

# 바이 모달 트램의 전기 제어 장치용 냉각장치에 관한 연구

김창욱\*, 김혜수\*, 송정일#

(#, \* 창원대학교 기계공학과)

## A Study on the Electronically Controlled Cooling system for Bimodal Tram

Chang-Uk Kim\*, Hea-Soo Kim\*, Jung-Il Song#

(Received 15 July 2014; received in revised form 7 August 2014; accepted 11 August 2014)

### ABSTRACT

In this study, the first and second electronically controlled cooling systems for a bimodal tram were developed. The performance characteristics of the cooling systems were assessed experimentally with actual and identical conditions, and a simulation was run using ANSYS Fluent. The results of the experimental and FEA method were standardized. In order to confirm the reliability of the experimental method, the experiment was carried out by a testing institution. The low-volume flow-rate condition was found to be better, but the cooling system performed in a minimal condition. Therefore, it is important to find the optimum performance levels. The cooling system equipment was revised to determine the optimized design parameters, after which the cooling performance levels increased at the radiation area. Specifically, with a greater fan diameter. Through this study, the newly developed cooling system will be reevaluated after being mounted on an actual bimodal tram. This will lead to a completely domestically produced bi-modal tram cooling system.

**Key Words** : Bimodal tram(바이모달 트램), Cooling(냉각), Analysis(유한요소해석), Fluent(플루언트)

### 1. 서 론

현재 바이모달 트램은 압축천연가스(CNG)와 연료전지를 전원으로 사용하는 하이브리드형 바이모달 트램을 개발하고 있는 중이다. 일반 도로에서

는 천연가스를 이용하는 엔진으로 달리다가 전용선로에서는 전기로 구동하는 모터로 동력을 바꾼다. 또 지하도로나 터널에서는 배기 가스가 나오지 않는 모터를 사용한다. 이러한 기술들은 교통분야에서 환경문제를 최소화함과 동시에, 미래환경과 경제산업을 선도하는 기술들이며, 세계적 수준의 우리 정보기술(IT)과 통신기술을 이용한 지능형 교통수단인 바이모달 트램은 2010년 시험차량이 제작돼 현재 성능 시험 중에 있다. 전용궤도와 일반도로를 모두 주행할 수 있는 바이모달 트램은 현재 CNG 하이브리드형 구동시스템으로 개발중이며, 하이브리드형 바이모달 트램에는 하

\* School of Mechanical Engineering, Changwon National University.

# Corresponding Author :

School of Mechanical Engineering, Changwon National University.

E-mail : jjsong@changwon.ac.kr

이브리드 제어장치를 비롯한 인버터와 AUC, RCU, DCU가 사용된다. 이들 유닛은 가동중 고온의 열이 발생하고, 이 열을 냉각하기 위한 쿨링 장치가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 바이모달 트랩에 사용되는 전기제어장치의 냉각을 위한 냉각장치의 개발방법과 개발제품의 개선 방향을 제시한다. 냉각 장치는 A Type과 B Type으로 두 종류의 냉각장치를 설계하고, 유한요소법을 이용하여 냉각장치의 성능 평가를 실시하고, 시제품을 제작하여 성능평가를 실시하여 해석 결과와 성능평가 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 바이모달 트랩 냉각장치 설계

### 2.1 바이모달 트랩 냉각장치 모델링

바이모달 트랩의 냉각장치의 전체 구조에 대한 모델링은 Solid Edge ST4를 이용하여 실시하였다. 냉각장치에 사용되는 주요부품은 크게 4가지로 나뉘지는데, 유체(냉각수)가 순환하도록 하는 순환펌프, 내부로 순환하는 물과 공기의 접촉이 원활하도록 닿는 면적을 넓혀주는 라지에이터, 외기를 순환시켜 라지에이터의 물을 냉각 시키도록 하는 팬, 이 시스템을 작동시키게 하는 전원공급부 등으로 이루어져 있으며, 순환펌프를 통해 흐르는 냉각수가 팬의 회전에 의하여 냉각되는 시스템으로 이루어져 있다.

A type 냉각장치는 Fig. 1과 같이 내부의 공기가 냉각장치 밖으로 빠져 나가는 형태로 작동되며, 2개의 라지에이터 구성되어져 내부로 흐르는 냉각수는 순환펌프에 의해 순환되며, 펌프의 유량과 팬의 회전속도는 전기제어를 통하여 조절되는데 펌프의 유량의 경우 60~75l/min까지 가능하고, 팬의 경우 최대 2400rpm의 회전속도를 낼 수 있도록 설계 하였다.

Fig. 2는 B type 냉각장치로 일체형 라지에이터로 구성되며, 외부의 공기가 냉각장치 안으로 들어오면서 라지에이터에 직접적으로 바람을 일으키는 형태로 설계되며, 구동방식은 A Type과 동일한 방식과 사양으로 설계하였다. Table 1은 바이모달 트랩 냉각장치 A, B type의 사양을 비교한

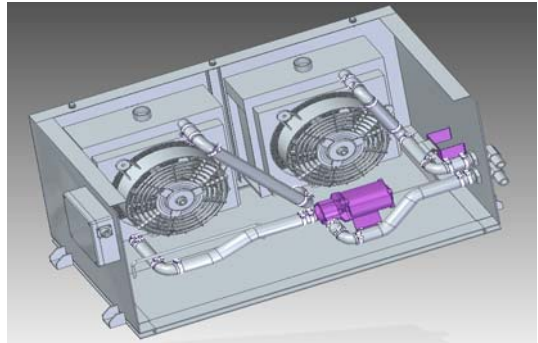


Fig. 1 Modeling of A Type Cooling System

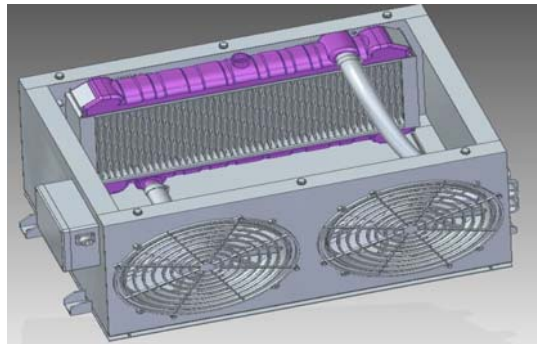


Fig. 2 Modeling of B Type Cooling System

Table 1 Comparison of A, B Type Cooling System

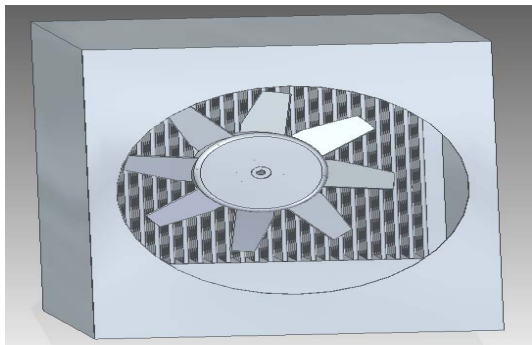
	A Type	B Type
Size(mm)	932.5×500×447	790×500×447
Weight(kg)	73	54
Fan Diameter	230	320
Velocity direction	inside-> outside	outside-> inside
Pump	Circulating Pump	
Radiator	2	1

것이다.

### 2.2 바이모달 트랩 냉각장치의 성능평가

바이 모달 트랩의 냉각장치의 유한요소해석은 ANSYS Fluent를 이용하여 실시하였으며, 유동장

은 ANSYS Workbench 내 Design Modeler를 이용하여 해석에 필요한 개별부품을 Design Modeler 내에서 해석에 불필요한 부분은 제거하고, 재조립을 하는 방식으로 모델링을 하여 냉각장치의 온도 분포를 도출하기 위하여 정상 상태 열 유동해석을 수행하였다. A type 모델은 사용된 경계조건 중 유량은 라지에이터가 두 개로 나뉘져 있기 때문에 Fig.3 과 같이 한 개의 라지에이터를 이용하여 유량을 절반 값을 대입하고, B Type 냉각장치는 라지에이터가 일체형으로 A type와 동일한 해석을 위해 Fig. 4와 같이 1/2 모델을 이용하였다. 모델링한 냉각장치는 ANSYS Workbench 에 Import시켜 격자 생성 후 FLUENT 환경에서 경계조건은 Table 2, 냉각수와 대기에 대한 물성 Table 3와 같이 정의하여 유동해석을 실시하였다.



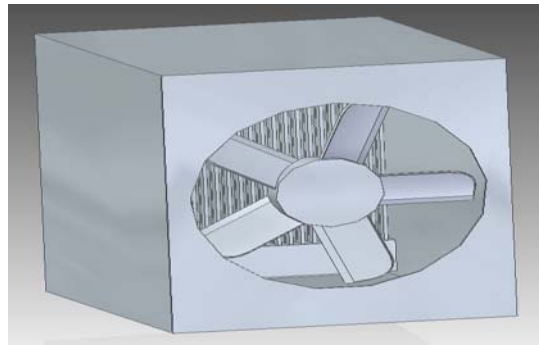
**Fig. 3 Simple Modeling of A Type Cooling System**

**Table 2 Boundary Conditions**

Boundary Conditions	Value
Inlet Temperature(°C)	60
Outdoor Temperature(°C)	40
Fan Speed(rpm)	2400
Volume flow rate(l/min)	60 / 65 / 70 / 75
Turbulence(%)	5
Hydraulic Diameter of water(m)	0.027
Hydraulic Diameter of Air(m)	0.34

**Table 3 Material Properties of Water and Air**

Conditions	Water	Air
Density(kg/m <sup>3</sup> )	998.2	1.225
Specific Heat (J/kg-K)	4182	1006.43
Thermal Conductivity (w/m-K)	0.6	0.0242



**Fig. 4 Simple Modeling of B Type Cooling System**

### 2.3 바이모달 트램 냉각장치의 해석결과

바이모달 트램의 냉각장치의 출·입구 온도 분포를 도출하기 위하여 정상 상태의 열 유동해석을 수행하였다. 냉각수의 유입온도를 60°C이며, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 입구를 통하여 고온의 냉각수가 유입되어 라지에이터를 통과한 후 출구로 빠져나가는 것을 확인 할 수 있었다. Table 2,3의 경계 조건에서 볼 수 있듯이 팬을 2400rpm으로 회전시켰을 때 발생하는 공기의 강제대류가 일어나며, 팬에 의해 발생하는 공기의 평균 유속은 약 10m/s 정도로 관찰된다.

유동흐름에 따라 라지에이터 내부로 흐르는 고온의 물이 냉각되는데, 이때 열이 빠져나가는 모습을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 입구로 들어오는 물의 온도는 경계조건에서 입력한 60°C의 온도를 통해 들어오고 아래 그림은 순환하는 동안 열이 팬이 강제대류를 일으키는 방향으로 빠져나가고, Fig. 7은 최종적으로 순환된 냉각수가 나왔을 때의 온도인 330.9K(57.75°C)로 약 2.25°C의 온도 감

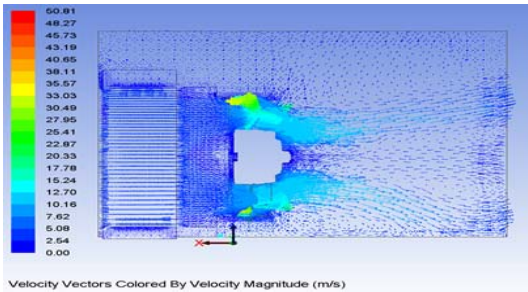


Fig. 5 A Type Cooling System Fluid distribution

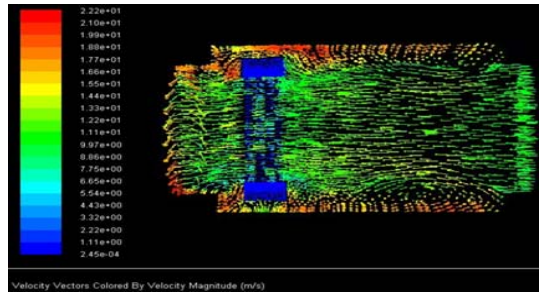


Fig. 8 B Type Cooling System Fluid distribution

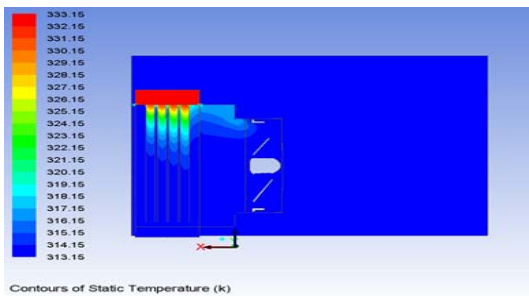


Fig. 6 Inner Temperature Distribution

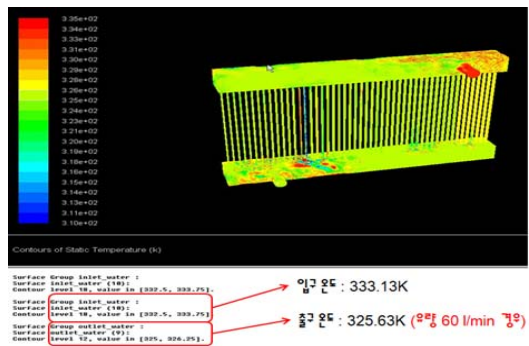


Fig. 9 B Type Cooling System Fluid Temperature

라진 것을 볼 수 있으며, 평균 유속은 약 11~12m/s 정도이다.

Fig. 9에서처럼 최종 냉각수의 온도는 325.63K (52.5°C), 냉각능력은 31.4kW로 확인하였다.



Fig. 7 Outlet Temperature of A Type Cooling System

소하고, 냉각 능력은 약 9.41kW의 냉각효과가 있다는 것을 확인하였다.

B Type 냉각장치 A Type과 동일한 조건으로 적용하여 해석을 수행하였다. Fig. 8과 같이 고온의 냉각수가 라지에이터로 유입되어 냉각되면서 빠져나가며, 냉각수가 라지에이터를 통과하는 동안 외부 공기를 통해 라지에이터를 직접 냉각시키는 방식으로 냉각되는 모습을 볼 수 있다. 팬의 크기가 A Type보다 커짐으로서 유속이 좀 더 빨

### 3. 바이모달 트랩 냉각장치 제작

#### 3.1 바이모달 트랩

A Type의 시제품은 내부의 공기가 냉각장치 밖으로 빠져 나가는 형태로 Fig. 10과 같으며, 펌프의 유량의 경우 60~75l/min까지 가능하고, 팬의 경우 최대 2400rpm의 회전속도를 낼 수 있도록 제작되었다. 다음은 A Type 냉각장치 제품 제작 방법에 대하여 Table. 4로 나타내었다.

Table. 5는 B Type 냉각장치의 제작 방법에 대하여 나타낸 것으로 외부의 공기가 냉각장치 안으로 들어오면서 라지에이터에 직접적으로 바람을 일으키는 형태로 설계되어 있으며, 라지에이터

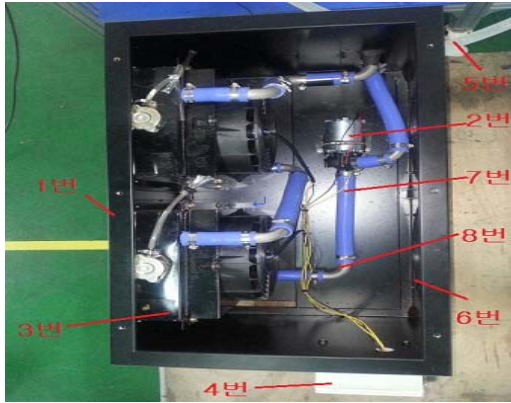


Fig. 10 Assembling of A Type Cooling System

Table 4 A Type Cooling System Production Method

Proce dure	Process	Method
1	Water Pump	Using 6x20 Bolt, Connect Part 2 to Part 1 bottom
2	Radiator	Using M8x20 Bolt, Connect Part 3 to Part 1 side
3	Silicone Hose	Connect Input to Output, Fix the Hose clamp
4	Power Supply	Using M5x20 Bolt, Connect Part 4 to Part 1 outside
5	wiring	Connect Part 2 and Part 3 to Part 4
6	Coaking	Using sealant, Coaking Part 5 and Hose side

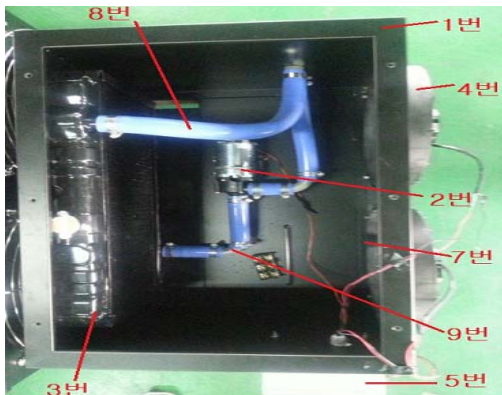


Fig. 11 Assembling of B Type Cooling System

Table 5 B Type Cooling System Production Method

Proce dure	Process	Method
1	Water Pump	Using 6x20 Bolt, Connect Part 2 to Part 1 bottom
2	Radiator	Using M8x20 Bolt, Connect Part 3 to Part 1 side
3	Fan	Using M8x20, Connect Part 4 to Part 1 side
4	Silicone Hose	Connect Input to Output, Fix the Hose Clamp
5	Power Supply	Using M5x20 Bolt, Connect Part 5 to Part 1 outside
6	wiring	Connect Part 2 and Part 4 to Part 5
7	Coaking	Using sealant, Coaking Part 6 and Hose side

내부로 흐르는 유체(물)는 순환펌프에 의해 순환되며, 펌프의 유량과 팬의 회전속도는 A Type과 동일하게 Fig. 11과 같이 제작되었다.

## 4. 바이모달 트랩 냉각장치의 성능평가

### 4.1 냉각장치 효율 검증

A Type의 시본 연구를 통하여 개발은 바이모달 트랩의 냉각장치의 냉각성능을 검증하기 위해 A,B Type을 비교하였다. 바이 모달 트랩의 냉각장치 자체적으로 시험검증을 위하여 Fig. 12와 같이 물탱크를 이용하여 물을 순환시켜 실험을 하고, 실제 구동 사항과 같은 조건인 60℃로 맞춘 물을 냉각장치와 물탱크에 물을 가득 채워놓은 후 같은 상태에서 전압을 공급하였다. 팬 두 개와 펌프의 소 단자가 연결되어 전력공급을 통해 냉각장치가 작동시켜, 순환펌프를 통해 순환하는 냉각수의 냉각되는 과정을 시간에 따라 확인 할 수 있다.

Thermo couple E type을 사용하여 오실로스코프 프로브와 연결하여 전압의 형태로 오실로스코프 파형을 관찰하였고, 이때 나타난 파형의 감소치와 실제 온도측정값을 비교하여 온도값을 측정



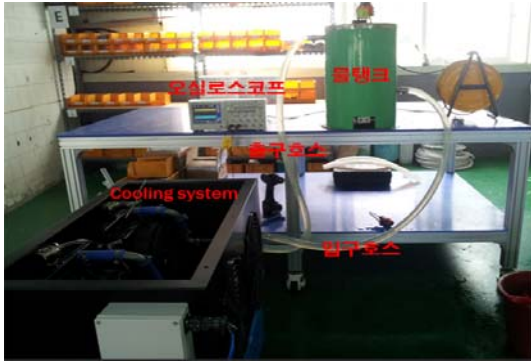


Fig. 12 Method of Cooling System experiment

하였다.

자체적으로 수행한 A Type의 냉각장치의 실험 결과를 의뢰기관에서 검증을 받기 위해 아래와 같은 요구조건으로 실험을 수행하였다.

Table 5 Test Conditions of Cooling System

Num ber	Inlet Temp.( $^{\circ}\text{C}$ )	In - Out Temp.( $^{\circ}\text{C}$ )	volume flow rate (l/min)	Specific Heat (J/kgK)
1	58.69	1.31	75	4182
2	48.77	1.23	60	
3	49.10	0.90	75	
4	39.44	0.56	60	
5	39.63	0.37	70	

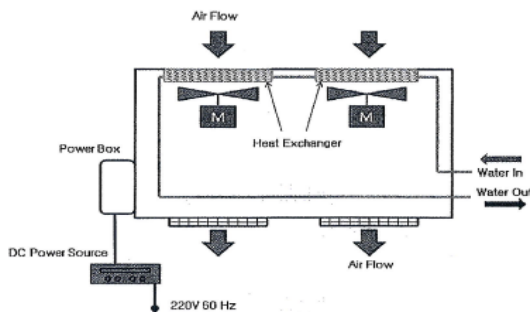


Fig. 13 Method of Testing institution

시험조건 및 시험방법은 정확한 분석을 위해 온도조건과 유량을 달리하여 냉각시스템의 성능을 알아보기 위한 목적으로 Table. 5의 시험조건에 따라 KS C 9306:2010을 일부 적용시킨 시험방법으로 실

시하였으며, 시험 개략도는 Fig. 13과 같다. 실제 장착되어 있는 순환펌프를 이용하지 않고 의뢰기관에 보유하고 있는 순환시스템을 통해 시험을 실시하였다. 시험조건에 따라 5분의 평균을 7회 측정하여 35분 동안 데이터를 평균값으로 산출하였다.

## 4.2 성능평가 결과

A, B Type 냉각장치의 체적을 구한 결과를 Table. 6에 나타내었다. 전체 시스템의 체적을 유량 1l/min으로 나누었을 시 순환시간은 약 27초이다.

가로축은 시간, 세로축은 전압이며, 가로축 한 칸은 20초, 세로축 한 칸은 20mV이다. 먼저 오실로스코프의 전원을 켜 상태로 정류기를 통해 냉각장치를 가동하게 되면, 전압에 의해 Fan이 회전하면서, 물이 순환하게 됨에 따라 온도에 대한 전압 파형이 점점 내려가는 모습을 볼 수 있다.

이 파형은 Thermo couple의 타입과 저항에 따라 다르게 나타난다. 파형이 감소하는 모습은 온도 감소가 일어나는 것이며, 시간에 대한 온도변화 Fig. 14와 같이 초기온도인 60 $^{\circ}\text{C}$ 부터, 냉각장치로 한 바퀴 순환하는 시간인 27초가 지났을 때의 온도

Table 6 Cooling System Volume

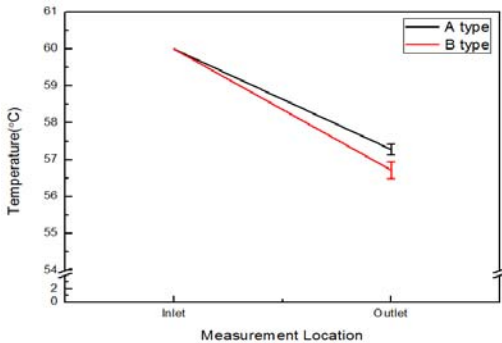
	Water Tank (m3)	Total Hose (m3)	Radiator (m3)	Total (m3)
A	0.02	0.000876	0.00641	0.027
B	0.02	0.000876	0.00962	0.030



Fig. 14 Temperature of A Type Cooling System

**Table 7 Result of Cooling System**

Number	Inlet Temperature (°C)	A Outlet Temperature (°C)	B Outlet Temperature (°C)
1	60	57.3	56.7
2		57.1	56.5
3		57.3	56.9
4		57.5	57
5		57.2	56.5
평균		57.28	56.72



**Fig. 15 Result of Cooling System**

는 57.3°C로 약 2.7°C 감소하였으며, 냉각효과는 11.3kW 발생하였다.

Table. 7은 냉각장치의 성능평가 5회 측정 시험 결과이며, Fig. 15는 냉각 온도를 도표화하여 나타낸 것이다. B Type 냉각장치 시스템의 체적을 유량 1l/min으로 나누었을 시 순환시간은 약 30초이다.

초기온도 60°C부터, 냉각장치로 한 바퀴순환되는 시간 30초가 지났을 때의 온도는 56.7°C로 약 3.3°C의 온도 감소하였으며, 냉각효과는 약 13.8kW의 발생하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 하이브리드형 바이모달 트램의 전기제어유닛의 냉각을 위한 시스템을 개발하는 것으로 A, B Type 냉각장치를 설계 및 제작하였다. 냉각장치의 성능을 확인하기 위해 실제조건과 같은 조건을 통해 성능시험을 실시하였고, 유한요소법을 적용하여 해석결과를 얻었으며, 실험적 수행방법과

성능시험법을 표준화하였다.

자체적으로 시험을 실시한 방법에 대하여 신뢰성을 확보하기 위해 의뢰기관을 통해 시험방법을 비교하고 결과의 비교 분석하여 검증받았다. 제작, 성능평가, 이론적 해석을 통하여 얻은 결과를 종합적으로 분석한 결론은 다음과 같다.

1) 냉각시스템에서 최대의 효율을 내기 위해서는 최소의 유량조건에서 가동되어야 효율이 좋다는 것을 확인하였다. 그러나 기본적으로 냉각시스템을 가동하기 위한 최소한의 유량이 정해져 있으므로, 적절한 유량조건을 찾는 것이 중요하다.

2) A Type의 냉각장치에서 라지에이터의 체적 및 팬의 직경의 증대로 B Type의 냉각장치를 개발하여 평균 냉각능력을 향상시켰다.

3) 해석결과를 통하여 성능시험결과와 비교 분석을 통해 A Type의 경우 16.8%, B Type의 경우 56%의 오차율이 발생하였다. 오차의 원인은 Fan의 방열효과를 고려하지 못한 해석을 통해 오차가 발생한 것으로 보인다.

새로 개발된 냉각장치를 실제 바이모달 트램에 장착하여 본 연구에서 최종 목표로 정한 냉각능력 23kW를 낼 수 있는 시스템 개발의 타당성을 재평가 할 예정이다. 본 연구 수행 결과로 냉각장치의 성능의 타당성이 입증되면, 궁극적으로 국산화가 가능할 것으로 예상되며, 보완연구를 통하여 바이모달 트램 뿐만 아니라, 냉각장치가 사용되는 다른 분야에 적용 시킬 수 있을 것이다.

### 후 기

“이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030058), 본 연구의 저자중 일부는 2012년 산학연공동기술개발사업 과제의 지원을 받은 것으로 이에 감사드립니다..”

### REFERENCES

(1) H. S. Kim, J. I. Song, S. H. Ha, “Development of Bi-Modal Tram Cooling Unit,” Proceeding of

KSPE 2013 Autumn Conference, pp.945~946

- (2) Korea Railroad Research Institute,  
“<http://www.bimodaltram.com>”
- (3) McGraw-Hill 'Heat Transfer' 2nd Edition
- (4) WILEY 'Fundamentals of Fluid Mechanics' Si  
version 6th Edition