

추진시스템 냉각유로의 주행풍 유동에 대한 수치해석적 연구

Study on Numerical Analysis for Ram-Air Flow of Cooling Duct on the Propulsion System

유성열* 조정래** 조태식** 김철주***
Ryoo, Seong-Ryoul Kim, Sung-Dae Yim, Kwang-Bin Kim, Chul-Ju

ABSTRACT

The cooling technology of power conversion semiconductors in the propulsion system for the HEMU(High Electrical Multi Unit) are applied in water cooling method and phase change method such as the immersed type and the heat pipe type. Both of cooling systems need a condenser and a fan through forced wind to emit that is radiated heat from electric power conversion semiconductor(IGBT) stack effectively, now in the case of Japanese Fastec 360S, is using ram-air that is flowed in establishing cooling passage to propulsion system for cooling of condenser. In this research, it is that achieved the computing numerical analysis using ADINA of commercial program to examine flow characteristics and pressure distribution of ram-air for a condenser in cooling passage.

1. 서 론

동력분산형 고속전철용 추진시스템 내부 대용량 전력변환반도체의 냉각에는 침전방식(Immersed Type), 히트파이프식(Heat Pipe Type) 등과 같은 상변화 냉각방법과 수냉각방식(Water Cooling Type) 등을 적용할 수 있다. 이 들 냉각방식은 전력변환반도체(IGBT) 스택(stack)으로부터 방열되는 열을 효과적으로 방출하기 위한 방열기가 필요하며, 방열기로 전달된 열을 외부로 배출하기 위해 일반적으로 송풍 팬을 설치하는 강제 대류 방식을 사용하거나, 주행풍(ram-air)을 이용한 자연 대류방식이 적용될 수 있다. 그러나 차후 설계 될 차세대 고속전철의 경우 목표 시험속도가 400Km/h인 점과 주요 전장품들(Main Circuit Devices)이 동력차 객실 하부에 설치되는 공간적 문제를 고려한다면, 냉각장치에 강제 송풍 팬을 이용한 냉각은 냉각장치의 중량증가와 소음증가의 원인이 될 수 있다.

현재 시험운행 중인 일본의 Fastec 360S(6M2T)의 경우, 그림 1에 보는 바와 같이 2대의 동력차를 하나의 유닛(unit)으로 편성하여 A형식은 주행풍을 이용한 수냉각장치, B형식은 강제 송풍 팬과 상변화장치, C 형식은 강제 송풍 팬과 수냉각장치를 장착하여 시험운행

* 유성열, 성균관대학교 대학원, 기계공학부, 정회원
E-mail : luciferz@skku.edu
TEL : (031)290-7489 FAX : (031)290-7489
** 성균관대학교 대학원, 기계공학부
*** 성균관대학교, 기계공학부

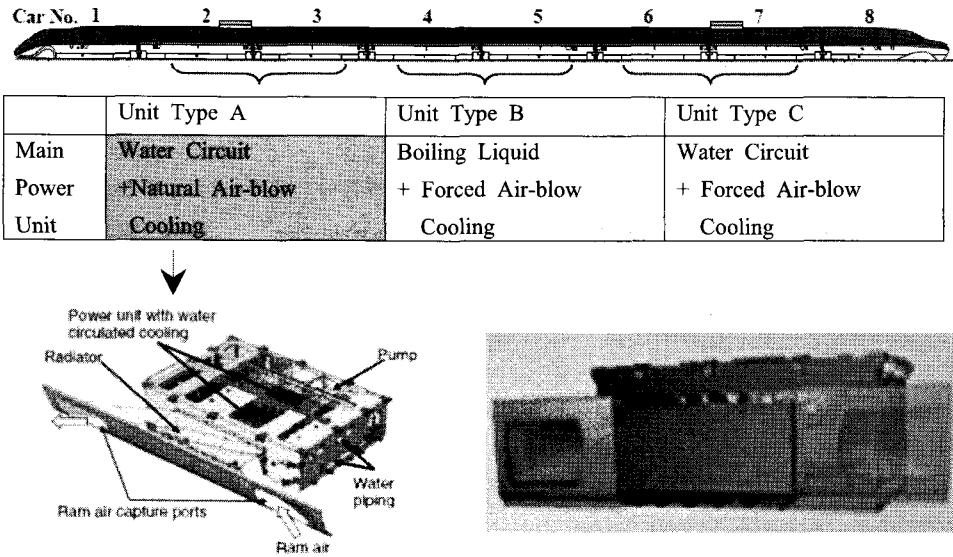


그림1. Fastech 360(6M2T) 시험편성 및 추진시스템과 송풍유로

하고 있다.

본 연구에서는 차세대 고속전철 추진시스템의 냉각장치의 송풍방법을 주행풍을 이용하기 위하여, 동력차를 기초 모델링하였으며, 이 동력차 하부에 장착되는 추진시스템과 송풍유로의 공간적 크기와 배치를 검토하였다. 또한 고속으로 운행되는 전철의 측면 주행풍의 유입 속도와 압력분포를 예측하기 위하여 전산수치해석을 수행하였다.

2. 모델링 및 해석조건

2.1 추진시스템 및 냉각유로

차세대 고속전철 사업의 차량 시스템 사양서로부터 주어진 동력차의 기본적인 수치를 기초로 동력차를 모델링한 것이 그림 2이다. 향후 개발될 차세대 고속전철의 동력차 하부에는 추진시스템이 두 조 편성으로 계획하고 있으며, 그림에 보는 바와 같이 추진시스템의 설치 허용공간 및 송풍유로의 예상치수는 동력차와 대차의 높이를 고려하여 가정하였다.

표 1. 동력차와 대차 치수 및 추진시스템 공간과 송풍유로 예상 치수

동력차(m)		대차(mm)		추진시스템 공간(mm)		송풍유로(mm)	
길이(L)	23.5	길이(L)	4000	길이(L)	7450	길이(L)	7450
폭(W)	3.1	폭(W)	920	폭(W)	2300	폭(W)	400
높이(H)	3.7	높이(H)	600	높이(H)	580	높이(H)	400
		고정	3000			덕트 폭	350
		축간거리				입출구 단면(mm)	
		레일폭	1500			길이(L)	900
		차륜경	860			폭(W)	610
		차륜폭	280				

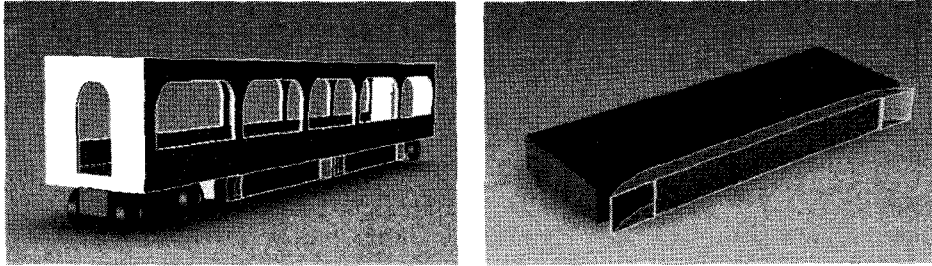


그림 2. 차세대 고속전철 예상 동력차 형상 및 추진시스템 허용공간과 송풍유로

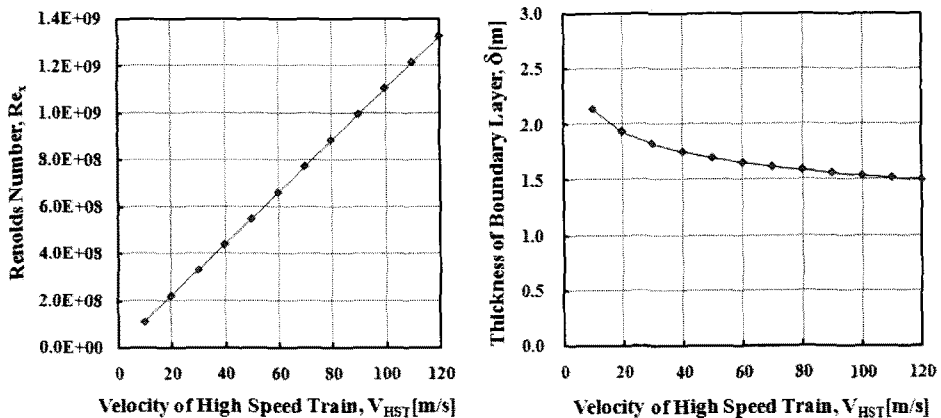
2.2 해석조건

최대 시험속도가 400km/h인 차세대 고속전철이 시험운행 할 경우, 측면 냉각유로로 유입되는 주행풍에 대해 검토하기 위한 수치해석을 하기 위해서는 차체 측면의 속도경계층이 모델링 되어야 한다. 본 연구에서는 속도 경계층을 계산하기 위하여 다음 식을 적용하였다.

$$\frac{\delta}{x} \approx \frac{5.0}{Re_x^{1/2}} \quad : \text{층류, Blasius(1908)} \quad (1)$$

$$\frac{\delta}{x} \approx \frac{0.16}{Re_x^{1/7}} \quad : \text{난류} \quad (2)$$

여기서, δ 는 속도 경계층 두께, x 는 유동길이이고, Re_x 는 Reynolds 수이다. 이 식을 이용하여 계산한 Reynolds 수 및 측면 경계층 두께 변화를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 고속전철의 운행속도 약 30~400km/h로 가정할 경우, 상대적인 공기 유속은 약 10~110m/s이고, Reynolds 수는 $1.1 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^9$ 에 해당되는 고속 난류유동이 되며, 식 (2)를 통해 계산된 차체 측면의 공기 유동 경계층은 속도가 증가할수록 약 1.5m에 수렴하는 것을 알 수 있다.



(a) Reynold 수 변화

(b) 차체 측면 경계층 두께 변화

그림 3. 고속전철 속도변화에 따른 Reynold 수와 차체 측면 경계층 두께

이 결과를 바탕으로 차체 측면의 공기유동 경계층을 1.5m로 하였으며, 차체 측면의 공기유

동 흐름을 자유흐름으로 모사하기 위하여 이 경계층에 10배에 해당하는 공간을 유동공간으로 가정하였다. 그림 4는 고속 난류 유동 해석을 지원하는 상용해석프로그램인 ADINA를 이용하여 송풍유로 및 공기 유동공간을 2D로 모델링하고, mesh 작업을 수행한 것이다. 좌측에 2개의 송풍유로를 구성하였으며, 이 측면 벽은 점착조건(no-slip)을 적용하였고, 우측 측면은 비점착 조건(slip)으로 하였다. 하단 면은 공기가 유입되는 입구로 지정하였으며, 공기 유입 속도를 각각 100~400km/h 범위에서 100km/h씩 증가하여 해석을 수행하였다.

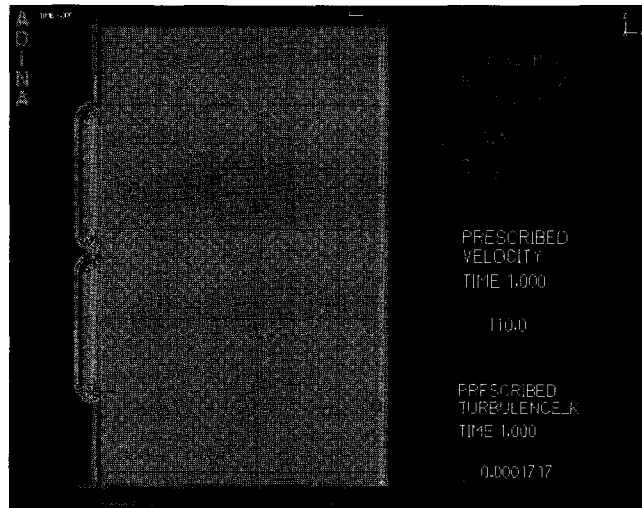
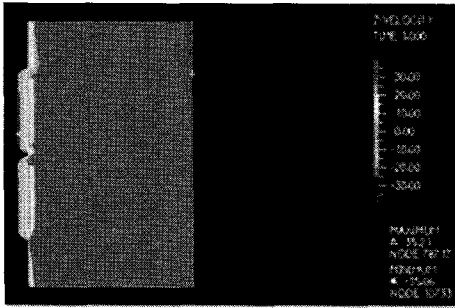


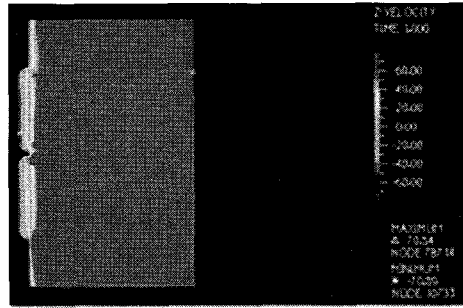
그림 4. 차체 측면 경계층을 고려한 측면 주행풍 해석 모델

3. 해석결과 및 고찰

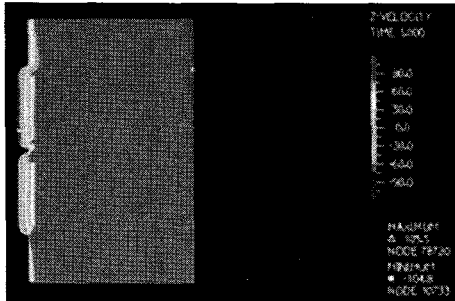
차체 측면 주행풍의 냉각유로 공기 유입속도와 압력변화를 그림 5와 6에 나타내었다. 그림에 보는 바와 같이 공기 흐름이 시작되는 첫 번째 냉각유로와 두 번째 냉각유로의 속도가 다소 차이가 남을 알 수 있다. 이는 첫 번째 냉각유로로 유입된 공기의 후류의 토출방향이 다음 유로에 유입되는 공기의 흐름에 영향을 미치기 때문이다. 실제 여러 대의 객차가 연결되어 있는 상황에서는 두 번째 유로의 유동형태가 냉각유로 내부에서 발생할 것으로 보이며, 또한 냉각유로 내부에 냉각장치 열교환용 방열기가 놓일 경우 유동 저항이 증가할 것으로 보인다. 이 가정을 토대로 관 내부 평균 유속을 두 번째 유로의 중앙부로 가정하고, 100km/h, 200km/h, 300km/h와 400km/h로 입력 조건을 대입하였을 때 유로 내부 평균유속은 각각 11.5m/s, 21.1m/s, 33.2m/s와 39.9m/s로 해석되었으며, 압력분포는 -300kPa, -1200kPa, -2700kPa와 -4800kPa로 해석되었다, 이 결과를 그림 7에 나타내었으며, 공기 유입속도는 고속전철의 주행 속도와 선형적으로 비례하고 압력변화는 $y = 8E-06x^3 - 0.3906x^2 + 0.1063x - 1.7288$ 의 함수로 변화함을 알 수 있다.



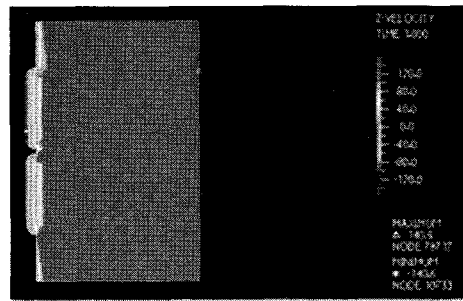
(a) 100km/h



(b) 200km/h

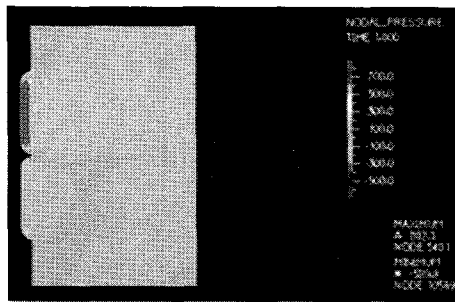


(c) 300km/h

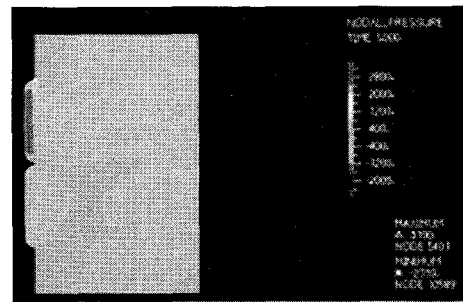


(d) 400km/h

그림 6. 측면 주행풍의 냉각유로 유입 속도 변화 해석결과

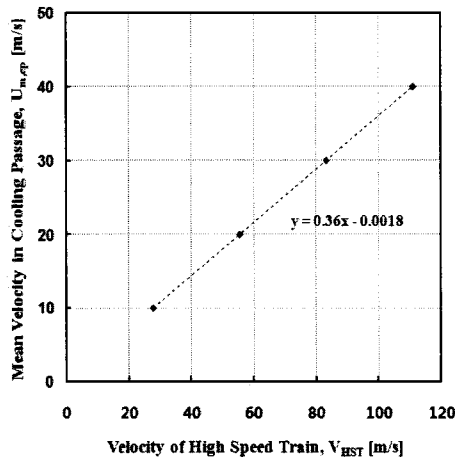


(c) 300km/h

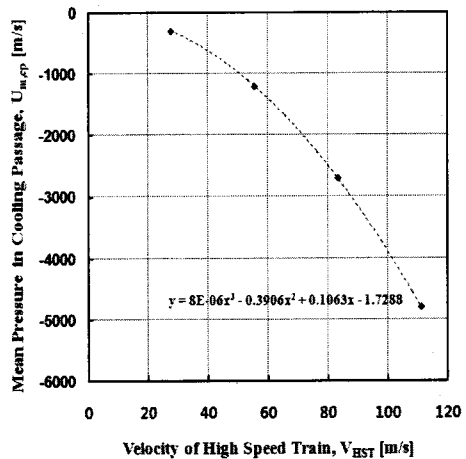


(d) 400km/h

그림 6. 측면 주행풍의 냉각유로 유입 속도 변화 해석결과



(a) 공기 유입속도 변화



(b) 압력 변화

그림 5 측면 주행풍의 냉각유로 유입 속도 및 압력 변화

4. 결론

본 연구에서는 차세대 고속전철 추진시스템의 냉각장치의 송풍방법을 주행풍을 이용하기 위하여, 동력차를 기초 모델링하여 이 동력차 하부에 장착되는 추진시스템과 송풍유로의 공간적 크기와 배치를 검토하였다. 수치해석 결과 고속전철 주행시 측면 주행풍은 차량속도에 비례적으로 냉각유로에 유입되고 냉각유로의 압력은 주변 압력보다 상대적으로 낮은 저압상태가 됨을 확인할 수 있었다. 다만 본 수치해석은 냉각유로에 방열기가 배치되어 있지 않은 상태의 해석이나 향후 방열기가 장착된 냉각유로 해석이 수반되어야 할 것이다. 그리고, 해석결과에서 나타낸 바와 같이 동력차 하부에 장착되는 추진시스템 설계 시 냉각유로의 형상설계와 배치에 대한 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도 A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Takashi Murase et. al, "Power Semiconductor Device cooling system Using Electrical Insulated Heat Pipe for Rolling Stock", Furokawa Review, No 12, pp. 82~93, 1993.
2. Matase, T., Endo, T., Koizumi., "Heat pipe Cooling System for Thyristors", 5th International Heat pipe conference, Tsukuba, Japan, May, pp. 14~18, 1984

3. Takashi Endo, "Challenge of Fastech 360" , JR EAST Technical Review-No.8
4. Yoshitaka Yasui and Ryosuke Furuta, "Development of high performance main electrical circuit system" , JR EAST Technical Review-No.8
5. "Theory and Modeling Guide Volume III: ADINA CFD & FSI" , Report ARD 08-6, ADINA R&D, INC., February, 2008
6. "ADINA User Interface Primer" , Report ARD 08-6, ADINA R&D, INC., February, 2008
7. Frank M. White, "Fluid Mechanics, 5th edition" , McGraw-Hill Korea, Inc., 2003