

# 공리적 설계를 이용한 마이크로 그립퍼 시스템의 평가 및 개선

전종협\*, 박종규\*\*, 문원규#

## Valuation and Improvement on Micro-gripper System by Axiomatic Design

Jong Hyup Jeon\*, Jong Kyu Park\*\* and Won Kyu Moon#

### ABSTRACT

The micro-gripper system is one of the systems that should be improved in the respect of performance for practical usage. In the previous works, the important issues are considered and presented using axiomatic design approach. In this paper, the functional requirements and design parameters are evaluated in order to improve the performance and efficiency of the system. The evaluation is a very difficult task since many variables are related to the outcomes. To provide a basis for correct design decisions, axiomatic design principles have been advanced. Since the framework of axiomatic design makes design issues easier to understand when they are analyzed, we used those as an evaluation tool.

The object of the system is to handle micro-size parts. Main device is a micro-gripper using two bender-typed and one stack-typed PZTs as actuators. And it has three tips made of tungsten wires for holding function. Also the system must satisfy other functional requirements for appropriate handling performance.

The results of this study show design improvements of micro-gripper system such as structural change of gripper, additional element, and integration of physical parts. Axiomatic design guides presented suitable design parameters corresponding to functional requirements and made the design elements improve through diagrams of whole system.

**Key Words** : Axiom(공리), Design(설계), Micro-gripper(마이크로 그립퍼)

### 기호설명

FR=Functional Requirement

DP=Design Parameter

C=Constraint

### 1. 서론

공리적 설계 이론은, 기능요구사항들(functional requirements; FRs)간의 독립성을 유지하라는 독립 공리와 설계의 정보량을 최소화하라는 정보공리, 이 두 가지의 설계 공리들을 바탕으로 한 체계적이고 합리적인 설계법이다. 독립공리는 계층구조

접수일: 2003년 12월 29일; 게재승인일: 2005년 5월 13일

\* 포항공과대학교 기계공학과

\*\* 포항공과대학교 기계공학과

# 교신저자, 포항공대 기계공학과

Email [wkmoon@postech.ac.kr](mailto:wkmoon@postech.ac.kr) Tel. 054-279-2184

화를 통해서 각 기능들과 물리적 개체들 간의 관계를 고려하여 합당한 설계방안을 얻을 수 있게 한다. 그리고 정보공리는 주어진 기능요구사항들을 구현함에 있어 확률적 점검을 통해 제안된 선택사항들 중에서 최적의 것을 선택하는 기준을 제시한다. 이러한 설계법은 실제로 기계나 제품에 관해서 뿐만 아니라, 설계에 관한 모든 분야에 적용이 가능하다. 특히 문제 설정 및 그것의 해결에 관한 접근법은 논리적 판단에 의해 수행되므로 설계에 있어 우수성이 보장된다. 그리고 다양한 제품이나 공정 설계에의 적용을 통해 유용함이 입증되어 왔다.<sup>1,3,4,5,6</sup>

여기서 우리는 공리적 설계법을 기계적 제품 설계에 적용하려고 한다. 특히 기존의 제품에 대해 공리적 설계 이론을 도입하여 설계의 타당성 검토 등의 평가를 해보고자 한다. 이를 통하여 설계의 개선을 얻을 수 있으며, 공리적 설계법의 효용성을 확인할 수 있을 것이다.

본 논문에서 공리적 설계법을 도입하여 평가하고자 하는 기존의 제품은 마이크로 그립퍼 시스템<sup>2</sup>이다. 마이크로 그립퍼 시스템이란, 마이크로 스케일의 대상을 조작하기 위한 홀딩, 이동, 릴리싱의 기본 기능을 수행할 수 있도록 구성된 시스템이다. 이는 주기능을 수행하는 마이크로 그립퍼를 중심으로 이송, 비전 등의 보조기능을 수행하는 부가적인 시스템으로 구성되어 있다.

이러한 기존의 시스템은 성능 테스트를 통해 해결이 요구되는 여러가지 문제들이 제시되어있는 상황이다. 그리고 성능 향상을 위해 재제작을 목표로 하므로 기존 시스템의 검증 및 그 문제들에 대한 개선 방안들의 고찰이 필요하다. 공리적 설계를 통해 이러한 요구를 충족시키고자 하며, 더불어 아직 확인하지 못한 또 다른 문제점의 발견 및 해결도 가능하리라 본다.

본 연구에서의 기존 시스템에 대한 평가는 공리적 설계법의 기본 과정에 따라 이루어진다. 다시 말해서 설계 대상의 FRs를 설정하고 제약조건들(constraints; Cs)을 고려하여 이에 적합한 설계파라미터들(design parameters; DPs)을 구상하고, 이렇게 결정된 사항들을 공리적 설계법에서 제시하는 공리들에 비추어 타당성을 검증한 뒤 수정하는 과정의 반복을 통해 합리적인 설계를 유도하는 것이다.

## 2. 기존 마이크로 그립퍼 시스템

### 2.1 마이크로 그립퍼

마이크로 그립퍼는 전체 시스템에서 가장 핵심적인 홀딩과 릴리싱 기능을 수행하는 그립퍼 부분이다. 본 연구는 궁극적으로 나노 스케일의 대상을 조작하고, 바이오 물질을 다룰 수 있도록 하는 그립퍼가 장착된 시스템을 구성하고자 한다. 이를 위한 초기 단계로 마이크로 스케일의 대상을 조작할 수 있도록 제작된 시스템이 우리의 공리적 설계법을 통한 평가 대상이다.

마이크로 그립퍼의 연구는 활발하게 진행<sup>2</sup>되고 있는 만큼 기본적으로 갖추어야할 기능이 정립되어 있다. 공리적 설계의 관점에서는 FRs이 설정되어 있는 셈이다. 구동기가 홀딩에 충분한 힘을 발휘하면서도 대상물에 따라 손상이 없도록 힘의 제어가 가능해야한다. 그리고 대상물질의 종류에 구애됨이 없어야 하며, 그립퍼 이동시 안정성이 보장되어야 한다. 특히 그립퍼 이동후의 진동 문제는 우리가 다루는 마이크로 그립퍼에 있어 해결이 절실한 것으로 구조 설계에 있어 충분한 고려가 필요하다. 또한 마이크로 스케일의 표면 효과로 대표되는 정전력, 표면장력, 반데르발스힘 등은 릴리싱 기능을 수행하는데 있어 반드시 해결해야할 과제이기도 하다.

그립퍼의 종류도 다양하다. 구동기의 종류에 따라 압전재료나 형상 기억합금을 이용한 기계 작동식 그립퍼, 유체의 점착력을 이용한 점착식 그립퍼, 기압차나 정전력을 이용한 흡착식 그립퍼 등이 있다. 이 중에서 우리가 제작한 그립퍼는 압전형 구동기를 사용하는 기계 작동식 그립퍼에 해당한다.

압전형의 구동기는 그립핑에 충분히 강한 힘을 발휘하고, 고분해능( $0.1 \mu\text{m}$ )의 동작 특성을 가지는 반면 동작 범위가 좁으므로 마이크로 스케일의 대상을 다루는 데 적합하다. 하지만 우리가 사용하는 압전 벤더형 구동기는 최대  $100 \mu\text{m}$  이상의 물체도 다룰 수 있을 정도의 비교적 큰 작동 범위를 갖는다.

### 2.2 마이크로 그립퍼 시스템

기존 마이크로 그립퍼의 전체 시스템은 5개의 큰 기능들을 수행하는 부분들로 구성되어 있다. 따라서 공리적 설계의 관점에서 그 시스템을 분석

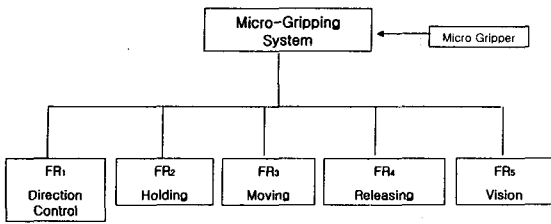


Fig. 1 First level of functional requirements for micro-gripper system

하여 계층적으로 정리하면 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 결정된다. 이렇게 설정된 하나의 기능요구사항에 대해 세부적인 기능들을 고려하여 하부 구조가 형성된다. 그리고 각 기능을 수행하는 설계과라미터가 도입되는데 이것은 실제로 하나 이상의 기능을 하는 물리적 개체의 단위가 되는 경우가 많다.

**2.2.1 방향 제어 기능**

그립퍼 작동시 조작 대상에 대해 다양한 방향에서의 용이한 접근이 가능하도록 다자유도의 시스템을 구축하였다. 이때 Fig. 2 에서와 같이 마이크로 스테이지들(rotational stage, linear micro stages)에 의해 충분한 자유도가 보장된다.

**2.2.2 홀딩 기능**

전체 시스템의 핵심인 대상 물체를 잡는 기능이 마이크로 그립퍼에 의해 수행된다. 그립퍼는 3 개의 압전 구동기와 3 개의 텅스텐 와이어 팁의 그립핑부로 이루어진 3 젓가락형 구조이다. 이때 각 젓가락은 Fig. 3 과 같이 배열되어 있다. 그립퍼는 스택형 압전으로 주그립핑 젓가락과 보조 젓가락의 끝점이 일치되도록 조절하고, 주그립핑 젓가락의 물체 그립핑 동작이 이루어진 후 덮개 젓가락이 안정된 그립핑을 돕도록 하는 순차적 작동이 이루어진다.

**2.2.3 이동 기능**

마이크로 스테이지에 의해 이동 기능이 수행(Fig. 2)될 수 있지만, Fig. 4 와 같이 마이크로 매니플레이터의 도입으로 자동화 및 정밀 제어 이동이 구현되도록 하였다. 매니플레이터는 정밀 구동에 적합한 컨트롤러 및 구동기로 이루어져 있으며, 구동부는 효율적인 구동을 위하여 구동 영역에 따라

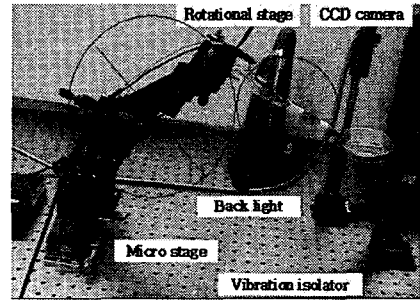


Fig. 2 Subsystem to control direction using micro-Stages<sup>2</sup>

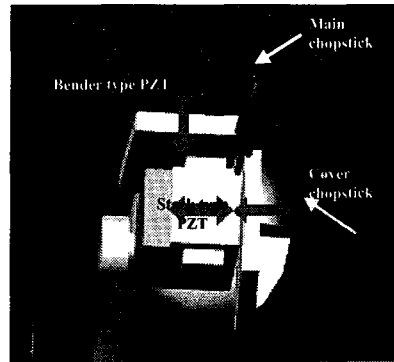


Fig. 3 Design view to show actuating directions of each actuator in the gripper

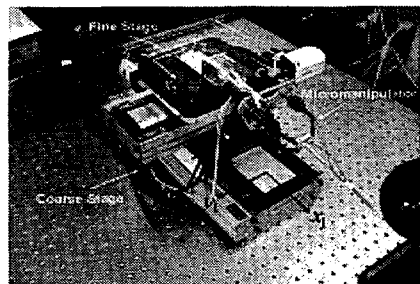
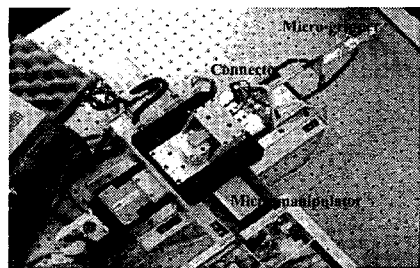


Fig. 4 Subsystem to perform moving function

정밀 구동부(fine stage)와 대변위 구동부(coarse stage)로 구성되어 있다.(Fig. 4 (하)) 또한 그립퍼가 이 매니플레이터에 장착되어 조작성이 용이하도록 연결부 구조물이 더해져 있다.(Fig. 4 (상))

### 2.2.4 비전 기능

마이크로 스케일에서의 조작성 동작의 과정과 결과를 확인하기 위해 비전 시스템은 필수적이다. 이것을 구현하기 위해 Fig. 5 와 같이 2 대의 CCD 카메라와 1 대의 광학 현미경이 이용되었다.

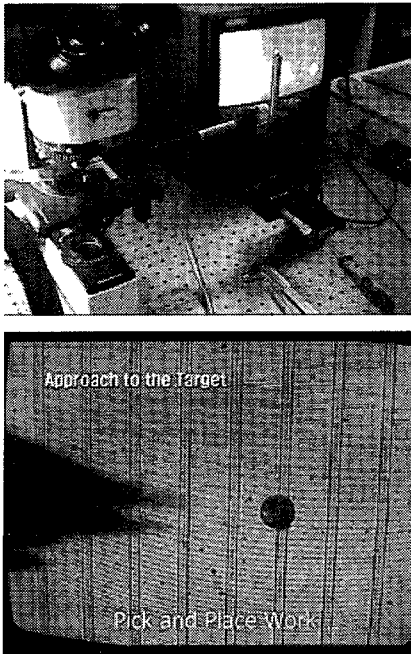


Fig. 5 Test view through the CCD monitor

## 3. 개선된 마이크로 그립퍼 시스템

### 3.1 문제점 분석 및 개선방안 검토

기존의 시스템의 시험 작동을 통해 대책이 요구되는 많은 문제점들은 이미 제시되었다. 따라서 안정되고 정밀한 작동을 위해, 공리적 설계법을 적용하여 기존 모델에서 발생한 문제점을 추가 기능 요구사항(FR)으로 설정하고 이에 맞는 설계파라미터(DP)를 제안하고자 한다. 이런 과정에서 도출된 개선안을 검토하고 연성설계(coupled design)의 존재를 확인하여 비연성설계(uncoupled design)가 이루어

질 수 있도록 수정하면서 예상치 못한 문제점들을 발견하고 해결하여 설계를 더욱 개선하고자 하였다.

이렇게 개선된 사항들을 앞서 제시한 각 기능들과 함께 계층적 구조를 통해 제시한다. 이미 기존 기능들에 대해서는 적당히 언급되었으므로, 개선 내용에 초점을 맞추어 설명하고자 한다.

### 3.1.1 개선(1) - FRs 의 재선정

그리퍼 시스템의 일반적인 동작 순서를 고려하여 5 개의 최상위 기능요구사항들(FRs)을 설정하고, 그에 맞는 5 개의 설계파라미터들(DPs)을 선정하였다. 하지만 분석 결과 FR1 과 FR3 는 서로 독립적이지 않았으며, 공리적 설계법의 정보공리에서 물리적 개체의 통합이라는 추론에 근거하여 불필요한 FR(FR1)을 설정하였음을 확인하였다. 그래서 Fig. 6 과 같이 DP1 을 DP3 의 한 부분으로 물리적인 개체의 통합(integration)에 의해 수정하면서 FR 을 줄여서 공리에 부합할 수 있었으며, 이 과정에서 FR3 에 추가로 요구되는 사항들이 발생하여 하부구조도 설정되었다. 다시 말하면 공리적 설계를 적용한 결과 기존 마이크로 그립퍼 시스템이 FRs 를 만족 시키는 범위 내에서 정보량을 줄일 수 있는 개체의 물리적 통합이 이루어져 있음을 확인할 수 있었다.

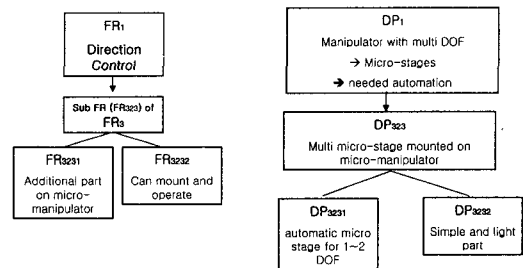


Fig. 6 Hierarchical diagram for direction control function

### 3.1.2 개선(2) - 추가요소 도입

홀딩 기능에 있어서 3 젓가락형 그립퍼가 안정적이며 정확한 작동을 위해서는 3 개 팁들의 끝점들이 한점에서 만나도록 하는 초기화가 이루어져야 한다. 기존 시스템의 실제 시험 작동시 이러한 초기 설정을 위한 보완요소가 필요함이 지적되었다. 이를 위하여 팁의 적절한 휨과 함께 물론 보조기구(보정기라고 명함)가 팁과 구동기의 연결부에 더해지는 설계를 고안하였다. 이는 구조가 단

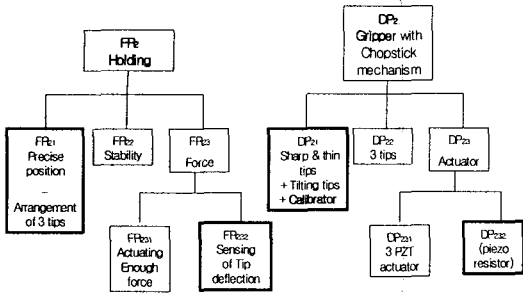


Fig. 7 Hierarchical diagram for holding function

순하면서도 필요시에 팁간의 정밀 배열이 용이하도록 하는 역할을 한다. 그리고 홀딩시 대상 물체에 따라 적절한 힘을 발휘할 수 있도록 하기 위해 연성설계가 불가피한 되먹임 제어 메커니즘의 도입이 제안되었다. 이러한 설계 추가 부분들이 Fig. 7에서 하위구조에 명시되어 있다.

3.1.3 개선(3) – 구조적 수정

기존 시스템의 시험 구동시 이동 동작후 그림퍼 끝단(팁)에서의 진동이 반드시 해결해야 할 문제로 드러났다. 이것에 대해 되먹임 제어의 필요성이 언급되었지만, 실제 구현에 있어 제약 조건으로 놓아야 할 정도의 큰 어려움이 따르는 것으로 판단되었다. 따라서 구조적 개선을 통해 근본적으로 진동을 줄이는 방법을 우선 도입하였다. 이 과정에서 그림퍼의 팔길이가 짧아지고 저주파 진동에 강한 구조가 제안되었다. 이러한 개선내용들이 Fig. 8에서와 같이 하위구조에 더해졌다. 또한 Fig. 8에서 앞서 언급한 FR1 과 FR3 과의 관계도 확인할 수 있다.

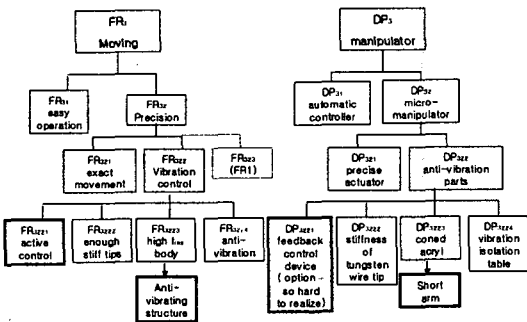


Fig. 8 Hierarchical diagram for moving function

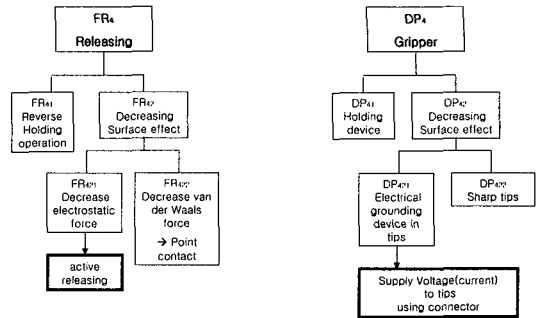


Fig. 9 Hierarchical diagram for releasing function

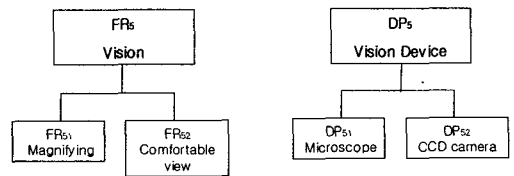


Fig. 10 Hierarchical diagram for vision function

3.1.4 개선(4) – 성능향상을 위한 대안 제시

릴리싱 기능을 시험하는 과정에서 표면 효과에 의해 기존의 시스템으로는 만족스런 성능을 얻을 수 없었다. 따라서 표면 효과에 대한 보다 적극적 대응 방안이 필요하게 되었다. 이에 대해 대상 물체가 붙은 팁에 대전된 전하와 같은 극의 전압을 순간적 가하여 정전적 반발력을 유도하여 물체를 떼어내는 전기적 방법이 제안되어 Fig. 9에서와 같이 하위구조에 추가된 설계가 이루어졌다.

비전 기능에 대해서는 시험 작동시 충분한 성능을 발휘하였다고 판단하지만 작동이 번거로운 면이 있었으므로, 보다 효율적이고 작동이 용이한 시스템의 구축이 필요함을 확인하였다. 하위 구조는 Fig. 10에서와 같이 단순하다.

3.2 결과

기존의 전체 시스템은 Fig. 11과 같으며 이는 아직 개선안들이 적용되지 않은 상태의 것이다. 이에 비해 개선된 모델은 공리적 설계법에 기초하여 불필요한 물리적 개체의 수가 줄고, 실험에 의해 드러난 문제들에 대한 대책으로 적합한 요소의 추가와 구조적 보완 등의 새로운 아이디어들이 제시되면서 성능 향상을 기대할 수 있게 되었다.

Fig. 12는 전체 시스템의 FR과 DP의 관계를

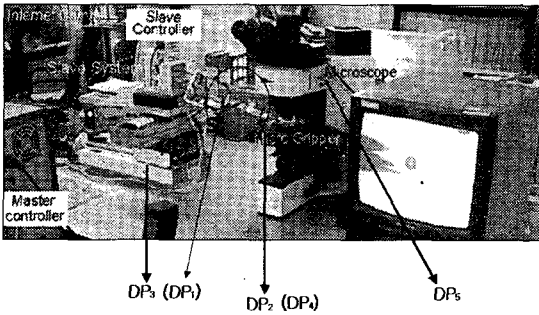


Fig. 11 Organization of existing gripper system<sup>2</sup>

제시할 수 있었다. 그리고 작동 시험시 지적된 문제점들에 대한 해결책을 찾아서 적절한 설계 요소로 구현하는 보완 과정에서, 공리적 설계의 계층적 분석법은 기존의 설계 요소와의 상관관계를 파악을 용이하게 하여 상호 보완적인 설계를 수행할 수 있게 하였다.

이 연구 결과는 공리적 설계법이 문제 설정 및 해결 과정이 합리적임을 알 수 있게 하였다. 따라서 공리적 설계법이 기계적 제품의 평가에 유용함을 확인할 수 있었다.

	DP <sub>1</sub>	DP <sub>2</sub>	DP <sub>22</sub>	DF <sub>21</sub>	DF <sub>22</sub>	DP <sub>21</sub>	DP <sub>22</sub>	DP <sub>23</sub>	DP <sub>24</sub>	DP <sub>25</sub>	DP <sub>26</sub>	DP <sub>27</sub>	DP <sub>28</sub>	DP <sub>29</sub>	DP <sub>30</sub>	DP <sub>31</sub>	DP <sub>32</sub>	DP <sub>33</sub>	DP <sub>34</sub>	DP <sub>35</sub>	DP <sub>36</sub>	DP <sub>37</sub>	DP <sub>38</sub>	DP <sub>39</sub>	DP <sub>40</sub>	
FR <sub>1</sub>	X																									
FR <sub>2</sub>		X																								
FR <sub>3</sub>			X																							
FR <sub>4</sub>				X																						
FR <sub>5</sub>					X																					
FR <sub>6</sub>						X																				
FR <sub>7</sub>							X																			
FR <sub>8</sub>								X																		
FR <sub>9</sub>									X																	
FR <sub>10</sub>										X																
FR <sub>11</sub>											X															
FR <sub>12</sub>												X														
FR <sub>13</sub>													X													
FR <sub>14</sub>														X												
FR <sub>15</sub>															X											
FR <sub>16</sub>																X										

Fig. 12 Master design matrix for modified system

보여주는 전체설계행렬이다. 이를 통해 되먹임 제어가 도입된 부분(DP231, DP232)을 제외하면 비연성 설계가 구현되었음을 확인할 수 있다. 여기서 색칠된 행과 열(FR1 과 DP1)은 설계 수정에 의해 제거된 부분이므로 무시해야한다.

앞서 공리적 설계법을 통해 기존의 시스템에서 연성 설계부를 찾아내어 그것을 비연성화 하는 개선 작업을 목표로 하였다. 하지만 기존 시스템은 이미 모두 비연성화된 설계가 이루어져 있음을 확인하였다. 다만 동작 시험에서 발견한 문제점들을 보완하는 추가 기능 도입이 필요한 것이었으므로 그것들에 대한 보강 아이디어들을 제시하였다.

#### 4. 결론

기존의 제품(마이크로 그립퍼 시스템)에 대해 공리적 설계법을 적용하여 평가 및 개선을 시도하였다. 그 결과 성능향상에 유리한 설계 방안들을

#### 참고문헌

1. Suh, N.P., "Axiomatic Design Advances and Applications," Oxford University Press, pp.192-238, 2001.
2. Park, J. K., Moon, W. K., "Systematic Design and Fabrication of a Three-Chopstick Microgripper," in publishing in International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002.
3. Suh, N.P., "Axiomatic Design Theory for Systems," Research in Engineering Design, Vol.10, pp.189-209, 1998.
4. Suh, N.P., "Designing-in quality through axiomatic design," IEEE Trans Reliab, Vol.44, No.2, pp.256-264, 1995.
5. Jang, B.S., "Axiomatic design approach for marine design problems," Marine Structures, Vol.15, pp.35-56, 2002.
6. Ryu, S.W., "Improvement of Paraglider by Using Axiomatic Approach," Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference 2001, Vol.4, pp.719-722, 2001.
7. Lee, S.J., Lee, I.H. and Cho, D.W., "Design for Micro-stereography using Axiomatic Approach," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.21, No.8, pp.106-111, 2004