

## 소형 다각형 부품의 비센서 진동 정렬

### Sensorless Vibratory Orienting of Small Polygonal Parts

한 인 환\*  
(Inhwan Han)

**Abstract :** This paper covers topics related to the investigations for the problem of sensorless vibratory orienting of polygonal parts with high probability through dynamic simulation. The author's program for mechanical systems with changing topologies was experimentally validated and was used as a simulation and design tool for motion behaviors of the vibratory parts-orienting system in the dynamic environment. A flat level vibrating bar is proposed as a means of orienting parts. Dynamic manipulation, in which a part is repeatedly caught and tossed by the bar without sensing, forms the fundamental manipulation strategy. This paper presents how to plan vibratory manipulation strategies that can orient a small rigid polygonal part using interaction between the part and the vibrating bar without requiring sensing. The planned motion strategies have been experimentally validated to show how the dynamic simulation can be used to find favorable vibration parameters for a given part without knowledge of their initial orientations.

**Keywords :** sensorless orienting, vibrating bar, dynamic manipulation, motion strategy

#### 1. 서론

생산 시스템에서 가장 중요한 공정의 한 가지는 대상 부품을 해당 작업 스테이션에 적절한 방향을 유지한 상태로 공급하는 것이다. 그러나 아직도 그러한 정렬작업은 주로 각 공정마다 전용 부품 이송 장치에 의해 수행되고 있는 상황이다[1,2]. 이상적인 부품 이송 장치는 구입과 가동비용이 낮고, 부품이나 작업 조건의 변화에 따라 프로그램의 변경이 가능한 제어 기능과 최소한의 하드웨어적인 조장을 보장하는 유연성을 가져야한다. 이러한 불확실성을 극복하기 위해 크게 두 가지접근방법이 채택되어 왔다. 센서 처리(sensor-based manipulation)와 비센서 처리(sensorless manipulation)가 그것이다. 부품간의 혹은 부품과 다른 물체 사이의 상대위치 상 불확실성을 극복하기 위해 센서를 사용하는 것이 센서 처리이고, 대상 과제(task) 자체의 역학을 사용하는 것이 비센서 처리이다. 비센서 부품 처리는 상대 위치에서 불확실성을 줄이기 위해, 대상부품이 취할 수 있는 가능한 방향의 수를 감소시키는 것으로부터 시작한다. 이런 경우에 센서를 추가한다 하더라도 부품이 제대로 정렬되었는지를 체크하는 최소한의 기능만 필요하게 된다[3,4].

진동 보울 피더(vibratory bowl feeder)[5]는 진동 수송의 원리에 의하여 소형부품을 급송하는 기기 중 가장 광범위하게 사용되고 있으며, 보울에 부품이 놓여지게 될 때 진동 운동의 효과로 부품들이 트랙을 따라 기어올라가는 운동을 하게 된다. 기존의 진동 보울피더들은 트랙에 설치된 다양한 필터들을 사용하여 부적절한 방향의 부품은 보울로 다시 떨어뜨리는 작업을 통하여 수동적인(passive) 정렬과 공

급 기능을 가지고 있다. 따라서, 부품의 종류와 크기가 바뀔 때마다 필터의 설계를 새로 해야 하는데, 이러한 설계도 또한 경험적 방법에 의존하고 있는 실정이다[6].

본 논문에서는 다양한 초기 방향을 가지고 도달한 부품을 진동수 및 진폭 등의 조절이 가능한 진동막대(vibrating bar) 위에서 상호 작용하는 역학을 이용하여 부품을 특정한 방향으로 정렬하는 장치를 제시한다. 이와 유사한 시스템을 Mason 연구 그룹[7]에서는 로봇 캐칭(robot catching) 시스템으로 정의하기도 한다. 또한, 분산 처리(distributed manipulation)의 개념 하에 테이블을 구성하는 수많은 셀들의 개별적인 진동에 의해, 테이블 위에 있는 부품들에 원하는 운동을 발생시키는 시스템이 연구[8]되고, 최근에는 압전체를 이용한 새로운 유형의 부품정렬기[9]가 제안되고 있다. 이러한 장치들은 부품이 바뀔 경우에 정렬 시스템의 하드웨어는 변경할 필요 없이 단지 테이블의 진동 함수들을 적절히 바꿔주면 될 것이다. 여기서 문제는 이러한 정렬이 가능하도록 테이블의 각 진동 축에 따른 진동의 변수들 즉, 가진 함수 형태, 진동수, 진폭 등을 적절하게 설정하는 것이다. 그런데, Swanson 등[2]은 진동하는 테이블 위에서 충돌하는 볼 부품에 대한 해석을 통하여 이러한 정렬 작업이 가능함을 일부 입증하였다. 이들의 모델은 혼돈 동역학 시스템의 예로 잘 알려져 있는 튀기는 볼(bouncing ball) 문제와 동일하다. 이러한 진동 테이블을 활용한 비센서 부품 정렬 작업은 Singer와 Seering[10]에 의해 최초로 제안되었으나 단지 직사각형 부품에 대한 이론적인 해석만 일부 수행하여 그 가능성만을 제시하였으며 마찰력에 의한 효과 등은 고려하지 않았다.

기계부품을 정렬하기 위해서는, 유연성 확보라는 측면에서 로봇을 이용한 파지동작도 주요한 고려의 한 대상이 될 수 있다[11]. 그런데, 각종 기계들의 소형화 내지는 마이크로화 추세에 따라 부품들의 크기가 마이크로 스케일에 접근하여 기존의 통상적인 기술은 부착(adhesion) 효과 등으로

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 6. 29., 채택확정 : 2006. 9. 16.

한인환 : 홍익대학교 기계정보공학과(ihhan@hongik.ac.kr)

※ 이 논문은 한국학술진흥재단 지원(R05-2004-000-10103-0)에 의하여 연구되었음.

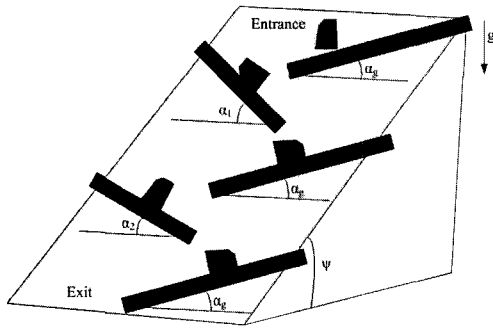


그림 1. 비센서 중력 부품정렬기.  
Fig. 1. Sensorless gravity parts-feeder[15].

인해 효과적으로 사용할 수 없다. 또한, 마이크로 스케일에서 부품을 정렬하거나 처리하려 할 때 센서 활용은 값이 매우 비싸지고, 노이즈로 인한 어려움을 겪게 된다[12]. 따라서, 마이크로 부품 처리 동작에선 특히 비센서 동작 정책이 중요한 의미를 가지게 된다[4,5]. 많은 연구자들[13,14]이 조립 공정에서 마이크로 부품들을 다루는 방법에 대하여 연구하였으나, 매크로 부품 처리에서와 동일한 개념의 비센서 동작 정책이 구현된 사례가 매우 드물다. Moll[4,5] 등은 매크로 부품에서의 평행 그리퍼에 의한 비센서 파지 동작 알고리즘을 마이크로 스케일에서의 역할에 대한 별도의 해석적 보완 없이 마이크로 부품에 그대로 적용을 하였다. Böhringer[13,14] 등도 매크로 부품 비센서 처리에서 새로운 기술로 등장한 분산 처리 방법을 MEMS에 적용하였다.

비센서 처리의 대표적 예로서, Han 등[15]이 개발한 중력 부품정렬기가 그림 1에 보여지고 있다. 이 정렬기에서는 중력과 일정한 각도(ψ)를 가진 지지면(supporting plane) 위에 위치한 게이트들의 개수와 각도(α<sub>i</sub>)를 적절히 조절함으로써 맨 위에 위치한 입력 게이트를 통하여 임의의 방향으로 공급되는 부품을 맨 아래쪽의 게이트를 통해 특정방향으로 정렬하여 배출하는 장치이다. 그런데, 부품의 종류가 바뀔 때마다 게이트들의 개수와 각도 등이 하드웨어적으로 조정되어야 한다. 본 논문에서 제시하는 진동 부품 정렬기는 이러한 중력 부품 정렬기와는 달리 진동막대의 진동 변수 즉, 가진 함수 형태, 진동수, 진폭 등을 능동적으로 변화함으로써 부품을 정렬할 수 있는 유연한 방식이다.

**II. 비센서 부품 정렬 장치**

본 연구에서 개발한 비센서 부품 정렬 장치는 그림 2에 설계 모델과 실제 제작된 모습이 보여진다. 부품의 평면 운동을 보장하는 지지면은 부품 바닥면과의 마찰력 효과를 차단 분리하기 위하여 에어테이블을 사용한다. 이는, 실제의 경우에도 부품 보호 등의 목적을 위하여 적절한 방법일 수 있다. 에어 테이블의 공기 유출 구멍은 지름이 1mm로 부품과 실제로 접촉할 수 있는 모든 범위에 상하 및 좌우

각각 15mm의 간격으로 뚫려 있다. 가장 중요한 진동막대는 실제로 부품과 접촉하는 부분으로 수직 및 수평방향으로 진동이 가능하다. 진동막대는 알루미늄으로 제작하였으나, 부품의 변형이나 손상을 막기 위하여 부품과의 접촉

표 1. 진동 운동 계수.

Table 1. Vibratory motion parameters.

Horizontal Vibration (Amplitude 1.2mm)	Level	A	B	C	D	E	F	G	H
	Frequency (Hz)	0	2.9	5.8	8.7	11.5	14.4	17.3	20.2
Vertical Vibration (Amplitude 0.5mm)	Level	1	2	3	4	5	6	7	8
	Frequency (Hz)	0	2.5	5.0	7.5	10.1	12.6	15.1	17.6

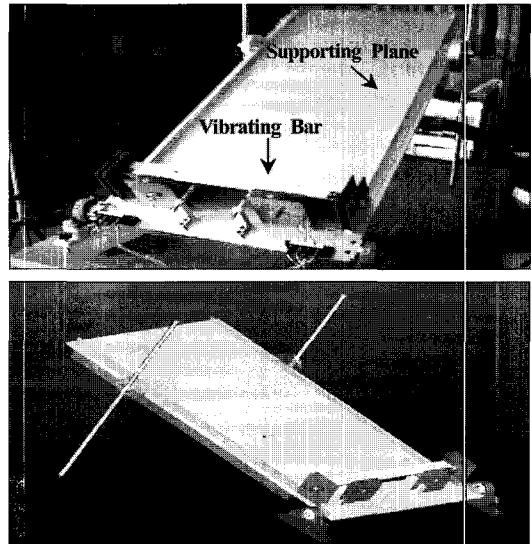


그림 2. 비센서 진동 부품정렬기.  
Fig. 2. Sensorless vibratory parts-feeder.

면은 목재로 하였다. 이 접촉면은 대상 부품 등에 따라 고무, 우레탄 등 여러 재질을 사용하여 장착이 가능하도록 하였다. 정렬 장치에서 진동의 구현은 비교적 제어가 용이한 전자석을 통해 이루어진다. 전자석에 전류의 흐름을 주기적으로 연결 또는 차단함으로써 진동을 만들어내고, LM 가이드를 활용하여 진동막대의 운동 경로를 수직과 수평 방향으로 제한하였다.

진동막대의 진폭 측정을 위해 사용한 레이저 변위 센서(ZX-LDA11)는 설치방향이 자유롭고 다양한 물체에 대한 측정이 가능하며, 100mm의 측정 중심거리에 ±40mm의 측정범위를 갖는다. 진동수는 진동 제어기에서 나오는 신호주기를 오실로스코프를 통해 측정하였다. 보완적인 방법으로 고속 비디오 카메라를 사용하여 초당 240프레임으로 촬영하여 영상 처리함으로써 진동수를 확인하였다. 표 1은 이러한 방식으로 측정된 진동 제어기의 단계별 진동수와 진폭을 보여준다. 본 정렬 장치에서는 동작정책 수립의 편의상 본 연구에서의 대상 부품에 적절하게 선정한 진폭은 고정하고 상하 및 좌우 진동의 진동수만을 변화시킬 수 있도록 하였다.

**III. 부품거동 시뮬레이션 해석 및 실험**

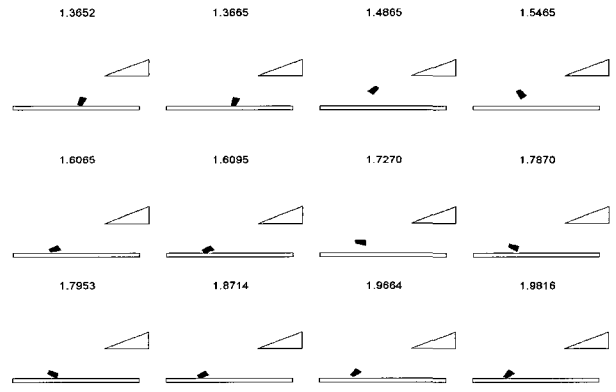
예측하기 힘든 많은 불연속동작을 가지고, 미끄럼 접촉

그리고 마찰력의 역할을 무시할 수 없는 부품 정렬 시스템과 같은 동적 기계 시스템을 위한 효과적인 시뮬레이션 혹은 설계 도구가 구하기 어렵다는 것은 문제의 해결을 어렵게 하고 있다. DADS나 ADAMS와 같은 시뮬레이션 상용 패키지가 있고 또, 많은 학자들에 의해 간헐적인 접촉 (Intermittent contact)을 가지는 기계 시스템을 위한 시뮬레이션 알고리즘의 개발이 수행되고 있으나, 그 어느 것도 간헐적 접촉과 마찰력이 개재되는 다중 물체 시스템에 대해서는 만족할 만한 결과를 보여주지 못하고 있다. 부품 정렬시스템의 동적 거동을 해석하거나 혹은, 동작계획을 수립하기 위해서는 다중 물체 시스템에서 발생할 수 있는 많은 문제들에 대한 완벽한 해석을 전제로 한다. 본 논문 저자가 개발한 프로그램[16]은 정적 영역 및 동적 영역에서의 마찰 접촉 문제에 대한 일반적인 해석, 기구학적 구속조건의 변화에 대한 분류, 정형화 및 변화의 순간에 대한 예측 및 포착, 마찰 충돌 해석 등 각 부문들에 대한 해석들이 예측하기 어려운 불연속 동작을 가지는 시스템의 해석을 위해 유기적으로 결합되어 하나의 패키지로서 역할을 수행할 수 있다.

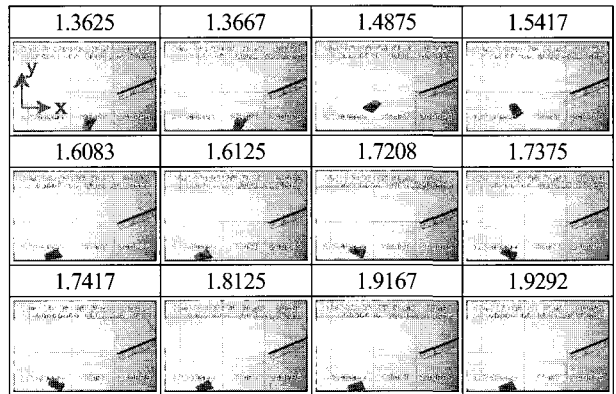
부품 정렬 동작에 대한 시뮬레이션을 수행하여, 대상 부품들의 동작을 고속 비디오카메라(FASTCAM-Rabbit)를 가지고 초당 240프레임의 속도로 촬영하고 컴퓨터로 영상 처리한 결과와 정량적 비교를 수행하였다. 실험에서 부품은 게이트로부터 공급되어 진동막대와의 반복적인 충돌을 경험하게 된다. 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 부품에 4개의 점을 표시하고, Matlab으로 작성한 영상 처리 프로그램을 활용하여 그 점들의 움직임을 추적해서 대상 부품의 변위, 속도 등의 동적 변수들을 구하였다. 그림 3과 표 2는 시뮬레이션 프로그램의 검증용을 위한 실험에 사용된 부품의 정보를 요약하고 있다.

그림 4(a)는 진동막대가 A8 단계(진폭 0.5mm, 진동수 17.6Hz)로 상하 진동하고 있을 때 게이트로부터 공급된 다각형 부품의 진동막대 위에서 동적 거동에 대한 시뮬레이션 결과이고, 그림 4(b)는 초당 240프레임으로 촬영한 실험 결과로서 최종 정렬면을 포함하여 전반적으로 좋은 일치성을 보여주고 있다. 그림 5는 다각형 부품이 진동막대 위에서 거동할 때 여러 동적 변수들에 대한 실험과 시뮬레이션 결과를 정량적으로 비교한 것이다. 시간이 경과함에 따라 오차가 누적되어, 실험과 시뮬레이션 결과의 차이가 다소 커

지는 경향은 있지만, 모든 방향으로 변위와 속도 모두 시뮬레이션(Han 프로그램)과 실험 결과는 좋은 일치를 보여주고 있다. 부품의 기하학적 형상 및 각종 물성치들의 불확실성 등을 감안할 때, 이러한 실험과 시뮬레이션 해석의 비교 결과는 Han 프로그램에 의한 시뮬레이션 해석의 신뢰성을 보여준다. 그러나 ADAMS의 경우는 특히 X-방향 선속도 및 각속도를 실험 결과와 비교해 볼 때, 부품과 진동막대와 충돌 이후부터는 오차가 상당히 커짐을 알 수 있다. 이는 마찰의 효과를 무시할 수 없는 부품의 충돌 거동을 적절히 해석하지 못한 것에 기인한 것으로 여겨진다.



(a) Simulation results



(b) Test results

그림 4. 실험과 시뮬레이션 결과의 정성적 비교.

Fig. 4. Qualitative comparison between test and simulation results.

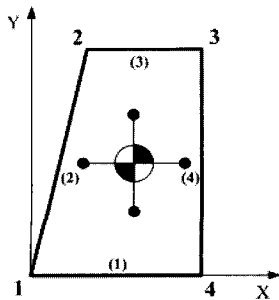


그림 3. 예제 부품 형상.

Fig. 3. Description of the example part.

표 2. 예제 부품 데이터.

Table 2. Data for the example part.

Item		Part
(X,Y)of Endpoint (mm)	1	(0.0, 0.0)
	2	(10.1, 35.1)
	3	(24.9, 35.1)
	4	(24.9, 0.0)
(XG, YG)	(mm)	(16.6, 18.7)
Mass	(g)	2.26
I	(kg · mm <sup>2</sup> )	0.8
$(\mu_x, \mu_y)$		(0.25, 0.24)
e		0.67

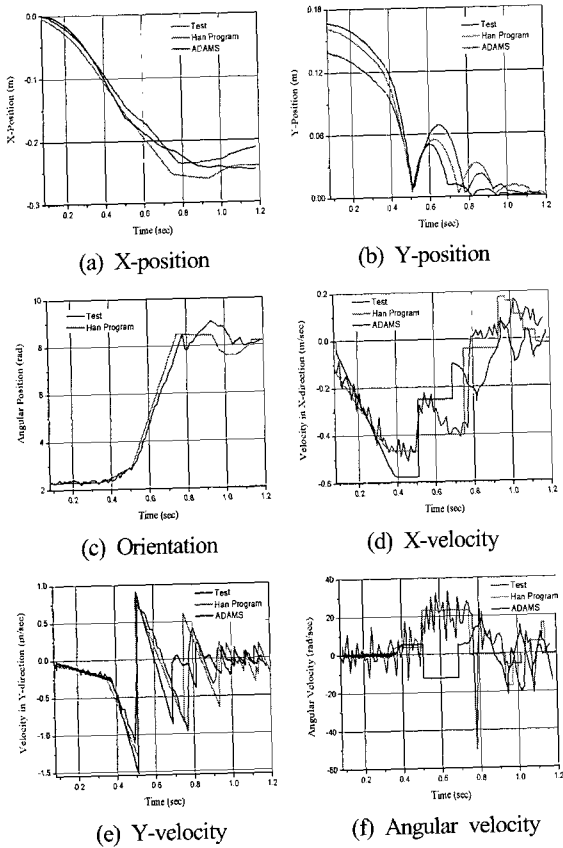


그림 5. 실험과 시뮬레이션 결과의 정량적 비교.  
Fig. 5. Quantitative comparison between test and simulation results.

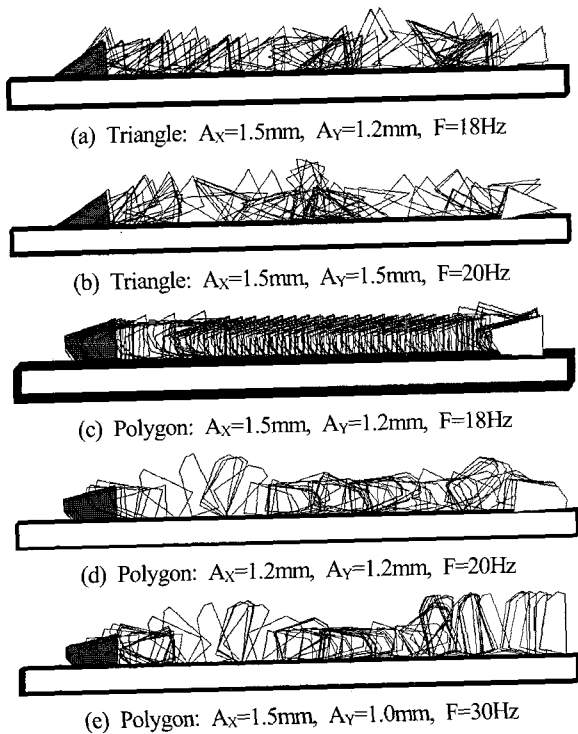


그림 6. 진동 정렬의 원리.  
Fig. 6. Fundamentals of vibratory orienting.

IV. 부품 정렬 동작 정책 수립과 실험

진동에 의한 파트 피더는 주로 이송 목적으로 활용되었고, 원하는 방향으로의 정렬은 부품마다 별도로 설계, 제작되어 정렬기 트랙에 장착된 추가 장치에 의해 이루어져 왔다. 그러나 본 논문에서는 진동 함수를 적절히 조절함으로써 부품을 원하는 방향으로 정렬하는 방법을 제시한다. 그림 6은 진동에 의해 부품을 임의의 방향으로 정렬하는 원리를 보여주고 있는데, Han 프로그램에 의해 수행된 시뮬레이션 결과이다. 초기자세(왼쪽, 적색)로 놓여있는 부품을 진동막대의 좌우 및 상하 진폭( $A_x$ ,  $A_y$ )과 진동수( $F$ )를 적절하게 변화시켜 원하는 최종자세(오른쪽, 황색)로 정렬하고 있다. 삼각형 부품에 대하여는 두 가지의 가능한 방향 그리고 오각형 부품에 대하여는 가능한 세 가지 방향으로 각각 정렬하는 동작을 예시한다.

1. 기준 정렬면 결정 방안

부품을 정렬하는 동작 정책의 수립에 앞서서, 그 부품을 어느 면으로 정렬하는 것이 가장 효과적인 것인지를 결정해야 한다. 물론, 정렬하고자 하는 방향은 대체로 물체가 가장 안정적으로 놓이는 면이 될 것이며, 그러한 선택은 그 이후의 과정을 더욱 수월하게 해 줄 것이다. 그리고 기하학적으로 단순하지 않은 부품의 경우 직관적으로 명백하리라 생각하는 정렬면이 항상 옳은 것은 아니므로 이러한 과정은 더욱 중요하다.

본 연구에서는 기준(정지) 정렬면(natural resting aspect)을 결정하기 위한 세가지 방법을 제안한다. 첫째 방법은 간단한 낙하 실험이고, 둘째 방법으로는 Lee 등[17]의 CSA (Centroid Solid Angle) 가설을 이용한 해석적 방법, 마지막으로 본 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 결과를 얻는 것이다. 사실, 기준 정렬면을 결정하는 가장 확실한 방법은 대상 부품을 가지고 파트 피더에서 정지되어 있는 진동 막대로 낙하실험을 수행하여 그 결과를 얻는 것이다.

CSA 가설은 정역학적 상황에서 부품이 갖는 기하학적 형상에 근거하여 간편하게 정렬면을 결정할 수 있는 방법이며, 그림 7에 보여지는 다각형 부품에 대하여 (1)로 표현된다.

$$P_i = \frac{W_i/h_i}{\sum_{j=1}^n W_j/h_j} \quad (1)$$

여기서,

$P_i$  = Probability of the part resting on aspect  $i$

$W_i$  = Centroid solid angle subtended by aspect  $i$  from the centroid

$h_i$  = Height of the centre of gravity from aspect  $i$

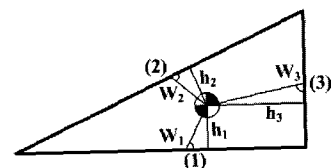


그림 7. CSA 가설.  
Fig. 7. CSA hypothesis.

CSA 가설 결과에서는 다각형 부품 면들 중에서 정렬되기 가장 어려운 면의 정렬 확률이 실험이나 동역학 시뮬레이션 결과보다는 훨씬 크게 나오며, 이는 CSA 가설의 근거가 정역학적인 상황에서 기하학적 조건만을 고려함에 기인한다. 즉, 실제 상황에서는 충돌 등 동역학적 상황 때문에 불안정면으로 정렬되는 확률이 더욱 줄어들게 된다. 본 연구에서는 후술하는 것처럼, 정렬 확률이 가장 높은 기준 정렬면이 세가지 방법 모두에서 잘 일치하고 있다. 따라서 CSA 가설은 그 편의성 등을 고려할 때, 부품 정렬을 위한 기준면을 단순히 선정하는 과정에서는 여전히 유용하다고 여겨진다.

2. 부품 정렬 동작 정책 수립

기준 정렬면이 결정되면, 임의의 방향으로 진동막대 위에 도달하는 부품을 정렬하기 위한 동작 정책의 수립 즉, 적절한 진동을 선택하는 일이 필요하다. 이는 부품 정렬 작업에서 가장 핵심적인 부분이며, Han 프로그램을 설계 도구로 활용하는 두 가지 방안을 제시한다.

2.1 단순 반복법(simple iteration method)

본 정렬 장치에서는 대상 부품에 적절하게 선정한 진폭은 고정하고 상하·좌우 진동의 진동수만을 표 1에서 볼 수 있는 것처럼 각각 8단계로 변화시킬 수 있도록 하였다. 단순 반복법은 상하·좌우 진동수로 구분되는 64개의 모든 구간에서 반복적인 시뮬레이션을 통해 구한 부품의 정렬 결과들로부터 최고의 정렬 성공률을 가져오는 진동 단계를 선택하는 방법이다. 64개의 모든 구간에 대한 시뮬레이션 해석을 통해 구한 결과를 활용에 편리하도록 표시한 그래프가 그림 8(a)에 보여지고 있다.

단순반복법을 통하여 얻은 최고 정렬률 구간들에는 수평 혹은 수직으로 한 단계만 변화해도 정렬률이 급격히 감소하는 경우가 있고, 이러한 경우 정밀한 진동 제어가 필요하게 되어 결국 바람직스럽지 못하게 된다. 또는, 64개의 구간들 중에서 최고 정렬률 구간이 복수개로 존재하는 경우도 있다. 이런 상황에 대처하기 위하여 그림 8(b)에서처럼 단순반복법의 보완적인 방법으로 9셀 평균법을 고안하게 되었다. 각 구간 셀(D5)의 주변 셀을 모두 합쳐 9개 셀의 평균값을 해당 구간 셀의 값(N4)으로 산정하는 것이다. 그림 8(b)에서 N1은 외곽모서리에 존재하는 A1의 9셀 평균을 구하는 방법인데, A1과 같은 모서리는 주변에 3개의 셀이 존재하므로 A1을 포함한 4개 셀의 평균을 구하게 되는 것이다. N2와 N3는 외곽인 E1과 H7에서 평균을 구하는 방법을 보여주며, 값이 존재하는 6개의 셀들에 대해서 평균을 구한다.

2.2 교차법(cross method)

단순 반복법은 64개의 모든 구간에서 반복적인 시뮬레이션을 통해 구한 부품의 정렬 결과들로부터 최고의 정렬률을 보이는 셀을 찾기 때문에 많은 시간과 노력이 필요하다. 실용적인 적용을 위해서는 이러한 단점을 보완하는 보다 효과적인 방안의 개발이 필요하다. 여러 다양한 부품들을 가지고 많은 실험과 시뮬레이션 작업 수행을 통하여, 그림 8(b)에 예시한 8X8행렬에서 특정 열(수평진동) 혹은 특정 행(수직진동)의 정렬률들이 다른 열이나 혹은 행보다 전반

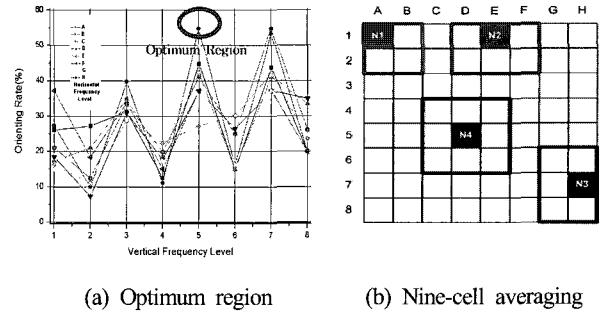


그림 8. 단순반복법. Fig. 8. Simple iteration method.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	A1							H1
2		B2					G2	
3			C3			F3		
4				D4	E4			
5				D5	E5			
6			C6			F6		
7		B7					G7	
8	A8							H8
	(A1+A8) / 2	(B2+B7) / 2	(C3+C6) / 2	(D4+D5) / 2	(E4+E5) / 2	(F3+F6) / 2	(G2+G7) / 2	(H1+H8) / 2

그림 9. 교차법. Fig. 9. Cross method.

적으로 높다는 사실을 확인할 수 있었다. 이러한 결과에 근거하여, 훨씬 적은 횟수의 반복 시뮬레이션 작업만으로 최적 구간(셀)을 찾는 방법을 개발하였으며, 그림 9에 보여지고 있다. 이러한 교차법에서 최적 구간을 찾기 위해서 그림 9와 같이 16개의 양측 대각 셀들에 대해서 시뮬레이션 결과를 얻는다. 그리고 그 각각의 행과 열에 존재하는 2개의 셀에 대한 평균값들을 행과 열을 따라 8개의 값을 구한 뒤에 비교하여 가장 높은 평균값을 가지는 행과 열을 각각 선택하여 이들이 교차하는 셀을 최적으로 선택한다. 이렇게 하면, 64개 중에서 16 혹은 17개의 셀에 대해서만 시뮬레이션을 수행하면 된다. 최적 정렬 셀을 더 잘 찾기 위해서는 가장 높은 평균값을 가지는 행과 열에 속하는 모든 셀의 값들을 구하여 찾을 수 있다. 이 경우에는 모두 27개의 셀들에 대해서 시뮬레이션을 수행하여야 한다.

3. 부품정렬

Han 프로그램을 설계도구로 활용하여 몇 가지의 대표적인 형상을 가진 소형 다각형 부품들에 대하여 부품 정렬을 위한 동작 정책 즉, 진동 구간을 찾아내고, 그 유용성을 입증하기 위하여 그림 2에 보여지는 것과 같은 비센서 진동 정렬기에서 실험을 수행하였다.

부품 정렬 실험 대상으로 선정한 부품들의 기하학적 형상과 물성치들은 그림 10과 표 3에 정리되어 있다. 삼각형과 오각형 부품은 두께가 10mm인 미송(white pine)으로 그리고 사각형 부품은 두께가 5mm인 MDF(Medium Density Fiberboard)로 제작되었으며, 본 저자의 이전 연구[11]에서와 같이 예비실험을 통하여 각종 계수들을 측정하였다.

우선, 기준 정렬면을 결정하기 위하여, 표 3에 보여지는

부품들의 각면에 대한 정렬률을 1절에서 서술한 세가지 방법으로 구한 결과를 표 4에 정리하였다. 부품에서 가장 정렬률이 높게 나오는 면은 표 4의 그림에서 역삼각형 표기와 표 셀에 음영을 주어 구분을 하였다. 표 4에서 보는 바와 같이 직사각형 부품(R1, R2)의 경우는 긴 면(1)으로 정렬하는 것이 짧은 면(2)보다 용이하다. 직삼각형 부품(T1, T3)의 경우에는 빗면(2)의 정렬률이 가장 높은 값을 가지므로 (2)를 기준면으로 진동 정렬을 실시하였으며, 오각형 부품(P)은 (5)면을 정렬면으로 정하였다. 모든 부품들에서 정렬률이 가장 낮게 나온 면이 CSA 가설 결과에서 다른 두 방법보다 훨씬 크게 나오며, 이는 CSA 가설의 근거가 정역학적인 조건만을 고려함에 기인한다. 실제 상황에서는 충돌 등 동역학적 상황 때문에 불안정면으로 정렬되는 확률이 더욱 줄게 된다. 대표적인 예로, 부품 R1의 경우 CSA 가설에서는 (1)면 정렬률이 72%, 시뮬레이션에서는 95% 그리고 실험에서는 100%의 정렬률을 각각 보이고 있다. 그러나 보여지는 모든 부품들에 대하여 기준 정렬면은 세 가지 방법 모두 일치한다.

기준 정렬면이 결정되면, 부품을 정렬하기 위한 동작 정책의 수립 즉, 본 연구에서는 수평과 수직 방향으로 각각 적절한 진동수를 찾아야 한다. 그림 11은 다각형 부품들에 대하여 단순 반복법과 교차법에 의한 동작 정책의 수립 과정을 보여준다. 그림 11에서 붉은 색으로 표시된 셀이 교차법으로 찾은 최적 진동 구간이며, 배경색 없이 숫자만 써있는 셀은 단순반복법으로 찾은 최고 정렬률이 나오는 진동 구간이다. 단순반복법과 교차법의 적용 과정들을 볼 때 진술했던 것처럼 특정 열(수평진동) 혹은 특정 행(수직진동)의 정렬률들이 다른 열이나 혹은 행보다 전반적으로 높다는 사실을 볼 수 있다. 삼각형 부품 T1은 수직진동에 대해 비교적 민감하며 특정 수직진동수에서 높은 정렬률을 보이는 반면, 다른 삼각형 부품 T3는 수평진동수가 최대인 H단계에서 높은 정렬확률을 보인다. 한편, 직사각형 부품 R2와 오각형 부품 P의 경우 특정 수직진동과 수평진동 단계에서 높은 정렬률을 보인다. 직사각형 부품 R1은 거의 모든 진동 구간에서 정렬률이 100%이거나 100%에 근접한다.

각 부품에 대하여 수립된 동작 정책 수립 결과와 이에 준하여 실험을 수행한 결과가 표 5에 정리되어 있다. 표 4와 5 그리고 그림 11에서 정렬률들을 구하기 위한 반복 횟수는 시뮬레이션에서는 대략 35회, 실험에서는 50회 내외이다. 동작 정책의 평가는 실제 실험에서의 진동 정렬률이 정지 정렬률(probability of natural resting aspect)보다 크면 ○를 그렇지 않으면 ×로 나타내었다. 표 5의 부품들에 대하여 시뮬레이션 프로그램을 도구로 활용하여 수립한 최적 진동 구간들에서 예측된 정렬률들이 실험에서 보다 대략 20% 가량 높게 나온 것을 볼 수 있다. 이는 시뮬레이션에서는 부품이 진동막대 위에서 어느 한면이 닿아 일단 안정된 모습을 보일 때를 최종 상태로 간주한 것에 기인한다. 실제로는 계속되는 진동으로 진동막대와 접촉하는 면이 다시 바뀌는 경우가 많이 발생한다.

직삼각형 부품 T1과 T3를 보면, 정지 정렬률과 진동 정렬률간의 차이가 거의 없다. 이는 직삼각형 형태의 부품이

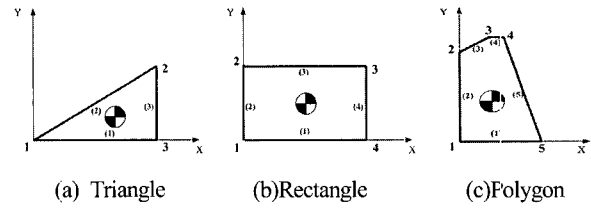


그림 10. 실험에 사용된 예제 부품.

Fig. 10. Example parts used in experiments.

표 3. 예제 부품의 형상 및 물성치.

Table 3. Geometric and physical data for example parts.

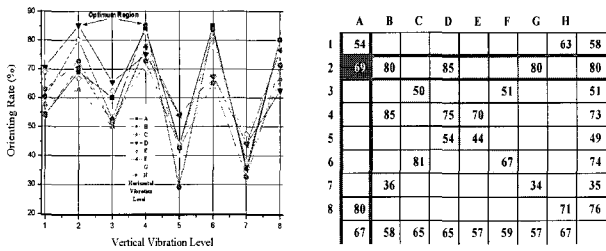
Item	Triangle 1 (T1)	Triangle 3 (T3)	Rectangle 1 (R1)	Rectangle 2 (R2)	Polygon (P)
(X,Y) of Endpoint (mm)	1 (0.0, 0.0) 2 (40.5,23.5) 3 (41.7, 0.0)	(0.0, 0.0) (39.0,13.9) (39.0,0.0)	(0.0, 0.0) (0.0, 20.0) (49.4, 20.0)	(0.0, 0.0) (0.0, 20.0) (29.6, 20.0)	(0.0, 0.0) (0.0,33.4) (7.8,41.7) (14.1,41.7) (22.5, 0.0)
(X <sub>G</sub> , Y <sub>G</sub> ) (mm)	(21.5, 6.6)	(17.5,3.21)	(29.2, 8.1)	(17.4, 8.2)	(12.7,10.09)
Mass (g)	1.81	1.13	3.61	2.29	2.82
I <sub>G</sub> (Kgm <sup>2</sup> )	2.7	1.3	5.7	1.8	2.8
μ	0.26-0.29	0.21-0.24	0.25-0.28	0.27-0.30	0.28-0.31
e	0.60-0.63	0.61-0.64	0.55-0.58	0.55-0.58	0.65-0.68

표 4. 부품의 정지(기준) 정렬률.

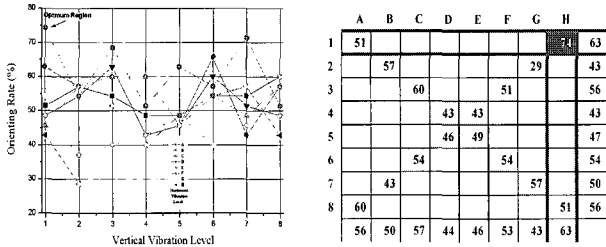
Table 4. Probabilities of resting aspects for parts.

Part	Method	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
T1	CSA	32	41	27	Aspect ratio: 0.56	
	Simulation	43	54	3		
	Test	38	50	12		
T3	CSA	33	40	27	Aspect ratio: 0.36	
	Simulation	49	51	0		
	Test	47	50	3		
R1	CSA	72	28	Aspect ratio: 0.40		
	Simulation	95	5			
	Test	100	0			
R2	CSA	60	40	Aspect ratio: 0.68		
	Simulation	78	22			
	Test	80	20			
P	CSA	22	23	12	12	31
	Simulation	26	17	0	0	57
	Test	10	33	0	0	57

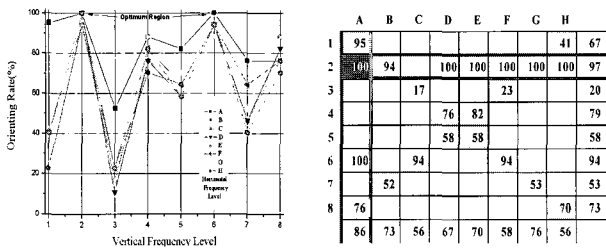
진동 정렬에 적합하지 않음을 의미한다. 그런데, 정렬률이 T1보다 T3에서 더 작게 나오는 것은 표 4에서 볼 수 있는 것처럼 T3의 경우 기준 정렬면인 (2)면과 (1)면의 정지 정렬률이 서로 근접한다는 사실에 기인한다. 그림 12는 진동의 효과로 인하여, 오히려 기준 정렬면으로 정렬되지 않는 예를 보여준다. 이런 현상은 정지 정렬률의 차이가 크지 않은 면들을 가진 부품에서 발생하게 된다. 직사각형 부품 R2의 경우는 100%에 육박하는 좋은 진동 정렬률을 보여주고 있고, R1의 경우에는 정지 및 진동 정렬률 모두 100%이다. 그리고 오각형 부품 P도 진동 정렬이 효과적으로 작동



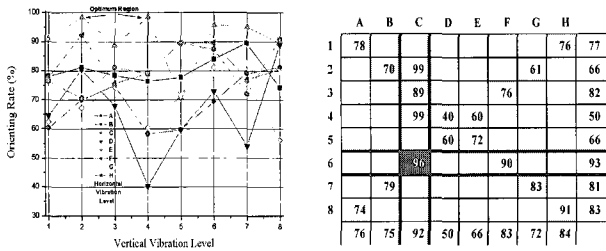
(a) Part T1



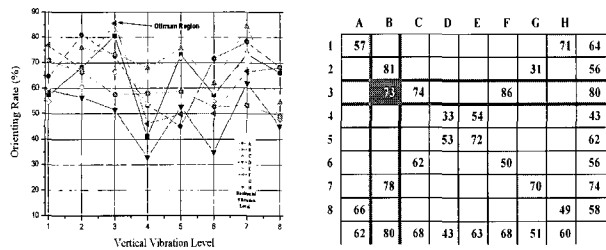
(b) Part T3



(c) Part R1



(d) Part R2



(e) Part P

그림 11. 동작 계획 수립 과정.

Fig. 11. Establishing process of motion plans.

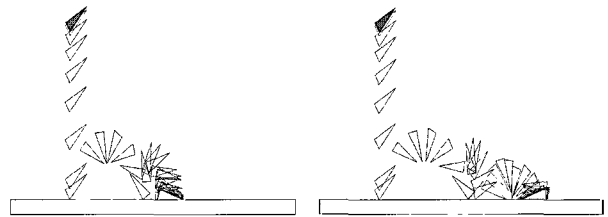
함을 확인할 수 있다.

표 5에서 ×는 9셀 평균법에서 주로 나왔다. 그림 13에서 처럼, 부품 T1의 경우와 같이 주변값들간의 편차가 심한 경우에는 9셀 평균법이 효과적이지만 그렇지 않고 부품 R2와 같이 편차가 비교적 적은 경우에는 최적구간을 선택하기가 어려울 수 있다. 따라서 9셀 평균법은 단순 반복법은

표 5. 동작 정책과 실험 결과.

Table 5. Motion strategies and test results.

Part	Motion Strategy	Test		Natural Resting (%)	Appraisal
		Planning Tool	Optimum Region		
T1	Simple	B4	85	55	○
		D2	85	52	○
	Cross	A2	69	50	×
T3	Simple	H1	74	50	○
		H8	60 (51)	52	×
	Cross	A2	82(82)	100	○
R1	Simple	A2, D2	100	100	○
		E2, F2	100	100	○
	Cross	A2	98	83	○
R2	Simple	C2	98	88	○
		C4	96	73	×
	Cross	C6	96	73	×
P1	Simple	F3	86	75	○
		B3	73	70	○
	Cross	B3	73	70	×
P1	Simple	F3	86	75	○
		B3	73	70	○
	Cross	B3	73	70	×
P1	Simple	F3	86	75	○
		B3	73	70	○
	Cross	B3	73	70	×

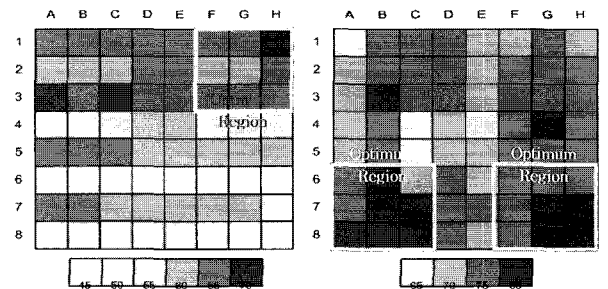


(a) No vibration

(b) H1-level vibration

그림 12. 진동 정렬의 역효과.

Fig. 12. The reverse effect of the vibratory orienting.



(a) Part T1

(b) Part R2

그림 13. 9-셀 평균법의 사용.

Fig. 13. Use of nine-cell averaging.

보완하는 것에 한정하고, 활용에 주의해야 한다. 표 5의 9셀 평균법과 관련된 정렬률들은 9개 셀들의 평균값이며 괄호안에 있는 값이 원 정렬률이다.

다양한 소형 부품의 진동 정렬 실험을 통하여 특정 진동 구간에서 정렬률이 확연히 높기도 하지만, 부품 형상에 따라서는 진동 정렬이 적합하지 않음도 확인하였다.

#### V. 결론

본 논문에서는 다양한 초기 방향을 가지고 도달한 다각형 부품을 주기적으로 진동하는 막대 위에서 센서를 사용하지 않고 상호 작용하는 역학을 활용하여 특정 방향으로 정렬하는 방안을 제시하였다. 본 연구에서 제작한 비센서 부품정렬 장치에서는, 부품 종류가 바뀔 경우에 하드웨어는 변경할 필요 없이 단지 진동 막대의 수평과 수직 방향 진동수를 적절히 바꿔주면 된다. 예측하기 어려운 많은 불연속 구름과 튀김 동작을 가지며, 마찰력 등이 작동하는 미끄럼 접촉들을 가지는 진동 정렬 장치와 같은 변화하는 토폴로지를 가지는 기계 시스템의 해석과 설계에 적절한 시뮬레이션 프로그램을 설계 도구로 사용하여 안정되고 원하는 방향으로 부품을 정렬하는 비센서 동작 정책을 수립하였다. 또한, 개발한 부품 정렬 방안들은 다양한 다각형 부품들을 대상으로 한 실험을 통해 그 유효성을 입증하였다.

#### 참고문헌

- [1] P. Swanson, "Orienting small parts with passive juggling," *Assembly Automation*, vol. 17, no. 2, pp. 122-128, 1997.
- [2] P. J. Swanson, R. R. Burrige and D. E. Koditschek, "Global asymptotic stability of a passive juggler: A parts feeding strategy," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1983-1988, 1995.
- [3] M. Moll and M. A. Erdmann, "Manipulation of pose distribution," *International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 3, pp. 277-292, 2002.
- [4] M. Moll, K. Goldberg, M. A. Erdmann and R. Fearing, "Aligning parts for micro assemblies," *Assembly Automation*, vol. 22, no. 1, pp. 46-54, 2002.
- [5] I. Han and Y. Lee, "Chaotic dynamics of repeated impacts in vibratory bowl feeders," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 249, no. 3, pp. 529-541, 2002.
- [6] G. P. Maul and M. B. Thomas, "A system model and simulation of the vibratory bowl feeder," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 16, no. 5, pp. 309-314, 1997.
- [7] K. M. Lynch and C. K. Black, "Recurrence, controllability, and stabilization of juggling," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 2, pp. 113-124, 2001.
- [8] P. Frei, "An intelligent vibratory conveyor for the individual object transportation in two dimensions," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1832-1837, 2002.
- [9] Y. Ting, H. C. Jar, C. Y. Lin and J. S. Huang, "A new type of parts feeder driven by bimorph piezo actuator," *Ultrasonics*, vol. 43, no. 7, pp. 566-573, 2005.
- [10] N. C. Singer and W. P. Seering, "Utilizing dynamic stability to orient parts," *ASME Journal of Applied Mechanics*, vol. 54, pp. 961-966, 1987.
- [11] I. Han and S. Park, "Impulsive motion planning for positioning and orienting a polygonal part," *International Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 3, pp. 249-262, 2001.
- [12] I. Han, "Microparticle impact motion with adhesion and frictional forces," *Trans. A of the Korean Society of Mechanical Engineers*, vol. 26, no. 8, pp. 1698-1708, 2002.
- [13] K. -F. Böhringer, R. S. Fearing and K. Goldberg, "Microassembly," in Nof, S.Y., (Eds) *Handbook of Industrial Robotics*, chapter 55, Wiley, pp. 1045-1066, 1999.
- [14] K. -F. Böhringer, B. R. Donald and N. C. MacDonald, "Programmable force fields for distributed manipulation, with applications to mems actuator arrays and vibratory parts feeders," *International Journal of Robotics Research*, vol. 18, no. 2, pp. 168-200, 1999.
- [15] I. Han, B. J. Gilmore, and M. M. Ogot, "Synthesis and experimental validation of dynamic parts-orienting devices," *Proc. of ASME Design Automation Conference*, DE-vol. 44-1, pp. 83-93, 1992.
- [16] I. Han and B. J. Gilmore, "Multi-body impact motion with friction-analysis, simulation and experimental validation," *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 115, pp. 412-422, 1993.
- [17] S. S. G. Lee, B. K. A. Ngoi, L. E. N. Lim and S. W. Lye, "Determining the probabilities of natural resting aspects of parts from their geometries," *Assembly Automation*, vol. 17, no. 2, pp. 137-142, 1997.



#### 한인환

1982년 서울대학교 기계설계학과 졸업. 1984년 동 대학원 석사. 1990년 펜실바니아 주립대학교 기계공학과 박사. 1984년~1986년 대우중공업 중앙연구소 연구원. 1986년~1987년 한국과학기술연구원 CAD/CAM실 연구원. 1990년~1991년 한국생산성본부 공장자동화사업부 수석전문위원. 1991년~현재 홍익대학교 기계정보공학과 교수. 관심분야는 충돌 및 마찰 관련 동역학, 다중물체 동역학, 이송 및 조립 자동화, 차량동역학, 자동차 사고 재구성 및 블랙박스 해석.