

초음파 용접 시스템 설계에 관한 연구

*홍정표, **정승환, *원태현, **권순재
*동의과학대학, **부경대학교

A Study on Ultrasonic Welding System Design

*Jeng-Pyo Hong, **Seoung-Hwan.Jung, *Tae-Hyun Won, **Soon-Jae Kwon
*DongEui College, **Pukyong National Univ.

ABSTRACT

Ultrasonic welder joins with a horn and a booster for amplification of the mechanical displacement. This coupling generates other resonance points at a frequency range lower than the piezoelectric material's resonance frequency. Therefore, frequency variation range through PLL control was proposed in order to prevent reaction to these resonance points.

1. 서론

최근 지구 환경 문제가 전 세계적인 이슈로 부각되면서 유럽을 중심으로 한 환경 규제(WEEE, RoHS등) 움직임이 강화되고 있으며, 이와 같은 규제 및 조약에 능동적으로 대처하고 생산효율을 향상시키면서 동시에 환경 친화적인 접합시스템에 대한 관심이 고조되고 있다.

지금까지 국내에서 사용되어지고 있는 용접은 주로 용융 용접이나 브레이징/솔더링 방식이 주를 이루었지만, 이러한 접합 방법은 생산성이 매우 낮고 접합 품질이 떨어질 뿐만 아니라 납이나 유해가스 등의 환경오염 물질이 발생하는 문제점 때문에 고생산성, 고품질 및 친환경 용접시스템에 대한 새로운 기술이 절실한 현실이다.

이러한 기대에 대해 부응하고 동시에 최근 각광받고 있는 신재생에너지 분야의 태양열 집열관에 적용할 수 있는 초음파 용접 시스템이 그 대안으로 제시되고 있지만 국내에서는 태양열 집열관의 초음파 접합에 대한 연구가 거의 전무한 상태이다. 특히 소재와 코팅재에 따라 초음파 접합부 특성이 달라지기 때문에 집열관의 효율 극대화와 접합부 신뢰성 향상을 위한 최적의 초음파 특성을 적용하여 접합하지 않으면 안된다.

이러한 초음파 용접 시스템은 주파수(약20~40kHz)대의 초음파 진동(20~70 μ m)을 이용한 소재 표면 산화물 파괴와 국부적인 소성변형이 발생하여 금속결합이 가능하고 접합 시나 접합 전 후에 각종 대기 오염 물질이나 연기가 발생하지 않고, 전처리 및 접합부 세척 등 여러 가지 공정을 거치지 않기 때문에 공정을 단순화과 동시에 새로운 친환경 용접 방식이다.

초음파 용접부의 기계적 성질을 포함한 용접 품질을

높이기 위해서는 정적인 가 압력과 전단응력의 형태, 용접부의 온도, 용접부에 전달되는 진동에너지, 용전전원 등을 면밀히 검토하여 최적의 용접조건을 도출하는 것이 중요하다.

초음파 용접기는 기계적 변위를 증폭하기 위해 호프와 부스터를 결합하게 되는데 이로 인해 압전체의 공진주파수보다 낮은 주파수 영역에서 다른 공진점들이 발생하게 된다. 따라서 이러한 공진점에 반응하는 것을 방지하기 위해서 PLL 제어를 통해 주파수 가변 범위를 제한하였다. 이를 통해 공진점내에서 출력전압을 제어함을 보여준다.^[1]

2. 압전소자

2.1 압전소자 특성

일반적으로 절연물이 되는 유전체는 전기 변위의 제공에 비례한 왜곡 변위를 발생한다. 이 현상을 전기 왜곡이라고 부르지만 보통의 유전체에서는 이 현상은 매우 작다. 그러나 PZT나 티탄산바륨과 같은 이른바 강유전체에서는 이 현상이 대단히 크고 실용 레벨의 왜곡 변위를 발생한다. 그림 1 (a)는 전기 왜곡 현상의 왜곡 특성을 나타낸 것이고 여기에서는 전기장의 제공에 비례하는 모습을 나타내고 있다. 또 이 왜곡은 전기장의 방향을 변화시켜도 같은 방향으로 변위한다.

그러나 압전현상은 그림 1 (b)와 같이 전기장에 대해 변위 왜곡이 선형적인 출력을 나타낸다.

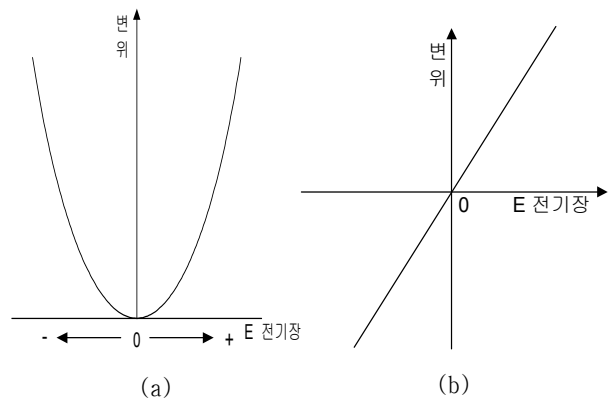


그림 1 전기장과 변위(왜곡)

Fig. 1 Electric berry displacement (distortion)

2.2 등가회로 및 주파수 특성

압전 소자는 공진 주파수 부근의 극히 좁은 범위 내에서 그림 2와 같은 등가 회로로 나타내어진다. 여기에서 직렬 공진변수 L, C, R 는 압전 소자의 공진을 나타낸다. 또 병렬 공진변의 콘덴서 C_d 는 유전체로서의 압전 소자의 정전 용량을 나타내고 있다. 따라서 이 회로의 직렬 공진 주파수 ω_s 는 식 1로 계산된다.

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{CL}} \quad (1)$$

또 병렬 공진 주파수 ω_p 는 식 2와 같다.

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L\left(\frac{C \cdot C_d}{C + C_d}\right)}} \quad (2)$$

식 1과 2에서 $\omega = 2\pi f$ 이다.

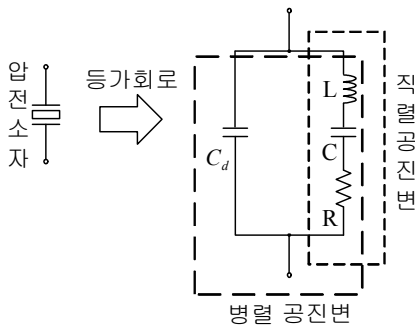


그림 2 압전소자 등가 회로

Fig. 2 Pressure total destruction sleeping equivalent circuit

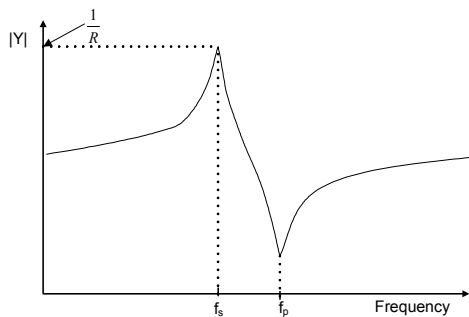


그림 3 압전소자 어드미턴스 특성

Fig. 3 Admittance characteristic of piezoelectric element

그림 3는 이 등가 회로의 주파수에 대한 어드미턴스 특성을 나타낸 것으로 어드미턴스 최대에서 직렬 공진이 되고 최소에서 병렬 공진이 된다. 여기에서 직렬 공진 주파수와 병렬 공진 주파수가 구해지면 다음의 근사식에서 압전 소자의 전기 기계 결합 계수를 산출할 수 있다.

압전 소자는 기계적 에너지를 전기적 에너지로, 또 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 일종의 트랜스듀서이므로 전기 기계 결합 계수를 계산 할 수 있다. 전기 기계 결합 계수는 전기적인 형으로 결정 중에 축적 되는 에너지의 기계적 총 입력에 대한 비율의 제곱근이

라고 정의되어 있다. 보다 쉽게 표현 하면 전기 에너지와 기계적 에너지의 변환 효율 정도로 생각해도 된다. 또한 전기 기계 결합 계수를 간단하게 결합 계수라고 하는 경우도 있다. 가로 효과 압전 소자의 전기 기계 결합 계수 K 는 식 3에 의해 계산할 수 있다.

$$K^2 = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{f_p - f_s}{f_s} \quad (3)$$

단, K 가 0.3 이상이 되는 경우는 식 4와 같은 근사식이 적용된다.

$$\frac{1}{K^2} = a \cdot \frac{f_s}{f_p - f_s} + b \quad (4)$$

식 4에서 a, b 는 상수로 압전소자의 진동 방향에 따라 결정되는 상수이다.

3. 초음파 용접기

3.1 초음파 용접기의 구성

다음의 그림 4는 초음파 용접기 변환기의 구성과 각 부분의 진동 진폭, 응력 분포를 나타낸 것이며 그림에서 볼 수 있듯이 부스터와 혼은 공구 단면의 진동 진폭을 확대한 것으로 이것은 일종의 음향 에너지 집중기라고 생각하면 된다.

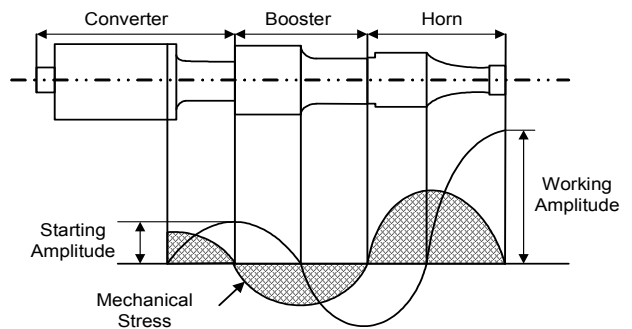


그림 4 용접기의 기계적 변위 특징 및 구조

Fig. 4 Structure and vibration displacement of processing transducer

진동자와 부스터의 접촉면, 부스터와 혼의 접촉면은 진동에 의한 응력 집중을 방지하기 위하여 응력 제로의 위치에 설정되어 있으며 금속 피로는 응력 최대 위치의 응력이 한계를 넘기 때문에 발생하므로 가공 목적에 따라 그에 맞는 혼을 사용해야 한다.

3.2 발전기 설계

앞 절에서 언급한 발전부의 특성을 모두 만족시키기 위해서는 그림 5와 같은 구조의 인버터가 필요하다. 발전부 인버터는 상용전원을 이용 인버터의 전원을 만들기 위해 AC인 상용전원을 DC를 바꾸기 위한 정류부가 필요하며, 임의의 고주파 출력을 발생하기 위해 Full-Bridged 인버터가 필요하다. 인버터 출력은 고주파 절연 변압기를 이용하여 입력과 출력을 절연하였으며, 인버터 출력은 구형파 이므로 정형파의 고주파를 얻기 위해 출력에 L-C 직렬공진 형태의 필터를 사용하였다.

어떠한 부하 조건에도 에너지 손실을 최소로 하기 위

해서는 발전기의 출력을 용접기의 기계적 공진 주파수로 제어해 주어야 한다. 이를 위해 그림에서와 같이 전압 전류 센서의 신호를 비교기를 통해 각 신호간의 위상차를 검출하고 이를 PI 제어기를 통해 PLL 제어를 수행하였다. 출력 공진 필터와 PLL 제어 방식에 대한 자세한 설명은 다음 장에 하기로 한다.

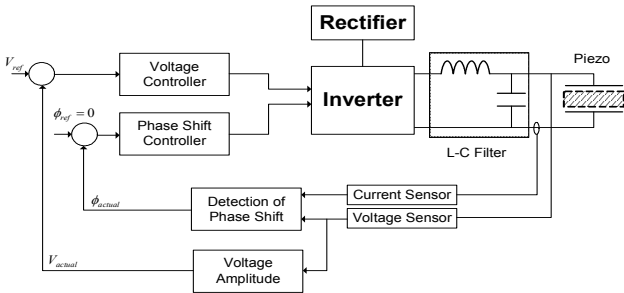


그림 5 초음파 용접기 발전부 구조
Fig. 5 Ultrasonic welding system transducer structure

4. 시뮬레이션 결과

다음으로 실제 초음파 용접기를 구현한 OR-CAD 시뮬레이션을 그림 6에 보여주고 있다. 시뮬레이션은 크게 3부분으로 나눌 수 있는데, 첫 번째로 20kHz의 구형파를 발생시키고 출력 전압을 조절하기 위한 인버터부와 두 번째로 L-C 직렬공진을 위한 공진 회로부, 그리고 마지막 세 번째로 무부하시 출력 전압이 커지므로 특정 전압 이상이 되면 에너지 회수 및 출력단 보호를 위한 출력 보호부이다. 여기서 인버터는 이상적인 전압 신호원을 사용하여 구현하였고 출력 전압의 크기 즉 구형파의 폭은 DSTM3의 시간 지연을 줌으로써 구현할 수 있다.

그림 7의 (a)는 인버터의 변조폭을 40%로 한 경우 변압기 출력 전압 및 인버터 출력 전압을 나타낸 것으로 인버터 출력과 필터 출력의 전압을 나타낸 것으로 출력 전압의 최대치는 1.4kV정도이며, (b)는 인버터 펄스폭을 80%로 한 경우의 출력으로 최대치는 약 2.2kV로 이다. 이것은 L-C필터에 의해 전압이 증폭되고 있음을 확인할 수 있으며 변조비에 따라 출력 전압이 제어되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 공진 필터를 사용함으로써 고조파 성분이 없이 기본파 성분만 출력에 나타남이 확인된다. 그리고 그림 7 (a) 및 (b)에서 나타나는 출력 전압은 압전체에서 요구되어지는 전압을 발생시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

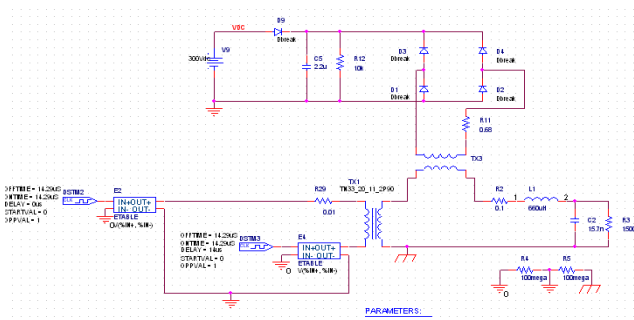
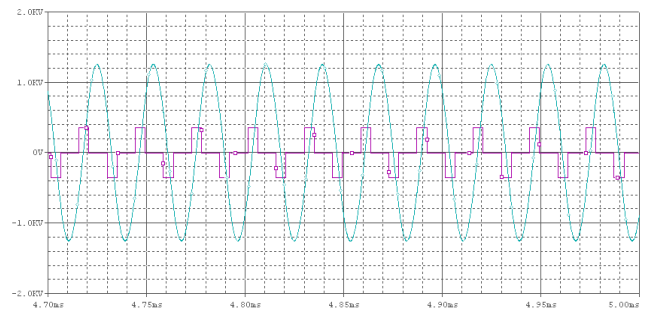
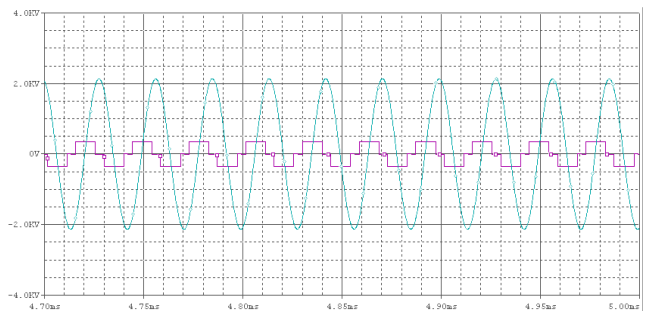


그림 6 초음파 용접기 시뮬레이션

Fig. 6 Timely territory simulation schematic



(a) 펄스폭 40%



(b) 펄스폭 80%

그림 7 진폭에 따른 출력 전압 제어 시뮬레이션

Fig. 7 Simulation of output voltage is controlled based on the modulation rate

5. 결론

초음파 용접부의 기계적 성질을 포함한 용접 품질을 높이기 위해서는 정적인 가압력과 전단응력의 형태, 용접부의 온도, 용접부에 전달되는 진동에너지, 용전전원 등을 면밀히 검토하여 최적의 용접조건을 도출하는 것이 중요하다.

초음파 용접기용 발전자의 특성을 이해하고 이에 따른 소재별 용접 공정 변수를 도출하였으며 도출된 변수를 이용하여 실제 용접기에서 발전부에 해당하는 L-C 공진형 인버터의 공진 L-C 파라미터를 도출하여 실제 인버터 제작에 사용하였다. 제작된 인버터의 알고리즘 구현을 위해 고주파 신호처리 및 위상제어 알고리즘을 사용하여 출력의 안정도를 높였다. 향후 본 논문에서 시뮬레이션을 통해 입증된 방식을 실험을 통해 검증하고자 한다.

참고 문헌

- [1] Lorenzo Parrini, "Design of Advanced Ultrasonic Transducers for Welding Devices", IEEE Trans. Sonics Ultrason. Vol 48, No 6, 1632 ~ 1639, Nov 2001.
- [2] J. TSUJINO, T. UEOK, Y SUZAKI, K UCHIDA, "ULTRAONIC BUTT WELDING OF THICK METAL PLATE SPECIMENS USING A CAPACITY STATIC INDUCTION THYRISTOR POWER AMPLIFIER" IEEE Ultrasonic Symposium, 371 ~ 374, 1990.