

마이크로 적층기술을 이용한 열교환기 생산모델 개발과 경제성 평가

유범상*, 김재희⁺, 박상민⁺⁺

(논문접수일 2006. 1. 23, 심사완료일 2006. 4. 3)

Development of Heat Exchanger Production Model Based on the Microlamination Technology and Estimation of its Economic Efficiency

Beom-Sahng Ryuh*, Jae-Hee Kim⁺, Sang-Min Park⁺⁺

Abstract

The development of a heat exchanger production model based on the microlamination technology and its economic efficiency is addressed. A microchannel production model is proposed for the high-volume production. The microlamination system is made up of lamina patterning, laminae sorting and laminae bonding. A cost estimation model is developed based on the known cycle time and capital equipment costs. An economic efficiency analysis is performed to determine the cost drivers under the different market and product scenarios. The result of the economic efficiency analysis indicated that the device size and the production rate have a great effect on the overall manufacturing cost of microlamination devices. And it can be concluded that the microlamination should focus on bonding larger laminae and reducing both cycle time and warpage.

Key Words : Microchannel(마이크로채널), Heat Exchanger(열교환기), Production model(생산모델), Microlamination(미소적층), MECS(MECS), Economic Efficiency(경제적 효율)

1. 서론

최근 혼합 척도를 갖는 장치 제조에 대한 연구가 점점 증가하고 있다. 혼합 척도(Mixed Length Scale)란 물리적 성능을 개선시키기 위하여 두 개 이상의 다른 척도 체계

(Macro, Mezzo, Micro, Nano etc.)를 포함하고 있는 시스템을 말한다. 이러한 혼합 척도가 사용되는 대표적인 예로는 마이크로 전자시스템(Micro Electronic System), MEMS(Micro Electro Mechanical System), μ -TAS(Micro scale Total Analysis Systems) 등을 들 수 있다. 혼합 척도를 갖는

* 전북대학교 기계항공시스템공학부 (ryuhbs@moak.chonbuk.ac.kr)

주소: 561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가

+ 전북대학교 대학원 졸업

++ 전주비전대 자동차과

장치 제조에 있어서 중요한 분야중 하나가 MECS(Micro-technology-based Energy and Chemical Systems)이다. 이는 나노와 마이크로계의 복합적 특성을 이용하여 열매체의 전달률을 증가시키는 마이크로 유체공학의 한 분야이다. 이 장치의 예로 많이 사용되는 것으로 마이크로 채널(Micro Channel) 열교환기가 있는데, 일반적인 열교환기보다 3~5 배의 높은 열 플럭스(Heat Flux)를 가진 것으로 보고되고 있다^(1,2).

MECS 장치는 나노 및 마이크로 계의 특징을 포함하지만 이에 사용되는 재료와 제조기술은 보편적인 마이크로 가공 기술과 상이한 점이 있는데, 최근에 좁고 깊은 마이크로채널을 갖는 MECS 장치의 경제적인 생산방법으로 마이크로 적층(Microlamination) 기술이 제시되고 있다⁽³⁾. 마이크로 적층기술에 대한 연구는 이미 여러 연구소와 산업체에서 진행되고 있는데⁽³⁻⁷⁾, 잉크젯 프린터^(4,5), 고성능 온도제어기⁽⁶⁾, 용제 분리 장치⁽⁹⁾, 마이크로 연소기⁽¹⁰⁾, 연료 처리기⁽¹¹⁾, 고온 반응촉매⁽¹²⁾, 유체 밸브기⁽¹³⁾ 그리고 마이크로 투석기⁽¹⁴⁾ 등에서 연구가 이루어졌다. 마이크로 채널과 마이크로 유체기계 시스템은 수십 μm 크기의 구리, 스테인리스강, 금속간 화합물(Inter-metallics), 폴리이미드(Polyimide) 등의 다양한 형상 배열로 구성되었다.

지금까지 대부분의 MECS 관련 연구는 시제품 제작이나 실험실 환경의 작업 수준에 머무르고 있다. 따라서, 경제성 분석을 위한 원가 자료가 부족하여 마이크로 적층기술과 관련된 원가산정 기법이 필요하다. 아울러, MECS의 성공 여부는 기존에 사용되고 있는 공기조화 방식이나 중앙집중식 에너지/화학 제어방식보다 더 경제적인 생산방법을 개발할 수 있느냐에 달려 있다고 할 수 있다.

본 논문에서는 MECS의 일종으로 마이크로 적층기술을 이용한 마이크로채널 열교환기의 생산 시스템 모델링을 개발하고, 개발된 시스템에 대한 원가 산정을 통하여 경제성을 분석하고자 한다. 마이크로채널 열교환기의 양산 시스템은 스테인리스강을 확산 접합하여 마이크로 적층 구조를 생산한다는 조건하에서 설계되었다. 설계된 양산 시스템으로부터 얻어진 사이클 타임과 설비 비용을 기초로 하여 원가 추산 모델이 만들어지고, 이를 토대로 다양한 시장과 생산 조건에 따른 원가 모델을 평가할 수 있었다.

2. 마이크로채널 열교환기 생산모델

본 장에서는 MECS의 일종으로는 마이크로 적층기술을 이용한 마이크로채널 열교환기 생산 시스템에 대하여 설명

하도록 한다. 마이크로채널 열교환기의 개략도를 Fig. 1에 소개하고 있는데, 이는 두 유체가 대향류(Counter-flow)를 이루고 있다. Fig. 2와 같은 마이크로채널 열교환기 생산 시스템은 일반적으로 박판 패턴성형, 박판 분류, 박판 접합공정 등 세 가지 순차적 공정으로 구성된다.

2.1 박판 패턴성형 공정

박판 패턴성형 공정(Patterning Process)은 박판을 설계 치수에 맞도록 가공하는 공정을 말한다. 패턴성형 가공방법으로는 크게 광화학적 가공(Photochemical Machining) 방법과 블랭킹(Blanking)/전기연마 디버링(Electropolish Deburring) 방법으로 구분되어진다. 본 연구에서는 박판에 사용되는 재료로 SUS 304를 선정하였다.

2.2 박판 분류 공정

박판 패턴성형 공정에서 만들어진 적층 박판은 Fig. 3과 같은 자동 분류 시스템을 사용하여 분류, 정렬한다. 이 자동 분류 시스템은 고신뢰성의 공급부품을 이용하여 구성되고 PLC로 제어한다. 이 자동 분류 시스템은 최소 25×25mm,

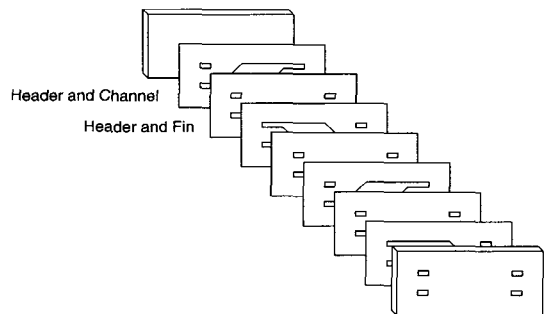


Fig. 1 A Schematic of two fluid counter-flow micro-channel arrays

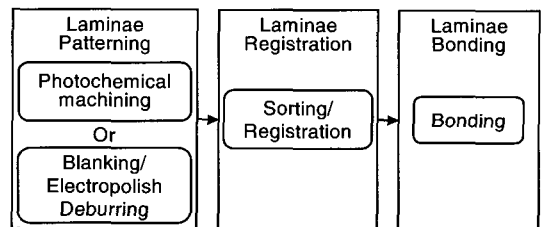


Fig. 2 Processing stages for the high-volume production of microchannel heat exchangers

최대 75×75mm의 크기와 100 μ m의 두께를 갖는 박판을 정렬, 이송할 수 있다. Table 1은 Fig. 3의 자동 분류 시스템에 사용되는 각 부품에 대한 설명을 나타내고 있다.

박판은 공압 장치를 이용한 매니플레이터에 의해 Fig. 4와 같은 형상의 트레이에 적층된다. 트레이는 Fig. 3 (a)의 Shim Handling Device 위에 장착되는데, 일렬로 공급되는 박판이 상하 왕복 운동과 회전 요동운동을 하는 매니플레이터에 의하여 트레이 위에 놓여진다. 매니플레이터는 회전운동을 위한 요동형 액추에이터, 상하 왕복 운동을 위한 공압 실린더, 흡착 패드형 그리퍼 등으로 구성된다. 작업 중 적층이 시작되는 박판과 적층이 끝나는 박판의 분리가 쉽도록 박리제를 바른 그래파이트(Graphite) 판을 중간에 적층한다. 이는 클램핑을 용이하게 하고 정렬을 정확하게 하는데 도움이

된다.

트레이는 Fig. 4와 같이 세워진 네 개의 포스트를 향하여 바닥이 15°경사지도록 설계되어 있으며 Fig. 3 (b)의 이송장치의 그리퍼 핑거가 아래로 삽입되어 적층 박판을 잡을 수 있도록 홈이 파여진 형태이다. 매니플레이터에 의하여 적층된 박판은 진동기(Vibrator)에 의하여 포스트 쪽으로 미끄러지며 정렬된다. 정렬 정도를 알아보기 위한 방법으로 50×50mm의 시편(재질 SUS304, 두께 0.2t)을 제작하여 실험을 수행하였다. 박판의 접합을 위해 확산 접합법(Diffusion Bonding)을 사용하였는데, 이는 최종 접합 정밀도가 5 μ m 이내의 성능을 갖고 있다. 본 연구에서는 매니플레이터에 의하여 적층된 박판의 최종 정렬 정도의 목표치를 μ m 이하로 설정하였다.

Fig. 5는 진동기를 이용하여 박판을 정렬한 후 표면조도를 이용하여 정렬도를 측정하는 모습을 나타내고 있다. 시험에 사용된 표면 조도계는 Mitutoyo Surfest 301 모델이었으며, 시험을 20회 반복해서 수행한 결과 최대 표면조도의 평균값은 28.5 μ m이었는데, 이는 목표치보다 두 배 정도 좋은 결과로서 곧바로 생산 시스템 설계에 적용할 수 있다.

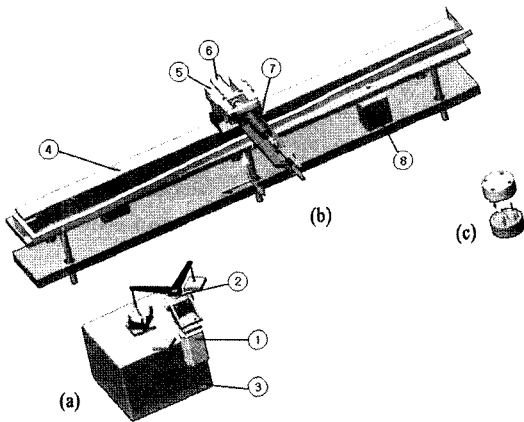


Fig. 3 Automated sorting system :
 (a) Shim handling device with suction pad
 (b) Transfer device with gripper
 (c) Molybdenum clamp for diffusion bonding

Table 1 Bill of Materials

NO.	Name	Unit	Quantity
1	Rotation Prevention Sheet Cylinder	EA	1
2	Oscillating Actuator	EA	1
3	Vibrator	EA	1
4	Rodless Combination Cylinder	EA	1
5	Cylinder Guide	EA	1
6	Double-acting Cylinder	EA	1
7	Double-acting Cylinder	EA	1
8	Short Stroke Double-acting Cylinder	EA	2

2.3 박판 접합 공정

정렬이 끝난 적층 박판은 Fig. 3 (b)와 같은 이송 장치를 통하여 Fig. 3 (c)쪽에 위치한 확산 접합용 진공 오븐(Vacuum Oven)으로 이송된다. 이송된 적층 박판은 오븐 안에서 Fig. 6과 같은 형태의 몰리브덴(Molybdenum) 클램프에 장착되고, 진공 오븐에서는 4, 5개 정도의 적층 박판이 확산 접합된다. 클램프에도 그리퍼의 핑거가 들어가도록 홈이 파여 있다. 그리퍼는 공압 실린더에 의하여 전후 운동을 하며, 로드리스(Rodless) 실린더에 의하여 진공 오븐으로 이송된다. 이송장치는 Fig. 3 (b)에서 볼 수 있듯이 트레이에서는 약 15°

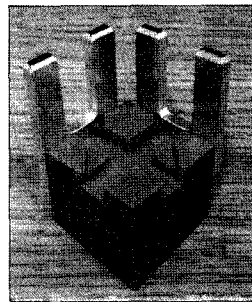


Fig. 4 Tray

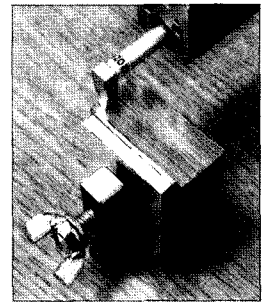


Fig. 5 Measurement of surface roughness

기울고, 진공오븐에서는 수평이 되도록 레일 가이드가 설계되었다.

진공 오븐에 열이 가해지면 적층된 박판은 클램프와의 열팽창계수(CTE) 차이에 의하여 발생하는 압력 차이로 인하여 접합이 이루어진다. 클램프의 재질인 몰리브덴은 적층되는 박판보다 열팽창계수가 적다. 아울러, 적층에 사용된 그라파이트는 클램프 바닥 홈이 접합할 때 적층 박판에 발생할 수 있는 압력 불균일 현상을 방지하는 역할을 한다.

3. 원가 산정 모델

마이크로채널 열교환기의 원가 모델은 다음과 같은 몇 가지 사항을 가정하여 마이크로채널 생산 시스템의 주요 장비 및 사이클 타임을 기반으로 산출되었다.

- ① 마이크로채널 열교환기 생산 시스템은 스테인레스강을 확산 접합하여 마이크로 적층구조로 생산한다. 생산 시스템은 1일 8시간, 1주 6일, 1년 52주간 가동된다.
- ② Fig. 1과 같은 대향류(Counter Flow) 유형의 장치에서 마이크로 적층구조는 최대 세 가지 박판 패턴을 갖는다.
- ③ 사용되는 박판은 다양한 두께와 패턴을 가질 수 있다.
- ④ 박판 패턴성형 공정은 하도급될 수 있으며, 협력업체들은 충분한 생산 능력을 가지고 있다.

3.1 박판 패턴성형 공정

광화학 및 블랭킹 가공 두 가지에 대하여 원자재비, 가공비, 간접비, 단위 시간당 임금 등을 조사하기 위하여 수 개의 협력업체로부터 정보를 수집하였다. 외부 협력업체로의 하도급을 가정하였으며, 이 경우 시설투자 비용은 고려하지 않았다.

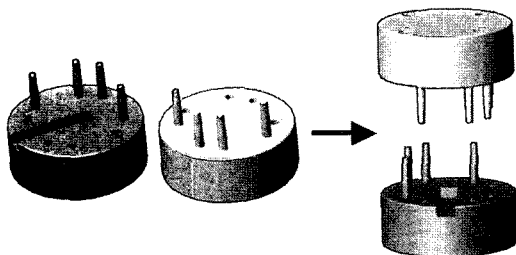


Fig. 6 Molybdenum clamp for diffusion bonding of the stack inside the vacuum oven

3.1.1 원자재비

원가 산정 모델을 개발하기 위해 선택된 원자재는 마이크로채널 열교환기등 MECS 응용분야에서 가장 많이 사용되는 SUS 304이다. 136kg 코일의 경우 단위 중량당 가격은 \$16.49/kg이다. 이는 길이가 대략 146m인데 0.5m 간격으로 판매된다.

3.1.2 광화학 가공

광화학 공정 장비의 대부분은 고정 노출 조리개를 갖는 카메라 시스템으로 구성되어 있다. 조사결과 협력업체의 장비로 마스크링할 수 있는 최대 패넬판 크기는 508mm×609mm를 초과하지 않았다. 패넬판 크기가 주어진다면 단위 작업에서 생산 가능한 박판의 수를 추산할 수 있기 때문에 이를 제한요소로 간주한다. 패턴의 복잡도는 단순(Simple), 보통(Medium), 복잡(High)의 3단계로 분류하였다. 이는 공구비용과 레티클(Reticle)의 원가가 패턴의 복잡도에 따라 영향을 받기 때문이다. Table 2는 이 분류 기준에 따라 협력업체로부터 얻은 1회 가공 비용과 마스크 원가를 나타내고 있다. 원가 산출 모델에서 이 가격은 매년 8%의 금리로 7년에 걸쳐 할부 상각되는 것으로 가정하였다. 광화학 가공과 블랭킹 가공 두 가지 모두에 대하여 원자재비, 가공비, 간접비, 단위 시간당 임금 등을 반영하기 위하여 수 개의 협력업체로부터 정보를 수집하였다. 외부 협력업체로의 하도급을 가정하였으며, 시설투자 비용은 고려되지 않았다.

보통 광화학 가공 협력업체는 스테인리스강(SUS 304)을 부식시키기 위한 물질로 염화 제2철을 사용하는데, 이는 0.00254mm/min의 부식율을 갖는다. 근로자의 시간당 임금은 원가 산정 데이터북⁽¹¹⁾에서 얻을 수 있는데 이 데이터북은 미국 워싱턴주 시애틀, 오레건 주 포틀랜드 지방에서의 광화학 가공분야의 예상 시간당 임금을 나타낸다. 이 데이터북을 통하여 산출된 시간당 임금은 \$19.88 이었다.

Table 2 One-time tooling costs and costs of the reticle for the photochemical machining process

Geometry Complexity	One-time Tooling Cost	Cost of the Reticle
Simple	\$225	\$250
Medium	\$500	\$600
High	\$1,200	\$1,500

Table 3 Tooling costs for the blanking process

Geometry Complexity	Tooling Cost
Simple	\$225
Medium	\$500
High	\$1,200

3.1.3 블랭킹 가공

블랭킹 가공 비용도 광화학 가공과 마찬가지로 박판 패턴의 복잡성에 영향을 받기 때문에 단순(Simple), 보통(Medium), 복잡(High)의 3단계로 분류하였다. Table 3은 협력업체를 통하여 얻은 블랭킹 가공비용에 대한 자료이다. 미국 워싱턴 주 시애틀, 오레건주 포틀랜드 지방의 블랭킹 임금은 시간당 \$20.05로 산출되었다⁽¹⁵⁾.

3.2 박판 분류 공정

박판 분류 공정에 있어서 주된 원가요소는 장비에 대한 설비투자인데, 자동 분류 시스템의 원가는 시스템의 요구 성능, 스피드 등에 따라 \$5,000~\$10,000로 산출된다. 본 논문에서 사용되는 시스템에서는 원가를 \$5,000으로 산정하였으며 매년 8%의 금리로 5년 동안 할부 상각된다고 가정하였다. 대량 생산에 필요한 자동 분류 시스템의 수는 생산능력에 의해 최종적으로 결정된다.

3.3 박판 접합 공정

박판 접합 공정의 주된 원가요소도 시설 장비에 대한 설비투자인데, 진공 오븐은 단가가 대략 \$250,000로 추산되었다. 대량 생산에 요구되는 진공오븐의 수도 생산율에 의해 결정되는데, 이 설비투자금액은 자동 분류 시스템과 마찬가지로 매년 8%의 금리로 7년 동안 할부 상각된다고 가정하였다.

3.4 기타 비용

간접비, 간접 재료비, 간접 활동비, 기타 간접비용 등의 공장 경상비용(overhead)이 원가 산출 모델에 고려되어야 하는데, 이는 총 공장 비용의 30%로 책정하였다⁽¹⁶⁾.

4. 원가 산정 모델에 대한 경제성 평가

마이크로채널 열교환기 생산 시스템에 대한 원가 산출을 위하여 Microsoft® Excel 2000 프로그램이 사용되었다. 먼저, 광화학 가공과 전기연마 디버링의 두 가지 생산 방법에 대하여 사이클 타임에 대한 정보를 입력시켜 각 생산율에

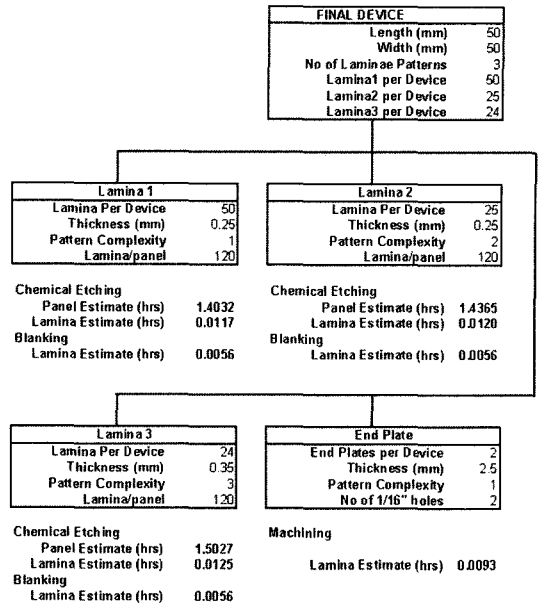


Fig. 7 Bill of materials for the baseline microlaminated structure

근거한 단위 제조원가를 산출하였다. Fig. 1과 같은 마이크로 적층구조가 경제성 평가를 수행하기 위한 기준으로 사용되었다. 이 구조는 세 개의 다른 박판패턴과 두 개의 엔드캡(Endcap)으로 구성되어 있으며, 그 형태는 50mm 크기의 정사각형이다. 장치 내의 각 박판은 패턴 복잡도와 두께가 다양한데, Fig. 7은 장치에 사용되는 재료에 대한 목록을 나타내고 있다.

원가 산정 모델에 사용된 각 공정의 사이클 타임은 다음과 같다.

- ① 광화학 가공 공정시 박판당 사이클 타임은 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 Lamina 1 0.0117시간, Lamina 2 0.0120시간, Lamina 3 0.0125시간이다. 이 공정에서 사이클 타임의 차이는 부식시간에 영향을 주는 박판 두께와 분류 공정 소요 시간에 영향을 주는 패턴의 복잡도에 따른다.
- ② 블랭킹과 전기연마 디버링의 조합 공정시 박판당 사이클 타임 : 0.0056시간
- ③ 양쪽 엔드캡 블랭킹 가공 및 두 개의 1.58mm(1/16") 구멍 드릴가공에 필요한 시간 : 박판당 0.0062시간
- ④ 자동 분류 시스템에서 분류에 필요한 시간 : 박판당

0.0004시간

⑤ 접합 공정을 완성하는데 필요한 사이클 타임 : 단위 스택(Stack)당 0.8125시간

사이클 타임에 대한 모든 정보가 원가 산출 모델에 입력된 후, 두 가지 방법의 생산율에 근거한 장비당 제조 원가를 구한다. 원가산출은 노동력, 재료 및 가공에 관련한 원가와 주요 설비투자를 포함하여 계산하였다. Table 4는 생산 단위가 각각 10, 100, 1,000, 10,000, 100,000일 경우의 장비당 단위 제조 원가를 나타내고 있고, Fig. 8은 이를 그래프로 보여주고 있다. 광화학 가공과 전기연마 디버링의 두 생산 방법의 손익 분기점이 189단위에서 발생하였고, 박판 크기가 50mm에서 75mm로 변경될 경우를 Fig. 9에서와 같이 손익분기점은 60단위에서 발생하였다.

경제성 평가에 있어서 “여러 대의 소형 열교환기와 한 대의 대형 열교환기 중 어느 쪽이 더 효율적인가?” 즉, 생산비용에 있어서 생산 단위와 장치 크기의 영향을 조사하기 위하여 Table 5와 같이 서로 다른 두 가지 생산율과 크기를 사용

Table 4 Manufacturing unit cost for different production rates for a 50mm square microlamination device.

Production Rate	Unit Cost	
	Photochemical Machining	Blanking/ Electropolish deburring
10	\$5,111.01	\$5,333.36
100	\$542.27	\$553.29
1,000	\$85.40	\$75.29
10,000	\$54.12	\$41.89
100,000	\$50.54	\$38.10

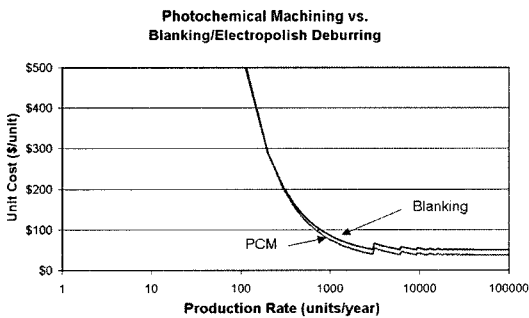


Fig. 8 Manufacturing unit cost for different production rates for 50mm square microlamination device

하여 분석하였다.

각 장치에서 등가 전열면적(Equivalent heat transfer area)은 열교환 면적과 생산율을 곱하여 구할 수 있는데, Table 5에서 계산한 결과 등가 전열면적은 $25 \times 10^6 \text{mm}^2$ 이다. Fig. 8, Fig. 9에서 생산 단위가 1,000 이상일 경우에는 광화학 가공보다 블랭킹/전기연마 디버링이 더 경제적이므로 이 방법을 사용하였다. Table 5에서 1,000개의 대형 열교환기를 생산하는데 소요되는 제조비용은 \$171.74로 소형 장치를 10,000개를 생산하는데 필요한 제조비용 \$41.89보다 약 4.1배 정도 비싸게 나타났다.

5. 결론

마이크로채널 열교환기와 같은 대부분의 MECS 장치에 관한 연구는 아직까지 시제품 제작이나 실험실 환경의 작업 수준에 머무르고 있다. 따라서, 경제성 분석을 위한 원가 자료가 부족하여 마이크로 적층기술과 관련된 원가산정 기법이 필요하다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 MECS의 일종인 마이크로 적층기술을 이용한 마이크로 채널 열교환기의 생산 시스템 모델링을 개발하고, 이에 대한 원가 산정을 통하여 경제성을 분석하였다.

Table 5. Effect of device size and production rate on the overall manufacturing cost

Production Rate	Device size (mm)	Unit Cost
		Blanking/ Electropolishing deburring
10,000	50x50	\$41.89
1,000	158x158	\$171.74

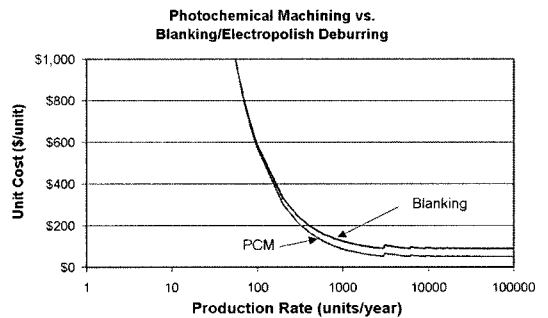


Fig. 9 Manufacturing unit cost for different production rates for 75mm square microlamination device

원가 산정 결과 박판 크기가 작을 경우에는 광화학 가공에 의한 생산 방법이 유리하였고, 박판 크기가 클 경우는 블랭킹/전해연마 디버링 생산 방법이 유리하였다. 등가 전열면적에서 비교한 결과, 박판 크기가 작은 소형 열교환기의 생산 비용이 적게 소요되었다. 아울러, 마이크로 박판 제조시 비용 측면에서 가장 큰 비중을 차지한 공정은 접합 공정이었다.

본 연구를 통하여 다른 연구과 유사하게 접합과정에서의 뒤틀림(warpage)이 패턴과정의 형상편차에 중요한 역할을 한다는 사실을 확인하였다^(17,18). 따라서 향후 마이크로 적층 기술에서 뒤틀림과 사이클 타임의 감소 등 접합공정 연구에 중점을 두어야 할 것이다. 장치의 크기와 생산 단위는 마이크로 적층제조장치의 총 제조비용에 중대한 영향을 미치므로 추후 대형 박판접합에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

참고 문헌

- (1) Brooks, 1999, "Mesoscale Combustor Evaporator Development," AES-Vol. 39, *Proceedings of the ASME, Advanced Energy Systems Division, American Society of Mechanical Engineers*, New York.
- (2) Hong, S. H., 1999, "Experiments and Modeling of a Musclic Laminar Plate Heat Exchanger," AES-Vol. 39, *Proceedings of the ASME, Advanced Energy Systems Division - American Society of Mechanical Engineers*, New York.
- (3) Paul, B. K. and Peterson, R. B., 1999, "Microlamination for Microtechnology-based Energy, Chemical, and Biological Systems," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Nashville, Tennessee, AES Volume 39, pp. 45~52, November 15-209.
- (4) Anderson, J. J., 1989, *U. S. Patent 4,875,619, Brazing of Ink Jet Print Head Components Using Thin Layers of Braze Material*.
- (5) Hershberg, E., Beenen, G., Boso, B., Krein, P., Marantz, R. and Murdock, B., 1988, "Manufacturing technology of the Tektronix digital ink jet head," *J. Imaging Technology*, 14: 124-128.
- (6) Wegeng, R. S., Call, C. J. and Drost, M. K., 1996, "Chemical system miniaturization," *Proceedings of the AIChE Spring National Meeting*, February.
- (7) Wegeng, R. S. and Drost, M. K., 1994, "Developing Miniature Energy Systems," *Mechanical Engineering*, ASME, New York, NY, September.
- (8) Martin, P. M., Bennett, W. D. and Johnson, J. W., 1996, "Microchannel Heat Exchangers for Advanced Climate Control," *Proc. SPIE*, Vol. 2639, pp. 82~88.
- (9) Matson, D. W., Martin, M. P., Bennett, W. D., Stewart, D. C. and Johnson, J. W., 1997, "Laser Micro-machined Microchannel Solvent Separator," *Proc. SPIE*, Vol. 3223, pp. 253~259.
- (10) Matson, D. W., Martin, P. M., Tonkovich, A. Y. and Roberts, G. L., 1998, "Fabrication of a Stainless Steel Microchannel Microcombustor Using a Lamination Process," *Proc. SPIE*, Vol. 3514, pp. 386~392.
- (11) Tonkovich, A. Y., Zilka, J. L., Wang, Y., LaMont, M. J., Fitzgerald, S., Vanderwiel, D. P. and Wegeng, R. S., 1999, *Proc. 3rd Intl. Conf. on Microreaction Technology*, Frankfurt, Germany.
- (12) Paul, B. K., Dewey, T., Alman, D. and Wilson, R. D., 2000, "Intermetallic Microlamination for High-Temperature Reactors," *4th Int. Conf. Microreaction Tech.*, Atlanta, GA, March 5-9.
- (13) Paul, B. K. and Terhaar, T., 2000, "Comparison of two passive microvalve designs for microlamination architectures," *J. Micromech. Microengr.*, 10: 15-20.
- (14) Martin, P. M., Matson, D. W., Bennett, W. D. and Hammerstrom, D. J., 1998, "Fabrication of plastic microfluidic components," *Proc. SPIE*, Vol. 3515, pp. 172~176.
- (15) Ostwald, P. F., 1988, *AM Cost Estimator Cost Estimating Database*, 4th Edition, Penton Publishing, Inc., Ohio.
- (16) Creese, R. C., Adithan, M. and Pabla, B. S., 1992, *Estimating and Costing for the Metal Manufacturing Industries*, Marcel Dekker, Inc., New York.
- (17) Kanlayasiri, K., Wattanutchariya, W. and Paul, B. K., "Aspect Ratio Limits in Microlamination due to Machining Methods," submitted for publication in the *J. of Mfg. Sci. and Engr.*
- (18) Thomas, J. and Paul, B. K., "Thermally-Enhanced Edge Registration (TEER) for Aligning Metallic Microlaminated Devices," submitted for publication in the *Proceedings of NAMRC XXX*.