

영구 체결용 나사 모델링과 체결력 시뮬레이션에 관한 연구

이승수*, 박진형*, 김민주*, 박정보**, 전언찬***

A Study on Modeling the Screw for Permanent Fixing and the Simulation of Fixing force

S. S. Lee*, J. H. Park*, M. J. Kim*, J. B. Park**, E. C. Jeon***

Key Words: ADS(Automatic drawing system)(자동설계 프로그래밍), rotation angle(회전각도), VisualLISP(자동설계 프로그램 언어), ANSYS(유한요소해석 프로그램)

Abstract

This study is an introduction of ADS in which we have written out programs which can design three-dimensional machine parts and reduce the required time for design them comparing with other CADs. Among the machine parts, screws are commonly used in joining one part to another because of easy handing but welding and rivet are used to join permanently them even though hard operation. Consequently, we have developed the screw for permanent fixing using stairs type screw threads, which is considered as the main machine parts in joining. For that, we designed permanent fastened screws according to the different rotation angle using VisualLISP and transferred it to ANSYS, structural solution program, to find out allowance load, maximum equivalent stress and where it occur.

1. 서론

최근 산업계에는 다양한 CAD 시스템이 도입되어 사용되고 있으며 그 운용효율을 극대화 하기 위하여 여러 가지 방법이 시도되고 있다. CAD/CAM시스템은 3차원 모델을 사용하며 이 3차원 모델은 CAD, MDT 및 CATIA, 그리고 Solid edge등에서 제공된다. 그리고 어떠한 프로그램에서 작업을 수행하더라도 정밀한 가공을 위한 3차원 모델을 생성하는데 많은 시간이 필요하고, 이를 수행하는 전문인력을 교육하는데 많은 경비가 소요된다. 이를 해결하기 위한 방법의 일환으로 ADS(Automatic Drawing System)가 사용되어진다. ADS는 설계에 필요한 몇 가지 요소만을 입력받아 2차원 및 3차원 모델을 생성하는 프로그램을

통칭하는 것인데, 일반적으로 CAD나 MDT 기판의 VisualLISP이 주로 사용된다.^{1,2)} 그리고 ADS는 기계공학적 지식을 가진 유저(User)라면 누구나 쉽게 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그리고 ADS 라이브러리(Library)를 구축함으로써 그 확장성과 활용성을 극대화시킬 수 있다. 이러한 ADS에 관한 연구는 국내외에서 활발히 진행되고 있으며,³⁾ 최근에는 CAD(Computer Aided Design)와 CAM(Computer Aided Manufacturing) 시스템간의 직접적인 연결에 의한 실패를 줄이기 위하여 CAD-CAE-CAM의 작업순서를 일반화하고, 컴퓨터를 이용한 기계요소해석의 비중이 점점 증가하고 있다.^{4,5)}

매우 중요한 기본 기계요소중의 하나인 나사는 각종 기계 구조물의 체결에 이용된다. 그리고 나사산의 형상에 따라 다음과 같이 분류하고 있다.⁶⁾

* 동아대학교 대학원
 ** 삼척대학교 기계공학과
 *** 동아대학교 기계·산업시스템공학부

- | | |
|---------|----------|
| 1. 삼각나사 | (일반체결용) |
| 2. 4각나사 | (힘의 전달용) |

- 3. 사다리꼴 나사 (운동 전달용)
- 4. 톱니나사 (한 방향에서 강한 힘이 작용하는 경우)
- 5. 둥근나사 (큰 힘이 작용하는 경우)

나사는 그 사용의 편리함이나 재활용성에도 불구하고, 금속재료를 영구적으로 결합하는 데 사용되지 못한다. 그리고 현재 리벳과 용접 등이 대안으로 사용되어진다. 이는 나사산의 형상에 관계없이 진동-하중에 의한 나사의 풀림 및 파손 등이 발생하기 때문이다.⁷⁾

그리고 영구체결용으로 사용되고 있는 리벳 및 용접은 한 번 시공하면, 수리 및 보수시에 이를 파괴-재시공해야 하는 불편함을 가지고 있다. 따라서 나사의 편리함과 리벳 및 용접의 단점을 보완한 체결용 기계요소나 체결방법 개발의 필요성이 제기되고 있다.

체결용 기계요소나 체결방법에 관한 연구는 국내외에서 많이 진행되고 있지만 나사의 장점과 리벳 및 용접의 단점을 보완하는 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 크게 두가지 점을 고려하여 영구체결용 나사를 설계하고자 한다. 첫째는 진동 및 하중에 의한 역회전 및 파손을 방지하는 것이고, 두 번째는 사용자가 풀고자 할 때 무리 없이 풀려야 한다는 것이다. 그리고 3차원 요소 자동설계 프로그램 라이브러리 구축의 일환으로 모델링에 걸리는 시간을 최소화하고, 모델링 정보의 피드백 및 재수정을 용이하게 수행하기 위한 자동설계 프로그램을 개발하고자 한다. 또한 영구체결용 나사설계의 타당성을 검증하기 위해 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 나사산에 걸리는 최대 응력을 해석하고자 한다.^{8),9)}

2. 영구체결용 나사산의 설계

영구체결용 나사를 설계하는 데 있어서 진동 및 하중에 의한 역회전 및 파손 방지와 사용자가 풀고자 할 때 무리 없이 풀려야 한다는 사실을 고려하여 Fig. 1과 같은 계단형 나사산을 설계하였다. 계단형 구조를 이용하여 진동 및 하중에 의한 역회전을 방지하고, 와셔를 이용한 체결방법을 통하여 풀고자 할 때 풀림 반대방향으로 힘을 가하면서 나사단사이의 클리어런스를 생성하

여 푸는 메커니즘을 설계하였다. 그림에서 보는 바와 같이 계단형 나사단이 너트에 있는 계단형 나사산과 면 접촉하여 영구 체결하는 구조이다. 그림에 나타난 기호를 다음에 나타내었다.

- α = 나선각, β = 이빨각,
- F = 회전력, Q = 축방향하중
- e = 이빨의높이,
- d_1 = 나사산직경,
- d_2 = 나사골직경
- $d = \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)$; 나사유효직경,
- μ = 나산면사이의 마찰계수

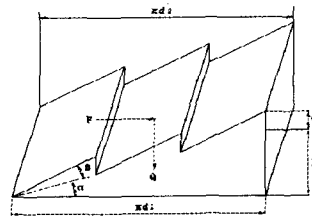


Fig. 1 Formation of the screw for permanent fixing using stairs type screw threads

2. 1 계단형 나사의 역학(나사를 체결할 때)

영구체결용 나사 체결시 작용하는 힘의 크기 및 방향을 Fig. 2에 나타내었다. 그리고 계단 경사면에 수직한 힘을 식 1)에 나타내었고, 계단 경사면에 평행한 힘을 식 2)에 나타내었다.

$$F \sin(\alpha + \beta) + Q \cos(\alpha + \beta) \quad 1)$$

$$F \cos(\alpha + \beta) - Q \sin(\alpha + \beta) \quad 2)$$

나사 체결이 시작되는 순간 계단 경사면을 따라 밀어 올리는 평행력은 수직력에 의해 발생하는 마찰력과 평행이 되므로 식 3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \mu(F \sin(\alpha + \beta) + Q \cos(\alpha + \beta)) \\ & = F \cos(\alpha + \beta) - Q \sin(\alpha + \beta) \end{aligned} \quad 3)$$

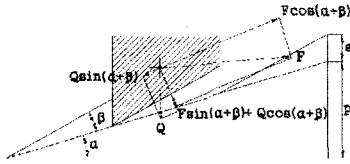


Fig. 2 Load on stairs type screw threads (when screwing)

그러나 여기서 삼각나사이므로 나사의 절단면을 나타낸 Fig. 3을 보면, $\mu' = \frac{\mu}{\cos \beta}$ 가 되므로

$$R = \frac{Q}{\cos \alpha} \text{ 이다.}$$

이를 식 3)에 대입하면 식 4)와 같이 된다. 여기서 $(\tan(\alpha + \beta) = \frac{p+e}{\pi d_1})$ 이다.

$$F = Q \frac{\mu' + \tan(\alpha + \beta)}{1 - \mu' \tan(\alpha + \beta)} \quad (4)$$

$$= Q \frac{\mu \cdot \pi d_1 + (p+e)}{\pi d_1 - \mu \cdot (p+e)}$$

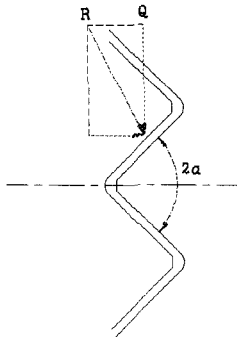


Fig. 3 Sectional plan of a triangular screw

2. 2 계단형 나사의 역학(나사를 풀 때)

영구체결용 나사를 풀 때 작용하는 힘의 크기 및 방향을 Fig. 4에 나타내었다. 일반나사의 경우 F' 가 0보다 크면 풀리게 되나 영구체결용 나사의 경우에는 $F' > 0$ 크더라도 볼트와 너트의 접촉면 e 에 강한 체결력이 발생하여 풀리지 않는다. 그리고 접촉면 e 에 발생하는 체결력은 식 5)와 같으며

$$F' \cos(\alpha + \beta) + Q' \sin(\alpha + \beta) \quad (5)$$

계단 경사면에 작용하는 힘은 식 6)과 같다.

$$Q' \cos(\alpha + \beta) - F' \sin(\alpha + \beta) \quad (6)$$

여기서 이빨의 개수를 n 이라 하면, $\frac{F'}{n}$ 와 $\frac{Q'}{n}$ 가 각 이빨에 걸리는 회전력과 축방향 하중이다.

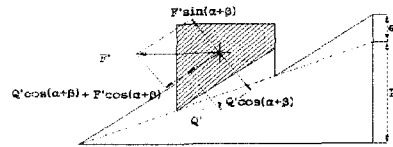


Fig. 4 Load on stairs type screw threads (when unscrewing)

계단형 나사산 하나에 걸리는 힘은 Fig. 5와 같다.

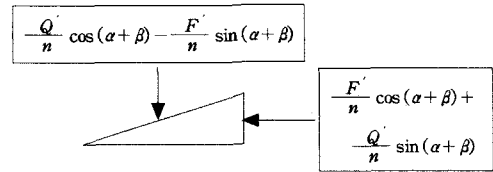


Fig. 5 Load on one stairs type screw thread (when unscrewing)

3. 영구체결용 나사 자동설계 프로그래밍

3. 1 VisualLISP을 이용한 자동설계 프로그래밍

ADS를 구현하는 프로그램을 작성하기 위하여 CAD를 기반으로 하는 프로그램 언어인 VisualLISP을 사용하였다. Fig. 6은 VisualLISP을 사용하여 가스킷, 플랜지 커플링과 라쳇트 휠을 자동설계할 수 있도록 프로그래밍한 것이다.

Fig. 6의 대화상자 안에 있는 몇 가지 설계요소 수치를 입력함으로써 간단하게 3D 모델을 얻을 수 있으며, 그 결과를 대화상자 아래에 나타내었다. 가스킷, 플랜지 커플링과 라쳇트 휠을 설계하는데 사용되는 요소는 내경, 외경 및 두께 등이

다.

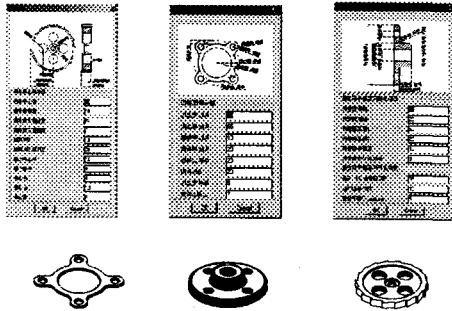


Fig. 6 A Gasket, Flange coupling and Ratchet wheel modeling using visualLISP

3. 2 영구체결용 나사 자동설계 프로그래밍

Fig. 7은 3차원 자동설계 프로그램 라이브러리 구축의 일환이며, 영구체결용 나사 자동설계 프로그램의 대화상자와 그 결과 모델링을 나타낸 것이다.

Fig. 6의 경우와 마찬가지로 대화상자에 몇 가지 요소만을 입력하여 Fig. 8와 같은 3D 모델을 생성할 수 있다. 사용자는 대화상자에서 먼저 나사의 KS 규격을 선정하고, 나사머리 모양을 선택한다. 그리고 피치의 갯수를 입력하고, 회전각도를 선택한다.

그 후 사용자는 오케이 버튼만 클릭함으로써 1분 이내에 3D 모델을 얻을 수 있다. 그리고 3차원 모델을 생성하기 위해 프로그램에서 사용한 수학적 알고리즘은 2장에서 전개한 계단형 나사산의 역학을 이용하였다.

3차원 모델이 생성되는 시뮬레이션 과정을 살펴보면 나사본체를 생성시킨 후 절삭에 사용될 공구를 생성한다. 그리고 나사본체의 하단부부터 공구를 접촉시키고, 절삭깊이를 입력된 피치에 따라 셋팅한다. 입력된 공구회전 각도에 따라서 공구를 회전시키고, 피치/360° 씩 공구를 위로 이송시키면서 계단형 나사산을 생성시킨다. 이와 같은 과정을 피치와 공구 회전 각도에 의해 결정된 횟수(n)만큼 반복한다.

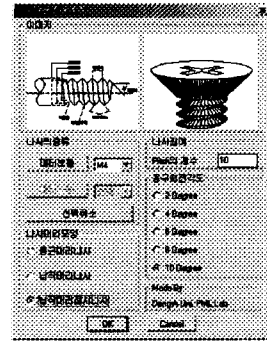


Fig. 7 Dialog box of modeling the screw for permanent fixing

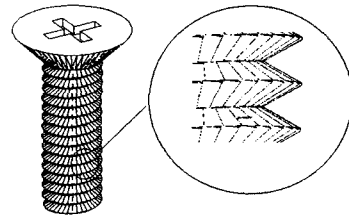


Fig. 8 Modeling the three-dimensional screw for permanent fixing

4. 영구체결용 나사의 강도 해석

4. 1 유한요소해석과 ANSYS

유한요소해석(FEA : Finite element analysis)이란 구조물내에 있는 무한개의 미지수점을 절점(Node)으로 이용하여 유한개의 이산화된 위치로 나타내고, 이들간에 서로 유기적 관계를 맺어 주는 요소(Element)라는 블록을 이용하여 전체 구조물이나 실제의 물리적 시스템 내의 임의의 점에서의 원하는 값을 수치적인 근사화를 통해 얻어내는 것을 말한다.

본 연구에 사용된 구조해석 프로그램인 ANSYS는 유한요소법(FEM : Finite element method)을 이용하여 구조, 유체 및 열등의 해석에 사용되어진다. ANSYS는 먼저 유한요소해석을 이론적 배경으로 하며, 분석대상을 결정한다. 그리고 GUI(Graphic user interface)를 통해 그래픽 모

드로 전환하고, 환경설정을 한다. 또한 하중조건이나 경계조건 같은 기본적인 사항들을 설정하고 모델을 세우며, 이를 해석, 결과 값을 보고, 검토하는 과정으로 이루어진다. 그리고 이와 같은 과정을 좀더 효율적으로 만들기 위하여 APDL(ANSYS Process development language), 최적 환경설정 및 작업순서를 기록한 로그파일을 만들어 이를 활용하는 과정들로 이루어진다.

4. 2 ANSYS를 이용한 체결용 나사의 응력해석

본 연구에서는 2장의 체결용 나사역학을 이용하여 3차원 모델을 자동설계하고, 이 모델을 유한요소해석하여 최대 등가응력을 구한다. 그리고 최대 등가응력이 이빨 하단 부분에서 발생할 것으로 예측되기 때문에 공구회전각도와 피치의 갯수에 변화를 주어서 설계하였다. 기준 데이터를 얻기 위한 설계 조건은 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 이를 이용하여 수평하중 F' 와 수직하중

Q' 이 작용할 때 공구회전각도에 따라 이빨 하나에 걸리 수 있는 최대 응력을 해석하고자 한다. (각 이빨에 걸리는 하중은 동일하다고 가정한다.)

본 연구에서 해석할 체결용 나사의 치수는 미터보통나사 M4에 이빨각(β) = 4° , 피치의 갯수를 10개로 선정하여 모델링하고, 그 나사산에 Table 1과 같이 공구회전각도에 따라 단을 생성한다.

Table 1 Created number of stairs type screw threads according to rotation angle

rotation angle(°)	2	4	6	8	10
number of stairs type screw threads(n)	1800	900	600	450	360

이때 계단형 나사산 하나에 작용하는 힘은 Fig. 5에 나타나 있다.

유한요소해석 프로그램인 ANSYS에서 응력해석을 하기 위해서는 자체적으로 유한요소모델을 생성하든지 아니면 외부의 프로그램을 이용하여 설계한 모델을 불러들이는 방법이 있다. 본 연구에서는 후자의 경우로서 3D 모델 생성 프로그램인 CAD에서 Fig. 7과 같은 자동설계 프로그램을 통해 생성된 3D 모델을 유한요소모델로 사용하

였다.

Fig. 9은 공구회전각도가 2° 일 때 생성된 계단형 나사산의 유한요소모델을 나타낸 것이다. 솔리드 모델을 사용하였으며, Fig. 5의 수식을 사용하여 단에 걸리는 힘을 계산하고, 응력해석을 반복수행하였다. 그리고 각 공구회전각도에 따라 비례한도 내에서 발생하는 최대 힘을 구하고자 한다. 재료는 탄소강($C=0.15$ 이하)을 사용하였으며 비례한도는 20kgf/mm^2 이며 물성치는 다음 표와 같다.

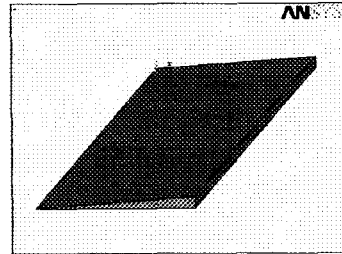


Fig. 9 Finite element model of a stairs type screw thread

Table 2 Specification of finite element model

Items	Spec.
Element type	Hex(6)
Modulus of elastic	$2.1 \times 10^6(\text{kgf/mm}^2)$
Poison's ratio	0.29

Fig. 10은 유한요소해석을 수행하기 위하여 계단형 나사산의 유한요소모델에 요소망을 생성한 그림이다. 요소망(Mesh)은 여섯 개의 절점을 가진 요소로 구성되어 있으며 절점(Node)수는 1,069개이고, 요소(Element)수는 180개이다.

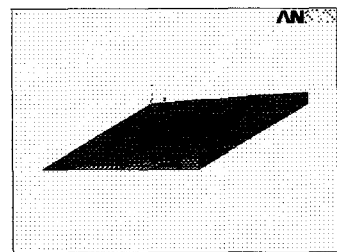


Fig. 10 Mesh generation of finite element model
본 연구에 사용된 유한요소모델인 계단형 나사

산에 적용된 경계 조건을 Fig. 11에 나타내었다. 이빨의 아랫면과 옆면은 수나사에 고정되어 있으므로 변위량 UX, UY 및 UZ가 0이다.

따라서 아랫면과 옆면을 구속하였다.

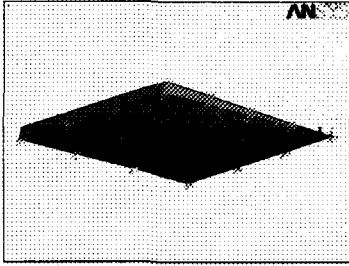


Fig. 11 Boundary condition of finite element model

Fig. 12은 유한요소모델에 작용하는 하중조건을 나타낸 그림이다. Fig. 5의 수식과 같이 나선각, 이빨각, 그리고 수평 및 수직하중이 주어질 때 모델을 나타내고 있다.

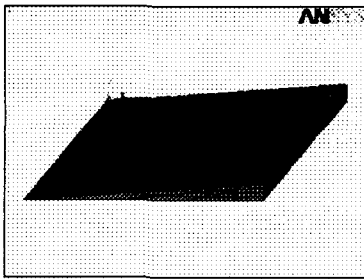


Fig. 12 Load condition of finite element model

자동설계 프로그램에 의하여 생성된 영구체결 용 나사의 계단형 나사산 모델에 유한요소해석을 적용하여 최대 등가 응력을 해석한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 예상 된바와 같이 이빨 모서리 부위에서 최대 등가 응력(MX)이 발생한 것을 볼 수 있다. 공구회전각도가 2. 일때 하중을 달리 하여 비례한도 20kgf/mm^2 내에서 나사에 가할 수 있는 최대 수평하중 $F' = 215\text{kgf}$, 최대수직하중 $Q' = 10\text{kgf}$ 을 구하였으며 최대등가응력 19.48kgf/mm^2 이 모서리 부분에 발생하였다.

Fig. 13부터 Fig. 17까지는 공구회전각도를 2° 부터 10° 까지 각도를 2씩 증가시키면서 최대등가응력을 구하였다.

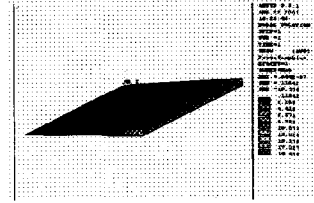


Fig. 13 Distributed equivalent stress (rotation angle = 2°)

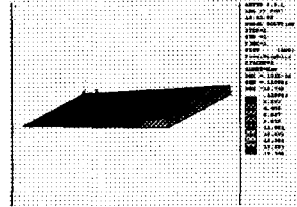


Fig. 14 Distributed equivalent stress (rotation angle = 4°)

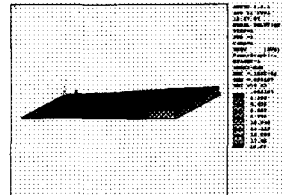


Fig. 15 Distributed equivalent stress (rotation angle = 6°)

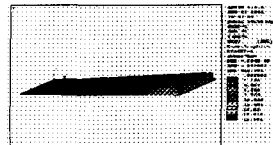


Fig. 16 Distributed equivalent stress (rotation angle = 8°)

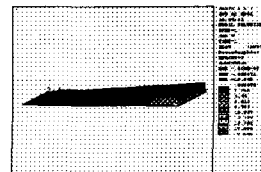


Fig. 17 Distributed equivalent stress (rotation angle = 10°)

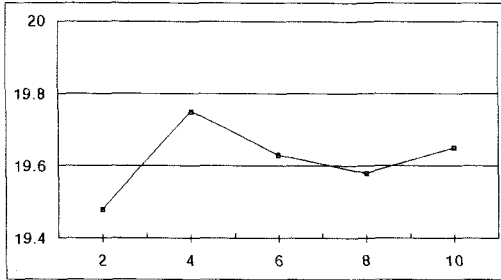


Fig. 18 Maximum equivalent stress according to rotation angle

Fig. 13부터 Fig. 17까지의 그림들은 회전각도별 최대 등가응력분포 해석결과이다. 이를 종합적으로 검토하기 위하여 Fig. 18에 회전각도별 최대 등가응력분포를 종합적으로 나타내었다. 예상했던 바와 같이 최대 등가응력은 나사산의 하단 부위에서 발생하였으며, 회전 각도가 2° 일 때 19.479kgf/mm²가 최소 등가응력이 발생함을 알 수 있었다. 이는 회전각도가 증가할수록 나사산의 크기가 커지나 계단형 나사산의 수가 감소하기 때문에 단에 걸리는 응력이 증가함을 알 수 있다. 따라서 회전각도를 줄이고, 나사산의 수를 증가시키는 것이 나사의 체결력을 분산시키는 효과를 거둘 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 영구체결용 나사를 개발하고, 이를 CAD상의 VisualLISP 프로그램을 이용하여 자동설계하였다. 그리고 이를 검증하기 위하여 ANSYS에서 최대 등가응력해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 나사의 장점과 리벳 및 용접의 단점을 보완한 영구체결용 나사구조를 고안하였다.
- 2) 복잡한 3차원 자동설계 라이브러리 구축의 일환으로 영구체결용 나사 자동설계 프로그램과 나사가공 시뮬레이터를 개발하였다.
- 3) 공구회전각도와 계단형 나사산에 걸리는 최대 등가응력의 상관관계를 규명하였다. 그리고 개발된 계단형 나사산은 최대등가응력이 단 하단

부에 발생함을 알 수 있었고, 최대 수평하중 215kgf, 최대수직하중 10kgf까지 견딜 수 있음을 해석하였다.

후 기

본 연구는 2001년도 동아대학교 지능형 통합항만관리연구센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- (1) 조종규, 김종석, 2000, "Auto-LISP을 이용한 기어설계 프로그램 개발에 관한 연구", 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp.422-427
- (2) 김영남, 이성수, 2000, "Visual-LISP을 이용한 마스터기어 자동설계 프로그램 개발", 한국공작기계학회 추계학술대회 논문집, pp.169-174
- (3) 김민주, 이승수, 전연찬, 2001, "ADS에 의한 RP 시스템의 최적성형에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 158-163
- (4) 이원석, 이현우, 1998 "FEA를 이용한 Lug의 피로수명 평가에 관한 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 10, pp. 88-95
- (5) 박천홍, 정재훈 외 2인, 2000, "FEM을 이용한 유정압테이블의 운동정밀도 해석", Vol. 17, No. 12, pp. 137-144
- (6) "기계설계편람 제3판", 1994 기계설계편람 편집위원회, pp. 849-852
- (7) Sopwith, D. G., "The Distribution of Load in Screw Threads", Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Vol. 159, pp. 373~383
- (8) C. B. Tsay, 1998, "Helical Gears with Involute Shaped Teeth: Geometry, Computer Simulation, Tooth Contact Analysis, and Stress Analysis", ASME, Vol. 110, pp. 481-491
- (9) 이상범, 2000, "단순유한요소 모델을 이용한 차체필라 형상최적설계", 한국공작기계학회지, Vol. 9, No. 6, pp. 133-139