

◆ 특집 ◆ 3 차원 임의형상제작 기술 및 응용

# SLS 공정에서 레이저 스캔 패스에 따른 기계적 특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Mechanical Characteristics along a Laser Scan Path in the SLS Process

배성우<sup>1</sup>, 김동수<sup>1,✉</sup>, 최경현<sup>2</sup>, 유성연<sup>3</sup>  
Sung Woo Bae<sup>1</sup>, Dong Soo Kim<sup>1,✉</sup>, Kyung Hyun Choi<sup>2</sup> and Seong Yeon Yoo<sup>3</sup>

1 한국기계연구원 나노융합기계연구본부 (Nano-Mechanical System Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials)

2 제주대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechanical Engineering, Cheju National Univ.)

3 충남대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National Univ.)

✉ Corresponding author: kds671@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7152

Key Words: Solid Freeform Fabrication (임의형상제작), Selective Laser Sintering (선택적 레이저 소결), Laser Scan Path (레이저 주사 경로), Digital Mirror System (디지털 미러 시스템), Tensile Stress (인장강도), Surface Roughness (표면거칠기)

### 1. 서론

제품 개발 과정에서 이루어지는 시제품의 빠른 제작 및 수정은 제품 개발 기간 단축에 따른 제품의 시장경쟁력과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 다양한 공정 및 소재를 이용한 3 차원 임의형상제작(SFF) 시스템의 수요가 지속적으로 증가하고 있다.

3 차원 임의형상제작(SFF) 시스템 가운데 SLS (Selective Laser Sintering) 공정은 제작하고자 하는 임의형상을 단면 형상대로 원하는 두께만큼 슬라이싱하여 슬라이싱된 단면 형상대로 첫번째 층을 레이저를 조사하여 소결시킨 뒤, 조사된 단면 위에 새로운 파우더를 적층하는 방식을 반복적으로 수행하여 최종적인 3 차원 형상을 제작하는 공정이다. SLS 공정은 공정 중에 지지대를 사용하지 않는 장점을 가지고 있으며,<sup>1</sup> 다른 3 차원 임의형상 제작 시스템에 비해 제작 속도 및 형상정밀도가 높은 장점이 있다.

하지만 SLS 공정 특성상 슬라이싱된 하나의 단

면에 대해 조사되는 레이저 빔의 크기가 항상 일정한 관계로 조사되지 말아야 하는 부분의 경계를 넘어서 조사되는 경우, 또는 조사되는 레이저 빔의 크기보다 단면 형상이 작은 부분에 대해 레이저를 조사하는 경우에 전체적인 3 차원 형상의 정밀도가 저하되는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 극복하고자 다양한 연구가 수행 중에 있으며, 특히 본 연구에서는 기존의 시스템에서 가지고 있었던 형상정밀도 저하 문제뿐만 아니라 제작 속도를 증가시키고자 DMS(Digital Mirror System)를 제안하였다.<sup>2</sup>

DMS 는 슬라이싱된 하나의 단면에서 가공하고자 하는 부분의 형상(미세 부분 및 넓은 해칭 면)에 대해 각각 레이저 빔의 스팟 사이즈를 변경함으로써 형상 정밀도 및 제작 속도를 높이고자 하는 것이다. 이러한 시스템을 구축하기 위해 기존의 고정식 빔 익스팬더(Beam Expander) 대신 가변형 빔 익스팬더(Variable Beam Expander)를 사용하여 레이저 빔 크기를 변경하여 공정연구를 진행하였다.

따라서 본 연구에서는 DMS 를 적용한 SLS 공정에서 레이저를 이용한 소결 시 시간에 따른 열에너지 분포에 의한 소결율의 변화 및 이러한 소결율의 변화에 따른 제작물의 수축이나 왜곡 등의 발생 등에 대한 공정 연구를 수행하였으며, 특히 기계적 특성에 대한 연구를 수행하여 최적의 공정 조건을 확립하고자 하였다.

## 2. 디지털 미러 시스템

### 2.1 디지털 미러 시스템 개념

디지털 미러 시스템은 SLS 공정에서 조사되는 레이저 빔의 크기 및 속도를 단면 형상의 복잡도 및 넓이에 따라 가변하여 조사함으로써 전체적인 형상정밀도 및 제작속도를 향상시키고자 도입한 새로운 개념의 시스템이다.

기존의 SLS 공정에서는 조사되는 레이저 빔의 크기 및 속도가 일정하기 때문에 Fig. 1 과 같이 미세한 부분에 대한 형상정밀도가 저하되는 경향이 있다. 이러한 이유는 조사되는 레이저의 빔 크기 및 속도는 일정한 것에 대해 파우더 표면이 받는 열에너지가 넓은 면적보다 작은 면적에서 크기 때문에 열에너지의 확산에 의해 소결되지 말아야 하는 부분까지 소결되는 현상에 의해 발생하게 된다.

따라서 디지털 미러 시스템은 이러한 현상을 최소화 하고자 소결하고자 하는 단면 형상의 복잡도 및 크기에 따라 넓은 해칭면에 대해서는 굵은 레이저 빔과 느린 속도, 미세한 부분에 대해서는 작은 레이저 빔과 빠른 속도를 이용하고 중간 크기에 대해서는 기존의 연구에서 사용한 레이저 빔의 크기와 속도를 적용하여 전체적인 제작속도 및 형상정밀도를 높이고자 하였으며, Fig. 2 에 개념도를 나타내었다.<sup>3</sup>

### 2.2 디지털 미러 시스템 작동원리

기존의 SLS 공정을 이용한 SFF 시스템은 주사 경로를 입력 받은 다음 주사 mirror 를 초기화 시키고 가공 명령(mark)과 다음 가공지점으로 이동시키기 위한 이동 명령(jump)으로 mirror 를 구동시킨다. 하나의 층의 소결이 완료되었을 경우에는 베드 제어기(bed controller)로 새로운 파우더 도포를 위한 신호를 보내고 도포 완료 신호가 입력될 때까지 대기한다. 이 때 mirror 를 home 에 위치시키고 정렬 한 후 다음 층을 가공하게 된다. 이러한 과정을 모든 layer 에 대해서 반복함으로써 전체

형상에 대한 가공이 완료된다.

이에 비해 Digital Mirror System 은 주사 경로를 입력 받은 다음 주사 미러와 Expander 를 초기화 시키고 슬라이싱된 단면에 대한 scanner, Expander, Laser 정보를 입력하게 된다. 입력된 데이터를 바탕으로 Hatching 면과 Boundary 를 차례로 소결한 후 이후 공정은 기존 연구와 마찬가지로 베드 제어기 (bed controller)로 새로운 파우더 도포를 위한 신호를 보내고 도포 완료 신호가 입력될 때까지 대기하게 된다. 이 때 mirror 를 home 에 위치시키고 정렬한 후 다음 층을 가공하게 된다. Fig. 3 은 Digital Mirror System 의 작동원리를 나타내었다.<sup>3</sup>

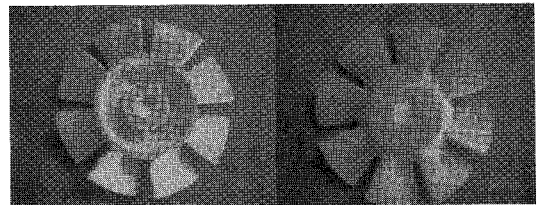


Fig. 1 Fabricated 3D model by using the existing SFF system

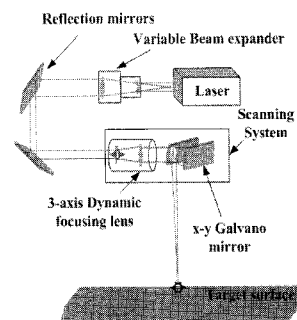


Fig. 2 Schematic representation of Digital Mirror System

### 2.3 주사경로 생성

SFF 시스템에서 주사경로는 가장 우선적으로 고려되어야 하는 레이저 제어 알고리즘이다. 주사경로의 생성은 가공품의 정밀도, 전체 가공시간 및 효율성에 매우 큰 영향을 미치는 부분으로 주사경로의 오차는 SFF 시스템에 치명적인 결함으로 작용할 수 있다. 그러므로 보다 정확한 주사경로 생성 및 추종 알고리즘의 개발은 SFF 시스템에서 반드시 선행 연구되어야 할 내용이다.

주사경로의 생성은 3 차원 모델링 형상으로부터 슬라이싱 단면을 생성시키고 이렇게 생성된 단면으로부터 주사점(scan point)을 구한다. 슬라이싱 단

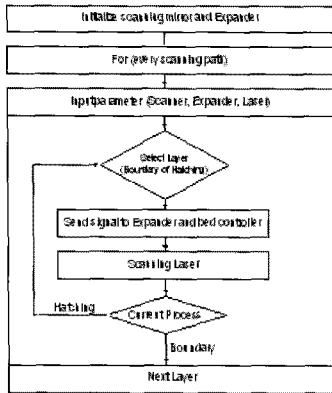


Fig. 3 Flowchart for Laser scans control

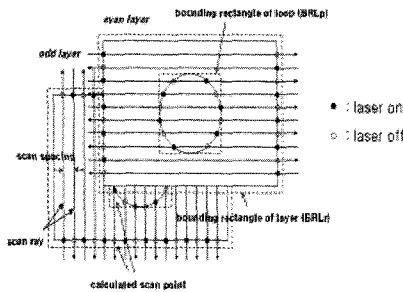


Fig. 4 Calculated scan point

면에 대한 주사경로 생성 알고리즘은 주사선(scan ray)을 주사간격만큼 옮겨가면서 윤곽 선분과의 교점을 연속으로 구하는 것이다. 주사선과 윤곽 선분과의 교점 계산 시간을 줄이기 위해서 Fig. 4 에서와 같이 하나의 레이어(layer) 안에 존재하는 모든 루프에 대하여 사각형을 경계로 하는 BRLp (Bounding Rectangle of Loop)를 설정하여 주사선이 이 경계와 만나지 않을 경우에는 루프를 건너뛰어 다음 루프에서 계산하게 된다.<sup>4,5</sup>

역분할 주사경로 알고리즘은 기본 주사경로 생성 알고리즘으로부터 DMS 를 적용하기 위한 기본적인 알고리즘이다. 주사경로는 레이저를 실제 주사하여 단면 형상을 이루는 마크(mark)와 하나의 주사점에서 다음 주사점으로 이동하는 점프로 구성되는데, 영역분할 주사경로의 생성은 기존의 주사경로 생성 방법에서 불필요한 레이저의 점프구간을 제거함으로써 가능하다. 영역분할 주사경로의 생성은 주사단면을 여러 개의 영역으로 분리하여 주사경로를 재배열하기 때문에 DMS 를 위한 영역분할 주사경로 생성을 가능하게 하고, 불필요한 점프구간을 제거하여 이동구간을 최소화시켜

전체 가공시간의 단축과 가공 정밀도 및 효율을 향상시킬 수 있다.<sup>4,5</sup>

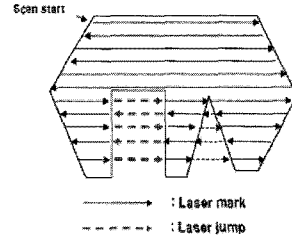


Fig. 5 Simple Scan path

Fig. 5 와 같은 기존의 단순한 지그재그 형태의 주사경로는 불필요한 주사경로의 이동이 많아 불필요한 점프구간을 많이 발생하게 된다. 영역분할 주사경로의 경우 Fig. 5 와 같은 단순한 지그재그 형태의 주사경로를 재배열하여 최소한의 레이저 이동구간이 발생하도록 하는 알고리즘으로 이를 통하여 주사효율을 향상시키고, DMS 적용 시 기본이 되는 주사경로 생성 알고리즘이다.<sup>4,5</sup>

Fig. 6 은 불필요한 점프영역을 제거하기 위한 영역분할 방법을 나타낸다. Region1, Region2, Region3, Region4 로 분할된 영역을 중심으로 각 주사영역에 주사경로를 재배열하고 Region1→Region2→Region3→Region4 의 순서로 이웃하는 주사 영역을 재 저장함으로써 새로운 배열을 갖는 주사경로를 생성할 수 있다. Fig. 6 에서와 같이 이렇게 생성된 주사경로는 점프구간이 현저하게 감소되었음을 알 수 있다. 이러한 주사경로의 생성은 직선상에 있는 주사선의 숫자에 의해서 단순히 결정될 수 있다.<sup>4,5</sup>

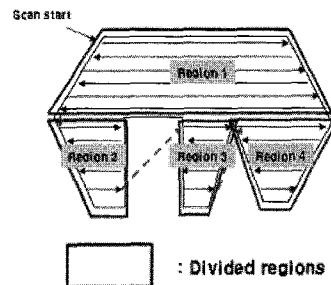


Fig. 6 Reconstructed Scan path

### 3. 디지털 미러 시스템 특성 연구

#### 3.1 시편 제작

DMS(Digital Mirror System)을 구축하여 레이저 빔 스팟 사이즈를 변경해 가며 소결하였을 때 그 소결 특성을 파악하기 위해 각각의 레이저 빔 스팟 사이즈에 대해 소결 실험을 행하였다. 특히 powder 에 전달되는 에너지 밀도의 양에 따른 over sintering 및 curling 발생하는 정도, 제품의 형상정밀도, 강도 등의 분석에 중점을 두었다. 여기에서 슬라이싱된 하나의 단면에 대해 다양한 레이저 빔 스팟 사이즈를 적용하여 파우더가 받는 에너지 밀도가 동일하게 유지되기 위한 방법은 2 가지 정도로 요약될 수 있다. 하나는 동일한 Scan Speed 에 Laser power 및 Scan Space 를 달리하는 방법과, 다른 하나는 동일한 Laser power 에 Scan Speed 및 Scan Space 를 달리하여 파우더가 받는 에너지 밀도를 같게 하는 방법이 있다. 이 2 가지 방법에 의해 파우더가 받는 에너지 밀도의 양을 보상해 줄 수 있으며, 본 연구에서는 다소 용이한 후자의 방법을 선택하여 실험을 행하였다. 또한 기존의 연구에서 얻어진 결과를 바탕으로 Laser power(18W), Layer thickness(100um), Build room Temp.(178℃)는 동일 조건으로 하여 실험을 행하였다. 특히 DMS (Digital Mirror System)에 적용하고자 하는 레이저 빔 스팟 사이즈의 크기와 Scan Speed 는 제작 공정 시간 단축을 위해 기존의 연구에서 고찰한 조건을 바탕으로 각각의 레이저 빔 스팟 사이즈에 대해 일정한 값을 바탕으로 실험을 행하였다. Table 1 에 소결 특성 실험을 하기 위한 실험 조건을 나타내었으며, 각각의 레이저 빔 스팟 사이즈 이상의 Scan Space 를 갖는 조건에 대해서는 시편을 제작하지 않았다. Fig. 7 에 제작된 시편을 보여주고 있다.

Table 1 Condition of Sintering Test

spot size (μm) / Magnification	Scan Speed (m/s)	Scan Space (mm)
300 / x8	7	0.2, 0.3
500 / x5	5	0.3
800 / x3	2	0.5, 0.6, 0.8

3.2 강도 특성

기존 공정조건으로 제작된 시편을 기준으로 각각의 레이저 빔 스팟 사이즈에 따라 제작된 시편의 기계적 강도를 비교해 보았다. 인장 강도 측정

은 Instron 5538 만능시험기를 이용하였으며, 각 스팟 사이즈 별로 4 회씩 실험하여 그 평균값을 데이터화하였다. Fig. 8 은 데이터 결과를 그래프로 도시한 것이다.

각각의 레이저 빔 스팟 사이즈에 대해 제작한 시편의 인장강도 시험 결과를 Table 2 에 나타내었다. 시험 결과 각각의 레이저 빔 스팟 사이즈에 따른 Scan space 의 중첩 비율에 대해 레이저 빔 스팟 사이즈가 작은 것이 강도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기준 시편인 C 와 비교해 보았을 때 30% 정도의 수준이며, 레이저 조사 시 각각의 레이저 빔 스팟 사이즈에 대해 Scan space 의 영향보다는 Scan speed 의 영향이 클 것으로 예상된다.

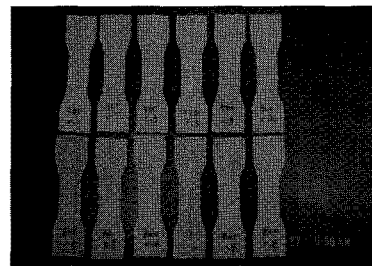


Fig. 7 Fabricated Specimens

Table 2 Tensile Stress test

	A	B	C	D	E	F
Condition	300um/0.2mm	300um/0.3mm	500um/0.3mm	800um/0.5mm	800um/0.6mm	800um/0.8mm
Max. load (kN)	0.533	0.637	1.43	2.78	2.39	1.20

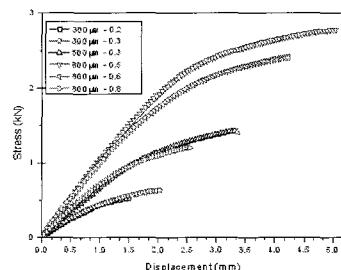


Fig. 8 Tensile test

3.3 DMS 적용 시편 제작 및 강도 측정

Digital Mirror System 를 적용하여 성능 평가를 위해 Table 3 과 같은 공정 조건에 의해 Fig. 9 와 같은 Key 모델을 제작하였다. 특히, 제작된 Key 모델을 이용하여 접합부위에서 각각의 공정 조건에서의 기계적 특성을 파악하고자 하였다. 성능평가에 사용된 공정 조건은 기본 주사 알고리즘, 익스팬더를 적용하지 않고 스캔 스피드만을 조정한 알고리즘, 익스팬더를 적용했으나 스캔 스피드는 고정 시킨 알고리즘, 마지막으로 DMS 알고리즘(익스팬더 사용 및 스캔 스피드 변화)을 적용하여 실험을 행하였다. 제작된 시편을 이용하여 Fig. 10 과 같이 Istron 5583 만능시험기를 이용하여 각각의 시편에 대해 인장 강도를 측정하여 보았다. 측정 결과 Fig. 11 과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 3 Experiment parameters for each specimen

	Basic	None-expander and speed	Expander-none Speed	DMS
Spacing(mm) / (spot size)	0.3/(0.5)	0.3/(0.5)	0.3/(0.3) 0.3/(0.6) 0.6/(0.8)	0.3/(0.3) 0.3/(0.6) 0.6/(0.8)
Speed(m/s)	5	6, 5, 4	5	6, 5, 4

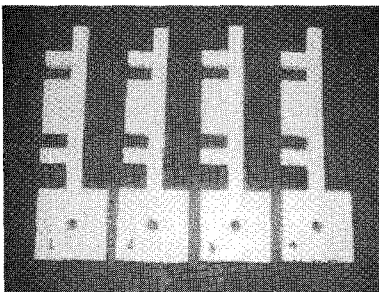


Fig. 9 Fabricated key model (form the left : DMS, Basic, None expander-speed, Expander-Speed)

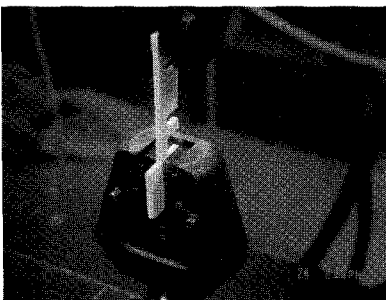


Fig. 10 Tensile tester

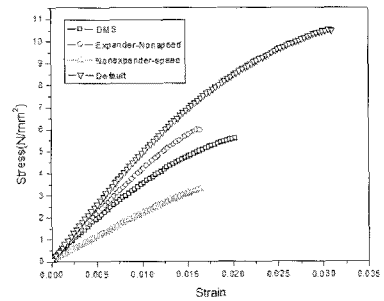


Fig. 11 Result of tensile test

### 3.4 DMS 적용 표면거칠기 측정

또한 제작된 시편의 표면 거칠기를 측정하기 위하여 일본 LaserTech 사의 Confocal Microscope (OPRELICS C130)를 이용하여 각각의 시편에 대한 표면 거칠기를 측정하였다. Confocal Microscope 는 시편의 전치리가 필요없이 전기, 전자, 반도체, 재료, 신소재 등의 표면을 분석하는 장치로써 표본의 형상, 3D 이미지, 표면거칠기 측정이 가능하며, 높은 분해능과 초점심도, 높은 배율에서의 측정이 가능한 신뢰성이 높은 장치이며, Xenon 광원을 이용하여 z 축에 대해 스캐닝 한 후 스캐닝 된 이미지들을 최종적으로 병합하여 하나의 형상으로 만들어 준다. Fig. 12 및 Fig. 13 은 표면 거칠기 측정 장치와 측정된 각각의 시편에 대한 측정 결과를 보여주고 있다.

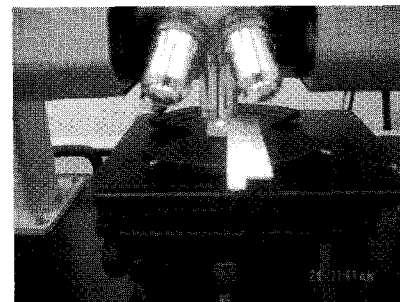
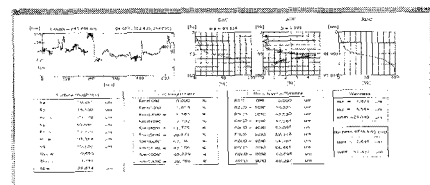
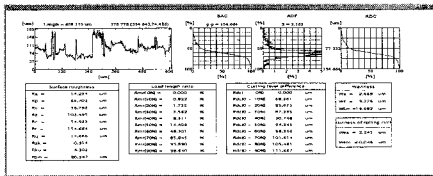


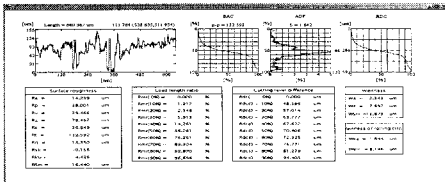
Fig. 12 Surface Roughness tester (Lasertech, OTELICS C130)



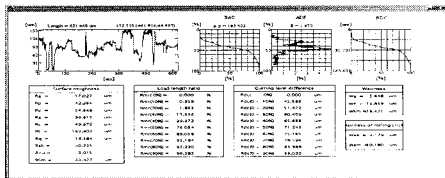
(a) Basic algorithm (Ra= 10.261um)



(b) Expander Non-speed (Ra= 14.234um)



(c) Non-Expander speed (Ra= 14.239um)



(d) Digital Mirror system (Ra= 17.027um)

Fig. 13 Result of Surface Roughness

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존 SLS 에서 미세한 부분의 형상정밀도 향상 및 전체 공정 시간을 단축하기 위해서 새로운 디지털 미러 시스템을 도입하여 각각의 조건에 대한 특성 분석을 위한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

각각의 알고리즘별 특성을 비교 분석한 결과 기본 주사 경로의 경우 표면거칠기 및 강도가 우수하나 공정시간이 증가하는 특징이 있고 Expander 를 적용하였을 때 Scan speed 를 고정할 경우 모델의 종류마다 다르긴 하나 기본 주사 경로에 비하여 표면 거칠기 및 접합면의 강도가 떨어짐을 알 수 있었다. 또한 Expander 를 적용하지 않고 Scan Speed 를 변경한 경우, Expander 를 적용하고 Scan Speed 를 고정한 경우와 표면 거칠기는 비슷한 양상을 띠었으나, 강도가 많이 약함을 알 수 있었다. 그리고 DMS 를 적용했을 경우 모델의 종류마다 다르긴 하나 기본주사경로 보다 접합면 강도가 증가하나 표면 조도가 떨어지는 것을 알 수 있었다

#### 후 기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. M6060200002-06E0200-00210).

#### 참고문헌

1. Ashley, S., "Rapid Prototyping System," Mechanical Engineering, pp. 34-43, 1991.
2. Kim, D. S., Bae, S. W. and Choi, K. H., "Application and performance evaluation for the DMS system in the SLS process," International Journal of Modern Physics B, Vol. 22, No. 9-11, pp. 1833-1838, 2008.
3. Bae, S. W., Kim, D. S., Choi, K. H. and Kim, C. H., "A study on Application of DMS in the Industrial SFF system," Journal of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 7, pp. 13-18, 2008.
4. Choi, K. H., Kim, H. C., Doh, Y. H. and Kim, D. S., "Novel scan path generation method based on area division for SFFS," 17th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Vol. 1, pp. 327-331, 2007.
5. Choi, K. H., Kim, H. C., Doh, Y. H. and Kim, D. S., "Digital Mirror system development for effective SFF system," Journal of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 7, pp. 19-26, 2008.