

마이크로 체결부품 전조성형공정에 관한 해석 및 실험적 고찰(Part II: M0.8 급 마이크로 스크류 전조공정 적용)

송정환¹ · 이종섭¹ · 이해진¹ · 이근안¹ · 박기동¹ · 나승우² · 이형욱[#]

Numerical Analysis and Experimental Study of Thread Rolling Process for Micro-sized Screws(Part II: Application to a Micro-screw with Diameter of 800 μ m)

J. H. Song, J. Lee, H. J. Lee, G. A. Lee, K. D. Park, S. W. Ra, H. W. Lee

(Received November 1, 2011 / Revised March 21, 2012 / Accepted April 4, 2012)

Abstract

In this paper, it is proposed to produce high precision screws with a diameter of 800 μ m and a thread pitch of 200 μ m (M0.8xP0.2) by means of a cold thread rolling process. In this part II of the study, the focus is on the production and reliability testing of the prototype M0.8xP0.2 micro-screw. Designs for two flat dies were developed with the aid of the literature and previous studies. Process parameters during the cold thread rolling process were established through FE simulations. The simulation results showed that the threads of the micro-screw are completely formed through the rolling process. Prototype M0.8xP0.2 micro-screw were fabricated with a high precision thread rolling machine. In order to verify the simulation results, the deformed shape and dimensions obtained from the experiment were compared with those from the simulations. Hardness and failure torque of the fabricated micro-screw were also measured. The values obtained indicate that the CAE based process design used in this paper is very appropriate for the thread rolling of micro-sized screws.

Key Words : Micro-screw, Flat Type Thread Rolling, Finite Element Analysis, M0.8xP0.2

1. 서 론

최근 제품의 소형화, 경량화, 정밀화에 대한 요구가 높아짐에 따라 마이크로 부품산업에 대한 관심이 증가하고 있다. 우수한 품질의 마이크로 제품을 개발하기 위해서는 나사와 같은 체결요소의 미세화, 정밀화가 필수적이다.

Fig. 1 과 같이 소형HDD 등에 사용되는 수백 μ m 의 직경을 갖는 마이크로 스크류의 경우, 일본이나 미국 등 부품선진국에서는 전조성형기술

을 적용하여 800 μ m의 직경과 200 μ m의 피치를 갖는 제품(M0.8xP0.2)까지 상용화 되어 있으나[1], 국내의 경우 직경 1400 μ m, 피치 300 μ m급(M1.4xP0.3)에 머물고 있는 실정이다. 본 논문에서는 Part I에서 기술한 관형전조공정의 해석을 통한 주요 공정변수의 영향 분석결과를 토대로 이를 M0.8xP0.2 급 마이크로 스크류 전조성형공정에 적용하였다.

마이크로 스크류의 전조 공정설계 시 유한요소 해석은 매우 유용한 도구가 될 수 있다[2~6]. 유

1. 한국생산기술연구원

2. (주) 서울금속

교신저자 : 한국교통대학교 에너지시스템공학과,

E-mail : hwlee@ut.ac.kr



Fig. 1 General application of micro screw in HDD

한요소해석을 통하여 불량 및 과도한 성형하중을 방지하기 위한 전조금형의 배치 및 초기 소재경 등을 효과적으로 결정할 수 있다. 해석을 통하여 예측된 유효 소성변형률을 기준으로 하여, 공정 중 제품의 파단을 예측할 수 있다.

본 논문에서는 M0.8xP0.2 마이크로 스크류 전조 성형을 위하여 문헌 및 규격[7~9] 등을 참조하여 스크류 및 전조금형 설계를 수행한 후에 유한요소해석을 통하여 치형형상, 성형하중, 금형과 소재간의 접촉에 따른 치형 충전정도 등을 분석하였다. 이를 토대로 초정밀 전조성형장비를 활용하여 M0.8xP0.2 마이크로 스크류 시제품에 대해 성형시험을 수행하고, 시제품의 치형 형상치수를 해석결과와 비교하여 해석기반 공정설계의 타당성을 살펴보았다. 마지막으로, 제품화 가능성 여부를 타진하기 위하여 경도 및 파단토크 등을 측정하였다.

2. 마이크로 스크류 공정 설계

2.1 마이크로 스크류 형상설계

스크류의 형상은 표준적으로 많이 사용되고 있는 미터계 나사법을 적용되며 일반적으로 나사산 각은 60°이다. 스크류 형상설계 시 가장 중요한 인자는 리드각과 유효지름을 결정하는 것이다. 리드(lead)는 유효지름을 지름으로 하는 가상의 원기둥을 원주면을 따라 펼쳐 놓았을 때 수직축을 지칭하며, 이때 나사곡선이 축선에 직각인 방향과 이루는 나선의 경사각을 리드각 혹은 나사각(helix angle) 이라고 한다. 리드각은 λ 은 식(1)과 같이 정의된다[8].

$$\tan \lambda = \frac{p}{\pi \cdot d_2} \quad (1)$$

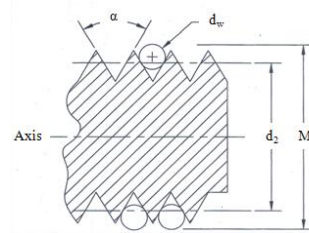


Fig. 2 Schematic description of pitch diameters [7]

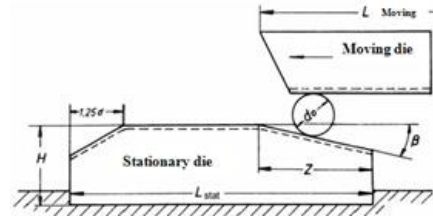


Fig. 3 Schematic diagram of thread rolling tool[9]

이때, d_2 는 유효지름으로 나사의 산과 골이 같아지는 가상적인 원기둥의 지름에 해당한다. 본 논문에서는 유효지름 계산을 위해서 정밀도가 높은 나사에 적용되는 Fig. 2 의 삼침법을 사용 식(2)와 식(3)을 토대로 계산된다[7].

$$d_2 = M - d_w \cdot \left(1 + \frac{1}{\sin(\alpha/2)}\right) + \frac{1}{2} p \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2)$$

$$d_w = \frac{p}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} \quad (3)$$

식(2)와 식(3)을 유효지름(d_2)에 대하여 정리하고, 60°의 나사산 각(α) CAD를 이용하여 유효지름을 계산한 결과, M0.8xP0.2 마이크로 스크류의 유효지름은 671 μ m이며, 이를 식(1)에 대입하여 리드각을 5.422°로 결정하였다.

2.2 마이크로 스크류 단조금형 설계

전조금형의 형상 설계는 생산소재와 성형공정 및 금형가공조건 등에 따라 매우 다양하게 변화된다. 식(4)에 일반적으로 사용되는 전조금형 설계 방법을 정리하였다[9].

$$\begin{aligned} W_D &= L_1 + 3p \\ z &= 3 \cdot d_0 \\ \beta &= 3 \sim 7^\circ \end{aligned} \quad (4)$$

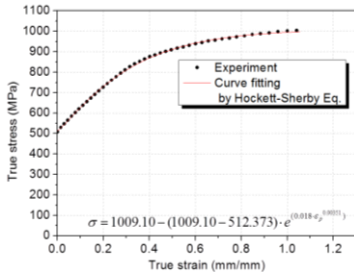


Fig. 4 Flow stress curves of SUSXM7 from experiment and interpolation by Hockett–Sherby model

Table 1 Chemical composition of SUSXM7(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Etc.
0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	-	11.5	-	-

여기서, W_D 는 금형의 폭을 의미하며, L_l 은 소재의 나사부 길이, H 는 금형의 두께, L 은 금형의 길이, d_0 는 소재의 초기직경, β 는 금형의 초기 진입각, z 는 초기진입 거리이다. Fig. 3에 각부의 명칭을 도시하였다. 본 연구에서는 다이폭(W_D) 20mm, 고정부 금형의 길이 45mm, 동작부 금형길이 60mm, 초기진입거리는 1.2mm, 초기진입각 3.0°의 금형을 사용하였다.

3. 마이크로 스크류 전조공정 해석

3.1 해석조건

앞 장 결정된 나사산 형상, 리드각 및 전조금형 외각치수 등의 금형설계를 기초로 M0.8xP0.2 마이크로 스크류의 전조성형해석을 수행하였다.

유한요소해석을 수행하기 앞서, M0.8xP0.2 마이크로 스크류용 초기소재의 물성평가를 위하여 압축시험을 수행하였다. 사용한 소재는 SUSXM7으로 SUS304에 구리를 첨가하여 냉간가공성을 향상시켜, 정밀기기용 스크류 등의 냉간압조에 주로 사용된다. SUSXM7의 화학조성은 Table 1과 같다.

시편의 초기높이 및 직경은 각각 1.05mm, 0.645mm이 되도록 제작하여 압축시험을 수행하였다. 압축시험 속도 0.01mm/s의 등속도를 부과하고 무윤활조건으로 6회 수행하였다. 압축하중이 최대, 최소 시편을 제외하고 산술평균하여 얻은 유동응력 곡선과 본 논문 Part I의 결과를 바탕으로 Hockett–Sherby 모델[10]로 근사한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. M0.8xP0.2 마이크로 스크류에 사용되는 SUSXM7 역시 Part I에서 다루었던 M1.4xP0.3

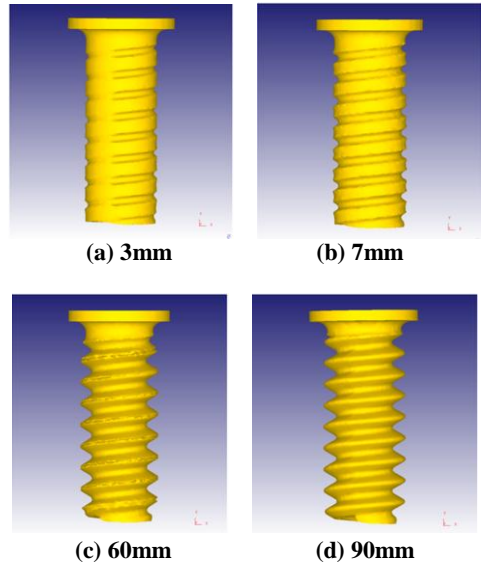


Fig. 5 Deformed shapes of the M0.8xP0.2 micro-screw during the thread rolling process

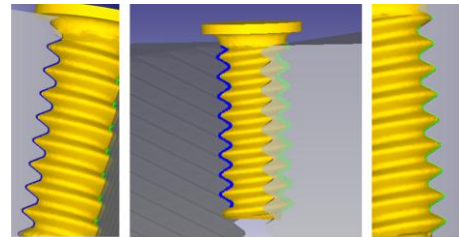


Fig. 6 Closed views of the workpiece and tools at the end of thread rolling process

용 SUS410 소재와 마찬가지로 Hockett–Sherby 모델로 유동응력의 근사가 가능함을 확인할 수 있다.

M0.8xP0.2 마이크로 스크류 전조공정의 유한요소 해석은 상용 프로그램인 DEFORM-3D[11]를 사용하였다. 소재의 유한요소모델은 4-node tetra 요소로 구성되었다. 본 논문 Part I의 결과를 토대로 금형과 소재 사이의 마찰계수는 0.9, 고정금형과 이송금형 간 종방향 배치간격은 피치의 절반인 0.1mm로 결정하였으며, 전조속도는 245mm/s로 결정하였다.

3.2 해석결과

전조성형해석 중의 M0.8xP0.2 마이크로 스크류 변형형상을 Fig. 5에 도시하였다. 성형 후 요소수는 134,820개, 절점수는 31,192개로 생성되었다. 최종성형 후 소재의 충전정도를 Fig. 6에 도시하였다.

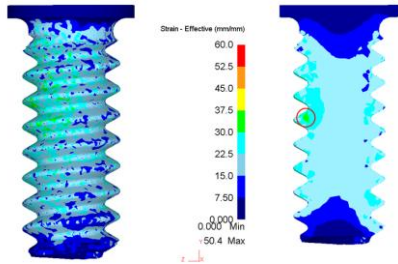


Fig. 7 Distribution of effective plastic strain

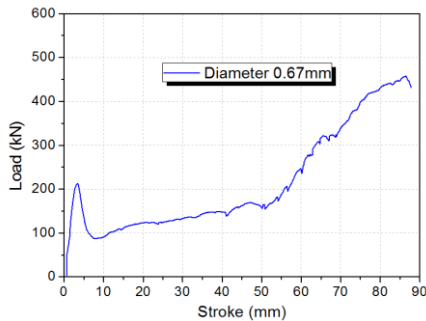


Fig. 8 Load-stroke curve for the thread rolling process of M0.8xP0.2 micro-screw

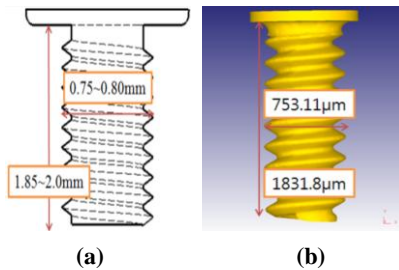


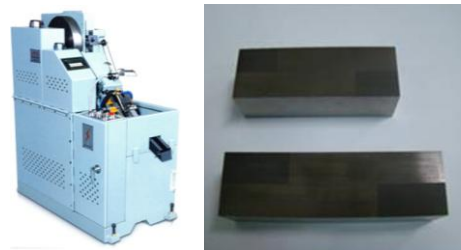
Fig. 9 Comparison of dimension between: (a) design specification; (b) analysis result

금형과 소재 사이의 접촉이 발생된 부분을 확대하여 살펴본 결과, 소재 치형이 금형 나선산과 균일하게 접촉되어 원활한 소재충진이 이루어짐을 확인할 수 있다. 이를 토대로 본 논문에서 결정한 금형 설계 및 공정변수를 토대로 M0.8xP0.2 마이크로 스크류의 성형이 가능함을 확인 할 수 있다. 소재 변형 시 발생하는 유효소성변형률 분포를 Fig. 7과 같다. 스크류 치형부에서 변형이 집중되어 높은 유효소성변형률 분포를 보인다.

M0.8xP0.2 전조성형 시 금형에 부과되는 성형하중을 Fig. 8에서 도시하였다. M0.8xP0.2 스크류의 최초 1회전 치형성형 시 반력은 211.2kN 이다. 동

Table 2 Design specification of thread rolling system

Spec.		Content
H/W	System size [mm]	2200×1200×1450
	Weight [kg]	3250
	Die size [mm]	170/150×80×31
	R.P.M.	120×150
Driving device	Main motor	7.5kW, 4p, 10Hp, 60Hz
	Hoper motor	0.4kW, 0.5Hp, 60Hz



(a) (b)

Fig.10 Experimental set up for M0.8xP0.2 micro screw: (a) equipment; (b) fabricated die sets

작부 금형행정 60mm 이상 일 때 금형하중 급격히 증가하였으며, 동작부 금형행정이 71mm 일 때 스크류의 치형생성이 완료된다.

M0.8xP0.2 마이크로 스크류의 치수검증을 위해 스크류 설계사양의 치수와 전조성형 해석결과에서 도출한 스크류의 치수를 Fig. 9에 비교하였다. 해석에서 예측된 스크류의 치수는 외경 및 길이는 각각 753.11µm, 1831.8µm 이며, 설계사양의 외경 및 길이 공차는 각각 1.85mm~2.0mm, 0.75 mm~0.80mm 으로 해석으로 예측된 결과가 설계사양과 비교하여 오차범위 0.1% 내의 유사한 치수를 가진다.

4. M0.8xP0.2 스크류 시제품 성형 및 평가

4.1 마이크로 스크류 전조 성형 시스템

3장에서 수행한 해석결과를 토대로 M0.8xP0.2 마이크로 스크류 시제품 제작을 위한 전조성형 공정시험을 수행하였다. 기존 전조성형기의 정밀도를 높이기 위하여 Table 2에 명시된 사양으로 Fig. 10(a)와 같이 시험기를 제작하였다. 주요 구성

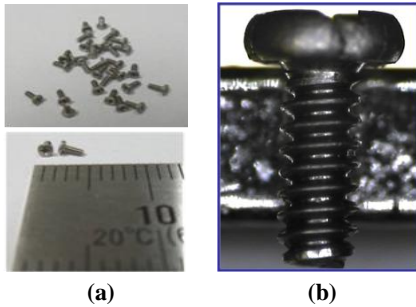


Fig.11 Picture of the produced M0.8xP0.2 micro screw: (a) real view; (b) closed view

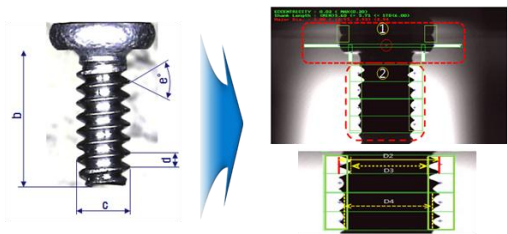


Fig.12 Measurement of typical dimensions of M0.8 xP0.2 micro screw

부품인 구동부 슬라이드는 SKD-11 을 열처리 후 연삭하여 부착하도록 하여, 슬라이드와 다이스 금형이 직각을 유지하도록 제작하였다. 그리고 금형 다이스 홀더 표면 역시 연삭작업을 통하여 정밀도를 높임과 동시에 다이에 부착 시 직각도를 높임으로서 작업오차를 감소시키도록 하였다.

M0.8xP0.2 마이크로 스크류 성형실험을 위해 최종 제작된 전조금형을 Fig. 10(b)에 도시하였다. 전조금형은 마이크로 사이즈의 정밀도로 인하여 제작 중 나사산 패턴의 방전가공, 열처리 등의 과정에서 불량 발생하는데 이는 마이크로 스크류 제품불량에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 본 실험에서는 총 4 회 재가공 작업을 통해 도면에 부합하는 최종 금형 시제품을 제작하였다.

4.2 마이크로 스크류 시제품 성형

상기와 같이 제작한 마이크로 전조성형기와 금형을 이용하여 실제 M0.8xP0.2 마이크로 스크류 제조공정시험을 수행하였다. 일반적으로 스크류 제조공정은 ①헤딩공정 ②바렐공정 ③롤링공정 ④열처리공정 ⑤세척공정 ⑥ 표면처리공정 순으로 이루어지나, 본 연구에서는 헤딩공정에서부터 롤링공정까지만 수행하였다.

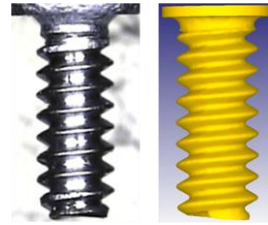


Fig.13 Comparison of deformed shape between experiment and simulation

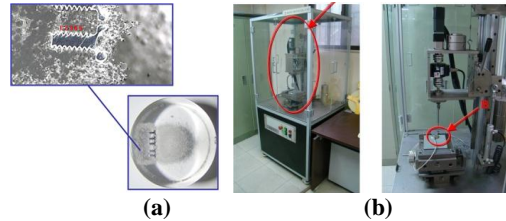


Fig.14 Evaluation of fabricated M0.8 xP0.2 micro screw: (a) hardness; (b) failure torque

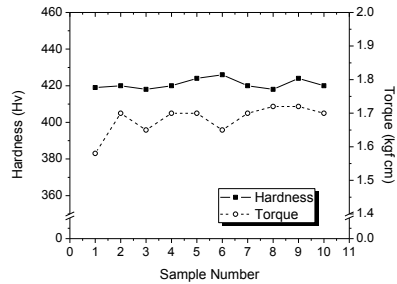


Fig.15 Hardness and failure torque of fabricated M0.8 xP0.2 micro-screw

M0.8xP0.2 마이크로 스크류 성형시험을 수행하여 얻은 시제품을 Fig. 11 에 도시하였다. Fig. 11(b)에 같이 확대한 광학사진을 통하여 전체적으로 치형이 고루 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 형상정밀도에 대한 정확한 비교를 위하여 Fig. 12 와 같이 나사직경, 나사길이 등 주요 인자에 대하여 3 차원 정밀 비전측정시스템을 이용하여 형상치수를 측정하여 Table 3 에 정리하였다. 나사직경, 피치, 치형각도, 나사 길이 모두 규격에서 정하는 공차 안에서 만족함을 확인할 수 있다. 한편, 3 장에서 수행한 유한요소해석의 신뢰성을 검토하기 위해서 Fig. 13 에 도시한 바와 같이 유한요소 해석결과와 실제 시험결과를 비교하였으며, 주요 형상인자에 대하여 역시 Table 3 에 비교하여 정리하였다. 유한요소 해석이 길이부에서 최대 5.2%의

Table 3 Design specification of thread rolling system

Parameters		Spec.	Allowable value		3D scanning data						FE analysis
			lower	upper	1	2	3	4	5	Avg.	
Length	b	2.0mm	1.85	2.00	1.94	1.94	1.94	1.91	1.91	1.93	1.83
Rolling	c	0.8 mm	0.75	0.85	0.76	0.75	0.75	0.76	0.76	0.75	0.75
Pitch	d	0.2 mm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Screw angle	e	60 °	61.5	57.5	61.3	57.8	58.6	60.0	61.0	59.74	60.2

오차범위에서 정확한 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

4.3 마이크로 스크류 시제품 특성평가

본 논문에서 개발한 M0.8xP0.2 마이크로 스크류 시제품의 특성평가를 위해 Fig. 14 에 도시한 바와 같이 경도 및 파단 토크를 측정하여 JIS 규격[12]의 만족여부를 평가하였다. 마이크로 스크류 시제품의 경도는 Fig. 14(a)와 같이 한 시편당 5 부분 (top, center, bottom, left, right)에서 비커스 경도값을 측정하였다. 파단토크 측정은 Fig. 14(b)와 같이 축력시험기를 이용하여 마이크로 스크류가 파괴될 때까지 토크를 가하였으며, 경도 및 파단토크는 모두 총 10 개의 시편의 데이터를 평균하여 산출하였다. Fig. 15 에 각 샘플 당 경도 및 파단토크 데이터를 도시하였다. M0.8xP0.2 마이크로 스크류 시제품의 특성평가 결과, 평균 비커스 경도 값과 파단토크는 각각 421Hv 와 1.68kgf·cm 으로 JIS 1082 규격에서 기준하고 있는 380Hv 이상의 경도와 1.5kgf·cm 이상의 파단토크를 모두 만족하는 결과를 확보하였다.

이상의 M0.8xP0.2 마이크로 스크류 시제품 성능 평가 결과, 본 논문에서 수행한 마이크로 체결부품 전조성형에 대한 유한요소해석기반 금형 및 공정설계의 타당성 및 제품화 활용 가능성을 입증한다고 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 초정밀 체결용 요소부품에 대하여 전조성형기술을 적용하여 800µm의 직경과 200µm 의 피치를 갖는 마이크로 스크류를 제작하고 평가하였다. M0.8xP0.2 마이크로 스크류 전조성형을 위하여 스크류 형상 및 전조금형 설계를 수

행한 후에 유한요소해석을 통하여 치형형상, 성형하중, 금형과 소재간의 접촉에 따른 치형 충전정도 등을 분석하였다. 이를 토대로 초정밀 전조성형장비를 활용하여 M0.8xP0.2 마이크로 스크류 시제품을 성형시험을 수행하고, 시제품의 치형 형상치수를 해석결과와 비교하여 해석기반 공정설계의 타당성을 확인하였다. 마지막으로, 제조된 M0.8xP0.2 마이크로 스크류 시제품의 형상정밀도 및 경도 평가를 통하여, 설계기준에 맞는 마이크로 스크류 제품의 제조가능 함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 생산기반분야 “마이크로 금속소재 기능성 요소부품 점진성형기술개발” 사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Japanese screws, 2009, Micro screws, <http://www.japanesescrews.com>.
- [2] J. P. Domblesky, F. Feng, 2002, A Parametric Study of Process Parameters in External Thread Rolling, J. Mater. Process. Technol., Vol. 121, No. 2-3, pp. 305~317.
- [3] J. L. Dotson, C. R. Henrey, J. P. Domblesky, 2002, Experimental Investigation of External Thread Rolling, Wire J. Int., Vol. 35, No. 11, pp. 64~68.
- [4] Y. Kao, H. Cheng, C. She, 2006, Development of an Integrated CAD/CAE/CAM System on Taper-tipped Thread-Rolling Die-plates, J. Mater. Process. Technol., Vol. 177, No. 1-3, pp. 98~103.
- [5] A. A. Kamounh, J. Ni, D. Stephenson, R. Vriesen,

- G. DeGrace, 2007, Diagnosis of Involutometric Issues in Flat Rolling of External Helical Gears through the Use of Finite-element Models, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 47, No. 7-8, pp. 1257~1262.
- [6] A. A. Kamouneh, J. Ni, D. Stephenson, R. Vriesen, 2007, Investigation of Work Hardening of Flat-rolled Helical-involute Gears through Grain-flow Analysis, FE-modeling, and Strain Signature Models, Int. J. Mach. Tools Manuf. Vol. 47, No. 7-8, pp. 1285~1291.
- [7] R. A. Walsh, 2001, Handbook of Machining and Metalworking Calculations, McGraw-Hill, New York, pp. 9.1~9.6
- [8] KS B 0201, 2006, Metric Coarse Screw Threads
- [9] H. Tschaetsch, 2006, Metal Forming Practice, Springer-Verlag, Berlin, pp. 56~76.
- [10] R. Greze, H. Laurent, P. Y. Manach, 2008, Proc. NUMISHEET 2008(ed. P. Hora), ETH Zurich, Interlaken, Switzerland, pp. 491~496.
- [11] SFTC, 2007, DEFORM-3D v6.1 User's Manual, Scientific Forming Technologies Corp., Ohio, U.S.A
- [12] JIS B 1082, 2009, Stress area and bearing area for threaded fasteners.