

## O<sup>18</sup> water target의 구조해석 및 설계

### Structure analysis and design for O<sup>18</sup> water target

허민구, 김상욱, 양승대, 전권수  
원자력의학원, 서울시 노원구 공릉동 215-4  
정순호, 오환섭  
경희대학교, 경기도 용인시 신갈읍

#### 요약

O<sup>18</sup> 액체표적은 양전자 단층촬영을 위해 사용되는 방사성동위원소인 F<sup>18</sup>의 생산에 사용된다. 표적은 몸체와 커버링 그리고 박판으로 구성되며 박판은 전자빔용접법에 의하여 몸체에 부착된다. 여기서는 표적의 성능을 향상시키기 위하여 용접부의 경도 및 응력 해석을 수행하였다. 용접선단의 항복강도가 모재보다 낮으므로 파손은 용접선단에서 발생할 것이 예측되며 또한 커버링이 응력의 감소에 좋은 영향을 주는 것으로 판단된다. 표적의 설계시 용접반경은 표적내부 반경보다 1.5mm 크게, 커버링 반경은 1mm 미만으로 작게 하는 것이 좋을 것으로 예상된다.

#### ABSTRACT

Commonly F<sup>18</sup> is used for PET(Positron Emission Tomography) and the Ti target is used for F<sup>18</sup> production. This target is constructed with three parts; Frame, Plate, Covering. The electron beam welding method is used to fix the plate and covering. To improve the target capacity, checked the hardness and analyzed stress behavior at the welding zone. Result of research, fracture is predicted at the welding point because yield strength of the welding point is lower than base, also it is showed that the covering is good for minimize of stress. In this study, the welding radius below 1.5mm and the covering radius above 1mm than the target chamber radius is suggested for the good target design.

#### 1. 서론

최근 핵의학분야에서 활용이 급속히 증가하고 있는 양전자 단층촬영 (PET: Positron Emission Tomography) 기술은 1974년 Ter-Pogossian등에 의하여 개발된 기능 진단 기술로서 양전자를 방출하는 방사성동위원소나 표지화합물을 생체에 투여한 후, 투여한 물질의

분포를 영상화하는 기술이다. PET에는 다른 핵의학 분야에도 널리 사용되고 있는 [2-<sup>18</sup>F]Fluoro-2-deoxy-D-glucose([<sup>18</sup>F]FDG) 방사선 의약품이 주로 사용되고 있는데, FDG 합성에 이용되는 방사선 동위원소인 F<sup>18</sup>은 안정물질인 H<sub>2</sub>O<sup>18</sup>을 O<sup>18</sup> water target에 주입한 후, 고에너지의 proton beam을 조사하여 생산한다. H<sub>2</sub>O<sup>18</sup>가 주입된 표적에 proton beam이 입사되는 순간 표적 내부는 고온 고압 상태에서 기화가 일어나고 target plate는 바깥쪽으로 팽창한다. 이 때 발생하는 응력집중으로 용접선단에서 미세한 균열이 발생 성장하며, 이는 현재 target의 수명을 단축시키는 중요한 원인으로 보고 되고 있다.

본 연구는 방사선 동위원소인 F<sup>18</sup>의 생산을 위해 사용되는 O<sup>18</sup> 액체표적의 성능을 향상시키는 데 목적이 있으며, 현재까지 순수이학의 관점에서 이루어진 국내 Target 개발연구에 공학적인 해석결과를 덧붙임으로서 앞으로의 target 개발기술의 기반기술로서 활용하고자 한다. 이를 위해 우선 기존 표적의 설계 및 제작기술을 분석하고, 경도측정을 통해 용접부의 열이 모재와 박판에 미치는 영향을 평가하였으며, FEM해석을 통해 표적내 압의 상승으로 인한 박판이 받는 힘을 최소화 할 수 있는 형상조건을 제시하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 Target 형상과 구조

방사선 동위원소 생산에 사용되는 Target의 형상은 Fig. 1과 같으며 부품의 구성은 Table. 1에 나타나 있다. 여기서 Target frame은 액상물질이 투입되고 배출될 수 있는 구조로서 Target plate를 고정하는 역할을 하며, Target plate는 beam에너지가 조사되는 부분으로 0.075mm의 얇은 박판구조로 되어있다. Covering은 Target plate를 Target frame에 용접할 때 용접부의 강도를 보완할 목적으로 덧붙여진다. 이들 재질은 열전도도가 낮고 내응력이 높은 재질인 Titanium으로 제작되며, Target frame과 plate의 접합에는 Electron beam welding을 사용하여 모재, 박판, 커버링이 결합된 상태에서 용접한다.

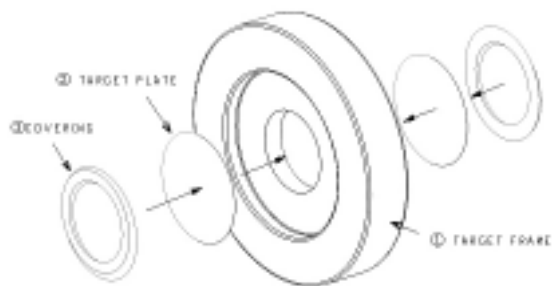


Fig. 1 Shape and component of Target

Table 1. Component of target

Number	Name	Material	Quantity
1	Target frame	Titanium	1
2	Target plate	Titanium	2
3	Covering	Titanium	2

### 2.2 Target 용접부의 관찰

Target 제작에 사용되는 전자빔 용접법은 접합강도가 크고 열영향부가 좁으며 정밀한

용접이 가능하므로 박판을 사용하는 target의 제작에 적합하다. Fig. 2는 광학현미경으로 관찰한 Target단면으로 용접부의 길이는 0.8~1.0mm으로 전 원주에 걸쳐 이루어졌다.

Target frame과 plate의 접합부는 전자빔용접에 의해 용융온도까지 가열 접합되므로 접합부 및 그 주위에서 금속조직 및 기계적 성질의 저하가 예상된다. 내압에 의한 용접선단에서의 균열의 발생원인과 발생위치를 확인하기 위해 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 용접부의 경도측정을 실시하였다. 실험조건은 하중 15g이며 압자거리는 50 $\mu$ m이다. 또한 비커스 경도값은 재료의 항복강도를 추정하는데 사용될 수 있다. 현재까지의 이루어진 연구결과를 종합하면 Vickers Hardness(  $H_V$  )와 항복강도(  $Y$  )와의 사이에는 식 (1)의 관계가 있다.

$$H_V \approx 3Y \quad (1)$$

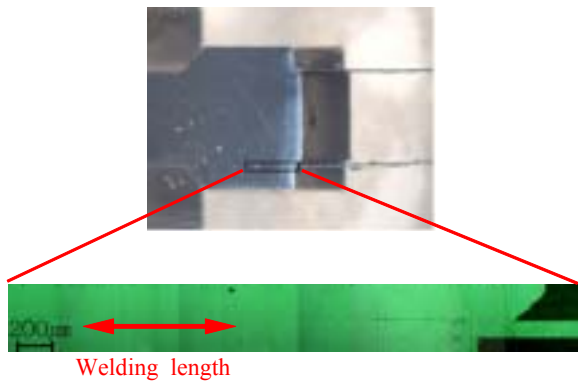


Fig. 2 Cross section of target and welding length

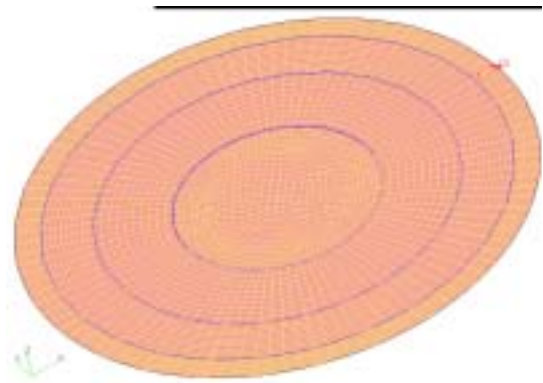


Fig. 3 FEM model of target plate

### 2.3 강도해석을 위한 FEM modeling

표적 내부에서의 압력이 박판에 작용함으로써 발생하는 응력집중을 최소화하기 위한 형상조건을 찾기 위해 기존 Target model로부터 강도에 큰 영향을 줄 수 있는 요인들을 파악하고, 형상변수를 조정하여 FEM해석을 실시하였다. Case 1은 전자빔용접을 수행하는 용접부의 위치 변화에 따른 응력의 변화를 알아보기 위한 모델이며, Case 2는 용접부의 위치를 고정하고 커버링의 크기를 변화시킬 경우의 응력의 변화를 알아보기 위한 모델이다. 용접부 선단에서의 응력분포를 확인하고 가장 취약한 부분을 파악하기 위해 두께가 75 $\mu$ m인 박판을 6부분으로 나누어 모델링 하고, 커버링에 의해 지지되는 부분과 용접선단을 경계조건으로 설정하였다. FEM해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 NASTRAN을 이용해 수행하였으며, pre/post processor인 PATRAN으로 mesh model을 생성하였다. Fig. 3은 박판의 mesh model 형상을 나타낸 것이다.

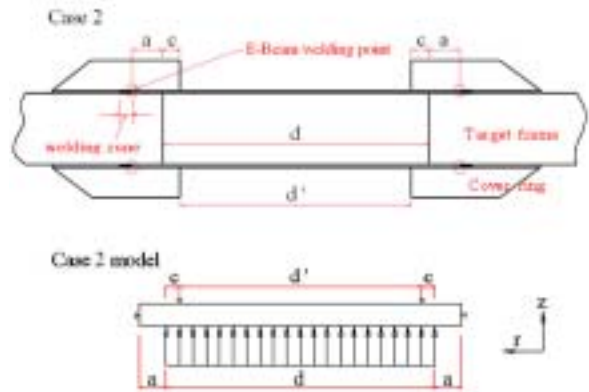
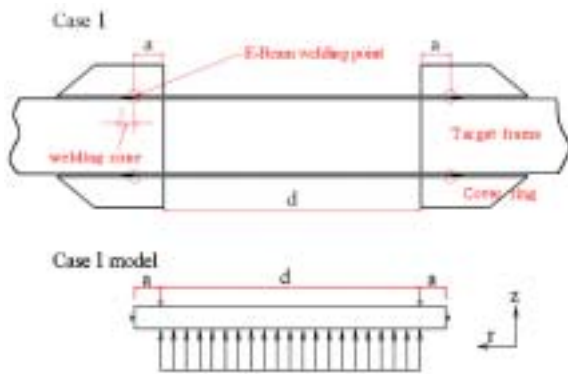


Fig. 4 Case 1 model and pressure distribution

Fig. 5 Case 2 model and pressure distribution

Table 2. Value for modeling and analysis of case 1 and case 2

	a(mm)	c(mm)	d(mm)	d'(mm)	pressure(MPa)
case1-1	1	-	18	-	0.2
case1-2	1.5	-	18	-	0.2
case1-3	2	-	18	-	0.2
case2-1	1	0.5	18	17	0.2
case2-2	1	1.0	18	16	0.2
case2-3	1	1.5	18	15	0.2

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Target용접부의 기계적 성질의 거동

용접부의 열 발생에 의한 모재와 박판재의 영향을 평가하기 위해 박판에 수직인 방향과 길이방향에서의 경도를 측정하였다. Fig. 6은 수직방향의 경도측정값을 표시한 것으로 변화가 거의 없지만, Fig. 7의 길이방향에서의 측정값은 용접부에서 낮아졌음을 알 수 있다. 이때 모재에 대한 경도치의 비는 68%정도로서 표적에서 생성되는 내압으로 박판이 인장력을 받는 경우 경도값이 낮은 용접부 선단에서 균열이 발생할 것으로 예측된다. Target frame의 평균경도는 192Hv이었으며, 용접부의 평균경도는 194Hv로 측정되었다. 식 (1)의 관계식을 이용하면 비커스경도를 항복강도로 표시할 수 있으며, 이 결과가 Table 4에 나타나 있다.

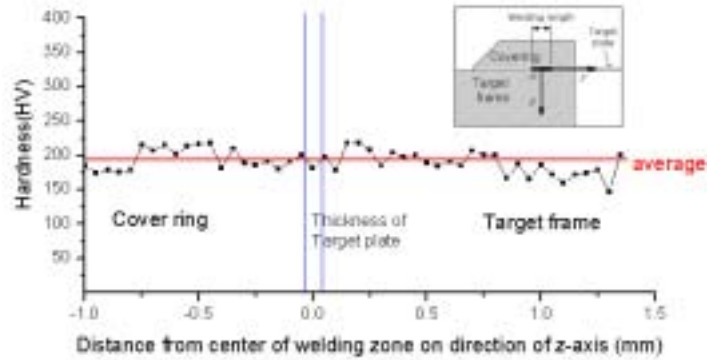


Fig. 6 Hardness behavior of z-direction

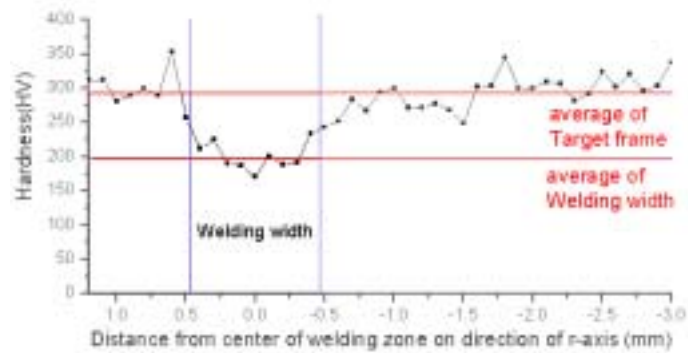


Fig. 7 Hardness behavior of r-direction

Table 4. Yield strength estimated from Vickers hardness

	Average of Vickers hardness (Hv)	Estimated Yield strength(MPa)
Target Foil	292	97.3
Welding Zone	194	64

### 3.2 접합부 응력해석

#### 3.2.1 Case 1의 경우

용접부의 위치변화에 따른 용접선단의 응력변화를 관찰하였다. Fig. 8은 용접부 선단에서부터 Target plate내의 응력거동을 해석한 결과다. 박판의 응력분포는 박판의 중심점을 기준으로 안쪽과 바깥쪽으로 응력이 최대가 되는 것을 확인할 수 있다. 또한 박판의 용접 선단부에서 박판의 중심으로 갈수록 표면의 응력은 감소하여 내부응력과 평형상태가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 본 해석의 경우 대상이 박판이므로 내외의 응력이 같다고 보면 용접부 선단이 가장 취약한 곳이 됨을 알 수 있다. Fig. 9는 용접선단에서의 최대응력값의 변화를 나타낸 것으로 용접위치기 길어질수록 응력값이 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서 용접길이를 증가시키는 것이 박판의 내구성을 증가시키는 것으로 판단되며 궁극적으로는 표적의 허용내압을 상승시키는 효과를 가지게 될 것이다.

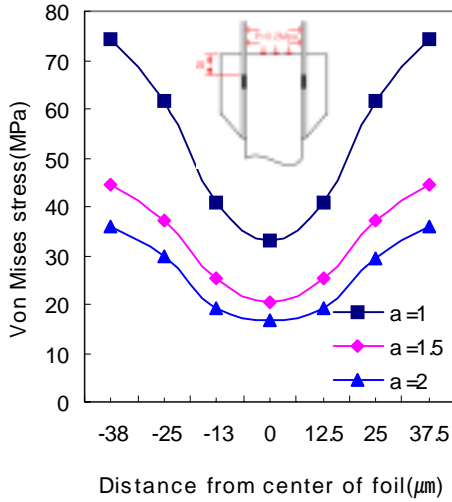


Fig. 8 Stress distribution of case 1

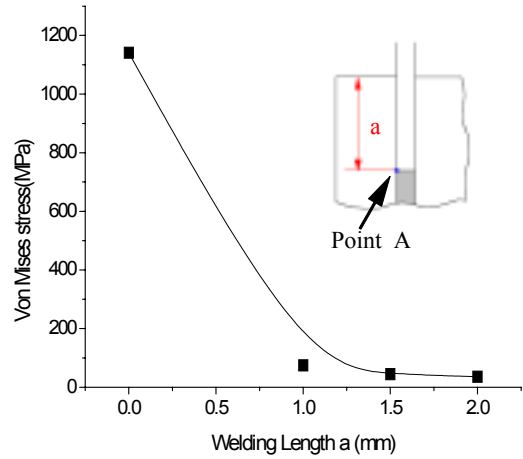


Fig. 9. Behavior at the point A of maximum stress

### 3.2.2 Case2의 경우

Fig. 10은 Target plate의 응력에 대한 Covering의 영향을 해석한 결과이다. 커버링의 내경이 감소할수록 용접부에서의 최대응력이 감소하는 것을 알 수 있으며, 두께방향의 응력분포도 균일해질 것으로 예측된다. 따라서 용접길이 증가의 경우와 동일하게 커버링의 내경을 감소시키는 것이 박판의 강도에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다

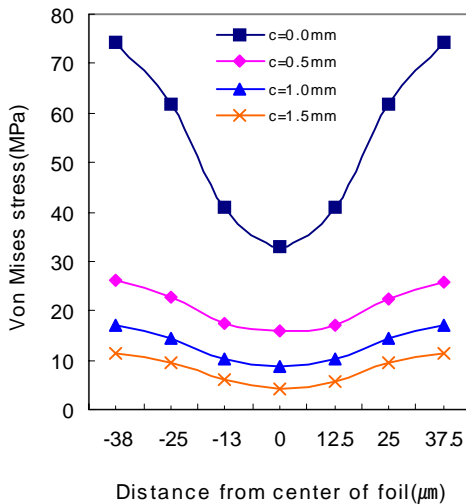


Fig. 10 Stress distribution of case 2

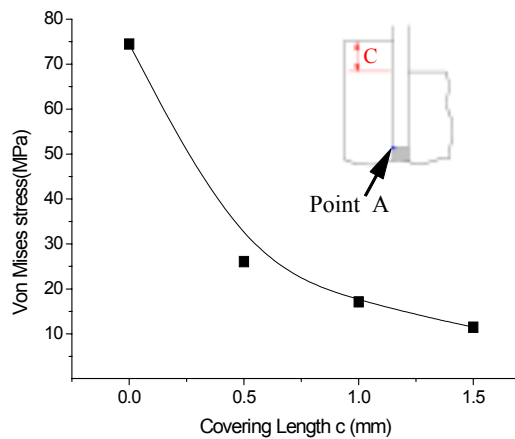


Fig. 11 Behavior at the point A of maximum stress

### 3.3 형상에 따른 박판의 변형

Fig. 12, 13는 case1와 case2에서의 박판 중앙부의 변형을 해석한 결과이다. 용접 길이만을 변화시키는 case1의 경우보다 커버링의 내경을 감소시키는 case2의 경우에서 내경이 작아질수록 변형량이 줄어드는 정도가 큰 것을 확인하였다. 이는 커버링의 내경을 줄임으로서 박판의 변형을 커버링이 억제시키는 것으로 판단된다. 박판의 변형은 표적의 수명과 사용에 많은 영향을 주게 되므로, 표적의 설계 시 이에 적합한 크기를 설정하는 것이 중요인자가 될 것이다

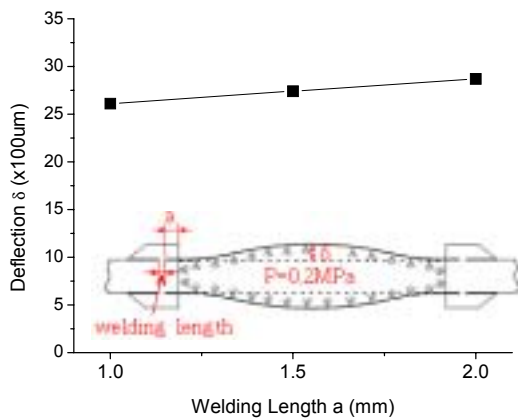


Fig. 12 Deflection at the center of window foil in case 1

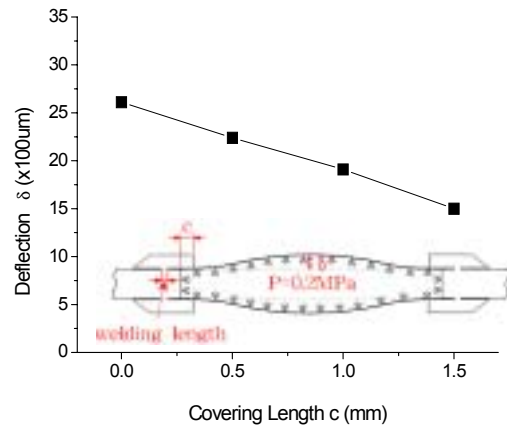


Fig. 13 Deflection at the center of window foil in case 2

### 3.4 Target 설계에 대한 제안

본 연구에서의 실험 및 해석결과를 바탕으로 기존에 사용되는 Target의 문제점을 보완한 향상된 모델의 설계조건을 아래와 같이 제시하였다.

- (1) Covering은 박판의 응력을 최소화하는데 효과가 크다
- (2) 용접부의 유효지름( $d_e$ )은 Frame의 내경( $d_f$ )을 기준으로  $d_e = d_f - a$  일때  $a \geq 1.5mm$  이상으로 하는 것이 바람직하다.
- (3) Covering의 내경( $d_c$ )는 Frame의 내경( $d_f$ )과  $d_c = d_f - c$ 일때  $c \leq 1mm$ 이면 효과가 기대된다.

## 4. 결론

본 논문은 기존에 사용되는 액체 표적의 문제점을 파악하고 성능을 개선하기 위하여 기존 표적에 대한 적합성 및 안정성 평가와 구조강도 해석 결과로부터 얻어진 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) Target plate 두께에 대해 용접길이는 충분하며 접합부의 표면거칠기도 겹보기상 양호

한 것으로 판단된다.

- (2) 용접부의 경도측정결과는 용접부의 항복강도는 모재의 항복강도의 68%라는 의미가 된다. 따라서 내압이 작용하는 경우 용접부에서 파손이 일어날 것으로 예측된다.
- (3) 용접선단에서 용접길이를 증가시킬수록 응력값이 낮아지고 응력분포가 균일한 것으로 나타났으며, 용접길이를 증가시키는 것이 Target plate의 내구성을 증가시키는 것으로 판단된다.
- (4) 커버링의 내경이 Target frame의 내경보다 작아질수록 용접선단의 응력값은 낮아지고, 응력분포가 균일한 것으로 나타났으며, 커버링의 내경을 Target frame보다 작게하는 것이 Target plate의 응력을 감소시키는데 효과가 있을 것으로 예상된다.
- (5) 커버링을 설치하는 것이 응력최소화에 효과가 있으며 용접부의 유효지름은 frame의 내경을 기준으로  $a > 1.5\text{mm}$ 이상이 바람직하며, 커버링의 내경은  $c < 1\text{mm}$ 면 효과가 기대된다.

## 참고문헌

1. 오환섭, 박철희, 허민구, “인장과 굽힘응력하에서 표면균열을 갖는 판재의 응력해석”, 한국자동차공학회춘계학술대회논문집, pp. 121-128, 1998.
2. Tong, P., Zhang, T. Y., Kim, J. K., "Fracture and Strength of Solids", Trans Tech Pubn, 1997.
3. Boyer, R. R., Eylon, D., Lutjering, G., "Fatigue Behavior of Titanium Alloys", Tms, pp. 89-99, 1999.
4. Moaveni, Saeed., "Finite Element Analysis", Prentice Hall, 1999.
5. Stocklin G. and Pike V. W., "Radiopharmaceuticals for Positron Emission Tomography", Kluwer Academic Publishers, 1993.
6. Ter-Pogossian M. M., Phelps M. E., Hoffman E. J. and Mullania A., "Radiology", 1975.
10. Frank, A. M., Ali, S. A., "Mechanical Behavior of Materials", Addison-Wesley publishing company, pp. 453-456, 1966,