

진공 배기 및 초음파 접합 복합기 진동자 냉각에 관한 연구

박상준¹, 이영림^{1*}

¹공주대학교 기계자동차 공학부

A Study on Cooling of Piezoelectric Element of Multifunction Equipment for Vacuum Exhaust and Ultrasonic Joining

Sang Jun Park¹ and Young Lim Lee^{1*}

¹Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

요 약 현재 진공유리 배기공정을 위해 진공챔버나 진공튜브를 이용하는데 챔버 혹은 튜브 내부 전체를 진공으로 만들기 위한 시간과 경비가 과도하게 요구된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 상압에서 진공배기 및 초음파 접합이 동시에 가능한 복합기를 개발하고자 하였는데, 이 경우 진동자인 피에조 온도가 과도하게 상승하여 복합기의 냉각을 최적화할 필요성이 대두되었다. 따라서, 본 연구에서는 수치해석 및 실험을 통해 자연대류 및 강제대류 냉각방식의 효과를 규명하였고 이를 통해 진공 배기 및 초음파 접합 복합기의 냉각 성능을 최적화하였다.

Abstract Vacuum chamber or vacuum tube for the exhaust process of vacuum glazing is presently used, where excessive time and expenses are required to make the whole vacuum chamber or tube vacuum. To solve this problem, multifunction equipment for vacuum exhaust and ultrasonic joining at atmospheric pressure has been developed, in which a piezoelectric vibrator experiences excessive temperature rise resulting in optimizing the cooling of the equipment. Therefore, in this study, cooling effects of natural convection and forced convection methods were identified by numerical analysis and experiments, and cooling performance of the multifunction equipment was optimized.

Key Words : Ultrasonic joining, Vacuum exhaust, Cooling, CFD

1. 서론

초음파는 음파의 파동 성질 또는 에너지를 이용하여 측정, 용접 및 소성 가공 등 다양한 분야에서 널리 응용되고 있다. 초음파 접합의 특징은 단시간에 접합이 가능하고 접합 결과는 접합면 상태에 큰 영향을 끼치지 않는다는 점이다. 또한, 복잡한 형상의 성형품에서도 접합결과가 우수하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 초음파 접합을 사용하는 예로는 금속탐상기, 가슴기, 자동차의 빗방울 제거 거울, 의료용 초음파 진단기, 어군 탐지기 등 있다. 본 연구에서는 이러한 초음파 접합을 진공유리의 배기공정 완료후 수행하는 봉지공정에 활용하고자 한다.

초음파 접합기의 경우 초음파를 발생하는 진동자, 진동을 감소 및 증가시키는 부스터(booster), 진동을 접합면에 전달하는 혼(horn)으로 나누어져 있다. 이러한 초음파 접합기는 히터를 통해 발생된 열이 혼을 통하여 접합면에 전달이 되고 충분히 열을 가하면 초음파 진동을 통해서도 다른 물성의 이중금속을 접합시키는 방식이다. 여기서, 초음파 진동자인 압전소자는 150℃이상에서 분자구조의 변형을 일으키게 된다. 만약 이러한 변형이 발생하면 진동 주파수를 증폭시키지 못하고, 접합부분에서 변형이나 균열이 생길수가 있어 내구성 감소를 초래하게 된다. 따라서, 진동자 보호 및 수명증대를 위해 진동자로 전달되는 열을 차단하거나 진동자의 냉각을 시켜줄 필요가

본 연구는 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업을 통해 연구된 결과임.

*Corresponding Author : Young Lim Lee

Tel: +82-18-290-9719 email: ylee@kongju.ac.kr

접수일 12년 01월 30일

수정일 12년 02월 20일

게재확정일 12년 04월 12일

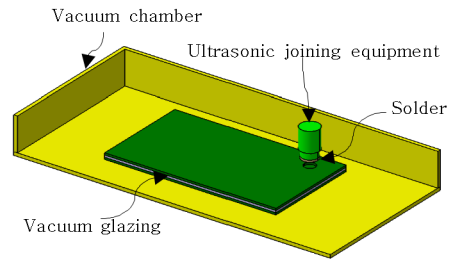
있다.

한편, 현재까지 진공유리의 배기공정은 그림1(a)와 같이 진공챔버나 튜브 전체를 진공으로 만드는 방식이다. 하지만, 이 경우 진공 챔버 전체를 진공으로 만들어야 하기 때문에 시간이 오래 걸리고 진공유리 내부 압력을 정확히 측정하기 어렵다. 그림 1(b)와 (c)는 상압하에서 진공 배기와 초음파 접합 겸용 복합기의 개략도를 보

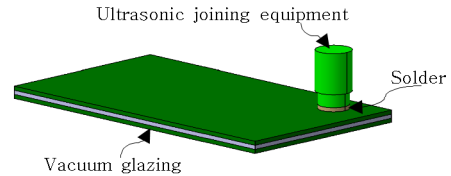
여준다. 이 복합기를 이용하면 진공 챔버없이 상압하에서 그림 1(c)에서와 같이 화살표 방향으로 공기를 배출시킨 후 목표 진공압력에 도달하게되면 배기를 멈추고 히터의 온도를 올려 연납을 녹이고 전기 신호를 인가하여 초음파 접합을 실시할 수 있다.

최근까지 초음파 접합기를 이용한 진공유리 봉지에 관한 연구 거의 이루어지지 않았고 주로 초음파 접합기 성능 향상에 초점이 맞추어져 왔다. 먼저, Zhou[1]는 혼의 굽힘진동 현상을 행렬을 이용하여 분석하였고, Kang[2] 등은 초음파를 이용한 절삭용 공구 혼 설계를 위하여 고유 진동수를 해석함으로써 혼의 길이 및 외경 치수를 결정하여 혼을 설계하였다. Sherrit[3] 등은 Mason's model을 이용하여 스텝 혼을 볼트와 Piezoelectric stack, Backing layer, Horn의 세 부분으로 모델링 하고 임피던스와 가속도를 계산하여 실험을 통하여 해석결과를 증명하였다. Lesniewski[4]는 Webster horn theory에 부합되는 등가 회로법을 제안하였으며 웹스터 이론은 단면 혼 차원의 파장과 비교하였을 때 작아야하며 평면파는 혼을 따라 전달된다는 가정 하에 코니컬 혼을 설계하고, 그 외에 익스퍼넨셜 혼, 카테노이달 혼의 설계방법을 제안하였다. Park[5] 등은 설계 모델의 형상에 따른 공진주파수를 유한요소 프로그램을 이용하여 예측하였고, Kim[6] 등은 단순 실린더 혼과 스플 혼을 수치해석을 통해 설계하여 스플 혼의 그루브 형상이 진폭 균일도에 미치는 영향을 분석하였다. Kim[7] 등은 스트립 형상인 Au 범프의 종방향 초음파 접합을 이용하여 범프 형상이 접합에 미치는 영향을 분석하여, 접합 면적과 마찰력에 따른 접합강도를 제안하였다. Seo[8] 등은 금속 Cu 박판의 용착 성능을 유한요소해석을 이용하여 용착성능을 평가 하였으며, 초음파 금속 용착 조건에 따른 최적의 Cu 박판의 용착조건을 찾았다.

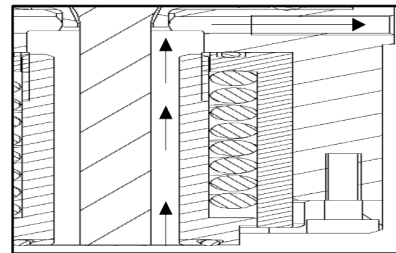
본 논문에서는 진공유리의 최종공정인 배기 및 봉지공정에서 사용되는 초음파 접합 및 진공배기 겸용 복합기의 냉각 성능을 최적화하고자하였다. 이를 위해, 자연대류와 강제대류 방식의 효과를 수치해석을 통해 규명하였고, 실험을 통해 복합기 냉각성능을 검증하였다.



(a) 기존 진공유리 제작 공법
(a) Previous production process for vacuum glazing



(b) 진공 배기 및 초음파 접합 겸용 복합기
(b) Multifunction equipment for vacuum exhaust and ultrasonic joining



(c) 진공 배기 및 초음파 접합 겸용 복합기 단면도
(c) Section of multifunction equipment for vacuum exhaust and ultrasonic joining

[그림 1] 진공유리 제작 공법
[Fig. 1] Vacuum glazing production process

2. 수치해석 및 실험방법

2.1 수치해석

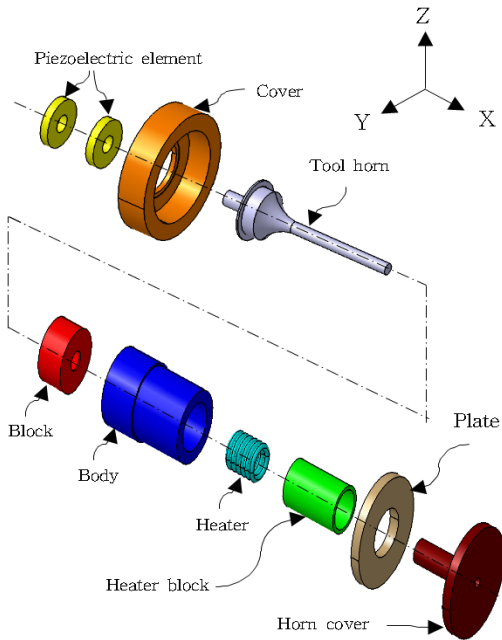
그림 2는 수치해석에 사용된 접합 및 배기 복합기의 구성품 명칭을 보여준다. 여기서, 혼은 티타늄, 진동자는 세라믹, 그 외의 물질은 STS 404로 가정하였다.

먼저, 강제대류 냉각방식을 고려하였는데 그림 3과 같이 균일한 풍속을 진동자에 직접 가하였다. 공기 분사의 면적은 12.56 mm², 입구 공기온도는 25 °C이다. 다음으로, 자연대류 냉각방식을 고려하였는데 그림 4와 같은 방열핀을 복합기 커버 주위에 부착시켰다.

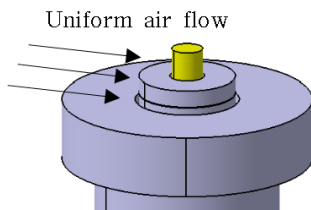
코일히터 온도는 300℃로 고정시켰고, 자연대류의 경우 $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 열전달 계수를 가정하였으며 복합기 내부의 작은 틈새에서는 복사 열전달도 고려하였다. 해석에 사용된 격자수는 약 8만개이고 3차원 형상 설계에는 Catia[9], 격자 생성 및 3차원 전도 해석에는 상용 프로그램인 Ansys[10]를 사용하였다.

2.2 실험방법

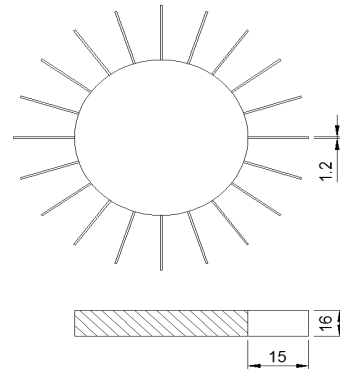
그림 5는 초음파 진동자 방열 실험 장치의 개략도를 보여준다. 이 때, 히터의 온도를 300℃로 유지하기 위하여 가변 전원공급기를 이용하였다. 그림 6은 강제대류를 이용한 실험 장치를 보여준다.



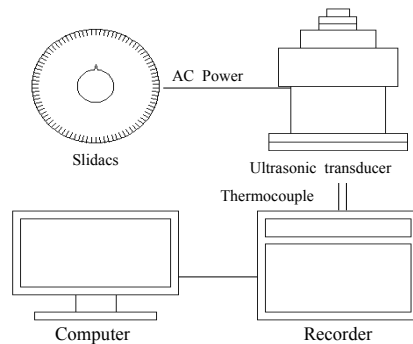
[그림 2] 초음파 접합 및 진공 배기 복합기 구성품
[Fig. 2] Components of multifunction equipment for ultrasonic joining and vacuum exhaust



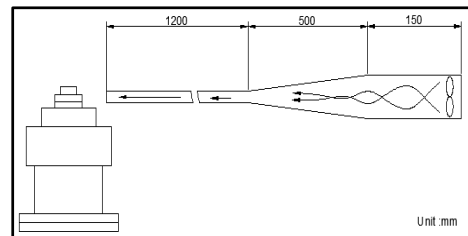
[그림 3] 강제대류 모델
[Fig. 3] Forced convection model



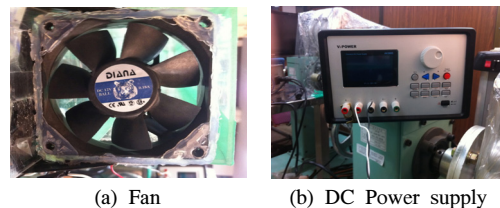
[그림 4] 자연대류 모델
[Fig. 4] Natural convection model



[그림 5] 초음파 진동자 방열 실험 개략도
[Fig. 5] Schematic of ultrasonic PZT cooling experiment



[그림 6] 강제대류 실험 개략도
[Fig. 6] Schematic of forced convection



[그림 7] 팬과 DC 파워 서플라이
[Fig. 7] Fan and DC power supply

실험의 정확성을 기하기 위해 팬을 통해 나온 불균일한 공기 유동보다는 간이 풍동을 거쳐 균일화된 공기 유동을 진동자에 붙여 주었다. 공기 유속을 1.5~4.5 m/s로 변화시키기 위해 그림 7과 같은 7익짜리 팬과 RPM 조절을 위한 직류 전원공급기를 사용하였다. 공기 속도 측정은 Schitknecht사의 MiniAir6 Micro 센서를 사용하였다.

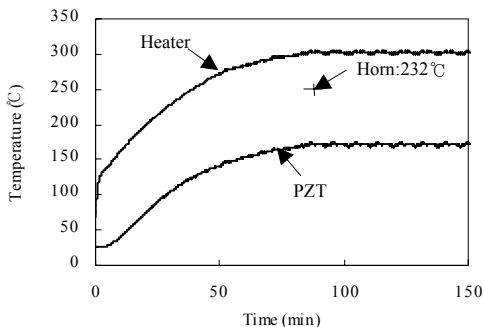
3. 결과 및 고찰

3.1 초기 모델 복합기 온도 분포

방열 구조를 고려하지 않은 초기 접합 및 배기 복합기에 전원을 공급하였을 때 시간에 따른 히터와 진동자의 온도 변화를 그림 8에 나타냈다. 약 90분 후에 히터와 진동자의 온도는 정상상태에 도달하는데 이때 연납과 접촉되는 공구 혼 하단부의 온도는 232℃로써 연납의 녹는점이 약 180℃임을 고려하면 충분히 연납을 녹일 수 있다. 하지만, 진동자 온도는 152℃로 측정되어 봉지 작업을 지속적으로 수행 시 압전소자가 분자 변형을 일으켜 그 기능을 상실할 우려가 있다.

따라서, 진동자 온도를 100℃ 정도로 낮추어야 하는데 이를 위해 히터용량을 변경하면 공구혼 하단부 온도가 180℃ 이하가 되어 복합기가 정상 작동이 불가능해진다. 이는 진동자만의 온도를 효과적으로 낮출 수 있는 방열시스템이 필요함을 의미한다.

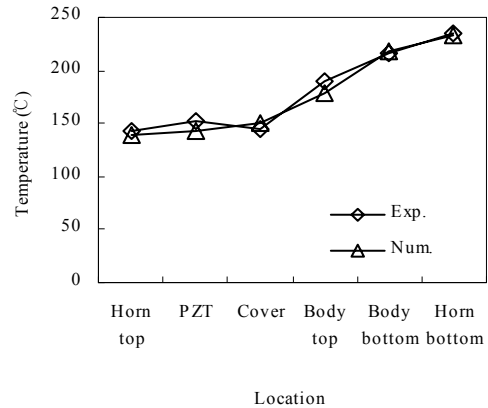
방열시스템 최적화에 이용할 수치해석 모델의 정확도를 검증하기 위해 수치해석 결과와 실험 결과를 그림 9에 각 위치별로 비교하였다. 대부분의 위치에서 3%이하의 오차를 보여주어 수치해석 모델의 타당성이 입증되었고 진동자 위치에서만 약 6.5%의 큰 오차를 보여주었다. 이는 열전달계수, 접촉저항(contact resistance), 복사 모델 등에 기인한다.



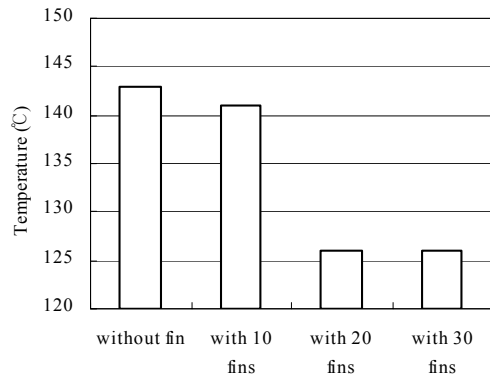
[그림 8] 시간에 따른 압전소자 및 히터온도 변화
[Fig. 8] Variation of PZT and heater temperature with time

3.2 자연대류 방식 진동자 냉각

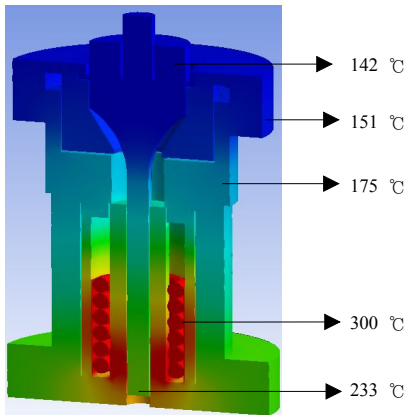
초기 모델 복합기의 기초 온도 실험 결과 진동자의 온도가 150℃ 이상이 되어 방열핀과 같은 추가 방열 장치의 필요성이 대두되었다. 하지만, 복합기 커버에 방열핀을 부착해야하므로 방열 핀의 크기는 제한되어 있어서 구조가 허락하는 최대 방열핀 크기에서 방열핀 개수만을 변화시키었다. 그림 10에서 방열핀을 10, 20, 30개로 변화시켰을 때 진동자 온도 변화를 수치해석적으로 알아보았다. 먼저, 방열핀 개수가 10개일 때 진동자 온도 감소는 약 2℃이고, 20개인 경우 약 17℃정도이다. 계속해서 30개로 증가시킨다고 해도 더 이상의 온도 감소 효과는 관측되지 않았다. 따라서, 방열핀 개수가 20개인 모델이 최적임을 알 수 있다.



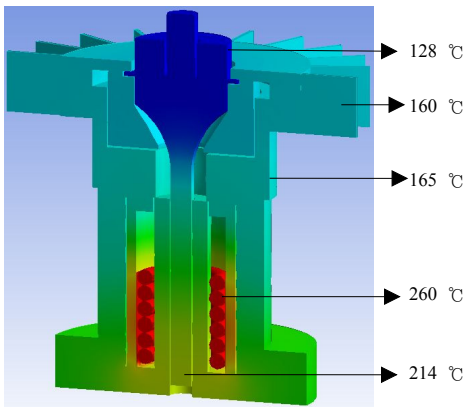
[그림 9] 수치해석과 실험의 온도 비교
[Fig. 9] Variation of temperature with location



[그림 10] 방열핀 개수에 따른 진동자 온도
[Fig. 10] Variation of PZT temperature with number of fin



(a) Numerical model of ultrasonic joining without heat sink



(b) Numerical model of ultrasonic joining with heat sink

[그림 11] 방열핀 유무에 따른 모델 온도분포
[Fig. 11] Variation of ultrasonic joining temperature with presence heat sink

그림 11은 방열핀 유무에 따른 복합기 내부 단면에서의 수치해석 온도분포를 보여준다. 히터의 열이 혼으로의 전달은 작은 틈새로 인하여 전도보다는 주로 복사 열전달에 기인함을 알 수 있다. 방열핀을 장착하게 되면 히터의 열이 방열핀으로 전달되어 혼 커버의 온도가 낮아져 혼으로의 복사 열전달량이 적어지게 된다. 이는 결국 진동자의 온도를 낮추는데 기여하나 연납을 녹여야 하는 혼의 하단부 온도도 동시에 감소시키는 것을 알 수 있다.

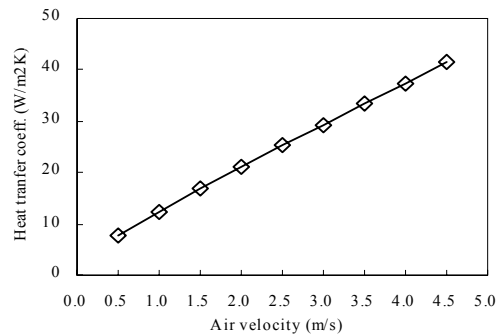
다음으로, 20개의 방열핀이 부착된 커버를 제작하여 실험으로 진동자 온도 감소 효과를 규명하였다. 실험에서는 수치해석 결과보다 다소 낮은 약 14°C 정도 진동자 온도가 감소하였다. 이는 여름철 생산 공장 내부 평균온도를 29~32°C로 가정하였을 경우 진동자 온도가 147~150°C에 도달할 수 있음을 의미한다. 따라서, 지속적인 작업을 수행한다면 압전소자의 내구성이 확보되지 않을 가

능성이 높다. 그러므로 더욱 효과적으로 진동자의 온도를 낮추기 위한 방열 구조가 필요하다.

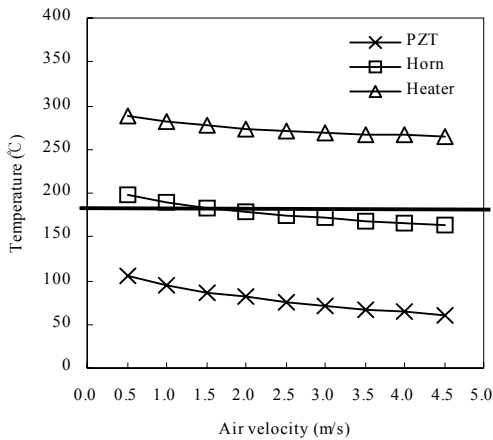
3.3 강제대류 방식 진동자 냉각

방열핀과 자연대류를 이용한 실험결과 외기온도가 높은 여름철에 초음파 복합기를 사용할 경우 진동자의 온도가 약 150°C가 되어 추가 방열 장치의 필요성이 대두되었다. 그림 12와 같이 풍속에 따른 열전달계수를 전산 유체역학을 이용하여 풍속 0.5 m/s 간격으로 알아보았다. 풍속이 증가할수록 열전달계수는 0.5 m/s에서 약 8 W/m²K, 4.5 m/s에서는 약 41 W/m²K로 거의 선형적으로 증가하였다. 예측된 열전달계수를 복합기 표면에 적용하여 전도해석을 수행한 후 진동자, 혼, 히터의 온도를 그림 13에 나타냈다. 여기서 굵은 실선은 180°C로 납을 녹일 수 있는 최소 온도를 나타냈다. 풍속이 증가할수록 진동자의 온도는 감소하였고 공구혼 하단부의 온도 역시 감소하여 2.0 m/s 이상에서는 공구혼의 온도가 180°C이하로 예측되어 연납을 녹이기에 충분하지 않았다.

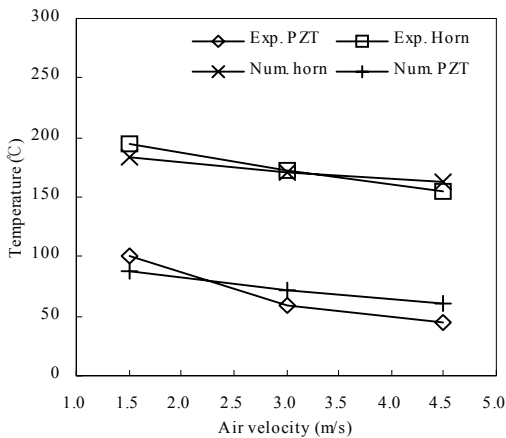
다음으로 강제대류 실험 장치를 제작하여 실험으로 진동자 온도 감소 효과를 검증하였다. 그림 14에 수치해석과 실험의 진동자와 공구혼 하단부의 온도를 나타냈다. 풍속이 증가할수록 수치해석 예측 결과와 같이 진동자 및 공구혼 하단부 온도가 감소하여 정성적으로는 일치하나 정량적으로는 4.5 m/s에서 최대 약 25%의 오차를 보여준다. 이는 평균열전달 계수를 이용한 전도 모델로 인한 것으로 사료되며 향후 복합열전달 해석을 통하면 정확도를 높일 수 있을 것으로 사료된다. 풍속을 3.0 m/s로 증가시키면 공구혼 하단부 온도가 172°C로 측정되어 연납을 녹이기 위한 온도로 충분하지 않았다. 따라서, 공구혼 하단부의 온도가 1.5 m/s에서 연납을 충분히 녹일 수 있고 진동자의 온도 또한 101°C로 낮출 수 있어 가장 효과적인 조건임을 알 수 있다.



[그림 12] 풍속에 따른 열전달계수 온도 변화
[Fig. 12] Variation of Heat transfer coefficient with air velocity



[그림 13] 풍속에 따른 복합기 온도 변화
 [Fig. 13] Variation of multifunction temperature with air velocity



[그림 14] 풍속에 따른 실험과 수치해석의 진동자와 공구 혼 하단부 온도 비교
 [Fig. 14] Variation of tool horn bottom and heater temperature with air velocity

4. 결론

본 논문에서는 진공배기와 초음파 접합이 동시에 가능한 복합기의 진동자 및 공구혼 온도를 최적화하기 위한 방열 연구를 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 히터를 사용하여 복합기 공구혼 하단부의 온도를 유지하면 진동자의 온도가 너무 높게 되어 내구성

이 상실하므로 효과적인 방열시스템이 필요하다.

- (2) 자연대류 냉각 방식을 채택할 경우 방열핀을 사용하지 않았을 때 보다 약 14.3°C 낮출 수 있었으나 외기 온도가 30°C 이상인 하절기에 진동소자의 온도를 충분히 낮출 수 없다.
- (3) 강제대류 냉각 방식은 방열에 매우 효과적이거나 풍속이 과도하게 높으면 과열을 유발한다. 따라서, 풍속 1.5 m/s 전후가 이상적임을 알 수 있다. 향수 개발된 복합기를 이용하면 진공유리의 초음파 접합과 진공배기를 동시에 수행할 수 있으리라 사료된다.

References

- [1] G. Zhou, "The Performance and Design of Ultrasonic Vibration System for Flexural Mode", Vol. 38, pp 979 ~984, 2000.
- [2] J. P. Kang, "A Study on the Design of Ultrasonic Vibration Cutting Tool Horn", Journal of the KSPE Vol. 8, No. 3, pp. 55~63, 1991.
- [3] S. Sherrit, B. P. Dolgin, Y and Bar-Cohen, "Modeling of Horns for Sonic/Ultrasonic Application", Ultrasonic Symposium, Vol. 1, pp. 647~651, 1999.
- [4] P. Lesniewski, "Discrete Component Equivalent Circuit for Webster's Horns", Applied Acoustic, Vol. 44, pp. 117~124, 1995.
- [5] M. H. Park, T. Y. Kim, T. G. Park and M. H. Kim, "Design and FEM Analysis of Langevin Type Ultrasonic Vibrator", KSMTE, pp. 525~528, 2000.
- [6] S. R. Kim, J. H. Lee and C. D. Yoo, "Design of Cylinder Horn for Ultrasonic Welding", Journal of KWJS, Vol. 27, No. 4, pp. 60~66, 2009.
- [7] B. C. Kim, J. H. Lee, C. D. Yoo and D. S. Choi, "Longitudinal Ultrasonic Bonding of Strip-type Au Bumps", Journal of KWJS, Vol. 22, No. 3, pp. 62~68, 2004.
- [8] J. S. Seo and D. S. Park, "Establishment of Conditions for Ultrasonic Welding of Cu sheet", Journal of the KSMTE, Vol. 19, No. 2, pp. 282~287, 2010.
- [9] Catia V5 R17, Dassault Systems, 2006.
- [10] Ansys version 12.1. Ansys Inc.

박 상 준(Sang Jun Park)

[정회원]



- 2012년 2월 : 공주대학교 기계공학전공 (공학학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 박사과정

<관심분야>
열유체공학, 에너지공학

이 영 림(Young Lim Lee)

[정회원]



- 1995년 5월 : U of Texas at Austin 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 2000년 2월 : 삼성자동차삼성전자 책임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>
열유체공학, 에너지공학, 자동차공학