https://doi.org/10.21289/KSIC.2021.24.4.509

금속박판 접합용 고분자화합물시트를 이용한 박형 히트파이프 내압성 및 유효열전도율 평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of Pressure Resistance and Effective Thermal Conductivity of Thin Heat Pipes Using Polymer Compound Sheets for Bonding Metal Thin Plates

유병석[1], 김정훈[2], 김동규[3*]

Byeong-Seok Yu[1], Jeong-Hun Kim[2], Dong-Gyu Kim[3*]

〈Abstract〉

In this study, a pressure vessel for a heat pipe was fabricated by bonding a metal thin film using a polymer compound sheet. In order to confirm the applicability of the experimentally manufactured copper material thin heat pipe of 0.6 mm or less, the pressure resistance and effective thermal conductivity for pressure generated according to the type of the working fluid of the heat pipe were evaluated to suggest the commercialization potential of the thin heat pipe. As a result of evaluating the pressure resistance and effective thermal conductivity performance of the thin heat pipe, the following conclusions were drawn.

1) Using a PEEK-based polymer compound sheet, it was possible to fabricate a pressure vessel for a thin heat pipe with a pressure resistance of up to 1.0 MPa by bonding a copper thin film, and the possibility of commercialization was confirmed at a temperature below 120 ℃.
2) In the case of the effective thermal conductivity performance evaluation test, the effective thermal conductivity of ethanol was higher than that of FC72 and Novec7000, and in the case of ethanol, the maximum effective thermal conductivity was 2,851 W/mK at 3.0 W of heating.

Keywords : Metal Thin Plates, Thin Heat Pipe, Polymer Compound Sheet, Pressure Vessel, Pressure Resistance, Effective Thermal Conductivity

1 주저자, 부경대학교 기계조선융합공학과 부교수
E-mail: youbs@pknu.ac.kr
2 공동저자, 아리투스 주식회사 연구원
E-mail: kimjh109@aritous.com
3* 정회원, 교신저자, 부경대학교 기계조선융합공학과 부교수 E-mail: dgkim@pknu.ac.kr

1 Dept. of Mechanical&Shipbuilding Convergence Engineering, Pukyong National University
2 Aritous. Corportation
3* Dept. of Mechanical&Shipbuilding Convergence Engineering, Pukyong National University

1. 서 론

스마트 기기 각 제조사의 치열한 기술 개발에 의해 스마트폰이나 태블릿과 같은 스마트 기기에서는 통신이나 데이터 처리 등의 고속화와 다기능화와 같은 고기능화가 진행되고 있다. 또 이러한 부품들을 고집적화 함으로써 스마트폰, 태블릿 PC 등의 스마트 기기는 그 두께가 얇아지고 있으며, 두께를 얇게 하기 위한 각 제조사의 경쟁은 더욱 더 치열해지고 있다. 하지만 고집적화에 따른 박형화와 다기능 및 고속화에 의해 스마트 기기는 국소적인 고온화에 의해 열적으로 가혹한 환경 하에서 작동하고 있다. 열적 가혹 환경을 해결하지 못하여 스마트기기의 AP 등이 국소적으로 고온이 되면, 스스로의 능력을 저하시켜, 그 기기가 가지고 있는 고스펙의 기능을 제대로 발휘하지 못하게 된다. 뿐만 아니라, 부품의 수명 저하 및 사용자에게 저온 화상을 입히거나 불쾌감을 준다. 따라서 이러한 스마트기기 내부의 고발열부에서 발생한 열을 온도가 낮은 부분으로 이동시키기 위한 높은 열전달 효율의 두께 0.5mm 미만의 초박형 평면 방열 기구에 대한 시장의 요구는 점점 더 커져가고 있는 실정이다. 두께 0.5mm 이하의 박형 고효율 히트파이프는 대부분 대만의 방열전문업체(CCI, Taisol 등)가 생산하고 있으며 이들 업체가 관련 시장을 지배하고 있으며 한국 업체에서 생산되는 초박형 히트파이프는 없는 것이 현실이다.

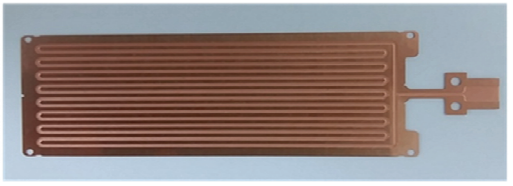
최근 스마트 기기에 적용되고 있는 박형 히트파이프는 금속 박판의 한면에 다수의 미세 유로를 형성시키고, 이렇게 가공된 금속 박판을 유로가 서로 마주보이도록 적층하여 접합을 실시한다. 다수의 미세 유로가 형성된 금속 박판에서 유로가 형성된 부위 이외의 면을 면과 면으로 접합하기 위해서는 현재 브레이징에 의한 액상 접합 또는 적층한 금속 박판을 고온에서 높은 압력을 주어 접합시키는 확산 접합(고상 접합)을 실시할 필요가 있다[1]. 하지만 액상 접합은 브레이징을 위한 용재가 마이크로 유로로 스며들어 유로를 막는 현상이 일어나고, 브레이징 과정에서 발생한 그을음에 의한 유로 막힘 현상도 발생한다. 이러한 브레이징에 의한 문제점을 해결하기 위해 고온 고압을 이용한 확산 접합이 미세 유로가 가공된 금속 박판의 접합에 적용되고 있다. 하지만 확산접합은 접합 가능한 금속 재료가 구리로 한정되어 있으며, 장시간의 접합 작업 시간이 요구되며, 또한 접합 면적도 진공 Hot press의 크기 이내로 제한을 받고 있어, 대량 생산시 낮은 생산성과 높은 생산 단가가 문제가 되고 있다. 본 연구에서는 금속 선택성을 가지지 않고, 접합시간도 6시간 정도로 짧은 고분자화합물시트를 이용해 금속박판을 접합하여 히트파이프용 압력용기를 제작하였다[2]. 시험 제작된 0.6mm 이하의 구리 박판 소재 박형 히트파이프의 적용 가능성을 확인하기 위해 히트파이프 작동유체의 포화수증기압에 따른 히트파이프 압력용기의 내압성 및 작동유체별 유효열전도율을 평가하여 초박형 히트파이프의 상용화 가능성을 검토 하였다.

2. 연구 및 기술개발 현황

전기자동차의 배터리[3]와 ECU 및 IGBT 등에 적용 가능성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 것에 반해, 박형 히트파이프 용기 제작방법 및 용기평가와 관련된 기존 연구는 미미한 실정이다. 박형 히트파이프 구조와 관련된 연구로써 문[4] 등은 전자통신 분야에 적용하기 위해 ‘압출형 박판 히트파이프의 모세관력 향상을 위한 구조 개발’에서 그루브 윅의 모세관력 향상을 위해 와이어 다발을 적용한 평판 히트파이프의 열성능 평가

Table 1. Polymer compound sheet properties

· Thickness	25 μm
· Glass transition temperature	140℃
· Bonding temperature	340~360℃



(a) Copper thin plate with micro channel

(b) Polymer compound sheet

Fig. 1 Materials for pressure container for thin heat pipe

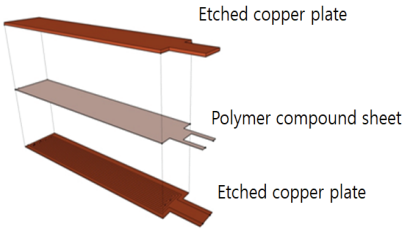


Fig. 2 Schematic diagram of lamination of specimens for bonding

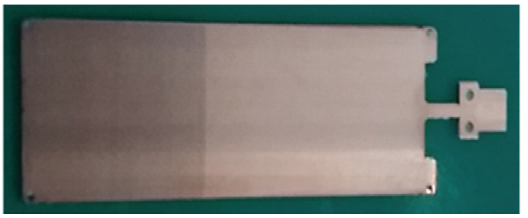


Fig. 3 Pressure container for thin heat pipe after bonding by polymer compound sheet

를 진행하였지만, 두께가 2mm이고, 판 사이에 와이어 다발를 삽입하는 구조로 인하여 히프파이프 용기의 내압성 평가는 진행하지 않았다. 그리고 성능평가 항목으로 제시한 유효 열전도율을 히트파이프의 전열성능으로 평가한 다수의 관련 연구[5-8]가 있으며, 그 중에서 Oshman[9]등의 연구에서 제시한 유효 열전도율 실험 장치 및 열성능 평가 방법 등을 참고로 하여 열성능을 평가하였다. 또한 박형 히트파이프 제조와 관련된 특허로서는 표면 미세요철, 중공튜브, 접착제 등을 이용하는 방법 등이 등록되어 있지만 본 연구와 같이 고분자화합물 시트를 금속 박판 사이에 중간재로 삽입하여 가열 가압하는 방식과는 차이가 있는 실정이다[10, 11].

3. 박형 히트파이프용 압력 용기 제작

금속박판을 접합할 수 있는 고분자 화합물을 대상으로 예비 접합 시험을 실시하여 박판 접합에 문제가 없는 PEEK계 소재를 선정하여 초박형 평면 히트파이프를 제작하였고, 선정된 고분자 화합물의 두께, 유리전이 온도, 접합 온도 등의 특성은 Table 1과 같다. Fig.1 (a), (b)에 박형 히트파이프용 압력 용기를 제작하기 위한 미세 채널이 가공된 구리 박판(a)과 PEEK계 고분자화합물시트(b)를 나타내었다. 상판과 하판에 사용된 동판 시편은 두께 0.2mm의 동판에 에칭으로 미세 유로를 가공하여 서로 마주보게 접합을 하였고, 접합면 사이에서 히트파이프의 작동유체가 증발과 응축을 반복할 수 있는 미세 채널을 0.1mm의 깊이로 가공하였다. 접합용 고분자화합물 시트는 고분자 화합물을 가공해 사용하였다. Fig.2와 같이 에칭 가공 동판을 상하로 마주보게 하여 중간에 두께 25μm의 고분자화합물 시트를 위치하도록 적

층한 후 진공 hot press에서 접합을 실시하였다. 시편 제작에 앞서 박형 동판 표면의 유분 제거를 위해 아세톤 세척을 하였고, 그 후 산화막 제거를 위해 5%의 황산수용액으로도 세정을 실시하였다. 고분자 화합물 시트도 가공 중의 표면에 묻은 유분을 제거하기 위해 아세톤 세정을 실시하였다. 가열 및 가압 접합을 위해 사용한 진공 hot press의 진공도는 3×10^{-2} hPa 이하, 프레스 압력은 10MPa으로서 진공 hot press의 최대 온도는 460℃이다. 동판과 고분자 화합물 시트가 적층된 시편을 가열 가압하여 제작된 Fig. 3의 박형 히트파이프용 압력용기의 크기는 가로길이 29mm, 세로길이 79mm이다.

4. 성능평가

4.1 내압성 평가

압력용기로 구리를 이용하는 경우 히트파이프에 사용할 수 있는 작동유체는 물, 에탄올, 아세톤 등이 있고, 박형 히트파이프의 최대 사용온도를 120℃로 고려했을 때, 각 유체별 포화수증기압 물(0.2MPa), 에탄올(0.66MPa), 아세톤(0.58MPa)까지의 압력에 견딜 수 있는 압력용기가 필요하므로, 본 연구에서 제작한 히트파이프용 압력 용기는 0.8MPa이상의 내압성을 기준으로 하여 평가를 하였다[2]. 내압성 평가를 위해 Fig.4에 압력 테스트를 위한 실험장치의 개략도를 나타내었다. 압력용기의 기밀 확인을 위해 상기 작동유체보다 분자량이 적은 헬륨 가스를 이용한 누설 테스트로 압력실험을 실시하였다. 헬륨 가스 용기 출구에 설치한 디지털 압력계를 사용하여 압력을 계측하였고, 사양은 Table 2와 같다. 실험방법은 헬륨 가스를 접합된 시편에 0.1MPa부터 공급하였으며 5분 이상 헬륨 가스의 누설이 없을 경우 압력을 0.1MPa씩 단계적으로 1.0MPa까지 상승시켰다. 최대 1.0MPa까지 헬륨 가스의 누설이 없을 시에 수조 내 시편에 송곳 등으로 구멍을 내어 시편 내 헬륨 가스가 공급되었는지를 기포로서 확인하였다.

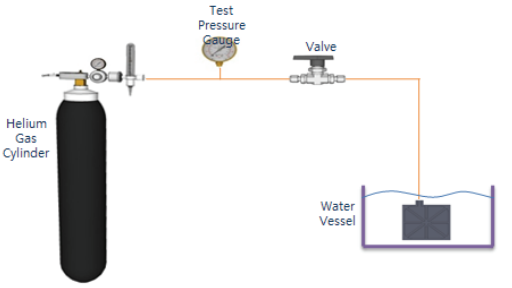


Fig. 4 Device schematic for leak test

Table 2. Specification of digital press gauge

· Manufacturer: PDK · Model: PDR500 · Measuring range: 0~20,000hPa	±0.1%

4.2 전열 성능 평가

기존 연구에 의하면 pulsating heat pipe의 작동유체는 증발온도의 작은 변화에 대해 큰 포화압력의 변화, 낮은 동점성, 낮은 잠열, 높은 비열, 낮은 표면장력 등의 물성치를 갖고 있어야 한다고 제안되어 있다[12]. 하지만 상기의 작동유체 조건은 유로의 수력 직경이 5mm 이상인 경우의 Pulsating Heat Pipe인 경우에 해당하며 본 연구에서 제작된 유로의 수력 직경 이 0.5mm 이하인 초박형 히트파이프에 그대로 적용될지 알 수 없어, 히트파이프 내에 봉입되는 작동유체에 따른 전열성능을 평가하였다.

작동유체로는 동으로 제작된 히트파이프에 주로 사용되는 에탄올과, 표면 장력과 동점성이 낮아 전자기기의 냉각에 주로 사용되고 있는 FC72와 Novec7000도 선정하였고, 작동유체의 사용온도는 상온에서 120℃사이로 하였다. 히트파이프용 압력용기 내부를 진공펌프를 이용하여 2×10^{-4} hPa 이하까지 진공시킨 후, 디스펜스로 주입시간을 조정하여 작동유체를 전체 유로 체적의 40%씩 주입하였다. 전열 성능평가 실험장치 사진 및 시편에서의 온도측정 위치를 Fig. 5, 6에 나타내었고, 측정장치의 사양은 Table 3과 같다. Heater에서의 가열량은 1.5W~3.0W까지 0.5W씩 증가시켰다. 각 가열량에서 측정 온도가 정상상태에 도달 한 후 5분이 지난 후에 가열량을 증가시켰고, 온도가 정상상태가 되었을 때 5분간의 데이터를 평균한 값을 각 측정 지점에서의 온도로 하여 아래의 식을 이용하여 유효 열전도율(k_{eff})을 계산하였다.

$$k_{eff} = q''\times\frac{L}{T_{\mathrm{eva,avg}} - T_{\mathrm{con,avg}}}$$

q'': 열유속 [W/m^2]
L: 가열부 중심과 응축부 중심부간 거리[m]
$T_{eva,avg}$: 증발부 평균온도[K]
$T_{con,avg}$: 응축부 평균온도[K]

5. 실험결과

PEEK계 고분자화합물시트를 사용하여 박형 히트파이프용 압력용기를 진공 hot press로 제작하였고, 각 시편별 9지점에 대한 두께 측정 결과는 Table 4와 같다. 측정 지점은 시편을 1/3씩 분할하여 분할영역마다 3지점씩 측정하였다. 접합 시편의 평균 두께는 0.413mm, 표준 편차는 최대

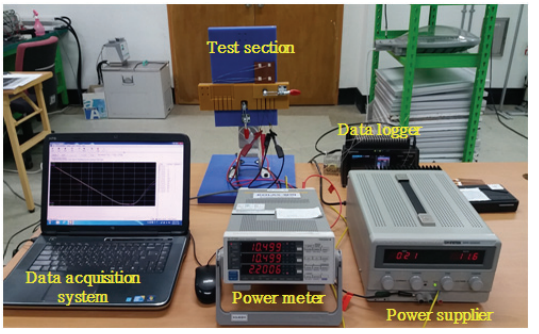


Fig. 5 Effective thermal conductivity test device

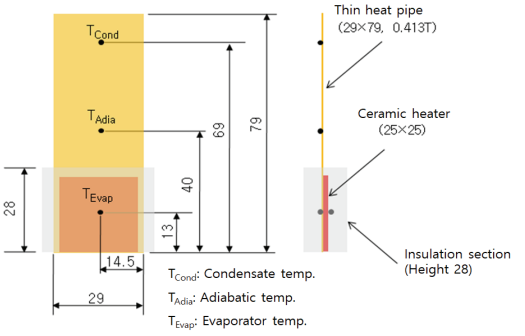


Fig. 6 Temperature measurement point

Table 3. Specification of power-meter and data logger

Amount of heating	· Manufacturer: YOKOGAWA · Model: WT210 · Measuring range: 0~5kW
Temp.	· Manufacturer: GRAPHTEC · Model: midi LOGGER GL820 · Measuring range: -100℃~1370℃ (K type)

0.006mm로 평균 두께의 1.5% 이내로 나타났다. 두께에 대한 표준 편차를 고려했을 때 동판과 고분자화합물 시트가 전반적으로 고르게 접합되었음을 알 수 있었다.

Fig. 7의 압력용기 내압성 성능평가 시험의 경우 최대 1.0MPa까지 단계적으로 변화시킨 헬륨가스의 가압 누설 실험에서 헬륨 가스의 누설이

없었고, 마지막 부분에서 발생한 압력의 변동은 헬륨 가스가 용기내로 공급되는지를 확인하기 위해 구멍을 냈을 때의 압력변동을 나타낸 것이다. 따라서 미세 채널이 가공된 상하의 구리 박판을 PEEK계의 고분자화합물 시트로 접합한 박형 히트파이프용 압력 용기는 120℃ 이하의 온도에서 사용할 수 있는 충분한 내압성을 가지는 것으로 나타났다.

Table 4. Specimen thickness measurement result

	Specimen thickness[mm]				
Specimen	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Mean	0.421	0.410	0.410	0.415	0.412
StDev	0.003	0.002	0.002	0.006	0.003

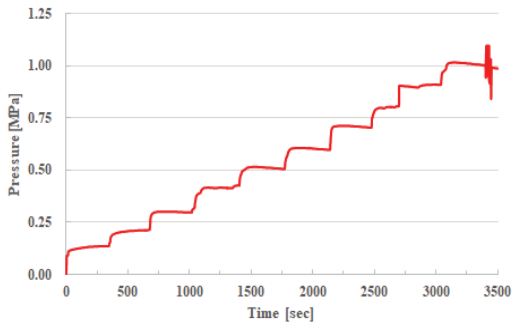


Fig. 7 Time variation of the pressure applied in the pressure container

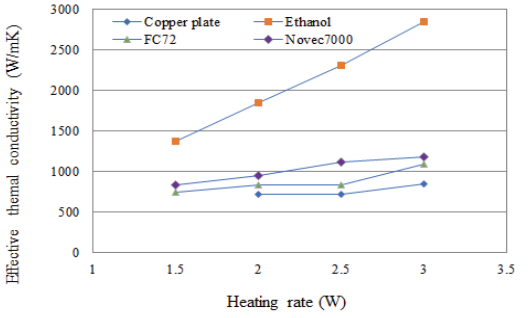


Fig. 8 Effective thermal conductivity of heat pipe according to type of working fluid

Fig. 8의 유효 열전도율 성능 평가시험의 경우 에탄올의 유효 열전도율이 FC72와 Novec7000보다 높은 것으로 나타났고, 동판에 비해 3종류 작동유체 모두 유효 열전도율이 1.2~3.3배 정도 높게 나타났다. 가열량 3.0W에서 다른 작동유체와 달리 에탄올의 경우 유효열전도율이 2,851W/mK으로 최대로 나타났다. 이는 가열량 증가에 따라 증발부와 응측부의 온도차 변화가 에탄올이 상대적으로 적어 높게 나타난 것으로 판단된다. Khandekar[11] 등이 제시한 이론에 따르면 Pulsating Heat Pipe의 작동유체로서는 FC72와 Novec7000이 에탄올 보다 더욱 더 적합한 것으로 제시되어 있지만, 본 연구에서 평가한 박형 히트파이프에서는 에탄올이 초박형 Pulsating Heat Pipe의 작동 유체로써 적합한 것으로 나타났다. 이는 작동유체가 작동하는 유로의 수력직경이 기존연구에서 제안한 작동조건과 다름으로 인해 발생한 것으로 판단된다.

6. 결 론

고분자 화합물 시트를 이용하여 제작한 박형 히트파이프 압력용기의 내압성과 히트파이프 유효 열전도율 성능 평가를 수행한 결과 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) PEEK계 고분자화합물 시트를 사용하여 구리 박판의 접합으로 1.0MPa까지의 내압성을 가지는 박형 히트파이프용 압력 용기의 제작이 가능하였고, 120℃ 이하 온도에서 상용화 가능성을 확인하였다.
2) 유효 열전도율 성능 평가시험의 경우 에탄올의 유효 열전도율이 FC72와 Novec7000보다 높은 것으로 나타났고, 에탄올의 경우 가열량 3.0W에서 유효열전도율이 2,851W/mK으로 최대로 나타났다.

3) 향후 유효 열전도율 성능 평가시험에서 박형 히트파이프용으로 적합한 것으로 나타난 에탄올에 대하여 최적 봉입량에 따른 전열성능 비교 및 고상접합이 힘든 알루미늄 박판을 사용한 박형 히트파이프의 접합 가능성에 대한 추가연구가 필요하다고 사료된다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었으며, 교신저자의 산학협력 연구내용을 수정・보완하였음

참고문헌

[1] T. Shioga and Y. Mizuno, “Micro loop heat pipe for mobile electronics applications”, IEEE 31st SEMI-THERM Symposium, pp.50-55, (2015).
[2] J.H, Kim and D.G, Kim, “The bonding of pressure container for thin heat pipe using a polymer compound sheet”, The Korean Society of Automotive Engineers Fall Conference, pp.1022-1023, (2016).
[3] T-H. Tran, S. Harmand, and B. Sahut, “Experimental investigation on heat pipe cooling for hybrid electric vehicle and electric vehicle lithium-ion battery”, J. Power Sources, Vol. 265, pp. 22-272, (2014).
[4] S.H. Moon and Y.H. Park, “Development of the Structure for Enhancing Capillary Force of the Thin Flat Heat Pipe Based on Extrusion Fabrication”, Trans.Korean Soc. Mech. Eng. B. Vol.40, No.11. pp.755-759, (2016).
[5] Y. J. Youn and S. J. Kim, “Fabrication and evaluation of a slicon-based micro pulsating heat spreader”, Sensors and Actuators A, Vol. 174, pp. 189-197, (2012).
[6] J. Q, H. Y. Wu and P. Cheng, “Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al2O3-water nanofluids”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, Issue 2, pp. 111-115, (2010).
[7] A. B. Solomon, M. Sekar and S. H. Yang, “Analytical expression for thermal conductivity of heat pipe”, Applied Thermal Engineering, vol. 100, pp.462-467, (2016).
[8] J. Legierski, B. Wie and G. Mey, “Measurements and simulations of transient characteristics of heat pipes”, Microelectronics Reliability, Vol. 46, Issue 1, pp. 109-115, (2006).
[9] C. Oshman, B. Shi, C. Li, R. Yang, G. P. Peterson, V. M. Bright and Y C L Kee, “The Development of Polymer-Based Flat Heat Pipes”, Journal of Microelectromechanical systems, Vol. 20, No. 2, pp. 410-417, (2011).
[10] Thin flat heat pipe, KR20160146614A
[11] Thin heat Pipe and Manufacturing Method, WO2016204328A1
[12] Sameer Khandekar, Nicolas Dollinger, Manfred Groll, “Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study”, Applied Thermal Engineering 23, pp.707-719, (2003).

(접수: 2021.07.02. 수정: 2021.07.27. 게재확정: 2021.07.30.)