

20 MeV DTL 냉각계통의 유동 특성에 관한 수치해석

김경렬[†]·박준*·권세진*·김형균*·김희섭*·황운하*·윤종철*

A Numerical Analysis on the Characteristics of Flow in the 20 MeV DTL Cooling System

Kyung-Ryul, Jun Park, Sei-Sin Kwon, Hyung-Gyun Kim, Hee-Sub Kim,
Woon-Ha Hwang, Jong-Cheol Yoon

Key Words: Cooling System(냉각계통), DTL(가속장치), PEFP(양성자기반공학기술사업), Pressure Drop(압력손실), Resonance Control(공진제어)

Abstract

The cooling water system for the PEFP 20 MeV proton accelerator was established and tested to obtain the precise resonance frequency of DTL through the temperature control of cooling water. The water temperature in the main flow loop was manipulated by adjusting the proportion of hot water returning from the DTL structures through the heat exchanger loop. Due to low duty factor operation and insufficient cooling loop installation of the DTL tanks, the manual mode operation was applied to maintain the DTL temperatures close to their resonance temperatures. The optimized process conditions with flow balancing and pressure drop in the DTL cooling systems are reported.

기호설명

ΔP	: 압력 손실 [bar]
Q	: 유량 [m^3/hr]
D	: 관내경 [m]
L	: 관의 길이 [m]
Dh	: 수력 직경 [m]
Lw	: 젖음 길이 [m]
A	: 면적 [m^2]
K	: 손실 계수
f	: 마찰 계수
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
V	: 속도 [m/s]

1. 서론

양성자기반공학기술개발사업(Proton Engineering Frontier Project)의 일환으로 20 MeV DTL(Drift Tube Linac) 가속장치 개발 및 성능 시험이 완료되었다. 20 MeV DTL 가속장치는 공진주파수의 동조(Tuning)가 Beam 가속에 있어서 필수적인 요소로써, 350 MHz 운전 주파수가 확보되어야 한다. 20 MeV DTL 가속장치의 공진주파수제어(Resonance Frequency Control)는 냉각수의 온도 제어를 통해서 이루어진다.⁽¹⁻³⁾

최근 DTL 등의 RF(Resonance Frequency) 부하 시험 결과^(4,5)를 볼 때, 공진기의 온도변화에 따른 공진주파수의 변화는 약 ± 5 kHz/ $^{\circ}C$ 로 나타나고 있으며, 공진기의 운전 전력 및 열부하의 변화에 따른 냉각계통의 적용 및 Thermal Tuning을 통한 주파수 안정화의 필요성이 부각되고 있다. 특히 양성자 선형가속기의 현장 설치조건에 부합하는

[†] 포항공과대학교 포항가속기연구소

E-mail : krk0301@postech.ac.kr

TEL : (054)279-1582 FAX : (054)279-1840

* 포항공과대학교 포항가속기연구소

** 포항공과대학교 포항가속기연구소

냉각계통의 건설은 가속장치뿐만 아니라, 건물 및 부대시설 등과의 간섭사항을 사전에 파악하여 설계에 반영하는 것이 요구되고 있으며, 가속장치의 Beam 가속 운전 성능 및 냉각계통의 정상적인 운전 확보가 우선적으로 수행되는 것이 필요하다. 현재 설치된 PEFP Test Facility의 20 MeV DTL 냉각계통은 단일 계통으로 Klystron 및 DTL (4대)의 냉각 및 온도 제어를 구현하는 구조를 가지고 있다. 또한, DT(Drift Tube)의 냉각수 공급 및 회수를 위한 다지관 크기 및 압력손실 등의 분석이 요구되고 있다.

본 연구에서는 20 MeV DTL 냉각계통의 구성 및 유동 특성을 분석하여 최적화하는데 그 목적이 있다.

2. DTL 냉각계통의 운전 특성

20 MeV DTL 가속장치는 2MW급의 Klystron 1대로부터 4대의 DTL에 RF를 공급하는 구조로 구성되어 있다⁽⁶⁾. 특히 냉각계통은 Klystron과 DTL을 동시에 냉각할 수 있는 계통으로 설치되어 있다. DTL의 RF 무부하 운전의 경우, Klystron은 냉각계통의 Heating Element 기능을 가지며, DTL Tank의 길이는 각각 4.431m, 4.649m, 4.755m, 4.776m이다. Figure 1에 도시한 바와 같이 DTL Tank는 냉각수의 공급 및 회수를 위한 다지관 등이 개별적으로 설치되어있고, 각 50개, 38개, 32개, 28개의 DT가 있다.

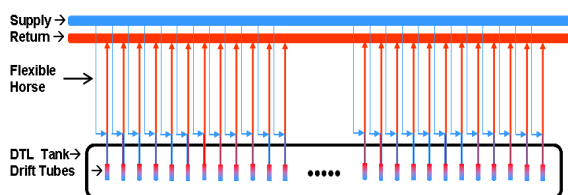


Fig. 1 Schematic diagram of the DTL water cooling manifold loops

Fig. 2는 20 MeV DTL 냉각계통의 주배관계통을 도시한 것이다. DTL Tank Wall과 DT의 냉각수 유로는 직렬로 연결되어 있으나, 20 MeV 양성자 Beam의 운전시험 계획에 따라 No Duty 또는 Low Duty 운전 조건에서는 DTL Tank Wall로부터의 열부하는 무시할 수 있는 정도이므로

Tank Wall에 있는 냉각수 유로를 형성하지 않고 DT에만 직접 유동시키는 운전 환경을 채택하고 있다. Klystron으로 유동되는 냉각수는 Cavity, Collector, Circulator 등으로 분기되어 각 부분의 열부하를 냉각할 수 있도록 하였다. Pump의 토출 유량은 $370 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이고, 압력 손실은 $3 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 이다. DTL 냉각계통의 온도제어는 3-way Valve가 열교환기로 회수되는 냉각수의 유량을 조절하여 냉각수의 공급온도를 제어한다. 또한 DTL에 공급되는 냉각수의 유량 및 압력이 일정하게 유지될 수 있도록 하기 위하여 냉각수 Pump 흡입측에 팽창탱크를 설치하여 배관계 전체의 유량 Balancing을 도모한다. 현재 DTL 냉각계통은 열교환기를 통한 냉각탑수의 유량을 일정하게 유지하면서 열교환기 전단에 설치된 3-Way Valve의 구동을 조정하여 38°C 의 냉각수를 DTL로 공급하도록 온도를 제어하고 있다.

Figure 3은 DTL의 냉각탑 배관계를 나타낸 것으로, 주요 장치는 2MW의 냉각 성능을 가진 냉각탑은 개폐형(Open Loop) 구조를 가지고 있다. 그리고 열교환기를 통한 주 냉각계통의 온도제어의 경우, 동 및 하절기에 냉각탑수의 유량 조절 등이 유기적으로 이루어 지지 않는 구조적 한계를 가지고 있다.

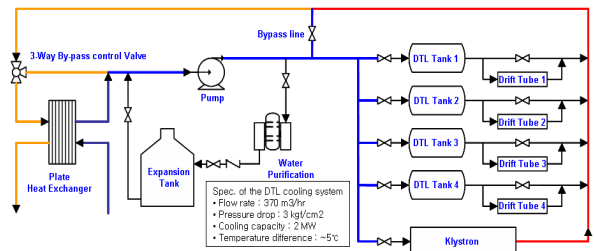


Fig. 2 Schematic layout of primary DTL cooling water loop in 20 MeV DTL system

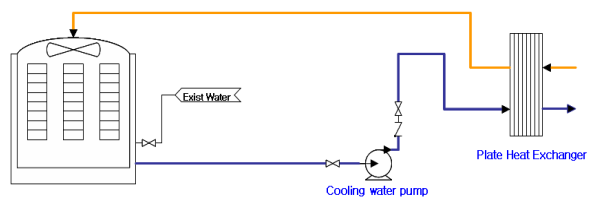


Fig. 3 Schematic layout of secondary cooling water loop in 20 MeV DTL system

3. DTL 냉각계통 해석

3.1 이론적 배경

다음은 배관계의 압력 손실에 대한 식이다.

$$\Delta P = K \frac{\rho Q^2}{2A^2} \quad (1)$$

ΔP = Pressure loss K = Loss Coefficient

A = Cross-sectional Area ρ = Fluid Density

Q = Volumetric Flow Rate

$$Dh = \frac{4A}{Lw} \quad (2)$$

Dh = Hydraulic Diameter

A = Cross-Sectional Area

Lw = Wetted Perimeter

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (3)$$

f = Friction Factor L = Length of Pipe

D = Diameter

ρ = Fluid Density

V = Velocity

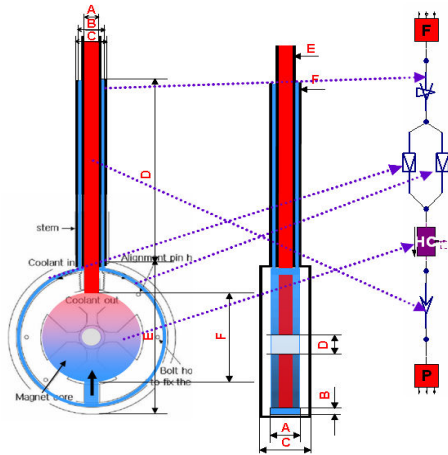


Fig. 4 Configuration of DTL drift tube and Flowmaster model

Table 1 Drift Tube Dimension

	Front (mm)	Side (mm)
A	12	22.5
B	20	3.5
C	26	Variable
D	350	14
E	130	2
F	80	3

3.2 Flowmaster Code Introduction

본 연구에서 사용된 Flowmaster(Ver. 6.5)⁽⁹⁾는 1차원 해석 상용 Tool로, 실제 도면을 생성하기 전 단계에서 실제 물리적인 값을 입력하여 설계의 타당성을 검증하는 Software다. 특히, 3차원의 기하학적인 Simulation 보다는 구성요소들 사이의 압력 손실, 유량 또는 온도 등의 예상 결과를 쉽게 얻을 수 있어 계통설계 초기 단계에 주로 사용된다..

3.3 Simulation 방법 및 결과

Figure 4는 DT의 유로 구조를 도시하고, 각 부분의 크기를 Table 1에 나타내었다. DT의 구조는 Stem, Coolant Channel, Magnet Bore 및 EQM (Electric Quadrapole Magnet)로 구성되어 있으며, 냉각수의 유로 형성은 Annular Type의 관을 통한 In-Out으로 유동되는 구조를 가지고 있다.

다음과 같은 전제 조건에서 수행되었다.

- (1) Stem의 Inlet은 Prismatic Type으로 하고, Outlet은 Normal Type으로 한다.
- (2) Stem에서의 열교환은 무시한다.
- (3) Coolant Channel은 Rectangular Type이며, Thermal load는 Heater-cooler를 사용하였다.
- (4) 유로 형성은 Direct로 가정한다.
- (5) 20 MeV DTL-1의 DT 1번을 해석한다.

각 DTL로 공급되는 유량이 $15.82 \text{ m}^3/\text{hr}$ 일 때, DTL의 DT가 50개이므로 DT 하나의 유량을 약 $0.3 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이라 가정하면, 유속은 0.78 m/s , 압력 손실은 0.014 bar 이다. 또한 DT 한 개의 열부하가 1.874 kW 일 때, 38°C 의 냉각수가 DT를 통한 뒤의 온도는 43°C 이다.

Figure 5는 DTL Tank 1번을 Modeling한 것으로써, 유량이 $15.82 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이며, 각 DT의 열부하는 Table 2의 C-Length의 비를 산정한 값을 입력하였다. 설계의 특성상 냉각수 공급은 DT 10번에서 시작하는 것으로 하였다.

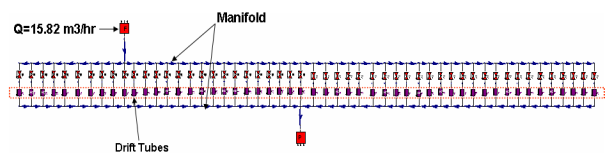


Fig. 5 Modeling of DTL tank

Table 2 Parameter of drift tubes in DTL

No.	C-length (mm)	Heat load (kW)	Flow rate (m ³ /hr)
1	47.30	1.53	0.25
2	47.75	1.54	0.25
3	48.21	1.55	0.26
4	48.67	1.57	0.26
5	49.13	1.58	0.26
6	49.59	1.60	0.27
7	50.04	1.61	0.27
8	50.49	1.63	0.27
9	50.95	1.64	0.27
10	51.39	1.66	0.28
11	51.85	1.67	0.28
12	52.30	1.69	0.28
13	52.74	1.70	0.28
14	53.19	1.72	0.29
15	53.64	1.73	0.29
16	54.08	1.74	0.29
17	54.52	1.76	0.29
18	54.96	1.77	0.30
19	55.41	1.79	0.30
20	55.84	1.80	0.30
21	56.28	1.81	0.31
22	56.72	1.83	0.31
23	57.16	1.84	0.31
24	57.60	1.86	0.31
25	58.04	1.87	0.31
26	58.46	1.88	0.32
27	58.90	1.90	0.32
28	59.32	1.91	0.32
29	59.75	1.93	0.33
30	60.18	1.94	0.33
31	60.61	1.95	0.33
32	61.04	1.97	0.33
33	61.46	1.98	0.34
34	61.88	2.00	0.34
35	62.30	2.01	0.34
36	62.72	2.02	0.34
37	63.14	2.04	0.35
38	63.56	2.05	0.35
39	63.98	2.06	0.35
40	64.39	2.08	0.35
41	64.81	2.09	0.36
42	65.22	2.10	0.36
43	65.63	2.12	0.36
44	66.04	2.13	0.36
45	66.45	2.14	0.37
46	66.85	2.16	0.37
47	67.27	2.17	0.37
48	67.67	2.18	0.37

49	68.07	2.19	0.38
50	68.47	2.21	0.38
Total	2906.02	93.70	15.82

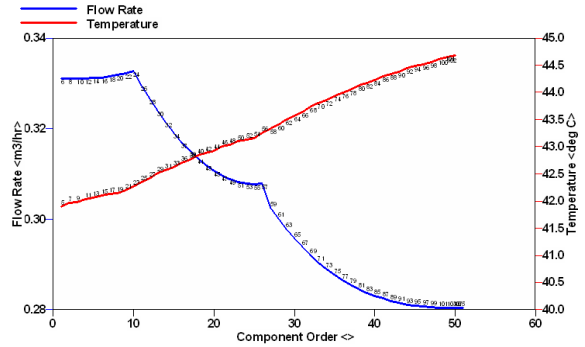


Fig. 6 Relation between flow rate and temperature without DT flow balancing

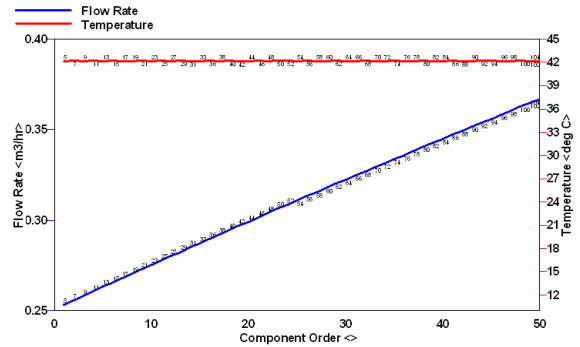
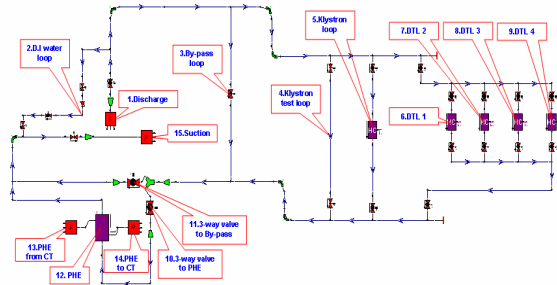


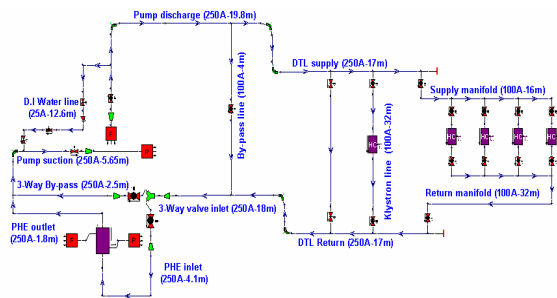
Fig. 7 Relation between flow rate and temperature with DT flow balancing

Fig. 6은 93.7kW DTL의 각 DT의 열부하에 따른 유량과 온도 분포를 해석한 도표이다. 전체적인 유량 범위는 0.28~0.33 m^3/hr 이고, 다지관 후단으로 갈수록 유량이 감소한다. 따라서 온도에 따른 요구유량을 각 DT에 입력하고, Valve 조작을 통한 유량 Balancing을 시도하였다. 그 결과, Figure 7과 같이 42℃의 균등한 온도 분포를 나타내고 있다.

Figure 8은 20 MeV DTL 냉각계통의 Simulation Modeling으로, (a)는 각 장치의 명칭, (b)는 각 배관계의 길이 및 직경을 도시하였다. 그림과 같이 각각의 입력 값들은 시험결과 및 도면을 준용하였으며, 3-Way Valve는 2개의 2-Way Valve를 통하여 유량 제어를 하였다.



(a) Component name



(b) Length & Diameter

Fig. 8 Flow model of 20 MeV DTL cooling system for Flowmaster simulation

Figure 8은 20 MeV DTL 냉각시스템의 Simulation Modeling으로, (a)는 각 장치의 명칭, (b)는 각 배관계의 길이 및 직경을 도시하였다. 그림과 같이 각각의 입력 값들은 시험결과 및 도면을 준용하였으며, 3-Way Valve는 2개의 2-Way Valve를 통하여 유량 제어를 하였다.

Figure 9는 총유량 $370 \text{ m}^3/\text{hr}$ 을 기준으로 각 배관계의 유량을 나타낸 것이다. Klystron과 DTL(1~4)의 유량은 각각 $106.5 \text{ m}^3/\text{hr}$ (29%), $15.39 \text{ m}^3/\text{hr}$ (4%), $15.34 \text{ m}^3/\text{hr}$ (4%), $15.34 \text{ m}^3/\text{hr}$ (4%), $15.4 \text{ m}^3/\text{hr}$ (4%)이며, By-pass 배관계의 유량은 $198.9 \text{ m}^3/\text{hr}$ (54%)이다. By-pass의 유량은 Klystron과 DTL의 유량에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

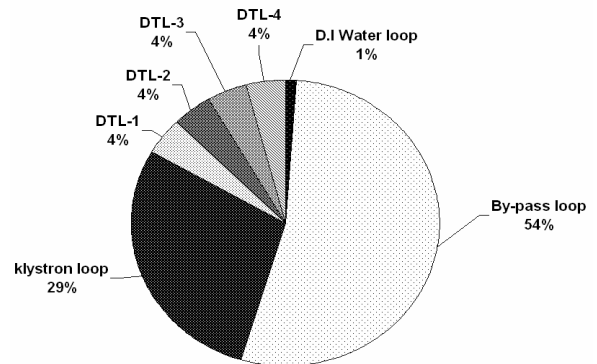


Fig. 9 Ratio of flow rate in each components

Figure 10은 DTL 냉각시스템의 각 배관계통 후단의 압력을 나타낸 것으로, 총 압력 손실은 2.1bar이고, DTL과 열교환기 계통의 압력 손실은 각각 1.23bar와 0.52bar이다. 또한 By-pass 배관계통의 과유량으로 인한 압력 손실은 2bar이상 발생한다. Figure 11과 같이 각 장치에 순환하는 냉각수는 By-pass 배관계통의 6.8m/s이다. 이것은 DTL System이 DTL 뿐만 아니라 Klystron Loop까지 냉각하는 구조로 되어있기 때문에 RF Power가 없는 상태에서는 54%의 유량이 By-pass Loop로 통하여 소음 및 배관 진동 등을 발생시킨다.

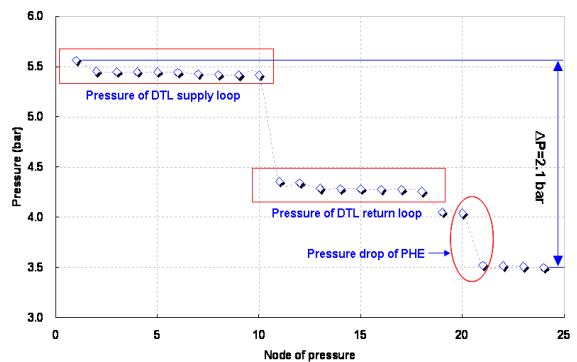


Fig. 10 Pressure distribution for node

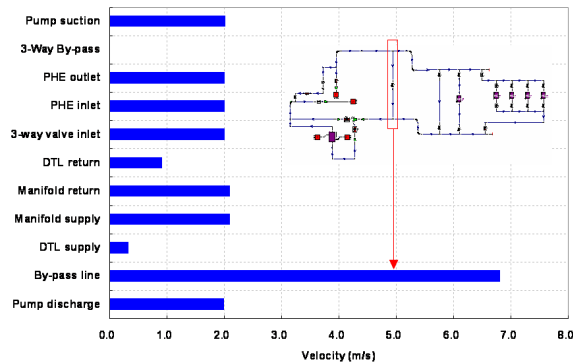


Fig. 11 Velocity distribution of DTL cooling water system components

4. 결 론

PEFP의 20 MeV 선형가속기는 350 MHz의 주파수 운전이 요구되고 있으며, 냉각수의 온도 제어를 통한 공진주파수제어(RFC)가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 DTL의 원활한 냉각수 공급을 위한 냉각계통의 특성을 다음과 같이 알 수 있다.

(1) 각 DTL로 공급되는 유량이 $15.82 \text{ m}^3/\text{hr}$ 일 때, 평균적인 DT의 유량 약 $0.3 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이라고 가정하면, 이때의 압력 손실과 유속은 0.014 bar와 0.78m/s이다.

(2) 각 DT는 Valve 등을 통한 유량 조절이 요구된다.

(4) 냉각수의 유량이 $370 \text{ m}^3/\text{hr}$ 일 때, Klystron과 DTL(1~4)은 각각 $106.5 \text{ m}^3/\text{hr}$, $15.39 \text{ m}^3/\text{hr}$, $15.34 \text{ m}^3/\text{hr}$, $15.34 \text{ m}^3/\text{hr}$, $15.4 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이며, By-pass 배관계통의 유량은 $198.9 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 나타났다.

(5) By-pass 배관계통은 과유량으로 인한 압력 손실이 크다.

(6) 54%이상의 유량이 By-pass로 형성되어 배관의 소음 및 진동이 크다.

후 기

이 논문은 양성자기반공학기술 사업단으로부터 지원을 받았음.

참고문헌

- (1) Kim, K. R., Park, H. C., Kim H. G., Kwon, S. J., Kim, H. S., Lee, C. S., Kwon, H. J. and Cho, Y. S., 2005, "Resonance Temperature Control Cooling System Modeling of Drift Tube Linace in PEFP 20 MeV Proton Accelerator," The 9th int'l Workshop on Accelerator and Beam Utilization, KAERI, Deajon, Oct. pp. 17~18
- (2) Kim, K. R., 2006, "Design of Resonance Frequency Control Cooling System for the DTL System in PEFP 100 MeV Proton Accelerator," The 10th International Workshop on Accelerator and Beam Utilization, Gyungju, Korea, pp. 21-22
- (3) Park, M. Y., Cho, Y. S., Jang, J. H., Kim, Y. H. and Kwon, H. J., 2004, "Fabrication Status of the PEFP 20 MeV DTL," Proceedings of EPAC, Lucerne, Switzerland, pp. 1369~1371.
- (4) Park, M. Y., Cho, Y. S., Kim, H. S., Kwon, H. J., Seol, K. T. and Song Y. G., 2005, "Tuning of 20 MeV PEFP DTL," Proceedings of PAC, Knoxville, Tennessee, pp. 1598~1600.
- (5) Han, J. M., Cho, Y. S., Kwon, H. J., Jang, J. H., Kim, Y. J., Han, S. H., Seol, K. T., Park, M. Y., Na, H. J., Lee, H. H. and Choi, B. H., 2003, "Development of a Low-Energy Proton Accelerator System for the Proton Engineering frontier Project," Proceedings of PAC, pp. 2832~2834.
- (6) Kim, H. S., Kwon, H. J. and Cho, Y. S., 2006, "RF Power Coupling for the PEFP Drift Tube Linac," Journal of the Korean Physical Society, Vol. 48, No. 4, pp. 732~735
- (7) Kim, I. D., Bok, K. S. and Lee, S. G., 2004, "Fan 냉각장치에서 System 저항에 관한 수치해석," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 1424~1429
- (8) Kim, S. S., Lee, J. H., Kim, S. M. and Kim, Y. H., 1996, "공동주택의 적정 난방온수 분배에 관한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 (B), pp. 276~282
- (9) www.flowmaster.com