

마이크로 광 조형 기술을 이용하여 미세 유체 시스템을 개발하기 위한 가상 조립 공정의 개발

강현욱*, 이인환+, 조동우**

Development of Virtual Assembly Process for the Fabrication of Micro-fluidic Systems Using Micro-stereolithography Technology

Hyun-wook Kang*, In Hwan Lee+, Dong-woo Cho**

Abstract

As it is difficult to construct a micro-fluidic system composed of micro-mixers, micro-channels and/or micro-chambers in a single process, an assembly process is typically used. The assembling and bonding of micro-parts, however, introduces other problems.

In this work, a virtual assembly process was developed that can be used to design various micro-fluidic systems before actual fabrication commences. In the process, the information required for the micro-stereolithography process is generated automatically. Consequently, complex micro-fluidic systems can be fabricated in a single process, thereby avoiding the need for additional assembly or bonding processes. Using the developed process, several examples were fabricated.

Key Words : 가상 조립 공정 (Virtual Assembly Process), 미세 유체 시스템 (Micro-fluid System), 마이크로 광 조형 기술 (Micro-stereolithography Technology)

1. 서론

최근 들어 미세 유체 시스템에 대한 필요성이 널리 인지되고 있으며, 이에 대한 많은 연구들도 수행되고 있다. 특히, 미세 화학과 미생물학 분야에서 많은 연구가 수행되고 있다. 일반적으로, 미세 유체 시스템은 마이크로 챔버, 마이크로 펌프 그리고 마이크로 믹서와 같은 여러 개의 단위 소

자들로 구성되어 있다. 그러나 이러한 미세 시스템들은 다수의 단위 소자들로 구성되어 있기 때문에, 단일 제작 공정을 통한 제작이 매우 어렵다. 이와 같은 단일 공정의 어려움으로 인하여, 일반적으로 미세 유체 시스템을 만들기 위해서는 단위 소자들의 조립공정이 요구된다. 그러나 마이크로 단위에서의 조립 공정은 마이크로 그리퍼(micro-

* 포항공과대학교 기계공학과 (khw@postech.ac.kr)
주소: 790-784 경북 포항시 남구 효자동 포항공과대학교 기계공학과
+ 영남대학교 기계공학부
++ 포항공과대학교 기계공학과

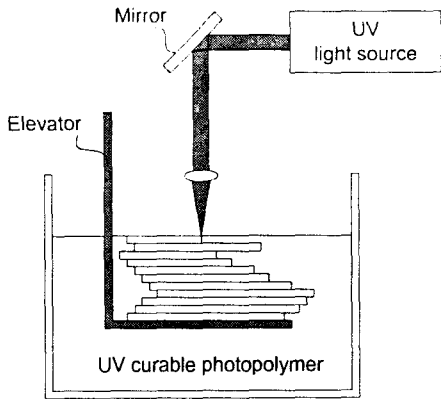


Fig. 1 Principle of micro-stereolithography.

gripper) 와 같은 조립을 위한 시스템이 필요하는 등 여러 가지 어려움을 동반하게 된다.

마이크로 광 조형 기술(micro-stereolithography technology)은 현재 산업 분야에서 널리 쓰이고 있는 광 조형(stereolithography) 기술을 응용하여 마이크로 크기의 제품을 제작하는 기술이다. 즉, Fig.1과 같이 수 μm 직경의 초점된 레이저 빔을 광 경화성 수지 표면 위에 주사하여 단면 형상을 성형하고, 이를 층층이 쌓아올려 원하는 3차원 형상을 얻어내는 것이다. 이러한 마이크로 광 조형 기술을 이용하면 여러 개의 단위 소자들로 이루어진 복잡한 미세 유체 시스템을 제작 후의 조립 과정이 필요 없는 단일 공정을 통하여 제작할 수 있다⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾. 그러나 마이크로 광 조형 기술을 이용하여 복잡한 미세 유체 시스템을 제작하기 위해서는 미세 시스템 전체를 한번에 성형하기 위한 성형정보를 필요로 하게 된다. 본 연구에서는 복잡한 미세 유체 시스템을 제작하는데 필요한 성형 정보를 얻기 위한 미세 유체 시스템의 가상 조립 공정을 개발하였다. 개발된 공정은 두 가지 주요한 기능을 수행하도록 개발되었다. 첫 번째는 복잡한 미세 유체 시스템을 제작하기 위한 성형 정보의 획득이다. 그리고 두 번째는 가상 공간상에서 각 단위 소자의 자유로운 가상 조립을 통하여, 다양한 미세 유체 시스템의 디자인이 가능하도록 하는 것이다.

이러한 가상 조립 공정을 개발하기 위하여, 미세 유체 시스템을 구성하는 각 단위 소자들의 성형 정보를 자유로이 이용하기 위한 정보 저장 체계를 구축하였다. 그리고 가상 조립 공정을 수행하기 위한 가상 조립과 성형 정보 추출 알고리즘을 개발하였다. 마지막으로 개발된 가상 조립 공정의 효율성을 보여주기 위하여 여러 가지 다른 형태의 미세 형

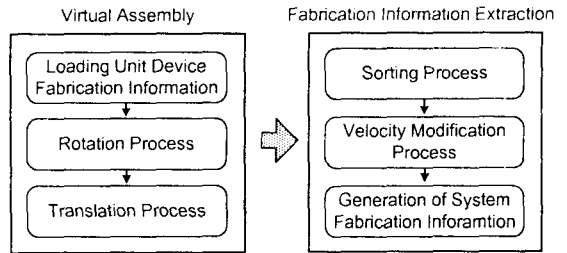


Fig. 2 Flow chart of the virtual assembly process.

액형 진단 시스템을 개발하였다.

2. 가상 조립 공정의 개발

2.1 개요

가상 조립 공정은 가상 공간상에서 단위 유체 소자들의 자유로운 가상 조립과 제작되는 시스템의 통합된 성형 정보를 얻기 위하여 개발되었다. 이러한 가상 공정을 가능하게 위하여 본 연구에서는 성형 정보의 정보 저장체계를 구축하였고, 가상 조립 알고리즘과 성형 정보 추출 알고리즘을 개발하였다. 개발된 가상 조립 공정의 흐름도는 Fig. 2와 같다.

2.2 성형 정보의 정보 저장 체계 구축

마이크로 광 조형 기술을 이용한 제품 성형과정에서 필요로 하는 정보를 저장하기 위해서는 우선, 정보 저장 체계를 구축하여야 한다. 적층 성형을 그 원리로 하는 광 조형 기술의 단면 성형 과정은 성형 전 새로운 층을 만들기 위한 층진 과정과 레이저 빔을 주사하여 단면 형상을 만드는 주사과정으로 나눌 수 있다.

이런 광 조형 기술의 적층 성형 특징을 반영하여, Fig.3에서 보는 것처럼 단위 유체 소자에 대한 성형 정보 체계를 여러 개의 층(layer)으로 나누었다. 그리고 각 층에는 고유의 단면 성형 정보와 층 두께(layer thickness)에 대한 정보를 가지게 하였다. 단면 성형 정보는 레이저 빔의 주사 경로들로서 표현되며, 각각의 경로는 시작점과 도착점, 주사 속도 그리고 직선 혹은 곡선과 같은 레이저 빔의 기하학적 경로에 대한 정보를 가지게 하였다.

한편, 레이저 파워와 층진 과정(layer thickness generation process)에 대한 정보는 모든 층이 공유해야 할 정보로 Fig.3에 나타난 바와 같이 층과 독립적인 구조를 가지도록 하였다.

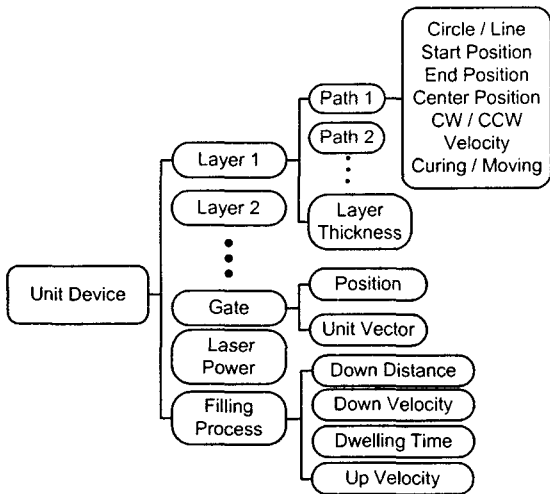


Fig. 3 Data structure of a unit device.

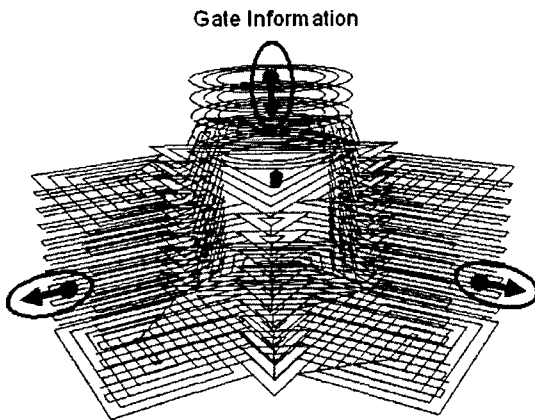


Fig. 4 Unit device and gate information.

마지막으로 유체소자의 출입구를 나타낼 문(Gate)에 대한 정보를 저장하기 위한 장소를 지정하였다. 이는 유체 소자의 출입구의 위치와 유체가 흘러갈 방향에 대한 방향 벡터를 정의하기 위한 장소이다.

Fig.4 은 이러한 정보저장체계로 저장된 한 단위 유체 소자의 성형 정보 및 문의 정보를 3차원 그래픽으로 표현한 것이다.

2.3 가상 조립 과정

Fig. 4에서 보는 것처럼 가상 공간상에서 각 단위 소자들은 구성하는 성형정보를 이용하여 여러 개의 선들로 나타나 있다. 각각의 선들은 각 소자들을 성형하기 위한 레이저 빔

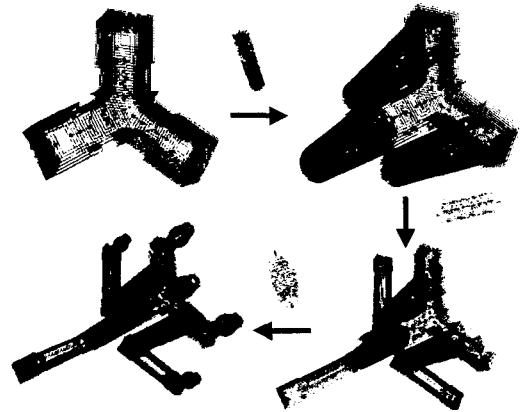


Fig. 5 Virtually assembled micro-fluidic system.

의 주사 경로들을 표현한 것이다. 이러한 그래픽 표현과 개발된 가상 조립 알고리즘을 이용하여 미세 유체 시스템은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 가상 조립된다.

이러한 가상 조립 과정은 각 유체 소자들의 회전과 이동 과정을 통하여 이루어진다. 그리고 각각의 과정들은 단위 소자들을 구성하고 있는 문(gate)의 정보를 이용하여 이루어진다. 문의 정보는 단위 유체 소자가 가지고 있는 입구와 출구의 위치와 방향에 대한 정보를 가지고 있어 각 유체 소자들을 연결하는데 이용된다. Fig.4에서 단위 유체 소자 안에 그래픽 적으로 표현된 문의 정보를 볼 수 있다. 이동 과정에서는 문의 위치 정보를 이용하게 되고, 회전 과정에서는 문의 방향 벡터 정보를 이용하여 가상 조립 과정이 이루어진다.

2.4 성형 정보 추출 과정

가상 조립 과정을 통하여 단순히 그래픽 적으로만 조립 되어 있는 미세 유체 시스템의 성형 정보를 얻기 위한 과정이 성형 정보 추출 과정이다. 이러한 성형 정보 추출 과정은 세 가지 단계로 이루어져 있다. 먼저 미세 유체 시스템을 구성하는 단위 소자들의 층별 구성을 알기 위한 분류 과정이다. Fig. 6은 분류 과정을 통하여 만들어지는 색인 정보의 한 예를 보여주고 있다. 색인 정보에는 Fig. 7에서 보는 것과 같이 여러 개의 단위 소자들로 이루어진 복잡한 미세 유체 시스템의 각 층을 구성하는 단위 소자들의 성형정보의 위치를 가지게 된다. 예를 들어, Fig. 6에서 미세 유체 시스템의 5번째 층은 첫 번째 단위 소자의 세 번째 층과 3번째 단위 소자의 두 번째 층으로 구성되어 있는 것이다. 두 번째는 속도 수정 과정이다. 이 과정은 각 유체 소자들의 성형

	Unit Device 1	Unit Device 2	Unit Device 3	Unit Device 4	
Layer 7	(1,4)		(3,4)	(4,3)	Z=0.4mm
Layer 6		(2,3)	(3,3)		Z=0.35mm
Layer 5	(1,3)		(3,2)		Z=0.3mm
Layer 4		(2,2)	(3,1)	(4,2)	Z=0.25mm
Layer 3	(1,2)				Z=0.2mm
Layer 2		(2,1)			Z=0.15mm
Layer 1	(1,1)			(4,1)	Z=0.1mm

(Unit Device Number, Layer Number)

Fig. 6 Example of the index information.

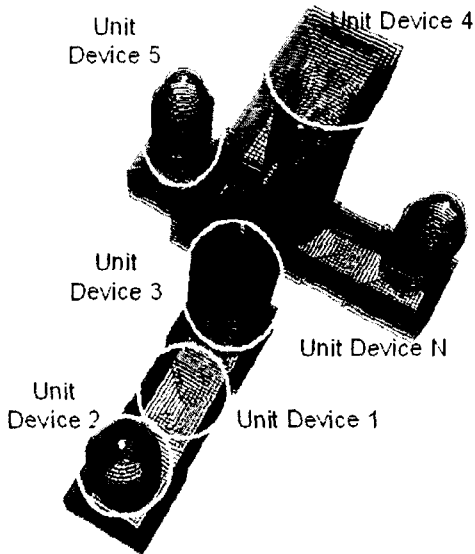


Fig. 7 Example of a micro-fluidic system.

정보인 레이저 파워 정보를 수정하여 주기 위한 과정이다. 이것은 미세 시스템을 구성하는 각 소자들 간에 모든 레이저 파워 정보가 서로 다를 때 이를 조율하여 주기 위한 과정이다. 마이크로 광 조형 기술에서 레이저가 광 경화성 수지에 주사 되었을 때, 주사된 에너지의 크기에 따라 경화된 형상이 변하게 된다. 그리고 주사되는 에너지의 크기는 레이저의 파워와 주사 속도에 의하여 결정된다. 속도 수정 과정

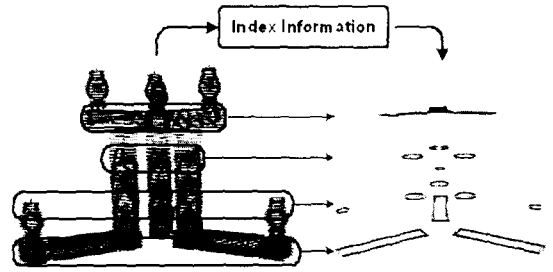


Fig. 8 Generation of fabrication information for a micro-fluidic system.

은 마이크로 광 조형 기술의 이러한 특징을 이용하여 단위 소자의 레이저 파워 정보가 변했을 때 주사 속도를 적절히 조절하여 같은 크기의 에너지가 주사되도록 주사 속도를 조절하여 준다. 예를 들어 레이저 파워 P_{old} 가 P_{new} 로 변했을 때, 레이저 주사 속도 v_{old} 는 식(1)에 의하여 v_{new} 로 바꾸어 주면 같은 에너지가 주사된다.

$$v_{new} = P_{new} \times v_{old} / P_{old} \quad (1)$$

세 번째 단계는 미세 유체 시스템의 성형 정보 생성 과정이다. 성형 정보 생성 과정은 앞서 소개된 색인 정보와 속도 수정 과정에 의하여 수정된 단위 소자의 성형정보들을 이용하여 새로운 미세 유체 시스템의 성형 정보를 재구성 하게 된다. Fig. 8은 성형 정보 생성 과정을 이용하여 각 단면 정보를 재구성하는 과정을 간단하게 그림으로 표현한 것이다.

3. 단위 유체 소자 및 미세 유체 시스템 제작

3.1 단위 유체 소자 제작

미세 유체 시스템이나 μ -TAS에서 많이 쓰이고 있는 단위 유체 소자로는 마이크로 믹서, 채널 및 챔버 등을 들 수 있다. 이에, 본 연구에서는 마이크로 광 조형 기술을 이용하여 가장 기본적인 소자인 마이크로 채널, 믹서 및 챔버 등을 제작하였다.

Fig.9는 제작된 유체 소자들을 보여 주고 있다. Fig.6 (a)은 카오스 혼합 원리를 이용한 BEKM (Barrier Embedded Kenics Micromixer)을 보여준다⁽⁴⁾⁽⁵⁾. 그리고 Fig.9 (b),(c)는 제작된 마이크로 채널 및 각 소자를 연결시켜 줄 연결관을 보여 주고 있다. 마지막으로 Fig.9 (d)는 마이크로 연결관을 이용한 마이크로 채널 연결에 대한 개략도

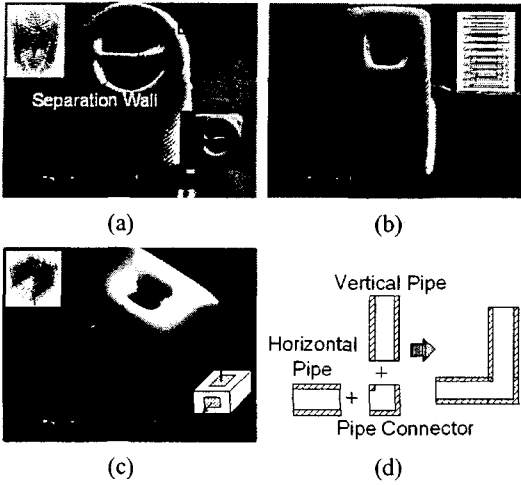


Fig. 9 Developed micro-fluidic unit devices.

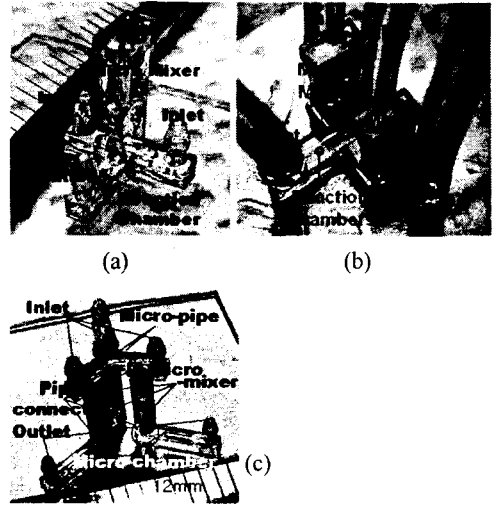


Fig. 10 Developed micro-ABO blood typing systems.

를 보여주고 있다.

3.2 미세 혈액형 진단 시스템의 개발

개발된 가상 조립 공정의 효율성을 확인하기 위하여, 단위 유체 소자들이 조립된 여러 가지 형태의 미세 혈액형 진단 시스템을 개발하였다. Fig.10은 제작된 3가지 종류의 미세 혈액형 진단 시스템들을 보여주고 있다. Fig. 10(a)은 2개의 유체 입구(inlet)와 1개의 마이크로 믹서(micro-mixer), 1개의 마이크로 챔버와 1개의 유체 출구(outlet)로 이루어져 있는 반면에, Fig. 10(b)은 3개의 유체 입구와 2개의 마이크로 믹서, 2개의 마이크로 챔버로 이루어져 있다. 그리고 Fig. 10 (c)은 4개의 유체 입구와 3개의 마이크로 믹서, 3개의 마이크로 챔버로 이루어져 있다. 각 시스템들은 한번의 실험으로 확인할 수 있는 반응의 개수에 따라 구분할 수 있다. Fig.10 (a)는 1개의 시약과 혈액의 응집 반응을 그리고 Fig.10(b)는 두개의 시약과 혈액의 응집 반응을 확인할 수 있다. 마지막으로 Fig.10(c)는 3가지 종류의 시약과 혈액과의 응집 반응을 확인할 수 있도록 개발되었다.

본 연구에서 개발된 가상 조립 공정을 이용하여 다양한 종류의 마이크로 시스템을 개발하였으며, 이를 통하여 개발된 공정이 다양한 형태의 미세 유체 시스템을 개발하는데 적절한 성능을 발휘한다는 것을 성공적으로 확인할 수 있었다.

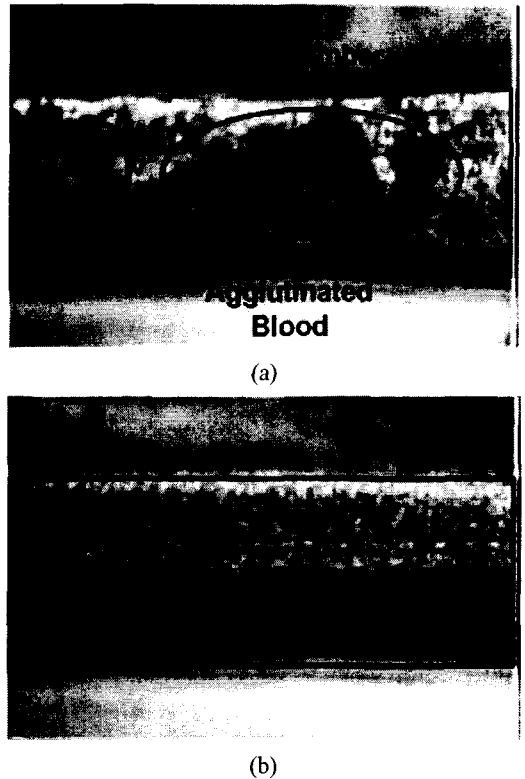


Fig. 11 Blood Typing experimental result of micro-ABO blood typing systems.

3.3 개발된 미세 진단 시스템을 이용한 혈액형 진단 실험

가상 조립 공정을 이용하여 개발된 미세 혈액형 진단 시스템을 이용하여 혈액형 진단 실험을 수행하였다. 일반적으로 알려진 것처럼 A형 혈액형과 시약 anti-A가 섞이게 되면 응집반응이 일어나게 된다. 반면에 혈액형 A에 진단 시약 anti-B가 섞이면 응집반응이 일어나지 않는다. 본 실험에서는 이러한 응집 반응을 유도하기 위하여 개발된 Fig. 10(a)의 미세 혈액형 진단 시스템에 주사기 펌프를 사용하여 A형 혈액형과 시약 anti-A와 anti-B를 주입하였다.

Fig. 11은 주사기 펌프를 사용하여 혈액과 시약들을 주입한 후 미세 시스템의 챔버내에서 일어난 반응의 사진을 보여주고 있다. Fig. 11(a)는 A형 혈액과 시약 anti-A가 주입 되었을 때, Fig. 11(b)는 A형 혈액과 시약 anti-B가 주입되었을 때의 반응 챔버 안의 반응을 CCD 카메라로 촬영한 것이다. Fig. 11에서 볼 수 있는 것처럼 응집 반응이 적절히 일어나고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이로써 개발된 미세 혈액형 진단 시스템이 적절히 작동한다는 것을 확인할 수 있었다.

본 실험을 통하여 본 연구에서 개발된 가상 조립 공정이 여러 개의 단위 소자들로부터 이루어진 복잡한 미세 유체 시스템을 개발함으로써 그 유용성을 확인할 수 있었다.

4. 결론

마이크로 광 조형기술을 이용하여 마이크로 믹서, 채널 및 챔버 등을 제작하고, 이 단위 소자들을 이용하여 특정한 기능을 수행하는 미세 유체 시스템을 만들기 위한 조립방안에 관한 연구를 수행하였다.

이 조립방안에 대한 본 연구의 목표는 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫 번째는, 단위 유체소자를 성형 전 컴퓨터상에서 전자 데이터로써 조립하는 가상 조립 공정을 가능하게 하는 것이다. 두 번째는 모듈별로 개발된 단위 유체 소자를 제작하려는 제품의 목적에 따라 자유로운 구성이 가능하게 하는 것이다.

이에 본 연구에서는 단위 유체 소자를 컴퓨터상에서 단위 모듈로써 사용하기 위하여 성형정보의 전자정보 체계를 구축하였다. 또한, 모듈별로 개발된 단위 유체소자를 성형 전에 그 목적에 따라 자유로운 구성을 가능하게 하기 위한 가상 조립 소프트웨어를 개발하였다. 마지막으로, 마이크로

믹서, 채널 및 챔버 등의 단위 유체소자를 제작하고, 개발된 가상 조립 공정을 사용하여 여러 가지 형태의 미세 혈액형 진단을 개발하였다. 그리고 혈액과 시약을 사용한 진단 시스템의 작동 여부의 확인을 통하여 개발된 가상 조립 공정의 유용성을 확인할 수 있었다.

5. 후기

본 연구는 산업자원부 산업기반기술개발사업인 차세대신기술개발사업의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Ikuta, K., Hirowatari, K., 1993, "Real three-dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding," Proceedings of the IEEE international Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'93), Fort Lauderdale, FL, 7-10 February 1993, pp. 42~47.
- (2) Bertsch, A., Lorenz, H., Renaud, P., 1999, "3D micro-fabrication by combining microstereolithography and thick resist UV lithography," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 73/1-2, pp.14~23.
- (3) Lee, I.H., Cho, D.W., 2003, "Microstereolithography photopolymer solidification patterns for various laser beam exposure conditions," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 22/5-6, pp. 410~416.
- (4) D. S. Kim, S. W. Lee, T. H. Kwon and S. S. Lee, 2002, "Barrier Embedded Chaotic Micromixer," Proc. mTAS 2002 Symposium, Nara, Japan, Nov. 3-7, pp. 757-759.
- (5) Kim, D.S., Lee, I.H., Kwon, T.H., Cho, D.W., 2003, "A NOVEL CHAOTIC MICROMIXER: BARRIER EMBEDDED KENICS MICROMIXER," Proceedings of Micro Total Analysis Systems 2003, Vol. 1, pp. 73~76.