

# G7 동력차 동력실 유동해석을 통한 루프후드 구조 연구

## The study for roof hood structure of G7 power car engine compartment using air flow analysis.

박광복\*                      이동훈\*\*                      장규호\*\*\*  
 Park, Kwang-Bok      Lee, Dong-Hoon      Jang, Kyu-Ho

### ABSTRACT

The study was carried out about the roof hood structure of power car for Korean High Speed Train. The compatibility for applied material and volume of hood duct was studied using analysis about heat and flow distributions. The materials and volume of duct were mainly determined by output air temperature and flow rate of each electric blocks. This report was described, which focuses on pressure distribution and air temperature within engine compartment of power car.

#### 1. 서론

동력차 차량의 동력실 공기 흐름도에 관한 검토로 동력실 주요 기기배치에 따른 기기별 공기순환 및 환기량을 검토하고, 동력실 냉각해석을 통해 각 기기의 냉각에 필요한 공기유량의 적절성 여부와 ROOF HOOD의 DUCT설계의 적합성을 검토함으로써 동력실 기기에 대한 필요환기량 및 냉각검토 연구를 목적으로한다.

#### 2. 동력실 기기배치 및 공기흐름

공기 순환은 기본적으로 동력실내 각 기기의 Motor Fan에 의한 강제 냉각 방식으로 하며 외부 유입 공기는 동력차의 측면(Side)에서 유입되어 동력실의 내부와 U/F로 순환되어 기기를 냉각한 후에 Motor Fan에 의해 동력실 상부로 순환되어 동력차 Hood 내부에서 좌우 방향으로 분리되어 Hood의 양방향으로 배출된다. 동력실 내의 공기흐름도가 그림 1에 개략적으로 나타나 있다.

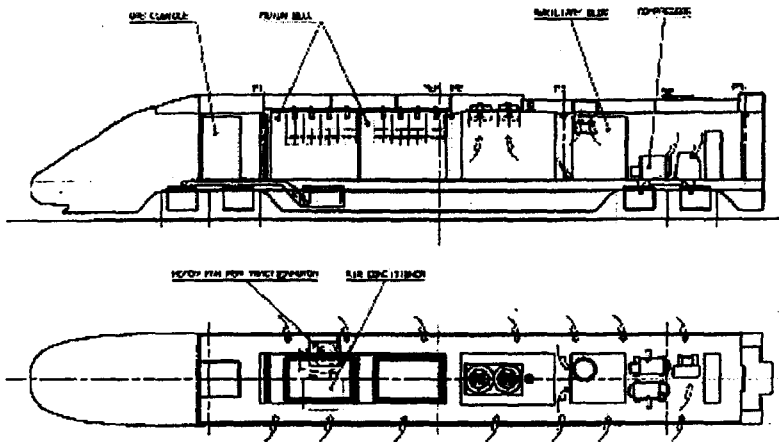


그림 1 동력실 공기 흐름 일반도

다음 그림은 공기가 기기를 냉각하고 최종적으로 통과해 배출되게 되는 Hood의 외관이며, G7 동력차에는 폴리에스테르 재질의 hood1 및 알루미늄 재질의 hood2, hood3, hood4 등 4개의 roof hood로 구성된다. hood1은 배기구가 없으며 공력 저항 및 외관을 고려한 동력차 전두부와 일체감을 갖는 형상으로 되어있다.

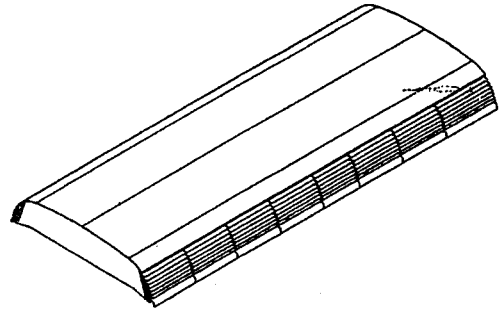


그림 2 Hood 2의 외관

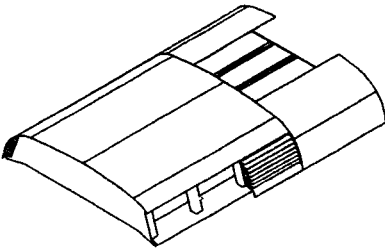


그림 3 Hood 3의 외관

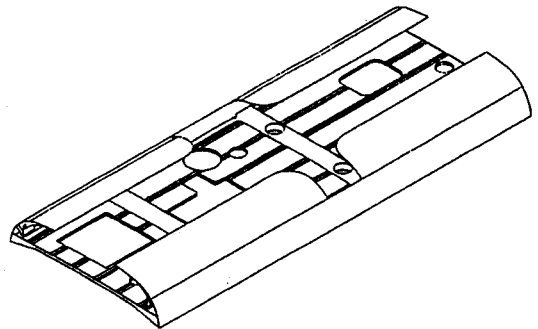


그림 4 Hood 4의 외관

### 3. 동력실 유동해석

#### 1) 이론적 배경

##### (1) 지배방정식

본 과제는 동력차내의 열 및 유동 분포의 계산에 목적이 있다. 동력차내의 열원이 유동에 의하여 열이 전달되는 현상을 모사하기 위하여 유동을 지배하는 비압축성 3차원 Navier-Stokes 방정식과 온도장을 지배하는 에너지 방정식을 도입하였으며, 다음과 같다.

##### 연속방정식

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

##### 운동량 방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

##### 에너지 방정식

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial f_j}{\partial x_j}$$

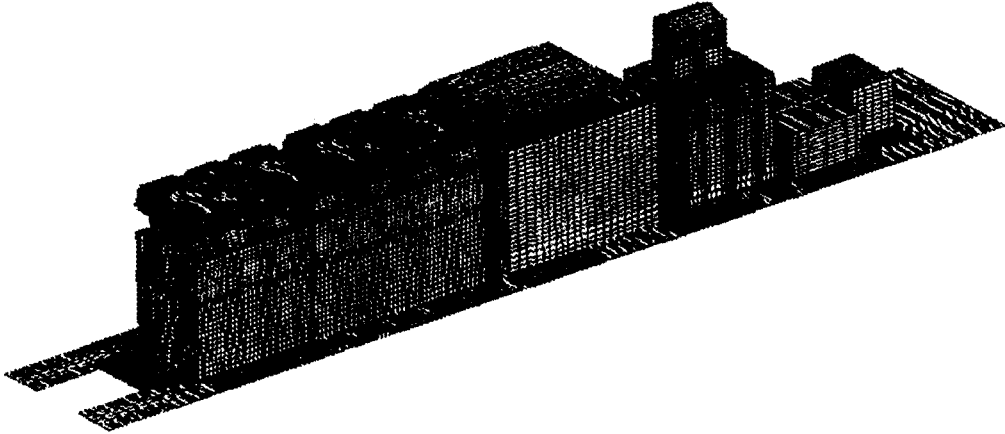
##### (2) 수치해석 기법

연속 방정식과 운동량 방정식은 비압축성 방정식에서 주로 사용하는 SIMPLE 방법에 의해서 연성(coupling)을 하였으며, 공간적으로는 유동의 정보전달 방향을 고려한 2nd order upwind 방법을 상용하였다. 또한, 유동 지배 방정식과 에너지 방정식을 연성하므로써 유동장과 온도장이 서로 연계를 가지는 해를 구하고자 하였다.

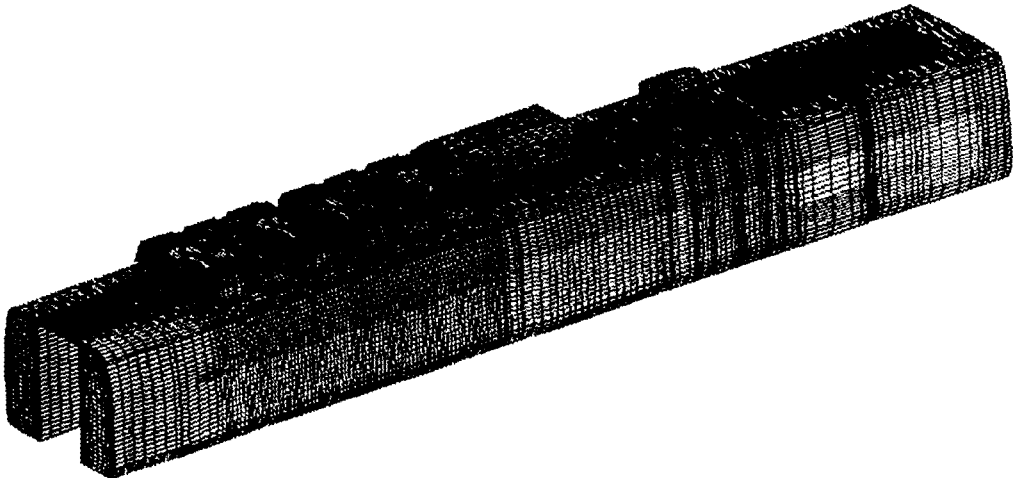
## 2) 격자계(grid systems)

본 과제의 대상인 동력차의 실내는 모터, 변압기, 압축기등의 요소들로 인하여 비교적 복잡한 형상을 갖고 있다. 그러나, 각각의 요소들이 비교적 육면체에 가까우므로, 다중블록의 육면체 격자계를 생성하여, 격자 수의 절약과 해의 정확도를 도모하였다.

동력차의 전체를 전산 해석하여야 하므로 많은 격자수가 필요하였으며, 본 계산에서는 27만 셀의 격자계를 생성하였으며, 생성된 격자계는 그림 5에 나타난 바와 같다.



(a) Grid system of inner units



(b) Grid system of casing

그림 5 Grid system(270 thousands cells)

## 3) 경계조건(Boundary conditions)

표 1에 본 계산에 사용된 경계조건을 정리해 놓았다. 팬(fan)에 의해서 출구로 나가는 유량을 모두 알고 있으므로 전체유량을 합산한 후에 루버(louver)의 면적으로 나누어서

루버로 유입되는 속도의 크기를 구했으며, 속도의 방향은 루버의 2차원 형상에 기초한 수치해석 결과에 의하여 결정하였다. 또한, 모터블록과 변압기 블록 등의 덕트를 통해서 나가는 출구 경계는 각각의 유출유량을 모두 알고 있으므로 유량을 분배하여 보정하는 방법을 사용하였다

표 1. 경계조건

	유동	난류	온도/에너지	경계
속도 고정 (velocity inlet)	속도의 크기와 방향 설정	난류강도 고정 (5%)	온도 고정	루버
벽 (wall)	점착조건	벽함수	온도고정 열량고정 단열	변압기, 동력차 외벽 모터블록의 열원 등 천장, 바닥 등
유량 보정 (out flow)	유입유량 = 유출유량	Neumann condition	Neumann condition	모든 출구

4) 결과

(1) 계산조건

각각 정차시, 운행시(350km/hr), 비상제동시의 세가지 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 정차시에는 유동이 루버에 수직인 속도성분만 갖는다고 가정하였다. 그리고, 비상제동의 경우를 해석하려면, 시간에 따라서 경계조건이 변화하는 비정상계산(unsteady computation)을 해야한다. 그러나, 본 계산에서는 비상제동을 하는 순간에 대해서만 정상계산(steady computation)을 하였다. 표 2에 계산조건이 정리되어 있다. 여기서,  $V_t$ 와  $V_n$ 은 각각 동력차의 루버에 수평인 속도 성분과 수직인 방향의 속도성분을 나타낸다.

표 2. 계산조건

(단위 : 속도[m/s], 열량[kw])

	유입속도	Invertor 열량	BCH 열량	Convertor 열량	Brake Resistor 열량
Case1 (정차시)	$V_t = 0$ $V_n = 0.9975194$	0	0	0	0
Case2 (운행시)	$V_t = 2.148503$ $V_n = 0.9975194$	1.7	0	4.584	0
Case3 (비상제동시)	$V_t = 2.148503$ $V_n = 0.9975194$	1.864	1.779	0	406.3

(2) 계산결과

Case1

유동은 양쪽의 루버에서 유입되어서 각각 모터 블록, 변압기 블록, 보조 블록의 뎀에 의하여 천장쪽의 출구로 빠져 나간다. 그림 6은 정차시의 기관실내의 주요장치 벽면에서의 압력분포를 나타내고 있다. 전체 유출 유량의 약 48%를 차지하는 변압기 블록의 출구 부분은 많은 유량에 비해서 출구의 크기는 크지 않으므로 변압기 블록 안쪽의 유동속도가 빨라지게 됨으로써 변압기 블록 전반에 걸쳐서 압력이 낮음을 알 수 있다. 정차시에는 모터블록에서 발열하지 않으므로 모터블록 및 덕트의 온도가 대기의 온도와 같다.

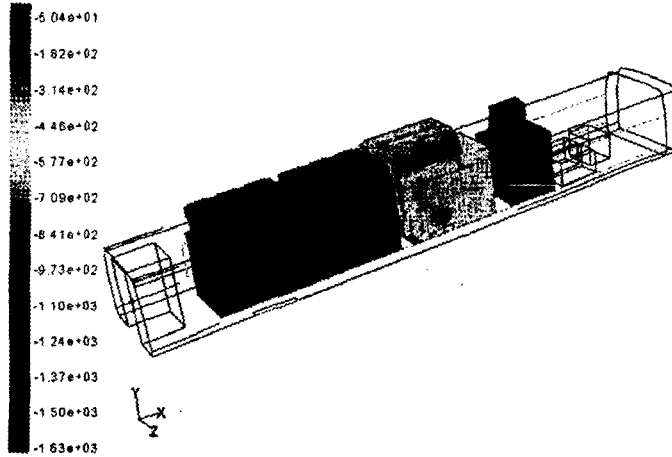


그림 6 Pressure contours(case1)

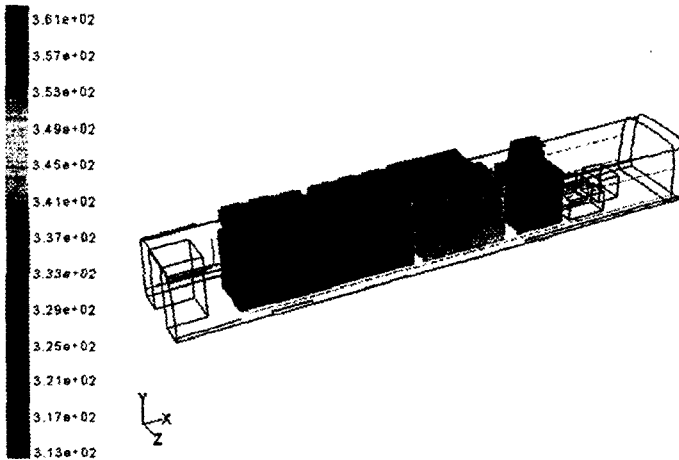


그림 7 Temperature contours(case1)

### Case2

정차시에는 유동이 유입하는 루버에 수직인 성분의 속도만이 존재하며, 모터블록에 발열도 존재하지 않았다. 이번 질에서는 루버에 수직인 속도 성분 뿐만 아니라 수평한 속도 성분을 가지고 유입하는 350km/h로 주행하는 경우(case2)에 대하여 해석한 결과에 대하여 설명하고자 한다. case2에서는 case1과 달리 루버를 통해서 유입하는 유동이 기관실의 길이방향(-x 방향)의 속도 성분을 가지므로 case1과 달리 기관실내의 대부분의 구역에서 -x 방향의 유동효과가 나타났다.

각각의 요소내의 유동 및 열전달 특성을 살펴 보기에 앞서서 전체적인 특성을 살펴기 위하여 그림 8과 그림 9에 압력과 온도를 도시하였다. Case2의 경우도 case1과 마찬가지로 변압기 블록이 가장 많은 유량을 소모하므로 변압기 블록이 가장 낮은 압력을 나타내고 있다. 또한, 변압기 블록과 보조블록의 온도는 case1과 같으며, 모터블록은 발열이 되므로 정차시 보다 높은 온도를 나타내고 있다. 그러나, case2의 경우에도 여전히 변압기 블록이 가장 높은 온도를 나타내고 있다.

그림 10은 모터블록의 벽면에서의 압력분포를 나타내고 있다. 대체적으로 블록의 앞쪽보다 뒤쪽의 압력이 높게 나타나고 있으며, 앞쪽 블록의 덕트보다 뒤쪽 블록의 덕트에서 압력차이가 심하게 나타나고 있다. 특히 블록의 뒤쪽 벽의 압력이 가장 크게 나타나고 있는데, 이러한 압력의 분포는 그림 12과 그림 13에 나타나있는 유동형태와 매우

관련이 깊다. 그림에 나타난 바와 같이 루버로 유입하는 유동은  $-x$  방향의 속도 성분을 가지고 유입하며, 모터블록 내로 유입할 때도 역시  $-x$  방향의 속도 성분은 유지된다. 모터블록내로 유입된 유동은 모터블록의 뒤쪽 벽에 부딪히게 되어 속도가 작아지고 압력이 커지는 정체점(stagnation point)이 나타나게 된다. 모터 블록내의 대체적인 유동현상은 case1 과 마찬가지로 루버로 유입하여 덕트 출구로 유출되는 유동이지만, 그림 12 과 그림 13 에 나타난 유선은 상당히 강한 이차 유동을 동반하고 있다. 유입한 후에 수력점프에 의한 와류유동이 나타나는 것은 case1 과 흡사하지만, case2 에서는 모터블록의 출구 부분에서 와류유동이 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 모터블록의 뒤쪽으로 갈수록 와류강도가 심해지는 것을 알 수가 있는데, 이것은 뒤쪽에 설치된 덕트내의 압력이 높으므로 유동이 덕트로 유입되다가 덕트내의 압력에 의하여 다시 모터블록으로 밀려나면서 나타나는 현상으로 추정된다.

그림 11 에는 모터블록의 온도 분포가 나타나 있다. 모터블록의 출구에서 발열이 일어나고 발열된 열량은 모두 유동에 의해서 덕트로 대류에 의한 열 전달이 일어나므로 덕트 벽면의 온도가 모터블록의 온도보다 높은 것을 알 수 있다.

그림 14 에 나타난 변압기 블록의 벽면의 압력은 case1 의 경우와 매우 흡사하며, 대부분의 유량이 통과하는 두 번째와 세 번째 덕트 출구의 압력이 가장 낮음을 알 수 있다.

그림 15 와 그림 16 에 나타난 유선을 살펴보면, case1 과 같이 변압기 블록으로 유입된 후에  $y$  축과 평행한 회전축을 가지면서 선회하면서 출구로 빠져나가는 모양을 나타내고 있으며,  $-x$  방향의 속도성분에 의한 효과는 나타나지 않고 있으며, 그 이유는 변압기 블록에 설치된 팬(fan)이 모터블록의 팬보다 유동을 강하게 흡입하므로 변압기 블록에 수직인 속도성분이( $z$  방향)  $-x$  방향의 속도 성분보다 월등히 크기 때문이다. 그림 17 에 변압기 블록의 온도 분포가 나타나 있으며, 유동의 형태와 경계조건이 같으므로 온도 분포 또한 case1 과 같은 결과를 나타내고 있다.

그림 18 에 나타나 있는 보조 블록의 벽면에서의 압력을 살펴보면, 유동이 뒤쪽으로부터 보조 블록쪽으로 흐르다가 보조 블록의 뒤쪽 벽면에 부딪힌 후에 벽면을 타고 보조블록의 아래쪽의 입구로 유입되므로 보조블록의 뒤쪽 벽의 압력이 매우 높은 것을 알 수 있으며 보조블록의 위에 위치한 덕트에서는 압력의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 그림 19 에 보조블록의 뒤쪽벽면에 유동의 박리선이 관찰되고 있으며, 뒤쪽의 덕트에서의 박리가 case1 의 경우보다 심한 것을 알 수 있으며, 선회하면서 출구로 빠져나가고 있음을 알 수 있다.

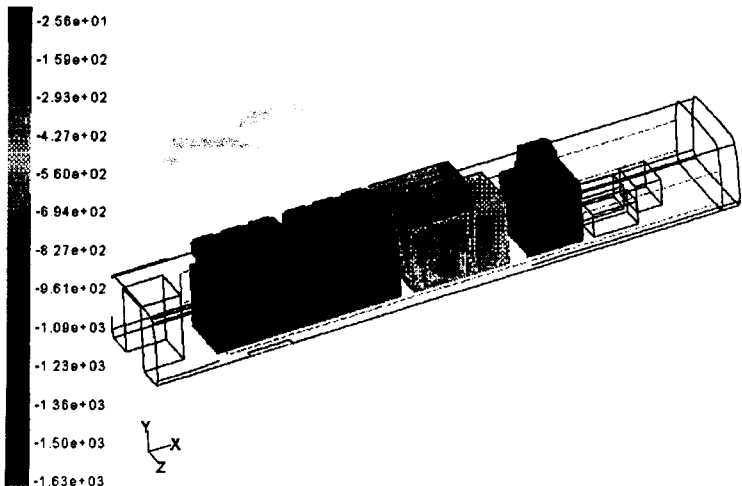


그림 8 Pressure contours(case2)

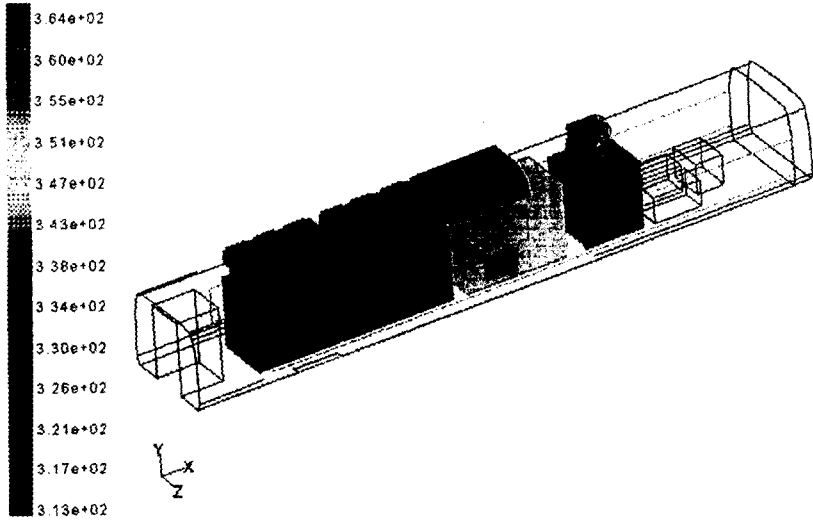


그림 9 Temperature contours(case2)

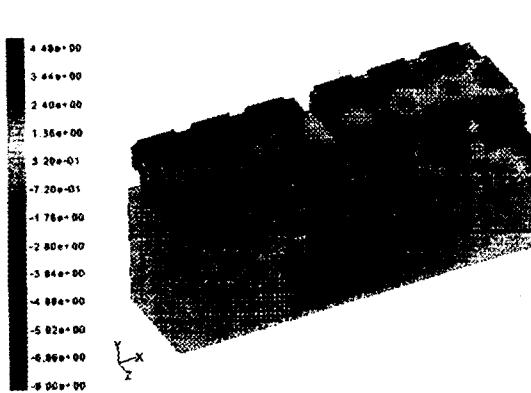


그림 10 Pressure contours of motor block

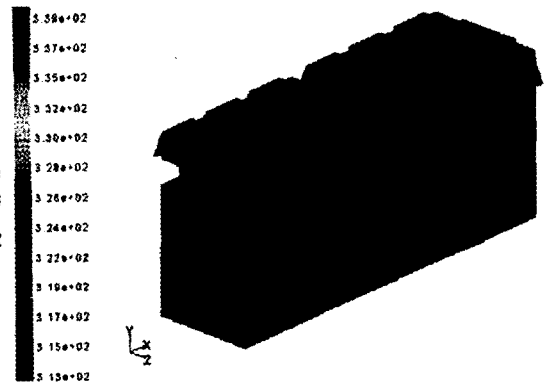


그림 11 Temperature contours of motor block

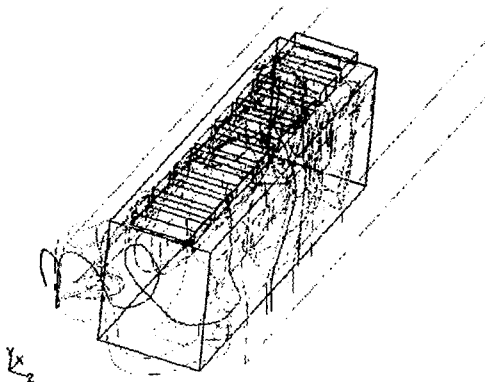


그림 12 Streamlines of motor block

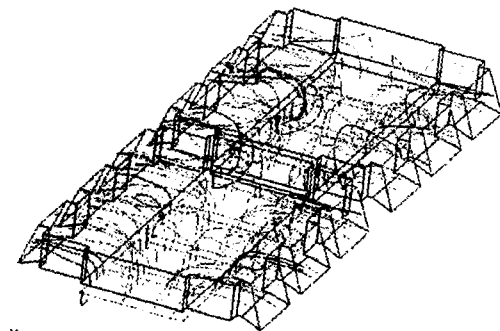


그림 13 Streamlines of duct on the motor block

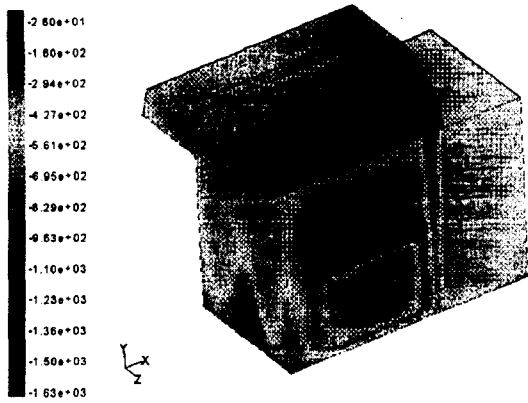


그림 14 Pressure contours of transformer block

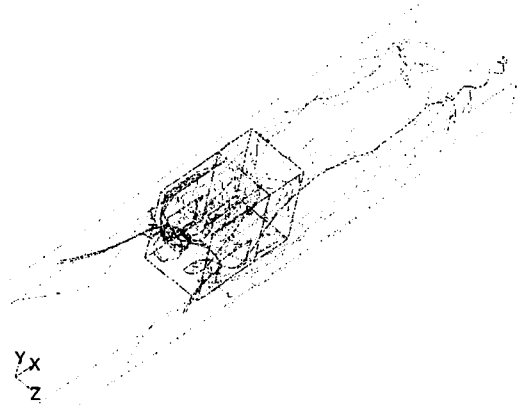


그림 15 Streamlines of transformer block

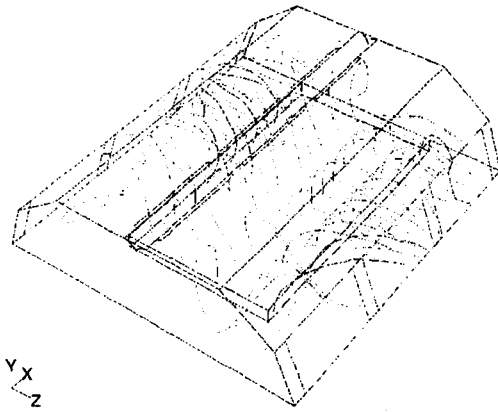


그림 16 Streamlines of duct on the transformer block

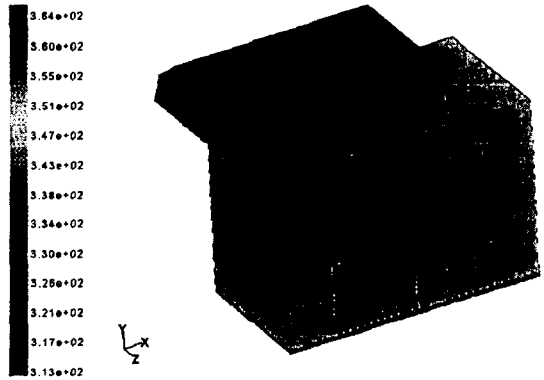


그림 17 Temperature contours of transformer block

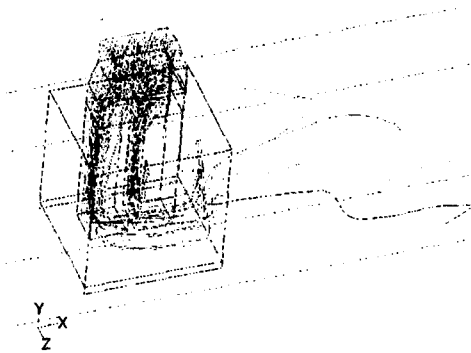


그림 18 Pressure contours of auxiliary block

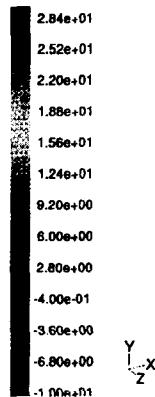


그림 19 Streamlines of auxiliary block



**Case3**

마지막으로 가장 많은 발열이 일어나는 비상제동의 경우에 대하여 전산해석한 결과를 설명하도록 하겠다. 비상제동의 경우는 제동을 시작하여 완전히 정차를 할 때까지의 열 및 유동에 대한 해석을 비정상적(unsteady)으로 해야 하지만 비 정상계산의 경우에 많은 계산 시간이 필요하므로 본 계산에서는 가장 많은 발열이 일어날 것으로 예측되는 350km/h로 주행하다가 처음 비상제동을 하는 순간에 대하여 정상해석(steady state analysis)을 수행하였다. 기본적으로 350km/h로 주행하다가 처음 비상제동을 하는 순간을 모사하기로 하였으므로 유동조건은 case2와 같게 하였고, 그러므로 이번 절에서는 유동에 대한 설명은 생략하도록 하였고 유동에 대한 내용은 case2를 참조하도록 한다.

비상제동시의 발열은 대부분 모터블록에서 일어나며, 모터블록의 출구 덕트의 온도가 평균 520K 정도로 상승하게 된다. 덕트 벽면에서의 온도 분포를 살펴 보면 덕트 뒤쪽벽면에서의 온도가 가장 낮게 나타나고 있으며, 그림 21에 나타난 바와 같이 뒤쪽 덕트의 중간부분에서 약 800K 가까이 까지 상승하고 있음을 알 수 있다.

그림 22와 그림 23에 나타나 있는 변압기 블록과 보조 블록의 온도 분포는 case2에서 설명한 경우와 거의 같으며, 이것은 case2와 유동조건과 온도 경계조건이 같고 모터블록의 발열은 이웃한 블록에 거의 영향을 주지 않기 때문이다.

이상에서 정차시(case1), 350km/h로 주행시(case2), 비상제동시(case3)에 대한 열 및 유동해석을 하였으며, 표 3-표 5에 각 경우에 대한 평균 온도 비교를 하였다. 변압기 블록과 보조 블록의 출구온도는 각 경우가 유사한 결과를 나타내고 있으며, 모터블록의 평균온도는 각 경우 별로 차이하고 있으며, 발열이 가장 큰 비상제동시에 모터블록에 설치된 출구 온도는 약 530K 정도까지 상승하고 있다.

표 3. 모터 블록 출구 온도 비교

	Case1	Case2	Case3
평균온도(K)	313.003	316.2927	527.8029

표 4. 변압기 블록 출구 온도 비교

	Case1	Case2	Case3
평균온도(K)	315.7347	315.8	315.1632

표 5. 보조 블록 출구 온도 비교

	Case1	Case2	Case3
평균온도(K)	330.5515	331.3739	330.2937

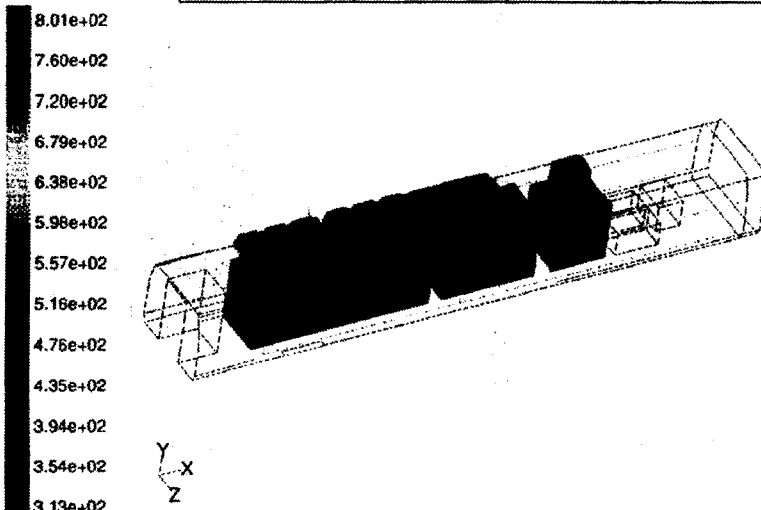


그림 20  
Temperature contours(case3)

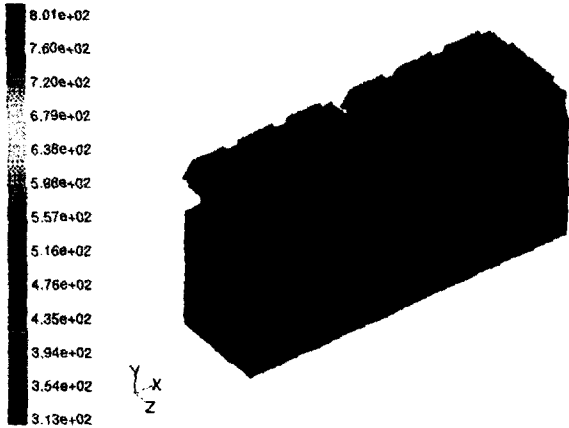


그림 21 Temperature contours of motor block

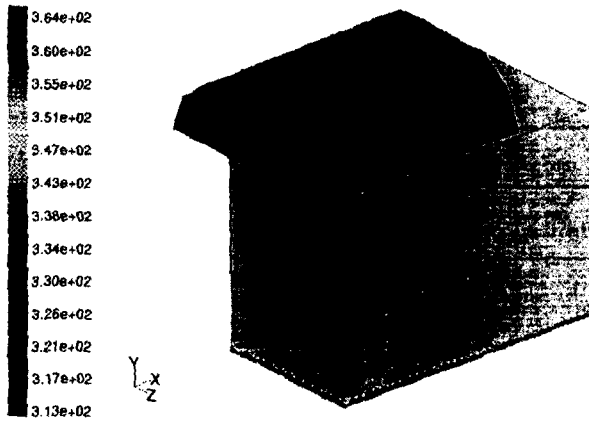


그림 22 Temperature contours of transformer block

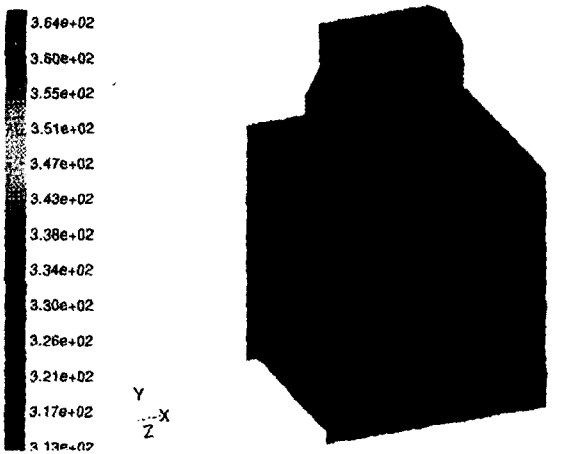


그림 23 Temperature contours of auxiliary block

#### 4. 결론

앞절의 계산 결과로부터 350 km/h 로 주행중 비상제동시(저항제동 사용) 모터블럭 출구의 온도가 528K(약 255℃)로 경부고속전철의 320℃에 비해 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 경부고속전철에 사용된 모터블럭 출구 덕트에 비해 G7 용 덕트 volume 이 약 38 % 증가되었으며, 각 기기의 팬(fan)으로부터 출구로 나가는 유량이 일정하게 경계조건을 설정한데에 그 이유가 있을 것으로 판단된다. 보다 정확한 계산을 위해서는 각 기기에 적용된 팬의 특성곡선뿐 아니라 각 기기의 내부구조의 모델링이 함께 적용되어야 한다.

루프 후드는 알루미늄 압출 소재를 용접 제작한 구조로 모터블럭용 덕트외에는 출구온도에 따른 변형의 영향이 없으며 모터블럭용 덕트는 출구온도를 고려하여 스텐레스 스틸로 제작된다. 동력실 기기의 필요환기량을 위한 덕트의 volume 은 상기의 계산결과에 따른 출구온도를 고려할 때 충분하다 할 수 있다. 향후 동력실에 설치되는 각 기기의 설계를 반영한 상세 모델링을 통해 보다 정확한 해석을 수행하고자 한다.

#### 참고문헌

1. 한국철도차량 (1999), "G7 동력차 개발 1 단계 보고서"
2. 대우중공업 (1998), "G7 동력차 개발 2 차년도 보고서"