



용접이 박판의 고유진동수에 미치는 영향에 관한 연구

김진호 · 박도윤 · 배성용†
(부경대학교)

A Study on the Effect of Welding on Natural Frequencies of Thin Plate

Jin-Ho KIM · Do-Yun PARK · Sung-Yong BAE†
(Pukyong National University)

Abstract

Vibration analysis is an essential factor to be considered to prevent fatigue wreckage due to resonance in moving structures such as automobiles and ships as well as in general structures. On the other hand, construction and assembly of structures in most industries including construction, civil engineering and aerospace field depend on welding. In recent years, welding has become the most commonly used assembly technique as the development of welding processes and structures become more complex and larger. It is expected that natural frequency will change due to welding in the vibration analysis of local structures, but no study can be found about it. Therefore, in this study, the effect of welding on the natural frequency of the thin plate was investigated by vibration analysis when plates used in the actual shipbuilding industry were welded. By using the experimental results, the characteristics of the natural frequency of the welded structure are investigated and the theoretical analysis method is suggested by using it.

Key words : Vibration analysis, Natural frequencies, Resonance, Welding, Fatigue wreckage, Thin plate

I. 서론

진동 해석은 일반 구조물에서 뿐만 아니라 자동차와 선박 등과 같이 움직이는 구조물에서 공진에 의한 피로파괴현상을 방지하기 위해 고려해야 할 필수요소이다.

한편, 건축·토목 및 항공 분야를 비롯하여 산업 전반에 걸쳐 일반적인 구조물의 건조 및 조립은 대부분 용접에 의존하고 있다. 특히 최근 조선, 해양 분야의 소조립, 대조립 과정에 있어서 용접 프로세스의 발달과 선박 및 해양구조물이 구조적으로 더욱 복잡해지고 대형화됨에 따라 용접은

가장 보편적으로 사용되는 건조 기법으로 자리잡았다.

이와 같이 용접이 산업전반에 걸쳐 널리 활용되고 있으나, 국부 구조물에 대한 진동 해석 시 용접상태에 따라 구조물의 강성 등을 변화시키기 때문에 고유진동수가 변화할 것이라고 예측됨에도 불구하고 구조물의 고유진동수에 미치는 영향에 관한 연구는 찾아보기가 어렵다.

그 동안 보와 판의 진동 해석에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 진행되어왔다. Shin(1983)은 집중하중을 받는 캔틸레버(Cantilever) 보와 양단 힌지(Hinge) 지지 된 아치형 보의 진동 해석

† Corresponding author : 051-629-6616, sybae@pknu.ac.kr

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의해 연구되었음.

과, 단순지지보와 캔틸레버 보의 자유진동에 대해 유한요소법(F.E.M.)을 이용하여 해석을 진행하였다.

Kim et al.(1987)은 유공 직사각형 보강판에 대해 Rayleigh-Ritz방법과 F.E.M., 그리고 실험적 해석을 통하여 진동해석에 대한 연구를 행하여 보강재 효과를 국부적 집중 효과로 취급하는 모델링 방법이 불규칙 보강재를 합리적으로 취급할 수 있고 보강재 사이에 구멍이 있을 경우 고유진동수가 높아지며 그 개수나 면적이 증가함에 따라 같이 증가함을 보여주었다. 그리고 Lee & Kim(1996)는 Mindlin판 특성함수에 기초하여 등방성후판 및 직교이방성후판에 대하여 중복 고유치를 갖는 경우 반복적 Kantorovich방법으로 명확한 고유치 및 고유모드를 얻을 수 있다는 것에 대한 연구를 진행하였다.

또한 Shin et al.(1999)은 선체 제작 시 deck plate 용접부의 변형을 최소화하기 위해 용접 변형에 우수한 저항성을 가지는 설계 방안을 제시하기 위해 용접 조건에 따른 입열량, 주판 및 중, 횡방향. 보강재의 두께 및 간격 등의 설계 인자들이 용접부 각 변형에 미치는 영향을 평가하는 연구를 진행하였다.

그러나 용접이 이루어진 판의 진동 해석에 대한 구체적인 연구사례는 거의 찾아볼 수 없고, 용접에 의해 발생하는 고유진동수의 변화에 대한 체계적인 연구가 필요하다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 실제 조선소에서 판과 판을 결합시키는 용접이 많이 이루어지고 있기 때문에 실험을 통해 용접된 박판에 대한 고유진동수를 측정하여 용접이 박판의 고유진동수에 어떠한 영향을 미치는지 정성적인 경향을 파악해보고자 한다.

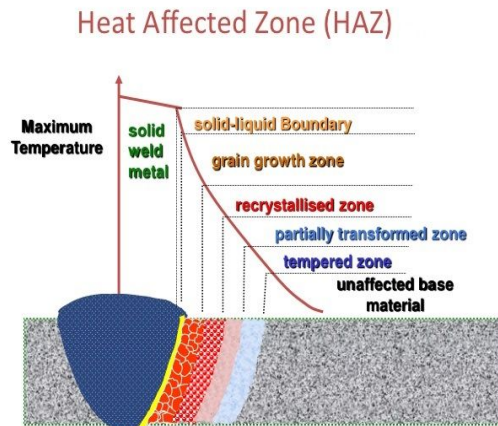
향후 실험결과를 이용하여 용접된 구조물의 고유진동수 변화에 대한 이론적인 해석방법을 연구하여 용접이 고유진동수에 미치는 영향에 대한 기준을 정성적으로 제시하고자 한다.

II. 실험 및 방법

1. 용접

금속재료에 대한 용접 공정은 크게 용융용접(Fusion Welding)과 압력용접(Pressure Welding)으로 나눌 수 있는데 일반적으로 산업 현장에서는 용융용접이 많이 사용되고 있다.

금속을 녹여서 접합시키는 용융용접에는 SMAW(Shield Metal Arc Welding), GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), GMAW(Gas Metal Arc Welding), SAW(Submerged Arc Welding), Gas Welding, Laser Welding 등 많은 용접기법들이 있으며 주로 SMAW, GTAW, GMAW, SAW가 산업 전반에 걸쳐 사용되고 있으며 각 용접 기법은 장·단점이 존재하기 때문에 생산현장에 따라 가장 적합한 기법을 사용한다. 이처럼 열을 이용하여 금속을 녹여 접합시키는 용융용접은 공정 과정에서 발생하는 열에 의해 모재에 국부적인 성질 변화를 야기 시킨다([Fig. 1]).

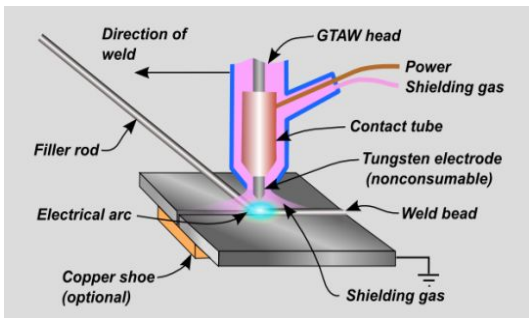


[Fig. 1] Heat Affected Zone(HAZ)

본 연구의 실험에 사용된 시편은 두께 3mm의 박판이며 실제로 조선소에서 박판 용접 시 주로 사용되는 용접 프로세스인 GTAW 기법을 이용하여 제작하였다.

GTAW은 텅스텐 전극봉을 이용하여 아크를 발생시켜 양쪽 모재를 용융시켜 접합하거나 용가재를 공급하여 양쪽 모재와 함께 용융시켜 접합하는 용접 기법이다. 용접 시 불활성 보호가스(Ar, He 등)가 모재, 용접부, 텅스텐 봉의 산화를 방지하기 위해 사용되어 TIG(Tungsten Inert Gas)용접이라고 부르기도 한다. GTAW의 상세 Process는 [Fig. 2]와 같다.

GTAW은 모든 용접 자세에 적용이 가능하고 아크가 안정되고 용접 품질이 우수하여 박판(3mm 이하)용접에 용이하며 다양한 재질의 용접이 가능하다. 하지만 용접사의 숙달이 요구되고 작업 속도가 느리기 때문에 생산성이 떨어진다는 단점이 있다.



[Fig. 2] GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) process

2. 시편 제작

본 연구의 실험에 사용된 시편의 형태는 크게 가로 300mm, 세로 300mm인 정사각형 박판과 가로 300mm, 세로 200mm인 직사각형 박판으로 제작하였으며 직사각형 박판에서는 다시 가로부분과 세로부분에 각 용접으로 경계조건을 달리하였고, 모든 시편의 두께는 3mm로 일정하며, 경계조건과 평행한 용접부분은 가로용접, 수직인 용접부분은 세로용접으로 칭한다.

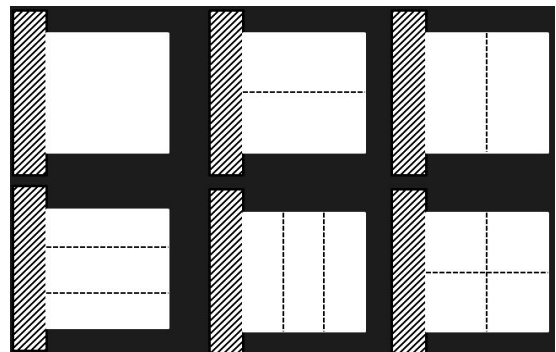
또한 정사각형 시편은 용접하지 않은 원판, 가로 1회 용접, 세로 1회 용접, 가로 2회 용접, 세로 2회 용접, 가로 세로 각각 1회 교차용접의 여

섯 종류이고 직사각형 시편은 용접의 경계조건에 따라 용접하지 않은 원판, 가로 1회 용접, 세로 1회 용접, 가로 세로 각 1회 교차용접의 각각 네 종류로 총 여덟 종류로서 이번 실험에 사용된 시편의 수는 모두 열 네 종류이다([Fig. 3], [Fig. 4]).

이 때 사용된 마운트는 가로 60mm, 세로 60mm, 길이 400mm인 사각강봉을 이용하였으며 마운트와 측정판 사이의 고유진동수 간섭을 피하여 제작하였다. 용접 공정과정 및 철판 재단 과정에서 허용 공차가 있기 때문에 철판의 크기가 완전히 일치하지는 않지만 이는 실제 조선소에서 적용되는 사항이며 본 연구에서는 정성적인 경향을 파악하는 것이 주된 목적이므로 이로 인해 발생하는 오차는 감안하고 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 철판의 제원은 <Table 1>과 같고 용접조건(Welding Condition)은 <Table 2>와 같다.



[Fig. 3] Experiment specimen



[Fig. 4] Welding point of steel plate

여기에서 [Fig. 4]의 좌측 상단 첫 번째 그림부터 좌측 하단 첫 번째 그림까지 시계방향으로, Original plate, Once vertical welding, Once horizontal welding, Cross welding, Twice horizontal welding, Twice vertical welding 의 순으로 나열하였다.

<Table 1> Specification of steel plate

	Square plate	Rectangular plate (fixed :300)	Rectangular plate (fixed :200)
Length[mm]	300	300	200
Breath[mm]	300	200	300
Thickness[mm]	3	3	3
Young's Modulus[GPa]	210	210	210
Mass Density[kg/m ³]	7.86×10 ³	7.86×10 ³	7.86×10 ³
Poisson's Ratio	0.26	0.26	0.26

<Table 2> Welding conditions

Process	Electrode	Current Intensity [A]	Shield Gas
TIG (GTAW)	AWS A5.18 ER70S-6	100 ~ 120	Ar

3. 실험방법

용접부분이 포함된 판의 고유진동수가 제대로 측정이 되었는지를 확인하기 위해 용접부분이 포함 되지 않은 원판에 대해서도 고유진동수 측정을 하였으며 제작된 시편을 충격 해머로 가진 실험을 하였다.

측정 장치는 [Fig. 5]과 같이 FFT 분석기(b&k, 3560-B-040), 충격해머(B&K, 8206-001), 가속도계(ENDEVCO, 751-100)와 신호 분석 프로그램을 이용하기 위한 컴퓨터로 구성된다. 측정판은 각각 가로 5개, 세로 5개씩 총 25개의 측정점을 갖도록 등분하였고 각 측정점마다 5회 평균하여 가진

실험을 수행하였다. FFT 분석기로부터 측정된 신호를 이용하여 모드 특성치를 얻기 위해 신호 분석 프로그램인 PULSE Labshop(b&k)을 이용하였고 측정된 특성치로부터 고유모드를 표현하기 위해 MATLAB 프로그램을 이용하였다.



[Fig. 5] Experimental apparatus for modal analysis

Ⅲ. 실험결과 및 분석

1. 정사각형 판의 경우

300mm×300mm×3mm 의 정사각형 형태의 판에 대한 실험에서 얻은 고유진동수는 <Table 3>에 나타내었으며 고유모드는 [Fig. 6]에 나타내었다.

<Table 3>에서 알 수 있듯이 4차 이상의 고유 모드에서는 대체적으로 원판보다 용접한 판의 고유진동수가 높게 나타났으며 가로용접, 세로용접, 교차용접 순으로 고유진동수가 높게 나타나고 있다.

<Table 3> Natural frequency of square plate

	Original Plate [Hz]	Once Horizontal Welding [Hz]	Once Vertical Welding [Hz]	Twice Horizontal Welding [Hz]	Twice Vertical Welding [Hz]	Cross Welding [Hz]
1st	26	19	36	24	27	33
2nd	53	49	-	67	48	50
3rd	155	162	-	164	136	-
4th	208	229	-	236	220	217
5th	400	428	455	399	391	-

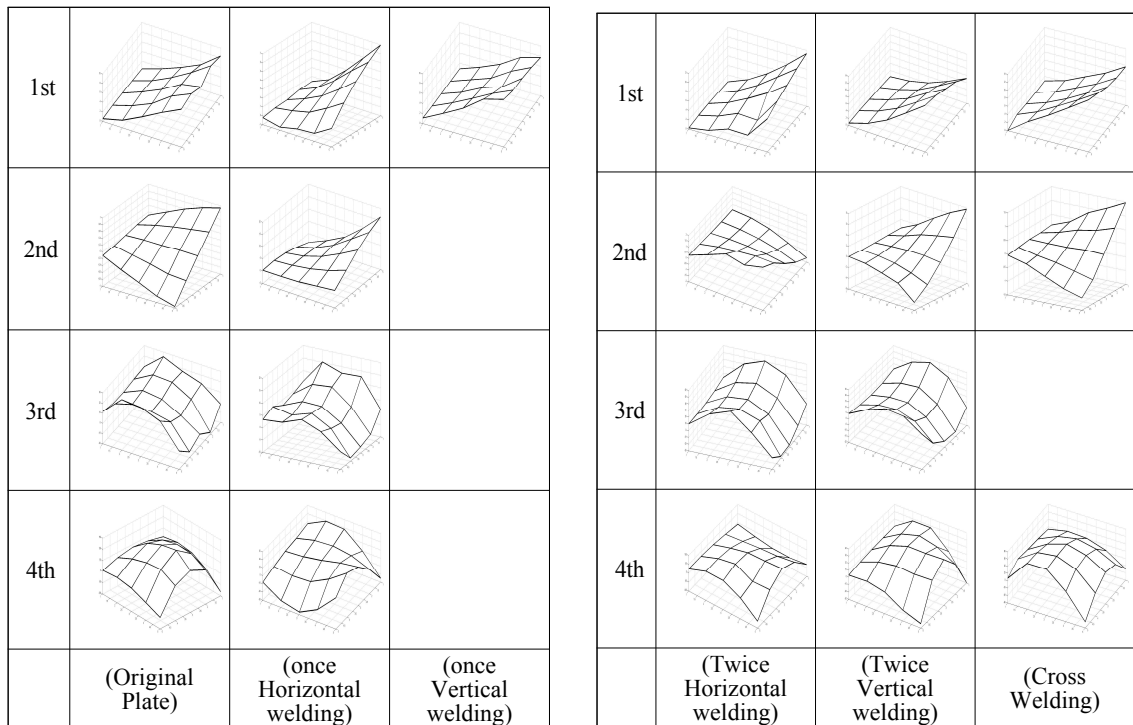
그러나 1, 2차 고유모드에서는 가로 1회 용접과 세로 2회 용접의 고유진동수가 원판보다 낮게 나타났으며, 세로 1회 용접은 1차 고유모드에서 고유진동수가 높게, 가로 2회 용접은 1차 고유모드에서는 원판보다 낮게, 2차 고유모드에서는 원판보다 높게 나타나고 있다.

또한 교차용접에서는 1차 고유모드에서는 원판보다 높게, 2차 고유모드에서는 원판보다 낮게 나타나고 있다. 이것은 용접으로 인한 강성의 변화와 모드 형태로 인하여 고유진동수가 결정되기 때문으로 판단된다.

[Fig. 6]에서 보이는 것과 같이 용접방향이 모드형태와 경계부분이 결합하여 진동모드를 억제하는 방향으로 작용하면 고유진동수를 높이는 경향이 발생하며, 모드 변위를 더욱 가중시키는 방향에 있으면 관성력의 증가로 고유진동수를 낮추는 경향이 있다고 판단된다. 따라서 세로1회 용

접은 강성의 증가로 고유진동수가 증가하고, 가로 1회용접은 관성력의 증가로 고유진동수를 낮추는 경향이 있다.

또한, 용접부분이 경계조건과 가까이 붙어 있으면 상호작용에 의해 모드를 억제시키는 방향으로 작용하여 고유진동수를 높이는 경향을 보이고 있다. 예를 들면, [Fig. 6]에서 보는바와 같이 1차 모드가 경계부분으로부터 멀리 떨어질수록 모드 변위가 큰 경우 가로용접은 모드 변위와 동일하게 변위를 가지지만 세로 용접은 용접 부분이 원판보다 강성이 증가하여 모드 변위를 억제시키는 경우이며, 교차용접은 가로용접으로 인하여 고유진동수가 낮은 방향으로, 세로용접으로 인하여 고유진동수가 높은 방향으로 작용함에 따라, 세로 1회 용접과 가로 1회 용접 사이의 고유진동수 값을 나타내고 있다.



[Fig. 6] Experimental mode shapes of square plate

또한 가로 2회 용접에서는 가로 1회 용접보다 멀리 떨어진 용접부분에서는 고유진동수를 낮추는 경향으로, 경계조건과 가까운 용접부분에서는 고유진동수를 높이는 경향으로 나타나기 때문에 가로 1회 용접 때보다 대체적으로 고유진동수가 높게 나타나며, 이는 관성력의 증가보다는 경계조건의 영향으로 강성의 증가가 더 높게 나타나기 때문이라고 사료된다.

2. 직사각형 판의 경우

직사각형 판의 경우는 300mm 경계조건과 200mm 경계조건에 대한 부분을 각각 고찰하였다.

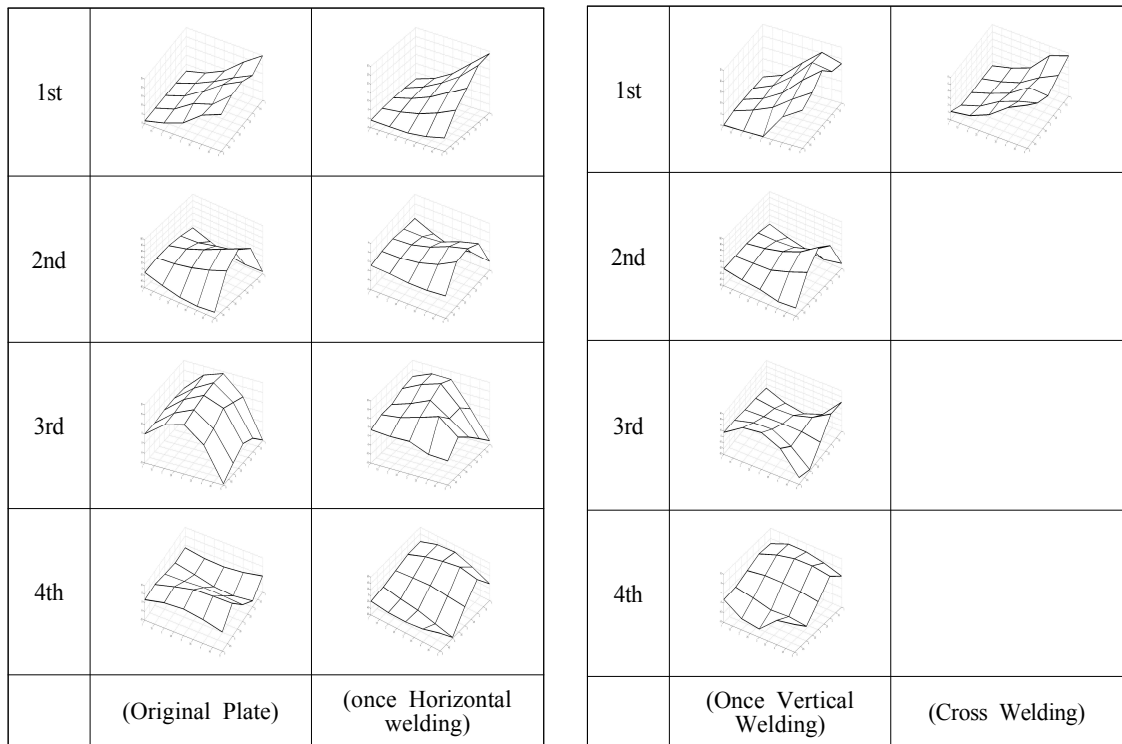
가. 300mm 부분 경계조건

300mm × 200mm × 3mm 의 직사각형 판에서 300mm 부분에 경계조건을 두어 원판, 가로 1회,

세로 1회, 교차용접 등 총 4종류의 실험을 행하였고 그 결과는 <Table 4>와 [Fig. 7]에 나타내고 있다.

<Table 4> Natural frequencies of rectangular plate (fixed : 300mm)

	Original Plate [Hz]	Once Horizontal Welding [Hz]	Once Vertical Welding [Hz]	Cross Welding [Hz]
1st	56	48	58	57
2nd	228	168	233	-
3rd	392	347	415	-
4th	550	551	566	-
5th	664	653	674	752



[Fig. 7] Experimental mode shapes of rectangular plate (Fixed : 300mm)

<Table 4>에서 보이는 바와 같이 원판과 비교하여 가로 1회 용접은 일반적으로 고유진동수가 낮게 나타나고 있으며, 세로 1회 용접은 고유진동수가 높게 나타나고 있다. 교차용접은 1차에서는 세로 1회와 가로 1회 고유진동수 사이에 고유진동수가 존재하며 5차에서는 가장 높게 나타나고 있다.

정사각형의 경우와 비교하면, 용접부분이 경계부분에 더 가까이 있음으로 인해 고유진동수는 상대적으로 적게 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 직사각형의 경우 2차와 3차 모드에서는 가로 반파 모드이며 모드 형상에서 보는바와 같이 용접부분이 아래, 위 변위로 모드와 동일하게 움직이므로 관성력의 증가를 초래하여 고유진동수를 낮추는 작용을 하고 있으며 4차 모드에서는 가로 1차 모드가 주된 모드이기 때문에 용접부분이 고유진동수에 미치는 영향이 거의 없을 것이라고 생각되었으나 모드를 자세히 들여다보면 경

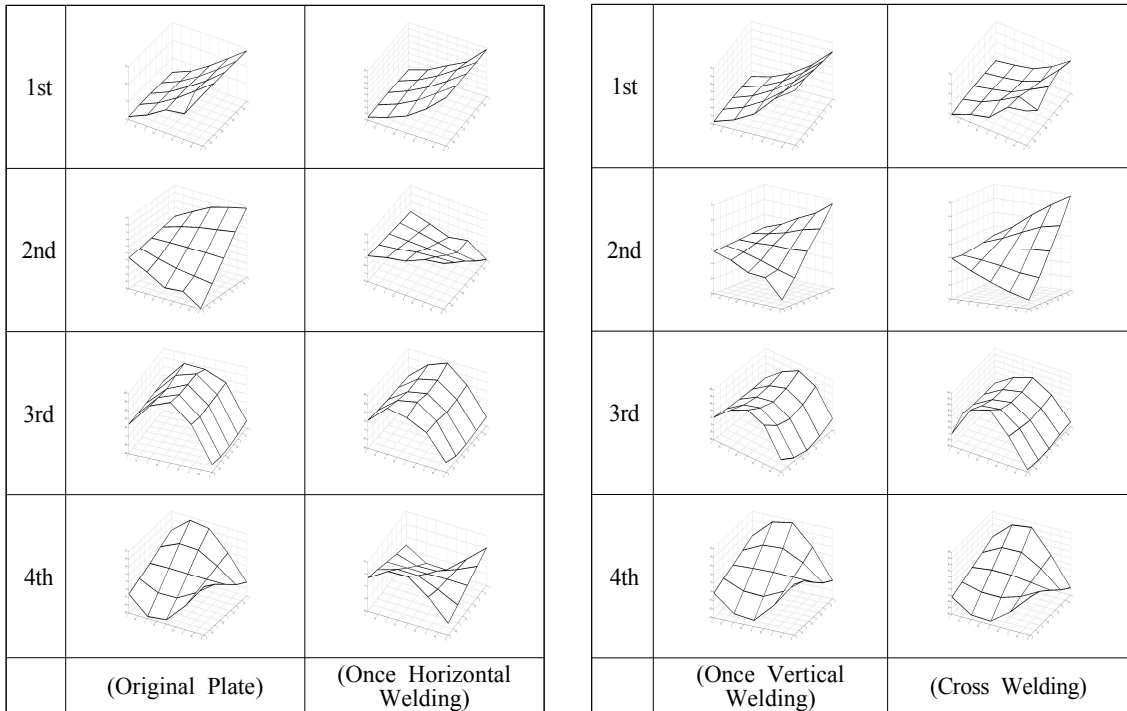
계부분에서 멀리 떨어질수록 아래, 위 방향의 변위가 미소 발생하고 있기 때문에 사료된다.

나. 200mm 부분 경계조건

200mm×300mm×3mm의 직사각형 판에서 200mm 부분에 경계조건을 두어 원판, 가로 1회, 세로 1회, 교차용접 등 총 4종류의 실험을 행하였고 그 결과는 <Table 5>와 [Fig. 8]에 나타내고 있다.

<Table 5> Natural frequency of rectangular plate (fixed : 200mm)

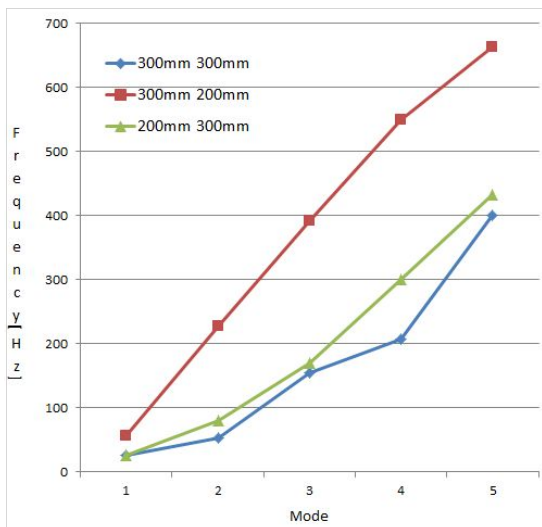
	Original Plate [Hz]	Once Horizontal Welding [Hz]	Once Vertical Welding [Hz]	Cross Welding [Hz]
1st	26	27	23	24
2nd	81	72	62	56
3rd	171	161	128	173
4th	301	297	243	246
5th	432	418	-	464



[Fig. 8] Experimental mode shapes of rectangular plate (Fixed : 200mm)

3. 원판 비교

[Fig. 9]는 각 시편 형태별 원판의 고유진동수를 나타내었다. 여기서 300mm 300mm와 300mm 200mm는 300mm 부분에 용접을, 200mm 300mm는 200mm부분에 용접을 한 시편을 의미한다. 그림에서 보이는 바와 같이 면적에 비해 경계조건 부분이 클수록 고유진동수는 높게 나타나는 것을 볼 수 있고 모드 형태에 따라 고유진동수의 증감이 결정된다는 것을 알 수 있다.



[Fig. 9] Natural frequencies of non-welding plate

IV. 결론

이상과 같이 여러 가지 형태의 용접부위가 포함된 판에 대한 실험적 모드 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 마운트에 고정되는 부분의 길이를 경계조건으로 볼 때, 경계조건과 판의 면적에 따라 고유진동수가 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

2) 가로방향으로 용접된 판의 경우, 경계조건과 관계없이 1차, 2차 고유진동수가 낮게 측정됨을 볼 수 있었다. 또한, 교차용접의 경우 가로방

향으로 용접한 경우와 세로방향으로 용접한 경우의 결과값의 차이값을 가짐을 보여주는데, 경계조건과 관계없이 가로방향으로 용접된 경우보다 세로방향으로 용접했을 때의 결과와 더 가까운 경향을 보이고 있다.

3) 세로방향으로 2번 용접한 정사각형 판의 경우 1차에서 3차까지의 고유진동수가 낮아지는 경향이 나타나고, 경계조건이 200mm 부분에 고정 지지 된 경우 세로방향으로 용접했을 때 다른 시편들의 경향과는 반대로 오히려 고유진동수가 낮아지는 경향을 띄고 있어 이 부분에 대한 세부적인 고찰이 더 필요하다고 생각된다.

본 연구에서는 실험 결과값의 비교를 통한 경향을 분석하였는데, 향후 이 실험결과를 바탕으로 유한요소법을 이용한 이론적 해석에 적용하여 경계조건에 대한 고찰과 이를 통한 다양한 형태의 구조물에 대한 해석을 실시하고 이를 확장시켜 최종적으로 용접부분에 대한 진동해석의 기준을 제시할 계획이다.

References

American Welding Society(2015), AWS D1.1 Structural Welding Code - Steel.

Bae, K. Y. & Choi, T. W.(1999). An Analysis of Thermal Stress and Angular Distortion in Bead-on-Plate Welding Incorporating Constrained Boundary Conditions., The Korean Welding and Joining Society, 17(3).

Choi, W. D.(2002). (A) study on the thermal stress analysis and residual stress measurement of thin plate during TIG welding, Chungnam National University,

Kim, K. C. · Han, S. Y. & Jung, J. H(1987). Natural Vibrations of Rectangular Stiffened Plates with Inner Cutouts, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 24(3).

Lee, J. M. & Kim, K. C(1996). Vibration Analysis of Rectangular Thick Plates Using Mindlin Plate Characteristic Functions, Transactions of the

Society of Naval Architects of Korea, 33(2).
Shin, S. B. · Yoon, J. K. & Park, D. H(1999). A
Study on the Angular Distortion at the Stiffened
Panel Structure, The Korean Welding and Joining
Society, Summary book of Special Lecture and
Conference, Vol. 2, 318~320.
Shin, Young-Shik(1983). Free Vibration Analysis of a

Timoshenko Beam Finite Element, Report, 11(1).

-
- Received : 25 May, 2017
 - Revised : 13 June, 2017
 - Accepted : 21 June, 2017