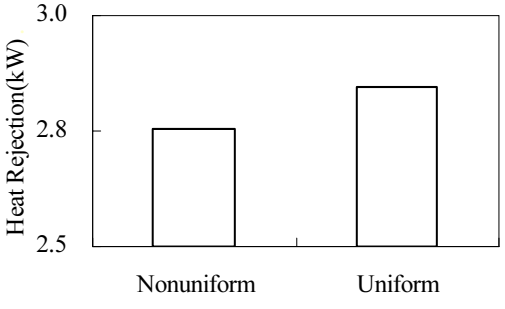


[그림 8] 균일 풍속분포인 경우 오일온도 분포

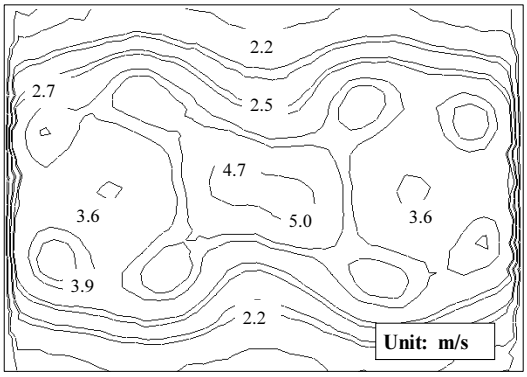
3.3 불균일 전면풍속 방열성능 수치해석

그림 9는 불균일 풍속과 균일 풍속의 방열량을 나타냈다. 팬을 회전시켜 불균일 풍속에서 방열량을 예측하여 보았는데 방열량은 2.75 kW로 예측되었다. 전면 풍량으로 풍속을 예측하여 보았는데 700 rad/s에서 평균 풍속은 약 3.57 m/s였다. 균일 풍속에서 방열량을 예측하여 보았는데 방열량은 약 2.84 kW로 약 3.28 % 증가 하였다. 그림 10은 두 개의 팬을 사용하여 오일 쿨러를 냉각시킬 때 코어를 통과하는 풍속의 분포도를 나타냈다. 팬 날개의 회전으로 통과 풍속이 매우 불균일함을 알 수 있다. 이 때의 불균일도는 약 1.98 정도임을 알 수 있다.

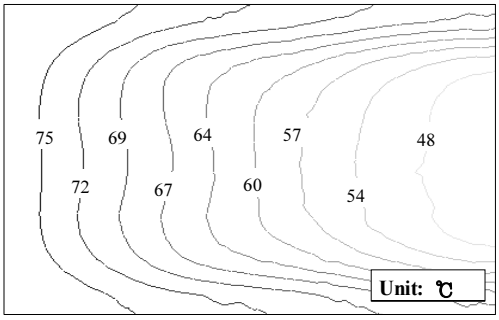
그림 11은 통과 풍속 분포가 불균일할 때의 오일온도 분포를 보여준다. 이 경우 오일은 입구에서 출구 쪽으로 흘러가면서 균일한 냉각 성능을 나타내지 않는다. 이는 팬 영역은 열교환이 높으나 오일 쿨러의 상부와 하부로 갈수록 공기와의 열교환량이 저하되기 때문이다.



[그림 9] 전면풍속 분포에 따른 방열량



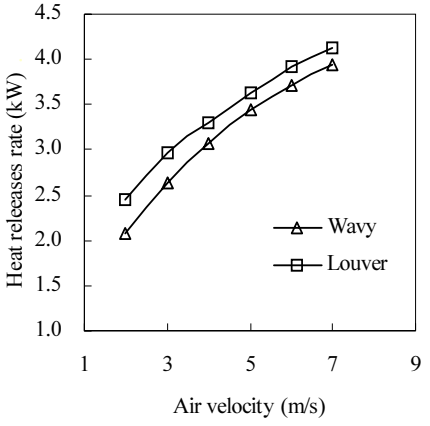
[그림 10] 불균일 전면풍속의 속도 분포



[그림 11] 불균일 풍속인 경우 오일온도 분포

3.4. 핀 형상에 따른 방열성능 수치해석

그림 12에 루버핀과 파형핀의 방열량을 나타내었다. 전면풍속이 2~7 m/s일 경우 전체 방열율은 파형핀은 18.8 kW, 루버핀은 20.3 kW로 약 7.4 %정도 루버핀의 방열성능이 우수하였다. 이것은 일반적으로 루버핀의 방열성능이 상대적으로 우수하다는 사실과 일치한다.



[그림 12] 전면 풍속에 따른 방열량

한편, 팬을 사용하여 불균일 통과풍속을 발생시킨 경우에도 루버핀의 방열성능이 파형핀 대비 우수함을 나타내고 있어 균일 풍속분포인 경우와 유사한 경향을 보여준다. 루버핀 오일쿨러의 경우 오일 출구온도는 균일통과풍속일 경우 48 ℃, 불균일일 경우 45 ℃의 온도를 나타냈다.

4.결 론

본 연구는 루버핀과 파형핀 오일쿨러에 대해 방열실험 데이터를 이용하여 듀얼셀 방법을 이용한 3차원 수치해석을 수행하였으며 불균일 풍속과 균일 풍속인 경우 방열율을 예측하여 보았다. 또한, 핀 형상에 따른 방열성능을 수치해석으로 예측하여 보았으며 이러한 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 공기의 속도가 7 m/s 이고 물의 유량이 1, 3 lpm일 경우 3 lpm에서 약 53.7 % 방열성능이 우수하였다. 또한, 공기의 유속이 빠를수록 방열성능이 우수하여 설계시 고려해야 한다.
2) 비정렬격자 사용이 가능한 듀얼셀 방법을 이용하여 균일 풍속인 경우 오일쿨러를 방열 해석한 결과 실험대비 오차가 약 0.27 %로 수치해석 모델의 정확함을 알 수 있다.
3) 동일 유량에서 불균일 풍속과 균일풍속에서 방열성능에서 균일풍속일 경우 방열성능이 약 3.3 % 우수하여 방열 시스템 설계 정확도 향상을 위해 불균일도를 고려해야 한다.
4) 루버핀 오일쿨러가 파형핀 오일 쿨러에 비해 방열성능이 약 7.4 %정도 우수하여 이것은 상대적으로 루버핀의 방열성능이 우수하다는 사실과 일치하였다. 팬을 사용하여 통과풍속이 불균일할 경우도 동일하게 루버핀의 방열성능이 우수하였다.

참고문헌

[1] W.M. Kays and A. L. London, Compact Heat Exchanger, 3rd Edn, McGraw-Hill, New York, 1964.
[2] A.Achaichia, T. A. Cowell, "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Flat Tube and Louvred Plate Fin Surfaces," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.1, pp.147-157, 188
[3] M. Kajino and M. Hiramatsu, "Research and Development of Automotive Heat Exchangers," Heat

Transfer in High Technology and Power Engineering, Hemisphere, pp.402-432, 1987.
[4] W. H. Hucho, "Aerodynamics of Road Vehicles", 4th ed., p.560, Society of Automotive Engineers, Inc., 1998.
[5] B.-S. Park, J.-H Cho and C.-S Han, "Three Dimensional Analysis for the Performance of the Corrugated Louver Fin for a Vehicle Heat Exchanger," Journal of SAREK, Vol.14, No.2, pp.116-126, 2002
[6] M. H. Kim and W. Y. Park, "Air-side Heat Transfer and pressure Drop Characteristics of Louvered Fin Heat Exchangers", KSME International Jounal, pp. 123-128, 1988
[7] H. J Chang, B. H. Kang, S. Kim and B. K. Park, " An Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop of Air Side in a Plate- Louvered Fin Heat Exchanger", Jornal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol 14, pp. 485-492, 2002
[8] Young Lim Lee, " An Analysis of Engine Cooling using a Three-dimensional Radiator Model" Jounal of KSAE, Vol.4, pp.10-17, 2003
[9] Catia, V5R17, Dassault Systems, 2006.
[10] Gambit, Fluent, Unc, Lebanon. NH 2005.
[11] Ansys Fluent version 12.1 Ansys Inc,. NH 2009.

이 영 림(Young Lim Lee) **[정회원]**

- 1995년 5월 : U of Texas at Austin 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 2000년 2월 : 삼성자동차·삼성전자 책임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>
열유체공학, 에너지공학, 자동차공학

박 상 준(Sang Jun Park) **[준회원]**

- 2010년 2월 : 공주대학교 기계설계공학전공 (공학학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 석사과정

<관심분야>
열유체공학, 에너지공학