

*KOMAC DTL 가속 공동 설계¹⁾

Design of KOMAC DTL Accelerating Cavity

조용섭, 권혁중, 박미영, 장지호, 정경근

양성자기반공학기술개발사업단

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

1GeV 가 KOMAC (Korea Multi-
purpose Accelerator Complex)
가 2 100MeV 가 10
20MeV 100MeV
2 100MeV 가
20MeV 가 DTL

Abstract

PEFP (Proton Engineering Frontier Project) is developing the KOMAC (Korea Multi-purpose Accelerator Complex) program that consists of 1GeV proton linac for an accelerator driven transmutation experiments, and applications in the industries and the basic science areas as Korean national research facility. In the 2nd phase, a 100MeV linac and several beam lines of 20MeV and 100MeV will be constructed, and several applications with high current proton beams, and an user program for future extension of the program are planned. For the 2nd phase, a DTL from 3MeV to 20MeV has been designed. It consists of 350MHz DTL cavities for CW operation and a 1MW RF source. The details of the DTL accelerating cavity design will be reported.

1. 서 론

양성자기반공학기술개발단에서는 산업, 원자력, 의료 및 기초 과학 등에 활용하기 위한 100MeV 양성자가속기를 개발하고 있다. 이 양성자 가속기는 50keV 양성자 입사기, 3MeV RFQ (Radio Frequency Quadrupole), 20MeV DTL, 100MeV DTL-II로 구성된다. 본 연구에서는 이중 20MeV DTL의 설계에 대해 기술하고자 한다.

20MeV DTL의 설계 기본 변수는 아래와 같다.

1) 입력 양성자빔

350MHz RFQ로부터 가속된 양성자 빔은 표 1의 특성을 가지고 DTL로 입사된다.

표 1. 입력 양성자빔

Energy	3.0MeV
Current	0 ~ 20mA
Frequency	350MHz
Emittance (Transverse)	0.23 pi mm mrad (rms normal.)
Emittance (Longitudinal)	0.15 MeV-deg

2) 출력 양성자 빔

20MeV DTL 양성자 가속기로부터 인출되는 양성자빔은 표 2의 특성을 만족하여야 한다. 이 양성자 빔은 스윗칭 전자석에 의해 20MeV 빔으로 사용자에게 공급되거나, 100MeV 가속기에 공급되어 계속 가속되게 된다. 표 2의 특성은 100MeV 가속을 위한 최소 요구 조건이며, 20MeV 양성자 빔에 대한 사용자의 요구 조건이 발생하면 이를 만족하도록 설계할 예정이다.

표 2. 20MeV 양성자 빔의 특성

Energy	20.0MeV
Current	0 ~ 20mA
Emittance (transverse)	0.25 pi mm mrad (rms normal.)
Emittance (Longitudinal)	0.17 MeV-deg.

3) 구조

3 ~ 20MeV 영역의 양성자 가속기에 적합한 구조는 DTL, 초전도 가속관 및 DTL의 변형이 있다. DTL의 변형중 하나인 CCDTL은 사극전자석을 공동 외부에 둘 수 있으며, 높은 주파수로 운전할 수 있는 장점이 있으나, RFQ에 비해 높은 주파수를 사용하여 정합부가 필요하고 아직 운전되고 있는 가속기가 없어 R&D를 필요로 하는 등의 단점이 있다. 초전도 가속관의 경우도 낮은 에너지 영역에서의 운전은 아직 많은 R&D 과제를 가지고 있어 본 개발에는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 비록 공동내에 사극 전자석을 두어야 하는 단점에도 불구하고 기술적으로 문제가 적은 DTL을 선택하여 설계하였다.

4) 주파수

RFQ의 주파수는 350MHz이며, 이 주파수는 DTL에 적합한 주파수이다. RFQ에서 공급되는 양성자의 에너지가 3MeV이므로, DTL의 첫 번째 사극 전자석에 많은 연구 및 실험을 필요로 한다. RFQ와 같은 주파수를 사용하는 경우 RFQ와 DTL 간의 정합이 비교적 용이하므로, 같은 주파수를 사용하기로 하였다.

5) 고주파 출력

본 연구에서 개발중인 20MeV 가속기는 개발이 완료되면, 양성자빔 사용자에게 빔을 공급하게 계획이 되어 있다. 따라서, 20MeV 양성자 가속기는 향후의 100MeV 가속기 또는 1GeV 가속기와 무관하게 독자적으로 가동되는 것이 바람직하다. 이러한 관점에서 가장 바람직한 방향은 20MeV 가속기까지의 고주파원은 향후의 가속기 고주파원과 분리되어 운영되며, 또한 최소 수량인 동시에 RFQ의 고주파원과 동일한 것이다. RFQ의 고주파원은 1MW 클라이스트론을 중심으로 구성되어 있으므로, DTL의 고주파원도 1MW 클라이스트론을 중심으로 구성된다. 이 클라이스트론에서 운전의 여유도 등을 감안할 때 실질적으로 사용할 수 있는 최대 설계 출력은 900kW이므로, 본 DTL은 이 범위를 넘지 않도록 설계하였다.

6) 동작 모드

사용자에게 공급되는 20MeV 양성자빔은 연속 또는 펄스형이다. 따라서, DTL은 연속형으로 설계, 제작하여 운전할 예정이다. 펄스형 운전이 필요한 경우 고주파원을 펄스에 맞추어 운전을 하거나, 양성자 입사기에서 펄스화된 빔을 공급하는 방법 중에서 이용자에게 편리한 방향으로 선택할 예정이다. 대전류 펄스 빔을 사용하는 경우에는 후자가 바람직할 것이며, 전류가 적은 경우에는 전자의 방식으로 운전될 것이다.

2. 고주파 공동

DTL 공동의 형상을 결정하기 위해 미국 로스알라모스 국립 연구소에서 개발된 SUPERFISH 코드²⁾를 사용하였다. 이 코드 그룹중 DTLFISH를 사용하면 원하는 주파수에 맞는 탱크 직경, 드리프트 튜브의 형상 등을 얻을 수 있다.

1) DTL 공동 구조

그림 1은 DTL 공동의 하나의 셀을 보여준다. 여기서 D 는 DTL 탱크의 직경, d 는 드리프트 튜브의 직경, L 은 셀의 길이, g 는 가속 갭 간격, R_b 는 빔이 통과하는 개구 반경이다.

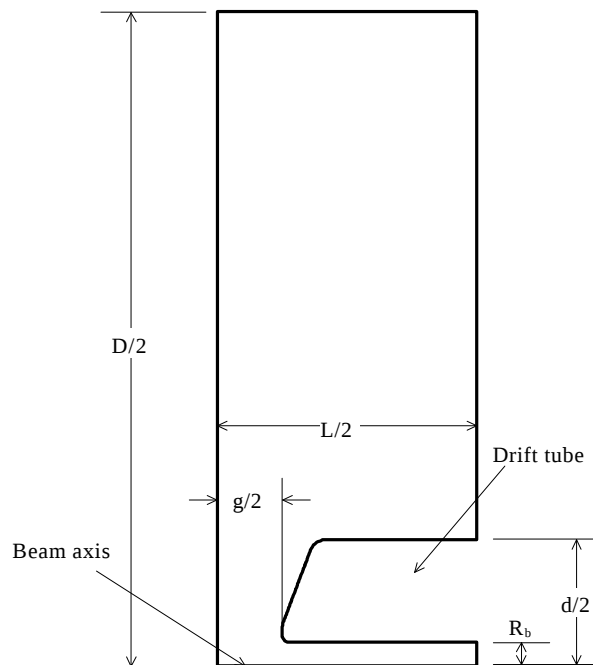


그림 1. DTL 공동 형상

2) DTL 설계 변수

DTL의 형상을 결정하는데 가장 중요한 변수는 고주파 이용 효율이라 할 수 있는 셉트 임피던스의 최대화라 할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 본 20MeV DTL은 하나의 고주파원으로 고주파 출력 900kW를 공급받아 운전되도록 설계되어야 하므로 가급적 높은 셉트 임피던스를 갖도록 하는 것이 바람직한다. 빔이 통과하는 개구 직경을 14mm로 두고 가장 높은 셉트 임피던스를 갖는 구조를 선택하였다. 그림 2는 탱크 직경에 따른 셉트 임피던스 계산 예로서 탱크 직경 54cm가 가장 적합함을 알 수 있다.

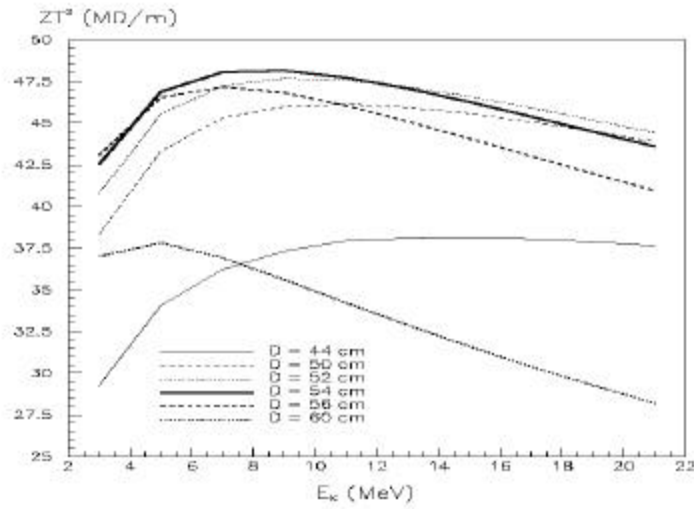


그림 2. 탱크 직경에 따른 섀트 임피던스

표 3는 최적화된 DTL 공동의 크기이다. 이때, 양성자 속도에 따른 유효 섀트 임피던스는 그림 3과 같다. 이렇게 얻어진 가속 공동 데이터는 가속 공동에서의 빔 가속 모사 코드인 PARMILA (미국 로스알라모스 국립연구소)의 입력으로 제공된다. 제공된 입력을 이용하여 PARMILA 코드는 DTL의 각 셀에 대한 정보를 제공하고, 이러한 가속 공동에서 빔이 손실없이 가속되는지 판별하게 된다.

표 3. DTL 공동의 크기

Parameter	Symbol	Value
RF frequency		350 MHz
RF power		900 kW
Reference temperature		40 °C
Initial energy		3 MeV
Final energy		20 MeV
Tank diameter	D	54.44 cm
Drift-tube diameter	d	13 cm
Bore radius	R _b	0.7 cm
Drift-tube face angle	α _f	10 degrees
Drift-tube flat length	F	0.3 cm
Corner radius	R _c	0.5 cm
Inner nose radius	R _i	0.2 cm
Outer nose radius	R _o	0.2 cm
Stem diameter	d _{stem}	2.6 cm
Frequency tolerance	δf	0.005 MHz

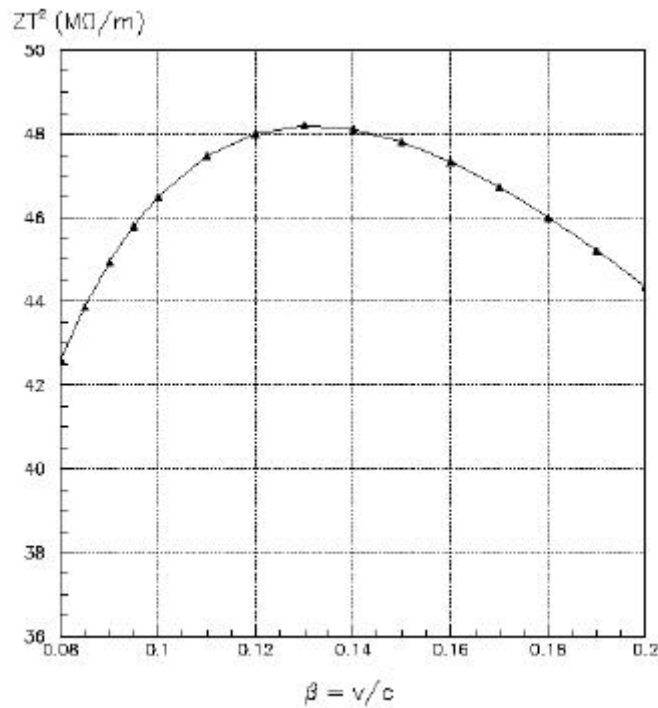


그림 3 양성자 속도에 따른 유효 셉트 임피던스

3. PARMILA 코드 계산 결과

DTL 구조

PARMILA 코드를 이용하여 20MeV 20mA 양성자 가속에 최적화된 DTL 구조를 얻었다. DTL 구조에서는 드리프트 튜브 개수의 제곱으로 비례하여 가공의 난이도가 올라간다. 따라서, 현실적으로 가공이 가능한 DTL 탱크는 하나의 탱크에 50개 이내의 드리프트 튜브를 갖는 경우이다. 이러한 조건을 만족하기 위하여 20MeV DTL을 4개의 탱크로 구성하도록 하였다. 따라서, 하나의 탱크에는 250kW 미만의 고주파를 공급하므로, 루프 결합기를 이용하여 고주파를 공급할 수 있을 것으로 판단된다.

앞서 언급한 바와 같이 350MHz DTL에서 3MeV의 양성자를 받아 가속하는 경우, 첫 사극 전자석을 드리프트 튜브에 넣는 것이 가장 어려운 설계 요건이다. 이를 극복하기 위해 빔 크기는 다소 증가하나, 사극 전자석 강도를 약하게 할 수 있는 FFDD 형태 집속 구조를 택하였다. 동기 위상 및 가속 전장 강도를 변화시키는 Ramping 구조는 펄스 운전의 대전류 가속기에서는 일반적이나, 본 가속기의 경우 연속운전이므로 가속 전장 강도가 비교적 낮고, 순간 전류도 낮기 때문에 필요없는 것으로 판단하였다. 따라서, 동기 위

상 및 가속 전장 강도는 모든 탱크에 동일한 값을 갖도록 하였다. 표 4는 PARMILA 코드에서 얻어진 각 탱크에서의 셀수, 가속 전장 강도, 사극 전자석 강도 및 동기 위상이다.

Table 3-1. The DTL parameters for each tanks

	Tank 1	Tank 2	Tank 3	Tank 4
Number of cells	51	39	33	29
Energy range (MeV)	3.00 ~ 7.18	7.18 ~ 11.50	11.50 ~ 15.80	15.80 ~ 20.00
Tank length (cm)	443.1	464.9	475.5	477.6
Number of Quads	52	40	34	30
Focusing lattice	FOFODODO	FOFODODO	FOFODODO	FOFODODO
Φ_s (deg)	-30.0	-30.0	-30.0	-30.0
Total Power (kW)	225	225	224	221
Effective Quad length (cm)	3.5	3.5	3.5	3.5
Quad gradient (kG/cm)	5.0	5.0	5.0	5.0
E_0 (MV/m)	1.30	1.30	1.30	1.30
Transit-time factor	0.83	0.83 ~ 0.81	0.81 ~ 0.79	0.79 ~ 0.77

빔 동력학적으로 필요로 하는 사극 전자석의 사극 자장 강도는 5kG/cm, 자극의 길이는 3.5cm로 계산되었다. 이 사극 전자석을 에너지가 높아짐에 따라 조금씩 약하게 하는 경우 빔 크기를 일정하게 유지하고, 전자석 전원 규격을 조금 낮출 수 있는 장점이 있다. 그러나, 같은 강도의 전자석으로 일정하게 설계하면 에너지가 높아질수록 빔 직경이 조금씩 작아지기 때문에 빔 손실이 보다 문제가 되는 고에너지 측에서의 빔 손실을 줄일 수 있으며, 하나의 전자석 전원으로 여러개의 사극 전자석을 운전할 수 있기 때문에 제작 단가를 낮출 수 있는 장점이 있어 같은 사극 자장 강도를 갖는 전자석으로 설계하였다.

동기 위상 및 가속 전장 강도는 각각 -30° 및 1.3 MV/m이다. 최대 표면 전장 강도는 고주파 방전의 기초 상수인 Kilpatrick 수의 0.9배를 넘지 않도록 하여, 제작 및 표면 유지가 용이하도록 하였다.

DTL 내부의 주파수 및 전장 강도 분포는 스러그 튜너를 이용하여 보정할 예정이며, 전장 강도의 안정화는 포스트 커플러를 이용할 예정이다. 스러그 튜너는 1MHz 주파수 보정이 가능하도록 각 탱크에 8개를 설치하도록 설계되었다. 포스트 커플러는 고주파 손실을 유발하고 포스트 커플러 사이의 커플링이 발생하여 조절을 어렵게 하므로, 최소량으로 하는 것이 바람직하다. 미국 SNS³⁾ 및 일본 J-Parc⁴⁾의 예에서 3개의 드리프트 튜브당 하나의 포스트 커플러가 적합할 것으로 판단되어 이를 택하였다.

4. 사극 전자석

1) GL 요구조건

요구되는 GL은 $17.5 \text{ kG/cm} \cdot \text{cm}$ 이다. 10%의 여유를 고려하여 설계 GL은 $20.0 \text{ kG/cm} \cdot \text{cm}$ 로 하였다.

2) 자석 형태

DTL의 사극 자석으로 전자석 및 영구 자석을 사용할 수 있다. 본 가속기의 경우 연속 운전으로 전류가 “0”에서 20mA로 가변이다. 따라서, 빔의 조건에 따라서 사극 전자석 강도를 조절할 필요가 있다. 영구 자석의 경우 매우 제한된 범위에서만 가변이 가능하므로 본 가속기의 사극 자석으로는 전자석을 택하여 설계하였다.

3) 사극 전자석 공간

RFQ에서 입사되는 3MeV의 양성자를 받아들이는 350MHz DTL의 입구에서는 셀의 길이가 6.9 cm이다. 이 셀 길이중 사극 전자석을 수용하게 될 공간은 대략 셀 길이의 60%이 되므로, 전자석의 길이는 4cm 이하가 되어야 한다. 이러한 제한 요건에 따르면 일반적인 제작인 수냉형 사극 코일을 이용하는 방법으로는 제작이 불가능하다. 따라서, 다른 방법을 이용한 설계를 필요로 한다.

4) 사극 전자석 권선 및 냉각

사극 전자석을 위한 공간이 제한되는 경우 다른 두가지 방법이 제안되고 있다. 하나는 도금법을 이용하여 수냉형 코일을 제작하는 방법으로 일본 KEK에서 고안되어 J-Parc 가속기에 사용되고 있는 방법이다. 이 방법은 성능은 매우 우수하나 제작단가가 너무 높아 본 가속기에의 적용은 어렵다. 다른 한 방법으로 프랑스 CEA에서 제안된 변압기용 코일을 사용하고 코일 외부에서 냉각하는 방법이다.⁵⁾ 아직 실증된 장치가 없고 냉각수에 의한 침식의 우려가 있으나, 제작법이 단순하여 본 가속기에서는 이 방법을 채용하기로 하였다.

5) 자극 형상

사극 자장 형성을 위해서는 포물선 자극이 이상적이다. 그러나, 정밀한 비곡면 가공은 어렵고 비싸기 때문에 곡면으로 하는 것이 현실적이다. 본 가속기에 사용될 사극 전자석의 자극 형상은 1% 오차를 갖는 개구 반경이 자극 반경의 70% 이상이 되도록 자극 형상을 결정하였다. 이때 다극 성분도 1% 이하가 되도록 하였다. 그림은 POISSON 코드 (미국 로스알라모스 국립연구소)를 이용하여 계산된 자극 형상이다. 요구되는 사극 성분을 얻기에 충분한 철심을 두어 포화가 일어나지 않도록 하였다.

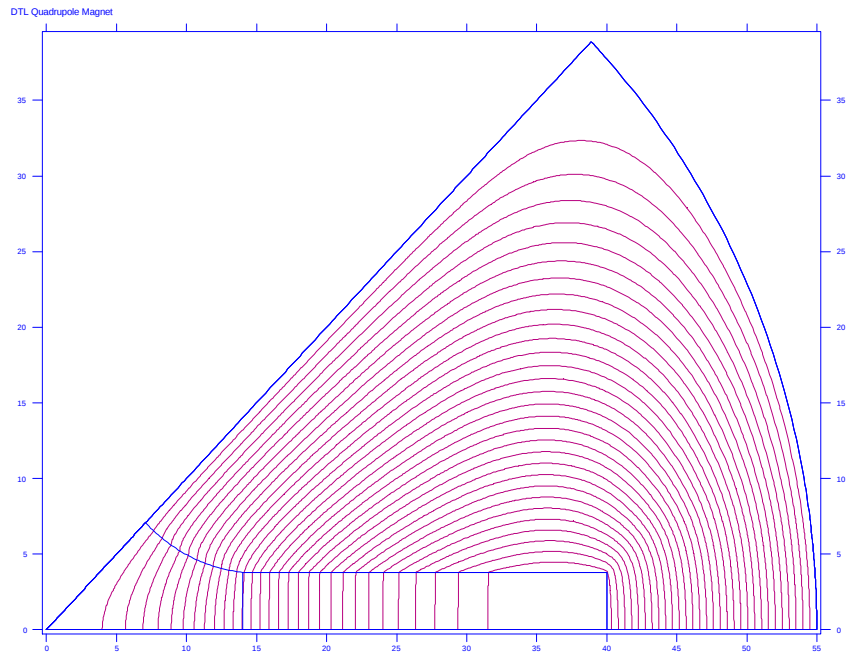


그림 5. DTL 사극 전자석 자극 형상 및 자장 분포

6) 설계 결과

표 4는 사극전자석의 설계 결과를 요약한 것이다. 이 사극 전자석은 DTL의 첫 드리프트 튜브에 넣을 수 있는 크기로 되어 있다. 코일은 냉각을 위한 표면적을 확보할 수 있도록 가는 것으로 하였으며, 이로 인해 발생하는 열 문제는 향후 보다 연구가 필요하다.

Table 4-1 EMQ Parameter

GL	20 kG/cm * cm
External Diameter	110 mm
Bore Diameter	20mm
Pole Length	30mm
Good Field Diameter	14mm (1%)
Multipole	<1%
NI for 20kG	2,200AT
Conductor	3x3mm
# of Turns	8
Joule dissipations	600W

6) 제작 방법

자극은 1010 저탄소강을 재료로 방전가공을 이용하여 정밀하게 제작된다. 제작된 자극에 직접 변압기 코일을 이용하여 권선을 하며 전자석을 제작할 예정이다. 제작된 자극 전자석은 무산소동으로 제작되는 드리프트 튜브에 삽입되어 전자빔을 이용하여 진공 용접이 이루어진다.

5. 설계 종합

앞서 기술한 설계 내용을 가지고 3차원 도면을 구성하면 그림 와 같다. 이 그림은 20MeV DTL 가속기의 4개의 탱크중 가장 저에너지 측에 해당한다. 길이 4m의 탱크에 50여개의 드리프트 튜브가 장착되며, 전장 안정화를 위한 포스트 커플러, 위치 조절 장치, 진공 포트 및 스러그 튜너 포트를 볼 수 있다.

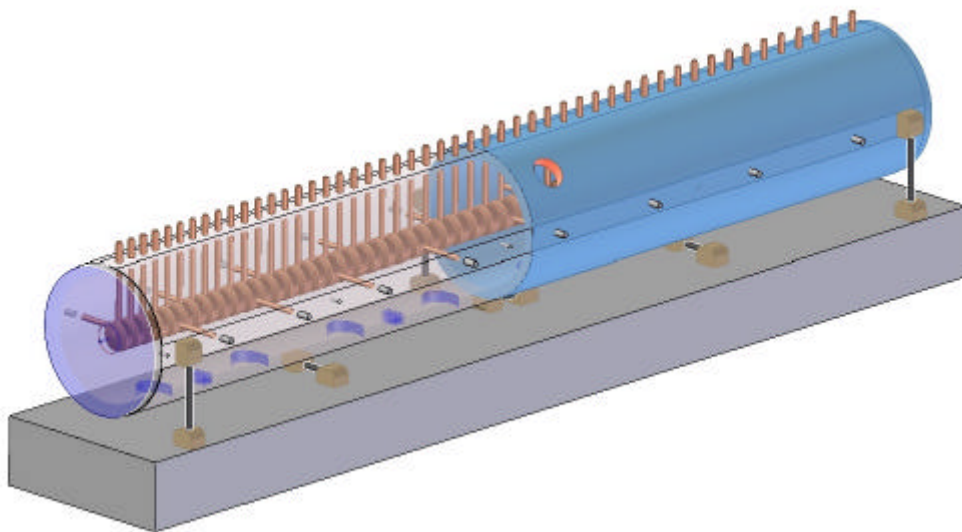


그림 . DTL 탱크 1

6. 결론

KOMAC 양성자 가속기의 20MeV DTL을 설계하였다. 본 가속기는 350MHz RFQ에서 얻어지는 3MeV 20mA를 1MW 고주파원 하나로 연속 운전될 수 있도록 설계를 최적화하였다. 현재 본 가속기를 제작하는데 가장 중요한 요소가 되는 탱크의 표면 도금 및 드리프트 튜브의 전자빔 진공 용접이 시도되고 있다. 이러한, 시험을 바탕으로 설계를 계속 최적화 하면서 본 장치를 제작할 예정이다.

참고 문헌

- 1) Y.S.Cho, et al, "KOMAC DTL (3MeV-20MeV) Preliminary Design Report", PE-30000DD-P001, 2002
- 2) James H. Billen and Lloyd M.Young, "POISSON/SUPERFISH", LA-UR-96-1834, Los Alamos National Laboratory, Sep., 2002
- 3) J.H. Billen, et al, "Room-temperature linac structures for the Spallation Neutron Source", Proc. of 2001 PAC, P1104, 2001
- 4) F. Naito, et al, "Mechanical and rf properties of the DTL for the JAERI/KEK Joint Project", Proc. of XXI International Linac Conference, 2002
- 5) P.E. Bernaudin, et al, "Design of the IPHI DTL", Proc. of 2001 PAC, P3903, 2001