

모바일 기기용 초소형 나사의 냉간 단조 공정 설계

최두순^{*}

¹한국교통대학교 기계공학과

Design of Cold Forging Process of Micro Screw for Mobile Devices

Du-Soon Choi^{*}

¹Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation

요약 나사는 나선형의 홈으로 구성된 체결용 기계요소이다. 최근의 모바일 기기의 소형화 추세로 인하여 나사의 소형화 및 경량화 요구도 크게 증가하고 있는 실정이다. 우수한 기계적 성질과 높은 정밀도의 나사를 생산하기 위해서는 금형 및 공정설계가 성공적으로 수행되어야 한다. 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 초소형 나사의 머리부 냉간 단조 성형에 대한 공정설계를 수행하였다. 특히, 금형의 형상과 마찰력이 성형에 미치는 영향을 분석하기 위하여 실험계획법을 적용하였고, 그 결과 마찰력이 성형 시 발생하는 접힘 결함의 지배적인 요인임을 밝혀내었다. 이러한 결과로부터 금형 형상을 개선하였고, 개선된 금형으로 단조 실험을 수행하였고, 실험 결과로부터 접힘 결함 불량이 해소된 것을 확인하였다.

Abstract A screw is a type of fastener characterized by a helical ridge known as thread. The demands for screws with the miniaturization and weight reduction are increasing for the trend of small size of mobile devices. The successful designs of mold and process are very important to obtain screws with good mechanical properties and high precision. In this study, the design of cold forging process of micro screw was carried out by using finite element method. In particular, in order to investigate the effects of die geometries and friction, design of experiment method was adopted and it was revealed that the friction was the dominant factor of folding defects. From these results, the design of die was modified and experiments were carried out with the modified die. From the experimental results, it was found that the folding defects disappeared.

Key Words : Cold Forging, Die Design, Finite Element Method, Micro Screw

1. 서론

모바일 기기(mobile device)는 휴대가 가능한 크기의 컴퓨터 장치로, 일반적으로 터치 입력을 가진 표시 화면이나 소형 자판을 갖고 있다. 스마트폰으로 대표되는 이러한 모바일 기기는 전자산업 시장을 끊임없이 변화시켜 왔으며, 관련 기술의 발달로 다양한 기능의 모바일 기기들이 출시되고 있다. 최근 모바일 기기의 소형화 및 경량화 추세로 인하여 체결 부품의 소형화에 대한 요구가 크게 증가되고 있다. 대표적인 체결 부품인 나사(screw)는

나선형의 나사산과 끝을 이용하여 기계 부품의 체결, 고정 등에 사용되는 부품으로, 최근의 소형화 추세에 맞추어 직경 1mm 내외의 초소형 나사(micro screw)의 개발을 위한 소재[1]나 나사형상[2] 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 나사의 제조는 단조(forging)공정을 통한 머리부 성형과 진조(thread forming) 공정을 이용한 몸통부 나사산 성형으로 이루어진다. 일반적으로 냉간 단조 공정에 의해 제작된 나사는 재료의 손실이 적고, 생산 속도가 빠르며, 우수한 기계적 강도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 금형 및 공정설계에 필요한 시간 및

본 논문은 2014년도 정부의 재원으로 한국산업단지공단의 산업집적지경쟁력강화사업의 지원을 받아 수행되었음.

^{*}Corresponding Author : Du-Soon Choi(Korea National University of Transportation)

Tel: +82-43-841-5128 email: dschoi@ut.ac.kr

Received April 30 2015

Revised June 2, 2015

Accepted June 11, 2015

Published June 30, 2015

비용이 큰 문제점이 있으며 이러한 문제점을 해결하기 위하여 컴퓨터를 이용한 수치해석 기법이 금형 및 공정 설계에 활발히 적용되고 있다[3,4,5].

본 연구에서는 모바일 기기용 초소형 나사의 머리부 단조 공정에 대하여 수치해석을 통한 금형 및 공정조건에 대한 설계를 수행하였다. 먼저 초기 금형 설계안에 대한 성형해석을 수행하고, 머리부 가장자리와 홈 내부에 접힘 결함 발생 가능성을 예측하였다. 결함 개선을 위하여 다구چه 실험계획법을 적용하여, 각 요인이 접힘 결함에 미치는 영향을 분석하고 설계안을 개선하였다. 개선된 설계안에 대하여 해석 및 실험을 통해 접힘 결함이 개선되었음을 확인하였다.

2. 성형 해석

2.1 초기 설계안 형상

본 연구의 대상인 모바일 기기용 나사의 초기 설계 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 나사의 머리부는 지름 3.5mm, 두께 0.6mm로 구성되었고, 몸통부는 지름 1.2mm, 길이 2.4mm로 이루어져 있다. 모바일 기기용으로 사용되므로 전체 크기가 매우 작은 초소형 나사이며, 방수 성능을 위해 나사 성형 후 머리부 아래면에 실리콘 재질의 O-링을 장착하도록 설계되었다. 나사 성형 시 먼저 머리부가 단조공정으로 성형되고, 몸통부는 이후에 전조공정으로 성형되므로 본 연구에서는 몸통부의 세부 형상은 고려하지 않았다. 또한, 나사 머리부 성형 시 1단계 예비성형을 통한 2단계 다단성형을 실시하는 경우가 많으나[6], 본 연구에서는 1단계 성형으로 최종형상을 얻는 것을 목표로 하였다.

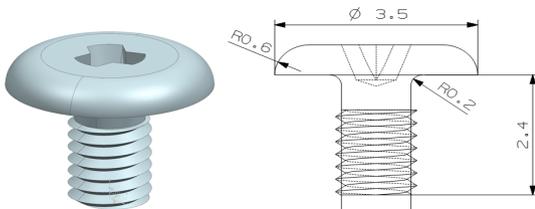


Fig. 1. Geometry of initially designed micro screw

2.2 초기 설계안 해석

초기 설계안에 대한 검토 및 문제점 예측을 위하여 성형해석을 수행하였다. 해석에 사용된 상부 및 하부 다이

(die)의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 소재부는 형상의 대칭성을 이용하여 1/6 대칭부만 25109개의 사면체 요소로 구성하였다. 소재 물성 및 해석조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Analysis conditions for forging simulation

Analysis model	3D rigid plastic
Number of Element	25109
Element type	Tetrahedral element
Material	SUS 410
Initial Workpiece size	$\Phi 1.15 \times 7.105$ mm
Punch stroke	4.93 mm
Shear friction factor	0.12

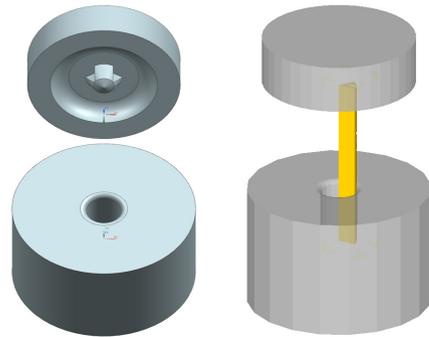


Fig. 2. Geometry of upper die, lower die, and workpiece for numerical analysis

해석 수행 결과 소재의 변형양상과 최대 주응력 (maximum principal stress) 분포를 Fig. 3, 4에 나타내었다. 결과를 살펴보면 A지점과 B지점에서 접힘(folding) 결함이 나타나고 있음을 알 수 있다. A지점의 접힘 결함은 나사 머리부의 Y형 홈이 성형되는 과정에서 바깥 방향으로 밀려나가는 소재 영역이 그대로 압축되면서 형성되는 것으로 분석된다. B지점의 접힘 결함은 Y형 홈 성형 시 나타나며, 일반적인나사 성형에서도 자주 관찰되는 현상이다. Fig. 4의 최대 주응력 분포에서도 접힘 결함이 발생하는 A, B 두 지점의 응력값이 가장 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

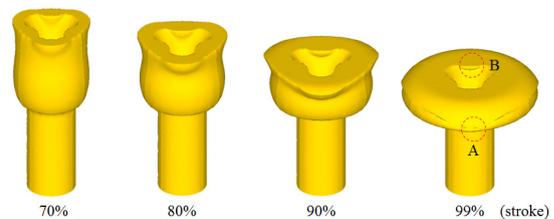


Fig. 3. Deformed shapes of initial design according to the strokes

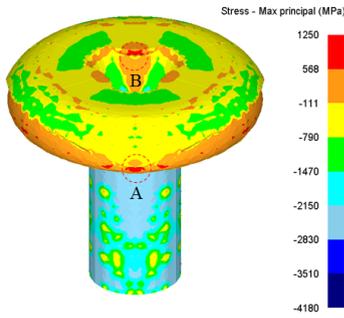


Fig. 4. Maximum principal stress distribution

2.3 설계 개선

초기 설계안 해석에서 예측된 결함을 개선하기 위하여 다음과 같은 설계 개선을 수행하였다. 먼저 설계 개선의 목적은 Fig. 3의 A영역의 접힘 현상을 최소화하는 것으로 선정하였다. 최적 설계를 위하여 다구찌 실험계획법의 파라미터 설계 기법(parameter design)을 이용하였다. 다구찌 실험계획법은 제어인자로 선정된 설계변수들의 여러 조합에서 성능특성이 잡음에 어떻게 영향을 받는가를 관찰하여 분석함으로써 가장 바람직한 설계변수를 정의하는 방법론이다. 이 때, 실험 요인의 실험시간을 최소화하기 위하여 다구찌 실험계획법은 직교배열표를 사용한다.

본 연구에서의 설계 개선을 위한 제어인자로는 Fig. 5에 도시한 머리부 윗면의 필렛반경(R_{top}), Y형 홈부의 필렛반경 (R_{slot}), 머리부 아랫면의 필렛반경(R_{bottom})을 금형 형상에 대한 인자로 선택하였다. 그리고 성형 조건에 대한 인자로 금형 표면의 마찰계수(μ)를 선정하였다. 금형의 마찰계수는 공정 시 제어 가능한 인자는 아니나, 마찰력으로 인한 배럴링(barreling) 현상이 접힘 현상에 영향을 미칠 것이라 판단되어 제어 인자로 선정하였다.

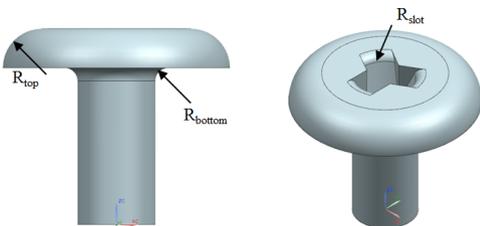


Fig. 5. The investigated parameters

각 인자에 대한 수준은 실제로 적용 가능한 범위 내에서 Table 2와 같이 4수준으로 설정하였다. 제어인자를 배치하기 위한 직교표는 Table 3과 같은 $L_{16}(4^4)$ 표로 선

정하여, 총 16가지 조건 하에서 단조성형해석을 수행하였다.

Table 2. The investigated parameters and levels

Parameters	R_{top}	R_{slot}	R_{bottom}	μ
Level 1	0.15	0.00	0.10	0.10
Level 2	0.30	0.10	0.20	0.20
Level 3	0.45	0.20	0.30	0.30
Level 4	0.60	0.30	0.40	0.40
Unit	mm	mm	mm	-

Table 3. 4-level orthogonal array, $L_{16}(4^4)$

Case	R_{top}	R_{slot}	R_{bottom}	μ
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

A영역의 접힘 결함의 정도를 비교하기 위한 정량적인 값으로는 A 지점의 최대 주응력 값을 이용하였다. Fig. 6과 같이 접힘 현상이 발생하면 접힘부 선단에서는 접힘 방향으로 압축응력이 발생하게 된다.

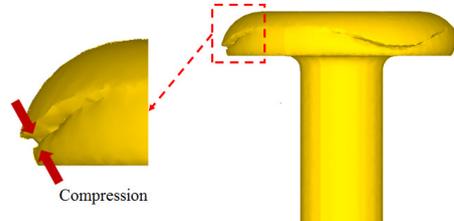


Fig. 6. Compression at folded region

접힘 현상이 심할수록 이 때 발생하는 압축 응력도 커지게 되므로 접힘 지점에서의 최대 주응력 값은 더 큰 음(-)의 값을 갖게 된다. 최대 주응력 값에 영향을 미치는 요인이 접힘 현상만이 아니기 때문에 접힘 결함의 척도로서 최대 주응력 값이 완벽히 대응된다고 볼 수는 없

으나, Fig. 7에 나타낸 것과 같이 각 조건에서의 접힘부 형상과 최대 주응력 값을 비교하면 접힘 현상이 심해질수록 최대 주응력 값이 더 큰 음의 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

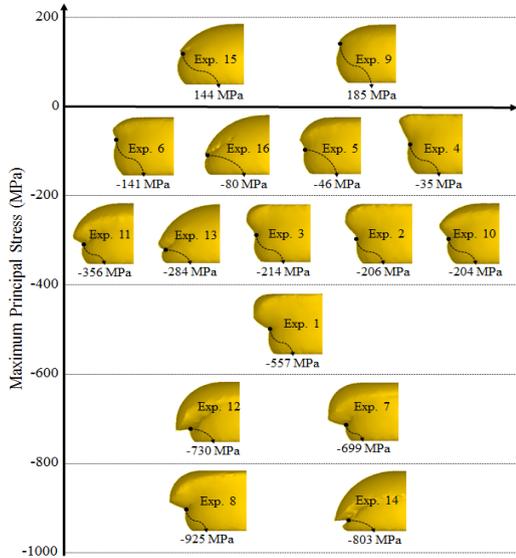


Fig. 7. The folded shapes according to maximum principal stresses

16가지 조건 하에서의 해석 결과를 이용하여 각 제어 인자들의 최대 주응력 값에 대한 주효과를 분석하여 Fig. 8에 나타내었다. 분석 결과 최대 주응력 값에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 금형 표면의 마찰력이었다. 다음 요인으로는 Y형 홈 부의 필렛 반경 (R_{slot}),머리부 아랫면의 필렛 반경(R_{bottom}),윗면의 필렛 반경(R_{top})순으로 분석되었으나, 마찰력에 비하여 그 효과가 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

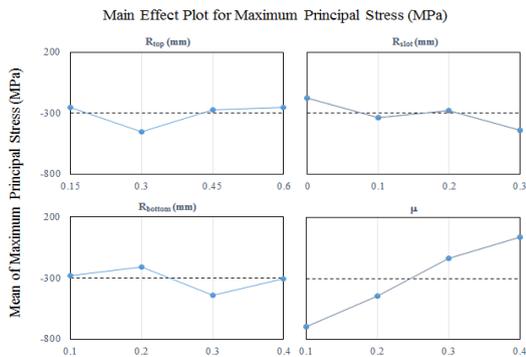


Fig. 8. Main effect plots for maximum principal stress

Fig. 9는 신호 대 잡음 비의 분석결과를 나타낸 것이다. 분석 결과 마찰계수가 클수록 다른 잡음에 대하여 강건한 결과를 나타내었고, 다른 인자들은 마찰계수에 비하여 큰 기여도를 보이지 않는 것으로 분석되었다. 당대 특성으로 분산분석(ANOVA)을 수행한 결과를 Table 4에 나타내었다. 분산분석 결과 역시 접힘 지점의 최대 주응력 값에 가장 유의한 영향을 미치는 요인은 마찰력을 나타내고 있다.

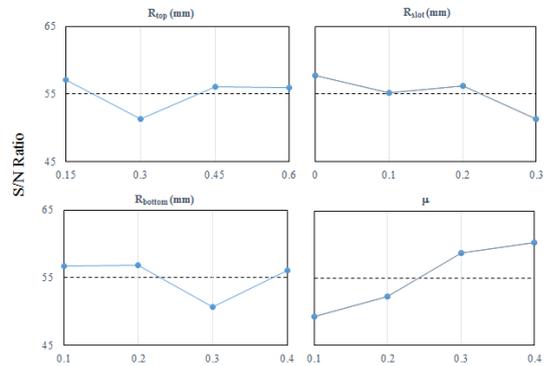


Fig. 9. Signal to noise for maximum principal stress

Table 4. Analysis of variance (ANOVA)

Factor	DF	Σx^2	MS	F value	P value
R_{top}	3	79.29	26.43	1.73	0.332
R_{slot}	3	92.03	30.68	2.01	0.291
R_{bottom}	3	104.90	37.97	2.29	0.257
μ	3	328.48	109.49	7.16	0.070
Error	3	45.89	15.30		
Total	15	650.59			

전체적인 결과를 종합할 때 가장 중요한 요인은 마찰력이다. 그러나 마찰력은 실제 공정에서 직접적인 제어가 어려우므로 마찰력 이외의 다른 요인들도 유의성을 갖는다고 가정하고 최적 조건을 선정하였다.

각 요인별 최적조건은 윗면의 필렛반경(R_{top})=0.15mm, 홈부의 필렛반경 (R_{slot})=0.0mm, 머리부 아랫면의 필렛 반경(R_{bottom})=0.2mm로 나타났다. 최적조건으로 선정된 값들을 살펴보면 상부다이에 위치한 윗면 및 홈부의 필렛반경이 최소일 경우가 접힘 결함 방지에 유리함을 의미한다. 일반적으로 필렛반경이 커지면 그 부분과 접촉하는 소재의 유동성이 증가하여 성형 시 유리한 효과를 얻을 수 있으나, 상부의 유동량이 많을수록 머리부 측면으로 유입되는 소재량이 증가하므로 접힘 결함이 심해지는 결과를 야기시킨다. 따라서 접힘 결함을 줄이기 위한 관점에서는 상부 다이와 접하는 소재의 유동량을 최소화

시키는 것이 유리하다. 동일한 이유로 마찰계수(μ) 값이 클수록 다이 표면에서의 소재 유동이 제한되어 접합 결합 해소에 유리해진다. 따라서, 금형 표면에 코팅이나 윤활제의 사용 없이 성형하는 것이 좋다는 결론을 얻을 수 있다.

이러한 최적조건을 반영한 설계안을 적용하여 성형 해석을 수행하고, 최종 변형 형상과 최대 주응력 분포를 Fig. 10, 11에 나타내었다.

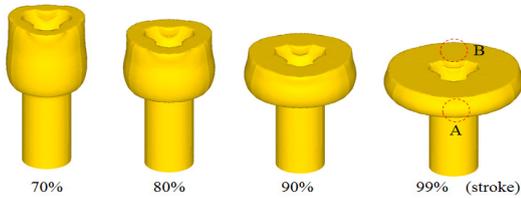


Fig. 10. Deformed shapes of modified design according to the strokes

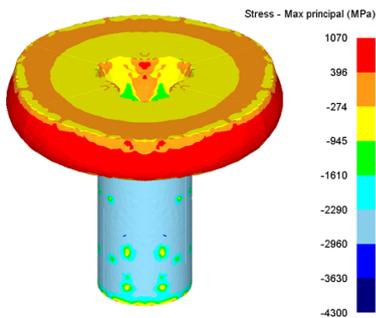


Fig. 11. Maximum principal stress distribution of modified design

Fig. 10의 변형 양상에서 A 지점의 접합 결합이 사라졌음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 11의 최대 주응력 분포에서도 A 지점에서 인장응력 상태를 나타내고 있으며, 따라서 접합 결합이 완전히 해소된 것을 확인할 수 있다. B 지점은 본 연구의 직접적인 설계 목적은 아니었으나 초기 설계안에 비하여 개선안의 경우에 접합 결합이 완화된 것을 확인하였다.

3. 단조 성형 실험

개선된 설계안을 적용하여 금형을 제작하고 단조 성형 실험을 수행하였다. 일반적으로 나사의 단조는 한 기계에서 연속적으로 이루어지며, 소재 와이어가 공급되면

일정 길이만큼 절단한 후 금형에 넣고 단조를 하여 제작된다. 그러나 초소형 나사의 경우 초기 소재가 매우 작으므로, 일정 길이만큼 공급된 와이어를 지그로 고정시킨 후 머리부 단조 성형을 실시하고, 머리 성형이 끝난 후 절단을 하게 된다. 이 때 와이어를 고정하는 지그 부분이 하부 금형의 역할을 하게 되므로 별도의 하부 금형 없이 상부 금형만으로 단조 공정이 수행된다. 실험에 사용된 상부 금형의 형상을 Fig. 12에 나타내었다. 상부 금형은 유한요소해석 결과로부터 선정된 형상을 갖도록 제작되었다. 또한, 해석에서 금형과 소재 사이의 마찰력이 큰 것이 유리하다는 결론을 얻었으므로, 금형 제작 시 마찰 감소를 위한 별도의 코팅을 하지 않았고, 단조 성형 시에도 윤활제를 사용하지 않았다.



Fig. 12. Upper die geometry in the experiment

단조 공정 후 성형된 성형품의 사진을 Fig. 13에 나타내었다. 해석에서 접합결합 가능성이 예측된 머리부 가장자리부와 Y형 홈 부분은 현미경을 이용하여 확대하여 결합 여부를 관찰하였다. 관찰 결과, 머리부 가장자리에 접합 결합이 발생하지 않았고, Y형 홈 부분에서도 접합이나 크랙 등의 결합이 발생하지 않았다. 이로써 해석을 통한 금형 설계 개선이 성공적이었음을 확인할 수 있었다.

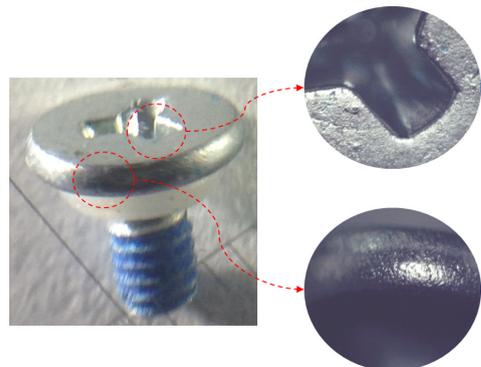


Fig. 13. Final shape of subminiature screw

4. 결론

본 연구에서는 모바일 기기용 초소형 나사의 머리부 단조 공정에서 발생하는 접힘 결함에 대하여 수치해석을 통하여 원인을 분석하고, 다구찌 실험계획법을 통한 설계개선을 수행하였다. 이러한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 초기 금형 설계안에 대한 성형 해석을 수행하고, 공정 중 발생하는 접힘 결함의 원인을 분석하였다.
- 2) 금형 및 공정 개선을 위한 제어 요인을 선정하고, 다구찌 실험계획법을 통하여 각 요인이 접힘결함에 미치는 영향을 분석하였다.
- 3) 각 요인별 최적조건은 윗면의 필렛반경(R_{top})=0.15mm, 홈부의 필렛반경 (R_{slot})=0.0mm, 머리부 아랫면의 필렛반경(R_{bottom})=0.2mm로 나타났고, 이를 적용한 설계안에 대하여 성형해석을 수행하여, 접힘 결함이 개선되었음을 확인하였다.
- 4) 개선된 설계안으로 금형을 제작하고, 단조 성형 실험을 수행하여 결과를 검증하였다.

References

[1] S. W. Ra, I. R. Kim, and S. T. Hwang, "Study of Production and Material Properties of Micro Screw Using SWCH18A and SUS XM7 Materials," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 38, No. 9, pp. 1043-1048, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.9.1043>

[2] K. B. Min, J. B. Kim, K. Park, and S. W. Ra, "Evaluation of Clamping Characteristics for Subminiature Screws According to Thread Angle Variation," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 31, No. 9, pp. 839-846, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.9.839>

[3] H. C. Lee, M. A. Saroosh, Y. T. Im, H. S. Kim, I. H. Son, and D. L. Lee, "Two-dimensional finite element approximation of the hexagonal bolt forming process," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 201, pp. 19-24, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.168>

[4] H. C. Lee, Y. G. Jin, Y. H. Lee, I. H. Son, D. L. Lee, and Y. T. Im, "Process design of high-strength bolt of fully pearlitic high-carbon steel," Journal of Materials

Processing Technology, Vol. 210, pp. 1870-1875, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.06.017>

- [5] J. Kim, S. W. Chae, S. S. Han, and Y. Son, "Manufacturing Process Design of Aluminum Alloy Bolt," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 27, No. 5, pp. 63-68, 2010.
- [6] W. S. Seo, B. W. Min, K. Park, S. W. Ra, S. H. Lee, J. H. Kim, and J. B. Kim, "Design of Cold Heading Process of a Screw for Storage Parts," Transactions of Materials Processing, Vol. 20, No. 1, pp. 48-53, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2011.20.1.48>

최 두 순(Du-Soon Choi)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2005년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (기계공학박사)
- 2005년 5월 ~ 2008년 2월 : LG화학 Tech Center 과장
- 2008년 3월 ~ 2013년 9월 : 인하공업전문대학 기계설계과 교수
- 2013년 10월 ~ 현재 : 한국교통대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

소성가공, 사출성형