

유한요소법과 최적설계기법을 활용한 히트싱크 콜드 플레이트 최적 설계

홍석무¹ · 서형준² · 김종문² · 심재원¹ · 황지훈[#]

Optimized Design of a Cold Plate Heat Sink using FEM and Optimization

S. Hong, H. Seo, J. Kim, J. Sim, J. Hwang

(Received March 28, 2014 / Revised August 19, 2014 / Accepted August 22, 2014)

Abstract

In order to improve efficiency, an outdoor unit using a refrigerant cooling method is designed into many air conditioner systems. The heat exchanger is composed of a Cu tube and an plate. The optimal design for the cold plate is very important because the efficiency of the heat transfer depends on the contact area between the Cu tube and the cold plate. The current study focused on the design of the cold plate to obtain a uniform contact between the Cu tube and the cold plate. Both FE(finite element) analysis and optimization were used in the design. The contact area between the tube and plate was predicted and improved by 16% through the press forming simulations. The springback after press forming was also reduced when the optimized design parameters were used. To verify the validity of the optimal cold plate design, a verification test was conducted. As a result, the performance of the heat exchanger improved by 34% when compared to benchmarked products.

Key Words : Heat Sink, Refrigerants Cooling, Optimization, CAE, Springback

1. 서 론

최근 고효율화를 추구하는 시장 변화에 대응하기 위해, 에어컨 업계에서는 정속 압축기 대신 고효율 인버터 압축기를 사용한 인버터 에어컨으로 대체하고 있다. 또한 대용량 제품이 요구되고 있어 용량이 큰 인버터 압축기의 사용과 더불어, 고속운전 기술을 적용하여 요구 최대부하에 대응하고 있다. 시장 요구의 고효율화, 대용량화에 따라 인버터 압축기 소자의 발열량 또한 계속해서 증가하고 있다. 기존 공냉식 냉각 시스템은 인버터 파워 모듈(IPM)에 가공된 알루미늄 핀을 부착하여 냉각하는데, 이를 고

용량 IPM에 적용할 경우 파워모듈의 냉각이 충분하지 않을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 주로 수치해석을 통한 냉각성능 평가와 이를 토대로 성능을 향상시키기 위한 선행연구들이 있었다. Kim 등(2010)은 바이패스(bypass) 유동이 발생하는 히트싱크(heat sink)의 열 성능을 향상시키기 위한 가이드 장치를 제안하고 실험을 통해 가능성을 확인했다[1]. Jee 등(2012)은 히트싱크의 높이 변화에 따라 발생하는 팁 클리어런스의 너비가 열 성능에 미치는 영향을 실험과 해석을 통해 밝혔다[2]. 또 Kim 등(2011)은 히트싱크의 방열 성능을 향상시키기 위해 PHP (Pulsating Heat Pipe: 진동형 히트파이프)를 적용하여

1. 삼성전자 글로벌기술센터 DFX그룹

2. 삼성전자 생활가전사업부 에어컨전문기술 Lab.

Corresponding Author: Global Technology Center, Samsung electronics, Co., Ltd., E-mail: jso.hwang@samsung.com

발열량과 공기 유속에 따른 히트싱크의 열 저항에 대한 실험 및 수치해석으로 냉각성능을 평가하였다 [3]. Yu 등(2011)은 자연대류하의 원형 히트싱크의 구조에 대한 변수연구를 수행하고, 실험과 수치해석을 통한 최적설계 기법으로 최적형상을 도출했다[4]. 이 밖에도 기구물의 설계를 변경하거나, 히트싱크의 경사각을 변화하는 등 주로 공냉식 냉각 시스템의 구조에 대한 연구가 주를 이루었다[5~7]. Eom 등(2012)은 유한요소해석을 이용해 핀 형 히트싱크의 단조 공정을 설계함으로써, 제조단계부터 해석적 기법을 도입해 시행착오를 줄이고자 했다[8]. 그러나 본질적으로 공냉식 냉각 시스템은 효율적 측면에서 한계를 가지기 때문에 액체 냉매를 이용한 냉매냉각 방식이 대체 방안으로 점차 확대 적용되고 있는 추세이다.

이에 본 연구에서는 IPM 냉각에 사용되는 냉매냉각 방식의 히트싱크 형상제작을 위해 프레스 성형 공정 최적설계를 수행했다. 일반적으로 냉매냉각을 위한 콜드 플레이트 제작은 두 개의 플레이트를 독립적으로 만든 후 스크류로 체결하는 방식을 생각할 수 있으나, 많은 공수와 공정으로 인해 비용 상승이 예상된다. 따라서 스크류 체결방식의 공정을 최소화 하면서 냉각 효율을 극대화할 수 있는 프레스 성형기술을 제안했다. 프레스 성형공정을 통해 구리튜브가 콜드 플레이트에 압착 삽입되고 제하했을 때 일반적으로 소성 변형 후 남아있는 잔류응력으로 인해 스프링백(springback)이 발생하게 되는데, 이처럼 스프링백이 발생하면 압착삽입 되었던 구리튜브가 이탈되거나 접촉면적이 줄어들어 열 전달 효율이 감소할 수 있기 때문에 스프링백을 고려한 프레스 금형 설계가 필요하다. 프레스 금형 설계는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/CAE를 활용하였으며, 스프링백 및 튜브와 금형의 탈착 여부 해석은 ABAQUS/Explicit을 이용했다[9]. 접촉면적을 최대화하면서 튜브의 두께변화를 최소로 하는 최적형상을 도출하기 위해 상용 최적화 프로그램인 PIANO를 사용했다[10].

2. 콜드 플레이트 최적설계

냉매 냉각을 위한 콜드 플레이트 제작은 Fig. 1-(a)와 같이 2개의 알루미늄 판을 기계 가공한 후, 튜브를 삽입해 스크류로 체결하여 마무리한다. 따라서

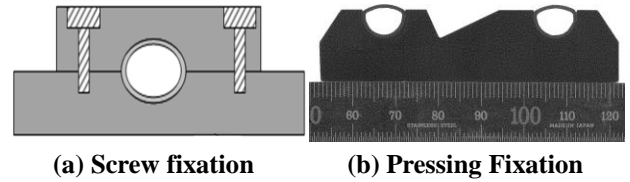


Fig. 1 Schematic diagram of cold plate

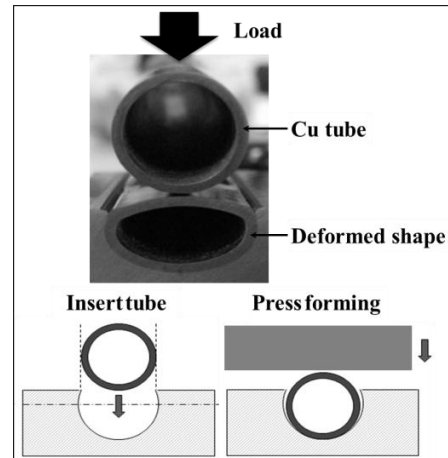


Fig. 2 Schematic process of press forming and shape of before /after press

원 소재 비용 및 가공/공정 비용이 증가할 뿐만 아니라, 접촉면적에 대한 보장이 없어 열 전달 효율 확보에 문제가 발생할 수 있다. 폐쇄형 플레이트 방식의 단점을 보완하고, 재료비 절감 및 사이클 타임을 대폭 개선하기 위해 Fig. 1-(b)와 같이 오픈형 플레이트 형상 및 프레스 압착 공정을 구상하였다. 공정 개략도 및 부품형상은 Fig. 2와 같다. 원형 튜브가 프레스 성형에 의해 알루미늄 플레이트에 삽입되는데, 튜브가 이탈하지 않고 접촉 면적을 최대화하기 위한 역구배(under cut) 구조를 고안했다. 오픈형 플레이트 형상에 있어 접촉면적 최대화 및 이탈방지는 가장 중요하게 고려되어야 할 사항이기 때문에 아래쪽 플레이트의 형상설계는 매우 중요하다. 따라서 각 설계변수가 제품 품질(접촉면적 및 열 전달 효율)에 미치는 영향을 분석하고, 제조 시 성형성을 확보하기 위해 유한요소해석을 활용하여 콜드 플레이트 최적형상 설계를 수행했다.

2.1 유한요소해석 모델링

우선 2차원 유한요소해석을 위해 Fig. 3 같이 1/2대칭 평면 변형률 조건으로 모델을 구축하고 실제 테스트 결과와 비교 분석했다. 사용된 튜브는 C1220T-0

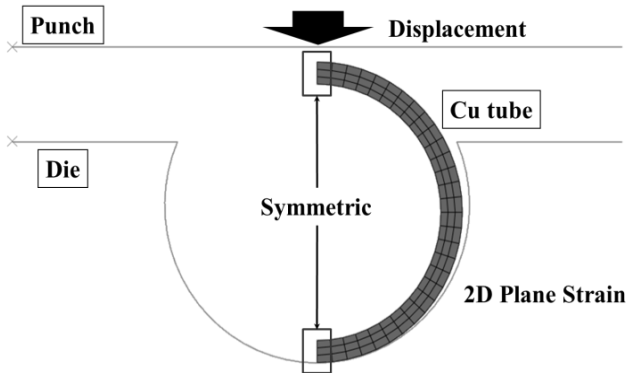


Fig. 3 FE modeling for 2D press forming

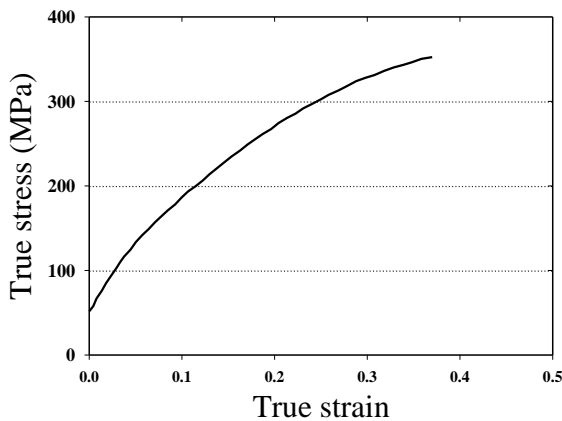


Fig. 4 True stress-true strain curve for the Cu tube

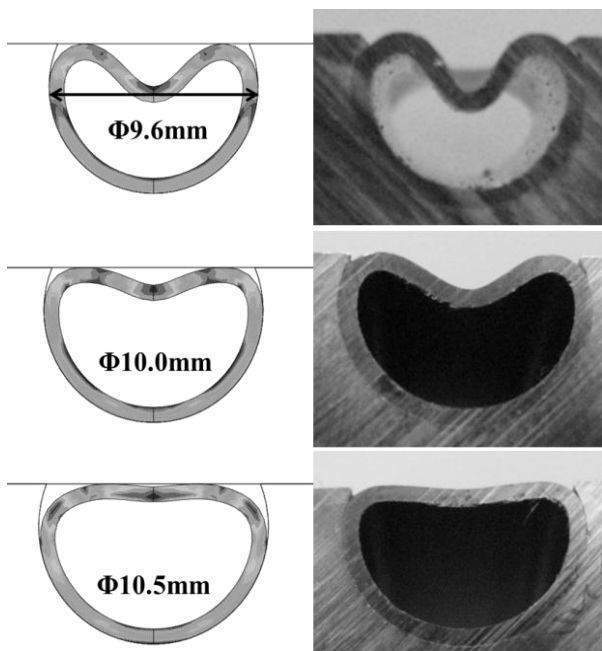
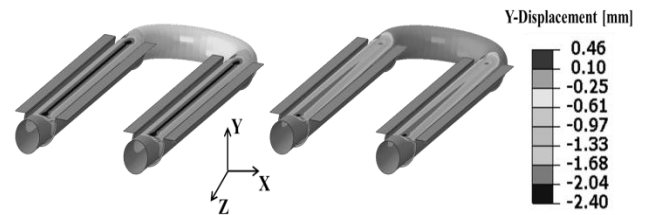


Fig. 5 Comparison of deformation between FE- simulation and experimental results



(a) Y-displacement (b) Springback

Fig. 6 Simulation results from 3D press forming and springback caused by elastic recover

(인탈산 동관)로 외경은 9.52mm, 두께는 0.7mm이다. 또한 알루미늄 플레이트는 AL6063 압출소재를 사용했다. 소재의 기계적 물성은 제조사에서 인장시험을 통해 확보했는데, 탄성계수는 118GPa, 포아송비 (Poisson's ratio)는 0.33이며 유동응력은 Fig. 4와 같다. 펀치는 STD11을 사용했으며, 해석 시 강체(rigid body)로 설정했고 쿨롱 마찰계수는 0.03으로 가정했다. Fig. 5에서 보여지는 바와 같이, 다이 직경을 변수로 한 실제 테스트와 해석결과의 소재거동이 매우 일치한다.

2D 해석결과를 바탕으로 3D 모델링을 통해 유한요소해석의 유용성을 확인할 수 있었다. 특히 3차원 해석의 경우, 2D 해석과 달리 튜브 길이 방향에서 접촉면적이 달라짐을 확인할 수 있었다. 왜냐하면, 튜브 압착 시 접촉순서에 따라 변형이 다르며 콜드 플레이트 양끝 단은 평면 변형률 거동을 보이지 않기 때문이다. 또한 Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 3D 스프링백 해석을 통해 튜브 프레스 압착 후 예상치 않게 발생할 수 있는 튜브의 이탈을 예측할 수 있다. 다이 직경이 11.0mm일 때 3차원 프레스 성형 해석 후 탄성회복 해석 수행 결과 스프링백으로 인해 중간과 양끝의 접촉 면적이 달라지고, 이로 인해 동관이 밖으로 이탈할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이를 최적화 해석 수행 시 고려해야 하는 제한조건 (constraint)으로 설정하였다.

2.2 공정 최적화

콜드 플레이트의 설계변수는 Fig. 7과 같이 원형형상으로 정의했고, 목적함수와 설계변수 및 제한조건 등이 나타나있다. 여기서 L 은 원형형상의 너비, H_{Die} 는 높이, R_{Die} 는 반경을 의미하며 W_{Punch} , H_{Punch} 는 튜브 압착용 펀치의 단면 형상변수로써 각각 호의 너비, 높이를 나타낸다. 플레이트에 삽입되는 튜브는

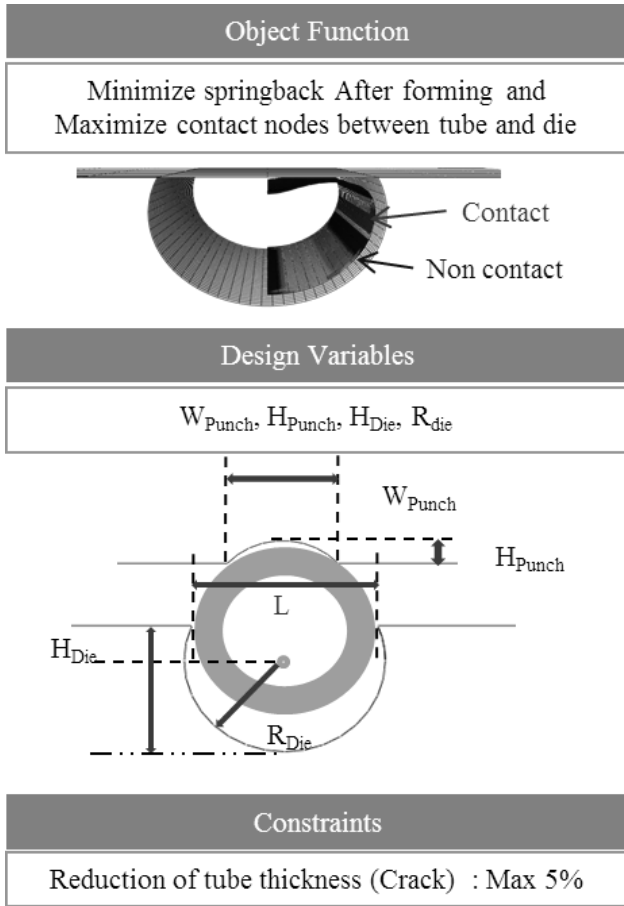


Fig. 7 Optimization process and design parameters

Table 1 The result of optimization

Optimized Shape (mm)		Optimization	Benchmarking
R _{Die}	5.07		
H _{Die}	1.45		
R _{Punch}	9.84		
H _{Punch}	-8.81		
Contact rate (%)		116	100
Springback (mm)		0.021	0.025

두께 0.7mm, 지름 9.52mm이다. 플레이트의 안착부는 튜브가 삽입되는 부분으로써 튜브가 삽입되면서

적힘 현상을 방지하기 위해 튜브의 지름보다 크게 설계 해야 하며, 튜브 압착 후 이탈 방지를 위해 역구배(undercut) 형상을 유지해야 한다. 이러한 역구배 형상을 구현하기 위해 H_{Die} 는 원형 형상의 반지름 R_{Die} 보다 커야 하고, R_{Die} 는 튜브의 반지름보다 커야 한다. 따라서 제안된 최적화 설계변수(design variable)는 H_{Die} , R_{Die} , W_{Punch} , H_{Punch} 이며 목적함수(Object function)는 튜브 압착 후 플레이트와의 접촉면적 최대화 그리고 튜브의 두께변화 최소화로 정의했다. 제한조건으로 두께감소율 (5%이하), 그리고 가공공차(0.1mm) 등을 고려했다. 반복적인 최적화 해석을 수행하기 위해서 유한요소해석 프로그램 ABAQUS와 최적화 프로그램 PIANO를 연계하는 자동화 프로그램을 구성하였다. Yoon 등(2011)과 Choi 등(2011)은 자체 개발한 PIANO와 상용프로그램을 연계하여 해석 프로세스 자동화 및 통합최적설계를 수행한바 있다[11, 12]. 적용한 자동화 프로그램에서는 알루미늄 플레이트 및 펀치의 형상 변수의 자동 모델링, 자동 요소(mesh) 생성 작업, 접촉 및 경계조건 등을 자동으로 입력 파일에 작성하고 해석을 수행하게 되며, 각 결과에 따라 PIANO S/W 에서 최적화를 수행하게 된다. Table 1에는 결정된 최적설계 변수와 계산된 접촉비율 및 스프링백 양을 보여준다. 벤치마킹(benchmarking) 대상 제품에 비해 접촉비율은 약 16% 향상되었으며, 선진사 제품은 국부적 소성변형으로 접촉면의 압력이 불 균일 한데 비해 최적화된 금형으로 제작된 형상은 전체적으로 고른 압력분포를 갖는다. 또한 튜브 압착 후 발생할 수 있는 스프링백으로 인한 이탈 현상 예측 결과 벤치마킹 제품과 거의 유사한 수준을 보이고 있다. 본 제품의 실제 단품 냉각효율을 IPM과 냉매의 온도차 ΔT 로 정의했을 때, 선진사 제품은 37.6℃인 반면 최적화 금형으로 제작한 형상은 28.9℃이다. 또한 열저항(thermal resistance) 측면에서 벤치마킹 제품은 0.176℃/W, 개발 형상은 0.116℃/W으로 약 34% 향상되었다.

3. 검증

본 설계를 바탕으로 실제 알루미늄 플레이트를 제작하고, 만능 재료 시험기(UTM 250kN, Zwick GmbH)에 안착해 검증 테스트를 수행했다. Fig. 9-(a)에 보여지는 바와 같이 펀치가 수직으로 하강하여

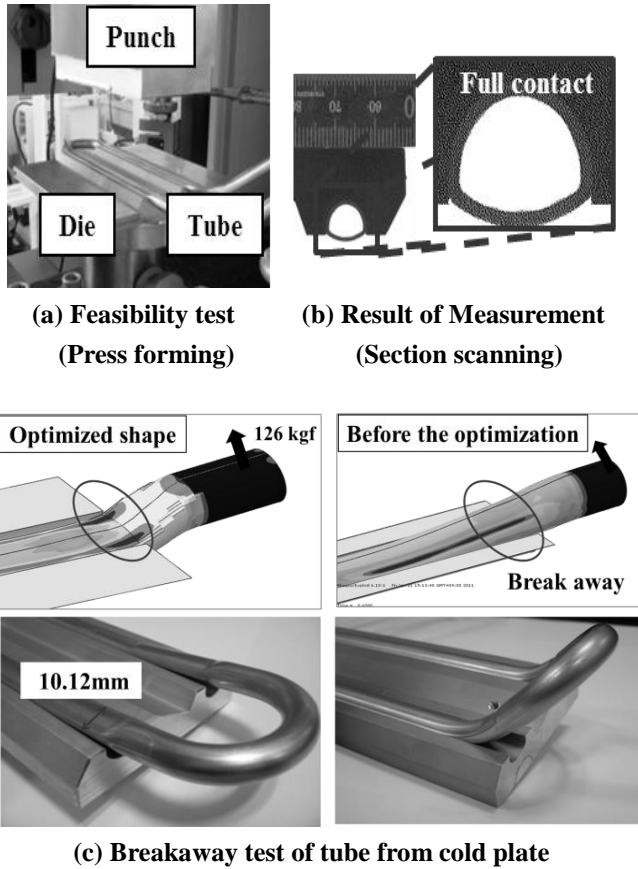


Fig. 9 Verification of (a) optimized geometry for tube press forming, (b) measurement of contact area and (c) breakaway test of tube from cold plate

원형 튜브를 알루미늄 플레이트에 압착하게 된다. 펀치를 제하하면 삽입된 튜브가 탄성 회복되면서 스프링백을 일으킨다. 이 때 접촉면적이 부족하거나 가공오차가 크다면 압착된 튜브가 빠질 수 있다. Fig. 9-(b)는 제안된 최적설계 변수에 따라 제작된 알루미늄 플레이트에 튜브를 압착하고 스프링백까지 발생한 튜브 샘플 단면의 접촉 면적을 확인한 결과이다. 해석결과와 마찬가지로 전체적으로 균일하게 접촉되어 있음을 확인할 수 있다. 강건설계를 도입하여 콜드 플레이트 가공 시 발생하는 가공공차(최대0.1mm 가정)에도 튜브가 빠지지 않도록 설계했고, 이를 해석과 실험결과 비교를 통해 확인했다. Fig. 9-(c)에서 보는 바와 같이 최적설계로 구현된 제품은 튜브 끝부분에 일정 힘을 가하게 되었을 때, 전체적으로 튜브가 빠지지 않고, 튜브 자체가 변형을 일으킬 정도까지 이탈이 생기지 않음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

프레스 성형을 통한 열 교환기 콜드 플레이트 설계에 있어 CAE와 최적설계 기법을 연계한 프로세스를 도입하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 프레스 성형 CAE 분석 결과 형상 변화에 따른 접촉면적과 스프링백의 변화 예측 및 확인이 가능하였다.

(2) 변수연구(parametric study)를 통해 설계변수를 도출(R_{Die} , H_{Die} , W_{Punch} , H_{Punch})하고, 구속조건을 부여함으로써 최적설계가 가능했다.

(3) 해석결과를 바탕으로 실제 부품을 제작하고 열 전도 효율을 비교한 결과 B/M제품 대비 접촉면적은16%가 향상되었는데, 이는 냉각효율 측면에서 34%성능이 향상되었음을 의미한다.

(4) 접촉면적 증가에 따른 열 전도 효율 향상뿐만 아니라 제조 조립성 측면에서도 부품 2개, 스크류 4개가 감소하여 공정수와 원가를 절감할 수 있게 되었다.

REFERENCES

- [1] J. Kim, S. Kim, J. Kim, 2010, Thermal Optimization of a Straight Fin Heat Sink with Bypass Flow, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 34, No. 2, pp. 179~184.
- [2] S. H. Jee, H. S. Lee, J. D. Chun, S. H. Kang, E. C. Jeon, 2012, Proc. Kor. Soc. Prec. Eng., Spring Conf., Kor. Soc. Prec. Eng., Seoul, Korea, pp. 1065~1066.
- [3] J. Kim, S. Ha, Y. Kwon, 2011, A Study on Cooling Performance of Aluminum Heat Sink with Pulsating Heat Pipe, J. Kor. Soc. Marine Eng., Vol. 35, No. 8, pp. 1016~1021.
- [4] S. Yu, K. Lee, S. Yook, 2011, Optimum Design of a Radial Heat Sink under Natural Convection, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 54, No. 11, pp. 2499-2505.
- [5] D. Park, E. Seo, Y. Park, 2013, Proc. Kor. Soc. Mech. Eng., Autumn Conf., Kor. Soc. Prec. Eng., Seoul, Korea, pp. 1726~1729.
- [6] S. Jee, S. Lee, D. Kim, E. Jeon, 2013, Proc. Soc. CAD/CAM Conf., Soc. CAD/CAM Eng., Seoul, Korea, pp. 579~581.
- [7] K. H. Do, T. H. Kim, Y. S. Han, B. Choi, M. B. Kim,

- 2012, Experimental Investigation of Variations in Inclination Angle of Natural Convective Heat Sink with Plate Fins, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 36, No. 6, pp. 571~578.
- [8] J. G. Eom, J. M. Cho, S. W. Jung, M. S. Joun, 2012, Proc. Kor. Soc. for Tech. of Plast., Autumn Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 152~155.
- [9] ABAQUS User's Manual, Version 6.10, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA (2010).
- [10] PIAAnO User's Manual, Version 3.3, PIDOTECH Inc., KOREA (2011).
- [11] S. Yoon, D. Choi, 2011, Proc. Kor. Soc. Mech. Eng., Spring Conf., Koc. Soc. Mech. Eng., Seoul, Korea, pp. 246~247.
- [12] B. L. Choi, S. M. Hong, S. Y. Ryu, K. B. Kang, D. H. Choi, 2011, Proc. Kor. Soc. of Manuf. Tech. Eng., Autumn Conf., Kor. Soc. Manuf. Tech. Eng., Seoul, Korea, p. 79.