

전자빔 용접기 진공 작업실의 구조설계

Structural Design on the Vacuum Chamber of Electron Beam Welding System

이영신*, 류충현**, 서 정**, 한유희***

*충남대학교 기계설계공학과, **충남대학교 기계설계공학과 대학원, ***한국기계연구원 레이저가공그룹

Y. S. Lee, C. H. Ryu, J. Suh and Y. H. Han

(1998년 6월 25일 받음)

Abstract

The electron beam welding system has the advantages of the high power density, narrow welding section, and small thermal distortion of a workpiece. Recently, the electron beam welding system is widely used to the airplane engineering, nuclear power plant, and automobile industry.

In the present paper, the structural analyses on the vacuum chamber of the electron beam welding system are performed by the F.E.M. analysis. The stiffening characteristics on the geometric shape, stiffener height and stiffener span are investigated.

The deflection of the stiffened vacuum chamber under pressure is minimized by longitudinal and transverse stiffeners which are continuous in both direction.

Key Words : Vacuum Chamber, Electron Beam Gun, Stiffener Height, Stiffener Span, Transverse Stiffeners, Longitudinal Stiffeners

1. 서 론

빔용접에는 전자빔 용접과 레이저빔 용접이 있으며, 전자빔은 지난 30여년간 금속용접에 사용되어 왔으나 레이저빔은 금속용접에 사용된 기간은 10여년에 불과하다. 빔용접 공정은 고밀도 에너지에 의한 깊은 용입(deep penetration)의 특성을 나타내고 짧은 냉각시간, 높은 냉각속도의 결과로 아주 좁게 경화된 열영향부를 생성한다. 그러나, 레이저빔 용접은 아직 효과적이지 못한 분야가 남아 있기 때문에 전자빔 기술을 완전히 대체하는 일은 불가능하다고 여겨지고 있다.

용접기술에서 진공의 사용은 용접부위를 대기의 해로운 가스나 증기로부터 보호하고자 하는 것이다. 특히, 전자빔 용접은 산화 방지, 전기적 단락 방지, 그리고 전자를 산란되지 않고 먼 거리를 이동시키기 위해 진공의 환경이 필요하다. 전자빔 용접기에서 활용되는 진공 압력은 저진공 압

력 $P=1\sim 10^3$ mbar와 고진공 압력 $P=10^3\sim 10^5$ mbar 로 고려되고 있다. 진공을 만들 때 가스 입자들은 대부분 공간이동이 제약받을 뿐만 아니라 일부는 흡착 영향에 의해 고체의 표면에 붙어 있게 된다. 표면에 붙어 있는 가스 입자들을 떼어내는 작업의 효율은 만들고자 하는 진공 압력보다는 진공 펌프의 운전시간, 벽 표면상태와 온도, 작업물 이송장치(moving system), 작업물등에 의해 더 큰 영향을 받게 된다. 또한 고진공 상태에서 많은 가스 입자들은 공간에서 자유롭게 이동하는 입자보다는 고체의 표면에서 더 많이 발견된다. 따라서, 진공 작업실 내부의 표면적이 증가하게 될 경우에는 강력한 펌프를 사용하더라도 고진공의 압력을 만드는데 걸리는 시간이 길어지게 된다. 또한 내부 벽의 거칠기와 청결의 정도에 따라서도 그 영향이 나타나며 특히 깊은 골을 가지는 이송장치와 넓은 면적의 작업물이 큰 영향을 미친다. 이러한 이유로 인하여 보강판은 진공

작업실의 외벽에 설치하는 것을 기본으로 하는 보강판의 설치위치의 제약조건이 된다”.

최근에 전자빔 용접에 사용되는 작업물들의 대형화 추세에 따라 작업실의 대형화가 요구되고 있으며 구조 건전성의 확보가 필수적이다²⁾. 진공 작업실은 대기압에 의해 외부에서 0.1MPa의 하중을 받으며 작업실의 변위는 내부 장치인 전자총(electron beam gun), 이송장치와 간섭을 발생시켜 전자빔 용접의 정밀도를 저하시킨다. 또한 진공작업실의 앞쪽에는 작업물과 작업대 등을 내부에 설치하기 위한 문이 설치된다. 문은 체결장치가 없이 기압차에 의하여 자동적으로 앞판에 흡착된다. 밀폐의 정도가 매우 중요한 진공 작업실은 문과 앞판의 변위를 최소화하여야 한다. 왜냐하면 앞판과 문의 변형은 이들간의 간격을 형성할 수도 있기 때문이다.

외부 하중을 받는 진공 작업실의 변위를 감소시키는 방법은 작업실의 기하학적 형상을 변화시키는 방법과 보강부재를 이용하는 방법이 있다. 기하학적 형상의 변화는 내부구조와 전체 시스템의 구성이 바뀌어야 하는 대폭적인 설계변경이 필요하다. 그러나 보강부재를 채용한 경우에는 기하학적 형상을 결정한 후에 변위를 감소시킬 수 있다. 이 때 보강부재는 진공펌프의 효율을 고려하여 작업실의 외부에 설치하여야 한다. 보강방법 중 판을 작업실의 외부에 설치하는 판 보강방법은 매우 간단하며 효과적이다³⁾.

보강된 구조물은 일반적인 산업현장에서 널리 이용되고 있으며 이에 대한 해석도 많이 수행되었다. McGrattan⁴⁾은 다양한 하중을 받는 곡면판(cylindrical panel)에 대하여 쉘과 보이론을 이용하여 중량 최적화하였다. Hyer⁵⁾는 압력을 받는 복합재료 판에 T형의 보강판을 설치하였을 경우에 대해 해석하였으며 Sinha⁶⁾는 임의로 보강된 쉘구조의 유한요소 해석법을 연구하였다. 그리고, 대부분의 압력 용기는 압력에 구조적으로 강한 쉘형태이며 박스형태는 압력에 취약하므로 거의 연구되지 않았다. 사각단면을 갖는 구조물은 좌굴해석과 진동해석이 주를 이루고 있으며^{7,8)}, 이영신 등은 레이저 가공기 구조에 채용되는 보강박스 구조물의 진동 및 응력해석에 대해 연구하였다^{9,10)}.

전자빔 용접시에 용접부위로부터 X선이 방사되므로 용접작업자의 안전을 위해 X선 차폐가 가능하도록 진공 작업실을 설계하여야 한다. X선 차폐에 대한 규정은 국내에서는 뚜렷한 규정이 미비된 관계로 독일의 규정¹¹⁾을 참조

할 수 있다. 이 규정에 의해 계산된 작업실의 벽두께는 약 27mm로 본 연구에서는 안전성을 고려하여 작업실의 벽두께를 30mm로 하였다. 그리고 작업실에는 내부를 관찰할 수 있도록 여러 개의 창이 설치되어야 하며 차폐규정에 의해 24mm의 납유리를 사용하였다.

2. 유한요소 해석 모델링

Fig. 1의 (a)는 앞판과 뒷판을 제거한 진공 작업실의 개략도를 나타내고 (b)는 앞판의 개략도를 나타낸다. 작업실의 높이 $H=3.5$ m, 폭 $W=5.0$ m, 길이 $L=5.4$ m이며 보강판의 높이(stiffener height)를 SH , 보강판의 간격(stiffener span)을 SS 로 나타내었다. 좌표계는 폭방향을 X , 높이방향을 Y 그리고 길이방향을 Z 로 나타내었으며 XY 평면에 평행한 보강판을 폭방향 보강재(transverse stiffeners)이라고 하고 XZ 평면에 평행한 보강판을 길이방향 보강재(longitudinal stiffeners)이라고 한다. 보강판의 간격 SS 는 폭방향과 길이방향이 같은 것으로 고려하였다. 문의 폭

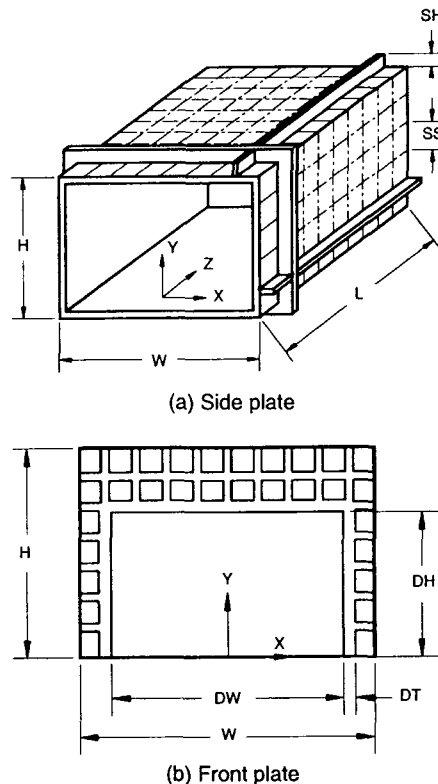


Fig. 1. Schematic diagram of the vacuum chamber.

DW = 4.2m, 문의 높이 DH = 2.4m이고 앞판에서 문을 직접적으로 지지하는 부분의 보강판의 두께 DT는 다른 부분의 보강판 두께의 2배인 60mm 를 사용하였다. 진공 작업실은 작업상의 요구조건에 의해 문, 창과 배기구 등의 개구부가 존재하게 된다. 그러나, 본 논문에서는 개구부 중 구조적으로 중요한 문만을 고려하고 다른 개구부들은 작고 다른 주변장치들과 연결되어 있으므로 무시하기로 한다.

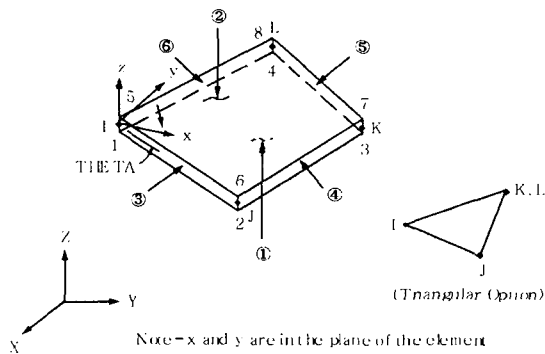


Fig. 2. Description of shell 63 element of finite element modeling.

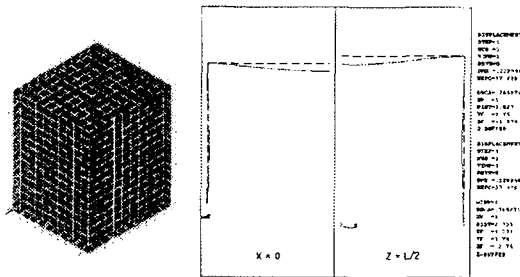


Fig. 3. Simulation model for the vacuum chamber without a door and stiffeners.

작업실과 보강판에 사용된 요소는 각 방향으로 변위성분과 회전성분을 갖는 6자유도의 SHELL 요소를 사용하였다. Fig. 2는 ANSYSTM에서 사용된 Shell 63요소를 나타낸다. 이 요소는 가장 일반적인 쉘구조물에 사용하는 요소로서 두께를 입력하게 되어 있다. 4절점의 요소로 각 노드(node)는 X, Y, Z축으로 변위와 회전의 자유도를 갖는다. 사용된 재료의 기계적 물성은 탄성계수 E = 210GPa, 밀도 7850kg/m³, 포아손 비 ν = 0.3 인 일반적인 연강으로 고려하였다.

Fig. 3은 보강판과 문이 없는 작업실을 간단한 박스 구조

물로 묘사한 유한요소 해석 모델이다. 작용 하중은 작업실 내부와 외부와의 기압차에 의한 대기압 0.1MPa 을 작업실의 외벽에 압력으로 가하였다. 작업실의 바닥은 작업실의 자중과 작업실 내부에 설치된 작업물 및 작업대 등에 의해 하중을 받고 있으므로 Y=0에서 고정 경계조건을 사용하여 변위와 회전을 구속하였다. 박스 구조물은 X방향과 Z방향으로 대칭이므로 X=0와 Z=L/2에 대칭 경계조건을 사용하였다.

앞판과 측판은 모두 각 대칭면에서 Y=H/2인 축에 대해 대칭 형상을 나타내므로 Y=0인 고정 경계조건과 앞판과 상판, 측판과 상판이 결합된 부위의 경계조건이 같다고 가정할 수 있다. 이렇게 가정함으로써 모델을 좀 더 단순화할 수 있고 해석시간을 줄일 수 있다. Fig. 4는 앞판이 결합되는 부분을 고정 경계조건으로 해석 모델을 근사한 경우이다. 최대 변위는 210mm로 앞판을 고려한 모델의 경우에 비해 약 8%의 오차를 보이고 이는 충분히 단순화된 모델로 거동의 예측이 가능하다고 고려할 수 있다. 그러나, 각각의 판만을 해석할 경우 서로 연성의 효과를 알 수 없기 때문에 본 연구에서는 두 가지의 경우 즉, 상판과 측판에 대한 해석과 문과 앞판에 대한 해석으로 구분하여 수행한다.

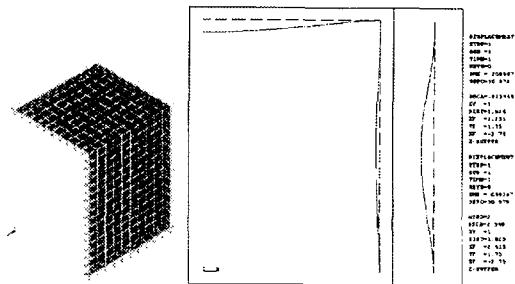


Fig. 4. Simulation model for the vacuum chamber without the front plate and stiffeners.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1. 진공 작업실 상판 및 측판의 구조해석

진공 작업실의 형상에 따른 변위를 Fig. 5에 나타내었다. 사각 박스형인 경우에는 최대 변위가 상판의 중앙에서 발생하므로 상판만의 형상을 변화시켜 그 영향을 고찰하였다. (a)는 X=W/2에서의 높이 Y=H, X=0에서의 높이를 Y=0.2H로 하여 상판의 기울기를 0.2로 설계하였을 경우의 해석 모델이다. 최대 변위는 17mm로 사각 박스형의 최

발생하며 이는 보강판이 없는 경우의 약 3%에 해당된다. 역시 상판과 측판의 변위가 모두 감소하였으며 측판의 변위는 상판의 변위의 24%이다. 폭방향 보강판만을 사용한 경우보다 증가한 결과를 보이는데 이는 길이방향 보강판에 의해 보강판 각각의 변위를 연성시키기 때문이다. 측판의 변형형상도 바뀐 것을 알 수 있다. 길이방향과 폭방향의 보강판을 설치한 경우의 다른 모델로 길이 방향 보강판의 배치를 SS/2만큼 불연속적으로 배치한 해석모델을 Fig. 9에 나타내었다. 최대변위는 18mm로 연속적으로 배치하는 경우보다 250% 증가하였으며 측판의 변형형상은 S형태를 나타낸다. 이상의 결과들은 길이방향의 보강효과가 작아지는 것으로 고려할 수 있으며 폭방향도 마찬가지로 영향을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

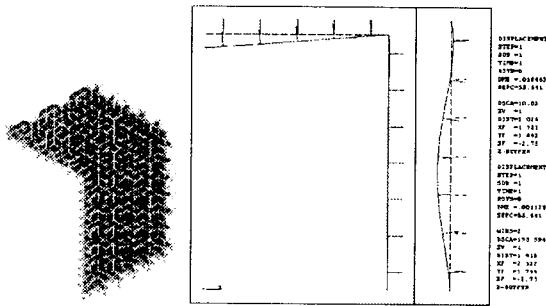


Fig. 9. Simulation model of vacuum chamber with longitudinal and transverse stiffeners (longitudinal direction discrete type).

Table 1. Maximum deflection versus weight for the vacuum chamber

(Unit : mm/ton)

Case	Max. deflection vs. weight
No stiffeners	54.1
Longitudinal stiffeners	1.8
Transverse stiffeners	2.5
Longitudinal and transverse stiffeners (continuous type)	1.1
Longitudinal and transverse stiffeners (longitudinal direction discrete type)	2.7

Table 1은 앞에서 논의한 각각의 경우에 대해 작업실의 중량과 최대변위의 비를 나타낸다. 최대값은 54.1로서 보강판이 없는 경우이며 최소값은 1.1로 길이방향과 폭방향의 보강판을 연속적으로 설치하는 경우이다. 길이방향과

폭방향의 보강판을 설치한 경우 중 길이방향 보강판을 불연속적으로 설치한 경우는 길이방향 보강판만을 설치하였을 경우보다도 중량대 최대변위의 비가 크다. 따라서 보강판을 설치할 경우에는 연속적으로 보강하는 것이 좀더 효과적인 보강방법임을 확인할 수 있다.

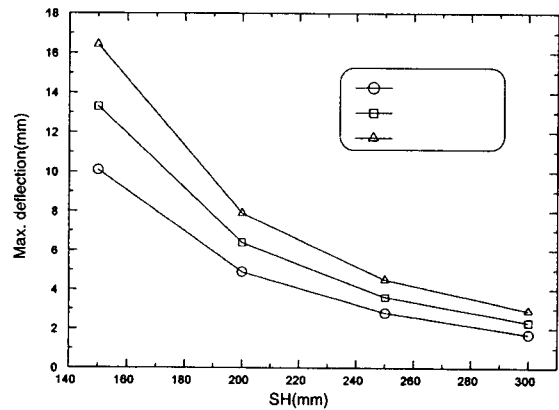


Fig. 10. Maximum deflection of the vacuum chamber with various stiffener height and stiffener span.

보강판의 높이 SH와 간격 SS가 진공 작업실의 최대 변위에 미치는 영향을 Fig. 10에 정리하였다. 보강판의 높이는 150mm ~ 300mm로 고려하였으며 이는 보강판의 높이가 그 이상이 되면 보강판의 국부 좌굴이 발생되므로 더 이상은 고려하지 않았다. 그리고 보강판의 간격은 작업성과 직접적으로 관계되므로 500mm ~ 900mm를 고려하였다. 고려된 보강판의 두께는 모두 30mm이며 최대 변위는 보강판의 높이가 증가하면 감소하고 보강판의 간격이 감소하면 감소한다. 또한 보강판의 높이가 증가하면 보강판의 간격의 영향이 작아지고 보강판의 간격이 큰 경우에는 보강판의 높이의 영향이 크다.

3.2 진공작업실 앞판의 구조해석

Fig. 11는 문과 앞판의 1/2 해석모델이며 X = 0에 대칭 경계조건을 사용하였고 나머지 끝단은 고정 경계조건을 사용하였다. 보강판은 보강판의 배열의 영향을 고찰할 때 사용한 경우와 동일하게 SH = 200mm, SS = 500mm를 사용하였다. Fig. 11에서 화살표는 가해진 대기압을 나타내며 문과 앞판의 결합력은 내부와 외부의 기압차인 대기압과 마찰력이다. 문과 앞판은 용접된 것과 같이 서로 완전

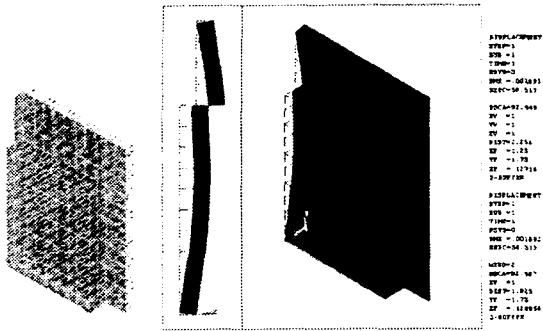


Fig. 11. Simulation model of the chamber door and front plate.

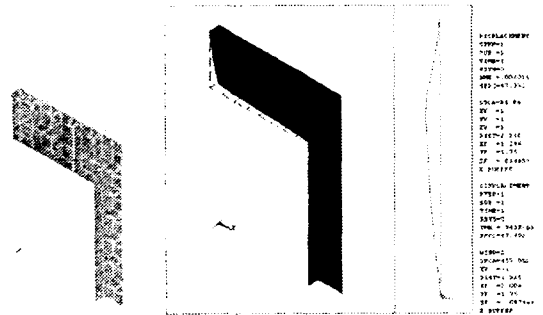


Fig. 12. Simulation model of the front plate under equilibrium load on door pressure.

고착상태로 간주하여 해석하였다. 대칭 경계면에서 최대 변위가 발생하였으며 크기는 1.9mm이다. 대칭 경계면에서의 변형 형상은 개구부의 특성이 보이지 않고 일체형 구조물의 특성을 보인다. 왜냐하면 문과 앞판의 경계조건을 완전 고착상태로 고려하였기 때문이다. 이것은 실제의 경우보다 강성이 높게 평가되므로 설계에 있어서 좀더 신뢰성 있는 자료를 제공하기 위해 개선된 모델이 필요하다.

Fig. 12는 개선된 해석 모델로 문을 모델에서 제거하고 대기압이 문에 작용하는 하중을 계산하여 이를 문이 부착되는 강판에 하중을 분포시켜 고려하였다. Fig. 12에서 화살표는 문에 작용하는 하중을 나타내며 대기압은 나타나 있지 않다. 최대 변위는 2mm로 문과 일체형의 앞판의 최대 변위보다 조금 큰 변위를 보이며 대칭 경계면의 개구부 끝에서 발생한다. 전술한 바와 같이 앞판의 보강판의 두께는 30mm와 60mm로 나뉘어진다. 따라서 $X = DW/2$ 에서의 변형 형상은 하중과 보강판의 두께가 다르기 때문에 그

특성이 보인다. 두께가 다른 보강판은 $X = \pm DW/2$, $Y = DH$ 의 위치에 설치되는데 이를 동일하게 30mm를 설치한 경우와 최대 변위와 차가 없다. 즉, 일부로 60mm의 보강판을 사용하여 보강을 하여도 그 효과는 거의 없다는 것이다. 그러나, 60mm의 보강판을 $X = \pm W/2$ 까지 설치하는 경우에는 최대 변위가 1.4mm로 $X = \pm DW/2$ 까지 설치하는 경우의 최대 변위의 68%로 감소한다. 보강판을 사용할 경우에는 보강판 배열의 연속성 뿐만 아니라 보강판 두께도 일정한 것이 더 효과적임을 알 수 있다.

앞판의 변위는 전술한 것처럼 밀폐에 큰 영향을 미치므로 변위를 더 감소시켜야 한다. 따라서 작업실의 내부에 보강판을 설치하기로 하였다. Table 2는 내부 보강판의 개수와 높이에 따른 영향을 나타내었다. 내부 보강판이 한 개의 경우에는 보강판을 $X = 0$ 에 설치한 경우이고 두 개의 경우에는 보강판을 $X = \pm DW/4$ 에 설치한 경우이다. 내부 보강판이 세 개인 경우에는 $X = 0, \pm DW/4$ 에 설치한 경우이다. 보강판의 높이에 따라 최대 변위는 감소하며 보강의 효과가 가장 큰 보강판의 위치는 최대 변위가 생기는 중앙부위로 두 개의 보강판을 설치하는 것보다 하나의 보강판을 설치하는 것이 더 작은 변위를 나타낸다. 따라서 변위를 감소하기 위해 보강판을 사용할 경우에는 최대 변위가 발생하는 위치에 보강판을 설치하는 것이 가장 효과적이다.

Table 2. Maximum deflection of the front plate with inner stiffeners

(Unit : mm/ton)

Height of stiffeners	Number of the inner stiffeners		
	1($X=0$)	2($X = \pm DW/4$)	3($X = \pm DW/4$)
200	1.2	1.7	0.9
300	1.0	1.4	0.6
400	0.9	1.2	0.4

4. 결론

전자빔 용접 진공 작업실은 대형화에 따른 구조해석이 요구된다. 본 연구는 대형 진공 작업실의 구조해석을 수행하여 최대 변위를 감소시킬 수 있는 효과적인 보강법을 제시하였다. 이는 진공 작업실의 설계에 있어서 사용될 자료로 사용될 수 있다.

(1) 진공 작업실 상판이 0.2의 기울기를 갖는 삼각형 구조인 경우 최대 변위는 평면상판을 갖는 작업실에 대한 최

대 변위의 8 % 정도 감소하고 상판의 곡률반경 $\rho = 5.6 \text{ m}$ 인 경우에는 최대 변위가 4 % 정도 감소한다.

(2) 진공 작업실의 외부에 보강판을 설치할 경우 길이방향과 폭방향의 보강판을 설치하는 방법이 가장 최대 변위가 작다. 그러나, 단일 방향으로 보강한다면 길이방향 보강판을 설치하는 것이 폭방향 보강판을 설치하는 것보다 더 효과적이다. 또한 보강판의 높이가 증가할수록, 보강판의 간격이 작을 수록 최대 변위도 감소한다.

(3) 길이방향과 폭방향 보강판을 설치하는 경우에는 양방향으로 연속적으로 배치하는 것이 불연속적으로 배치하는 것보다 더 작은 변위를 갖는다. 또한 각 보강판에 대하여 보강판의 두께도 일정하여야 보강 효과가 크다.

(4) 진공 작업실의 앞판을 설계하기 위한 모델은 문에 작용하는 압력을 앞판에 분포하는 하중으로 고려하는 것이 더 신뢰성이 있는 해석이다. 그리고, 앞판의 내부 보강판은 최대 변위를 발생시키는 중앙에 설치하는 것이 가장 효과적이다.

참고 문헌

1. 한유희, 서정, "비행체 용접용 전자빔 용접장치 개발", 한국기계연구원 제 7회 레이저 가공기술 심포지움, pp.165 ~ 176, 1996.
2. 이영신, 류충현, 한유희, 서정, "전자빔 용접기 진공 작업실의 구조해석", 한국기계연구원 제 8회 레이저 가공기술 심포지움, pp.105 ~ 121, 1997.
3. V. Kristek, "Theory of Box Girders", John Wiley and Sons, 1979.
4. R. J. McGrattan, "Weight Optimization of Stiffened Cylindrical Panels", Trans. of ASME, J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 109, No. 1, pp. 1 ~ 9, 1987.
5. M. W. Hyer, D. C. Loup, J. H. Starnes Jr., "Stiffener/Skin Interactions in Pressure-Loaded Composite Panels", AIAA Journal, Vol. 28, No. 3, pp. 532 ~ 537, 1988.
6. G. Sinha, A. H. Sheikh, M. Mukhopadhyay, "A New Finite Element Model for the Analysis of Arbitrary Stiffened Shells", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 12, pp. 241 ~ 271, 1992.
7. T. S. Koko, M. D. Olson, "Vibration Analysis of

Stiffened Plates by Super Elements", J. of Sound and Vibration, Vol. 1, No. 157, pp.149 ~ 167, 1992.

8. N. Jones, "Dynamic and Static Axial Crushing of Axially Stiffened Square Tubes", Proceeding Institution Mechanical Engineerings, Vol. 204, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, pp. 293 ~ 310, 1990.

9. 이영신, 한재도, 한유희, 서정, "보강박스 구조물의 진동 및 응력해석", 한국소음진동공학회지, 제6권 제2회, pp. 147 ~ 162, 1996.

10. Y. S. Lee, J. D. Han, Y. H. Han, and J. Suh, "A Vibration and Stress Analysis of Stiffened Box Structures", Proceedings of the Computational Structures Technology Conference, Civil-Comp Press, Vol. Advances in Computational Techniques for Structural Engineering, pp. 225 ~ 232, 1996.

11. DIN 54 113 Part 1-3:500kV 가속전압까지의 X-Ray 장비에 대한 방사선 차폐규정.

12. ANSYS User's Manual Vol. I, II, Swanson Analysis System, Inc.