

## 레이저 마커용 빔 정렬장치의 공리적 설계

신광섭\* · 이정욱\*\* · 박경진†

(2001년 6월 13일 접수, 2002년 6월 27일 심사완료)

### Axiomatic Design of a Beam Adjuster for Laser Marker

Gwang Seob Shin, Jeong Wook Yi and Gyung Jin Park

**Key Words :** Axiomatic Design(공리적 설계), Independent Axiom(독립공리), Information Axiom(정보공리), Laser Marker(레이저 마커), Adjuster(정렬장치)

#### Abstract

The usage of beam scanning type laser marker is rapidly increasing in the field of semiconductor equipment. A device called "beam adjuster" is employed to adjust the visible diode laser, which points the marking position for various setting. The device is very sensitive to manufacturing tolerance and assembly condition. Axiomatic approach has been applied to the design of the device. An existing design is analyzed based on the Independence Axiom. The existing design is found to violate the axiom. Two new designs are proposed to satisfy the Independence Axiom. The Information Axiom is utilized to evaluate the designs. A design is selected to have the minimum information content. The significance of this research is that a full cycle of axiomatic design is applied to a real engineering product.

#### 1. 서론

최근 들어, 국내 반도체장비 제조업체에서는 대외 경쟁력을 향상시키기 위해 독창적인 개념설계에 관심을 높이고 있다. 빠르게 변화하는 환경에 적응하기 위해서, 새로운 설계를 도출하는 능력이 매우 중요해졌기 때문이다. 그러나 어떠한 방법으로 좋은 설계를 얻을 것인가에 대한 해결 방안을 찾는 것은 상당히 어렵다. 반도체 집적회로나 산업용 부품의 표면에 로고나 상호 부품정보를 표시하는 마킹장비 분야에서, 레이저를 이용한 빔 스캐닝(*beam scanning*)식 레이저 마킹 방법의 이용이 현저하게 늘고 있다. 이는 발생된 레이저를 고속으로 제어하는 거울로 반사시켜 원하는 위치에 마킹하는 방법이다. 이때, 원하는 마킹 위치를 미리 확인하기 위해서는 저 출력의 다이오드(*diode*) 가

시 레이저(*visible laser*)를 추가하여 빔 경로를 실제 레이저 경로와 같은 위치에 정렬해야 한다. 이렇게 하면 실제 레이저를 사용하지 않고도 인쇄할 위치를 미리 미세 조정할 수 있어, 고가의 자재가 손상되는 것을 방지할 수 있다. 이때 정렬장치는 정렬된 실제 마킹용 레이저의 경로에 지시 빔 레이저의 경로를 일치시키는 장치로, 부품 가공상의 오차와 정밀한 조립의 한계성으로 인하여 빔 경로를 정밀하게 일치시키기가 매우 어렵다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 문제점을 해결하기 위해서 공리적 설계방법을 이용하여 새로운 설계의 고안을 시도하였다.

설계공리는 공학 분야에서 제시하고 있는 유용한 설계 이론 중의 하나로서 크게 독립 공리와 정보 공리로 나눈다.<sup>(4-8)</sup> 독립공리는 설계의 목적을 특징지을 수 있는 최소한의 기능요구를 정의하고, 정의된 기능요구들 사이의 독립성을 항상 만족해야 한다.<sup>(9-11)</sup> 정보공리는 독립공리를 만족하는 설계들 중에서 정보량이 가장 적은 설계가 최상의 설계임을 의미하며, 설계의 우수성을 정량적으로 표현하는 방법을 제시한다.<sup>(8,12,13)</sup> 본 연구에서는 공리적 설계방법을 이용하여 빔 정렬장치 설계를 평가하고 이에 대한 문제점을 파악하였다. 또한

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 회원, 한양대학교 대학원 기계설계학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부

E-mail : gjpark@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2299-3209 FAX : (02)2299-3209

문제점을 해결할 수 있는 새로운 빔 정렬장치의 설계모델을 도출하였다. 먼저 초기의 정렬장치를 분석하기 위하여, 기능요구(functional requirements, FRs)와 설계파라미터(design parameter, DPs)를 정의하였다. 이를 설계방정식으로 나타낸 결과 연성설계(coupled design)임을 알 수 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 독립공리를 이용한 새로운 설계변수를 모색하였고, 두 종류의 비연성화설계(decoupled design) 모델을 도출할 수 있었다. 도출된 두 가지의 설계 중에서 우수한 설계를 선택하기 위해 설계모델의 정보량을 계산하였다. 계산 결과 성공의 확률이 높은 설계를 최종적으로 선택함으로써, 두 가지 이상의 설계 안에 대하여 더 좋은 설계를 선정하는데 정보공리가 이용될 수 있음을 보여주었다. 실제로 새로운 설계로 제작하여 시험한 결과, 원하는 기능을 만족시키면서 비교적 빠른 시간에 성공적인 레이저 빔 정렬 작업을 수행할 수 있었다.

## 2. 공리적 설계의 개요

### 2.1 공리적 설계의 개요

공리적 설계방법(axiomatic design approach)은 설계 분야에서 일반적인 설계원리로 소개되어왔다. 공리적 설계방법에서는 설계의 대상을 기능적 영역과 물리적 영역으로 구분하고, 이들 영역간의 사상과정을 통하여 의사결정과정을 진행한다. 설계자는 기능적 영역을 구체화시키기 위해서 기능요구를 정의하고, 물리적 영역에서 각 기능요구에 대응되는 설계파라미터를 정의한다. 설계공리에서 말하는 설계란 원하는 대상과 그 대상을 얻기 위해 수행하는 방법 사이의 연속적인 상호작용을 의미한다. 즉 설계의 목적은 원하는 대상을 기능적 영역에서 정의하는 것이고, 설계의 결과는 물리적 영역에서 얻을 수 있다. 설계과정은 이들 두 영역 내에서 구현되는 동일한 계층구조(hierarchical structure) 단계에서 일어나는 영역간 상호작용을 통하여 이루어 질 수 있다. 또한, 이들 두 영역은 본질적으로 서로 독립적이다. 기능적 영역에서 정의되는 설계의 목적은 기능요구로 구체화된다. 기능요구를 만족하기 위한 설계파라미터는 물리적 영역 내에서 만들어진다. 이러한 개념을 바탕으로 하는 설계공리의 일반적인 전개과정을 Fig. 1 과 같이 표현할 수 있다.

사용자가 요구하는 사항을 기능적 영역 내의 기능요구로 사상 시키고 물리적 영역 내에서 기능요구를 만족하는 설계파라미터를 구한다. 기능요

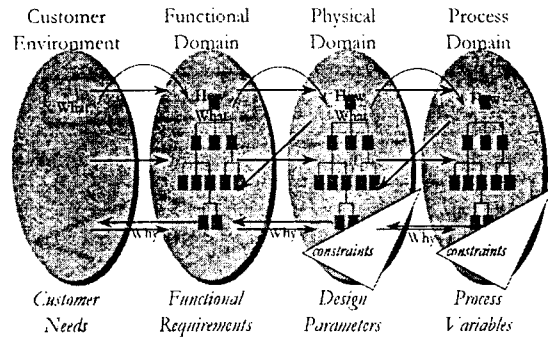


Fig. 1 Concept of domain, mapping and spaces

구와 설계파라미터는 계층구조 형태로 분해(decomposition)할 수 있다. 이때 각 계층구조 내에서 하위레벨로 분해되는 과정이 필요한 경우의 전제조건은 상위레벨에서 제시된 기능요구를 만족하는 설계파라미터를 동위레벨에서 결정해야 한다 따라서, 설계공리를 응용한 설계 행위는 기능요구와 설계파라미터가 계층구조상 동위레벨 사이를 서로 오고 가는 지그재그(zig-zag)과정으로 진행된다. 생산변수(process variables, PVs)로 이루어진 생산 영역(process domain)으로 사상되는 과정도 기능적 영역과 물리적 영역 사이의 사상방법과 동일하다. 이러한 사상과정은 유일한 과정이 아니므로, 기능요구에 맞는 적절한 설계파라미터를 찾아내는 것은 여러 개의 해가 나올 수 있고, 많은 부분이 설계자의 손에 달려 있다. 설계공리에서 제시하는 기본 공리는 다음과 같이 두 가지가 있다.<sup>(7,8)</sup>

공리 1 : 독립공리(The Independence Axiom)

기능요구의 독립성을 유지하라.

공리 2 : 정보공리(The Information Axiom)

설계대상의 정보량을 최소화하라.

독립공리는 설계의 목적을 특성화하는 최소한의 기능요구를 정의하고, 기능요구들 사이의 독립성을 유지해야 한다는 것을 말한다. 기능요구와 설계파라미터 사이의 사상과정을 평가하기 위하여 설계 방정식(design equation)을 이용한 좋은 설계의 평가 기준을 제공한다. 다음은 기능적 영역 내의 기능요구와 물리적 영역내의 설계파라미터 사이의 사상 과정을 수학적으로 표현한 설계행렬(design matrix)이다.

$$\{\mathbf{FRs}\} = [\mathbf{A}]\{\mathbf{DPs}\} \quad (1)$$

식 (1)에서 **FRs** 는 독립적인 여러 개의 기능요

구로 구성된 기능요구 벡터이며 설계대상의 기능적 영역을 표현한다. **DPs** 는 **FRs** 의 영향 하에서 설계대상을 정의하는 설계파라미터 벡터이다. 또한, **FRs** 와 **DPs** 의 관계는 설계행렬 **[A]**의 곱으로 나타내고, 설계행렬 내의 각 인자  $A_{ij}$ 는 다음과 같이 표현한다.

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)의 수학적 정의에도 불구하고, 설계행렬 내의 요소들을 모든 경우에 대하여 정확히 표현하는 예는 많지 않다. 따라서 많은 경우에, 설계행렬 내의 각각의 요소들은 기능요구와 설계파라미터 사이의 영향 관계만을 표현한다. 표현 방법은 **O** 와 **X** 의 두 가지인데, **O** 로 표기된 항목은 기능요구와 대응하는 설계파라미터 사이에 영향이 없다는 것을 의미하고, **X** 로 표기된 항목은 영향이 있다는 것을 의미한다. 이 경우, 독립공리를 만족하기 위해서 설계행렬 **[A]**는 대각행렬(diagonal matrix)이나 삼각행렬(triangular matrix)이어야 한다. 설계행렬이 대각행렬인 설계를 비연성설계(uncoupled design), 설계행렬이 삼각행렬인 설계를 비연성화설계(decoupled design)라 하며, 이러한 설계는 독립공리를 만족한다. 이 외에 다른 설계행렬을 갖는 설계는 연성설계(coupled design)라 한다. 앞에서 설명한 과정과 마찬가지로, 물리적 영역과 생산영역 사이의 사상과정은 식 (3)과 같다.

$$\{\mathbf{DPs}\} = [\mathbf{B}]\{\mathbf{PVs}\} \quad (3)$$

**[B]** 행렬은 생산설계행렬이고, **PVs** 는 생산영역의 생산변수 벡터이다. 똑같이 **[B]**행렬의 인자들은 생산변수에 대한 설계파라미터를 편미분한 값이다.

정보공리에서 정보량(Information content)은 설계의 생산물과 생산과정에 따른 기능요구를 성공적으로 얻을 확률로 정의한다. 기능요구  $i$  에 대한 정보량  $I_i$ 는 식 (4)로 정의한다.

$$I_i = \log_2 \frac{1}{p} \quad (4)$$

여기서,  $p$ 는  $FR_i$ 를 만족하는  $DP_j$ 를 얻을 확률이다.  $n$  개의 기능요구가 있을 때, 정보공리를 만족하는 최상의 설계는 가장 적은 정보량을 갖는 설계로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

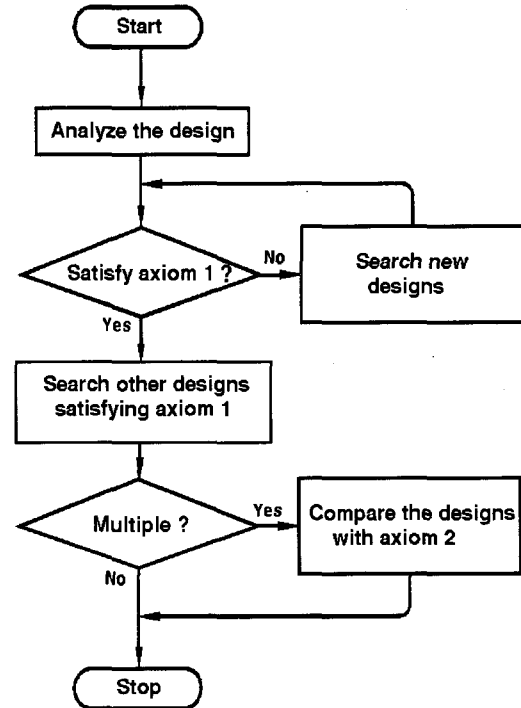


Fig. 2 Flow chart of axiomatic design

$$I_{\min} = \min \sum_{i=1}^n I_i \quad (5)$$

## 2.2 공리적 설계의 순서

실제 설계과정에서, 독립공리와 정보공리를 모두 만족하는 설계를 찾아내기란 쉽지 않다. 대부분의 경우에 독립공리를 만족하는 몇 가지 비연성화 설계들을 제안한 후에 정보공리를 고려하여 최종 설계안을 선택하는 방법이 제시되고 있다. Fig. 2 에서 공리적 설계방법을 사용하여 새로운 설계를 고안하는 일반적인 순서도를 나타내었다. 이를 설명하면 다음과 같다. 먼저 초기 설계에 대한 분석을 한다. 기능요구와 설계변수를 정의하고 설계행렬을 구성하여, 독립공리에 대한 만족 여부를 판단한다. 독립공리를 만족하지 않을 경우에는 사상과정을 통해 새로운 설계안을 모색한다. 이때 두 가지 이상의 설계안이 도출 될 수도 있다.

독립공리를 만족시키는 설계안이 다수인 경우에는 두 번째 공리인 정보공리가 이용될 수 있다. 정보량이 더 적은 다른 설계안이 있을 수 있으므로 독립공리를 만족시키는 또 다른 설계안을 찾아본다. 제안된 복수의 설계안 중에서 어떤 것을 선택하느냐의 문제는 각 설계안의 정보량을 계산

하여 판단할 수 있다. 정보공리는 정보량이 가장 적은 설계를 가장 좋은 설계로 정의하므로 이를 이용하면 최종적 설계안을 선택할 수 있다.

### 3. 레이저 마킹용 지시 빔 정렬장치

#### 3.1 레이저마커와 정렬장치

반도체의 조립 공정 중에는 패키지(package)의 표면 위에 상호, 로고, 제품번호 등의 정보를 표시 해 주는 마킹과정이 있다. 최근에는 여러 가지 마킹방식 중 레이저(laser)와 고속으로 제어되는 거울을 이용하여 펜으로 써나가듯 표면을 변형시키는 빔 스캐닝(beam scanning)식 YAG 레이저 마킹방법이 널리 이용되고 있다. YAG 레이저는 이트륨(Yttrium), 알루미늄(Aluminium), 가넷(Garnet)의 3 개 합성물질로 이루어진 결정을 레이저의 매질로 사용하는 고체 레이저 중의 한 종류이다.<sup>(3)</sup> 레이저 마커는 Fig. 3 과 같은 모양으로 크게 YAG 레이저를 발생시키는 빔 발생장치와 스캐닝 헤드부로 구성되어 있다.

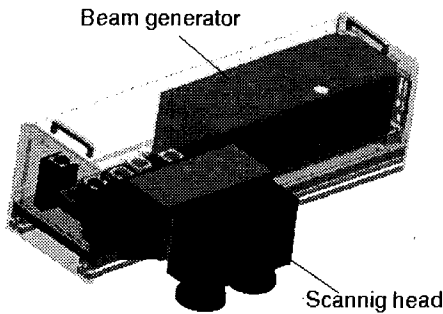


Fig. 3 Beam scanning type laser marker

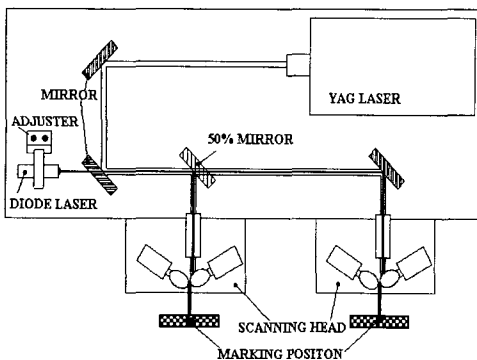


Fig. 4 The component layout of laser marker

스캐닝 헤드는 거울이 부착된 두쌍의 모터가 장착된 장치로, 거울을 이용하여 레이저 빔의 경로를 원하는 위치로 제어한다. 빔 발생 장치에서 생성된 레이저빔은 Fig. 4 에서 볼 수 있는 바와 같이 거울에 반사되어, 그 경로가 스캐닝 헤드부로 입사한다. 이때 마킹속도를 두배로 하기 위해서, 50%는 반사하고 50%는 투과하는 기능을 가진 50% 거울로 그 경로를 분리한다. 이와 같이 두 군데 위치에서 동시에 마킹할 수 있는 장치를 듀얼형 마커라 하는데 반도체 표면마킹 분야에서 널리 사용되고 있다.

실제로 마킹에 사용되는 빔은 YAG 레이저이지만, 여러 가지 새로운 자재의 초기 위치설정 시에 고가의 자재를 보호하기 위해서는 마킹용 레이저 빔을 직접 사용하지 않고 마킹위치를 확인하고 조정할 수 있어야 한다.

이를 위해, 저 출력인 지시용 다이오드 레이저(diode laser)를 사용하면 마킹 위치를 재 설정할 때 자재의 손상 없이 마킹할 경로를 미리 확인하고 보정할 수 있다.

다이오드 레이저를 정렬하는 과정은 다음과 같다. 먼저 YAG 레이저에서 출력된 레이저 빔이 스캐닝 헤드부에 입사하도록 정렬시키고 난 후 경로를 표시하기 위해 기본적인 마킹 위치에 원점을 표시해 둔다. 다이오드 레이저가 YAG 레이저와 동일한 경로를 따르도록 정렬하기 위해서는 Fig. 5 와 같이 다이오드 레이저를 켜서 생기는 표시점의 위치가 YAG 레이저로 이미 생성한 마킹 기준점과 같아지도록 다이오드 레이저의 빔 발생 위치를 이동하여 두 점을 일치시키면 된다. 이때 다이오드 레이저를 마킹용 YAG 레이저의 경로에 정확히 일치시켜야 두 가지 레이저가 같은 위치로 확인되어 YAG 레이저를 끈 상태에서 다이오드 레이저만으로도 마킹 위치를 안전하게 확인할 수 있다. 마지

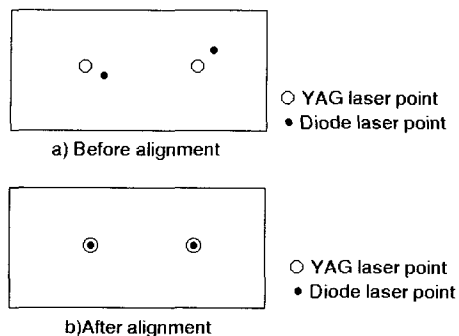


Fig. 5 The alignment of diode laser

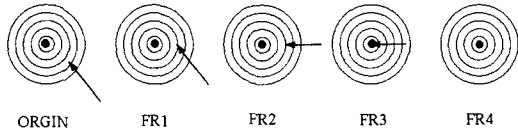


Fig. 6 Illustration for functional requirement

사격에서 말하는 영점조정의 기능을 하도록 레이저 빔 경로의 두 축을 일치시키는 장치가 빔 정렬장치(beam adjuster)이다.

빔 정렬장치는 마킹 확인용 다이오드 레이저를 이미 정렬된 마킹용 YAG 레이저의 경로에 정확히 일치시키는 역할을 한다. 이를 위하여, 빔 정렬장치의 수직·수평의 위치 및 각도를 조정하여 올바른 마킹 기준점에 정렬해야 한다. 그러나 정렬장치는 미세한 가공오차에 따라 정렬하기가 어려운 경우가 많다. 이러한 문제점은 단순히 정밀한 부품을 사용하거나 많은 조립시간을 투자하여도 해결되지 않는 경우가 많다. 그러므로 정렬장치의 위치 및 각도를 정확히 조정할 수 있는 설계가 요구된다.

### 3.2 초기 설계안의 공리적 분석

기능요구의 독립성을 유지해야 한다는 독립공리를 이용하여 빔 정렬장치를 설계하기 위해서는 먼저 기능적 요구 벡터 FRs 와 설계파라미터 벡터 DPs 를 결정하고 이들간의 관계를 설계행렬 [A]로 표현하여야 한다. 특히 독립적인 기능요구의 정의는 설계분석에 있어서 상당히 중요한 비중을 차지한다. 이미 설계되어 사용되었던 빔 정렬장치의 기능요구와 제한조건(CS)을 고려한 결과 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

- FR1 : 빔의 수직 위치를 정렬시킨다.
- FR2 : 빔의 수직 각도를 정렬시킨다.
- FR3 : 빔의 수평 위치를 정렬시킨다.
- FR4 : 빔의 수평 각도를 정렬시킨다.
- FR5 : 빔의 위치를 고정시킨다.

CS1 : 주어진 작은 공간

CS2 : 제작비용

위와 같은 기능요구가 결정된 근거를 설명하면 다음과 같다. 먼저 빔의 경로를 서로 일치시킨다는 것은 빔의 두 중심 축을 일치시킨다는 의미와 같다. 이러한 빔의 중심 축을 일치시키려면 대상이 되는 빔 중심축의 연장선 위에 일치시키려는 빔의 시작점을 이동시켜야 한다.(FR1, FR3) 시작점

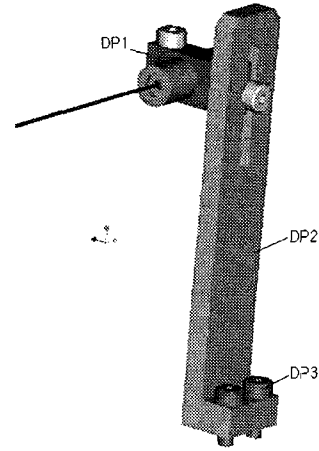


Fig. 7 Beam adjuster and DPs

의 이동은 수직 및 수평위치가 모두 일치되어야 한다. 또한 빔의 거리에 관계없이 두 빔의 축이 일치하려면 두 빔의 각도가 서로 같아야 한다.(FR2, FR4)

이러한 기능요구를 그림으로 설명하면 Fig. 6 과 같다. 기능요구에 대응되는 설계파라미터를 초기의 설계에서 찾으면 다음과 같고 Fig. 7 에 각 설계파라미터를 표시하였다.

DP1 : 수직 이동 블록

DP2 : 지지 블록

DP3 : 하단 나사

이에 대한 설계행렬은 식 (6)과 같이 연성 설계(coupled design) 임을 알 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & O & O \\ O & X & O \\ O & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

설계행렬을 구성해본 결과 초기의 설계는 5 개의 기능요구를 설계파라미터 3 개로 조정해야 하는 연성설계임을 알 수 있다. 이 설계에서 수직 위치를 정렬하고 싶을 때 수직 이동 블록을 움직여야 하므로 이미 설정된 수직 각도가 같이 변동된다. 마찬가지로 수평 위치를 정렬할 때 수평 각도에도 영향을 미쳐 이를 동시에 정렬하기가 매우 어려운 구조로 되어있다. 공리적 설계에서 가장

이상적인 설계(ideal design)는 기능요구의 수와 설계파라미터의 수가 같아야 한다. 현재의 설계는 독립공리를 만족시키지 못하는 연성설계로 설계파라미터를 새로 추가하여 기능요구의 수와 같도록 하면 독립공리를 만족시키는 비연성 설계, 또는 비연성화설계를 도출할 가능성이 있다.

#### 4. 공리적 설계를 이용한 빔 정렬장치 개발

4.1 독립공리를 이용한 정렬장치의 설계안 도출  
 독립공리를 만족하는 새로운 설계를 도출하기 위하여 새로운 설계파라미터를 갖는 정렬장치를 고안하였다. 일단 수직 위치 및 각도를 조절하는 FR1, FR2 만을 고려하여 설계안을 도출한다면 수평위치를 조절하는 FR3, FR4 는 같은 원리로 확장시킬 수 있다. FR1, FR2 에 대한 초기설계의 설계행렬은 다시 표시하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

위와 같은 연성설계를 개선하여 수직 위치와

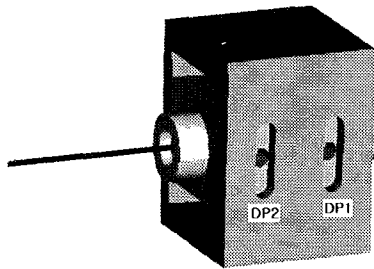


Fig. 8 New design model #1

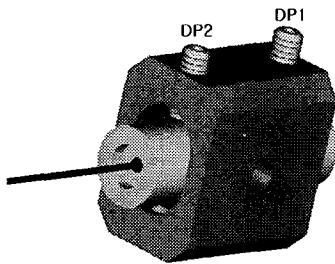


Fig. 9 New design model #2

수직 각도를 결정하기 위한 설계파라미터가 따로 구분되는 설계를 생각한 결과 다음과 같은 두 가지의 기본적인 설계안을 도출할 수 있었다.

첫 번째 설계안은 Fig. 8 과 같이 빔의 시작하는 수직 위치를 조절할 수 있는 뒤쪽 체결부와 수직 각도를 조절할 수 있는 앞쪽 체결부로 나뉘어진 설계파라미터를 가지고 있다. 각각의 홀에 나사를 체결할 수 있고 조절 후 각 위치를 고정시킬 수 있는 설계다. 이에 대한 설계행렬을 구성한다면 다음과 같이 된다. 이는 이미 사용되고 있는 설계와 달리 식 (8)과 같은 비연성화설계(decoupled design)가 된다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

독립공리를 만족시키는 설계는 한가지 이상이나올 수 있으므로 독립공리를 만족시키는 다른 설계안을 고안한 결과 Fig. 9 와 같은 두 번째 설계안을 도출 할 수 있었다.

역시 빔의 수직 시작위치를 조정하는 뒤쪽 나사 부와 빔의 수직 각도를 조절하는 앞쪽 나사부가 분리되어 있다. 이 설계가 Fig. 8 과 다른 점은 빔의 각 위치를 직접 이동시키지 않고 나사를 이용하여 작은 양만큼 조절할 수 있다는 점이다. 위쪽 나사가 위치를 조절할 때 나사 부 아래에는 스프링 플런저(spring plunger)가 부착되어 있는 설계안이다. 그러므로 직접 이동하지 않고 나사를 돌리는 것만으로 빔의 위치가 변동된다. 이 설계 또한 설계행렬을 표시하면 식 (9)와 같은 비연성화설계가 된다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

위의 두 가지 설계안은 각각의 기능요구에 대한 설계파라미터를 새로 정의하여 비연성화설계를 도출할 수 있었다. FR1, FR2 에 대한 개념을 같은 방법으로 확장시키면 다음과 같은 설계를 도출 할 수 있다.

Fig. 10 은 Fig. 9 의 설계를 확장시켰을 때의 설계를 나타내고 있다. 이 설계의 기능요구와 설계파라미터를 정리하면 다음과 같이 된다.

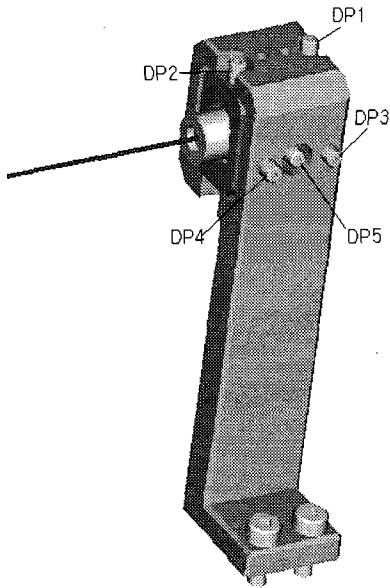


Fig. 10 Expanded new design model

기능요구:

- FR1 : 빔의 수직 위치를 정렬시킨다.
- FR2 : 빔의 수직 각도를 정렬시킨다.
- FR3 : 빔의 수평 위치를 정렬시킨다.
- FR4 : 빔의 수평 각도를 정렬시킨다.
- FR5 : 빔의 위치를 고정시킨다.

설계파라미터:

- DP1 : 위쪽 뒷나사
- DP2 : 위쪽 앞나사
- DP3 : 옆쪽 뒷나사
- DP4 : 옆쪽 앞나사
- DP5 : 고정 나사

확장된 새로운 설계 역시 식 (10)과 같은 비연성화설계 행렬이 된다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O & O & O \\ X & X & O & O & O \\ O & O & X & O & O \\ O & O & X & X & O \\ O & O & O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

따라서 도출된 설계는 초기의 설계보다 주어진 기능을 보다 독립적으로 만족시킨다고 할 수 있다.

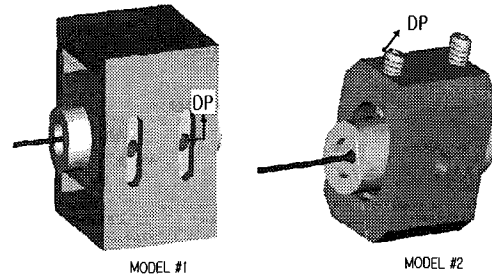


Fig. 11 Design parameter for information content comparison

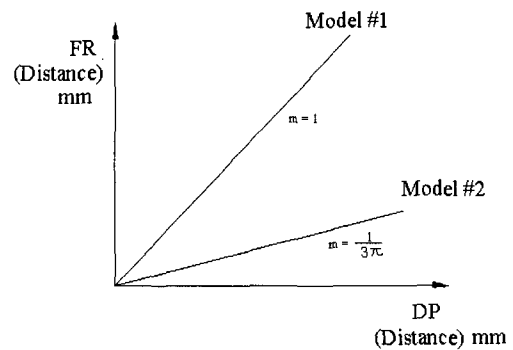


Fig. 12 Distance of FR as adjusting distance of DP

4.2 정보공리를 이용한 빔 정렬 장치의 선정  
 앞 절에서 도출된 두 가지의 설계 중 더 좋은 설계를 선택하기 위한 방법으로 정보공리를 이용하는 방법이 있다. 공리적 관점에서는 정보량이 적은 설계가 더 좋은 설계이다. Fig. 11 에서 보여진 두가지 설계의 정보량을 비교하기 위해, 목표치 부근에서 각 설계파라미터의 분포에 대한 성공의 확률을 비교하였다.

모델 1 은 조정 시에 이동거리가 빔의 이동거리와 일치하므로 Fig. 12 에서 기울기는 1 이 된다. 설계계수 행렬을 구하기 위하여 식 (2)와 조정장치의 치수를 이용하면 설계행렬은 식 (11)과 같이 된다.

$$\text{모델 1 : } \begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & O \\ -4 & 4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

모델 2 의 경우 나사를 는 나사의 지름을 한바퀴 돌릴 때 나사의 피치(pitch)만큼 빔이 이동한다.

$$\frac{2 \pi r}{DP_i} = \frac{p}{FR_i} \quad (12)$$

$r$ : 나사의 반경

$p$ : 나사산의 피치

모델 2 에서 반경( $r$ ) = 1.5(mm) 피치( $p$ )= 1mm 인 나사를 사용한 경우 이를 식 (11)에 대입하면 모델 2 의 설계계수행렬 기술기는  $1/3p$  이 된다. 이러한 방법을 사용하여 모델 2 의 설계 행렬을 식 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$\text{모델 2: } \begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{3\pi} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -4 & 4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

정보량은 식 (4)에 의하여 구할 수 있다. 여기서  $P$  는 성공률로 기능요구 벡터를 확률변수로 하는 결합확률밀도함수(joint distribution function)  $f(FR)$  을 설계 구간에 대하여 적분한 값이다.<sup>(12,13)</sup> 모델 1 에 대한 성공률을 구하기 위하여 기능요구  $FR_i$  에 대하여 목표값( $\tau FR_i$ )을 0 이라 하고, 요구되는 공차( $\pm \delta FR_i$ )를 각각 0.2mm, 0.3rad 이라고 할 때,  $FR_1, FR_2$  는 식 (14)와 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tau FR_1 \pm \delta FR_1 \\ \tau FR_2 \pm \delta FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \pm 0.2 \\ 0 \pm 0.3 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

또한, 설계파라미터는 인간의 손으로 조정하는 양이므로 목표점 부근에서 1 mm 만큼의 오차를 갖는다고 하자. 각 설계파라미터는 확률상 독립이고, 균일한 분포를 갖는 연속형 균등분포함수(continuous uniform distribution)라고 하면 식 (15)와 같다.

$$\begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tau DP_1 \pm \delta DP_1 \\ \tau DP_2 \pm \delta DP_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \pm 1 \\ 0 \pm 1 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

식 (15)에 대한 설계파라미터의 확률분포함수는 단위계단함수(unit step function,  $U$ )를 이용하여 수식으로 표현할 수 있다.

Table 1 Comparison of each design model

	Initial Design	New Design
Adjustment accuracy (mm)	0.8	0.34
Adjustment time (min)	8.1	4.5

$$P(DP_1) = \frac{1}{2\delta DP_1} \{U[DP_1 - (\tau DP_1 + \delta DP_1)] - U[DP_1 - (\tau DP_1 - \delta DP_1)]\} \quad (16)$$

독립변수  $DP_1, DP_2$  에 대한 결합확률분포함수는 두 분포함수의 곱으로 계산될 수 있고,  $FR_1, FR_2$  영역에서의 결합확률분포함수는 자코비 변환(Jacobian of the transformation)을 통하여 구할 수 있다.<sup>(14)</sup> 식 (17)은 자코비 변환한 적분식을 표시하였다.

$$f(FR_1, FR_2) = \frac{1}{2} [U(FR_1 - 1) - U(FR_1 + 1)] \times \frac{1}{2} \left[ U\left(\frac{1}{4}FR_2 + FR_1 - 1\right) - U\left(\frac{1}{4}FR_2 + FR_1 + 1\right) \right] \times \frac{1}{4} \quad (17)$$

이를 설계 영역에 대하여 적분하면 식 (18)과 같이 된다.

$$\int_{-0.2}^{0.2} \int_{-0.3}^{0.3} f(FR_1, FR_2) dFR_2 dFR_1 = 0.015 \quad (18)$$

식 (18)에 식 (17)을 대입하면, 성공률은 1.5%이고 이에 따른 정보량은  $I_1=6.059$  이다. 모델 2 에 대해서도 마찬가지로 방법으로 구하면 성공률은 58.195%가 되고 정보량은  $I_2=0.781$  이다.

정보공리에 따르면 정보량을 최소화하는 설계가 좋은 설계이므로 모델 2 가 더 좋은 설계임을 알 수 있다. 결과적으로 모델 2 를 확장 시킨 Fig. 10 의 설계를 최종 설계로 결정하였다.

시제품을 제작하여 초기 설계안과의 성능을 비교한 결과 Table 1 과 같이 정렬 정확성이 약 58% 가 향상되었고 정렬소요시간은 43%가 단축되어 도출된 설계가 보다 우수한 설계임을 확인할 수 있다.



## 5. 결 론

최근 들어 공학적인 설계(engineering design)안이 몇 가지 제시되고 있고 설계방법을 개선하려는 노력이 제기되고 있다. 이러한 맥락에서 설계에 대한 이론의 적용을 통해 보다 효과적이고 좋은 설계를 도출해 내는 방법에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 공리적 설계에서 독립공리 및 정보공리를 순차적으로 적용하는 과정을 순서도로 표시하고 정리하였다.

(2) 레이저마커에 사용되는 빔 정렬장치의 초기 설계를 공리적 입장에서 분석하였다. 기능요구와 설계행렬을 구성하여 분석한 결과 초기의 설계는 연성된 설계임을 알 수 있었다.

(3) 독립공리를 사용하여 기능적으로 독립적인 두 가지의 설계안을 도출 하였다. 독립공리를 적용해서 얻어낸 두 가지의 설계안 중에서 더 좋은 설계안을 선택하기 위해 정보공리를 이용하여 최종안을 선택하였다.

(4) 공리적 설계의 전체과정을 적용한 결과로 초기 빔 정렬장치 설계의 단점을 해결한 새로운 개념의 설계가 도출되었다. 이러한 방법을 통하여 좋은 설계를 얻기 위한 기계장치의 개념설계에 공리적 설계의 전체 과정이 유용하게 사용될 수 있음을 보여주었다.

## 후 기

이 연구는 교육부 지원 BK21 사업 연구비 및 한국과학재단지정 최적설계기술센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

(1) *RS-MARKER Manual*, 2000, Rofinsinar Laser.

- (2) *Operation & Maintenance Manual*, 2000, Dongyang Semiconductor Equipment.
- (3) Jeff Hcht, 1986, *The Laser Guide Book*, McGraw-Hill Book Company.
- (4) Suh N.P., Bell A.C., Gossard D.C., 1978, "On an Axiomatic Approach to Manufacturing and Manufacturing Systems," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 100, No. 2, pp. 127~130.
- (5) Suh, N.P., Wilson, D.R., Tice, W.W., Yasuhara, M. and Bell, A.C., 1979, "Application of Axiomatic Design Techniques to Manufacturing," *Winter Annual Meeting, ASME*, 79-WA/Prod-25, New York, NY, December 2-7.
- (6) Suh, N.P. and Sekimoto, S., 1990, "Design of Thinking Design Machine," *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, pp. 145~148.
- (7) Suh, N.P., 1990, *The Principles of Design*, Oxford University Press, New York.
- (8) Suh N.P., 2000, *Axiomatic Design: Advances and Applications*, to be Published: Oxford University Press.
- (9) Lee, K.W. and Park, G.J., 2000, "A Structural Optimization Methodology Using the Independence Axiom," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, October, Vol. 24, No. 10, pp. 2438~2450.
- (10) Shin, M.K., Hong, S.W. and Park, G.J., 2000, "Analysis and Design of a Motor Driven Tilt/Telescopic Steering Column for Safety Improvement," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, June, Vol. 24, No. 6, pp. 1479~1490.
- (11) Do, S.H. and Park, G.J., 1996, "Application of Design Axioms for Glass-bulb Design and Software Development for Design Automation," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, Vol. 20, No. 4, pp. 1333~1346.
- (12) Daniel D. Frey, Ebad Jahangir, Fredrik Engelhardt, 2000, "Computing the Information Content of Decoupled Designs," *First International Conference on Axiomatic Design, Proceedings of ICAD2000*, pp. 151~159.
- (13) Albano, L.D. and Suh, N.P., 1993, "The Information Axiom and its Implication," *Intelligent Concurrent Design: Fundamentals, Methodology, Modeling and Practice, ASME*, Vol. 66-DE.
- (14) Alexander M. Mood, Franklin A. Graybill and Duane C. Boes, 1963, *Introduction to the Theory of Statistics*, McGraw-hill, Inc.