

효과적인 패널 냉각을 위한 대향류형 냉각장치의 개발

이중순^{1*}

¹동명대학교 자동차공학과

A Development of Counter Flow Type of Cooling System for Effective Panel Cooling

Joong-Soon Lee^{1*}

¹Dept. of Automobile Engineering, TongMyong University

요약 산업용 컴퓨터를 포함한 다양한 형태의 동작기계나 자동화 시스템의 배전반이나 제어 패널을 고효율적으로 냉각시킬 수 있는 시스템은 매우 중요한 요소이다. 따라서 이러한 냉각장치는 산업용 로봇, 수치제어 동작기계 등과 같은 다양한 산업용 시스템에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 패널 내부를 순환하는 공기를 강제적으로 유동시키는 냉각방식을 채택하여 효과적인 패널 냉각을 위한 대향류형 냉각장치를 개발하였다. 본 연구를 통하여 효과적인 냉각장치를 위한 핀 어셈블리를 개발하여 제어용 패널에 적용한 결과, 기존의 시스템에 비하여 냉각 성능과 열교환율이 개선된 결과를 확인할 수 있었다. 연구에 적용된 상용의 시스템에 비해 공기의 유동량은 약 20% 정도 증가하는 현상을 보였고, 열교환량은 약 2배 이상 증가하는 현상을 확인할 수 있었다.

Abstract The high efficient and cooling system is very important to the control panels of electrical distributors, and Industrial automated system including computer. Also, it can be used widely in various industrial systems such as industrial robots, numerically controlled machining center, and so on. The cooling method which flowing gasses were forced to circulate by compulsion was adapted in this study. then development of counter flow type of cooling system for effective panel cooling. In the present study, fin assembly was developed for this cooling system. As results, the developed system has the improvements of cooling performances and radiant heat ratio. Its increasing of airflow mass is about 20%, and radiation rate of heating is twice or more as high as the conventional system.

Key Words : Fin, Counter Flow, Corrugated, Hear Exchanger, Wind Tunnel, Differential Pressure

1. 서론

산업현장에서는 유연성이 높은 생산 시스템의 구축을 위하여 생산설비의 고정도, 고성능화, 대형화, 자동화 추세가 주류를 이루고 있는 실정이다. 이에 따라 각종의 설비를 제어하기 위한 제어용 패널의 제작과 관련한 기술이 다양하게 개발되고 있을 뿐 아니라 종래의 기계기술 분야에 적용하지 않았던 각종의 전기 전자 소자들이 널리 이용되고 있다. 제어용 패널의 제작 및 개발과정에 이용되고 있는 제어용 변압기, 배선용 차단기, 전자 접촉기, 열동형 과부하 계전기, 전자 계전기, 인버터 등과 같은 각

종의 전기전자 부품들은 동작시에 매우 높은 발열량을 갖고 있기 때문에 제어용 패널의 내부 온도를 고온의 분위기 조건으로 형성하여 각종 설비의 오동작을 야기함은 물론 제어용 패널의 내구성을 저하시키는 요인이 된다. 제어용 패널 내부에 설치된 부품들의 발열은 현장 내부의 고온, 다습, 분진 등과 같은 열악한 환경 조건과 병행하여 안전사고의 유발은 물론 장비의 성능 저하와 유지 및 보수면에서 많은 문제점을 유발하고 있기 때문에 제어용 패널 내부의 온도를 최적의 조건으로 유지시킬 수 있는 기술의 확보는 반드시 필요하며, 이러한 기술의 개발을 위하여 국내·외적으로 실용적인 연구가 활발히 이

*교신저자 : 이중순(jslee@tu.ac.kr)

접수일 09년 11월 18일

수정일 (1차 10년 02월 11일, 2차 10년 03월 03일)

게재확정일 10년 03월 18일

루어지고 있다.

본 연구는 열전도도가 우수한 재질을 최적의 조건으로 설계하여 핀 피치와 열교환 면적을 결정한 후, 박판 절곡 엠보싱 성형 가공한 열교환 핀을 가공하고 열관류율과 냉각능력이 향상된 핀 어셈블리를 개발하여 피장착 장비에 대한 신뢰도를 향상시키고자 하는 것이다.

2. 이론적 고찰

열교환기는 하나의 유체로 또 다른 유체를 냉각시키거나 가열시키기 위한 목적으로 사용되는 것을 말하며 다양한 종류가 있다. 본 연구에서는 냉각 대상이 동작기기류 등에 사용되고 있는 제어용 패널을 효율적으로 냉각시키기 위한 목적에 국한되기 때문에 관의 외면에 확대전열면을 효과적으로 부착한 콜게이트(Corrugated) 핀튜브 열교환기를 사용하였다.

콜게이트 핀튜브 열교환기는 확대전열면적인 핀의 면적과 기하학적 형상에 따라 열교환기 성능이 결정되는데, 관의 외표면적 A_p , 핀의 면적 A_f , 관내 전열면적 A_{pi} , 핀측의 총합 전열면적 A_o 는 각각 다음의 식으로 계산할 수 있다[1,2].

$$A_p = 2 \cdot N_p \cdot L_1 \cdot (L_p + L_2) \quad [mm^2]$$

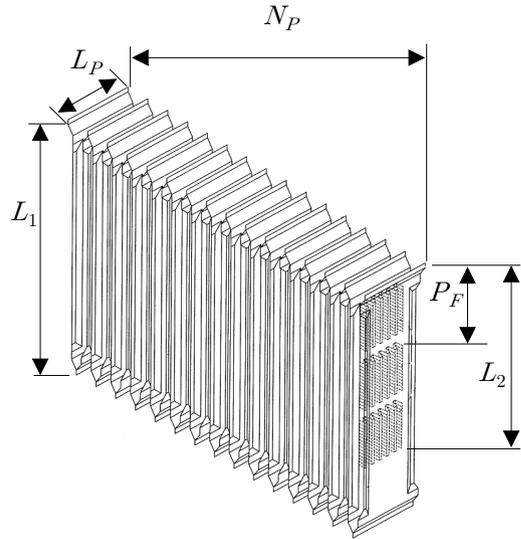
$$A_f = 2 \cdot N_p \cdot (L_1/P_f) \cdot L_{FR} \cdot L_2 \quad [mm^2]$$

$$A_{pi} = 2 \cdot N_p \cdot L_1 \cdot (L_p - 2 \cdot t_p) + (L_2 - 2 \cdot t_p) \quad [mm^2]$$

$$A_o = A_p + A_f \quad [mm^2]$$

여기서, N_p 는 관의 단수, L_p 는 관의 폭, L_1 은 열교환기의 높이, L_2 는 열교환기를 통과하는 공기 흐름 방향의 핀 길이, P_f 는 핀의 적층 피치, L_{FR} 은 핀의 길이, t_p 는 관의 두께이다.

핀의 효율은 전체 온도차에 대한 냉각의 정도를 의미하는 것으로 열교환기의 설계에 있어 매우 중요한 요소이다. 즉, 핀 효율이란 핀의 전체 표면이 근원 온도와 같을 때의 열교환량에 대한 핀의 실제 열교환량의 비로서 정의될 수 있다.



[그림 1] 대향류형 방열기의 형상과 각 부의 치수표시

여기서는 패널 내부의 열교환량 Q_i 와 방열율 K 를 구하여 최적의 핀 설계를 수행하였다. 방열율 K 는 패널 내부 공기의 열교환량을 흡입구의 공기온도와 출구온도의 차이로 나누어 준 정량적인 데이터로 열교환기의 성능을 객관적으로 평가할 수 있다.

$$Q_i = 0.24 \cdot \Delta T_i \cdot G_i / (v \cdot 0.86) \quad [W]$$

$$K = Q_i / (\Delta T_{io}) \quad [W/K]$$

여기에서, ΔT_i 는 패널 내부의 입·출구 온도차, G_i 는 풍량, v 는 비체적, ΔT_{io} 는 패널 외부의 입구온도와 패널 내부의 입구온도 차이를 말한다. 또한, 공기 유동의 개선을 위해서는 핀의 설계 치수에 따른 내부공기의 유·출입과 외부공기의 유·출입을 위한 풍량과 풍속이 매우 중요한 인자이다. 따라서 냉각 효율의 향상을 위해서는 유체의 관로에 대한 디자인의 개선이 절대적이며, 유체 유동 저항의 최소화과 냉각 효율의 향상을 위한 수단으로 온도와 습도의 제어가 가능한 풍동을 이용하여 실험을 수행하고, 공기의 풍량 G_a 는 다음 식으로 구하였다. 여기에서, ΔP 는 양단의 차압을 말한다[5].

$$G_a = K\sqrt{(v \cdot \Delta P)} \quad [m^3/h]$$

3. 실험방법

열교환 시스템 설계시에는 단순하게 열교환기 자체의 고효율화만을 전제로 하여서는 곤란하기 때문에 열교환기로서의 사용 목적과 열교환 조건은 물론, 경제성 부분과 설치 공간 문제 등과 같은 해당 조건에 적합한 설계를 통하여 요구 조건을 충분히 만족시킬 수 있어야 한다.

컴팩트 열교환기의 사용 범위는 전열 면적의 확대를 위하여 핀을 사용하는 경우가 많은데, 핀의 고밀도화는 전열면적의 확대는 가능하나 유체 유동에 대한 저항으로 작용할 수 있기 때문에 트레이드오프의 관계에 있어 최적의 조건 도출을 위한 시행착오를 겪어야 한다.

층류경계층과 파이프 또는 핀 주변을 흐르는 층류흐름의 중요한 특징은 어떤 조건하에서 조그마한 유동에 의해서 흐름이 비정상류가 되고 근본적으로 다른 종류의 흐름으로 천이가 발생하는 것이다. 따라서 층류흐름의 특성을 결정짓는 점성력은 흐름이 외부로부터 어떤 영향을 받았을 때, 층류흐름을 유지하려는 효과를 가지고 있지만, 국부 천이 속도 변화와 연관된 관성력은 반대적인 효과를 가진다는 점에 대해서도 유의할 필요가 있다.

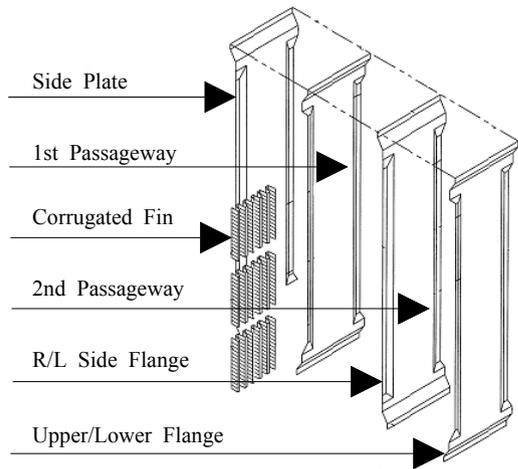
관성력은 흐름을 흔들리게 하거나 국부적인 영향을 증대시키는 경향이 있기 때문에 레이놀드수는 점성력에 대한 관성력의 비율이라고 말할 수 있으며, 안정적인 층류 유동은 낮은 레이놀드수의 값과 관계되어 있다. 압력성분이 없는 매끄러운 표면을 가진 평판상의 단순한 층류경계층에서 일정 레이놀드수범위에 도달하면 난류형 경계층으로 천이가 발생하는 경향이 있다는 것도 주의의 사실이다[3].

그러나 이러한 임계 레이놀드수의 범위는 핀 표면의 거칠기의 정도는 물론, 유체 흐름이 저속인 경우에는 자유흐름속도와 연관이 있다. 만약 자유흐름의 압력변동도 없고, 표면이 매끄럽다면 층류경계층은 상당히 높은 차수의 레이놀드수를 유지한다. 예를 들면, 유체의 유동 공간 내에서 완전히 발달된 층류는 레이놀드수가 약 2300보다 작게 되면 큰 혼란에도 안정적이기 때문이다.[4]

이상의 고찰에 근거하여 열교환기용 핀을 설계하였다. 핀의 재료는 판 두께 0.5mm인 알루미늄 43계열을 사용하였고, 양단은 유선형으로 설계하여 열관류율의 극대화와 유체의 유입 및 토출에 따른 유체 유동 저항의 최소화를 도모하였다.

핀의 양단 클레딩 폭 8~12%, 스트립 폭 295mm, 피치는 88mm로 각각 결정하여 설계하였다.

핀 가공을 위한 금형의 설계는 60톤 프레스 머신을 사용하여 가공할 수 있는 스펙으로 결정하였고, 프로그래시브 다이의 양단 클리어런스는 각각 0.03mm로 결정하였다.



[그림 2] 콜게이트 핀 튜브 열교환기의 구조와 각 부 명칭

가공이 끝난 스트립은 고정구를 이용하여 조립하고 산처리와 브레이징 처리를 한 후, 핀 표면에 크로메이터 처리를 하여 필드의 분진 등과 같은 이물질로부터 핀 표면이 오염되는 것을 최소화할 수 있도록 하였다.

그림 2는 개발 단계에서 설계한 핀 어셈블리를 포함한 방열체의 개략도를 나타낸 것이다. 외부공기가 통과하는 제1통로와 내부공기가 흐르는 제2통로를 형성하는 방열판의 제1통로와 제2통로에 콜게이트 핀을 개재시키고, 서로 엇갈리면서 마주보도록 연속적으로 접합시켜 구성하였다.

냉각 효율의 향상을 위해서는 공기 유동의 개선이 복합적으로 이루어져야 하기 때문에 다양한 형상의 핀 어셈블리 설계를 통하여 최적의 조건을 도출하여야 한다. 즉, 패널 내부로 유입되는 외부 공기의 흡·배기와 패널 내부로부터 유출되는 내부 공기의 흡·배기효율을 증대시키기 위해서는 디자인의 개선이 필요하며, 이를 통해 적정량의 풍량과 풍속을 확보할 수 있는 조건을 도출할 필요가 있다.

[표 1] 실험에 사용된 모델의 사양

Parameters Model	Strip Pitch (mm)	Fin Pitch (mm)	Fin Length (mm)	Section Shape	Flow Direction
M 1	7.2	2.5	174	Square	Pull
M 2	9.0	2.0	68	Streamline	Pull
M 3	9.0	2.0	136	Streamline	Push
M 4	9.0	2.0	136	Streamline	Pull
M 5	12.8	4.0	104	Square	Pull

이를 위하여 표 1과 같은 조건을 가진 5종류의 모델을 결정하였다. 여기에서 M1은 상용의 제품이며, 이를 기본

으로 피치와 길이 및 형상 등을 다양하게 설정한 후, 기초 실험을 수행한 결과 대표적인 모델을 제시하였다[5].

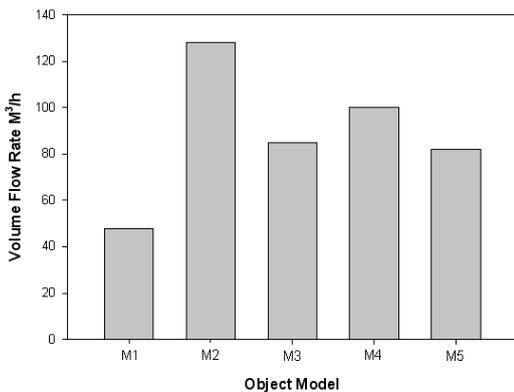
4. 실험결과 및 고찰

핀의 설계 최적화를 위해서는 고온·고습 챔버와 풍동(Wind tunnel) 실험을 통한 풍량의 측정과 마노미터와 차압변환기 등을 이용한 공기의 차압 측정이 필요하다. 그림 3은 내측 풍량 계측 실험에 사용된 풍동장치를 나타낸다.



[그림 3] 풍동장치를 이용한 실험 전경

열교환량과 방열을 확인을 위해서는 내측 풍량 실험이 필요하다. 각각의 핀 어셈블리 모델에 대한 내측 풍량 실험 결과를 그림 4에 나타낸다.



[그림 4] 핀 어셈블리 모델에 따른 내측 풍량 실험 결과

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 M1의 경우가 가장 적은 풍량을 나타내고 있는데, 이는 핀의 전열 면적을 증가시키기 위한 목적으로 핀의 길이를 과도하게 길게 설계한 반면, 스트립 피치를 작게 설계한 결과에 의해 유동

저항이 증가한 원인에 기인하는 것으로 판단된다.

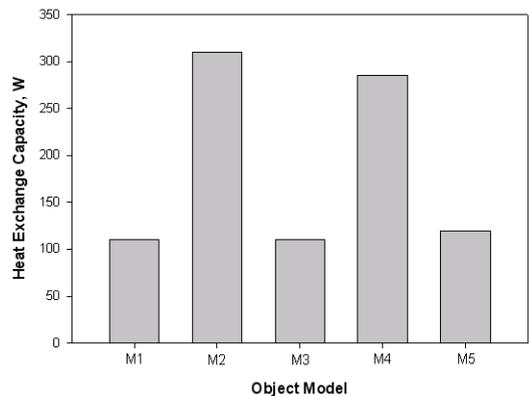
또한, M3과 M4를 비교해 볼 때, 유동 방향을 제외한 나머지 조건이 동일한 조건임에도 불구하고 유동 방향에 따라서 20% 이상의 풍량 차이가 나는 것을 알 수 있으며 이는 매우 중요한 의미를 가진다. 실험 결과와 계산식에 의한 풍량값의 차이는 오차 범위 내에서 동일한 경향을 나타내었다.

풍량의 크기에 영향을 미치는 차압을 확인하기 위하여 실험을 수행한 환경을 표 2에 나타낸다. 비체적의 값이 다소 변동이 있음을 알 수 있는데, 이는 온도와 습도 등과 같은 실험 환경적 요인에 기인한 것이며, 오리피스 계수를 변수로 적용하였다.

[표 2] 각 모델에 적용한 실험 조건

	Temperature (°C)	Humidity (%RH)	Specific Volume (m³/kg)	Orifice Factor
Model 1	28	48	0.87	0.19
Model 2	22	31	0.843	0.69
Model 3	22	39	0.85	0.28
Model 4	21	42	0.84	0.28
Model 5	13	28	0.814	0.28

그림 5는 풍동 실험을 통하여 측정된 풍량을 근거로 열교환량을 구한 결과를 제시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 M2와 M4는 조건이 다른 M1, M3, M5에 비하여 열교환량이 2~3배 정도 높게 나타나는 현상을 볼 수 있는데, 이는 풍량의 절대값이 큼에 따른 우수한 유동성과 패널 내측의 입·출구 영역의 온도 차이에 기인하여 나타나는 현상인 것으로 볼 수 있다.

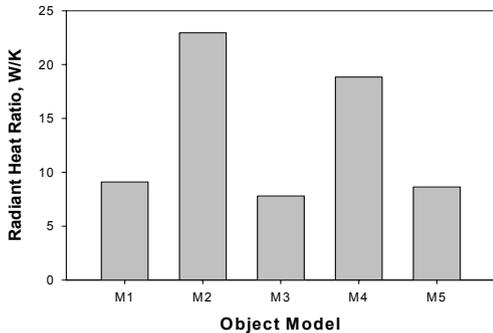


[그림 5] 핀 어셈블리 모델에 따른 열교환량

그림 6은 핀 어셈블리의 성능 평가를 위하여 수행한

방열을 결과를 나타낸 것이다.

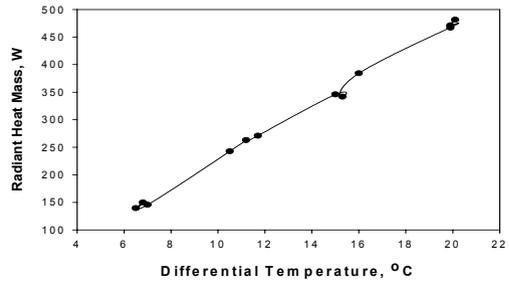
방열율이란 패널 내부에서 발생한 내부 공기의 열교환량을 흡입구의 공기온도와 출구 온도의 차이로 나누어 준 값을 의미하는 것이다. 따라서 방열율이란 전열 특성을 가진 열교환기의 성능을 객관적으로 표시할 수 있는 지표로 정량적인 데이터이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 각각의 모델은 8~23W/K 범위의 값을 보이고 있다. M2의 경우가 가장 높은 값을 나타내며, M4는 M3의 결과보다 2배 정도의 높은 값을 보이고 있다. M3과 M4 조건의 경우는 핀의 치수를 포함한 모든 조건이 동일한 반면, 유동 방향만이 반대인 경우이다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 핀 어셈블리의 설계시에는 핀의 치수 및 형상의 최적 설계와 함께 유동 방향 등과 같은 유체의 흐름에 영향을 미칠 수 있는 주변의 모든 인자까지도 반드시 설계 과정에 고려하여야 할 것으로 보인다.



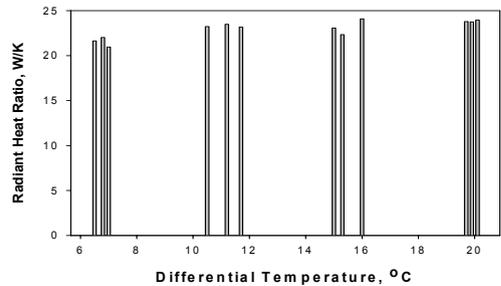
[그림 6] 핀 어셈블리 모델에 따른 방열율

그림 7과 그림 8은 각각의 모델에 대한 실험을 수행한 결과, 본 연구의 범위 내에서 가장 우수한 냉각 성능을 나타내는 것으로 판단되는 M2를 선정하여, 단위 온도차에 따른 열교환량과 방열율의 변화 추세를 확인하기 위하여 나타낸 그림이다. 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 ΔT 의 절대값 증가와 함께 열교환량도 직선적으로 증가하고 있는 현상을 볼 수 있는데, 지속적인 연구를 통하여 다양한 조건에 대한 실험을 수행한다면 결과식을 도출하여 일반화시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이와 같은 ΔT 의 절대값 증가와 함께 열교환량은 증가하지만, 방열율은 그림 8에서 보는 바와 같이 21~23W/K 정도의 일정한 값을 유지하고 있다. 이는 실험 영역 내에서 ΔT 의 절대값의 변화와는 무관하게 일정한 수준의 냉각 능력을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 즉, 패널 내부의 발열에 따른 온도 상승을 실시간적으로 낮추기 위한 수단 하나로 냉각 팬에 의하여 외부부의 공기를 제어 패널 내부로 유입시켜 쿨게이트 핀에 의하여 열적인 평형이 가능해짐

을 확인하였다.

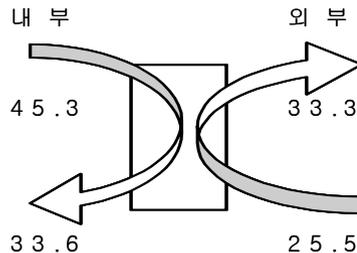


[그림 7] 모델 2를 적용한 경우의 단위 온도차와 열교환량의 관계



[그림 8] 모델 2를 적용한 경우의 단위 온도차와 방열율의 관계

그림 9는 M2 조건에서 확인한 내부와 외부 공기의 순환에 따른 실제의 열교환 현상을 나타낸 것이다. 그림은 패널 내부의 발열에 따라 내부 공기의 온도가 45.3°C로 증가한 경우에 25.5°C의 외부 공기를 제어 패널 내부로 유입시킨 경우를 나타낸 것으로, 대향류형 핀에 의해 패널 내부로부터 유출되는 공기 온도와 외부의 공기 온도가 각각 33.6°C와 33.3°C를 나타내는 것으로 보아 최적의 열평형이 이루어짐을 알 수 있다[5].



[그림 9] 모델 2를 적용한 경우의 열교환량 결과

5. 결론

패널내부의 허용온도 초과로 인하여 발생하는 각종 트러블을 방지할 수 있는 저가의 냉각장치 개발을 목적으로 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 동일한 조건에서 유동의 방향에 따라 20% 이상의 풍량 차이가 나는 것을 알 수 있고 방열율의 증대와 유동 저항의 최소화를 위한 적정 핀 피치와 길이가 존재함을 확인할 수 있다.
- (2) 열교환량의 증대를 위해서는 적정의 전열 면적 설계와 함께 핀 형상을 고려하여 열전달율을 촉진할 필요가 있다.
- (3) ΔT 의 절대값 증가와 함께 열교환량이 직선적으로 증가하고 있는 현상을 볼 수 있는데, 지속적인 연구를 통하여 다양한 조건에 대한 실험을 수행한다면 결과식을 도출하여 일반화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] R. L. Webb, "Heat Transfer Engineering", Vol. 1, No. 3, pp33. 1980.
- [2] 박기원 외 2인, "컴팩트 열교환기", 태훈출판사, pp. 21~74, 2003.
- [3] J. P. Holman, "Heat Transfer", pp.539~596, 1995.
- [4] 박이동, "최신 유체역학", 보성각, pp.229~256, 2003.
- [5] 박이환, 이중순 외, "산업기계 제어 패널용 고효율 지능형 냉각장치의 개발", 중소기업 기술혁신개발사업 최종 보고서, 2004.

이 중 순(Joong-Soon Lee)

[정회원]



- 1998년 6월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 자동차공학과 부교수

<관심분야>

자동차엔진제어, 자동화, 자동제어