

KSTAR 토카막 장치에서 TF 자석 구조물의 조립에 관한 검토

김경민[†]·최창호*·홍권희*·양형렬*·유인근*·허남일*·사정우*
김학근*·김근홍*·김상태*·김홍택*·양진석*·박주식*·김재호**

Study on Assembly of TF Coil Structure in KSTAR Tokamak

K.M.Kim, C.H.Choi, K.H.Hong, H.L.Yang, I.K.Yu, N.I.Her, J.W.Sa, H.K.Kim,
G.H.Kim, S.T.Kim, H.T.Kim, J.S.Yang, J.S.Bak, and C.H.Kim

Key Words: Spacer(스페이서), KSTAR(차세대 핵융합 연구), TF coil structure(TF자석 구조물),
Taper ring(테이퍼 링), Misalignment measuring instrument(편심측정도구)

Abstract

TF magnet structures are the main structural components in the KSTAR magnet systems to protect the superconducting coils from mechanical, electrical, and thermal loads. TF coil structure supports CS and PF coil system. The inter-coil structure contains adjustable shear keys and conical bolts to provide pre-loading in toroidal direction and to resist against in-plane and out-of-plane forces that are the most critical loads on the TF magnet system. The conical bolts and shear keys are specially designed to assemble easily and to provide a convenient accommodation for a good alignment. The connection plate that is one of the prototype fabrications had been manufactured to study adjustability of conical bolts and shear keys for assembly of TF coil structure. We could measure the misalignments at the keyways and conical holes with the misalignment measuring instrument.

1. 서 론

차세대 핵융합 연구 장치인 KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 토카막 장치의 주요 구성품으로는 초전도 자석, 초전도 자석 구조물, 진공용기, 저온용기, 열차폐막, 플라즈마 대향부품 등으로 구성되어 있다.⁽¹⁾

초전도 자석 구조물은 초전도 자석을 구조적, 열적 그리고 전기적으로 보호하는 구조물이며 TF (Toroidal Field) 자석 구조물, PF (Poloidal Field) 자석 구조물, CS (Central Solenoid) 구조물로 나누어진다. 총 16 개로 구성되어 있는 TF 자석 구조

물 각각은 D-형상이며 높이는 약 4.2 m, 폭은 약 3 m, 22.5°의 각도를 이루는 부채꼴 모양으로 설계되었다.⁽²⁾ Fig. 1은 TF 자석 구조물 한 개와 주요 부분의 명칭을 나타내었다.

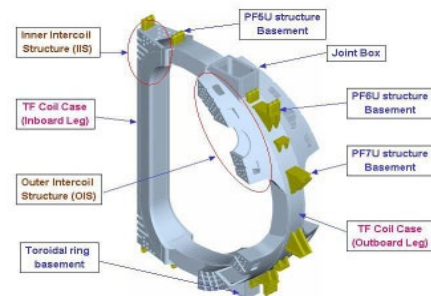


Fig. 1 Configuration of TF coil structure

본 연구는 TF 자석 구조물의 조립 공정 개발을 위해 수행되었다. 특히, 자석 구조물의 조립 과정에서 서로 어긋남이 생겼을 경우 키홈과 원추형 구멍에서 발생하는 국소 부위의 편심 측정 도구를 개발·제작하였으며 그 측정 방법과 원리를

[†] 한국기초과학지원연구원 핵융합사업단

E-mail : kyungmin@kbsi.re.kr

TEL : (042)870-1716 FAX : (042)870-1709

* 한국기초과학지원연구원 핵융합사업단

** 경북대학교 기계공학부

었다. Fig. 5는 실제 제작한 측정 도구이다.

측정도구의 몸체가 키홈에 완전히 밀착되면 측정도구의 다리 부분은 몸체의 중심을 나타내는 동시에 키홈의 중심을 함께 나타낸다. 이때 다리 부분을 측정하면 국소 부위인 키홈에서 발생한 편심량을 알 수가 있다. Fig. 7에 측정도구의 측정 과정을 나타낸 그림이다.

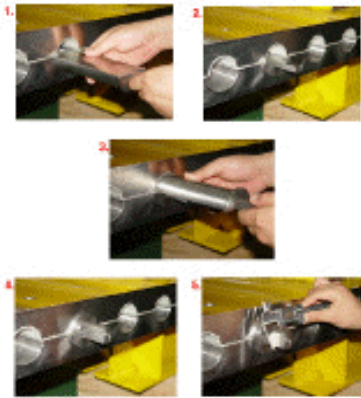


Fig. 7 Measuring method of spacer misalignment measuring instrument

(1)~(3) 측정 도구의 몸체를 조립된 키홈에 완전히 삽입한다.

(4) 주변의 볼트를 완전히 체결하여 측정 도구와 키홈 사이에 틈새가 생기지 않도록 주의한다. IIS 부분에는 모형 원추형 볼트를 체결하고 OIS 부분에는 M30 육각볼트를 체결한다. 여기서 모형 원추형 볼트는 가공 전인 테이퍼 링을 제외한 와셔와 너트만을 사용한 볼트를 말한다.

(5) 준비한 버니어캘리퍼스를 이용해 측정 도구의 다리 부분을 측정한다.

편심량 계산은 Fig. 8과 같이 측정값 A 값에 다리 부분의 치수인 18 mm를 식(1)과 같이 빼주면 계산할 수 있다.

$$\text{편심량}(mm) = A - 18.0 \quad (1)$$

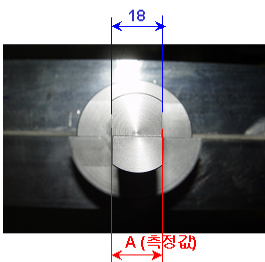


Fig. 8 Misalignment at keyway

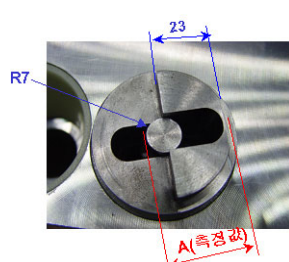


Fig. 9 Misalignment at conical hole

3.2 테이퍼 링 편심측정도구

원추형 구멍의 편심 측정 도구를 ‘테이퍼 링 편심측정도구’ 라하며, 측정 다리와 몸체로 구성된 본체와 2개의 플러그, 총 3개로 구성된다. 본체의 다리 부분은 몸체의 중심과 일치한다. Fig. 6은 실제 제작한 측정 도구이다. 본체와 측정 플러그가 편심된 원추형 구멍에 완전히 삽입되기 위해서는 다리 부분은 플러그의 일직선 구멍에 삽입되고, 동시에 일직선 구멍은 최대 편심 방향으로 정렬되어야만 한다. 삽입 후 측정 플러그의 측정면과 다리 부분을 서로 측정하면 편심량을 측정할 수 있다. 여기서 포스트 플러그는 본 측정에 앞서 최대 편심 방향을 예측하기 위해 사용된다. Fig. 10은 측정 과정을 나타낸 그림이다.

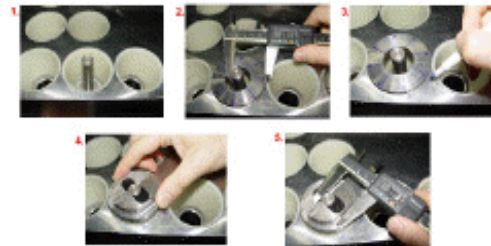


Fig. 10 Measuring method of taper ring misalignment measuring instrument

(1) 측정 본체를 삽입하여 완전히 밀착시킨다.

(2) 반대편에 먼저 포스트 플러그를 삽입한다.

(3) 포스트 플러그 외각면에 표시된 8 지점과 본체의 다리 사이를 측정하여 최대 또는 최소값이 되는 구간이 최대 편심 방향이 존재할 구간이므로 그 부분을 표시한다.

(4) 측정 플러그를 최대 편심 방향으로 삽입하여 완전히 밀착시킨다.

(5) 본체의 다리 부분과 측정 플러그의 측정면과의 거리를 버니어캘리퍼스로 측정한다.

편심량 계산은 Fig. 9의 측정값 A 값에 다리 부분의 치수 7 mm와 측정 플러그 중심에서 측정면까지의 거리 23 mm를 식 (2)와 같이 빼주면 계산할 수 있다.

$$\text{편심량}(mm) = A - 7.0 - 23.0 \quad (2)$$

4. 조립 시험

조립 시험을 위해 Connection plate A와 B 두 세트를 실험 크기로 제작하였으며, 시험의 목적은 다음을 확인하는데 있다.

- (1) 자체 개발·제작한 편심 측정 도구가 국소 부위에서의 편심량을 측정하는데 적합한가?
 - (2) 편심량에 따라 제작한 편심 스페이서와 테이퍼 링이 제작 공차에 맞게 가공되었는가?
 - (3) 편심 스페이서와 테이퍼 링의 체결에 문제점은 없으며 편심량을 반영한 조립이 가능한가?
- 다음은 조립 시험의 절차 및 방법이다.

(1) B-Connection plate가 아래에 오게 조립한다. 이때 Fig. 11과 같이 IIS 양 끝지점을 기준으로 '2 mm' 이내의 편심이 생기도록 설치한다.

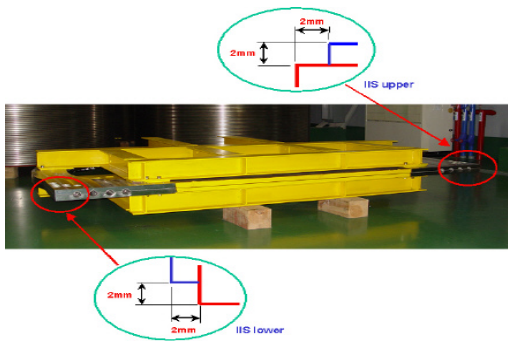


Fig. 11 Assembly tolerance of TF coil structure & connection plate

- (2) IIS 부분에는 모형 원추형 볼트(14 개)와 OIS 부분에는 M30 육각볼트(100 개)를 느슨하게 체결한다.
- (3) 키홈 18 개, 원추형 구멍 14 개의 지점에서 편심측정도구를 사용해 편심량을 측정한다.
- (4) 측정된 편심량에 따라 편심 스페이서와 테이퍼 링을 제작하고, 가공품의 치수를 측정한다.
- (5) 전단키와 편심 스페이서를 체결한다.
- (6) 원추형 볼트와 M30 육각볼트를 정격 토크(48kgf·m)로 완전히 체결한다.
- (7) 두께 게이지를 사용하여 전단키 부분의 틈새를 측정하여 체결 정도를 확인한다.

4.1 가공품 치수 측정

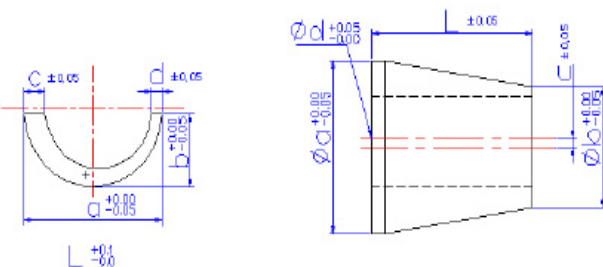


Fig. 12 Measuring items & machining tolerance

Fig. 12는 치수 확인 항목 및 허용 가공 공차를 나타낸 그림이다.

편심 스페이서는 밀링 머신에 설치하여 항목 a, c, d를 다이얼 인디케이터로 측정하였다. 항목 a, c, d는 모따기가 되어 있어 수평면에서 3.5 mm 내려 온 지점을 측정하였다. 항목 b는 정반에서 높이 게이지로 측정하였고, 각각의 항목은 길이 L에서 50 mm 간격으로 반복 측정하였다.

편심 테이퍼 링의 측정항목 a는 버니어캘리퍼스 세 지점을 측정하여 평균값을 구하였고, 항목 b는 네 지점의 평균 테이퍼 각도와 길이 L을 이용 CAD상에서 산출하였다. 항목 c는 선반에 설치하여 다이얼 인디케이터를 이용해 측정하였고, 항목 d는 실린더 게이지를 사용하였다.

4.2 체결성 확인

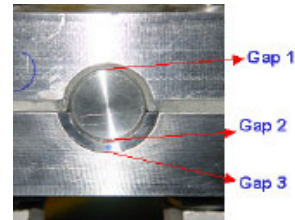


Fig. 13 Measuring points of gaps at keyway

전단키와 스페이서는 기계 가공품이기 때문에 제작 공차를 만족하더라도 공차에 의해 최대 0.1 mm의 틈이 생길 수 있다. 따라서, 상온에서 정격 토크로 볼트를 체결했을 때 0.1 mm이하의 틈은 허용할 수 있다. Fig. 13은 측정점을 나타내며, 측정 범위가 0.03 ~ 1.00 mm인 두께 게이지를 사용하였다. 원추형 볼트는 편심 테이퍼 링의 가공 정도를 확인하여 체결성을 판단하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 편심 측정 결과

Fig. 14는 각 측정점을 나타내었다.

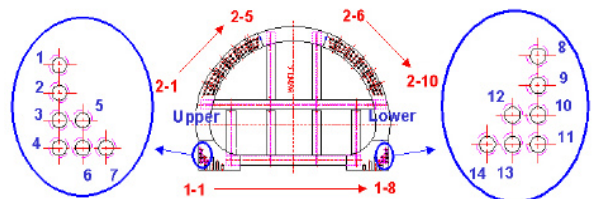


Fig. 14 Measuring points of keyway & hole

편심측정도구의 정확도는 모든 가공 공차를 고려해서 약 0.1/50 mm 일 것이라고 판단된다. 이것은 버니어캘리퍼스의 오차와 측정자의 측정시 오차는 고려하지 않은 측정도구 자체의 오차만을 고려한 것이다.

Table 1 Measuring results of misalignments of keyways (unit: mm)

No.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8		
편심량	1.1L	0.2L	0.7L	0.6L	0.0	0.3U	0.0	2.1U		
No.	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10
편심량	0.6U	0.8U	0.6U	0.9U	1.2U	0.6U	0.7U	0.5U	0.5U	0.4U

Table 2 Measuring results of misalignments of conical holes (unit: mm)

No.	1	2	3	4	5	6	7
편심량	0.7	1.0	1.0	0.9	1.6	1.1	1.1
No.	8	9	10	11	12	13	14
편심량	1.2	1.7	1.6	0.7	1.5	1.5	1.1

Table 1에서 U, L은 스페이서의 편심 방향을 나타낸 것이다. Table 2에서는 방향성 없이 순수 편심 오프셋(offset)만을 나타내었다.

5.2 가공품 치수 측정 결과

측정 결과값은 허용 가공 공차와 비교하기 위해 측정값과 참값의 차인 오차($\Delta E = \text{측정값} - \text{참값}$)를 구하였다. 편심 스페이서의 측정 결과 대체로 허용 공차를 많이 초과하였다. 항목 a, b 보다는 항목 c, d에서 허용 공차를 많이 초과하여, 항목 a는 약 39%, 항목 b는 약 42% 정도가 가공 공차를 만족한데 비해 항목 c는 약 3%, 항목 d는 약 10% 정도만이 허용 공차를 만족시켰다. 이는 편심 스페이서의 가공시 편심량 만큼 편심 위치에서 구멍을 가공할 때 오차가 발생한 것이 아닌가 짐작한다. 항목 a, c의 오차값을 Fig. 15, 16에 나타내었다.

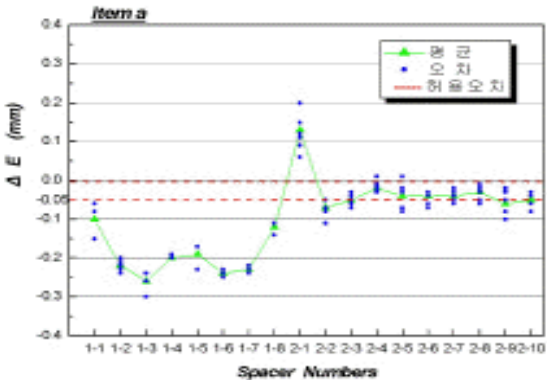


Fig. 15 Measuring results of item a at spacer

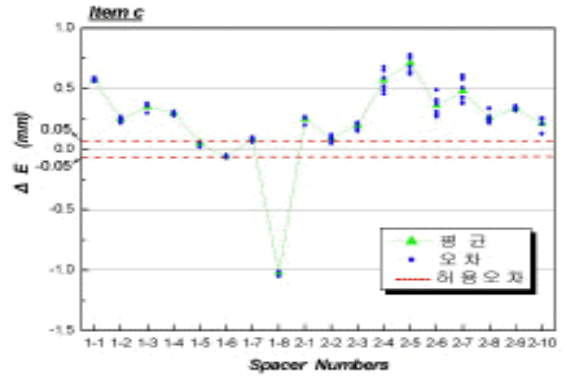


Fig. 16 Measuring results of item c at spacer

편심 테이퍼 링의 측정 항목 a, b, d는 항목 c 보다는 양호하여 최고 0.08 mm의 오차값을 나타내었으며, 전체 항목 중 67% 정도가 허용 공차를 만족시켰다. 반면, 항목 c를 포함하면 약 48% 정도만이 허용 공차를 만족한다. 원추형 볼트의 체결성 판단 항목인 a, b, c 모두가 허용 오차를 만족하는 것은 3개 밖에 되지 않아 요구하는 기준에 미흡하다고 결론 내릴 수 있다. 결과적으로 편심이 반영된 중앙의 구멍 가공(항목 c)에서 많은 오차가 발생한 것을 알 수 있다. Fig. 17, 18은 결과값을 나타낸 그림이다.

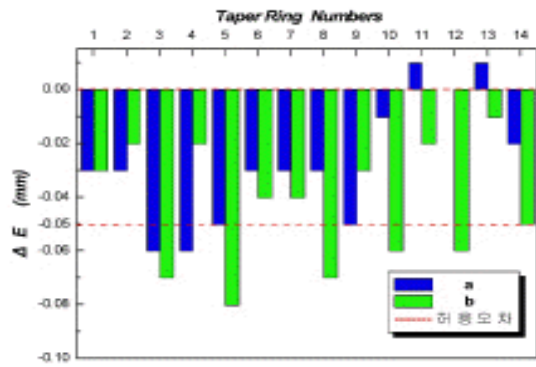


Fig. 17 Measuring results of item a, b

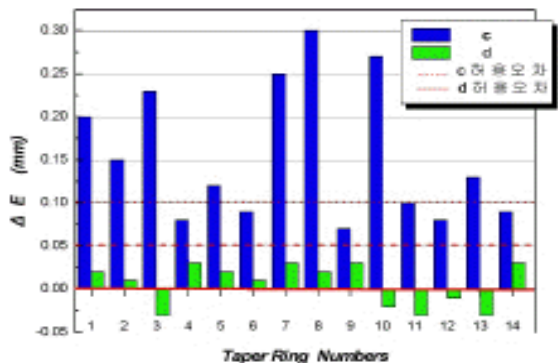


Fig. 18 Measuring results of item c, d

차후, 본 제품 제작시 편심 스페이서와 테이퍼 링의 제작에 엄격한 공차 관리가 필요하며, 특히 편심을 반영한 중앙의 구멍 가공시 정확한 중심 이동을 필요로 한다.

5.3 체결성 확인 결과

Table 3 Gap of keyway at IIS (unit: mm)

	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8
Gap 1	0.25	0.03	0.08	0.1	0.35	0.7	0.2	0.25
Gap 2	0.35	0.2	<0.03	<0.03	0.15	.	0.08	0.05
Gap 3	0.07	0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03

Table 4 Gap of keyway at OIS (unit: mm)

	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10
Gap 1	0.15	0.6	0.4	0.5	0.08	0.15	0.2	0.2	0.15	0.2
Gap 2	<0.03	.	.	.	0.1	0.15	0.09	0.09	0.04	0.09
Gap 3	<0.03	0.05	0.07	0.04	0.03	0.04	0.1	0.1	0.15	0.07

Gap 1의 측정 결과값은 Gap 2와 Gap 3에 비해 상대적으로 큰 값을 가지는데, 이 부분은 절연재와의 틈새로, 기계 가공품이 아닌 절연재의 두께 오차가 상당히 큰 것으로 판단되며 공란인 곳은 전단키가 고정되지 않아 각각의 틈새를 측정하는데 의미가 없으므로 Gap 1만 측정하였다.

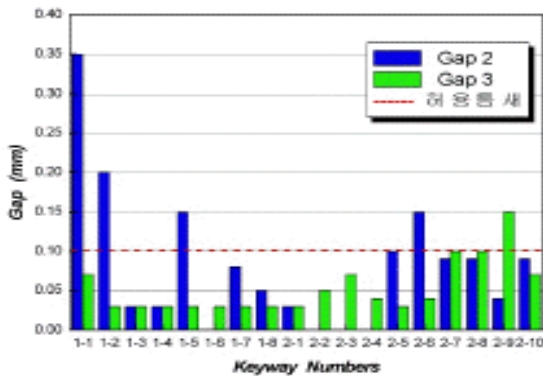


Fig. 19 Measuring results of Gap 2, 3

Fig. 19는 Gap 2, 3의 측정값을 최대 허용 틈새 0.1 mm와 비교하는 그래프이다. Gap 3에서는 한 지점(2-6)을 제외하고는 최대 허용 틈새를 만족하나, Gap 2에서는 초과하는 부분이 8 지점에 이른다. 이는 편심 스페이서의 가공 정도는 떨어지나 볼트를 완전히 체결하게 되면 압축되어 어느 정도 체결성을 향상시킨다고 판단할 수 있고, Gap 2는 절연재의 두께 공차와 관계 있는 Gap 1과 연관성이 있기 때문에 상대적으로 오차가 큰 것이다. 따라서, 전체적으로 절연재의 두께 공차를 관리하게 되면 체결성을 향상시킬 수 있다는 결론이다.

6. 결 론

본 논문에서는 TF 자석 구조물의 조립 과정 중 전단키와 원추형 볼트의 체결 과정을 검토해 보았으며, 여기에 필요한 편심 측정 도구를 개발·제작하여 적합성 시험을 수행하였다. 조립 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 편심 측정 도구를 개발·제작하였으며, 이것을 이용해 각 국소 부위의 편심을 측정할 수 있었다.
- (2) 편심 스페이서와 테이퍼 링의 가공정도를 확인했으며, 특히 편심이 반영된 중앙의 구멍 가공에 오차가 많이 발생하는 것을 알게 되었다.
- (3) 절연재의 제작 오차를 줄이는 것이 체결성 향상에 중요함을 알게 되었다.
- (4) TF 자석 구조물이 조립 공차 범위내에서 편심이 발생했을 경우 스페이서와 테이퍼 링을 이용해 편심량을 반영한 조립이 가능한 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 특정연구사업(KSTAR project)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) J.S. Bak, M. Kwon, et al., 2002, "Progress of the KSTAR Tokamak Engineering", Fusion Science and Technology, Vol. 42.
- (2) H.J. Ahn, Y.W. Lee, et al., 2001, "Engineering Design Status of the KSTAR TF Coil Struttur", IEEE Trans. Applied Sup.
- (3) G.T. Lee, et al., 2003, "Engineering design of KSTAR main structures assembly procedure - Stage 1" SFA
- (4) K.I. You, et al., 2000, "Field error analysis and a correction scheme for the KSTAR device", KBSI, unpublished.
- (5) G.S. Lee, et al., 2002, "KSTAR Project - System design and integration" KBSI.