

금속 용착을 위한 초음파 가공용 한파장 스텝 혼의 설계

백시영¹, 장성민^{2*}

¹순천향대학교, ²유한대학 기계과

One-wave Step Horn Design for Ultrasonic Machining for Metal Welding

Si-Young Back¹ and Sung-Min Jang^{2*}

¹Soonchunhyang University

²Department of Mechanical Engineering, Yuhan University

요 약 초음파 금속 용착은 신소재, 도금 구조물 등과 같은 다양한 재료의 용착에 대한 가능성 때문에 광범위한 분야에서 사용되고 있으며 용착 조건도 다양하다. 본 연구에서는, 이중 금속 박판의 초음파 금속 용착을 위해 설계된 단부가형 한파장 혼은 유한요소해석 하였다. 유한요소해석은 초음파 혼의 최적 설계와 초음파 공구혼의 고유 주파수를 예상하기 위해 사용되었다. 그리고 설계된 한파장 스텝 혼은 고유 주파수 분석 시스템을 사용하여 실험적으로 검증하였다.

Abstract The ultrasonic metal welding is highly used in extensive field due to the possibility for welding of various materials such as new materials, plated structures and etc, and its welding conditions has been diversify. In this paper, one-wavelength tool horn of step type designed for ultrasonic metal welding of dissimilar metal sheets has performed by FEM analysis. FEM analysis is applied to predict the natural frequency of ultrasonic tool horn and use of in the optimal design of ultrasonic horn shape. And the optimal design of one-wavelength step horn is confirmed experimentally using natural frequency analysis system.

Key Words : Ultrasonic Metal Welding, FEM analysis Ultrasonic tool horn, Optimal design, One-wavelength step horn, Natural frequency analysis system,

1. 서론

초음파 에너지는 의학, 공업계측, 부품소재 가공 등 다양한 분야에서 초음파 진단, 초음파 탐상, 초음파 가공 및 초음파 용착과 같은 기술로 광범위하게 응용되고 있다 [1]. 특히 미세 피치 저온 접합 기술 중 하나인 초음파 금속 용착(Ultrasonic Metal Welding)은 신소재나 이중 금속 간의 접합, 전해 콘덴서(Electrolytic Condenser)의 극판 접합, 솔더링(Soldering)을 대체하는 전자제품 및 반도체 생산 등에 실용화되면서 관심의 대상으로 부각되고 있으며 낮은 전기저항과 우수한 기계적 결합력뿐만 아니라 열 변형이 작아 열 손상을 최소화할 수 있는 특징이 있어 최근에는 반도체 칩(Chip)의 패키징(Packaging) 기술, 자

동차나 우주항공 산업의 경금속 바디(Light Metals Body) 접합, 선박건조 등 다양한 분야에서 활용도가 크게 높아지고 있는 추세이다[2,3].

초음파 금속 용착은 기반 산업에 파급효과가 큰 원천 기술 산업으로 초음파 기술의 개발과 더불어 진동공구(Vibration Tool)의 설계에 관한 연구[4~6], 용착성 평가(Weldability Estimation)에 관한 연구[7~9] 등 초음파 관련 연구가 진행되고 있으나 매우 미흡한 실정이며 관련 산업발전을 위해서는 질적, 양적인 측면에서 보다 적극적인 연구를 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 이중 금속 박판의 고품질 용착을 목적으로 유한요소법(Finite Elements Method)을 이용하여 초음파 가공에 사용할 용착용 공구혼의 설계 및 그 진동특

*교신저자 : 장성민(twkjms@yuhan.ac.kr)

접수일 10년 10월 18일

수정일 10년 11월 03일

게재확정일 10년 12월 17일

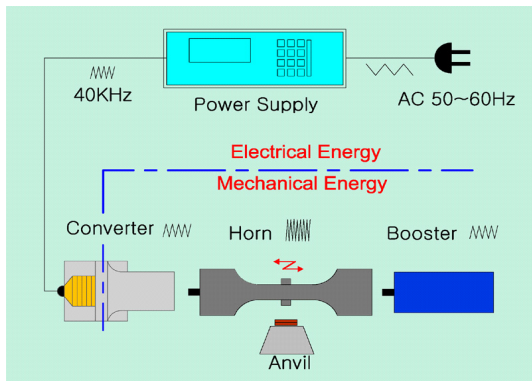
성을 분석하여 최적화 하였다. 연구 결과는 실제 초음파 가공에 사용하기 위한 공구혼의 제조에 사용할 것을 목적으로 한다.

2. 금속용착

2.1 용착의 원리와 구성

초음파 금속 용착은 국부적으로 초음파 진동에너지와 가압력을 동시에 가하여 단 시간 내에 용착되는 고상확산접합(Solid-state Diffusion Bonding)으로 용착 계면의 산화막과 불순물이 분산되면서 두 금속의 순수 원자층이 드러나 원자간 상호인력에 의한 금속 확산결합으로 보고되고 있다[10].

일반적으로 초음파 금속 용착기의 주요 장치는 전압을 50-60Hz의 고주파수(High Frequency)로 변환시켜 주는 발전기(Power Supply), 공급되는 전기 에너지를 기계적 진동에너지로 변환시키는 진동자(Converter), 진폭을 증감시키는 부스터(Booster)와 혼(Horn), 앤빌(Anvil)에 이르기까지 연속적으로 구성된다. 혼은 용착 대상물에 가압력을 인가한 상태에서 기계적 횡 진동(Lateral Vibration)을 전달함으로써 용착시키는 진동 공구이며, 앤빌은 용착 대상물을 고정시키는 동시에 혼에서 가해지는 가압력에 대하여 반력을 가하는 역할을 한다.



[그림 1] Mechanism of ultrasonic metal welding

한파장 혼을 사용하는 초음파 금속 용착기는 진동자, 부스터, 혼의 순서와 같은 연속적인 구성이 아닌 그림 1에 나타난 것과 같이 진동자 다음으로 혼이 바로 연결되고 밸런스(Balance)를 맞추기 위해 진동자 반대편으로 부스터가 연결된다.

2.2 용착의 변수

초음파 가공에 의한 금속 용착 후 그 품질을 좌우하는 중요 변수로써 중요한 것은 용착시간(Welding time)과 압력(Pressure), 진폭(Amplitude)으로 용착 대상의 종류나 크기에 맞추어 다양하게 설정된다. 이 요소들이 최적으로 이루어져야 우수한 용착강도를 얻을 수 있으며 특히 진폭은 혼의 재질과 형상에 따라 크게 좌우되므로 혼의 설계가 매우 중요하다[11].

3. 한파장 스텝 혼

혼은 원하는 진동모드로 공진하면서 효율적인 초음파 에너지 전달을 위해 정밀한 설계가 요구된다. 혼의 재질은 강도와 경도의 중요성뿐만 아니라 재질 내 파동의 음속 특성에 따라 파장(Wavelength)의 길이가 결정된다. 이는 혼의 초음파 진동을 유발하여 공진을 발생시키는 요소로 혼의 길이를 결정하는데 중요한 영향을 미친다. 또한 혼의 형상은 진동자의 작은 진폭으로부터 원하는 진폭 확대율을 얻을 수 있도록 진동에너지를 작은 면적으로 집중시켜야 한다.

3.1 형상 설계와 혼의 재질

초음파 가공에서 공구로 사용이 되는 혼의 형상은 그 형태에 따라 원추형(Conical), 지수형(Exponential), 단부가형(Step) 등이 사용되고 있다. 입력부와 출력부의 면적비가 일정할 때 진폭 확대율은 단부가형 혼이 가장 크고 원추형 혼이 가장 작다. 그러나 일반적으로 많이 사용되는 단부가형의 경우 진폭비가 증가할수록 혼의 응력분포가 커지는 단점이 있으므로 결과적으로 혼의 수명이 감소되어 효율적인 초음파 가공과 경제적, 안전성 측면에서 단점이 있다. 그러나 선단에서 매우 큰 진폭이 얻어지므로 스텝부에 알맞은 곡률을 두거나 스텝부를 익스포넨셜 곡선으로 두어 단점을 보완한다. 또한 공구의 단면이 크지 않으며 입, 출력단의 진폭비를 증폭할 필요가 없을 경우 원추형 또는 지수형 혼을 사용하며, 미세 구멍을 가공할 경우에는 원추형 혼을, 가공 면적이 클 때에는 단부가형 혼을 일반적으로 사용한다[12]. 본 연구에서는 파동방정식과 유한요소방법을 사용하여 초음파 가공을 통한 이종 금속 용착을 위해서 초음파 가공 장비의 핵심부인 초음파 진동 공구혼을 안전성을 고려하여 스텝부를 개선한 단부가형(Step type) 혼으로 설계하였다. 다축드릴머신과 같은 공작기계의 구조해석[13], 엔드밀 공구의 변형에 대한 유한요소해석[14] 등과 같이 본 연구에서도 유한요소

해석 방법을 적용하여 초음파 공구혼의 진동특성을 분석하여 상용화하고자 하였다.

단부가형 혼의 진동에너지 입력부의 면적을 S_1 , 출력부의 면적을 S_2 , 입력부로부터 거리 x 위치에서 단면적을 S_x 라 하면 혼의 형상은 일반적으로 식(1)과 같이 된다.

$$S_x = S_1 \cdot e^{-\gamma x}, \quad \gamma = \frac{1}{x} \ln \frac{S_1}{S_x} \quad (1)$$

또한 혼의 탄성계수(Young's modulus)를 E 라 하면 운동방정식은 식(2)와 같다.

$$\rho S_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = E \frac{\partial}{\partial x} \left(S_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \quad (2)$$

여기서 ρ 는 혼 재료의 밀도이며 u_x 와 t 는 각각 변위와 시간이다. 이때 단면적이 일정한 균일 봉의 진동은 식(3)과 같은 1차원 파동 방정식으로 나타낼 수 있다. 단, c 는 봉속을 전파하는 음속도이다.

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}, \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

이를 식(2)에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$S_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \quad (4)$$

여기서 혼의 경계조건으로 식(5)를 이용하면 식(6)과 같은 공진 조건을 얻을 수 있다. 단, $\tan \varphi_n$ 은 식(7)과 같으며 n 은 제 n 차의 공진을 나타낸다[12, 15].

$$x=0 \rightarrow \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0, \quad x=l \rightarrow \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

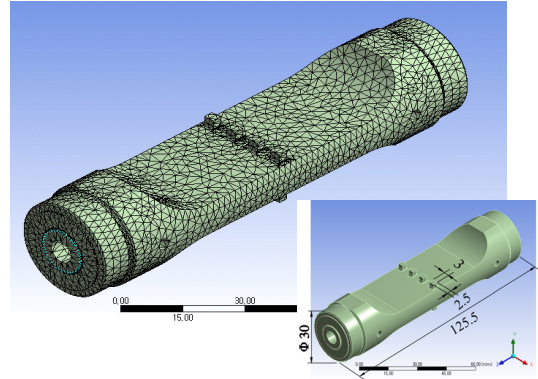
$$l_n = n \frac{c}{2f_n} \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_n} \quad n=1,2,.. \quad (6)$$

$$\tan \varphi_n = \frac{1}{2m} \log_e \left(\frac{S_2}{S_1} \right) = \frac{\gamma_n}{2m} \quad (7)$$

혼의 길이를 l 이라 할 때 양단에 자유로운 혼의 고유진동수는 식(8)과 같다.

$$w_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

한파장의 스텝 혼에서는 혼의 중심부에서 최대 변위를 얻어야 하므로 혼의 길이를 $n=1$ 인 종진동 진행파의 파장(λ)을 l 로 결정한다. λ 는 종진동 진행파의 길이로 혼의 길이가 되며 $\lambda = c/f_n$ 이다. 혼 설계 시 공구혼의 길이를 결정함에 따라 초음파 공구혼의 주파수가 결정되나 본 연구의 경우 주파수가 40kHz로 결정되어 있기 때문에 진동에너지 입력부에서 거리가 1/2파장이 되는 팁(Tip)에서 최대 진폭이 발생될 수 있도록 그림 2와 같은 좌우 대칭 형상을 갖는 전장 125.5mm, 40kHz용 한파장 혼을 설계하였다. 혼의 재질은 표 1에서와 같은 물성치를 갖는 HAP 공구강(Tool steel)으로 결정하였다.



[그림 2] FEM model of one-wave step horn

[표 1] Mechanical properties of horn material

Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/mm ³)	Hardness (HRC)
242.5	0.30	8.21×10 ⁻⁶	68

3.2 고유진동수와 진폭비 해석

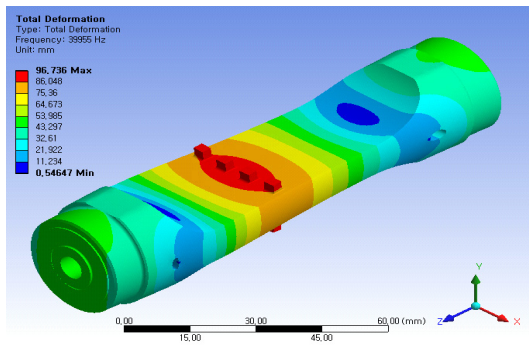
설계한 혼의 진동모드와 고유주파수 파악을 위해 ANSYS를 이용한 Modal해석을 하였다. 가진 주파수 40kHz를 기준으로 ±5,000Hz 범위에서 해석한 결과 그림 3과 같이 2가지 진동 모드의 고유 주파수가 나타났다. 표 2는 진동 모드에 따른 고유 주파수 값이다.

[표 2] Natural frequency of horn in 35~45 kHz range

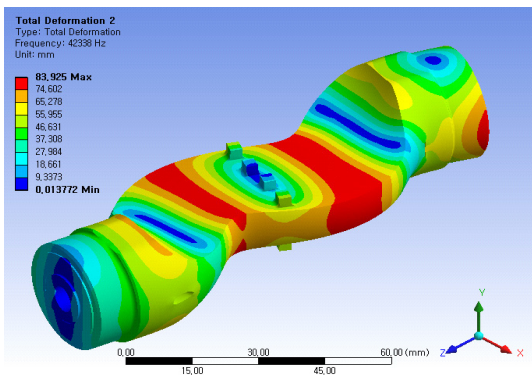
Mode	Natural frequency
1 st mode	39,955 Hz
2 nd mode	42,338 Hz

초음파 금속 용착용 혼은 용착 대상물에 평행하게 진동을 인가하여 용착해야 한다. 그러므로 축(Axial)방향으로 진동을 해야 하며 요구되는 주파수 대역에서 하나의 고유 주파수를 가져야 한다. 첫 번째 모드에서 고유주파수 39,955Hz로 축 방향 진동하고 팁(Tip)에서 최대 진폭을 나타내고 있으며 두 번째 모드의 고유 주파수와 약 2,000Hz정도 차이가 나므로 40kHz 금속 용착용 혼의 조건에 부합되는 적절한 설계라고 판단된다.

ANSYS의 Harmonic response 해석에서 Solution intervals값을 고유 주파수 39,955Hz를 기준으로 ± 25 Hz로 설정하고 진동에너지 입력부에 임의의 가진력 1N을 주어 진폭비 해석을 수행하였다. 그림 4와 그림 5는 그 결과를 나타낸 것으로 고유진동수 39,955Hz에서 최대 진폭이 $12.13\mu\text{m}$ 인 것으로 나타났다. 또한 표 3에서와 같이 입력부와 출력부에서의 진폭 측정값에 의해 약 1:2의 진폭비를 갖는 것을 알 수 있다.

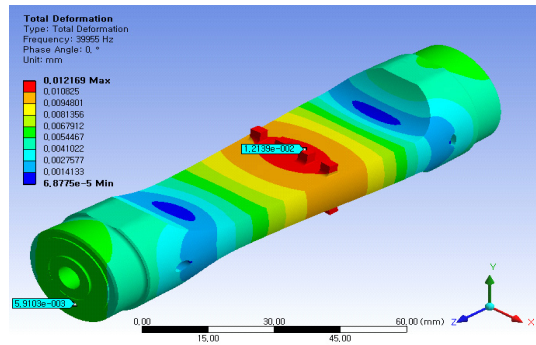


(a) 1st mode

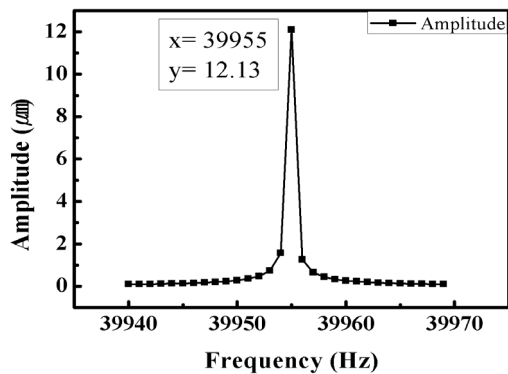


(b) 2nd mode

[그림 3] Modal analysis of one-wave step horn



[그림 4] Harmonic response analysis of horn



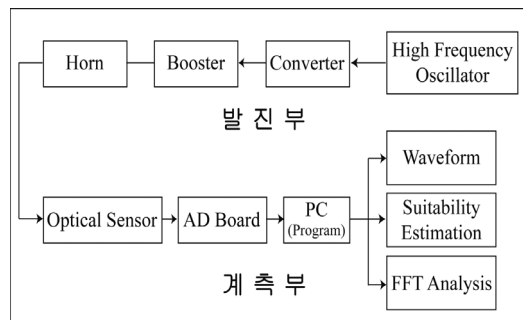
[그림 5] Amplitude graph according to ANSYS analysis

[표 3] Amplitude ratio of harmonic response analysis

Analysis data(μm)	Amplitude ratio
5.91 : 12.13	1 : 2

3.3 설계의 검증

3.3.1 고유주파수 분석 장치



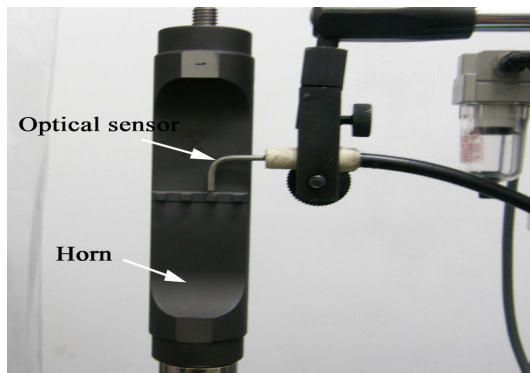
[그림 6] Block diagram of natural frequency analysis system

고유주파수 분석장치(Natural frequency Analysis system)는 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통하여 혼의 고유 주파수와 파형(Waveform), 진폭과 같은 진동 특성을 분석하는 장치로 그림 6과 같이 발진부와 계측부로 구성된다. 발진부에는 고주파 발진기(High frequency oscillator)와 진동자, 부스터, 혼의 순으로 구성되며, 계측부에는 광 센서(Optical sensor)가 혼의 진동을 감지하여 AD Board를 통하여 진동데이터가 PC로 전달되면서 FFT 분석을 수행한다.

표 4는 고유 주파수 분석 장치에 사용되는 광 센서의 주요 사양으로 분해능(Resolution)이 0.1 μ m로 혼의 진동 특성을 정밀하게 분석할 수 있으며 혼과 광 센서를 세팅할 때는 그림 7과 같이 진동 출력부의 진동 방향에 대하여 최대한 직각도를 유지하여 설치되도록 해야 정확한 측정이 가능하다.

【표 4】 Specification of optical sensor

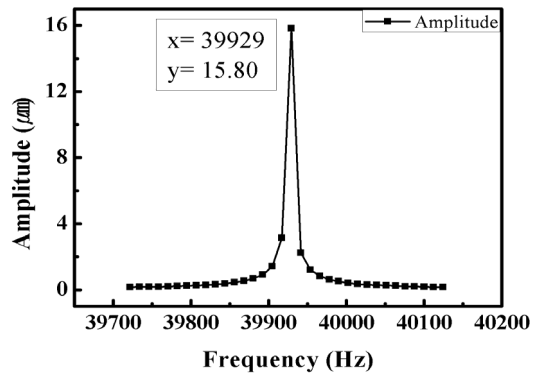
Model	D63-H1T4
Total range	3 mm
Linear range	0.76 mm
Nominal standoff	0.66 mm
Nominal sensitivity	2.8 mV/ μ m
Resolution DC-100kHz	0.1 μ m
inimum measurement spot	2.1 mm



【그림 7】 Photograph of horn & optical sensor set up

3.3.2 FFT 분석 및 결과

40kHz용 혼의 적합한 공진 주파수 설정을 위해 실시한 실험에 의하면 39,500~40,500Hz의 진동 주파수 대역에서 진동자의 무리한 작동 방지와 용착 불량률이 적고 수명이 길어 최적 혼의 공진주파수 범위로 설정하였다.



【그림 8】 Amplitude graph according to FFT analysis

그림 8은 고유 주파수 분석 장치를 이용한 FFT분석 그래프로 주파수에 따른 진폭을 나타내고 있다. 해석 근거에 따라 제작된 혼의 분석결과, 고유 진동수 39,929Hz에서 15.80 μ m의 최대 진폭을 확인하였다. 이와 같은 결과는 40kHz용 진동자의 진폭이 8~9 μ m임을 고려하였을 때 ANSYS의 Harmonic response해석에서 구한 약 1:2의 진폭비와 일치하므로 최적의 혼이 설계되었음을 나타내는 결과라 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 초음파 가공에 의한 이중 금속 박판의 용착에 사용되는 한파장 스텝형 공구혼의 최적 설계를 목적으로 1차원 파동 방정식을 이용하여 형상 치수를 결정하였으며, 40kHz용으로 설계된 한파장 혼을 유한요소 해석을 이용하여 진동 특성을 파악하였으며 실제 결과와 비교하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 공구혼의 설계 최적화를 위해 1차원 파동방정식으로부터 전장 125.5mm의 스텝 형태의 초음파 금속 용착용 한파장 혼을 설계하였다.
- (2) 유한요소방법에 의한 해석 결과 고유진동수 39,955Hz에서 축 방향으로 진동하며 최대 진폭이 12.13 μ m로, 입력부와 출력부가 약 1:2의 진폭비를 갖는 것을 확인하였다.
- (3) 고유 주파수 분석 장치를 이용한 실제 FFT분석 그래프로 주파수에 따른 진폭을 측정한 결과 고유진동수 39,929Hz에서 15.80 μ m의 최대 진폭을 확인하였다. 이와 같은 결과는 40kHz용 진동자의 진폭이 8~9 μ m임을 고려하였을 때 ANSYS의 Harmonic response해석에서 구한 약 1:2의 진폭비와 일치하고 유한요소 해석 결과와 고유

진동수 오차가 0.1% 이내로 나타나 설계 오차를 최소화하여 최적의 혼이 설계되었음을 검증하였다.

참고문헌

- [1] Jeong, H. S., "Fundamentals of Ultrasonic Welding," Journal of Korean Welding and Joining Society, Vol. 15, No. 6, pp. 24, 1997.
- [2] Koo, J. M., Kim, J. W., Yoon, J. W., Noh, B. I., Lee, C. Y., Moon, J. H., Yoo, C. D. and Jung, S. B., "Ultrasonic Bonding Technology for Flip Chip Packaging," Journal of the Korean Welding and Joining Society, Vol. 26, No. 1, pp. 24-30, 2008.
- [3] Lee, C. K., Hwang, B. J. and Heu, I. H., "Bonding of Electric Wire by Ultrasonic Welding," Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 9, No. 4, pp. 41-42, 2000.
- [4] Yoo, C. D., "Design of Ultrasonic Welding Horn," Journal of KWJS, Vol. 26, No. 1, pp. 9- 11, 2008.
- [5] Lee, B. G., Kim, K. L. and Kim, K. E., "Design of Ultrasonic Vibration Tool Horn for Micromachining using FEM," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 17, No. 6, pp. 63-70, 2008.
- [6] Seo, J. S. and Beck, S. Y., "A Optimization for Horn Design using Analysis system of Ultrasonic Vibration Frequency," Journal of Korea Intellectual Patent Society, Vol. 14, No. 4, pp. 17-23, 2009.
- [7] Lee, J. H., Kim, S. H., Cheon, C. G., Kim, S. U. and Kim, J. D., "Effects of Welding Parameters on Ultrasonic Bonding Strength of Solar Collector,"
- [7] Lee, J. H., Kim, S. H., Cheon, C. G., Kim, S. U. and Kim, J. D., "Effects of Welding Parameters on Ultrasonic Bonding Strength of Solar Collector," Proceedings of the KWS Conference, pp. 233-235, May 2006.
- [8] Kim, H. W., Hwang, K. M., Yoo, B. S. and Jo, S. M., "Welding Quality Evaluation by Waveform analysis on Copper Ultrasonic Spot Welding," Proceedings of the KWS Conference, pp. 297-299, November 2007.
- [9] Seo, J. S. and Beck, S. Y., "A Study for Design of Ultrasonic Welding One-wave Horn and Metal Welding," Journal of Korea Intellectual Patent Society, Vol. 14, No. 4, pp. 17-23, 2009.
- [10] Park, Y. H. and Kang, J. Y., "Sinter Diffusion Bonding Technology for Assembly and Hybrid of Materials," Journal of the Korean Welding and Joining Society, Vol. 24, No. 5, pp. 7-8, 2006.
- [11] Park, H. S., Kim, W. Y. and Kang, C. Y., "Welding and Bonding of Dissimilar Metal Steel/Nonferros Metal," Journal of the Korean Welding and Joining Society, Vol. 14, No. 6, pp. 1-7, 1996.
- [12] Amin, S. G., Ahmed, M. H. M. and Youssef, H. A., "Computer-aided design of Acoustic Horns for Ultrasonic Machining using Finite-element analysis," Journal of Materials Processing Technology, 55, pp. 254-260, 1995.
- [13] Jong-Sun Lee, "Design and Structural Analysis of Multi-Axis Drill M/C for PCB", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 6, No. 5, pp.412-417, October 2005.
- [14] Sung Chan Jung and Kug Weon Kim, "A Study on Finite Element Analysis of Tool Deformation in End Milling", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 6, No. 1, pp.83-86, February 2005.
- [15] Lee, S. W., "A Study on the Conditioning for Improvement of Grinding Accuracy," Department of Mechanical and Precision Engineering, Ph.D, Pusan National University, pp. 30-24, 2001.

백 시 영(Si-Young Back)

[정회원]



- 1990년 2월 : 원광대학교 물리학과 (이학석사)
- 2008년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2005년 3월 : (주)라라전자 생산부장 및 책임연구원

• 2010년 9월 ~ 현재 : 순천대학교 산학협력교수

<관심분야>

초정밀가공, 세라믹가공

장 성 민(Sung-Min Jang)

[정회원]



- 2000년 2월 : 숭실대학교 기계공학
학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 인하대학교 기계공
학과 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 2010년 2월 : (주)
정일기계 연구소장
- 2010년 9월 ~ 현재 : 유한대학
기계과 산학협력조교수

<관심분야>

정밀가공, 구조설계, ASME, AWS, 실험계획법