

초음파 접합용 바혼의 설계

김 선 략* · 이 재 학** · 유 중 돈*†

*KAIST 기계공학과

**KIMM 초정밀기계시스템실

Design of Bar Horn for Ultrasonic Bonding

Sun-Rak Kim*, Jae Hak Lee** and Choong D. Yoo*†

*Dept. of Mech. Eng., KAIST, Daejeon 305-701, Korea

**Dept. of Ultra Precision Mechanics and Systems, KIMM, Daejeon 305-343, Korea

†Corresponding author : cdyoo@kaist.ac.kr

(Received May 22, 2009 ; Revised August 3, 2009 ; Accepted August 18, 2009)

Abstract

The bar horn is designed to increase uniformity of the displacement on the output face through simulation and experiments. Three-dimensional modal analysis is conducted using the finite element method to calculate the vibration mode and displacement on the output face, and the design of experiment (DOE) technique is employed to determine the optimum dimensions of the groove and slot so that the high amplitude uniformity of the bar horn is produced. Displacement of the bar horn was measured using the Laser Doppler Vibrometer (LDV), and the experimental results show good agreements with the predicted results. High uniformity of the bar horn is achieved with the dimensions of the groove and slot determined using the design equations.

Key Words : Ultrasonic bonding, Bar horn, Design of experiments, Slot, Groove

1. 서 론

ACF(Anisotropic Conductive Film)는 전도성 입자가 균일하게 분포된 접착제 필름으로, LCD와 같은 디스플레이 제품의 구동 소자(drive IC)를 유리 기판에 접합시키기 위하여 사용된다. ACF의 접합에는 주로 열과 압력을 이용하는 열압착 공정이 사용되지만¹⁾, 열과 압력 이외에 초음파 진동을 인가하면 접착제의 점탄성 발열에 의해 온도가 증가하므로 접착제의 경화시간을 단축시켜 생산성을 증가시킬 수 있는 장점이 있다²⁾. LCD 구동 소자는 종횡비가 큰 막대 형상이므로 초음파를 인가하려면 출력면의 형상이 직사각형인 바혼(bar horn)을 사용하여야 한다. LCD 화면의 대형화 추세에 따라 구동 소자의 길이가 증가하기 때문에 종횡비가 큰 바혼의 진폭이 균일하게 발생하도록 바혼을 설계하는

것이 필요하다. 또한, 종횡비가 큰 바혼은 LCD 구동 소자뿐만 아니라 대면적의 플라스틱 접합에도 적용할 수 있다.

초음파를 이용하여 LCD 구동 소자와 유리 기판 사이에 도포된 접착제를 균일하게 가열하려면 바혼의 출력면에서 발생하는 진폭이 일정해야 한다. 초음파 접합에서 진폭 균일도가 증가하면 접합부에서 균일하게 열이 발생하고 구동소자와 유리 기판의 손상을 방지할 수 있다. 일반적으로 초음파 혼의 출력면의 면적이 증가하면 진폭 균일도가 감소하며, 축대칭 형상인 실린더 혼에 비해 바혼에서는 다양한 진동 모드가 발생한다. 종횡비가 큰 바혼의 균일도를 증가시키기 위하여 Fig. 1에 보인 바와 같이 바혼의 양단에 그루브(groove)를 가공한 그루브 바혼과 두께 방향으로 관통하는 슬롯(slot)이 가공된 슬롯 바혼을 사용하며, 혼의 폭이 증가하면 슬롯의 개수도 증가한다. Lucas^{3,4)} 등은 유한

요소법을 이용하여 슬롯 바흔을 해석하고 실험 결과와 비교하였으며, 마이크로 슬롯과 두께 방향의 단차 (castellation)를 이용하여 균일도를 증가시키는 방법을 제시하였다. 슬롯 이외에도 바흔에 추가의 혼을 부착하여 균일도를 증가시키는 연구와 유한요소법을 이용하여 공작물의 임피던스(impedance)를 고려한 혼의 설계에 대한 연구도 수행되었다^{5,6)}. 그러나 바흔의 그루브와 슬롯 형상이 균일도에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 바흔의 그루브와 슬롯이 진폭 균일도에 미치는 영향을 유한요소법을 이용하여 해석하였으며, 실험계획법을 이용하여 높은 균일도를 얻을 수 있는 그루브와 슬롯의 치수 결정하였다. 해석 결과를 검증하기 위하여 바흔을 가공하고 LDV (Laser Doppler Vibrometer)를 이용하여 혼의 공진과 출력면의 변위를 측정하고 해석결과와 비교하였다.

2. 바흔의 설계

일반적으로 초음파 혼을 설계하는데 고려해야 할 사항으로 공진 주파수, 증폭도, 응력, 진폭 균일도와 주파수 분리 등이 있다. 이 중에서 공진 주파수는 바흔의 길이에 의해 결정되고, 증폭도는 혼의 입력면과 출력면의 면적에 의해 결정된다. 본 연구에서는 초음파 접합을 LCD 구동 소자의 접합에 적용하기 때문에 진폭 균일도가 혼의 설계에서 중요한 인자이며, 95%의 균일도를 기준으로 설계하였다. 진폭 균일도는 혼의 출력면에서 발생하는 최소 변위와 최대 변위의 비율로 나타낸다⁷⁾.

$$U = \frac{u_{\min}}{u_{\max}} \times 100 \tag{1}$$

바흔의 설계시 균일도 이외에도 초음파 진동시 혼의 내부에서 발생하는 응력과 인접한 주파수와와의 분리를 고려하였다.

Fig. 1은 슬롯이 가공되지 않은 단순 바흔, 균일도를 증가시키기 위한 그루브 바흔과 슬롯 바흔의 형상을 나타낸다. 바흔의 3차원 모드 해석을 위하여 상용의 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 혼의 공진 주파수와 응력 및 출력면의 변위를 계산하였으며, 실험계획법을 이용하여 그루브와 슬롯의 인자가 균일도에 미치는 영향을 분석하였다. 바흔의 설계 인자 중에서 고정 인자는 혼의 길이(L), 폭(W)과 두께(T)이며, 그루브의 제어 인자는 그루브의 깊이(A)와 폭(B) 및 위치(h)이다. 슬롯 혼의 경우에 슬롯을 혼의 중앙에 위치시키며, 슬롯의 제어 인자는 슬롯의 길이(L_s)와 폭(W_s)이

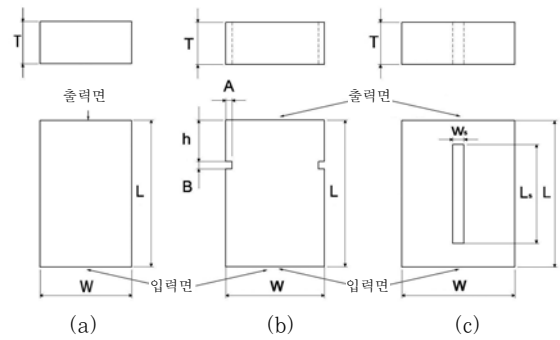


Fig. 1 Configuration and parameters of bar horns
Simple bar horn, (b) Groove bar horn, (c) Slot bar horn

다. 통계처리를 위하여 MINITAB을 이용하였고, 균일도에 미치는 영향이 큰 제어 인자와 그루브와 슬롯의 설계 치수를 구하고 이를 이용하여 설계식을 제안하였다.

수치해석 결과를 바탕으로 그루브 바흔과 슬롯 바흔을 가공하였으며, 혼의 공진 주파수와 출력면의 변위를 측정하고 계산 결과와 비교하여 수치해석 결과를 검증하였다. 주파수 분석기를 이용하여 초음파 발전기의 출력 주파수를 측정하였고, LDV를 이용하여 진동자와 부스터 및 혼의 출력면에서 주파수와 속도를 측정하였다. 출력면의 변위는 LDV로 측정된 속도를 적분하여 구하였다.

3. 결과 및 고찰

혼의 재질은 Al7075-T6이며, 유한요소 해석에 사용된 재질의 특성을 Table 1에 정리하였다. 유한요소 해석은 Fig. 1에 보인 단순 바흔과 그루브 바흔 및 슬롯 바흔에 대해 수행하였다. 혼의 고유 진동수와 변위를 계산하기 위하여 ANSYS 프로그램의 SOLID 45 요소를 사용하여 3차원 모드 해석을 수행하였다. 혼에 인가된 입력 변위는 3.64μm 이고, 초음파 주파수는 24.7kHz이며, 이들 입력값은 LDV를 이용하여 측정된 결과이다.

Fig. 2는 길이 104mm, 폭 70mm, 두께 30mm 인 바흔에 대해 모드 해석을 수행한 결과로서 혼의 인장시

Table 1 Material properties of horn

Material	Aluminium7075-T6
Density	2.81g/cm ³
Modulus of Elasticity	71.7GPa
Poisson's ratio	0.33
Yield strength	503MPa

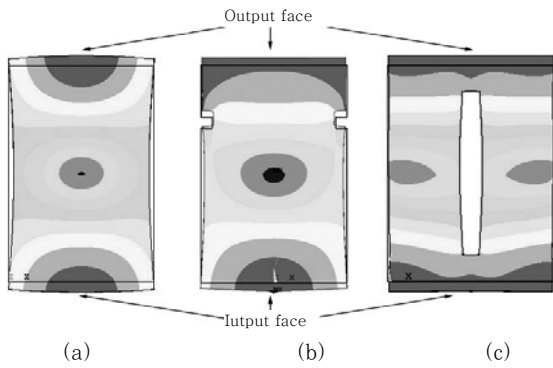


Fig. 2 Deformed shape of bar horns with longitudinal mode (a) Simple bar horn, (b) Groove bar horn, (c) Slot bar horn

변형된 형상을 나타낸다. 바흔의 두께가 30mm 이상 증가하면 두께 방향의 진폭 균일도가 95% 이하로 감소하기 때문에 혼의 두께를 30mm로 고정하였다. Fig. 2(a)는 단순 바흔이 인장하는 경우의 변형 형상으로서 포아송 효과(Poisson's effect)에 의해 혼의 중앙 부근이 오목해지고 출력면의 중심부가 볼록한 형상으로 변화하며, 압축시에는 혼이 수축되면서 반대의 형상으로 변화한다. 단순 바흔의 인장시 출력면 외곽의 변위가 중심부보다 작지만, Fig. 2(b)의 그루브 바흔의 경우에는 그루브에 의해 외곽의 구속조건이 완화되어 변위가 증가하므로 균일도가 증가한다. 이와 같이 그루브에 의해 진폭 균일도가 증가하는 현상은 스폴 혼의 경우와 유사하다⁷⁾. 슬롯 바흔의 경우(Fig. 2(c)), 출력면의 변위가 일정하여 균일도가 증가하며, 이는 혼의 중앙에 위치한 슬롯에 의해 바흔이 2개로 분리되는 효과가 발생하기 때문이다. 즉, 중앙에 위치한 슬롯이 바흔을 좌우로 분리하여 출력면의 면적이 1/2로 감소하기 때문에 균일도가 증가한다.

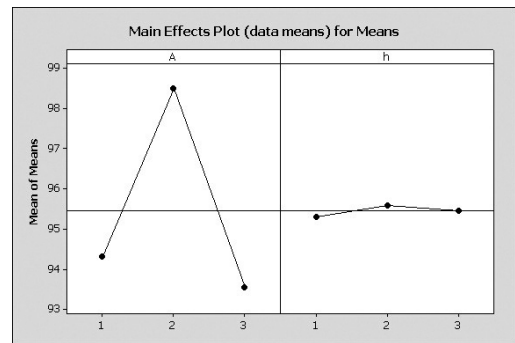
그루브 바흔에서 그루브의 설계 치수를 결정하기 위하여 실험계획법을 이용한 스폴 혼의 해석 결과를 참조하였으며, 스폴 혼의 경우에는 그루브 깊이(A)와 위치(h)에 비해 그루브 폭(B)이 균일도에 미치는 영향이 무시할 정도로 매우 작다⁷⁾. 그러므로 그루브 깊이와 그루브 위치를 바흔의 제어인자로 선택하였고, 그루브 폭은 스폴 혼의 설계식을 사용하여 결정하였다. 바흔의 고정 인자는 혼의 폭과 두께 및 그루브 폭이며, 각각의 치수는 70mm, 30mm, 5.2mm이다. 직교 배열표에서 사용한 제어 인자의 레벨(level)은 Table 2에 정리하였다. Table 2의 제어 인자의 값에 대하여 유한요소법을 이용하여 진폭 균일도를 계산하고, MINITAB을 이용하여 제어 인자가 균일도에 미치는 영향을 분석하여 최적값을 구하였다. Fig. 3의 평균 도표와 교호 작용

Table 2 Level of groove parameters for DOE

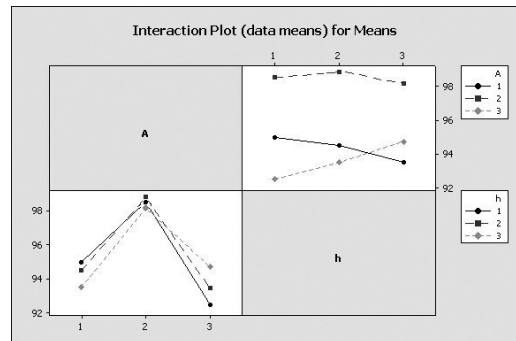
Level	Depth (A, mm)	Location (h, mm)
1	5	23
2	5.5	25
3	6	27

도표에서 형상 인자인 그루브 깊이와 위치 사이에 교호 작용이 존재하므로 Fig. 3(a)의 평균값만으로 최적 조건을 판단하기 어렵다. 각 인자의 영향을 MINITAB에서 델타값으로 나타내며, 델타값은 각 인자로부터 가장 큰 평균에서 가장 작은 평균값의 차이로 정의하기 때문에 인자의 델타값이 클수록 균일도에 큰 영향을 미친다. 교호작용의 결과로부터 그루브 깊이와 위치가 균일도에 미치는 델타값은 각각 4.94와 0.28이므로 그루브 깊이가 위치에 비해 진폭 균일도에 미치는 영향이 크고, 가장 높은 균일도를 발생시키는 그루브 깊이와 위치의 설계값은 각각 5.5mm와 25mm이다. 바흔의 크기가 변화하면 그루브의 치수가 이에 비례하여 선형적으로 변화한다고 가정하면, 높은 균일도를 얻을 수 있는 그루브의 치수를 다음의 설계식으로 나타낼 수 있다.

$$A = \frac{11}{140}W, h = \frac{25}{104}L, B = \frac{1}{20}L \tag{2}$$



(a) Main effect plot



(b) Interaction plot

Fig. 3 Results of DOE for groove dimension

위의 식에서 그루브 폭(B)은 스폴 혼의 설계식과 동일하며⁷⁾, 그루브 폭의 설계식의 타당성을 검증하기 위하여 그루브의 깊이와 위치를 설계값인 5.5mm와 25 mm로 고정시키고, 그루브의 폭을 4.7mm, 5.2mm, 5.7mm로 변화시키면서 진폭 균일도를 계산하였다. 그루브의 폭이 변화하여도 균일도는 98%로 일정하였으며, 이 결과로부터 스폴 혼에서와 동일하게 바흔의 경우에도 그루브의 폭은 혼의 균일도에 거의 영향을 주지 않는다. 또한, 바흔의 두께가 30mm보다 작은 경우에는 95% 이상의 진폭 균일도를 얻을 수 있기 때문에 바흔의 두께가 균일도에 영향을 주지 않는다.

바흔의 폭을 변화시키며 단순 바흔과 식(2)를 이용한 그루브 바흔의 균일도를 계산하여 Fig. 4에 나타내었으며, 바흔의 길이와 두께가 각각 104mm와 30mm이다. 단순 바흔의 경우에는 혼의 폭이 35mm 보다 작으면 95%의 균일도를 얻을 수 있지만, 혼의 폭이 40mm 보다 증가하면 균일도는 급격하게 감소한다. 그루브 바흔의 경우에는 그루브에 의해 출력면 외곽의 구속조건을 완화시키기 때문에 95% 이상의 균일도가 발생하는 혼의 폭이 90mm로 크게 증가한다. 그러나 혼의 폭이 100mm로 증가하면 균일도가 43%로 급격하게 감소하므로 그루브의 치수를 변화시켜야 한다.

슬롯 바흔의 경우에는 혼의 중심에 슬롯이 위치하므로 실험계획법의 제어 인자는 슬롯의 길이(L_s)와 폭(W_s)이고, 고정 인자는 혼의 폭(70mm), 두께(30mm) 및 슬롯의 위치이다. 직교 배열표에서 사용한 제어 인자의 레벨(level)은 Table 3에 정리하였으며, MINITAB으로 계산한 평균 도표와 교호 작용 도표를 Fig. 5에 나타내었다. 형상 인자인 L_s와 W_s사이에는 교호작용이 존재하며, 교호작용의 결과로부터 슬롯의 폭과 길이 균일도에 미치는 델타값은 각각 3.77과 0.9이므로 슬롯의 폭이 길이에 비해 진폭 균일도에 큰 영향을 준다. 가장 높은 균일도를 발생시키는 슬롯 길이와 폭은 각각

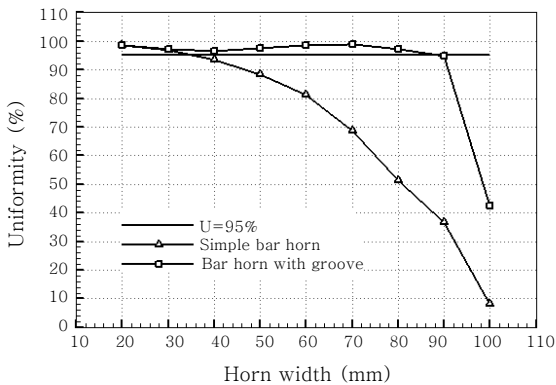
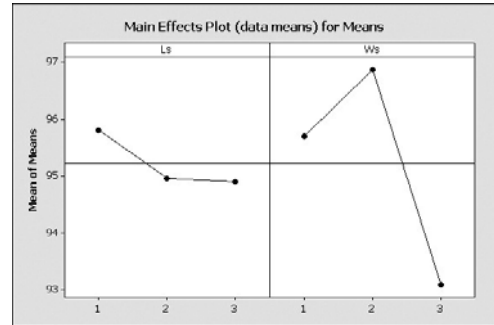


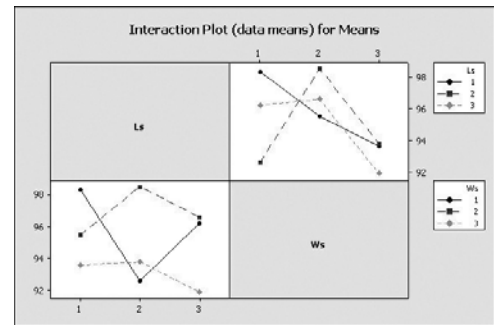
Fig. 4 Comparison of uniformity between simple and groove bar horns

Table 3 Level of slot parameters for DOE

Level	Length (L _s , mm)	Width (W _s , mm)
1	70	5
2	72	7
3	74	9



(a) Main effect plot



(b) Interaction plot

Fig. 5 Results of DOE for slot dimension

72mm와 7mm이며, 이를 이용하여 슬롯의 치수를 결정하는 설계식은 다음과 같다.

$$W_s = \frac{1}{10}W, L_s = \frac{9}{13}L \tag{3}$$

식(3)을 이용한 슬롯 바흔의 균일도와 그루브 바흔의 균일도와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 바흔의 폭이 90mm 이내인 경우에 95%의 균일도를 얻을 수 있지만, 바흔의 폭이 100mm로 증가하면 그루브 바흔의 균일도는 급격하게 감소하고 슬롯 바흔의 균일도는 완만하게 감소한다. 단순 바흔의 경우 혼의 폭이 40mm 이상으로 증가하면 균일도가 95% 이하로 감소하며, 이와 유사하게 슬롯에 의해 2개로 나뉘어진 바흔의 폭이 40mm 이상 증가하면 균일도가 95% 이하로 감소한다. 그러므로 바흔의 경우 95%의 균일도를 얻으려면 슬롯에 의해 분리된 폭을 40mm이하로 설계하는 것이 바람직하며, 혼의 폭이 100mm 이상 증가하면 2개의

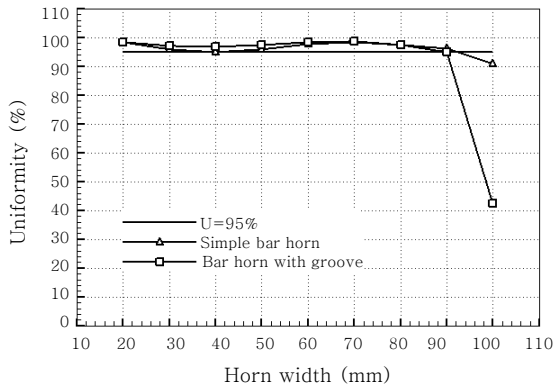


Fig. 6 Comparison of uniformity between groove and slot bar horns

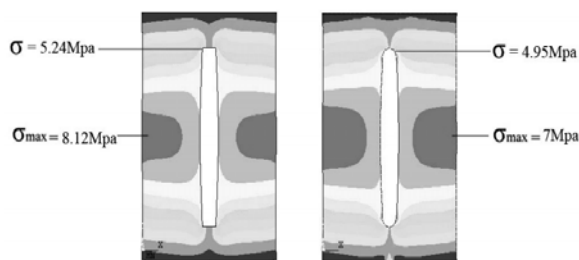
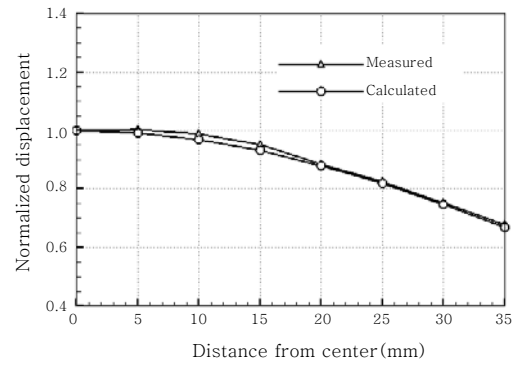


Fig. 7 Stress distributions of slot bar horns with and without rounding

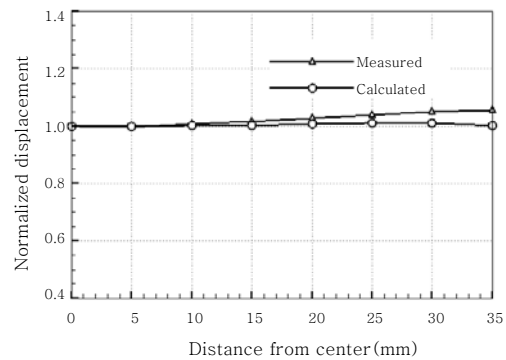
슬롯이 필요함을 알 수 있다.

Fig. 7은 유한요소법으로 슬롯 바혼의 응력 분포를 계산한 결과이며, 사각형 슬롯 바혼과 라운딩 처리한 슬롯 바혼의 응력을 비교하였다. 바혼의 입력 변위는 $3.64\mu\text{m}$ 이며, 사각형 슬롯의 모서리의 응력은 5.24MPa 이고 최대 응력은 8.12MPa 이다. 라운딩한 슬롯 모서리의 응력은 4.95MPa 이고, 최대 응력은 7MPa 로 감소한다. 그러므로 라운딩 가공시 응력집중을 방지하여 응력을 감소시킬 수 있지만, 사각형 슬롯 바혼의 최대 응력은 혼의 재질인 Al7075-T6의 항복응력인 503MPa 보다 매우 작기 때문에 라운딩 가공이 필요하지 않다. 그러나 초음파 혼의 파괴는 주로 피로에 의해 발생하므로 혼의 최대 응력이 항복 응력보다 낮더라도 피로 파괴를 고려해야 한다.

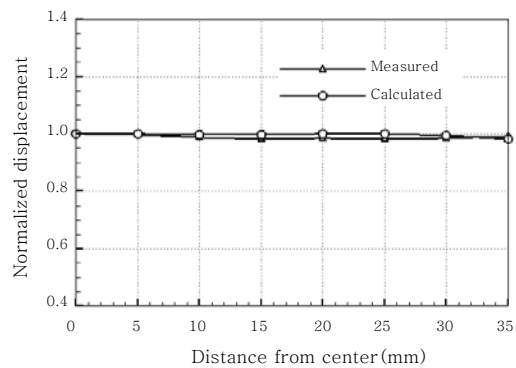
수치해석 결과를 검증하기 위하여 바혼을 가공하고 LDV를 이용하여 출력면의 변위를 측정하고 분석하였다. 주파수 분석기를 이용하여 측정된 발전기의 주파수와 LDV로 측정된 진동수와 부스터의 출력면에서의 주파수는 24.7kHz 이고, 변위는 각각 $1.51\mu\text{m}$ 와 $3.64\mu\text{m}$ 로 부스터의 증폭도는 2.4이다. 바혼의 폭과 길이 및 두께는 각각 70mm , 104mm , 30mm 이며, 가공에 사용된 그루브와 슬롯의 치수는 식(2)와 식(3)을 이용



(a) Simple bar horn



(b) Groove bar horn



(c) Slot bar horn

Fig. 8 Comparison of calculated and measured displacement on output face

하여 구하였다. 출력면의 폭 방향을 따라 발생하는 변위를 측정하고 수치해석 결과와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 계산 결과와 실험 결과는 비교적 정확하게 일치하였으며, 단순 바혼의 균일도는 68%로 가장 낮고 그루브 바혼과 슬롯 바혼의 균일도는 각각 95%와 98%이다. 그러므로 본 연구에서 제안한 그루브와 슬롯의 설계식을 이용하여 바혼의 균일도를 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

진폭 균일도가 높은 바혼을 설계하기 위하여 유한요

소법과 실험계획법을 이용하여 높은 균일도를 얻을 수 있는 바흔의 형상을 구하여 실험결과와 비교하였으며, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 유한요소법의 3차원 모드 해석을 이용하여 바흔의 진동 모드를 분석하고, 바흔의 균일도를 증가시키기 위하여 실험계획법을 이용하여 그루브와 슬롯 치수를 결정하는 설계식을 제안하였다. 그루브 바흔과 슬롯 바흔에서 균일도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 그루브의 깊이와 슬롯 폭이며, 본 연구에서 제안한 설계식은 혼의 두께와 폭이 각각 30mm와 100mm 이하인 경우에 적용할 수 있다.

2) 단순 바흔의 경우에는 95%의 균일도를 얻기 위한 혼의 폭이 35mm이지만, 설계식으로 구한 그루브와 슬롯을 이용하면 바흔의 폭을 90mm로 증가시킬 수 있다. 그루브는 바흔의 구속조건을 완화시키고, 슬롯은 출력면을 분리시켜 출력면의 면적을 감소시켜 바흔의 균일도가 증가한다.

3) 바흔에서 최대 응력이 발생하는 위치는 슬롯의 모서리 부위이며, 슬롯의 모서리에서 발생하는 응력집중을 완화시키기 위하여 라운딩 가공하면 최대 응력은 감소한다. 최대 응력은 재료의 항복응력보다 매우 작기 때문에 라운딩 가공은 불필요한 것으로 판단하지만 혼의 피로 파괴를 고려해야 한다.

4) LDV를 이용하여 측정된 바흔의 출력면의 변위는 계산 결과는 정확하게 일치하였다. 그러므로 그루브 바흔과 슬롯 바흔의 설계에 본 연구에서 제안한 방법과 설계식을 활용하여 균일도가 향상시킬 수 있다

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 협동연구과제의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. AWS: Welding Handbook, 8th ed. (1991)
2. K.-W. Lee, H.-J. Kim, M.-J. Yim, and K.-W. Paik: "Curing and bonding behaviors of Anisotropic Conductive Films (ACFs) by ultrasonic vibration for flip chip interconnection, 56th Electronic Components and Technology Conference, San Diego, California, USA (2006)
3. A. Cardoni, M. Lucas: Enhanced vibration performance of ultrasonic block horns, *Ultrasonics*, **40**(2002), 365-369
4. A. Cardoni and M. Lucas: Strategies for reducing stress in ultrasonic cutting systems, *Strain*, **41-1**(2005), 11-18
5. K. Adachi and S. Ueha: Modal vibration control of large ultrasonic tools with the use of wave-trapped horns, *J. of Acoust. Soc. Am.*, **87-1**(1990), 208-215
6. Y. Ming, L. Shih Fu, S. Zheng: A new optimization method for horn designs in ultrasonic welding systems, SIM Tech Technical Report (PT/02/006/JT)
7. S.-R. Kim, J. H. Lee, C. D. Yoo: Design of Cylinder Horn for Ultrasonic Welding (to be published in *J. of KWJS*)