S-band 고주파 전자가속기 가속관의 시뮬레이션 및 정밀가공을 통한 공진주파수 최적화

주진식[1] · 신승욱[2] · 김재현[1] · 이수민[1,3] · 채문식[1] · 차형기[1] · 이남호[1] · 이병노[1,*]

[1]한국원자력연구원 방사선기기연구부, [2]성균관대학교 정보통신대학, [3]한양대학교 원자력공학과

Resonance Frequency Optimization of S-band High Frequency Electron Accelerator Cavity by Simulation and Precise Machining

Jinsik Ju[1], Seung-wook Shin[2], Jaehyun Kim[1], Soomin Lee[1,3], Moonsik Chae[1], Hyungki Cha[1], Nam-Ho Lee[1] and Byeongno Lee[1,*]

[1]*Radiation Equipment Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Geumgu-gil 29, Jeongeup 56212, Republic of Korea*
[2]*College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Republic of Korea*
[3]*Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimri-ro, Seongdonggu, Seoul 04763, Republic of Korea*

Abstract - High-frequency electron accelerators are widely used in the various radiation equipment such as container inspection device, non-destructive inspection system and radiation therapy. The RF characteristics of S-band (2856 MHz) side-coupled structures for accelerator cavity were measured by using E-antenna (in refection), part of the half cell cavity was found to be out of error bound from resonance frequency, and thus was re-processed. When the error bound of the frequency is within 2 MHz, it can be reduced by using external tuning device. But if the error bound is bigger than 10 MHz, external tuning device cannot be used. In this study, Based on the result of accelerator cavity simulation and the precise machining, accelerating cell part and side-coupling cell were reprocessed to produce accelerator cavity frequency that is fit to purpose.

Key words : High frequency electron accelerator, High frequency cavity, S-band, Reprocessing cavity, Precision machining

서 론

산업용 전자가속기는 컨테이너검색기, 비파괴검사, 방사선치료 등의 용도로 다양하게 설치, 운영되고 있으나, 국내 기술의 부족으로 전량 수입에 의존하고 있고 유지 보수에 많은 어려움을 겪고 있다. 가속관의 자체 제작을 위해서는 Half cell Accelerating Cavity (AC), Side coupled Cavity (SC)의 내부 정밀 가공에 영향을 주는 여러 요인들, 즉 장비의 도구, 장비 진동, 절단 상태, 단결정 다이아몬드 칼, 환경 상태, 제조 공정에 들어가는 금속, 가공 중의 금속의 반응 등을 고려해야 하며 정밀 가공 장비에 대한 운전자의 경험도 중요하다(Sandy *et al*. 2018). 본 연구에 사용된 방사선 발생

* Corresponding author: Byeongno Lee, Tel. +82-63-570-3424, Fax. +82-63-570-3429, E-mail. bnlee@kaeri.re.kr

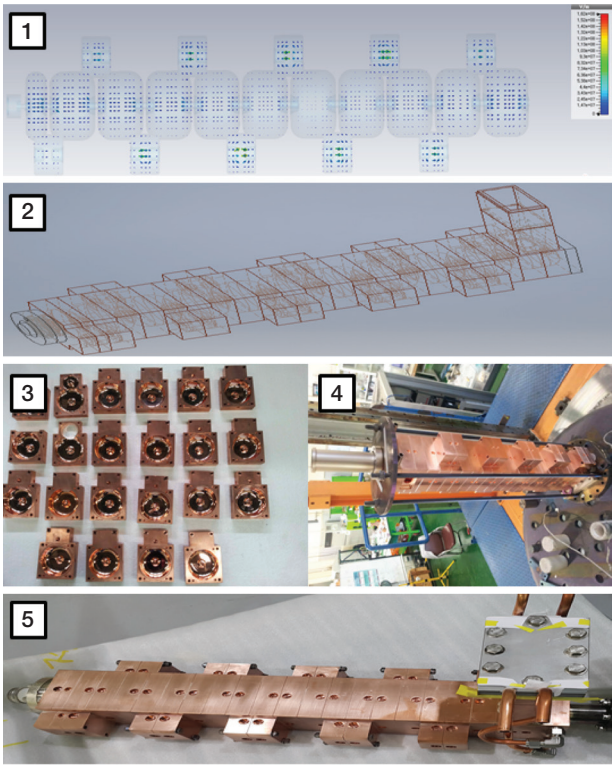

Fig. 1. Production process of making accelerator (1: E-field distribution of side coupled cavity, 2: 3D Layout of the side coupled cavity, 3: Half cell cavity, 4: Total cavity for brazing process, 5: S-band side coupled accelerator).

장치용 가속관은 S-band (2856 MHz) side coupled 구조이며 주요 제작의 흐름은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1-1과 같이 가속관 내부의 RF 주파수 시뮬레이션 결과를 연구 후 전체 가속관의 치수와, 조립 후의 디자인을 고려하여 Fig. 1-2와 같은 가속관의 내부 및 외부의 3D 도면을 완성한다. 원하는 가속관의 재질을 선택한 다음 Fig. 1-3 같이 Half cell 가속관을 가공한다. 사용된 가속관의 부품은 크게 A, B의 Plate로 나누어지며 각각 A, B Plate는 절반의 AC와 절반의 SC를 가지게 된다. A, B Plate는 Fig. 1-3 같이 내부는 같지만 브레이징 라인, SC 공진주파수 측정 구멍에 차이가 있다. 본 연구에서는 가속관 내부의 정밀가공은 완성된 가속관의 성능, 주파수 특성, Q-value, 진공도 등에 영향을 미치며 가속관 내부 표면거칠기를 Ra = 50 nm 이하로 가공을 하였다(Ao and Hayashizaki 2002). 또한, Half cell 가속관을 네트워크 애널라이저를 사용하여 RF 특성을 측정 후 시뮬레이션 공진주파수로부터 RF parameter들이 시뮬레이션 결과와 비교하였다(Sasan 2017). Fig. 1-4와 같이 하나의 몸체로 연결한 다음 Fig. 1-5와 같이 완성하였다. 본 논문은 Fig. 1의 3번과 4번 사이 제작 과정 중 완성된 Half cell 가속관의 공진주파수를 네트워크 애널라이저로 측정한 다음 가속관에 달린 튜닝 장치로도 공진주파수의 튜닝이 불가능한 Half cell 가속관을 부분 정밀 재가공하여 공진주파수 변화를 연구하였다. 가속관의 튜닝 오차를 많이 초과한 가속관 내부를 재가공하여 시뮬레이션의 공진주파수 결과와 비슷한 주파수를 얻을 수 있었다.

대상 및 방법

1. 가속관 전산모사

AC와 SC가 연결된 가속관을 간단하게 도식화하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 L_1과 L_2는 각각 가속관의 AC와 SC 부분의 inductance를 나타내며 C_1과 C_2는 가속관 AC와 SC 부분의 capacitance를 나타내고 R_1과 R_2는 resistance를 나타낸다.

AC Cavity, SC Cavity의 고유 진동수는

$$F_{0a}=\frac{1}{2\pi\sqrt{2L_1C_1}},\ F_{0b}=\frac{1}{2\pi\sqrt{2L_2C_2}}\ \text{이며,}$$

Resistance는 $R_1=2\pi\frac{2L_1f_{0a}}{Q_1},\ R_2=2\pi\frac{2L_2f_{0b}}{Q_2}$ 이다.

여기에서 Q_1, Q_2는 Quality factor이다. AC와 SC의 상호 Inductance M은 $M=k\sqrt{L_1L_2}$가 되고 여기서 k는 두 coupling coefficient가 된다. Fig. 2에서의 폐회로에서 각각의 AC와 SC의 motive force potential은 E_1, E_2로 나타내고 I_1, I_2는 폐회로에서의 전류를 나타낸다. 수식으로 정의하면 다음과 같다.

$$E_1=i_1\left(j\omega 2L_1+R_1+\frac{1}{j\omega C_1}\right)+j\omega Mi_2 \quad (1)$$

$$E_2=i_2\left(j\omega 2L_2+R_2+\frac{1}{j\omega C_2}\right)+j\omega Mi_1 \quad (2)$$

여기서 $i_1=\frac{E_1}{j\omega\sqrt{2L_1}},\ i_2=\frac{E_2}{j\omega\sqrt{2L_2}},\ X_1=i_1\sqrt{2L_1},\ X_2=i_2\sqrt{2L_2},$ $f=\frac{\omega}{2\pi}$ 으로 위의 식에 대입하면 다음과 같은 식이 나온다.

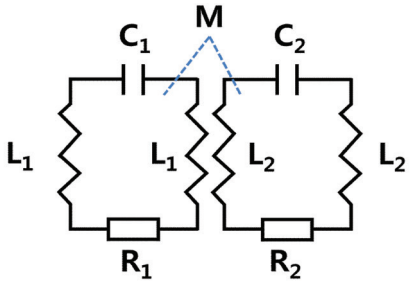

Fig. 2. Schematic of half cavity AC-SC Part.

$$I_1 = X_1\left(1-\frac{f_{0a}^2}{f^2}+\frac{f_{0a}}{jQ_1 f}\right)+\frac{k}{2}X_2 \quad (3)$$

$$I_2 = X_2\left(1-\frac{f_{0b}^2}{f^2}+\frac{f_{0b}}{jQ_2 f}\right)+\frac{k}{2}X_1 \quad (4)$$

여기서 $Q_1, Q_2 \rightarrow 10000$으로 보면, (3), (4)의 식에서 $\frac{f_{0a}}{jQ_1 f}\approx 0$, $\frac{f_{0b}}{jQ_2 f}\approx 0$으로 볼 수 있다. 그래서 다음 식과 같이 나타낼 수 있다(Katalev and Choroba 2004).

$$I_1 = X_1\left(1-\frac{f_{0a}^2}{f^2}\right)+\frac{k}{2}X_2 \quad (5)$$

$$I_2 = X_2\left(1-\frac{f_{0b}^2}{f^2}\right)+\frac{k}{2}X_1 \quad (6)$$

(5), (6) 식의 해를 구하려면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{vmatrix} 1-\frac{f_{0a}^2}{f^2} & \frac{k}{2} \\ \frac{k}{2} & 1-\frac{f_{0b}^2}{f^2} \end{vmatrix} = 0,$$

이것을 풀면 $\left(1-\frac{f_{0a}^2}{f^2}\right)\left(1-\frac{f_{0b}^2}{f^2}\right)-\frac{k^2}{4}=0$이 된다. 이 식을 풀게 되면 고유 진동수 f_1, f_2를 구할 수 있으며 역으로 응용하면 f_1, f_2를 알고 있으면 단일 가속관 f_{0a}, coupling coefficient k를 구할 수 있다. 그 식은 다음과 같다.

$$k = 2\sqrt{\frac{[(f_{0a}/f_1)^2-1][1-(f_{0a}/f_2)^2]}{(f_{0a}/f_1)^2+(f_{0a}/f_2)^2-1}} \quad (7)$$

$$f_{0b} = \frac{f_{0a}}{\sqrt{(f_{0a}/f_1)^2+(f_{0a}/f_2)^2-1}} \quad (8)$$

(7), (8)의 식을 시뮬레이션 프로그램에 적용시키면 단일 가속관 주파수 f_{0a}, f_{0b} 그리고 고유 진동수 f_1, f_2를 계산할 수 있다. 또한 k값도 구할 수 있다(Samy 2012).[1]

2. 단일 가속관 측정 방법

S-band 가속관의 주파수와 시뮬레이션 결과의 주파수를 비교 측정하기 위하여 각각의 가속관의 주파수를 측정하여야 한다. 주파수를 비교 측정하기 위하여 하나의 Cavity를 측정하는 것이 필요하다. 이때 네트워크 애널라이저(Agilent, E5061B)를 사용하여 가속관의 SC 부분과 AC 부분을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 Plate를 양 옆으로 고정하여 막고 E-antenna (E-probe)를 사용하여 네트워크 애널라이저에서 주파수를 측정한다.

Fig. 4는 네트워크 애널라이저의 측정 결과를 보여준다.

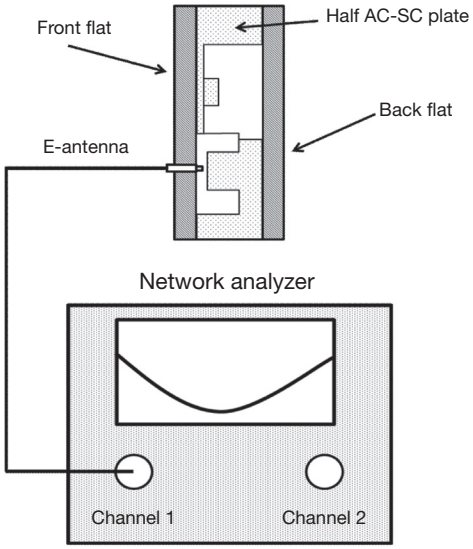

Fig. 3. Schematic of measuring the S-band half cavity.

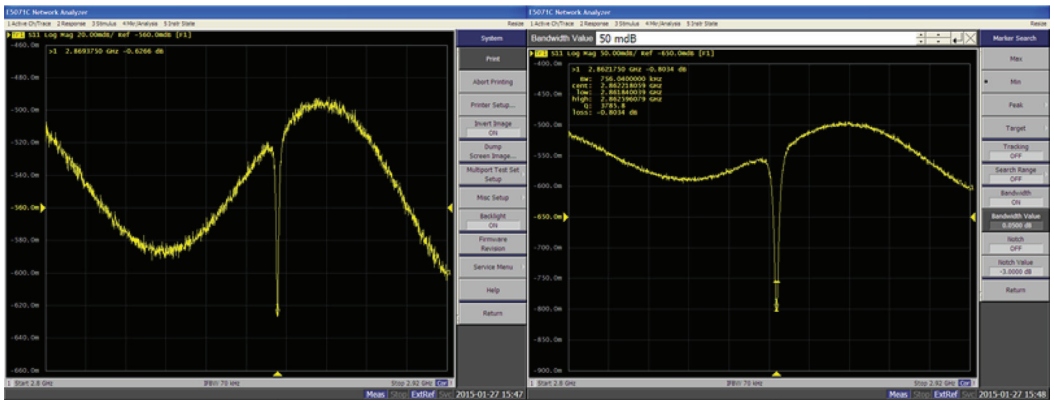

Fig. 4. Measurement of SC (left, 2869.3 MHz) and AC (right, 2862.1 MHz) before re-machining.

[1] "Conceptual Design of RF LINAC for Industrial Applications", KAERI/TR-4355/2011

단일 가속관의 공진주파수 S11을 측정해본 결과 SC에서는 2869.3 MHz가 측정이 되었고, AC에서는 2862.1 MHz가 측정되었다.

3. 고주파 가속관 측정 결과

Fig. 5는 고주파 가속관의 A Plate (half cell number: 5,6, 7,11,13,15,17,19,21,24,26,28,30,32,34,36,38)의 주파수 측정 그래프이다. 각각의 가속관을 측정한 결과 가속관의 AC 파트의 주파수의 평균은 약 2857.4 MHz가 측정되었으며 SC 파트의 주파수는 평균 2863.4 MHz가 측정되었다. 각각의 가속관 AC 파트의 주파수가 시뮬레이션 결과인 2863.3 MHz와 많은 차이가 있다.

Fig. 6의 그래프는 고주파 가속관의 B Plate (half cell number : 8,9,10,12,14,16,18,20,25,27,29,31,33,35,37)의 주파수 측정 그래프이다. B Plate 가속관을 측정한 결과 AC 파트의 주파수의 평균은 2857.2 MHz가 측정되었으며 SC 파트의 주파수는 평균 2861.4 MHz가 측정되었다. 각각의 B Plate 가속관 시뮬레이션 결과인 2863.3 MHz와 가공된 각각의 가속관 AC, SC 파트의 주파수에 차이를 보여준다.

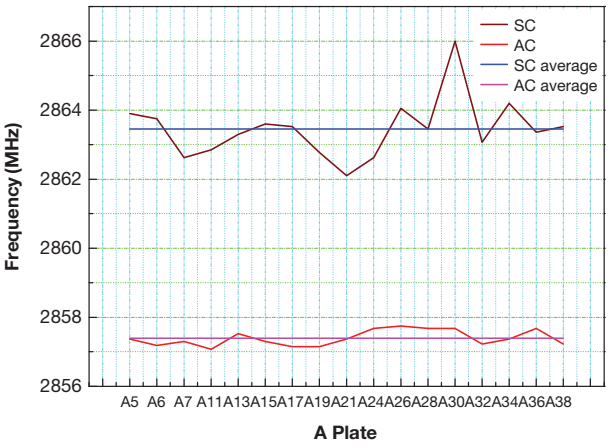

Fig. 5. Measurement date of A Plate before re-machining (X axis: half cell number, Y axis: Frequency MHz).

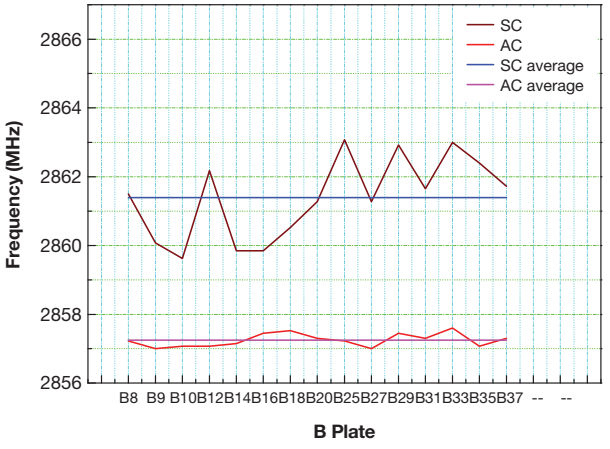

Fig. 6. Measurement date of B Plate before re-machining (X axis: half cell number, Y axis: Frequency MHz).

Table 1. Measurement results of AC, SC average frequency before re-machining

	Cavity	Frequency (MHz)
SC	A Plate (17 EA)	2863.453
	B Plate (15 EA)	2861.394
AC	A Plate (17 EA)	2857.394
	B Plate (15 EA)	2857.183

Table 2. Measurement results of coupler cavity frequency before re-machining

	Frequency (MHz)	
	AC	SC
C1A	2872.8250	2861.7250
C1B	2872.1875	2861.8750
C2A	2876.6500	2861.7250
C2B	2877.0625	2860.8438

Table 1은 A, B Plate 가속관의 SC, AC 평균 주파수를 나타낸 것이며 AC 가속관의 주파수가 SC 가속관의 주파수보다 평균 4~6 MHz 낮음을 알 수 있다.

Table 2는 Coupler 가속관의 2 Set를 각각 주파수를 측정한 자료이다. Couper 가속관의 AC 주파수가 SC 주파수 보다 평균 13 MHz 높았고 시뮬레이션 결과와 다름을 확인하였다.

4. 고주파 가속관 재가공 시뮬레이션

단일 가속관의 주파수를 변화시키기 위하여 각각의 튜닝 구멍으로 주파수를 변화시킬 수 있지만 튜닝 구멍의 내/외부 사이의 막의 크기가 1.5 mm라서 튜닝 시 실수할 경우 Half cell 가속관 내/외부막에 구멍이 생겨 단일 가속관을 사용하지 못하는 현상이 발생한다. 단일 가속관 공진주파수 튜닝 오차가 큰 가속관을 시뮬레이션 공진주파수와 동일한 공진주파수를 얻기 위하여 Fig. 7의 가속관 부분을 재가공 가능 깊이 만큼 수정하여 시뮬레이션 후 공진주파수 변화를 확인했다.

Fig. 8에 나타난 3D 도면과 같이 Half cell SC 측정을 위하여 왼쪽과 같이 시뮬레이션 도면을 제작하고 AC 측정을 위하여 오른쪽과 같이 도면을 제작한다. 각각의 설정된 E-probe를 통하여 S11 시뮬레이션 공진주파수를 측정한다.

Fig. 9에는 SC와 AC의 재가공 깊이에 따른 공진주파수를 나타내었으며 SC는 0.01 mm씩 Fig. 7-1의 부분을 제거하였으며 AC 부분은 각각 Fig. 7-2, 3의 부분을 0.1 mm씩 제거하였다. Fig. 9의 결과를 바탕으로 Fig. 7에 표시된 부분을

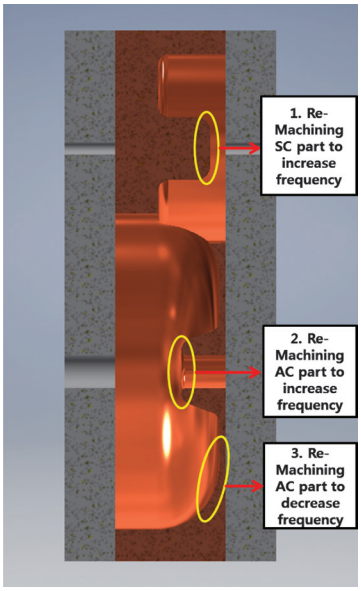

Fig. 7. Schematic of re-machining part.

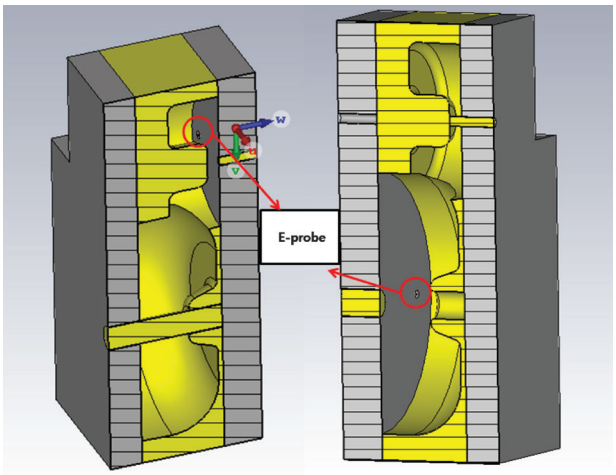

Fig. 8. Schematic of resonance frequency measurement method (left: SC, right: AC).

재가공하면 공진주파수가 변한다는 것을 알 수 있으며, 위의 자료를 참고하여 재가공 깊이와 공진주파수의 비례관계를 적용하여 실제 가속관을 정밀 재가공하였다.

5. 고주파 가속관 정밀 재가공

정밀 재가공 방법은 Fig. 10에 나타난 사진과 같은 방법으로 half cell을 머시닝 센터(WIA, 하나테크) 장비에 고정하여 고정된 half cell이 회전을 하는 동안 다이아몬드 툴이 정해진 위치를 앞/뒤로 움직이면서 정밀 재가공을 진행한다. 정밀 재가공 시 Fig. 7에 나타난 부분의 재가공 깊이는 Fig. 9의 결과와 시험용 half cell 가속관으로 많은 변수를 만들어

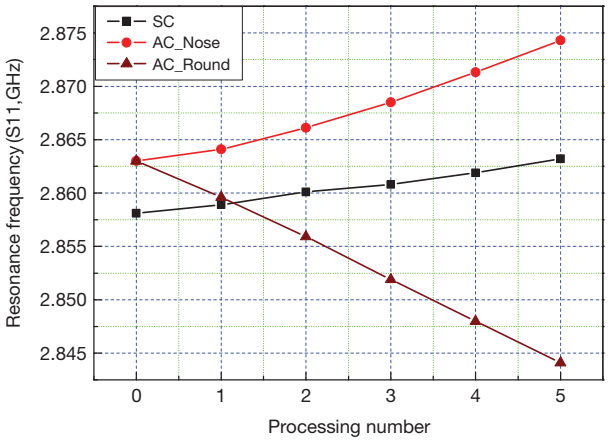

Fig. 9. Simulation results of re-machining for test half cell (■: Processing Cutting length/0.01 mm, ●, ▲: Processing Cutting length/0.1 mm).

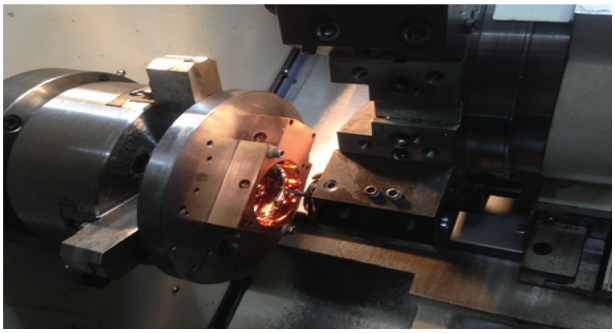

Fig. 10. Photo of re-machining AC cavity.

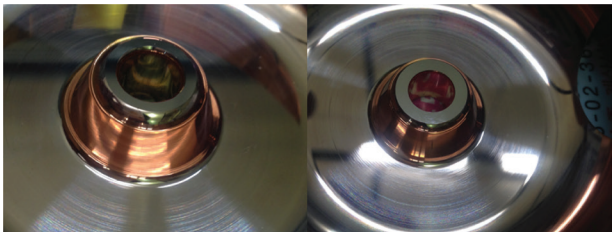

Fig. 11. Photo of re-machining before (left) and after (right).

주파수를 측정해 본 결과를 바탕으로 하여 재가공 깊이의 변수를 만들었다. 가속관 SC 부분의 공진주파수를 높이기 위하여 Fig. 7-1에 나타난 SC 부분을 정밀 재가공하며 가속관 AC 부분의 공진주파수를 높이기 위하여 Fig. 7-2에 나타난 AC 노즈콘 부분을 정밀 재가공한다. 또한 가속관 AC 부분의 공진주파수를 낮추기 위하여 Fig. 7-3에 나타난 부분을 정밀 재가공한다.

Fig. 11의 왼쪽은 재가공 전의 half cell의 AC 사진이며 Fig. 7의 2번 부분인 노즈콘 부분을 재가공한 뒤의 사진이 Fig. 11의 오른쪽에 나타나 있다.

결 과

1. 가속관 SC 주파수 높이는 재가공 후 측정

Fig. 12에서 가속관 B Plate (half cell number: 8,9,10,12, 14,16,18,20,25,27,29,31,33,35,37)의 SC 부분 주파수를 재가공 전과 후 비교한 자료이며 각각의 가속관에서 Fig. 7-1의 부분을 재가공한 높이(mm)를 나타낸다. 정밀 재가공 후 15개의 half cell 가속관의 SC 부분의 평균 공진주파수가 증가하였다.

2. 가속관 AC 주파수 높이는 재가공 후 측정

Fig. 13은 가속관 B Plate의 (half cell number: 8,9,10,12, 14,16,18,20,25,27,29,31,33,35,37) AC 부분 주파수를 재가공 전과 후 비교한 자료이며 각각의 가속관에서 Fig. 7-2의 부분을 재가공한 높이(mm)를 나타낸다. 정밀 재가공 후 15개의 half cell 가속관의 AC 부분의 평균 공진주파수가 증가하였다.

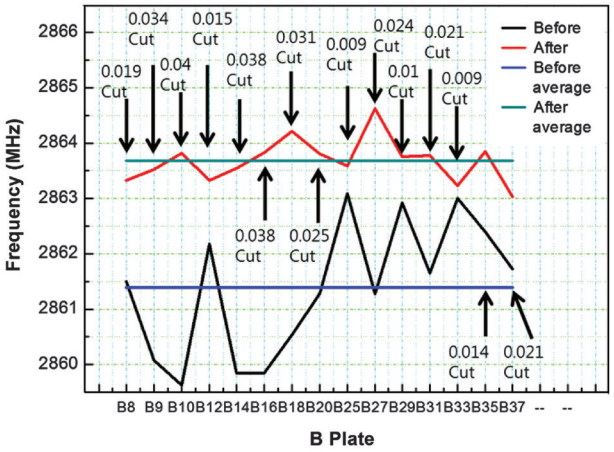

Fig. 12. Measurement of B plate SC cavity frequency after re-machining and re-machining part depth (mm) (X-axis: half cell number, Y-axis: Frequency MHz).

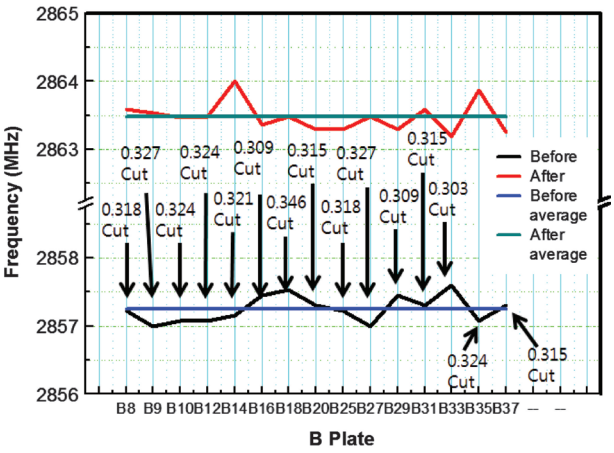

Fig. 13. Measurement of B plate AC cavity frequency after re-machining and re-machining part depth (mm) (X-axis: half cell number, Y-axis: Frequency MHz).

Table 3. Measurement of Coupler frequency after re-machining

Coupler	Step	Before (MHz)	AC Cut (mm)	After (MHz)
1	Step1	2876.6500	0.20	2868.1490
	Step2	2868.1490	0.25	2859.0000
2	Step1	2877.0625	0.20	2870.2000
	Step2	2870.2000	0.25	2860.5600

3. Coupler 가속관 AC 주파수를 낮추는 재가공

Table 3은 가속관 Coupler 가속관 A,B Plate의 AC 부분 주파수를 재가공 전과 후 비교한 자료이며 각각의 가속관에서 Fig. 7-3의 AC 재가공 높이를 나타낸다. Coupler 가속관의 재가공 작업은 2회에 걸쳐 작업을 하였으며 제거 전과 후의 주파수를 측정하여 Table 3에 나타내었다. 1번 Coupler 가속관 AC 부분을 0.45 mm 재가공한 결과는 2876.6500 MHz에서 2859.000 MHz으로 17.65 MHz가 낮아졌고, 2번 Coupler 가속관 AC 부분을 0.45 mm 재가공한 결과 2877.0625 MHz에서 2860.5600 MHz으로 16.5025 MHz가 낮아졌다.

고 찰

가속관 가공이 시뮬레이션 결과와 정확히 일치하여 가공이 되었다면 가공된 가속관의 측정결과도 시뮬레이션 결과와 같을 것이다. 하지만 가속관 시뮬레이션의 공진주파수 결과가 가속관의 주파수 튜닝장치의 튜닝 한계를 초과하였을 경우 가속관 내부를 정밀 재가공하여 가속관 내부 시뮬레이션의 공진주파수 결과와 유사하게 가공하여야 한다. 가속관 내부의 가공은 완성된 가속관의 성능, 주파수 특성, Q-value, 진공도 등의 결과 특성에 영향을 미쳐서 다이아몬드 정밀 가공을 해야 하며 Fig. 14와 같이 표면거칠기(Ra)는 50 nm 이하로 정밀 가공을 해야 한다(Atieh *et al*. 2011).

또한 가속관의 공진주파수 측정시 온도 영향으로 미세하게 공진주파수가 변하기 때문에 가속관의 공진주파수 측정 작업시에는 외부 온도를 동일한 조건(20°C)에서 측정을 해야 한다.[2] 가속관 공진주파수 튜닝작업을 하다 보면 생각보다 과한 힘을 주어 가속관 내/외부 막이 찢어져 단일 가속

[2] "Conceptual Design of RF LINAC for Industrial Applications", KAERI/TR-4355/2011

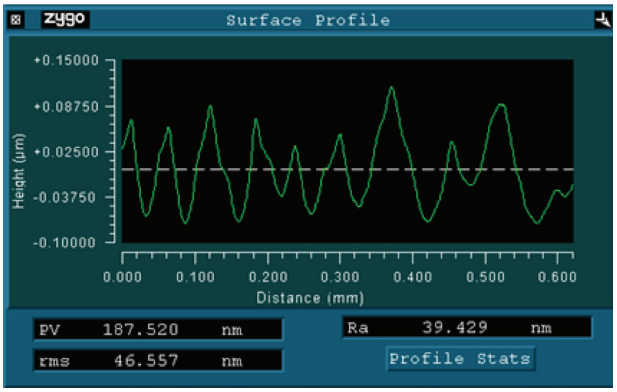

Fig. 14. Measurement of Cavity surface (Ra).

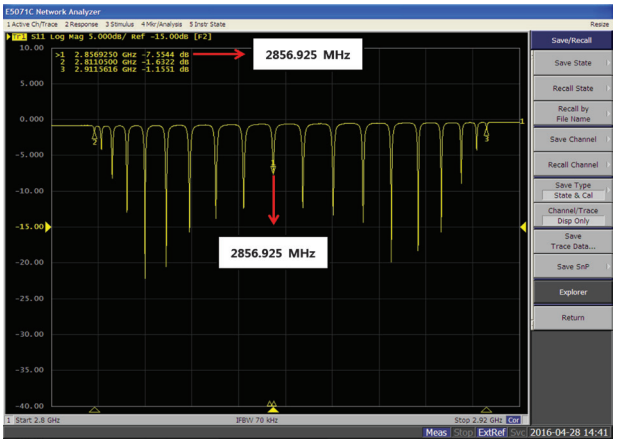

Fig. 15. Measurement of S-band $\pi \cdot 2^{-1}$ frequency (2856.925 MHz).

관을 사용하지 못할때가 있다. 시간과 비용을 낭비하지 않기 위하여 공진주파수 튜닝 한계를 초과한 가속관은 본 연구와 같이 재가공을 하여 시뮬레이션 결과와 동일한 공진주파수 값을 얻을 수 있다. 가속관 내부 재가공의 깊이는 Half cell 가속관 시뮬레이션 결과와 시험용 단일 가속관으로 여러 변수를 만들어 결과를 얻었으며, 재가공 깊이와 공진주파수의 관계를 대략적인 비례 수식으로 계산하여 가공하였다. 각각의 가속관의 주파수를 측정하였을 때 2863.3 MHz가 나와야 전체 가속관 측정을 할 때 시뮬레이션 결과와 같이 2856.3 MHz가 나온다.[3]

이와 같이 주파수가 떨어지는 현상은 각각의 가속관 주파수를 측정하는 시뮬레이션을 측정 결과와 가속관 재가공 후 전체 측정하였을 때 Fig. 15와 같이 공진주파수($\pi \cdot 2^{-1}$)가 2856.9 MHz가 나오는 것을 보아도 알 수 있다. 가속관 가공 작업이 시뮬레이션 결과와 같이 정확하면 재가공 작업을 하지 않아도 되지만 여러 변수로 인하여 가속관 공진주파수의 오차가 발생 시에는 이번 논문과 같은 작업으로 튜닝을 할 수 있다.

결 론

가속관 시뮬레이션을 바탕으로 2D 및 3D 도면을 제작하여 각각의 Cavity를 정밀 가공하였다. 가공 후 제작된 가속관의 공진주파수를 측정하며 시뮬레이션 결과와 동일한지 측정을 하지만 여러 가지 환경 변수로 인하여 같은 가속관의 도면이라도 가속관 정밀 가공 과정에서 미세하게 차이가 생길 수가 있으므로 공진주파수 측정결과가 조금씩 차이가 발생한다(Song 2013). 당초 오차범위가 5 MHz 이상이 발생하여 외부 튜닝으로 파괴의 위험이 있는 Half cell을 정밀 재가공 연구를 진행하였으며 그 결과 Fig. 7의 부분을 변화된 시뮬레이션 결과와 시험용 가속관으로 재가공 작업 후 AC, SC 부분의 공진주파수가 가변이 가능하다는 것을 확인하였다. 본 연구를 통하여 가속관 공진주파수 가변을 위하여 가속관 내부의 부분 정밀 재가공 정도에 따른 공진주파수 변화를 측정해 보았으며 가속관 내부 부분(AC, SC) 재가공으로 공진주파수 가변을 확인하였다. 이를 바탕으로 S-band 전자가속기를 정밀 제작하여 컨테이너 검색기 제작에 적용하였으며[4], 앞으로 제작될 전자가속관 시뮬레이션 및 튜닝 작업에도 많은 도움이 될 것이다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부 주관의 원자력연구개발사업인 복합방사선 발생장치 및 시스템 통합기술개발(NRF No. 2017M2A2A4A05018182) 과제로부터 지원받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Ao H and Hayashizaki N. 2002. R&D status of the annuler coupled structure linac for the JAERI/KEK joint project. Proceedings of LINAC2002 (Gyeongju, Korea). pp. 82-84.

Atieh S, Aicheler M, Cherif A, Deparis L, Glaude D, Remandet L, Riddone G, Gudkov D and Samoshkin A. 2011. Maching and characterizing X-band RF-structures for CLIC. Proceedings of IPAC2011 (San Sebastian, Spain). pp. 1768-1770.

[3] "Conceptual Design of RF LINAC for Industrial Applications", KAERI/TR-4355/2011
[4] "Commercialization of domestic standard container inspection system", KAERI/RR-4148/2016

Samy H. 2012. RF Linear Accelerators for Medical and Industrial Applications. 1st ed. pp. 15-40. Artech House. USA.

Sandy ST, Hao W and Wing BL. 2018. Materials Characterisation and Mechanism of Micro-Cutting in Ultra-Precision Diamond Turning. Springer, pp. 7-17. Germany.

Sasan A. 2017. Design and construction of brazed side coupled cavity of medical accelerator. Proceedings of IPAC2017 (Copengagen, Denmark). pp. 4664-4666.

Song KB. 2013. Cold Test Results of a Side-Coupled Standing-wave Electron-accelerating Structure. *J. Korean Phys. Soc*. **63**(2):174-179.

Katalev V and Choroba S. 2004. Tuning of external Q and phase for the cavities of a superconducting linear accelerator. Proceedings of LINAC 2004 (Lubeck, Germany). pp. 724-726.

Received: 20 February 2018
Revised: 15 March 2018
Revision accepted: 24 May 2018