

동력객차 동력실 내부의 열유체 유동의 수치 시뮬레이션

A Numerical Simulation of Heat and Fluid Flow in the Motor Block Room of a Motorized Car

김학범*
Kim, Hag-Beom

허재경*
Heo, Jae-Kyung

이기열**
Lee, Ki-Yeol

ABSTRACT

Heat and fluid flow in the motor block room of a motorized car is numerically simulated. The motorized car, composed of a motor block room and a passenger room, supplies additional power to achieve the design speed. A motor block, a transformer, and a fan are equipped in the motor block room. Flow phenomena in the ducts on the motor block and power transformer are investigated. Also, the three dimensional heat and fluid flow in the motor block room is simulated to give a qualitative information of the flow characteristics.

1. 서론

350Km/h의 운행 속도를 목표로 개발되고 있는 한국형 고속전철은 경부고속 전철에 투입되는 K-TGV와는 구성 기기와 형상 등에 있어 여러 가지의 차이점이 존재한다. 특히, K-TGV에 비해 50Km/h의 속도 증가는 공력학적 설계를 위한 차량형상의 고려와, 차체 경량화를 위한 재료의 변경 등을 가져왔다.

동력객차는 50Km/h의 속도 향상을 이루기 위한 보조 동력을 제공하는 차량으로, 객차와 동력차의 역할을 모두 수행하게 된다. 현재 설계중인 동력객차의 동력실은 공력저항을 감소시키기 위하여 동력실의 내부 공간이 K-TGV보다 상대적으로 작게 설계되었다. 또한, 중량 감소를 위한 알루미늄 차체의 채택은 구조강도를 만족시키기 위하여 그릴의 크기를 제한하게 된다. 그 밖에 속도 증가로 인한 동력실 내부의 구성장치들의 변화도 동력실 내부의 유동현상을 K-TGV의 그것과 비교하여 변화를 일으킬 것으로 예상된다.

동력실 내부를 구성하고 있는 주요 기기는 주변압기, 주전력 변환장치(motor block), 그리고 견인 모터(traction motor)에 공기를 공급하는 송풍기(motor ventilation fan) 등으로, 대부분 주변 온도에 의해 성능이 좌우되는 특성을 가지고 있다. 그러므로, 본 연구에서는 동력객차 동력실내의 열유체 유동현상을 시뮬레이션하여 주요 유동현상의 특성을 파악하고 이를 설계에 반영하고자 한다. 동력실 전체 유동현상의 해석에 앞서, 각 기기 상부의 환기덕트를 위치별, 형상별로 유동해석을 통해 검토하여 상부의 덕트 형상을 선정하였다. 이를 토대로 3차원 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 동력실 내부의 열유체 유동현상에 영향을 미치는 주요 인자들을 파악하였다.

* (주)한진중공업 연구원, 비회원

** (주)한진중공업 과장, 비회원

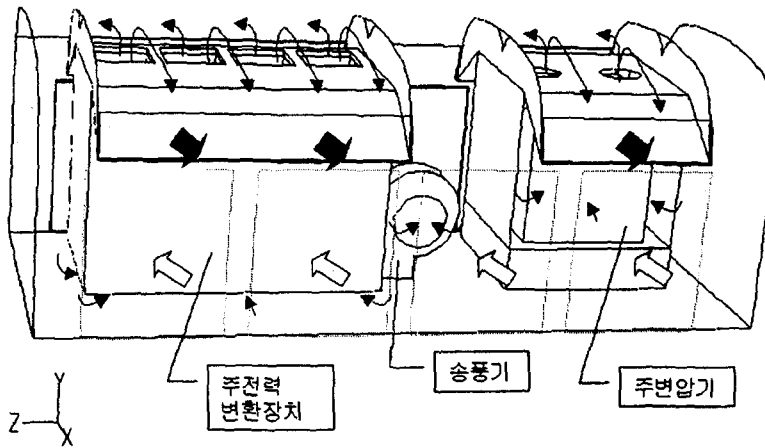


그림 1. 동력실의 공기 흐름도

2. 유동해석

현재 설계가 진행중인 동력객차의 동력실에 대하여 유한체적법을 사용하는 상용 소프트웨어인 Fluent/UNS를 이용하여 정지상태에서의 유동장을 해석하였다. 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 격자계는 육면체로 구성된 비정렬 격자계를 사용하였다. 지배방정식을 비롯한 수치계산 방법에 관한 자세한 내용은 참고문헌 1에 실려있다.

2.1 동력실 공기흐름 계동

동력실의 구성 기기는 크게 주전력 변환장치, 주변압기, 송풍기 등으로 구성된다. 주요 열원은 주전력 변환장치와 주변압기로 이들을 냉각시킬 수 있도록 공기를 원활히 공급 및 배출시켜야 한다. 공기의 유입구와 출입구는 그림 1에서와 같이 동력실의 좌우측 하부에 있는 그릴로부터 공기가 유입되고, 상부의 그릴을 통해 배출된다. 유입된 공기는 주전력 변환장치의 하부를 통해 4개의 stack을 거치면서 주전력 변환장치를 냉각시킨 후 stack 상부의 fan을 통해 덕트를 거쳐 유출된다. 주변압기는 양측면의 라디에이터를 통해 냉각되며 상부의 fan과 덕트를 거쳐 외부로 유출된다. 송풍기는 견인모터를 냉각시키기 위한 공기를 공급하는 역할을 한다.

2.2 모델링 및 계산조건

동력실 내부 구성 기기들의 복잡한 형상은 계산결과에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 단순화시켜 모델링 하였다. 주전력 변환장치의 stack은 인버터부와 컨버터부로부터 배출된 냉각핀들을 포함하고 있으나, 모델링의 편의를 위해 porous media로 stack을 가정하여 모델링 하였다. 주전력 변환장치에는 배기를 위한 fan 경계조건을 4개의 stack 상부에 부가하였다. 주변압기는 좌우측에 냉각용 라디에이터 경계조건을, 상부에는 두 개의 fan 경계조건을 부가하였다. 송풍기는 K-TGV의 자료를 참고하여 경계조건과 크기, 형상 등을 설정하였다. 동력실 좌우측의 그릴은 porous jump 경계조건을 사용하였다. 각 구성 기기들과 동력실의 경계면의 재질은 물성치와 두께 등이 정확히 결정되지 않아 단열벽 경계조건을 사용하였다.

2.3 계산결과

주전력 변환장치 상부에 설치된 환기덕트의 형상을 유입 경계 상부 중앙부분에 분리벽이 없는 경우(a), 직선 분리벽이 설치된 경우(b), 곡률진 분리벽이 설치된 경우(c)로 달리하여 각각 수치해석을 수행하였다. 그림 2는 세 가지 종류의 환기덕트에 대한 압력분포도로, (a)의 경우에는 유입경계 중앙부분에서 정체영역이 발생하고 다시 좌우측 출구로 압력이 감소되는 것을 볼 수 있다. (b)의 경우 역시 분리벽 중앙부분에서 정체영역이 발생하며 다시 좌우측 출구로 압력이 감소하지만, 분리벽의 압력분포가 불균일하게 나타나고 있다. (c)의 경우에는 곡률진 분리벽을 따라 압력이 고르게 분포되어 있음을 볼 수 있다. 전반적으로 덕트의 종류별로 압력분포에는 약간의 차이가 있으나 정량적으로는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 도표 1은 (a)의 압력손실을 1로 보았을 때의 (b), (c)덕트의 압력손실을 상대적인 값으로 나타내고 있다. 덕트(c)가 상대적으로 압력손실이 적으나 큰 차이는 보이지 않고 있다. 이는 유입속도가 저속이기 때문에 덕트의 분리벽이 유동의 압력손실을 감소시키는 데 크게 기여하지 않음을 예측할 수 있다.

도표 1. 주전력 변환장치 상부 환기덕트의 압력손실

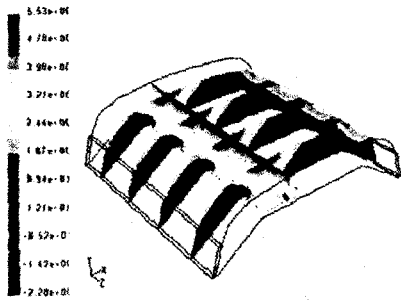
	덕트 (a)	덕트 (b)	덕트 (c)
압력손실	1.000	1.019	0.981

그림 3은 주변압기 상단부분의 환기덕트에 대한 세 가지 종류별 압력분포도이다. 환기덕트는 주전력 변환장치의 환기덕트와 마찬가지로 중앙부분에 분리벽이 없는 경우(a), 직선 분리벽이 설치된 경우(b), 곡률진 분리벽이 설치된 경우(c)이다. (a)의 경우 유입경계의 상부 중앙영역에서 정체영역이 발생하고 다시 좌우측 출구로 압력이 대기압으로 감소되는 것을 볼 수 있다. (b)의 경우 역시 분리벽 중앙부분에서 정체영역이 발생하고, 좌우측 출구로 압력이 감소하나 (a)에 비해 압력 정체압이 크게 감소된 것을 알 수 있다. (c)의 경우 곡률진 분리벽을 따라 압력이 고르게 분포되었음을 볼 수 있다. 도표 2는 (a)의 압력손실을 기준으로 (b), (c)덕트의 압력손실을 상대적인 값으로 나타내고 있다. 덕트(a) 보다는 (b)가 (b)보다는 (c)가 압력손실이 상대적으로 작게 나타나는데, 이는 주변압기 상부 덕트에서는 덕트 분리벽이 유동에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

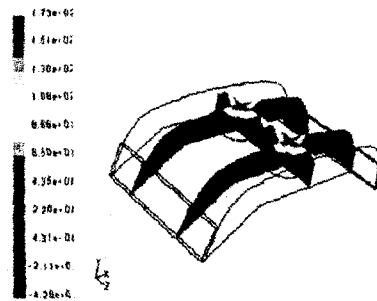
도표 2. 주변압기 상부 환기덕트의 압력손실

	덕트 (a)	덕트 (b)	덕트 (c)
압력손실	1.0	0.585	0.383

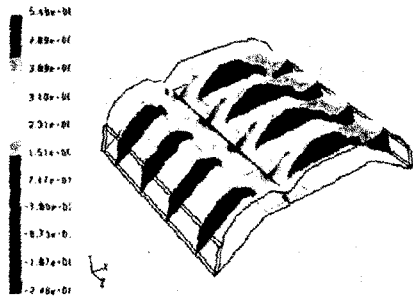
그림 4, 5, 6은 세 가지 덕트중 가장 효율이 좋은 곡률진 덕트를 설치한 동력실 내부의 유동을 해석한 결과이다. 그림 4는 동력실 내부의 압력분포도로서 주전력 변환장치의 상부 덕트보다 주변압기의 상부덕트에서 높은 압력을 보이고 있다. 주전력 변환장치의 stack의 압력은 음압으로 크게 감소하다가 다시 팬에 의해 회복되는 것을 확인 할 수 있다. 주변압기의 내부는 주전력 변환장치에 비하여 낮은 음압으로 흡입되지만 외부로는 높은 압력으로 공기가 배출된다. 이는 변압기의 공기유입 부분이 전 좌우측 면적의 약 2/3를 차지하기 때문에 큰 압력손실 없이 공기 유입이 원활하게 되는 것으로 사료된다.



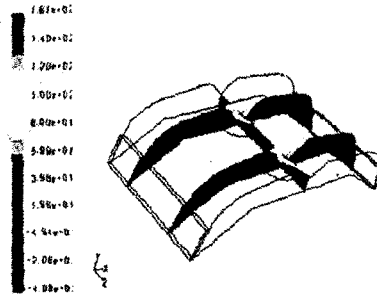
(a)분리벽이 없는 경우



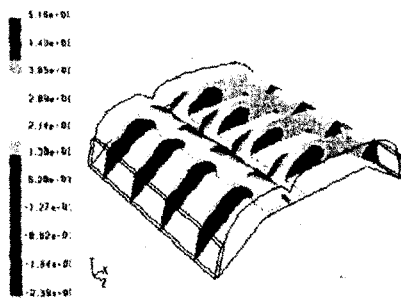
(a)분리벽이 없는 경우



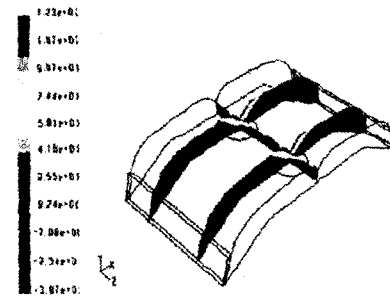
(b)직선 분리벽이 있는 경우



(b)직선 분리벽이 있는 경우



(c)곡률진 분리벽이 있는 경우



(c)곡률진 분리벽이 있는 경우

그림 2. 주전력 변환장치 상부덕트의 압력분포도

그림 3. 주변압기 상부덕트의 압력분포도

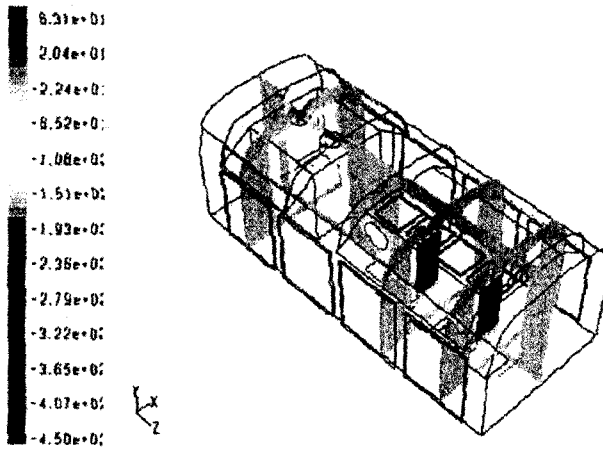


그림 4 동력실 내부의 압력분포도

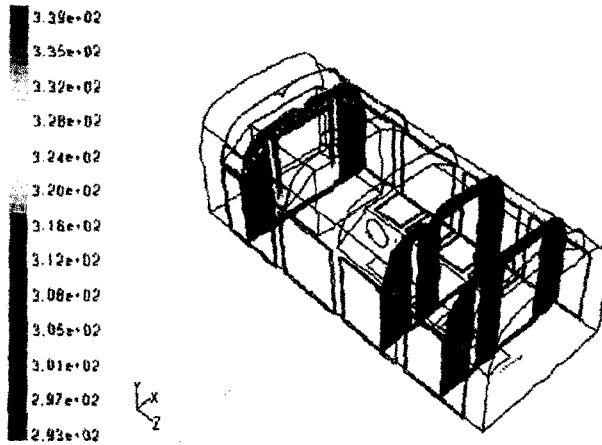


그림 5 동력실 내부의 온도분포도

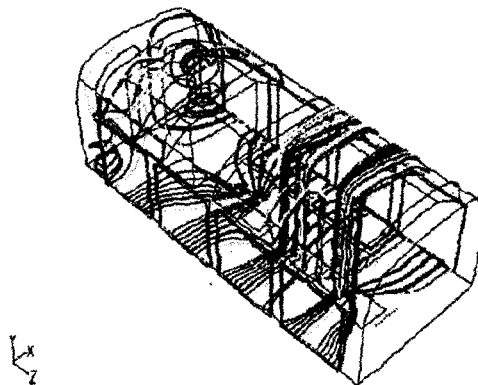


그림 6. Path lines

그림 5는 동력실 내부의 온도분포도로 주전력 변환장치를 냉각시킨 후 유출되는 공기보다 주변압기의 라디에이터를 통과한 공기의 온도가 크게 상승되고 있음을 볼 수 있다. 그림 6은 그릴 하부에서 유입된 공기의 path line들을 나타낸 것이다. 동력실 내부에서 유입된 공기가 선회하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 동력실 중간에 설치된 송풍기에 의해 주변의 공기흐름이 영향을 받고 있으나 도표 3.에서와 같이 흡입되는 풍량의 정량적인 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

도표 3. Mass flow rates

Fan	주전력 변환장치				주변압기	
	fan1	fan2	fan3	fan4	fan1	fan2
mass flow rate	1.000	0.998	0.997	0.999	1.000	0.995

※ 두 기기 모두 각각의 fan1을 기준으로 나타낸 값임
fan의 번호는 송풍기에서 멀어질수록 증가함

3. 결론

본 계산을 통해 현재 설계중인 동력객차의 동력실 내부 환기덕트의 형상별 유동 및 압력분포를 확인하여 그 중 효율이 좋은 환기덕트를 동력실 설계에 반영하였다. 또한, 3차원 동력실 내부 열유체 유동 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 주전력 변환장치의 상부 덕트는 분리벽의 형상 및 유무에 크게 영향을 받지 않았으며, 주변압기의 경우에는 분리벽의 영향이 크게 나타나고 있다.
- 동력실 내부의 송풍기에 의한 영향으로 주변 공기흐름이 영향을 받고 있다.
- 동력실 내부에 선회류가 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

실제 각 부품별로 개발될 최종 제품이 결정되지 않아 정량적인 정보의 제공보다는 정성적인 결과 검토를 통해 동력실 개념설계에 대한 기본방향을 설정할 수 있었다. 향후 그릴의 크기 및 위치 설계, 선회류 등을 포함한 내부유동 현상을 고려한 내부공간의 설계, 효율적인 공기흐름을 위한 덕트의 설계 등을 위해서는 실험과 병행하여 정도 높은 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. FLUENT INC., "FLUENT/UNS & RAMPANT User's Guide", 1997.
2. 이규택, 오인택 편집, 한국고속철도 "고속철도 차량시스템 엔지니어링 제1권", 1996. 3.
3. 한국생산기술연구원, "고속전철기술개발사업 차량분야 상반기 연구결과 발표자료 I. <차량시스템 중분야>", 1998. 6.
4. (주)한진중공업, "동력객차 차량개발 (1차년도 연차보고서)", 1997. 10.
5. (주)한진중공업, "동력객차 시스템 엔지니어링 기술개발 (1차년도 연차보고서)", 1997. 12.
6. 현대중공업(주) 중앙연구소, "주전력 변환장치개발 (1차년도 연차보고서)", 1997. 10.
7. 현대중공업(주), "주 변압기 개발 (1차년도 연차보고서)", 1997. 10.