

PEFP DTL 냉각시스템의 펌프 선정 최적화에 관한 연구

박 준*, 김 경 렬**, 김 형 균*

*포항공과대학교 포항가속기연구소

A Study on the Optimized Pump Selection of the Cooling System for the PEPF DTL Accelerator

Jun Park*, Kyung-Ryul Kim**, Hyung-Gyun Kim*

PAL/POSTECH, Pohang, Korea, 790-784

ABSTRACT: The main objective of this prototype is to control resonance frequency of DTL system through the temperature control of cooling water. It is to resonant frequency of the drift tube cavities to 350 MHz. This paper describes the design of a prototype cooling water skid required for the temperature control of the DTL cavities, focusing in the modeling and simulation of the cooling system, the sizing of water pumping skid component.

Key words: Cooling system(냉각계통), Friction factor(마찰계수), PEPF(양성자기반공학기술사업), Pressure drop(압력손실), Resonance control(공진제어), Heat load(열부하)

기 호 설 명

- ΔP : 압력 손실 [kg/cm^2]
- Q : 유량 [m^3/hr]
- K : 손실 계수
- f : 관 마찰 계수
- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- v : 유속 [m/s]
- T : 온도 [$^{\circ}C$]
- v : 동점성 계수

1. 서 론

PEFP(Proton Engineering Frontier Project)의 양성자 가속장치 DTL(Drift Tube Linac)의 공진 주파수 제어를 위한 RCCS (Resonance Control Cooling System)는 정밀 온도 제어장치이다. 이것은 저전도 냉각수(Low Conductivity Cooling Water)를 DTL로 공급 및 회수함으로써, 클라이스트론 (Klystron)으로부터 발생하는 고주파 및 사극전자석의 열부하(Thermal Load)를 제거하게 된다. 따라서 RCCS의 온도제어를 통해 가속장치의 구조적 안정화를 유지함으로써, DTL은 빔 성능을 위한 공진주파수(Resonant Frequency, 350 MHz)제어가 가능하다.^(1,2)

DTL 냉각시스템은 20 MeV DTL 4대, 100 MeV DTL 7대, RFQ, MEBT 등을 독립적으로 제어하게 된다. 이는 각 가속장치마다 발생하는 열부하 및 공진주파수에 따른 운전 조건이 다르

† 포항공과대학교 포항가속기연구소
 Tel.: +82-54-279-1203; fax: +82-54-279-1840
 E-mail address: kga0301@postech.ac.kr

기 때문이다. 따라서 각 장치에 적합한 RCCS의 설계는 가속장치의 성능 및 설비의 비용에 많은 영향을 미치게 된다. 특히 잘못된 펌프의 선정은 시스템의 경제성, 안정성 및 유지보수의 용이성을 어렵게 만드는 원인이 된다.

각 RCCS의 펌프 선정에 있어서 가속장치의 핵심 부품인 DT (Drift Tube)의 유속, 온도차, 유량 및 압력강하 등의 특성이 주요 변수가 된다. PEFP의 시험에서 20 l/min (=1.2 m³/hr)의 유량을 DT로 공급할 경우, 압력강하가 2 kg/cm², 온도차는 1.5℃로 측정되었다.^(3,4) 이 결과는 20 MeV DTL을 위한 RCCS21~24의 설계 조건으로 선정되어 현재 2대의 RCCS가 제작 및 성능시험을 수행 중에 있다. 하지만 100 MeV DTL을 위한 RCCS의 설계에 있어서 DT의 구조가 변경^(5,6)되었기 때문에 20 MeV RCCS와 동일한 개념으로 설계 및 제작한다는 것은 최적의 성능 구현을 확보할 수 없다. 따라서 100 MeV 특성에 적합한 장치의 설계가 요구되며, 그 핵심은 펌프 선정에서 시작한다.

본 연구의 목적은 20 MeV DTL을 위한 냉각시스템의 펌프 선정을 위한 배관망 해석을 결과를 제시하고, 100 MeV RCCS의 설계요구사항에 따른 전산 해석의 결과를 시스템 설계 검증을 위한 기준을 마련하는 데 있다.

2. DTL 냉각시스템의 설계 요구사항

2.1 냉각시스템의 개요

Fig. 1은 RCCS21과 RCCS22의 구성을 나타내고 있는 3차원 도면으로 나타낸 것이다. 이러한 냉각시스템의 기본적인 운전 개념은 다음과 같다.

(1) 무부하 운전 및 냉각시스템의 초기 운전에서 전기 가열기(Immersed Electric Heater)는 초기 운전에서 필요한 냉각수 공급 온도를 On-Off 제어에 의해 운전온도까지 상승시킨다.

(2) 저전도수(Low Conductivity Water) 순수여과장치(Deionized Water Fabrication Unit)는 냉각수의 청정도 및 부식성 방지하며, 총유동의 1~5%의 유량을 분기관(By-pass Loop)에서 지속적으로 순환 및 공급한다. Fig. 1은 20 MeV를 위한 RCCS 펌프장치(Water Pumping Skid)의

Solid model을 나타낸 것이다.

(3) 냉각수 유량은 DTL의 열부하 조건에 따라 가변속 펌프(Variable Speed Pump)에 의하여 일정하게 유지된다.

(4) 정상 상태에서의 냉각수의 온도제어는 3방향 제어 밸브(3-Way Control Valve)의 개도에 따른 열교환기 배관계로 공급되는 유량을 조절함으로써 이루어진다.

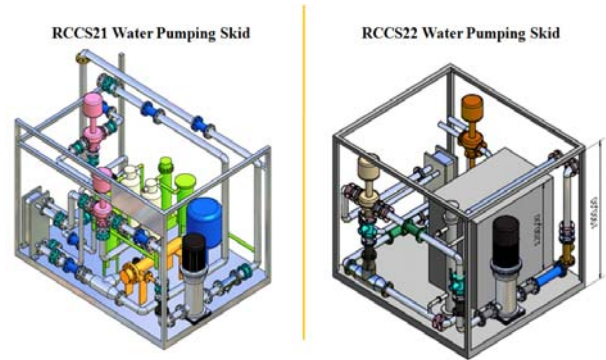


Fig. 1 Solid Model of the RCCS21 & RCCS22.

2.2 설계 요구 사항

2.2.1 기본 설계 개념

DTL 가속장치의 정상운전에서 RF Power의 대부분 (70~80%)이 DTL 내부 및 표면에서 소산된다. 여기서 발생된 열은 DTL 가속장치의 기하학적 형상을 변화시켜서 빔 성능 확보에 필요한 공진주파수(350 MHz)를 흔들리게 한다. 따라서 RCCS를 이용한 정밀온도제어는 공진주파수를 안정화하여 양성자 빔 가속의 효율을 높이는 데 기여한다.⁽⁷⁾

2.2.2 설계 요구사항

PEFP의 양성자가속장치는 각 DTL의 열부하가 다르기 때문에 DTL마다 독립적인 RCCS가 요구된다. RCCS의 냉각수 공급온도는 27℃를 기준으로 하고, 온도 정밀도는 ±0.1℃ 이내를 설계 기준으로 한다. 또한 공진주파수를 제어하기 위한 온도제어 범위는 21℃에서 33℃이며, 열교환기를 통한 냉수 계통의 공급온도는 10 ±1℃이다. Table 1은 RCCS 설계 사양을 정리한 것이다.

Table 1 Required heat load, flow rate and temperature for the RCCS

DTL No.	Heat Load [kW]	Flow Rate [m^3/hr]	Inlet Temp. and Range [$^{\circ}C$]
RFQ	48	28	27 ±6
DTL21	94	54	27 ±6
DTL22	76	44	27 ±6
DTL23	67	38	27 ±6
DTL24	61	35	27 ±6
DTL101	49	28	27 ±6
DTL102	46	26	27 ±6
DTL103	45	26	27 ±6
DTL104	43	25	27 ±6
DTL105	42	24	27 ±6
DTL106	42	24	27 ±6
DTL107	42	24	27 ±6
MEBT	21	12	27 ±6

3. 펌프 선정을 위한 모델링 및 해석

3.1 배경 이론

수치 해석을 위한 이론적 배경은 유체 동역학에서 기본적으로 사용되고 있는 연속방정식과 압력손실 계산하기 위한 방정식을 사용하였다. 또한 열교환기 및 펌프의 용량 선정을 위한 열량식을 이용하였다.

$$Q = AV \quad (1)$$

$$H_f = f \frac{l}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

식 (1),(2)에서 알 수 있는 것은 유량은 유속에 정비례하고, 압력강하는 유속의 제곱에 정비례한다는 것이다. 또한 마찰계수 f 를 용이하게 구하기 위해 난류유동에서 다음과 같은 식(3)을 이용하여 산출할 수 있다. Reynolds number는 유속과 정비례하므로 관내의 유속이 증가하면 레이놀즈수가 변화함에 따라 마찰계수도 변하게 된다.

$$f \approx 0.0055 + 0.0055 \left(20,000 \frac{e}{D} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$Q = 0.86 \frac{q_T}{\Delta T} \quad (4)$$

3.2 배관망 해석 모델링

3.2.1 20 MeV 냉각시스템 모델링

본 연구에서 이용된 배관망 해석 모델은 1차원 해석 Tool로, 실제 도면을 생성하기 전 단계에서 실제 물리적인 값을 입력하여 계통설계의 타당성을 검증하는 상용 Software Package다. 특히 기하학적인 Simulation 보다는 단순화된 구성요소들 사이의 압력 손실, 유량 또는 온도 특성을 구현할 수 있기 때문에 시스템의 초기 설계 단계에서 효과적인 검증을 수행할 수 있다.⁽⁸⁾

Fig. 2는 Network model을 이용한 냉각시스템의 배관망 해석을 위해 20 MeV RCCS를 모델링한 것이다. 그 결과는 각 20 MeV RCCS의 압력강하는 3~3.5 kg/cm^2 이고, 유속은 2.4~3.0 m/s로 계산되었다. 여기서 RCCS21의 주배관의 크기는 80A를 채택하고 RCCS22이하는 65A를 적용하였다. 이를 바탕으로 RCCS21과 22의 펌프의 양정은 50 m로 냉각시스템 설계에 반영하였다. Table 2는 Fig. 2의 해석 결과를 유량에 따른 압력손실 및 유속을 정리한 것이다. 향후 100 MeV RCCS의 펌프 선정을 위한 전산 해석도 동일한 방법으로 수행될 것이다.

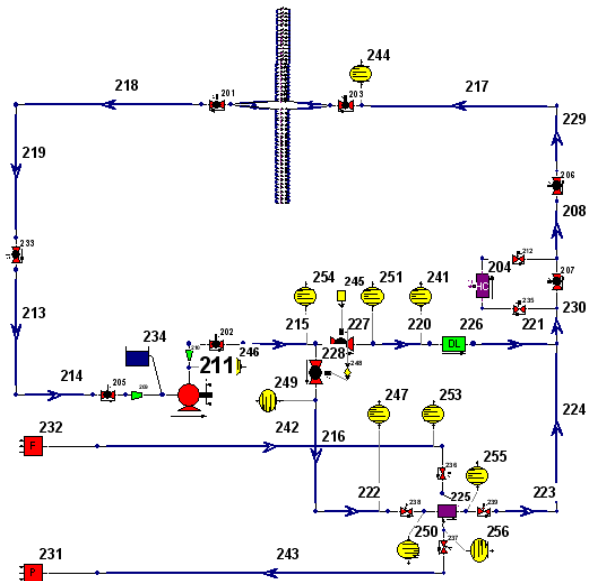


Fig. 2 Simulation modeling of the LCW cooling water system.

Table 2 Result of the network model.

DTL No.	Flow Rate [m ³ /hr]	Velocity [m/s]	ΔP [kg/cm ²]
DTL20-1	54	2.7	3.6
DTL20-2	44	3.0	3.4
DTL20-3	38	2.6	3.4
DTL20-4	35	2.4	2.9

3.2.2 100 MeV 냉각시스템 모델링

100 MeV RCCS 펌프의 설계 양정을 선정하기에 앞서 해석 network model을 이용하여 여러 조건에서의 압력손실 계산을 Fig. 2와 같이 계산하였다. 계산 결과에서 알 수 있듯이 RCCS101의 운전 유량에서 효율적인 펌프 선정⁽⁹⁾을 위한 배관의 크기는 65A(SCH20, 0.072 mm)가 설계 기준에 적합하다는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 배관으로 시스템을 설계할 수 있기 때문에 설비의 표준화, 유지보수의 용이성 및 펌프 성능의 최적화를 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

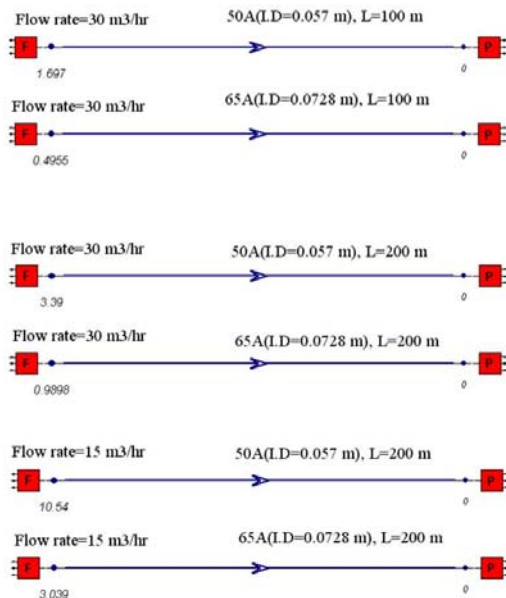


Fig. 3 Modeling of the plumbing with the pipe sizing.

여기서 배관 및 부속이 가지는 상당길이, 관경, 유량을 변수로 각 조건에서의 손실계수, 압력손실 및 유속을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Fluid characteristic with Fig. 4

No.	Velocity [m/s]	K factor	Pressure Loss [bar]
1	3.27	31.98	1.70
2	2.00	24.86	0.50
3	3.27	63.91	3.39
4	2.00	49.65	1.00
5	5.88	61.32	10.54
6	3.61	47.05	3.04

Fig. 4와 5은 RCCS101 EQM 및 stem에서의 열부하에 따른 유량, 온도차, 유속 및 압력강하 등을 계산한 것이다.

0.44 kW의 열부하를 가진 EQM으로 0.1 m³/hr의 유량이 공급될 때, 입구와 출구의 온도차가 3.8°C, 유속은 2.78 m/s이고, 압력강하는 0.63 bar 계산된다. 하지만 1.5°C의 온도차를 기준으로 한다면 유량은 온도차에 비례하기 때문에 압력강하가 증가하여 펌프 선정에 있어서 과도한 용량의 모터를 선택할 수밖에 없을 것이다. 또한 유속이 증가하여 내부의 진동 및 침식의 우려가 발생할 수 있기 때문에 공급 유량에 대한 구체적이고 정량적인 검증이 요구된다. 따라서 본 연구의 향후 일정에 EQM과 Stem의 구조 및 열전달 특성을 고려한 유동해석과 실제 시제품에 대한 시험 준비가 현재 진행 중에 있다.

반면 100 MeV DT stem의 경우 시뮬레이션의 결과, 압력손실이 약 0.1 kg/cm²으로 낮기 때문에 Flow balancing에 대한 간섭만 없다면 설계의 간섭사항이 되지 않는다.

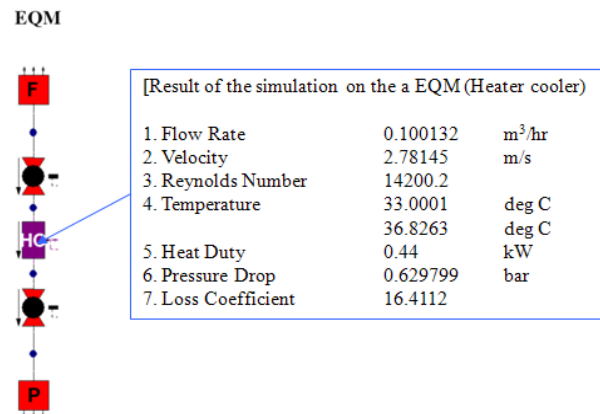


Fig. 4 Result of the simulation on the a EQM.

STEM

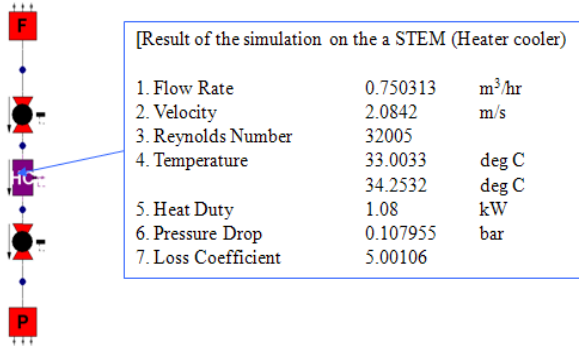


Fig. 5 Result of the simulation on the stem.

Fig. 6은 RCCS101의 Computational model과 펌프 장치에서 전송계통 및 DTL까지의 배관 구성에 대한 Flow chart를 도시한 것이다. DTL101은 35개의 EQM과 33개의 DT로 구성되어있다. 여기서 2개의 EQM은 Tank 양 끝단에 독립적으로 위치하고 나머지는 DT에 EQM과 Stem으로 구성된다.

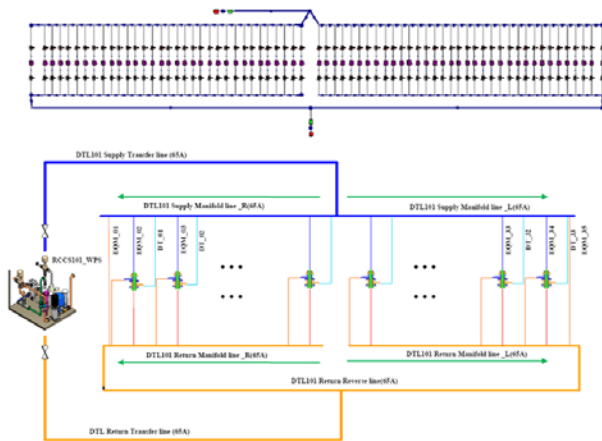


Fig. 6 Piping network model of the RCCS101.

냉각시스템의 Manifold에서 DT로 공급/회수되는 loop는 Flow balancing을 확보할 수 있는 Return reverse loop 방식을 적용하였다. 그 결과 Fig. 7에서 나타낸 것처럼 EQM과 Stem에서의 Flow balancing이 유지되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 EQM과 Stem의 손실계수(국부저항)가 차이가 나기 때문에 설계 유량이 공급되지 않는 것으로 계산되었다. 따라서 유량 또는 압력을

조절할 수 있는 별도의 Device가 필요할 것으로 사료된다.

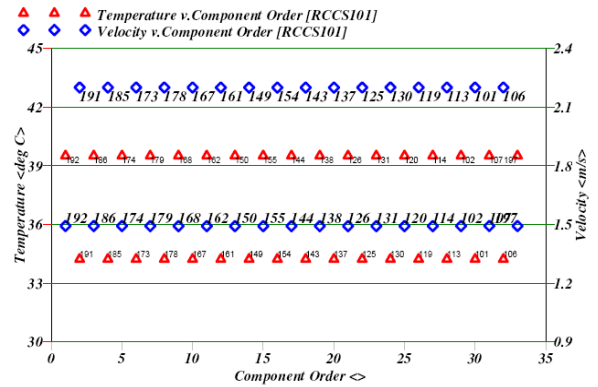


Fig. 7 Distribution of temperature & velocity in each DTs of the DTL101.

Fig. 8은 DTL101의 회수(Return) Manifold의 일부에 대한 유량 및 온도 분포의 결과를 나타낸 그래프이다. Component 32는 오른쪽에서 16번 EQM으로 0.05 m³/hr의 유량이 공급 시작점에서 회수 시작점으로 연결된 것이다. 이때 출구 온도는 약 39.5°C로 6.5°C의 온도차를 보인다. 하지만 회수 Manifold에서 혼합되면 EQM과 Stem의 열 전달 특성에 관계없이 오른쪽으로 갈수록 34.5°C로 안정화됨을 알 수 있다.

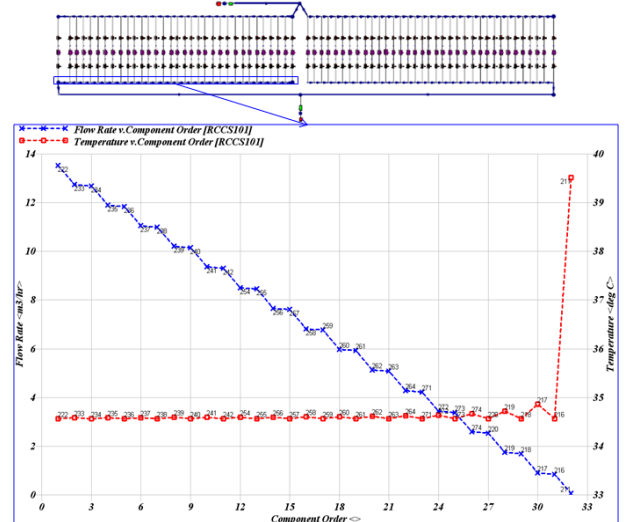


Fig. 8 Distribution of flow rate and temperature in the return manifold of the DTL101.

4. 결론

본 연구에서는 다음 내용을 설명하였다.

(1) RCCS는 PEFP DTL 가속장치의 350 MHz 공진주파수를 제어하는 냉각시스템이다.

(2) RCCS는 20 MeV DTL 4대, 100 MeV DTL 7대, RFQ 및 MEBT 등을 온도제어 한다.

(3) 20 MeV DTL을 위한 RCCS의 펌프 선정에서 유량은 35~54 m³/hr, 양정은 50 m로 Computational model을 이용하여 결정하였다.

(4) 100 MeV의 DT는 EQM으로 냉각수가 공급되기 때문에 펌프 선정을 위한 전산해석에 있어서 EQM의 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 EQM 1개에 공급되는 유량이 0.1 m³/hr일 때, 압력강하는 0.5 kg/cm²으로 나타났다.

(5) 100 MeV DTL101을 위한 RCCS101의 시뮬레이션 결과 Flow balancing은 Return revers type을 채택함으로써 확보할 수 있다. 하지만 EQM과 Stem의 설계 유량을 공급할 수 있는 별도의 Device가 요구된다.

(6) RCCS101의 1차원 해석 결과에서 Manifold에서 EQM과 Stem의 온도차가 1.5℃로 안정화되어 회수됨을 확인하였다.

(7) 결론적으로 EQM과 Stem의 열전달 특성을 확보한다면 100 MeV RCCS의 펌프 선정의 최적화를 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 교육과학기술부의 양성자기반공학기술 사업으로부터 지원을 받았음.

참고 문헌

1. Kim, K. R., 2006, "Design of Resonance Frequency Control Cooling System for the DTL System in PEFP 100 MeV Proton Accelerator," The 10th IWABU, Gyungju, Korea, pp. 21-22.
2. Kim, K. R., et al., 2007, "A Numerical Analysis on the Characteristics of Flow in the 20 MeV DTL Cooling System," Proceedings of the KSME 2007 Spring Annual Conference, pp. 2446-2451.
3. Park, M. Y., et al., 2004, "Fabrication Status of the PEFP 20 MeV DTL," Proceedings of EPAC04, pp. 1369-1371.
4. Kim, Y. H., et al., 2005, "Fabrication and Test of the Drift Tubes for PEFP 20 MeV DTL," Proceedings of PAC05, pp. 1552-1554.
5. Kim, Y. H., et al., 2007, "Design and Fabrication of the PEFP DTL II," Proceedings of PAC, pp. 1553-1555.
6. Kim, H. S., et al., 2008, "Fabrication Status of the PEFP DTL II," Proceedings of EPAC08, pp. 3425-3427.
7. Kim, K. R., et al., 2007, "양성자가속기 DTL 냉각시스템 시제품 설계 및 제작," 대한기계학회 추계학술대회, Vol. 7, No. 1, pp. 1489-1494.
8. www.flowmaster.com
9. Lee, B. J., 1999, "Change of performance characteristics and effective operation of chilled water circulation pumps," Proceedings of SAREK 1999, pp. 869-873.