

다구찌 방법에 기초한 선삭에서 진원도에 영향을 미치는 인자에 관한 평가

강신길*, 이창호⁺, 장성민⁺⁺

(논문접수일 2011. 01. 17, 수정일 2011. 05. 04, 심사완료일 2011. 05. 04)

An Evaluation of Factors on the Influence Roundness in Turning Based on the Taguchi Method

Shin-Gil Kang*, Chang-Ho Lee⁺, Sung-Min Jang⁺⁺

Abstract

The purpose of this study is to improve the roundness of CNC turning so that helps the operator to choose the right turning conditions to produce a product with the given parameters. This paper focuses on determining the optimal levels of machining factors for circular shaft with CNC turning. For this purpose, the optimization of factors is performed based on experimental design method. A design and analysis of experiments are conducted to study the effects of these factors on the roundness by using the S/N ratio, analysis of ANOVA, and F-test. Factors, namely, fixed pressure, wall thickness, depth of cut, and feed rate are optimized with consideration of the roundness. The boring tool used in this study is a tungsten carbide coated. The material of workpiece is Al6061 and the machining method is dry cutting.

Key Words : Fixed pressure(고정압), Roundness(진원도), Boring(보링), CNC turning(CNC선반), Cutting condition(절삭조건)

1. 서론

요소부품을 생산하는 제조현장에서는 기계가공으로 생산되는 부품의 품질향상과 부가가치를 높이기 위해 노력해 왔다. 그 결과, 과거 범용 공작기계를 사용한 가공방식에서 CNC 공작기계 등을 이용한 생산방식으로 매우 빠른 속도로 바뀌었고 이미 일반화 되었다. CNC 공작기계가 제조현장에 보급됨에 따라 자동화 시스템 발전에 기여하게 되었다. 제조현장에서는 범용 공작기계에 1:1로 작업자가 배치되었던 것에서 벗어나 공정 처리의 패러다임을 무인화 하는 것으로 바뀌어 나아가고 있다.

부품의 정밀도 향상과 품질의 개선은 기계를 운전하고 프로그래밍 하는 엔지니어의 숙련과 노하우에 좌우되고 있으며 그 방법은 일반적인 기계가공 조건의 적용범위 내에서 논의 되어왔다. 이와 관련한 논의는 다양한 학술 연구결과로써 나타나고 있다. 고 능률 가공을 위한 주축 회전수의 최적화에 대한 연구⁽¹⁾, 가공 시 요소부품의 변형량 최소화를 위한 절삭 깊이에 대한 연구⁽²⁻³⁾ 등이 활발히 진행되고 있다. 또한, 제품의 품위에 매우 중요한 표면 거칠기를 고려한 절삭속도와 이송량의 상호 특성변화에 대한 최적의 절삭조건 예측을 위한 연구가 선행되었다⁽⁴⁾. 각종 공작기계의 중요 기계요소인 원형 단면을 갖는 축

* 동양미래대학 기계공학부 기계과
+ 동양미래대학 기계공학부 기계과
++ 교신저자, 유한대학 기계과 (twkjsm@yuhan.ac.kr)
주소: 152-714 경기도 부천시 소사구 경인로 636

(shaft)은 공작기계의 정밀운전을 위해 그 정밀도가 매우 중요시 된다. 특히, 요소 축이 고정밀의 운전을 하기 위해서는 진원도의 영향이 매우 중요하다. 진원도가 악화되면 상호 운동하는 요소부품 간의 정밀운전이 불가능하여 운전 정밀도와 작동효율이 악화될 수 있다. 부정확한 운전으로 인한 손실은 요소 부품간의 마찰과 이로 인한 마멸을 초래하여 공작기계의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 기계 성능 및 효율을 저하시켜 결국 생산성 악화를 초래하고 경제적인 손실을 발생 시킨다. 진원도의 악화는 요소부품의 회전, 상하 운동의 부정확성을 초래할 뿐만 아니라 마찰로 인한 마멸과 열 발생은 부품의 국부적 손실과 동력 손실을 초래할 수 있다. 특히, 내부가 비어 있어 극단면계수가 작은 중공축의 진원도 오차는 축 회전에 기인한 비틀림 모멘트를 증가시켜 변형을 더욱 악화시킬 수 있다. 축의 변형은 소음, 진동을 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라 고 정도의 회전을 불가능하게 한다. 특히 고속 회전용 공작기계에서 스핀들 축의 진원도는 기계 자체의 품질 및 수명에 깊은 연관성을 갖는다. 그러므로 축과 같은 회전체의 진원도 정밀도를 향상시킬 수 있는 가공기술의 연구가 요구된다⁽⁵⁾.

선삭에서 원형 단면의 중공축과 같이 일정한 벽두께(wall thickness)를 갖는 피삭재는 한쪽 끝단을 작업자가 의도하는 일정한 고정압으로 고정된 후 가공을 실시한다. 중공축은 동일 외경을 갖는 중실축과 비교하여 단면계수가 작으므로 벽 두께가 얇을수록 굽힘 또는 비틀림에 의한 요소의 변형이 가중된다. 공작물에는 고정압의 영향으로 탄성과 소성변형이 모두 가해질 수 있으며, 선삭 후 고정력을 해제하면 소성변형에 의해 영구 변형이 발생하여 요소부품이 공차영역을 벗어나는 결과를 초래할 수 있다. 이와 같은 선삭공정은 중공축의 정밀도를 악화시켜 품질을 떨어뜨릴 수 있으므로 정밀가공을 위해서는 중공축의 고정시 적절한 고정압 설정이 요구된다⁽⁶⁾. 또한 고정밀 요소부품의 생산을 위한 정밀기계의 고속화와 가공물의 변형방지를 고려한 최적의 절삭조건 선정, 가공물 재질 특성에 따른 적절한 척킹력이 필요하다⁽⁷⁾.

2. 관련이론

파라미터의 변화는 가공된 완제품의 품질에 영향을 미친다. 본 연구에서는 중공의 시편을 대상으로 고정압, 벽두께, 절삭인자들이 진원도에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 최적화 기술을 위해 요구되는 대부분의 다른 방법보다 적은 노력으로 절삭 파라미터의 최적화에 체계적이고 효율적인 방법론을 제공하는 것으로 알려진 다구치 실험계획법⁽⁸⁾을 선삭실험에 적용하였다. 이와 관련된 연구를 살펴보면

피삭재의 절삭조건 선정을 위한 연구⁽⁹⁻¹⁰⁾ 외에도 다수의 논문에서 절삭 파라미터 분석 등을 위해 적용되었다⁽¹¹⁻¹⁵⁾.

다구치 실험계획법은 제조현장에서 생산성 향상과 품질 최적화를 위해 폭 넓게 적용할 수 있는 방법이다. 실험 후 생성된 데이터의 특성에 따라 적용하는 특성함수의 차이는 있으나 결과적으로 특성치를 최적화하는 것에는 동일한 목적을 갖는다. 본 연구에서는 선삭 후 중공소재의 진원도 향상을 목적으로 한다. 선삭이 완료된 후에는 기계부품의 진원도를 수정, 향상시킬 수 없으므로 생산단계에서 진원도에 미치는 영향을 최적화할 필요가 있다. 본 논문에서는 생산조건에 적용되는 인자들을 3 수준으로 구분하여 직교배열 조건에 따라 선삭 실험하였으며 진원도에 영향을 미치는 인자들을 분석하고 최적화하였다. 본 연구의 실험 데이터인 진원도는 그 오차가 작을수록 품질향상에 기여하므로 특성함수는 망소특성으로 하였고 다음과 같이 나타낸다.

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

S/N비는 신호 대 잡음의 비(signal-to-noise ratio)를 의미하고 실험시스템에서 신호의 힘과 잡음이 주는 영향을 비율로 표현한다. 신호(Signal)는 현장에서 작업자가 요구하는 특징적인 결과 값이고 잡음(Noise)은 원치 않는 값이다. 이때 MSD(mean squared deviation)는 다음 식과 같다.

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (2)$$

MSD는 0으로부터의 평균 제곱편차이다. 모든 실험이 수행된 후에는 그 결과값을 분석하여야 한다. 본 연구에서는 특성치에 크게 영향을 주는 요인이 무엇인가를 분석하기 위해 분산분석(analysis of variance) 방법을 사용하였다. 실험에 적용된 인자들을 분석하여 특성치인 진원도에 미치는 영향을 인자들 각각의 수준에 관하여 파악하였다.

3. 실험방법 및 조건

3.1 인자의 선정

중공축의 진원도에 영향을 주는 인자는 현장에서 기계부품을 생산할 때 적용하는 일반적인 절삭조건에 의한 영향을 우선 고려할 수 있다. 절삭조건은 절삭력에 영향을 미치는 것으로서

절삭력의 발생 차이에 따라서 부품소재에 작용력이 달라지고 이때의 작용력은 부품 소재의 변형을 초래하여 진원도에 영향을 줄 수 있다. 재료 제거량이 과도한 황삭 조건과 그렇지 않은 정삭 조건을 비교하였을 때 절삭 깊이와 이송속도를 크게 하는 황삭 조건에서 절삭력이 크게 나타날 것이므로 황삭의 절삭조건에서 진원도의 오차는 더 크게 발생할 것으로 예상할 수 있다. 그러므로 절삭조건에 과도한 정도를 고려해야 한다. 또한 안정적 절삭조건일 경우 절삭조건과는 별도로 중공 피삭재의 벽두께 변화와 이에 따른 고정압력의 변화가 매우 중요하다. 시편 벽두께의 차이와 고정압력의 변화는 중공 소재의 탄·소성 변화에 영향을 주며 이에 따라 진원도에도 변화를 초래하기 때문이다. 또한 고정압이 가해진 위치를 고정단이라 하고, 고정단으로 부터 길이 변화에 따른 진원도 차이는 발생한다. 이와 같이 본 연구에서는 중공축 시편의 진원도에 영향을 미치는 인자로서 시편을 척에 고정하는 고정압, 시편의 벽두께, 절삭깊이, 이송속도를 직교배열표에 의한 실험 인자로 선정하였다.

3.2 실험 방법

실험을 위해 사용된 피삭재는 중공의 Al6061 소재로써 $\varnothing 70 \times 100 \text{mm}$ 이다. 실험 전 시편에 대한 내, 외경 진원도 평균은 각각 $3.5 \mu\text{m}$ 와 $2.4 \mu\text{m}$ 이다. 특성치인 진원도에 영향을 주는 것으로 고려된 인자수와 수준은 4인자 3수준이다. 각각의 인자는 피삭재를 고정시키는 고정압, 피삭재의 벽두께, 절삭깊이, 이송속도이다. 세부 조건은 고정압 6, 12, 24bar, 벽두께 3, 6, 12mm, 절삭깊이 0.2, 0.4, 0.8mm, 이송속도 0.1, 0.2, 0.4mm/rev이며 적용된 직교배열표 조건은 $L_{27}(3^{13})$ 이다. 본 연구에서는 절삭깊이와 이송속도는 비교적 안정적 조건으로 선정하여 고정압과 벽두께 인자에 초점을 맞추어 진원도에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험이 수행되었다. 시편의 고정용 시편의 외경과 동일한 치수의 소프트 조(Soft jaw)를 사용하여 피삭재와의 불안전 접촉으로 인한 특성치 오차에 영향이 없도록 접촉 조의 원호가공 후 홀 테스터기(제조사:Mitutoyo)를 사용하여 시편의 외면과 조의 원호를 측정하여 시편 고정을 완전한 면 접촉에 근접할 수 있도록 하였다.

특성치 획득을 위해 사용된 선삭용 공구는 현장에서 주로 사용하고 있는 보링 바이트(PGT090304-C05 NC3020계열)이다. 드로우 어웨이 형태의 팁은 초경재질인 C20S - SCLPR 09를 채택하여 내경 선삭 후 정삭면이 될 수 있도록 고려하였으며, 매 선삭마다 새로운 초경선단을 사용하여 공구 마멸로 인한 잡음의 영향을 최소화 하였다. 또한 NC프로그래밍은 G96 기

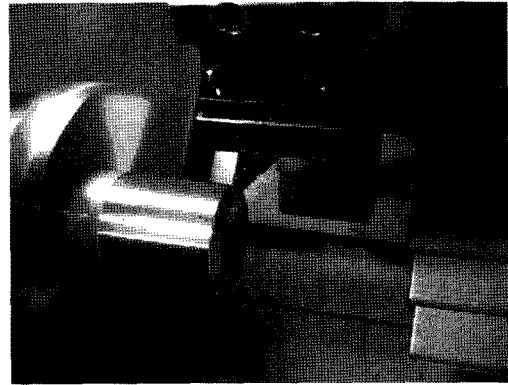


Fig. 1 Turning experiment of CNC machine

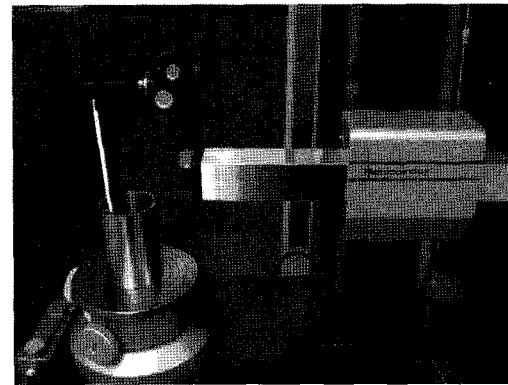


Fig. 2 Photo. of 3D roundness measurement equipment of Kosaka Co. LTD.

능을 사용, 절삭속도 200m/min으로 건식 절삭하였다. Fig. 1은 본 연구를 위해 CNC 선반에서 선삭중인 사진을 나타낸 것이다. 특성치인 진원도 측정은 항온항습시설이 갖추어진 KS 기준에 적합한 정밀 측정실에서 실시하였다. Fig. 2는 측정기의 원형 테이블 위에서 시편의 진원도를 측정중인 사진이다. 시편의 전체 길이 중 척의 조에 고정된 고정단 끝 부분을 0(zero), 자유단 끝 부분을 100mm로 하여 10mm지점에서 95mm지점까지 전체 구간을 5mm의 일정한 간격으로 구분하여 측정하였으며, 또한 5mm 길이의 일정 간격에 대하여 시편의 원주면 측정부위는 전체 원주를 50포인트로 구분하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 압력과 두께변화에 따른 진원도

Fig. 3~6은 진원도 측정장비를 사용하여 측정된 데이터 값을 분석하여 도시한 것이다. Fig. 3은 벽두께가 3mm 일 때 압력변화에 따른 외경에 대한 진원도의 변화를 볼 수 있다. 6bar 및 12bar의 고정압이 주어졌을 때 외경에 대한 진원도의 변화에는

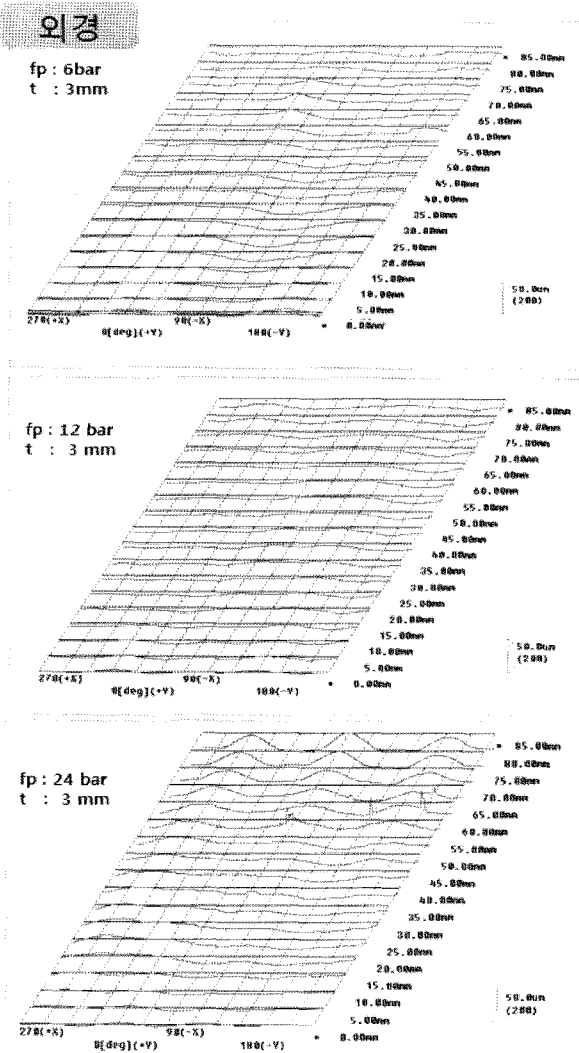


Fig. 3 Roundness of external diameter according to fixed pressure (thickness 3mm)

크게 영향이 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있으며 고정압 24bar 조건에서 진원도의 변위량이 뚜렷하게 발생하였다. Fig. 4-6은 압력별 시편의 벽두께 변화에 대한 내경의 진원도 변화량을 나타낸 것이다. 전체 압력부분 가운데 벽두께 12mm일 때 진원도의 변위량은 비교적 미미하였으며, 벽두께 3mm와 6mm일 때 진원도의 변위량은 높아졌다. 따라서 고정 압력이 높고 중공축의 벽두께가 얇을수록 진원도의 변위값이 높음을 알 수 있다. 고정압력이 외경의 진원도에 미치는 영향은 내경에 비하여 상대적으로 작게 작용하였는데, 그 이유는 시편의 외경은 모두 일정하게 고정하였고 내경에 대한 차이를 두어 벽두께에 변화를 주었기 때문이다. 또한 내경보다는 외경에 대한 원주거리가 상대적으로 크기 때문에 전체 원주거리에 대하여 외경에서 상대적으로 소성변형을 작게 발생시켰으므로 진원도 오차를 더 작게 하였다.

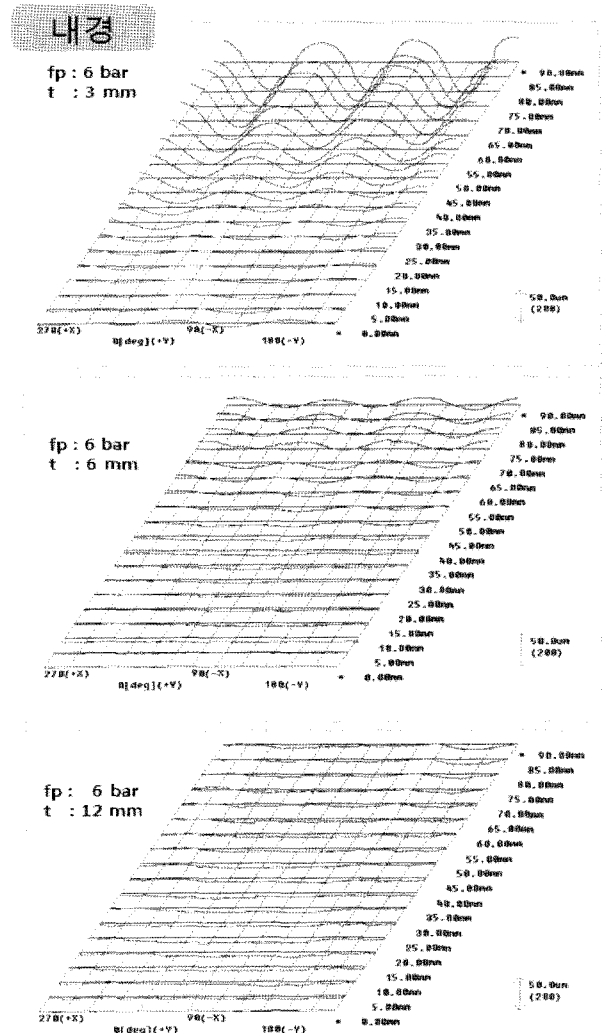


Fig. 4 Roundness of inner diameter according to thickness(fixed pressure 6bar)

4.2 내외경 진원도에 미치는 S/N비

S/N비 응답의 차이는 특성치의 품질차이를 의미한다. S/N비 값이 크면 특성치인 진원도에 미치는 바람직하지 않은 영향이 증가하여 진원도가 더욱 향상된다. 그러므로 기계 가공된 중공축의 품질향상에 기여한다. S/N비를 크게 하여 부품의 품질을 향상시키려면 실험에 적용된 제어인자 간의 적절한 배합이 중요한데, 이것은 직교 배열표에 의한 실험 결과를 분석하여 도출된 최적 조건의 조합으로 품질향상을 극대화시킬 수 있다.

Fig. 7은 선삭 후 시편의 내, 외경 진원도를 측정하여 S/N비 응답결과를 그래프로 나타낸 것이다. (a)-(d)는 각각 시편을 척에 고정하는 고정압, 시편의 벽두께, 절삭깊이, 이송속도 등에 관한 S/N비 응답결과이다.

Fig. 7 (a)는 3수준 고정압에 관한 응답결과로써 진원도 측정 결과, 내경에 대한 S/N비 응답이 외경과 비교했을 때 기울기

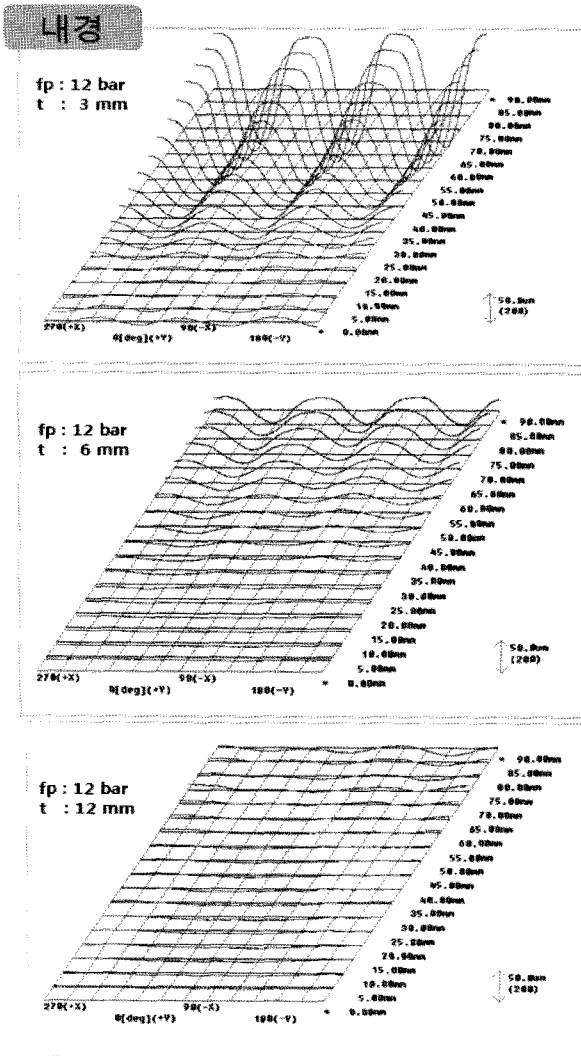


Fig. 5 Roundness of inner diameter according to thickness(fixed pressure 12bar)

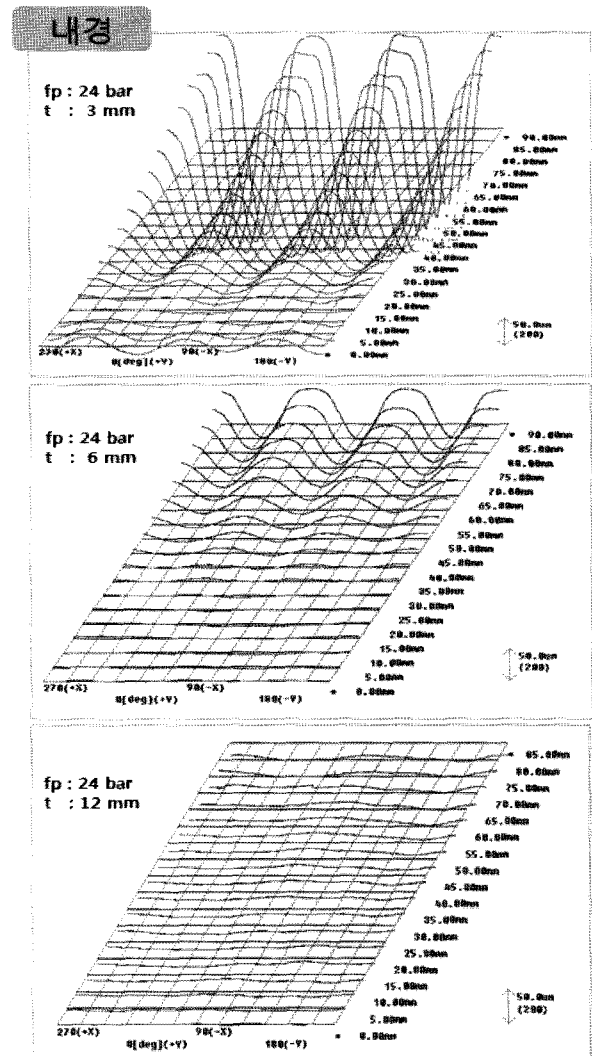


Fig. 6 Roundness of inner diameter according to thickness(fixed pressure 24bar)

변화가 크므로 고정압 인자의 영향을 더 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 특히, 고정압이 가장 큰 조건인 24bar에서 내경에 대한 S/N비 응답이 가장 작게 나타났는데, 고정압의 증가가 시편의 영구 소성변형을 초래하여 진원도를 악화시키기 때문이다. 외경에 대해서는 고정압에 대한 영향이 그다지 크게 작용하지 않았다. 시편의 외경은 모두 일정하게 고정하였고 내경에 대한 차이를 두어 벽두께에 변화를 주었기 때문이다.

Fig. 7 (b)는 벽두께에 관한 3수준 인자에 대한 S/N비 응답결과를 나타낸 것이다. 내경의 진원도에 대한 벽두께 각 수준에 대한 S/N비 응답 차이가 외경에 대한 결과보다 더 크게 나타났으므로 벽두께 인자는 내경의 진원도에 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 특히 벽두께가 얇을수록 더 큰 소성변형이 발생하므로 벽두께가 가장 작은 3mm에서 진원도에 대한 S/N비 응답이 가장 작게 나타났으며 외경과 내경과의 S/N비 응답 차이는 가장 크게 나타났다. 본 연구에서 진원도에 영향을 미치

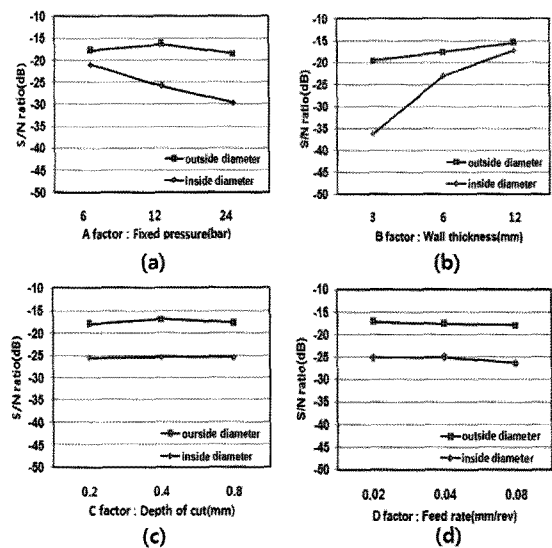


Fig. 7 S/N ratio response graphs for factor A,B,C and D

는 인자로서 고정압과 벽두께 각각의 수준에 따른 외경에 대한 S/N비 응답 차이가 내경에 비하여 상대적으로 작게 나타난 것은 외경의 원주거리가 내경에 비하여 더 큰 이유뿐만 아니라 전체 원주거리에 대하여 소성변형이 외경에서 상대적으로 작게 발생하였기 때문이다. 또한 중공축을 설계할 때 고려해야 할 내외경비는 벽두께와 축의 강도에 영향을 미치며 본 연구에서와 같이 고정압의 영향을 받으므로 중공축의 설계 시 내외경비의 선택을 신중히 고려해야 할 것이다.

Fig. 7 (c)에 나타내었듯이 선삭 시 절삭깊이 변화에 따른 진원도에 관한 S/N비 응답은 외경에 대한 응답이 내경에 대한 응답과 비교하여 그 영향이 다소 크게 작용하였으나 그 차이는 무시할 정도로 미미하게 나타났다. 절삭깊이의 변화는 절삭력에 의한 변위와 공구와 시편 상호간 채터에도 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 변위와 채터 발생이 시편 외경의 진원도에 미미하게 영향을 미쳤을 것이라 사료된다. 내경의 진원도에 관해서는 S/N비 응답 변화가 거의 발생되지 않았다. 본 연구는 보링 공구에 의한 내경 선삭을 수행한 것으로서 발생하는 채터 현상은 지름이 큰 외경에서 더 크게 발생하며 내경에서는 채터 발생이 미미하였을 것으로 사료된다.

이송속도에 관한 S/N비 분석결과는 Fig. 7 (d)에 나타내었다. 이송속도의 증가는 진원도에 관한 S/N비 응답을 떨어뜨린다. 이송속도가 증가할수록 시편의 이송 분력을 증가시켜 진원도 변위에 영향을 주었기 때문이다. S/N비 응답 결과에 대한 변화를 분석하였을 때 이송속도 인자는 절삭깊이 인자와 마찬가지로 진원도에 미치는 영향이 매우 미미한 것으로 나타났다. 본 연구에서 절삭깊이와 이송속도 조건은 비교적 안정적인 조건으로 선정되어 절삭력에 미치는 영향이 매우 미미하였기 때문이다. 이와 같은 이유로 절삭깊이와 이송속도 인자는 특성치인 진원도에 거의 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

4.3 내외경 진원도에 미치는 교호작용의 S/N비

Fig. 8은 내경에 대하여 Fig. 9는 외경에 대하여 진원도에 미치는 교호작용 A×B와 A×C에 관한 S/N비 응답성을 나타낸 결과이다. 내경의 진원도에 미치는 교호작용에 관한 S/N비 응답

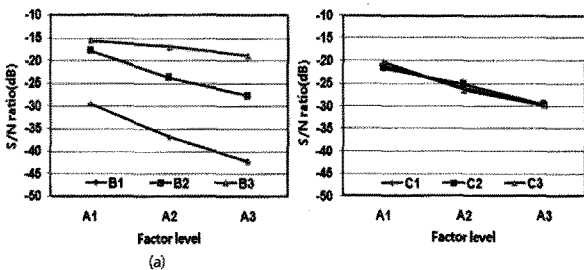


Fig. 8 S/N ratio response graphs for factor A×B and A×C (inside diameter roundness)

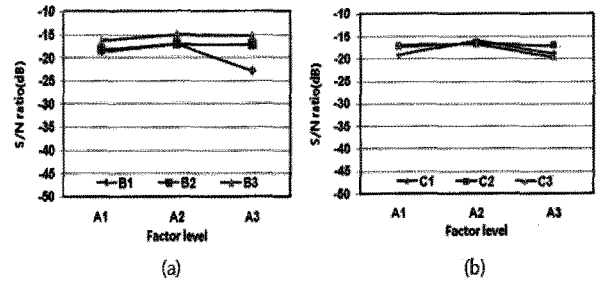


Fig. 9 S/N ratio response graphs for factor A×B and A×C (outside diameter roundness)

결과, A×B에 관해서는 A1B3의 조합이 진원도에 가장 높은 S/N비 응답을 갖는 것으로 나타났다. A×C에 관해서는 A1C3의 조합이 S/N비 응답을 가장 높게 하는 것으로 나타났다. 교호작용에 관한 S/N비 응답 결과 교호작용 A×C에 대한 S/N비 응답보다는 더 큰 기울기 변화를 나타낸 A×B 교호작용에서 진원도에 미치는 영향이 더 큰 것으로 확인되었다.

외경에 미치는 교호작용에 관한 S/N비 응답성은 Fig. 9에 나타내었다. 외경의 진원도에 관하여 교호작용 A×B에 관해서는 A3B3의 조합이 가장 큰 S/N비 응답성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 진원도에 가장 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 교호작용 A×C에 대해서는 A2C2의 조합이 진원도에 미치는 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 또한 교호작용이 외경의 진원도에 미치는 영향은 S/N비 응답 결과 내경과 비교할 때 그 영향이 매우 미미하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 선삭에서 척의 고정압, 시편의 벽두께 그리고 절삭깊이, 이송속도와 같은 절삭인자들이 중공축의 진원도에 미치는 영향을 분석한 것이다. 직교배열을 이용한 선삭 실험 후 S/N비를 분석하여 진원도에 미치는 인자들의 영향을 파악하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 고정압의 증가와 벽두께의 감소는 시편의 진원도 변위를 증가시킨다. 고정압의 증가는 특히 벽두께가 얇은 시편에서 진원도에 크게 영향을 주므로 시편 벽두께에 따른 적절한 고정압의 설정이 요구된다.
- (2) 진원도 오차는 시편의 외경에서 보다는 원주거리가 짧은 내경에서 시편에 가해지는 압축력의 영향으로 인하여 소성변형을 크게 초래하므로 진원도의 오차를 크게한다.
- (3) 절삭깊이와 이송속도는 비교적 안정적인 조건으로 실험이 수행되었기에 진원도에 미치는 영향은 매우 미미하게 나타났으나 고정압과 벽두께의 변화는 간과해서는 안될 만큼 진원도에 크게 영향을 미치므로 부품생산에 고려되어야 한

다. 특히 고정단에 가까울수록 진원도 오차는 크게 발생하므로 요구되는 진원도의 정밀도에 따라 고정단으로 부터의 거리를 제한하여 부품을 생산할 필요가 있다.

- (4) 중공축 가공 시 진원도에 미치는 영향을 고려하여 소재 특성에 따른 고정압과 벽두께의 최적값을 모색하여 적용해야 한다.

후 기

본 연구는 동양미래대학 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Cho, J. W., Kang, Y. G., and Kim, S. I., 2009, "Spindle Speed Optimization for High-efficiency Machining in Turning Process," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2009, Vol. 26, No. 2, pp. 138~145.

(2) Son, S. M., Her, S. W., and Ahn, J. H., 2003, "Study on the Minimizing of Cutting Depth in Submicro Machining," *Proceeding of the KSMTE Spring Conference*, pp. 376~381.

(3) Kim, K. W., 2002, "Study on the Critical Depth of Cut in Ultra-precision Machining," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 19, No. 8, pp. 126~133.

(4) Ahn, Y. H., Park, C. E., Kim, I. S., Jeong, Y. J., and Son, J. S., 1997, "The Effect of Various Cutting Conditions on the Surface Roughness of SM45C Materials," *Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference*, pp. 482~486.

(5) Yoon, M. M., Kim, J. S., Cho, H. K., and Kim, Y. K., 2005, "Study on the Roundness Characteristics of Round Shape Machining," *Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference*, pp. 1134~1137.

(6) Jeon, Y. S., Jang, S. M., and Kang, S. G., 2010, "Influence of fixed pressure on the machining accuracy

of inner diameter of hollow shaft," *Journal of the KSMTE*, Vol. 19, No. 3, pp. 381~387.

(7) Lee, S. S., Kang, S. G., and Jeon, Y. S., 2008, "Influence of Chucking Forces upon the Accuracy of Circular Hole in Boring Process on the Turning," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 2, pp. 58~64.

(8) Yang, W. H., and Tarn, Y. S. 1998, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 84, Issues 1-3, pp. 122~129.

(9) Kim, H. N., Park, T. M., Ha, S. Y., Lee, J. S., and Kim, S. C., 1995, "A Study on the Effective Cutting Conditions of Cage Motor Rotor Considering Production Rate(I)," *Journal of the KIIS*, Vol. 10, No. 1, pp. 9~19.

(10) Hyun, D. H., and Lee, Y. S., 1993, "A Study of the Optimazation the Cutting Condition Selecting System for the Rationality of Mould Manufacture," *Journal of the KIIS*, Vol. 8, No. 4, pp. 73~81.

(11) Davim, J. P., 2003, "Study of Drilling Metal-matrix Composites Based on the Taguchi Techniques," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, Issues 1-3, pp. 250~254.

(12) Yang, W. H., and Tarn, Y. S., 1998, "Design Optimization of Cutting Parameters for Turning Oerations Based on the Taguchi Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 84, Issues 1-3, pp. 122~129.

(13) Hong, M. S., and Lian, Z. M., 2001, "The Optimal Selection of Cutting Parameters in Turning Operations," *Transaction of NAMRI/SME*, Vol. XXIX, pp. 319~325.

(14) Su, Y. L., Yao, S. H., Wei, C. S., and Wu, C. T., 1998, "Analyses and Design of a WC Milling Cutter with TiCN Coating," *Wear*, Vol. 215, Issues 1-2, pp. 59~66.

(15) Maeng, M. J., and Jang, S. M., 2006, "Study on Analysis of Parameter for Optimal Surface Quality in Face Turning," *Journal of the KOSOS*, Vol. 21, No. 1, pp. 21~27.