

초음파 진동자를 이용한 알루미늄 와이어 용접에 관한 연구

A Study on the Aluminum Wire Bonding by Using Ultrasonic Vibrator

김 회수* (승실대학교 대학원 기계공학과), 이 건복 (승실대학교 기계공학과)

H.S.Kim* (Soongsil Univ.), G.B.Lee (Soongsil Univ.)

Key Words: Ultrasonic Wire Bonding Machine(초음파 용접기), Ultrasonic Vibrator(초음파 진동자), BLT(볼트 조임 랑지방 진동자), Nodal Plane(진동절면), ARMA Model(자기회귀 이동평균 모델)

Abstract : In recent years, ultrasonic has been widely applied in measurement and industrial fields and its application range has been expanded as a result of continuous research and development. Wire Bonding Machine, an instrument fabricating semi-conductor, makes use of ultrasonic bonding method. In order to improve the currently used wire bonding machine using ultrasonic energy, technical accumulation is needed steadily through development of exciting device of ultrasonic composed of piezoelectric vibrator and horn.

This study investigates the design conditions affecting the dynamic characteristics through the theoretical and experimental analysis of piezoelectric vibrator and horn. The study conducts separately the system identification of piezoelectric vibrator in time domain and the modal analysis of horn in frequency domain. In theoretical model, the integrated modeling is conducted via a combination of dynamic identification of piezoelectric vibrator and theoretical analysis of horn. Hence comparison is made for theoretical and experimental results of the dynamic characteristics of the ultrasonic transducer composed of piezoelectric vibrator and horn

From the results of this study we develop the design technique of ultrasonic transducer using dynamic characteristic analysis and propose the possibility of ultrasonic welding considering the optimal condition of the natural frequency and vibration mode of horn.

1. 서 론

최근 초음파의 응용 분야는 음파의 파동 성질을 이용하는 정보, 측정 분야와 초음파의 고에너지 사용하는 분야로 대표되며, 초음파의 고에너지를 이용한 예로는 초음파 용접기와 가공기 등을 들 수 있다. 초음파 용접기는 초음파의 진동 에너지를 용융한 것으로, 전기 도체인 가는 와이어(Wire)를 직접 회로(IC)와 리드 프레임(Lead frame)을 연결하는 기계 장치로, 구조는 Fig. 1과 같은 장치로 크게 초음파 발진기와 압전 진동자(Piezoelectric vibrator)와 혼(Horn)의 집합체인 초음파 진동자 그리고 용접 공구(Bonding tool)로 구성되어 있다.

용접은 기본적으로 용접 대상물에 열을 가하여 용융상태에 접합하는 방법이 있다. 그러나 이와 같은 열을 이용한 용접은 연속적인 작업에서 열의 손실이 나타나며 모재와의 용착에 많은 문제가 있다. 또한 직접 회로와 핀을 연결하는 와이어 용접의 고정밀 자동화에는 적합하지 않다. 따라서 초음파를 이용한 용접이 검토되며, 초음파 용접의 과정은 초음파로 발진된 교류 전압이 압전 진동자에 진동을 일으키고, 진동은 혼(Horn)에 중폭 전달되어 용접면 사이에서 고속 반복 마찰을 행하는 것으로, 대기 중에서도 가능하며, 빠른 작업이 진행될 수 있다는 잇점이 있다.

용접된 와이어는 모재와 같은 접합 강도를 유지하기 위한 접합 조건은 마모 계면의 온도가 용접에 있어서 주요한 인자이고, 압력과 진동에 의한 반복수는 2차적 인자로 발열 에너지를 경유해서 기여한다. 따라서 용접시 압전 진동자의 진동 에너지가 혼의 고유 진동수를 추종하여 소모되는 에너지를 최소화하기 위해 압전 진동자의 공진 주파수와 일치된 혼의 설계가 필요하다.

본 논문에서는, 60kHz의 공진 주파수를 고려한 압전 세라믹의 볼트 조임 랑지방 진동자(BLT)를 제작하여 압전 진동자로 사용하며, 또한 혼의 설계시 위에 언급한 주파수 일치를 위해 혼의 이론적 적용을 검토한다. 특히, 혼에 대해서는 이론과 실험적 동특성 해석의 결과를 비교하며, 이론과 실험을 통해 제작된 초음파 진동자를 이용해 알루미늄 와이어 용접의 가능 여부를 확인하고자 한다.

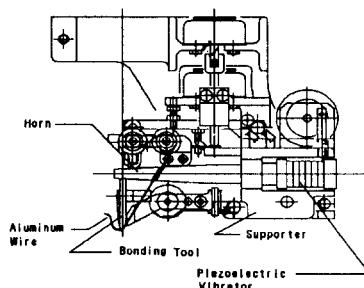


Fig. 1 The layout of ultrasonic aluminum wire bonding machine head

2. 관련 이론

2.1. 초음파 용접

초음파를 이용한 와이어의 용접은 용접 작업 전에 와이어 또는 그 외 접합부에 에열을 가하여, 접합되는 와이어의 끝을 용융상태로 만들거나 접합부 주위의 온도를 높인 다음, 용착시 초음파 진동을 가진 하는 방법과 에열없이 초음파 진동을 이용하여 와이어를 용접하는 방법으로 나누어 볼 수 있다. 와이어의 용접을 초음파의 진동만을 이용하는 것은 종진동(Longitudinal vibration)하는 용접 공구에 일정 하중을 와이어에 작용시켜 용착이 가능한 용융상태까지 온도를 상승시키는 것이다. 온도 상승의 효과는 하중에 의한 용접 공구와 와이어의 마찰을 이용한 고속 반복 마찰을 통해 열을 발생시키는 것으로, 용접 작업의 속도는 종진동의 주파수와 비례적 관계에 있다.

초음파 용접 순서는 초음파 진동자의 용접 공구에 밀착된 와이어의 위치 선정후 용접 공구에 일정 하중을 가한 상태에서 모재와 접촉하며 초음파의 진동이 시작된다. 용접의 질을 높이기 위해 초음파 진동은 와이어와 직접 회로 그리고 편에 덮여 있는 산화 피막을 제거하고 나면 용접 공구에 의한 마찰을 이용하여 와이어에 마찰열을 발생시켜 와이어를 용융 온도 이상의 온도로 만들어 모재와 용접하게 된다.

2.2. 압전 진동자

2.2.1 압전 이론

대표적으로 사용되는 압전 진동자의 원리는 1880년 Curie가 발견한, 크리스털(Crystal)의 결정 방향에 대해 기계적 응력을 가했을 때 전기적 분극이 생기는 압전 효과의 반대적 현상인 역압전 효과를 이용한 진동자로, 현재는 크리스털보다는 압전 효과가 뛰어난 압전 세라믹(Piezoelectric ceramics)이 실용화되고 있다. 압전 세라믹은 단결정을 대부분 제거한 것으로 모두 분극 처리가 되어 있다. 이는 세라믹에 직류의 고전압을 가한 것으로, 세라믹을 구성하고 있는 미립자중 쌍극자를 강제적으로 한 방향으로 처리한 것이다. 압전 세라믹의 특징은, 넓은 온도 범위에 걸쳐 유전율이 높고, 압전성이 우수하며 전기기계 결합계수(K^2)가 60%이상 달하고 Curie 점이 400°C 이상으로 높아 온도의 안정성이 우수하다는 이점이 있다. 압전 효과는 결정에 가해지는 힘(F)에 의해 양단의 두 전극에 전하량(Q)이 발생한다. 이를 압전 상수(d)와의 관계로 표현하면 아래와 같다.

$$Q = dF \quad (1)$$

힘에 의해 두께 t인 결정에 두께 변화가 Δt 만큼 생겼다고 하면, 면적 A인 결정체에 영률(Young's modulus) Y^E 는 두께 변화분에 대한 응력으로 나타내면

$$Y^E = \frac{F}{A} = \frac{t F}{A \Delta t} = \rho v^2 \quad (2)$$

따라서 두께 변화 Δt 의 항으로 나타나는 전하량 Q는

$$Q = d \cdot \frac{AY^E \Delta t}{t} \quad (3)$$

또 두 전극 사이의 캐페시턴스 C_c 는

$$C_c = \epsilon \frac{A}{t} \quad (4)$$

이고 ϵ 은 유전율(Dielectric constant)이다. 두 전극 사이의 출력 전압은 $E_o = Q/C_c$ 이므로 전압과 두께 변화와의 관계는 아래와 같다.

$$E_o = g \cdot Y^E \Delta t \quad (5)$$

여기서 $g = d/\epsilon$ 는 압전 감도(Voltage sensitivity)이다. 이러한 관계의 압전 효과를 나타내는 것으로서 전기기계 결합계수(K)를 사용하며 식 (6)과 같다.

$$K^2 = \frac{\text{converted to mechanical energy}}{\text{input electrical energy}} \quad (6)$$

$$= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_r}{f_a} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta f}{f_a}\right)$$

위의 식 (6)에서 f_r 은 압전 세라믹의 공진 주파수, f_a 은 압전 세라믹의 반공진 주파수로 압전 세라믹에 교류 전압을 인가하여 주파수를 변화시키면 일정 주파수에서 압전 세라믹이 매우 강하게 진동한다. 이 주파수를 공진 주파수라 하며, 공진 주파수를 이용한 진동은 높은 기계적인 진동을 나타낸다. 실제로 실험의 측정은 Fig. 2와 같은 등가회로 상에서 염밀하게는 압전 세라믹의 전극간의 어드미턴스(Admittance)가 영위상이 되는 2개의 주파수 가운데 높은 쪽이 공진 주파수, 낮은 쪽은 반공진 주파수이다.

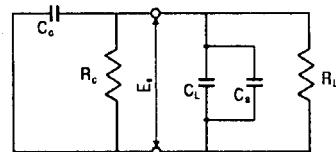


Fig. 2 Equivalent electric circuit of piezoelectric ceramics
 E_o : Voltage of piezoelectric ceramics
 C_c : Capacitance of piezoelectric ceramics
 R_c : Resistance of piezoelectric ceramics

Fig. 2 Equivalent electric circuit of piezoelectric ceramics

2.2.2 압전 진동자의 제작 이론

압전 세라믹을 다른 기계적 요소와의 체결 문제를 해결하고 기계적 진동의 효과를 증대하기 위하여 볼트 조임 랑지방 진동자의 모양으로 조합할 필요가 있다. 우선 일반적으로 알루미늄 와이어 용접기에 사용되는 초음파 주파수가 60kHz로 상용되어 있는 관계로 초음파 진동자의 제작은 60kHz에 맞추어 제작하기로 한다.

이로써 압전 세라믹의 공진 주파수를 60kHz가 되도록 아래의 식 (7)에 따라 압전 세라믹의 두께를 맞춘다.

$$t = \frac{N_t}{f_r} \quad (7)$$

여기서 N_s 는 압전 세라믹의 제조상 나타나는 고유한 값인 주파수 상수(Frequency constant)이다. 두께가 결정된 압전 세라믹은 초음파 진동자의 최대 변위 출력을 얻기 위해 Fig. 3과 같이 4 개의 압전 세라믹사이에 전극판을 삽입한다. 교류 입력 전압의 인가시 각각의 압전 세라믹의 길이 변화가 전극판에 의해 유도되는 상대적 변이의 작용으로 전체적으로는 $3/4 \lambda$ 으로 최대의 변이로 진동할 수 있도록 제작하였다.

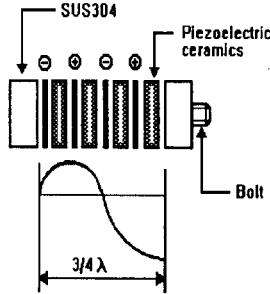


Fig. 3 Configuration of piezoelectric vibrator

2.2.3 압전 진동자의 시스템 인식

이와 같이 제작된 압전 진동자는 금속 블록과 볼트의 체결로부터 실제적인 진동에 영향이 생겨 실험적으로 측정된 압전 진동자의 시스템 인식이 필요하다. 따라서 압전 진동자의 이산화(Sampling)된 시간의 입출력 데이터, 즉 입력 전압에 대한 변위의 측정으로 압전 진동자의 시스템 인식(System identification)을 수행한다. 압전 진동자의 모델은 입력 전압 $u(k)$ 와 출력 변위 $y(k)$ 에 관계되는 식 (8)과 같은 ARMA(Auto Regressive Moving Average) 모델로 한다.

$$\begin{aligned} y(k+1) = & -\sum_{i=1}^n a_i y(k+1-i) + \\ & \sum_{i=0}^m b_i E(k+1-i-d) \\ = & \theta^T \psi(k) \end{aligned} \quad (8)$$

파라미터의 추정은 식 (9)의 PAA(Parameter Adaptation Algorithm)을 이용하여 추정 파라미터 $\widehat{\theta}(k+1)$ 을 추정 한다.

$$\widehat{\theta}(k+1) = \widehat{\theta}(k) + F(k) \psi(k) \varepsilon(k+1) \quad (9)$$

이와 같은 PAA를 이용하여 압전 진동자의 입출력에 관계된 파라미터를 추정할 수 있다.

2.3. 혼 (Horn)

2.3.1 혼의 제작 이론

압전 진동자에 의한 기계적인 초음파 진동을 용접 작업

의 종방향에 대한 진동 전달 매체로 혼을 사용하게 된다. 또한 혼은 와이어 용접기(Wire bonding machine)에 장착하기 위해 체결 형태로 만들 수 있으며, 종진동을 최종 전달 지점까지 전달 과정에서 진폭을 증폭 할 수 있는 형태로 주로 사용된다.

운동 방정식은 일차원적 파동 전파 이론 식을 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_x \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = c_h^2 \frac{\partial}{\partial x} (S_x \frac{\partial y(x, t)}{\partial x}) \quad (10)$$

위의 식은 종방향 진동을 연속체로 모형화하여 종방향 변형만이 존재하며, 단면에서의 응력은 균일하게 분포한다는 가정으로 한 것이다. 여기서 S_x 는 길이 방향에 대한 단면적이며, c 는 재질의 음속이며, 단면적의 축소는 진폭의 증폭 요인임을 알 수 있다. 따라서 혼의 형태는 직선적인 부분에 연속적인 단면의 축소를 이루는 원추형을 연결한 형태로 한다면 Fig. 4와 같은 형태이다. 혼의 경계 조건은 길이 방향에 대한 응력과 진폭의 관계로

$$\begin{aligned} x=0 & : \frac{\partial y_1}{\partial x} = 0 \\ x=l_1 & : y_1 = y_2 \quad , \quad \frac{\partial y_1}{\partial x} = \frac{\partial y_2}{\partial x} \\ x=l_1+l_2 & : \frac{\partial y_2}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)과 같으며, 식 (10)은 경계 조건에 의해 혼의 길이와 단면적의 관계로 나타낸 공진 조건 식으로 표현할 수 있다.

$$\tan \alpha l_1 =$$

$$\frac{a l_2 (\sqrt{S_1/S_2} - 1)^2}{\sqrt{S_1/S_2} \alpha l_2 [\alpha l_2 + (\sqrt{S_1/S_2} - 1) \tan \alpha l_2]} - \frac{[\sqrt{S_1/S_2} (\alpha l_2)^2 + (\sqrt{S_1/S_2} - 1)^2] \tan \alpha l_2}{\sqrt{S_1/S_2} \alpha l_2 [\alpha l_2 + (\sqrt{S_1/S_2} - 1) \tan \alpha l_2]} \quad (12)$$

여기서 a 는 파장 정수($=c_h/2\pi f_r$)이다. 압전 진동자의 입력에 대한 혼의 출력단에서의 진폭 확대율은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} M &= \frac{y_2}{y_1} = \\ & | \sqrt{S_1/S_2} \frac{\cos \alpha l_1}{\cos \alpha l_2} \frac{\alpha l_2}{\alpha l_2 + (\sqrt{S_1/S_2} - 1) \tan \alpha l_2} | \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 직선부의 길이와 단면적을 정하고 진폭 확대율을 결정하면 위의 식으로부터 원추형의 길이와 소 단면적을 결정할 수 있을 것이다.

혼의 직경과 길이는 고유 진동수에 관계하며, 길이는 초음파 용접의 작업시 회전에 의한 관성력이 작용하여 정확한 위치 이동의 장애가 될 수 있다. 따라서 초음파에 의한 혼의 진동의 파장(λ_h)을 이용한 길이비로 축소해야 한다.

$$\lambda_h = \sqrt{\frac{Y_h^E}{\rho_h}} = \frac{c_h}{f_r} = 2l_1 \quad (14)$$

식 (14)에 의해 Fig. 4에서와 같이 직선부 길이 l_1 에서 진동의 반파장을 유도하여 직선부의 중점에서 진동 절면(Nodal plane)이 생기도록 한다. 진동 절면은 초음파 진동

자를 고정할 수 있는 지지대로 사용하면 초음파 진동에너지의 소모를 극소로 줄일 수 있으며, 또한 초음파 진동에 의한 진동 절면에서 작용하는 최대의 용력 보강재로도 쓰일 수 있는 이점이 있다.

더욱이 진동 절면의 유도를 정확하게 하기 위해서는 진동 절면의 위치에서 계단(Step)형을 만들어 진동 파장의 불연속적인 부분을 만들어 사용할 수 있다.

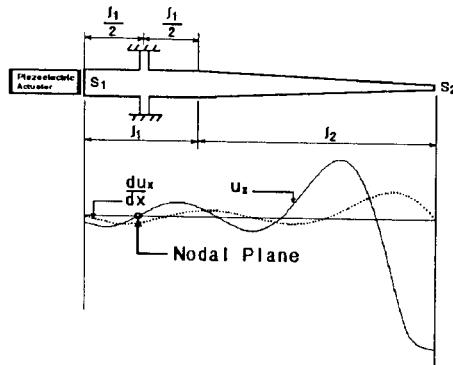


Fig. 4 Configuration of ultrasonic transducer and wavelength of longitudinal vibration

3. 실험 장치 및 방법

3.1. 실험 장치

실험을 통해 최적의 초음파 진동자로 선택된 압전 진동자와 혼이 설계 제작되면 Fig. 5와 같은 용접기 헤드(Bonding head)에 장착하여 와이어의 용접을 시도하게 된다. 용접은 직경 $\phi 150\mu\text{m} \sim \phi 400\mu\text{m}$ 까지의 알루미늄 와이어를 알루미늄 금속판에 용접하게 되며 용접시 작용하는 하중은 Fig. 5의 ③의 서보 모터에 불 스크류를 연결한 Z-축으로 용접기 헤드를 이동하는 변위가 주로 하중으로 작용하며, ②의 솔레노이드는 변위 변화시 전압의 조절을 통해 유연하게 적정의 위치에 적용할 수 있게 설계되었다.

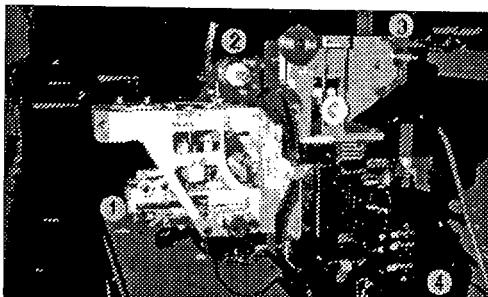


Fig. 5 Close view of the wire bonding machine head

3.2. 실험 방법

초음파 진동자는 압전 진동자와 혼이 결합된 집합체로 구성되어 있다. 고주파 신호에 의한 압전 진동자의 진동은 혼에 결합된 상태에서 전달되므로 결합 상태에서 혼을 진동하는 압전 진동자의 진동은 측정이 불가능하다고 할 수 있다.

따라서 Fig. 6과 같은 방법으로 압전 진동자의 시스템 인식을 수행한다. 신호 발생기의 입력 전압과 갭 센서의 변위 출력의 데이터는 시간적 오차를 줄이기 위해 온 라인(On line)으로 처리된다. 진동 주파수 대역은 100kHz를 넘는 대역이 필요하므로 이산화 시간(Sampling time)은 $7.63\mu\text{s}$ 로 하여 측정 주파수 대역은 102.4kHz로 하였다. 측정 결과 입출력에 대해 외란(Noise)의 영향이 거의 나타나지 않은 관계로 시스템 인식의 방법은 PAA를 이용한 직병렬 방법(Series parallel method)을 사용하였다. 이렇게 인식된 압전 진동자의 실제적인 모델은 시뮬레이션 프로그램인 Matlab의 Simulink에서 부분적인 시스템으로 구성하여 유한 요소법(FEM)을 이용한 혼의 모델과 함께 전체적 시스템을 구성한다. 입력 값으로 백색 잡음(White noise)을 주며 각각의 압전 진동자를 통과한 출력과 전체 시스템을 통과한 출력을 FFT(Fast Fourier Transform)의 알고리즘을 이용한 Matlab 프로그램으로 주파수 영역에서의 스펙트럼(Spectrum)을 구하고 나면 혼의 이론적 해석의 주파수 응답은 각종 함수를 이용한 커브 피팅으로 구할 수 있다.

Fig. 7은 이론적 해석과 실험적 해석의 관계를 나타낸 것이다.

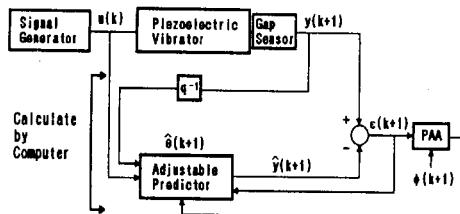


Fig. 6 Recursive identification method of piezoelectric vibrator

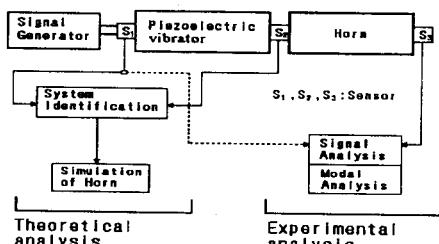


Fig. 7 Components of theoretical and experimental system for dynamic characteristic analysis

4. 실험 결과

4.1. 초음파 진동자의 동특성

Fig. 8과 Fig. 9는 혼의 직선부에 약간의 계단형을 만든 경우와 그렇지 않은 혼의 공진 주파수와 전기기계 결합계수의 측정을 목적으로 실시한 임피던스 측정 실험의 결과이다. 여기서 출력은 임피던스의 역수인 어드미턴스가 출력된 상태로 되어 있으며 실험 결과 계단형이 있는 경우가 초음파 진동자의 전기기계 결합계수가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문의 초음파 진동자의 동특성 해석을 위한 실험은 계단형의 혼에 대한 실험으로 진행하였다.

Fig. 10은 압전 진동자의 입력 전압에 대한 출력 변위의 주파수 응답으로 압전 세라믹의 공진 주파수인 60kHz외에도 피크치 응답이 나타나고 있으나 최대 피크치는 60kHz 주파수에서 최대 피크 즉, 공진 주파수임을 알 수 있다.

Fig. 12는 용접 작업이 이루어지는 용접 지점에서의 실험에 의한 주파수 응답과 이론적 해석의 주파수 응답을 비교하였다. 비교 결과 피크 응답의 위치가 거의 동일한 주파수에서 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 혼의 고유 진동수도 실험과 이론의 결과 60kHz에 존재하고 있다. 이로써 이론에 의한 혼의 설계는 실제의 초음파 진동에 적용이 가능하다.

Fig. 13은 커브 팟팅을 통해 얻은 진동 모우드이다. Fig. 13은 주파수 변화와 혼의 길이 변화에 대해 진동 모우드로 직선부에서 보다 원추형에서 확실한 진폭의 증폭이 이루어짐을 보이고 있다. 여기서 공진 주파수 60kHz에서의 진동 모우드 Fig. 14를 보면 이론적 배경에서 언급한 혼의 진동 모우드와 거의 흡사한 형태를 보이고 있다. 또한 이론과 실험에 의한 진동 모우드도 유사하게 나타나고 있다. 그러나 원추형 부분에서 이론과 실험의 진동 모우드가 약간의 오차를 보이고 있다. 이것은 혼의 중방향 진동 측정 시 스트레인 게이지 부착의 위치가 정화하지 않아서 오는 오차와 혼 재질의 균질성 여부 그리고 가공시 작용하는 가공 오차의 원인으로 고찰된다. 또한 Fig. 14에서 혼의 직선부에 대한 진동 모우드를 보면 직선부의 중심에 진동 절면이 존재하고 있음이 이론 및 실험의 모우드에서 확인되고 있다.

4.2. 알루미늄 와이어 용접

진동 절면의 확인으로 직선부 중심에 체결이 가능한 혼을 용접기 헤드에 장착하여 초음파 용접을 실시하였다. 용접의 시간과 하중의 결정은 Fig. 15와 같은 알루미늄 와이어를 용융시킬 수 있는 에너지를 상위 하는 마찰력의 에너지가 작용할 수 있도록 결정한다.

마찰력 결정은 용접시 작용하는 축의 위치 이동으로 하중을 가하며 적정 하중의 유지를 위해 슬레노이드의 전기적 입력을 조정하여 과부하 또는 저부하를 방지하도록 하는 것으로 보정을 한다. 이로써 알루미늄으로 제작된 시편에 직경 $\phi 400\mu\text{m}$ 인 알루미늄 와이어를 초음파 용접 한다. Fig. 16은 용접 결과의 확대 사진이다.

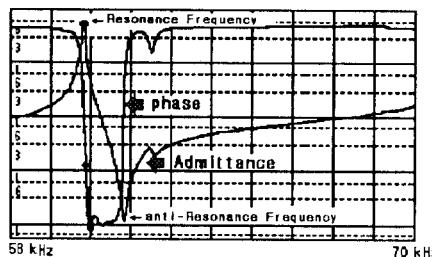


Fig. 8 Admittance and phase of ultrasonic transducer with uniform type ($K^2=0.26$)

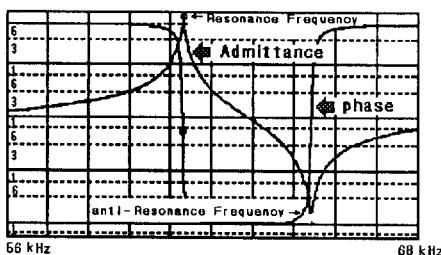


Fig. 9 Admittance and phase of ultrasonic transducer with step type ($K^2=0.44$)

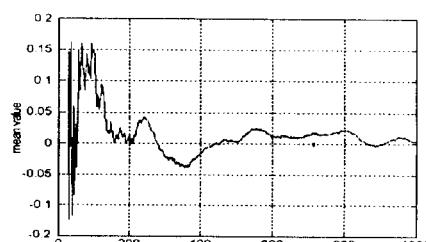


Fig. 10 Mean values of error [$\epsilon (k+1)$]

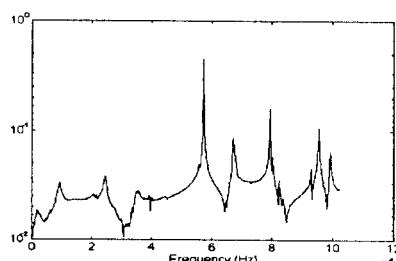


Fig. 11 Experimental frequency response of piezoelectric vibrator

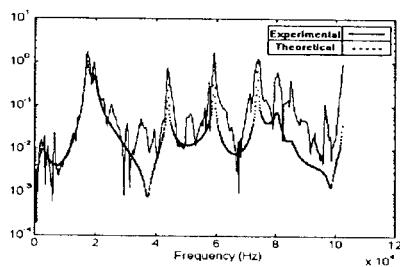


Fig. 12 Experimental and theoretical frequency response of horn ($x \approx l_1 + l_2$)

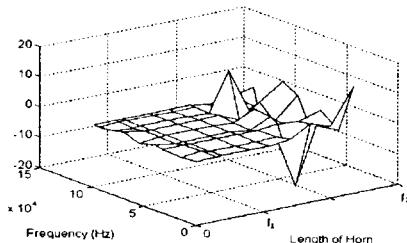


Fig. 13 Experimental mode shape of horn

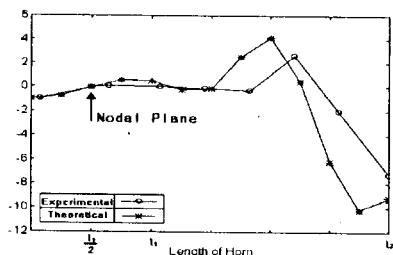


Fig. 14 Experimental and theoretical mode shape of horn at 60kHz resonance frequency

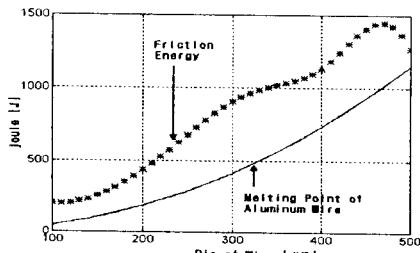


Fig. 15 Friction energy and melting point of aluminum wire ($\phi 400 \mu\text{m} \sim \phi 100 \mu\text{m}$)

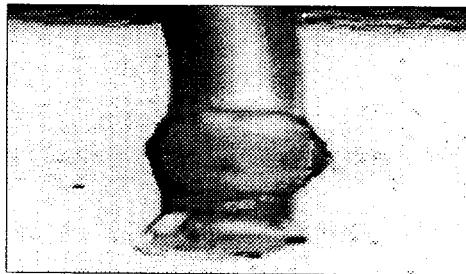


Fig. 16 View of bonded wire ($\phi 400\mu\text{m}$, $\times 500$)

5. 결 론

초음파 용접기의 용접 구동 장치인 초음파 진동자의 압전 진동자와 혼을 설계의 이론적 조건에 따라 제작하여, 압전 진동자와 혼의 동특성 해석을 실험과 이론적으로 실시하여 비교 검토하며, 초음파 용접기로 알루미늄 와이어를 용접한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 볼트 조임 랑지방 진동자는 압전 세라믹의 공진 주파수를 유지하며 압전 진동자 제작에 유리하다.
2. 혼의 제작시 진동 절면의 위치 선정에 의한 설계는 초음파 용접기의 장착에 유용하다.
3. 혼의 진동 모우드에서 혼이 원주형을 이루는 연속적인 구간은 진폭의 증폭 효과가 매우 좋으며, 이 구간의 길이와 직경의 비를 조절하여 증폭비 조절이 가능하다.
4. 실험 및 이론의 동특성 해석 결과로부터 혼의 이론 적용이 가능하다.
5. 제작된 초음파 진동자를 이용하여 알루미늄 와이어의 초음파 용접이 가능함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1]. 이성일, 이제철 외4, “초음파 가공기의 개발”, 생산기술 연구원보 1992
- [2]. Ioan Iore Landaw, “System Identification and control Design”, Prentice-Hall 1990, PP.156 ~ 159
- [3]. D.J.Ewins, “Modal Testing:Theory and Practice”, Research Studies Press LTD, 1984
- [4]. 金子, 上雨, 森 “プラスチックの超音波溶接”, 日本音響學會誌, VOL.42, No 5, pp. 365-371 (1986)
- [5]. Leonard Moirovital, “analytical Method in Vibration”, The MacMillan Company 1967, PP.126 ~ 138
- [6]. 什野, “超音波溶接の現状と課題”, 日本音響學會誌, VOL. 45 No 5, 1989, PP.409 ~ 415
- [11]. Kinsler, Frey, Coppens, Saners, “Fundamentals of ACOUSTICS”, Wiley, 1982, PP.373 ~ 375