

자동차 정션박스의 열성능 개선을 위한 연구

이 영 림*

공주대학교 기계자동차공학부

A Study of the Improvement of Thermal Performance of a Junction Box of a Passenger Car

Young Lim Lee*

*Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea
(Received 13 July 2007 / Accepted 8 January 2008)*

Abstract : Thermal management of a junction box of a passenger car has recently become more challenging due to its smaller size and larger current capacity. Thus, it is essential to perform the thermal optimization of a junction box in its design on an early stage of vehicle design. In this study, 3 dimensional CFD simulation with experimental measurement has been done to study for better thermal management of the junction box. First, the study of thermal characteristics of electric relays in the junction box has revealed that each surface of the relay has very different thermal resistance. In addition, an idea to install a cooling fan on the junction box has been studied and it was found that the forced cooling method was not effective on the system to keep the thermal resistance to the reasonable level of the junction box. Finally, the effect of external flows around the junction box on the temperatures of the relays, fuses, etc. has been studied and the result shows that the installation of the junction box at the proper place in an engine room can avoid any unnecessary overdesign in thermal management.

Key words : Junction box(정션박스), CFD(전산유체역학), Cooling(냉각), Relay(릴레이), Thermal performance (열성능)

Nomenclature

A : 암페어(ampere)
V : 속도
W : 와트(watt)
x,y,x : 직교좌표계
k : 난류운동에너지
ε : 난류에너지 소산율

Subscripts

amb : ambient
min, max : minimum, maximum

1. 서론

자동차의 정션박스(junction box)는 와이어링 하니스(wiring harness)의 한 부품으로써 전기 출력이나 신호를 배분하는 장치이다. 정션박스 내부는 발열체인 릴레이(relay)나 퓨즈(fuse) 등으로 구성되어 있고 엔진룸이나 승객실의 레그룸(leg room) 등에 설치되지만 최근에는 엔진룸에만 설치되는 추세이다. 엔진룸은 고온다습한 매우 열악한 환경을 가지고 있으며 공기역학이나 승객실의 확충 등 여러 이유 때문에 엔진룸의 크기가 점점 작아지고 있어 정션박스의 외부 환경 역시 더욱 열악해지고 있다.

Fig. 1은 일반적인 자동차의 정션박스 모습을 보

*Corresponding author, E-mail: ylee@kongju.ac.kr

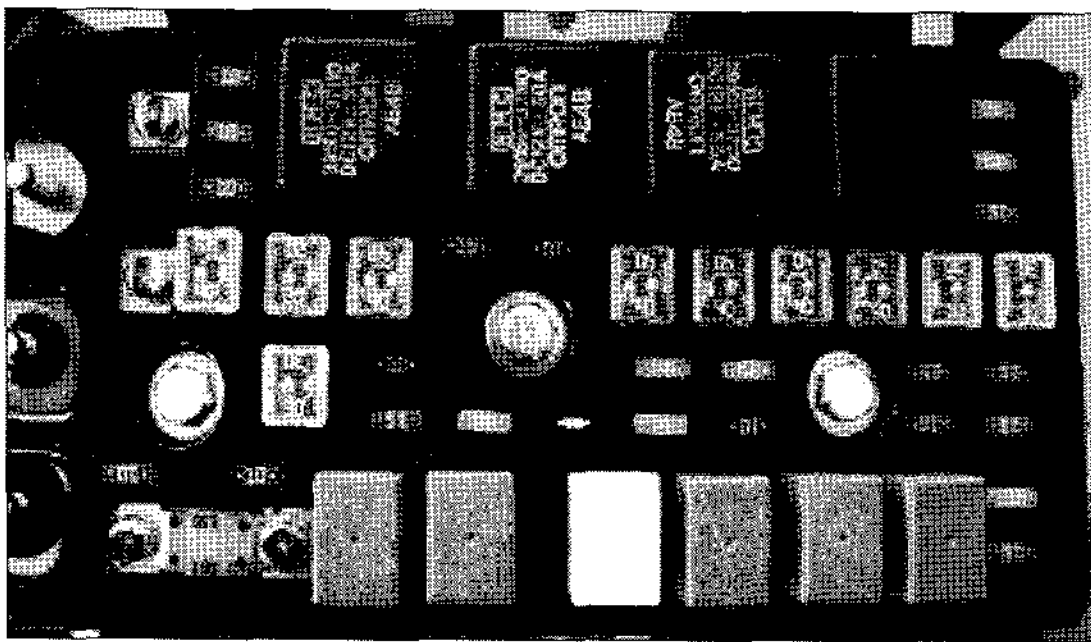


Fig. 1 Typical configuration of a junction box

여 준다. 자동차의 전자화 및 텔레매틱스화가 점점 진행됨에 따라 정션박스의 부품 수나 최대 전류 허용량도 날로 증대하고 있다. 최근의 정션박스 최대 전류량은 180 A를 상회하고 있다. 또한 과거와 달리 각종 릴레이나 퓨즈 등의 크기도 대폭 줄어들어 단위 체적당 발열량이 높아지고 정션박스의 크기도 점점 감소하고 있다. 따라서, 과거와 같이 충분한 열설계 마진(margin)을 확보하기 힘들어짐에 따라 더욱 정확도가 높은 정션박스 열설계가 요구되고 있다. 또한 최근들어 정션박스의 개발 사이클 기간과 비용을 줄이기 위해서도 열설계 기술은 많은 관심을 받고 있다.

정션박스 열설계에 관련된 연구는 2001년에 T. Ikeya¹⁾ 등이 전도 해석을 통하여 커버가 없는 정션박스에 대해 예측된 발열체의 온도가 실험값의 5% 이내로 보정될 수 있음을 보였다. 1998년 Brendan Soersting²⁾은 전형적인 버스바 타입의 정션박스에 대하여 전기회로와 열전도 해석에 대한 연계(coupling)를 시도하였다. 그는 약 15% 이내의 정확도를 가진 모델을 제시하였다. 한편 Yang과 Spadoni³⁾는 릴레이간의 간섭효과에 의한 온도를 예측하기 위해 수치해석 및 실험을 통해 간단한 실험식을 제안하였다. 지금까지의 연구는 유동은 고려하지 않은 단순한 전도해석만이 수행되었다.

정션박스 열설계시 가장 중요한 기준은 각 릴레이나 퓨즈가 어떤 사용환경 아래에서도 각각의 허용온도를 넘어서는 안된다는 것이다. 그러므로, 열설계시 가장 열악한 환경을 가정하기 위하여 주위 공기는 정지해 있고 주위 공기온도는 엔진룸 내부에서 발생할 수 있는 최고온도를 사용한다. 이로 인

해 정션박스 주위에는 온도차로 인한 자연대류(natural convection)만이 존재하게 된다. 하지만, 실제 엔진룸 내부에 정션박스를 장착할 때는 차량의 전면 개구부(front-end openings)를 통과한 냉각풍이 정션박스를 통과하게 된다. 또, 정션박스를 지나는 냉각풍의 온도나 속도 크기는 정션박스의 위치에 따라 변화할 것이다. 따라서, 엔진룸 레이아웃(layout)시 정션박스 주위 공기 속도에 따른 정션박스 발열체의 온도 변화 예측이 필요하게 된다.

본 연구에서는 버스바(bus bar) 타입의 정션박스인 경우에 초기설계 단계에 효율적인 정션박스 열설계 모델을 개발하고자 한다. 즉, 릴레이나 퓨즈 등의 위치 최적화나 정션박스 커버의 내외부 환경 변화에 따른 발열체의 온도 변화 예측에 매우 효율적인 모델을 개발하려고 한다. 먼저 주변의 공기가 정지해 있는 경우를 가정하여 열해석을 수행하고 실험 결과를 이용하여 모델을 검증하고자 한다. 다음으로, 실제 엔진룸 내부에서와 같이 정션박스 외부에 강제대류가 있을 때나 정션박스 내의 온도를 더욱 저감시키기 위해 냉각팬을 장착할 경우에 발열체의 온도변화를 예측하여 초기 설계시 활용하고자 한다.

2. 실험 및 수치 해석

릴레이나 퓨즈 등에서 발생하는 열은 주로 자연대류나 복사, 그리고 버스바 및 전선으로 전도를 통하여 전달된다. 정션박스 내부에서는 온도차에 의한 자연대류만이 발생하여 릴레이나 퓨즈 등의 온도가 그렇게 높지 않음에도 불구하고 복사 열전달도 중요한 모드가 된다. 또 버스바 및 전선을 통해 전도로 빠져 나가는 열량이 크기 때문에 이것을 정확히 계산하기 위해서는 버스바 및 전선의 상세 모델링이 필요하다. 이러한 상세 부분까지 고려하여 전도, 대류, 복사와 같은 열전달 현상을 구하기에는 수치해석 모델이 너무 방대해지므로 본 연구에서는 다음과 같은 접근 방법을 제시하고자 한다. 즉, 릴레이나 퓨즈의 위치 최적화나 커버 주위의 환경 변화에 따른 온도 변화 예측을 위하여 버스바나 전선은 평균전도율을 가진 단순화된 블록(block)형태로 모델링하고 열유동장을 해석하였다.

2.1 지배방정식

본 연구의 정선박스에서 발생하는 유동 및 열전달 현상은 3차원, 정상상태 및 난류유동으로 이러한 경우의 지배방정식은 잘 알려져 있다.^{4,5)} 대류항은 2nd order upwind를 사용하였고 난류 모델링은 표준 k-ε을 사용하였다.

2.2 플라스틱 박스 내부 온도 상승 해석

정선박스의 3차원 수치 해석의 정확도를 검증하기 위하여 다음과 같은 해석을 수행하였다. 플라스틱 박스 안에 내부 발열체가 있는 경우 Fluent⁴⁾를 이용하여 해석한 다음 실험에 근거한 1차원 해석 결과⁶⁾와 비교하여 보았다. 해석을 위하여 정선박스 내부의 공기가 12 W의 열량을 균일하게 생성한다고 가정하였고 정선박스는 외기온도 25°C의 정지된 공기 중에 노출되어 외부와 자연대류 및 복사에 의해 열을 방출한다고 가정하였다. 이 때 해석 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 A physical characteristics of the junction box

Junction box dimension (width×depth×height)	0.254× 0.254× 0.254 (m)
Wall thickness	3.18×10 ⁻³ m
Conductivity	0.394 W/m ² °C
Heat generation	12 W

격자는 약 25만개를 사용하였고 격자 수를 2배 증가시켰을 때 0.5°C 미만으로 변화하였다. 또한, 자연대류를 해석하기 위해서 박스 위로 박스 높이의 3배, 아래로 1.5배, 옆으로 1배의 해석공간을 사용하였다.

2.3 릴레이 표면 온도 측정

실제 릴레이의 표면 온도는 각 표면 방향으로의 열저항의 크기에 따라 결정되므로 이에 의한 효과를 알아보기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. Fig. 2와 같은 미니 릴레이와 마이크로 릴레이에 대하여 실내 온도를 25°C로 유지하면서 통전 전류를 1 A에서 15 A까지 증가시켜 가며 각 표면에서의 온도를 측정하였다.

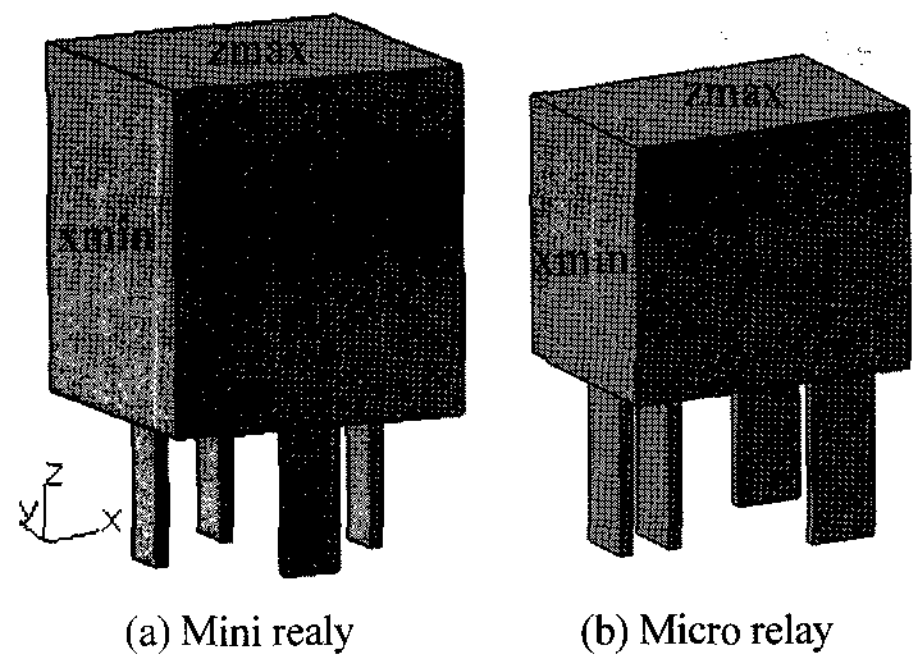


Fig. 2 Geometry of the relays

2.4 정선박스 열유동 수치 해석

외부 유동이나 팬에 의한 부품 온도 변화를 해석하기 위해 앞서 무풍 항온조에서 측정된 각종 릴레이나 퓨즈 등의 온도를 재현하기 위하여 Fig. 3과 같은 단순화된 3차원 해석 모델을 확립하였다. 온도는 항온실에 정선박스를 장치하고 주변온도를 90°C로 유지한 후 실제 운전조건에 해당되는 전류를 흐르게 하여 측정되었다.

정선박스 내에 있는 각종 릴레이나 퓨즈 등의 온도를 정확히 예측하기 위해서는 정선박스 내부 공기로 전달되어 커버(cover)를 거쳐 외부로 빠져나가는 상부 열전달과 버스바 및 전선을 거쳐 빠져나가는 하부 열전달 모두를 모델링하여야 한다. 하지만 이러한 전체 시스템을 고려하면 해석 모델이 너무 방대해지므로 본 연구에서는 버스바를 통하여 하부로 전달되어 지는 열전달은 단순화 하였다. 즉, 각종 릴레이 및 퓨즈 등은 내부 발열이 있는 블록으로 단순화하였고 버스바 및 와이어링 하니스는 평균전도

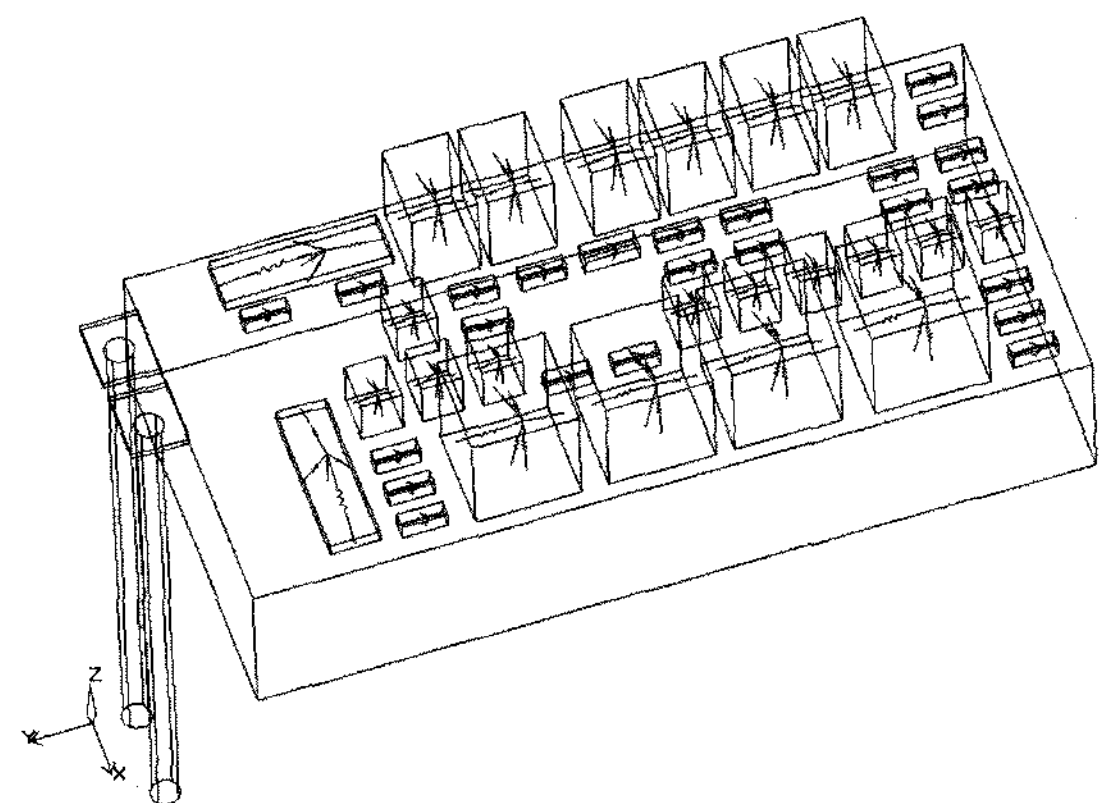


Fig. 3 3-dimensional configuration of the junction box

을 가진 블록으로 모델링하였다. 정선박스 커버 역시 사각형 모양으로 단순화 하였다.

따라서 본 연구에서는 하부 열전달을 정확히 모델하지 않았고 각 부품들도 단순화하였으므로 실험 값과 일치하는 온도를 얻기 위하여 각 부품의 열발생량을 조절하였다. 다만, 버스바를 통해 전도되어지는 열량의 비율은 Yang과 Spadoni³⁾의 결과를 참고하여 총발열량의 15%로 가정하였다. 한편 무풍조건인 정선박스의 경우 단지 자연대류만이 발생하여 대류속도가 크지 않으므로 반드시 복사 효과를 고려해야한다. 격자는 약 80만개를 사용하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 플라스틱 박스 내부 온도 상승 해석

Fig. 4에 플라스틱 박스 내외부의 속도 분포와 온도 분포를 나타내었다. 플라스틱 박스 내부에서는 자연대류에 의하여 재순환 유동이 형성되고 외부에서는 수직방향으로의 상승 기류가 형성된다. 정선박스 내부의 평균 공기온도는 38.4°C로 관측되었다.

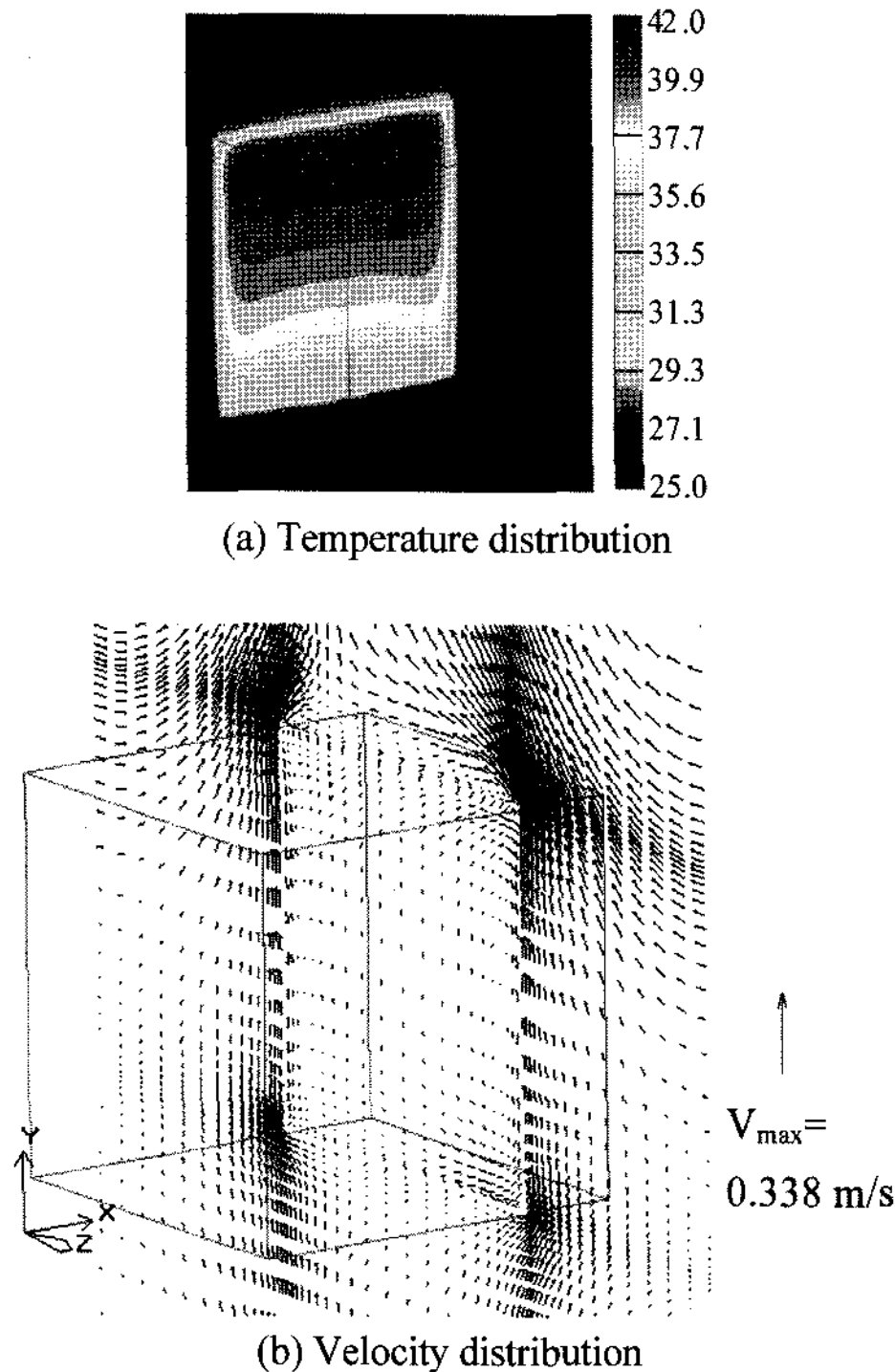


Fig. 4 Velocity and temperature distributions around a plastic case of the junction box

이는 1차원 결과⁶⁾ 대비 평균온도가 약 0.2°C 낮게 예측되었으나 해석 조건의 정확한 일치 어려운 점을 감안한다면 허용 오차 범위이어서 본 해석의 타당성이 확보되었다고 할 수 있다. 만약 위 박스가 분위기 온도 90°C인 엔진룸 내에 장착된다면 박스

내부의 온도는 약 104°C 까지도 상승할 수 있다. 이는 정선박스 내에 장착되어 있는 릴레이 등의 한계 온도가 140°C 임을 고려한다면 정선박스 열설계에 세심한 주의가 필요함을 알 수 있다.

3.2 릴레이 표면 온도 측정

Fig. 5에 통전전류에 따른 릴레이 표면온도 변화를 나타내었다. 먼저 측정된 온도가 표면마다 현저히 다르며 최대 20°C 이상 차이가 남을 알 수 있다. 이것은 내부 코일에서 발생된 열량이 고르게 방열되지 않고 있으며 각 방향으로의 열저항이 매우 다르다는 것을 보여준다. 따라서, 정선박스 레이아웃(layout) 설계시 온도가 높은 표면끼리 서로 마주 보지 않도록 하는 등의 릴레이의 배치 방향을 최적화할 필요가 있다.

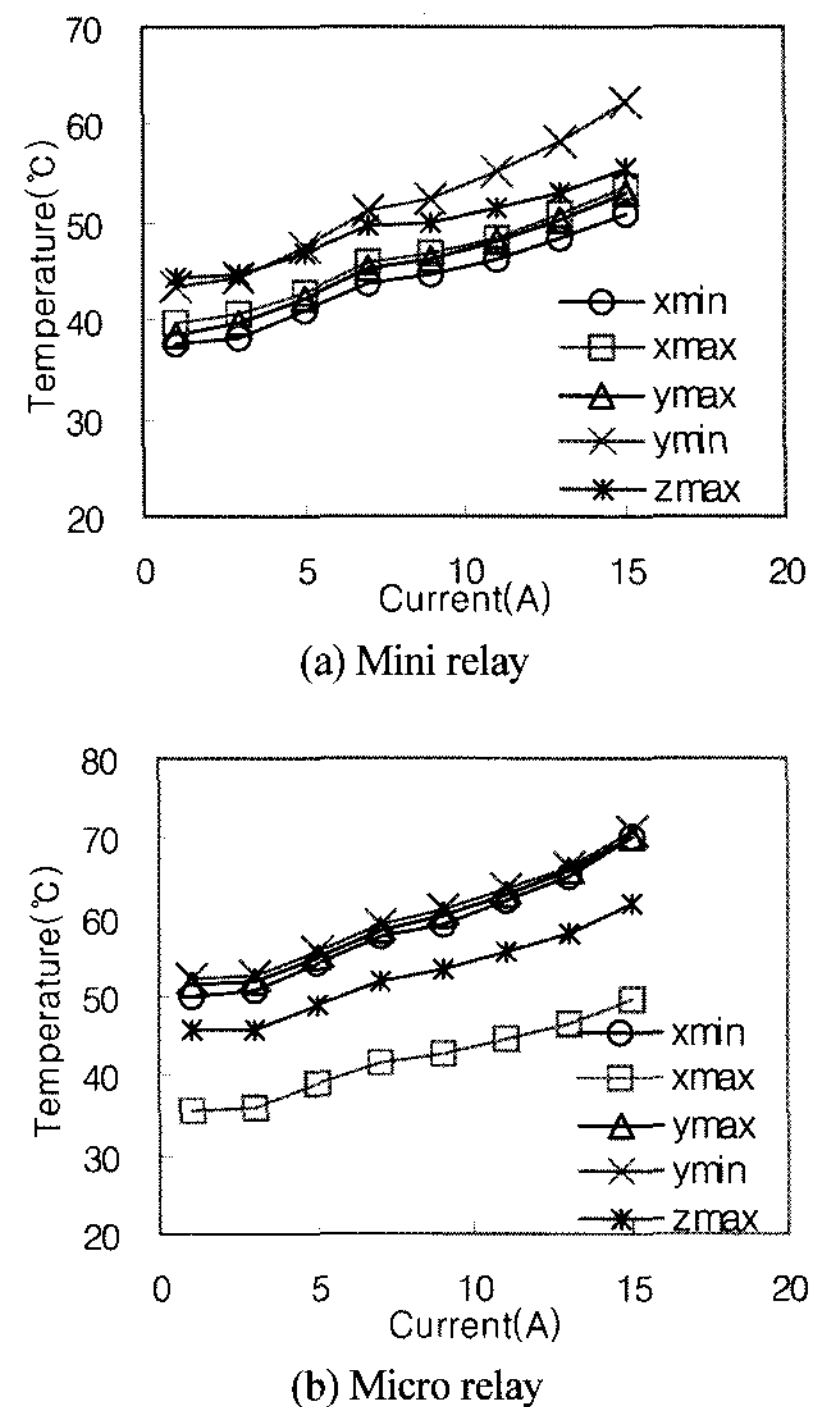


Fig. 5 Variation of the surface temperature of the junction box with current

미니 릴레이의 경우 상부면(zmax)을 제외하고는 전류에 따른 온도변화가 같은 경향을 나타내며 비교적 선형적으로 변화하는 모습을 보여준다. 미니 릴레이의 경우 정면(ymin)과 상부면을 통하여 가장 많은 열이 방출되고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 5(b)의 마이크로 릴레이에서도 통전전류에 따른 각 표면에서의 온도변화는 전반적으로 선형적으로 변화하는 것을 알 수 있다. 내부 발열량은 주로 정면, 후면(ymax) 및 좌측면(xmin)면을 통해 방열되고 내부 코일의 기하학적 대칭성으로 인하여 우측면(xmax)과 좌측면의 온도는 같아야 하는데 측정 결과도 이를 뒷받침하여 주고 있다.

3.3 정선박스 열유동 해석

수치해석 결과를 실험값에 근사시키기 위하여 부품의 내부 발열량을 변화시켜가며 Fig. 6과 같이 각 측정지점에서의 온도차이가 0.5°C 이내가 될 때까지 이분법(bi-section method)을 사용하여 반복 계산하였다. 초기값은 1 W를 사용하였다.

Fig. 7에 정선박스 내부와 외부의 온도 및 속도분포를 나타내었다. 정선박스 내부는 부품의 발열로 인한 자연대류로 인해 복잡한 재순환 유동이 발생하고 있고 정선박스 외부는 커버주위로 올라가는 전형적인 수직방향의 자연대류가 형성된다. 최대 속도는 약 0.13m/s 계산되었으며 복사 효과를 고려하지 않았을 경우 부품 평균 온도가 약 7°C 상승하여 복사를 통한 외부로의 열방출이 정선박스의 냉각메커니즘에서 매우 중요함을 알 수 있다. 본 연구에서 최대온도는 137.5°C로써 블레이드 형식의 미니 퓨즈에서 발생되었다.

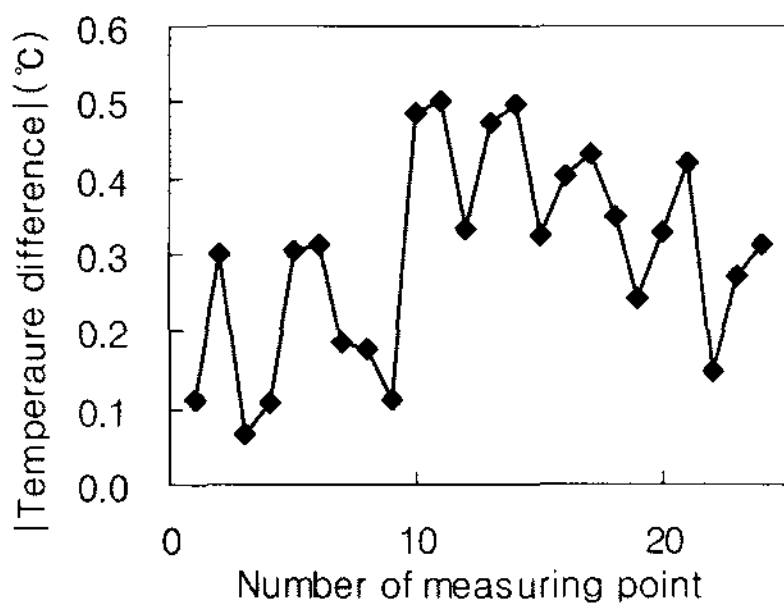


Fig. 6 Temperature difference between measured and calculated results after calibration

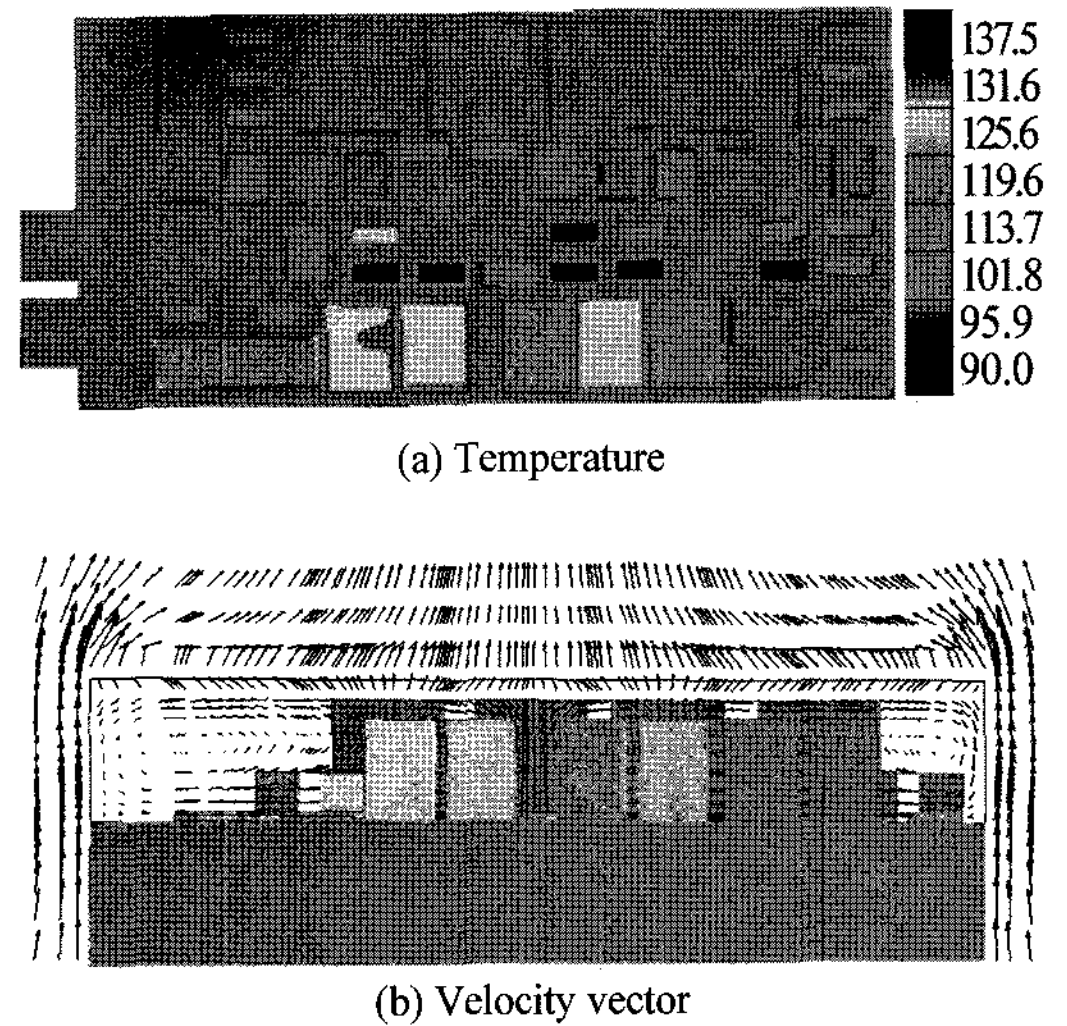


Fig. 7 Temperature and velocity distribution on the junction box with natural convection condition

3.4 팬 설치에 따른 정선박스 열유동 해석

정선박스의 냉각 성능을 더욱 향상시키기 위한 방법으로 내부에 팬을 장착하여 공기를 순환시키는 것이 부품 냉각 성능에 얼마나 효율적인지를 해석하여 보았다. 팬은 Sanyo Denki⁷⁾ 회사 제품 중에서 정선박스 내부의 유동속도를 약 3-10 m/s를 유발시킬 수 있는 것으로 선정하여 2차원 팬으로 모델하였다.

Fig. 8은 팬을 장착한 경우가 팬을 장착하지 않은 경우에 대비하여 평균 부품온도를 얼마나 감소시켰는지 보여주고 있다. 첫 번째 고려된 팬은 최고속도 약 3 m/s의 내부 유동을 야기 하였으며 평균 부품온도를 약 0.7°C 감소시켰었다. 이는 자연대류와 비교하여 최고속도는 수십 배 증가하였으나 실제 평균 부품온도를 낮추는 효과는 미미하였다. 따라서 두

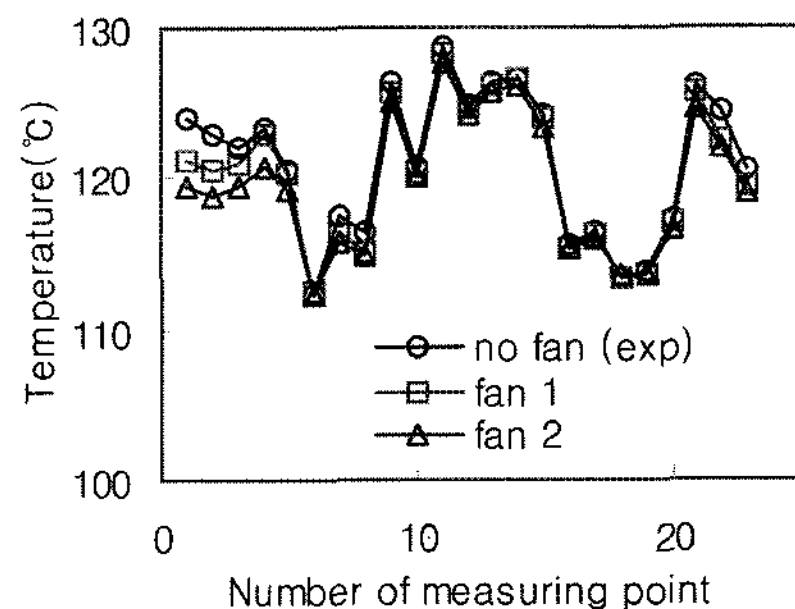


Fig. 8 Variation of temperature with the cooling fan

번째 팬은 훨씬 용량이 큰 것을 선택하여 최고속도 약 9 m/s가 발생되도록 하였다. 하지만, 두 번째 팬 역시 부품의 온도를 약 1.3°C 정도 감소시키는데 그쳐 기대에 미치지 못함을 알 수 있다.

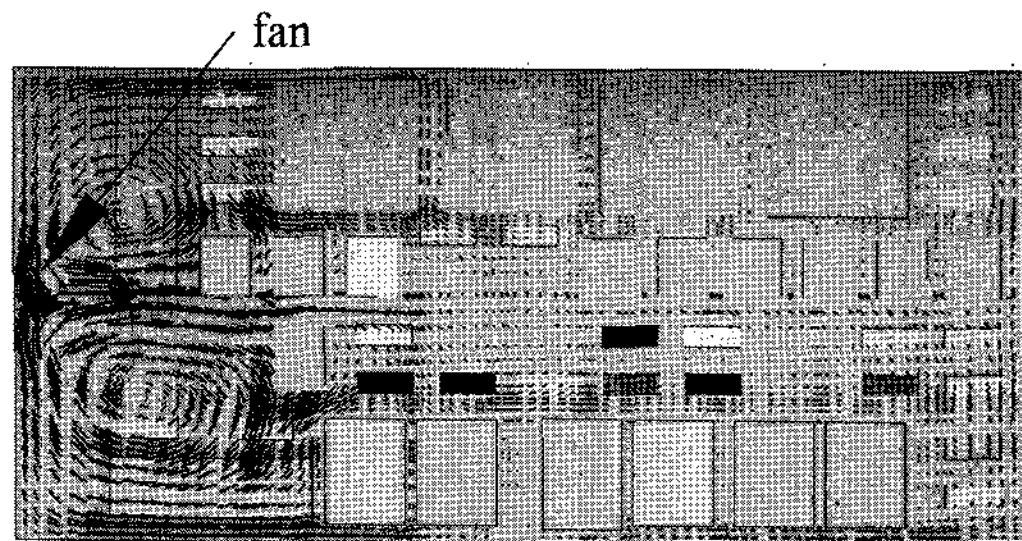
팬을 장착한 경우 정선박스 내의 유동 분포를 알기 위하여 Fig. 9(a)에 속도 벡터를 나타내었다. 이 경우 팬에서 불어 주는 공기는 바로 앞에 위치한 퓨즈들에 의해 유로가 막혀 두 개의 커다란 재순환 유동을 형성하고 있으며 이로 인해 정선박스 길이 방향으로 깊숙이 들어가지 못함을 알 수 있다. 따라서 내부 유동 개선을 통한 냉각 효과를 더욱 극대화하기 위하여 Fig. 9(b)에서와 같이 팬 근처의 릴레이나 퓨즈의 위치를 적절히 변경하였고 팬의 위치도 최적화하였다. 이와 같은 노력을 통해 원래 경우(Fig. 9(a))보다 정선박스 내부의 유동 형태도 많이 단순화되었고 이에 따른 추가적인 부품온도 감소가 기대되었다. 하지만, 정선박스의 유동 개선을 위한 릴레이나 퓨즈의 위치 변경에도 불구하고 평균 부품온도가 단지 약 1.5°C 하강하여 그 효과는 크지 않았다. 이것은 내부 공기 순환용 팬을 정선박스에 장착하더라도 정선박스 내부 공기 온도가 높고 부품과

정선 커버 사이의 복사 열전달도 상대적으로 중요하므로 내부 팬에 의한 순환유동은 부품 냉각에 그다지 효율적이지 못함이 판명되었다. 참고로 정선 박스는 습기 문제로 인하여 외부에서 상대적으로 낮은 온도의 공기를 흡입하는 팬을 사용할 수 없다.

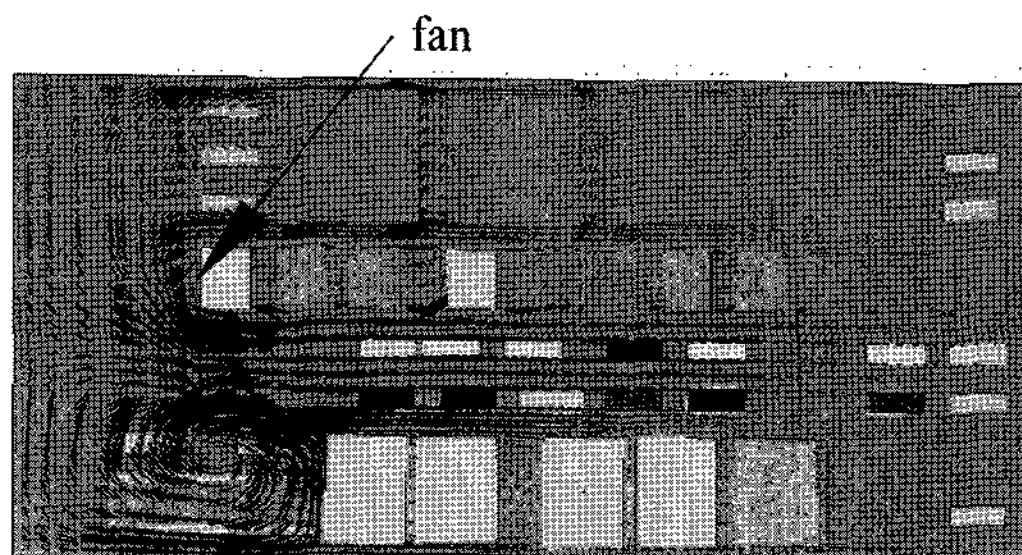
3.5 외부 유동 변화에 따른 정선박스 열유동 해석

엔진룸 내부의 속도는 엔진룸 내의 위치, 차량의 주행상태 및 팬의 작동상태에 따라 0에서 10m/s 이상이다. 또한 엔진룸 내부의 온도 역시 계절 및 운전 상황에 따라 국소적으로 100°C 이상 될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 정선박스를 지나는 외부 유동 및 엔진룸 온도분포가 부품 냉각 성능에 얼마나 효율적인지를 알아보았다. Fig. 10에 저자가 수행한 엔진룸 열해석⁸⁾의 전형적인 결과를 나타내었다.

먼저, 90°C인 균일한 속도 분포를 가진 외부 유동의 속도를 2 및 10 m/s로 변화시키었다. Fig. 11에서와 같이 외부 유동이 2 m/s 일 때 평균 부품온도가 약 3.5°C 감소하고 10 m/s 일 때 약 5.7°C 감소하는 것으로 예측되었다. 이는 외부 유동 효과가 내부에 팬을



(a) Before rearrangement



(b) After rearrangement

Fig. 9 Comparison of velocity distribution on the junction box with the cooling fan

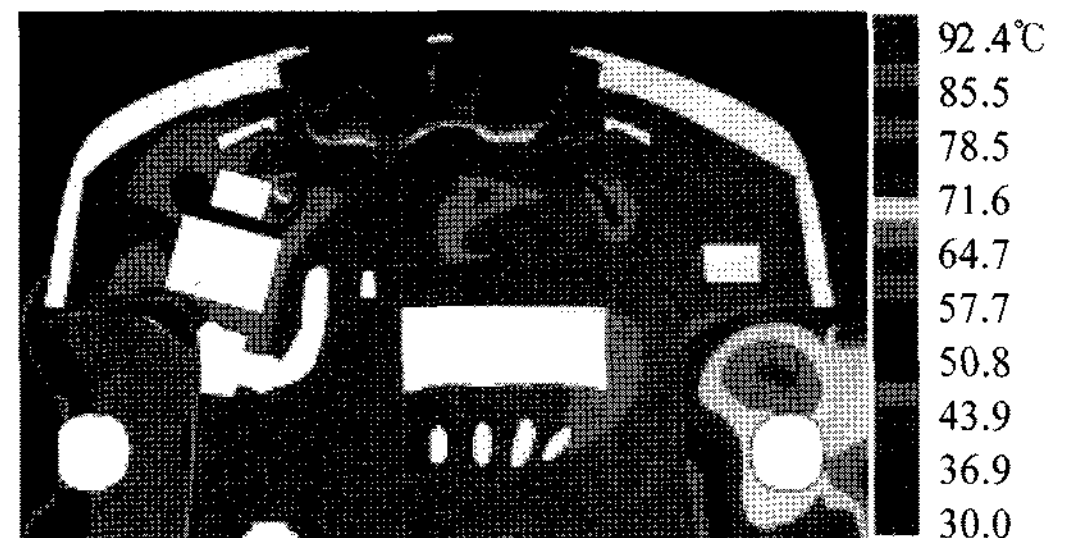


Fig. 10 Typical temperature distribution in an engine room at the idling operating condition of an engine

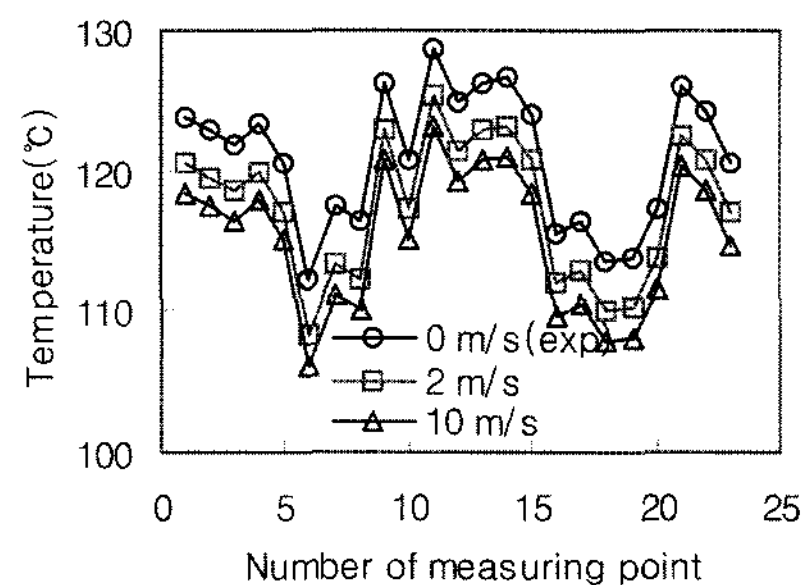


Fig. 11 Variation of temperature with ambient air flow velocity at $T_{amb} = 90^{\circ}C$

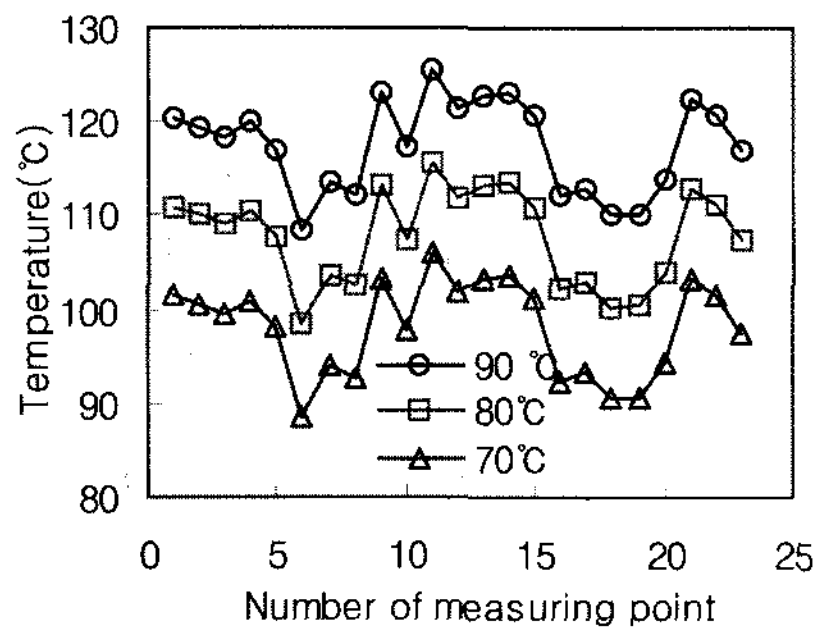


Fig. 12 Variation of temperature with ambient temperature at $V_{amb} = 2 \text{ m/s}$

삽입하는 것보다 부품 냉각에 훨씬 효율적인 것을 보여준다.

한편, 정선박스를 지나가는 외부 공기온도의 변화에 따른 냉각 효과를 살펴보기 위하여 주변 온도를 Fig. 12에서와 같이 변화 시켰었다. 주변 온도가 10°C 감소함에 따라 평균 부품온도 역시 약 10°C 하강한다. 이것은 온도편차가 심한 엔진룸 내에서 정선박스 위치가 얼마나 냉각성능에 중요한 인자임을 다시 한번 일깨워 주고 있다.

4. 결론

날로 열악해지는 자동차 정선박스의 열성능을 개선하기 위해 수행된 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 릴레이 각 표면을 통한 열저항이 현저히 달라 표면 온도차가 최대 20°C 이상 나기 때문에 정선박스 레이아웃 설계시 고온의 표면이 마주보지 않도록 배열하거나 혹은 간격을 더욱 확보하는 등의 주의가 요구되어진다.
- 2) 정선박스 내부에 팬을 삽입하여 내부 공기를 순환시키는 것은 본 연구에서 고려된 팬의 경우 평균 약 1.5°C 감소시키는데 그쳐 냉각 성능 개선에 그렇게 효율적이지 않음을 알 수 있다.
- 3) 반면, 정선박스 외부의 유동 및 온도분포는 릴레

이 온도 저감에 매우 효율적인 인자임이 판명되었다. 따라서, 초기 엔진룸 패키징(packaging) 설계 단계부터 엔진룸 내의 정선박스 위치 최적화가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 버스바 및 와이어하니스를 통해 전도로 방출되는 열량은 일정하다고 가정하였는데 이는 본 연구의 결론에는 영향을 미치지 않는다. 하지만, 버스바를 통해 정선박스 하부로 전도되는 열 해석을 통하여 버스바의 재질이나 모양 두께 등에 의한 열성능 해석 그리고 엔진룸 유동해석과의 연계를 통한 정선박스 냉각 최적화 등이 향후 필요하다고 하겠다.

References

- 1) T. Ikeya, N. Ito, A. Chiriku, M. Okada, Y. Miyazawa and N. Mochizuki, "Thermal Simulation of the Electrical Distribution Box," SAE 2001-01-0690, 2001.
- 2) B. H. Soerstling, "Thermal-Electrical Modeling of Electrical Subsystems," SAE 981111, 1998.
- 3) Q. Yang and S. Spadoni, "Thermal Study of Electrical Devices in Electrical Distribution Box," SAE 9703030, 1997.
- 4) Fluent, Version 6.1, Fluent, Inc., Lebanon, NH 2005.
- 5) F. P. Incorpera and D. P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, New York, 1990.
- 6) G. N. Ellison, Thermal Computations for Electronic Equipment, Krieger Publishing Company, Florida, 1989.
- 7) Cooling Fans, Sanyo Denki Co., LTD, Tokyo, Japan.
- 8) Y. L. Lee, "An Analysis of Engine Cooling using a Three-dimensional Radiator Model," Transactions of KSAE, Vol.9, No.4, pp.10-17, 2001.