

## 초음파 용접용 혼의 설계

유 중 돈

### Design of Ultrasonic Welding Horn

Choong D. Yoo

#### 1. 초음파 용접기의 구성 요소

20kHz 이상의 고주파인 초음파는 용접, 절단, 세정, 측정 및 검사 등의 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 이 중에서 초음파 용접은 종방향 또는 횡방향으로 초음파 진동을 가하여 열가소성 플라스틱이나 이종 금속을 접합한다. 플라스틱 접합은 종방향 진동에 의한 점탄성 발열로 플라스틱이 용융되면서 접합부를 형성하며, 금속의 접합에서는 횡방향 진동에 의해 접합면의 불순물과 산화막이 제거되어 확산에 의한 고상접합부가 형성된다. 이와 같이 초음파 용접의 적용 분야는 다르지만, 초음파 용접에 사용되는 장비의 구성과 작동 원리는 매우 유사하다.

일반적으로 초음파 용접기는 Fig. 1에 보인 바와 같이 초음파 발전기(generator), 초음파 진동자(transducer), 부스터(booster) 및 혼(horn)으로 구성된다. 초음파 발전기는 60Hz의 AC 전류를 20kHz 이상의 고주파 전류로 변환시켜 초음파 진동자에 공급한다. 초음파 진동자는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 역할을 하며, 초음파 압전자라고 부르기도 한다. 초음파 진동자의 재료로서 주로 피에조(piezo) 재료 사용한다. 산업용 진동자는 다수의 원판을 적층시키고 볼트로

압력을 가한 BLT(Bolt clamped Langevin-type Transducer)를 사용한다. BLT의 출력단에서 발생하는 초음파 진폭은 5-15 $\mu$ m로 매우 작기 때문에 용접용으로 사용하려면 진폭을 증가시켜야 하며, 이를 위하여 BLT 출력면에 부스터와 혼을 순차적으로 부착시켜 사용한다. 부스터는 BLT와 혼의 중간에 위치하며 BLT의 진폭을 1/3-3 배 정도로 증폭시킨다. 혼은 부스터의 출력단에 부착되며 부스터의 진폭을 1/3-3 배 정도로 증폭시킨다. 대부분의 부스터와 혼의 증폭비는 1보다 크지만, 적용 분야에 따라 1보다 작은 경우도 있다. 혼을 소노트로드(sonotrode) 또는 콘센트레이터(concentrator)라고 부르기도 하며, 측정용 탐침인 경우에는 프로브(probe)라고 부르기도 한다.

적용 분야에서 사용하는 초음파 주파수에 따라 초음파 용접기의 구성 요소 중에서 초음파 발전기와 진동자를 결정할 수 있다. 일반적으로 플라스틱 용접에서는 20-40kHz, 금속의 고상접합에는 20-60kHz, 반도체 공정에서 사용되는 와이어 본딩(wire bonding)에는 60-100kHz의 주파수 범위를 사용한다. 그러나 이는 절대적인 주파수 범위가 아니고 필요에 따라 적합한 영역을 사용할 수 있다. 또한, 시판되는 초음파 시스템의 주파수가 제한적이므로 장비 제조업체와 협의하여 적절한 주파수를 결정하여야 한다.

부스터와 혼의 경우에 사용자가 결정할 수 있는 사양은 부스터와 혼의 증폭비와 형상이다. 그러나 많은 경우에 부스터는 제조업체에서 초음파 진동자와 함께 제공하며, 부스터의 증폭비 값이 일정 범위 내에서 표준 사양이 결정되어 있다. 그러므로 사용자는 공정에 필요한 진폭과 진동 모드 및 출력 면적을 고려하여 혼을 적절하게 설계하여야 한다. 혼의 증폭비는 공정 증폭비를 부스터의 증폭비로 나눈 값이며, 공정 증폭비는 가공에 필요한 혼의 진폭을 초음파 진동자의 진폭으로 나눈 값이 된다.

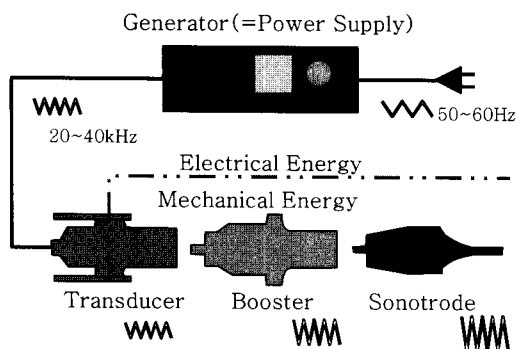


Fig. 1 초음파 용접기의 구조

## 2. 혼의 형상

초음파 혼의 설계시 고려해야 하는 사항은 다양하지만, 중요한 요소로 혼의 공진 주파수와 진폭 및 출력면 진폭의 균일도(uniformity) 등을 들 수 있다. 혼의 공진 주파수는 초음파 진동자의 가진 주파수가 일치해야 하며, 공진 상태에서 초음파 에너지가 가장 효율적으로 혼의 출력면에 전달된다. Fig. 2는 부스터와 혼에서 변화하는 초음파 진폭을 나타내며, 초음파 진동자의 진폭이 부스터와 혼을 통과하면서 증폭된다. 부스터의 입력면과 출력면 사이의 거리가 음파의 1/2 파장에서 진폭이 최대가 되며(anti-node), 혼의 길이도 음파의 1/2 파장 또는 이의 배수이다. 부스터와 혼의 내부에는 진폭이 영(zero)인 노드(node)가 존재하며, 노드의 주변에서 최대 응력이 발생하므로 혼의 설계시 노드 주위의 응력 분포에 주의해야 한다.

초음파 용접에 사용되는 혼의 형상은 매우 다양하며, Fig. 3은 산업용으로 사용되는 대표적인 혼의 형상을 나타낸다. Fig. 3(a)는 가장 단순한 형상으로 스텝 혼(steppped horn)을 나타내며, 이외에도 형상에 따라 원추형 혼(conical horn)이나 지수형 혼(exponential horn)을 사용할 수 있다. 이때, 혼의 입력부 면적이 출력부 면적보다 크면 진폭이 증폭되며, 진폭비는 혼의 입력면과 출력면의 면적비에 비례한다. Fig. 3(b)와 3(c)는 각각 바 혼(bar horn)과 블록 혼(block horn)을 나타내며, 넓은 면적에 초음파를 가하는데 사용된다.

## 3. 혼의 설계

혼을 실린더 형상으로 가정하면, 실린더의 진동은 아래의 1차원 파동 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \tag{1}$$

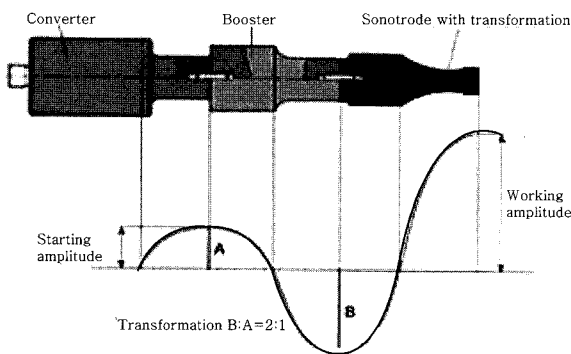


Fig. 2 부스터와 혼의 진폭 변화

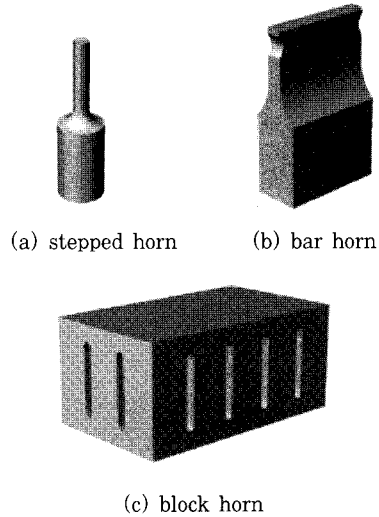


Fig. 3 혼의 형상

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

이때, E와 ρ는 실린더 또는 매질의 탄성계수와 밀도, c는 매질내의 음속을 나타낸다. 위의 식으로부터 음속은 혼의 재료에 의해 결정되며, 일반적으로 알루미늄 합금이나 타이타늄 합금을 사용한다. 그러나 혼의 마모가 중요한 설계 요소인 경우에는 내마모성이 우수한 공구강을 사용하기도 한다.

경계조건을 이용하면 유도된 식(1)의 해로부터 길이 ℓ인 실린더의 1차 고유 진동수는 다음과 같다.

$$f = \frac{c}{\ell} \tag{2}$$

위의 식에서 실린더의 길이가 증가하거나 매질의 음속이 감소하면 (즉, 탄성계수가 감소하거나 밀도가 증가하면) 고유 진동수가 감소한다. 위의 식은 개략적인 혼의 길이를 예측하는 기본적인 해석식으로서, 혼의 재료와 가진 주파수가 결정되면 혼의 길이는 실린더 길이의 1/2 파장에 해당한다.

혼의 설계시 혼의 길이와 형상은 각각 공진 주파수와 증폭비를 결정한다. 혼을 설계하는데 일반적으로 적용하는 절차는 다음과 같다.

- (1) 식(2)를 이용하여 개략적인 혼의 길이를 계산한다.
- (2) 혼의 증폭비로부터 혼의 형상을 계산한다. 이때 혼의 단면적을 Handbook 등을 이용하여 계산할 수 있다.
- (3) 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 이용하여 혼의 고유 진동수와 진동 모드(mode)를 계산한다. 이때, (1)과 (2)의 결과를 FEM의 입력으로 이용한다.

(4) FEM의 결과를 검토하여 혼의 형상과 길이를 수정하며, 원하는 특성을 얻을 때까지 수정을 반복한다.

(5) 혼을 가공한다. 이때 추가 가공에 대비하여 혼의 길이에 여유 공차를 1-2mm 주는 것이 바람직하다.

(6) 가공된 혼이 원하는 주파수에서 공진이 발생하는지의 여부를 실험을 통하여 확인한다. 필요한 경우에는 수정 가공을 수행한다.

이와 같은 혼의 설계 과정은 일반적으로 사용되는 절차이며, 특히 FEM을 이용한 모드 해석(modal analysis)은 매우 유용하다. 이는 FEM을 이용하여 혼의 형상에 따른 고유 진동수와 진폭뿐만 아니라 진폭의 균일도와 응력 해석도 가능하기 때문이다. Fig. 4는 3차원 FEM을 이용하여 블록 혼의 진동을 해석한 결과를 나타내며, 축방향의 1차 축방향 진동 모드 이외에도 다양한 모드가 발생함을 알 수 있다.

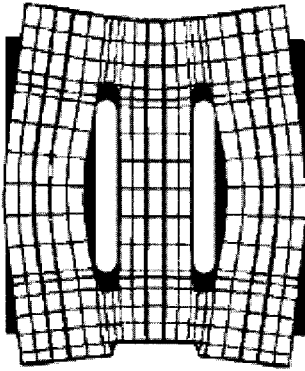


Fig. 4 Block horn의 FEM 해석 결과

#### 4. 요약

초음파 용접용 혼의 설계에 대한 기본적인 방법과 절차를 설명하였다. 그러나 아직까지 혼의 최적 형상을 구하는 방법은 시행착오(trial-and-error) 방법과 실험 및 설계자의 경험에 많이 의존해야 한다. 또한, 혼의 해석 결과로서 다양한 진동 모드를 얻을 수 있기 때문에 설계자는 이를 분석하고 원하는 진동 모드를 얻을 수 있도록 설계하여야 한다.



- 유중돈 (兪仲敦)
- 1956년생
- KAIST 기계공학과
- 용접/접합공정, 마이크로 접합공정
- e-mail: cdyoo@kaist.ac.kr