

고정압이 중공축 내경의 가공정밀도에 미치는 영향

전영석*, 장성민+, 강신길**

(논문접수일 2010. 04. 27, 심사완료일 2010. 05. 13)

Influence of fixed pressure on the machining accuracy of inner diameter of hollow shaft

Young-Seog Jeon*, Sung-Min Jang+, Shin-Gil Kang**

Abstract

This paper presents a study of the influence of fixed pressure in turning. The effect of roundness error and diameter deformation were studied with respect to the fixed pressure applied inside the cylindrical work piece made by boring tool in CNC lathe. The boring tool used in this study is a tungsten carbide coated. The material of workpiece is SM45C and the machining method is dry cutting. Cutting conditions as cutting speed, feed rate and depth of cut are constant. Finally, the change of fixed pressure had influence on the roundness error and diameter deformation.

Key Words : Fixed pressure(고정압), Roundness(진원도), Diameter deformation(지름 변형), Boring(보링), CNC lathe(CNC선반), Cutting condition(절삭조건), Dry cutting(건식절삭)

1. 서론

고성능, 고기능화에서 다기능 전용 생산을 위한 복합, 첨단화 추세에 있는 각종 공작기계는 다양한 산업분야에 적용되어 왔다. 설계 및 제조 패러다임 변화에 따른 고객의 요구를 만족시키기 위해 현장 엔지니어의 노력은 기계요소의 설계 시방에서 생산과 품질관리에 이르기까지 매우 정밀한 공정을 요구한다. 생산 단계에서의 기계가공 공정은 불량률 감

소와 생산성 향상 그리고 경쟁력 강화를 위해 기업에서는 대부분의 요소부품 제조에 CNC(Computer Numerical Control) 공작기계를 도입하여 사용하고 있으며 이미 일반화되었다. 기계 제작업체는 각종 공작기계에 고 정밀 CNC방식의 적용을 위해 노력하고 있으며 그 결과, 기계부품의 품질 향상과 FMS(Flexible Manufacturing System)의 발전에 기여해 나가고 있다. 기계가공 공정을 통한 요소부품의 품질은 가공 후 표면 거칠기 상태, 부품의 진원도, 진직도, 원통도 등의

* 동양미래대학 기계공학부 기계설계과

+ 유한대학 기계과

** 교신저자, 동양미래대학 기계공학부 기계과 (sgkang@dongyang.ac.kr)

주소: 152-714 서울시 구로구 고척동 62-160

형상정밀도의 결과에 따라 요소부품의 조립정도와 각종 공작기계의 정밀한 운전에도 영향을 미친다. 그러므로 생산 초기 단계에서부터 공정에 신중을 기하여야 한다.

생산성과 정밀도에 영향을 미치는 이송속도, 절삭 깊이, 주축 회전수 등과 같은 절삭 조건들은 일반적으로 제조 현장에서 근무하는 숙련된 작업자들의 경험과 지식에 의해 선택, 적용되고 있는 실정이다. 소비자의 요구에 부응하기 위한 효율적 생산과 고 정밀가공 그리고 공작기계의 정밀도가 보장될 수 있는 요소부품의 정밀가공이 필요로 하고 있으며 이를 위한 연구가 수행되고 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 중요한 표면 거칠기를 고려한 절삭속도와 이송량의 상호 특성변화에 대한 최적의 절삭조건의 예측을 위한 연구가 선행되었다⁽⁴⁾.

기계 산업에서 공작기계에 장착되어 사용되고 있는 회전체 및 각종 부품들은 작업 과정에 있어서 많은 부분이 회전운동으로 이루어지고 있으며, 단면이 대부분 원형 형태로 설계되었다. 이러한 원형 부품의 형상이 진원으로부터 벗어났을 경우 접촉부에 원치 않는 불규칙한 마찰이 발생하게 되어 동력 손실은 물론 마멸에 의한 기계의 수명감소, 회전 및 상하이동의 부정확 등 다양한 문제가 발생되어 공작기계의 고정밀 성능 저해를 초래할 수 있다. 산업기계 및 자동차 산업 등에 힘입은 관련 산업분야에서는 각 기계요소들의 고정밀 부품을 끊임없이 요구하고 있다. 특히 회전체의 경우, 진원도의 상태에 따라 원형 단면의 회전 축 등 기계요소의 회전구동 시 소음, 진동이 발생할 수 있을 뿐만 아니라 고 정도의 회전이 불가능해진다. 특히 고속 회전체에 적용되는 각 요소 부품의 경우 진원도의 상태는 회전체의 품질 및 수명에 깊은 연관성을 갖는다. 그러므로 회전체의 경우 진원도 정도를 향상시킬 수 있는 가공기술의 연구가 요구된다⁽⁵⁾.

원형관의 벽 두께(Wall thickness)가 얇은 파이프와 같은 중공축의 가공방법은 한쪽 끝단을 작업자가 의도하는 고정압으로 고정하여 가공을 한다. 중공축은 동일 외경을 갖는 중실축의 단면계수와 비교할 때 벽 두께가 얇을수록 굽힘 또는 비틀림에 의한 요소의 변형이 가중된다. 공작물에는 고정압에 의해 탄성변형과 소성변형이 모두 가해질 수 있으며, 선삭 후 고정력을 해제 하였을 때 영구 변형이 발생하여 요소부품이 공차영역을 벗어나는 원인을 초래할 수 있다. 이와 같은 이유로 인하여 중공축의 정밀도를 악화시켜 품질을 떨어뜨릴 수 있으므로 정밀가공을 위해서는 조(Jaw)에 중공축의 고정시 적절한 고정압의 설정이 요구된다.

중공축의 변형은 공작물의 고정압 뿐만 아니라 절삭조건에 선정에 의해서도 달라질 수 있다. 기계가공 조건은 생산성과 품질에 매우 중요하다. 모든 조건을 무시한, 단순하게 짧은 시간에 제품의 수량 증가에 의한 생산성만을 목적으로 한다면 그 조건은 과도하게 적용될 수 있다. 원형단면의 요소부품을 생산하기 위한 기본 공정인 선삭가공의 경우 절삭 깊이는 크게 하고 이송속도는 빠르게 하는 것이 바로 그것이다. 그러나 고 정밀 가공을 통한 제품의 품질향상을 목적으로 한다면, 절삭 깊이, 이송속도 등을 제품의 가공정도에 맞추어 적절하게 선정하여야 하며 내경 가공시에는 특히 chatter(Chatter)에 의한 영향 등을 고려해야 한다. 절삭조건의 선택은 사용기계의 강성과 함께 생산성과 품질 측면을 모두 고려해야 한다. 선삭 중 발생하는 절삭력은 공작물에 그대로 전달되므로 중공축의 벽 두께와 재료강도에 따라 그 영향을 크게 받아 변형을 초래할 수 있다. 동일 외경의 실제 축에 비해 강도가 약화된 중공축은 가공 후 변형에 의한 품질저하를 방지하기 위해 숙련된 작업자들의 경험에 의존해 왔던 가공조건 즉, 주축 회전수, 절삭 깊이, 이송속도, 절삭속도 그리고 공구의 기하학적 형태 등의 변수를 감안하여 적절한 선택이 요구된다. 고 정밀 요소부품의 생산을 위한 정밀기계의 고속화와 가공물의 변형방지를 고려한 최적의 절삭조건을 갖춘 공구의 선정이 필요하며 가공물 재질 특성에 따른 적절한 척킹력이 필요하다⁽⁶⁾. 특히 내경 가공의 경우엔 공작물 재질에 대한 탄성한계 범위 내에서의 고정이 필요하다.

본 연구에서는 원형 중공축의 변형에 영향을 주는 다양한 인자 중 고정압에 의한 영향을 실험적으로 연구하였다. 시험편으로 일반적인 기계부품 제작에 많이 사용되고 있는 기계구조용 탄소강 SM45C(AISI 1045 Steel)를 사용하였으며 드로우 어웨이 형태의 초경 인서트 팁을 내경 바이트 생크에 장착한 보링가공에서 중공축의 고정압에 의한 진원도와 직경 변화량을 실험적으로 관찰하였다.

2. 실험방법 및 조건

본 실험에서는 선삭실험을 위한 시험편으로 SM45C를 $\varnothing 70 \times 100 \text{mm}$ 로 준비하여 사용하였다. 시험편의 벽 두께는 각각 3, 6, 9mm인 중공축이다.

선삭을 위한 공작기계는 CNC선반(SKT160A)을 사용하였으며, 공작물 고정은 유압에 의한 고정압으로 12, 16, 20bar의 조건으로 하였다. 공작물에 대하여 척의 클램핑 조건이 진원도와 chatter 안정성에 미치는 영향⁽⁷⁾을 고려하여 공

작물과의 불완전한 고정으로 인한 가공 정밀도의 불량을 해소하고 접촉 조(jaw)와 공작물 간의 완전 접촉을 통한 확실한 고정을 위해 소프트 타입의 조를 선택 하였고 접촉 조는 피삭재의 직경과 일치할 수 있도록 원호 가공한 후, 시험편 고정에 사용하였다. 접촉 조의 원호가공은 클램핑 시에 완전한 면접촉에 근접할 수 있도록 후 Fig. 1과 같이 홀 테스터기(제조사:Mitutoyo)를 사용하여 조의 원호를 측정하여 원호 가공이 적절하였음을 확인 후 실험을 하였다.

본 실험에 사용된 공구는 현장에서 많이 사용되고 있는 내경 가공용 보링바이트(PGT090304-C05 NC3020계열)를 사용하였다.

내경 선삭가공에 사용되는 공구 홀더는 외경 가공에 비해 돌출 부위가 상대적으로 길어 가공 도중에 공구로 전달되는 진동에 의한 공구의 떨림 즉, 채터의 영향을 덜 받게 하기 위하여 초경재질인 C20S - SCLPR 09를 사용하였다. 정밀 가공을 위하여 실험에 주축 일정제어기능인 G96을 사용하여 절삭속도를 일정하게 유지하여 건식 절삭⁽⁸⁾하였으며 그 외 조건은 Table. 1과 같다.

Fig. 2와 3은 각각 본 연구에 사용된 CNC 선반에서 선삭 중인 사진과 공작물 고정 상태를 기하학적으로 대략 표현한 것이다. 선삭 후 측정은 항온항습기가 갖추어진 온도 20℃

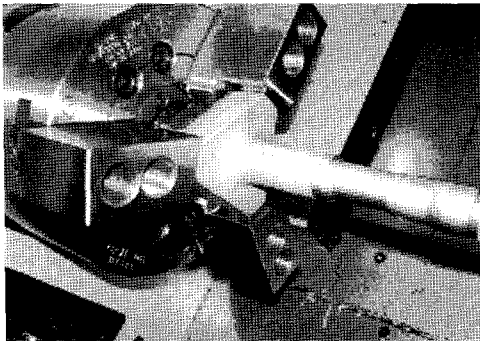


Fig. 1 Photograph of hole tester instrument

Table 1 Experiment condition for inside diameter turning

Wall thickness(mm)	Cutting speed(m/min)	feed rate (mm/rev)	Depth of cut (mm)
3	200	0.07	0.5
6			
9			

(±1℃), 습도 50%(±5%)를 유지하고 있는 정밀 측정실에서 실시하였다⁽⁹⁾. 측정에 사용된 장비는 3차원 측정기인 덕인 SIGMA 665C를 이용하였다. Fig. 4는 측정에 사용된 3차원 측정기를 나타낸 것이다. 측정방법은 시험편 전체 길이 100mm에서 척의 조에 고정되어 있는 고정단의 끝 부분을

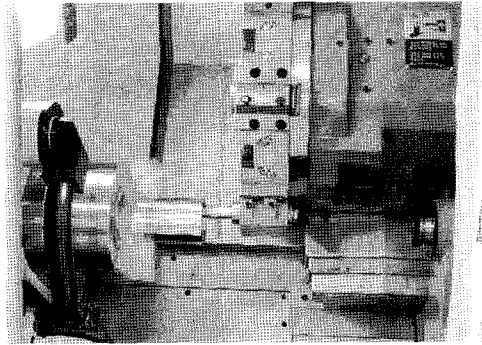


Fig. 2 Photograph during turning experiment

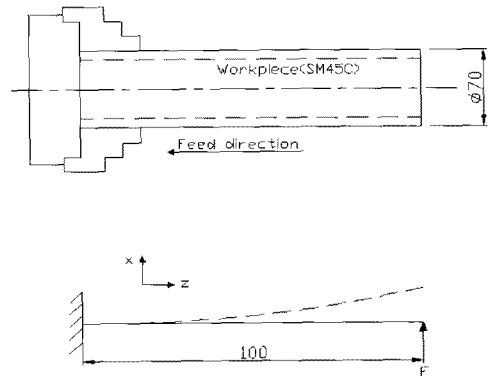


Fig. 3 Schematic diagram of workpiece setup

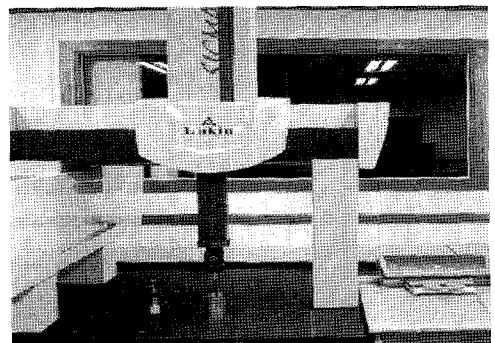


Fig. 4 Photograph of 3D measurement equipment

0으로, 반대편 자유단 끝 부분을 100mm로 하여 10mm지점에서 95mm지점까지 전체 구간을 5mm 사이로 측정하였다. 측정간격은 각 구간에 대하여 원주(0도~360도)를 50군데 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 진원도 오차

Fig. 5~7은 각각 중공축의 고정압 12, 16, 20bar 조건에서 측정위치 25mm지점의 진원도를 3차원 측정기를 이용하여 측정한 결과를 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 5~7의 (a), (b), (c) 결과에서 알 수 있듯이 두께가 두꺼워질수록 중공축 내경의 형상 변화가 감소되고 있는 것을 알 수가 있다.

Fig. 8은 벽두께 3mm인 공작물에 대한 선삭 후 진원도를 측정한 결과이다. 실험에 적용된 12, 16, 20bar의 모든 고정압 조건에서 측정 위치가 고정단 내인 10mm 지점에서 공작

물의 진원도가 가장 악화되었음을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 9~10에 나타내었듯이 벽 두께가 6, 9mm인 시험편보다 측정 위치에 따른 진원도 변화 값이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있는데, 고정압의 영향이 두께가 가장 얇은 공작물에서 가장 크게 작용 받았기 때문이다. 측정 위치에 따른 변화를 살펴보면 측정 지점 70mm이상인 곳에서 진원도의 차이가 거의 없을 정도로 편차가 매우 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 공작물이 척의 조에서 멀리 떨어질수록 진원도에 미치는 영향이 매우 제한적이라는 것을 의미하며 벽 두께 3mm인 경우에서는 70mm이상 떨어진 지점이 고정압의 영향에서 벗어나는 임계 지점이라는 것이 실험적 결과로 나타났다. 다소의 편차 발생은 선삭 시 절삭력에 의한 시험편의 변위와 채터 현상 등 본 실험에서 제어하지 못한 기타 변수의 영향을 받은 것으로 사료된다.

Fig. 9는 벽두께 6mm인 공작물을 대상으로 선삭 후 진원도를 측정한 결과이다. 벽 두께 3mm를 대상으로 한 Fig. 8과 마찬가지로 측정 위치가 고정단 내에 있는 10mm 지점에서 모든 고정압에서 진원도가 가장 악화된 결과를 보였다.

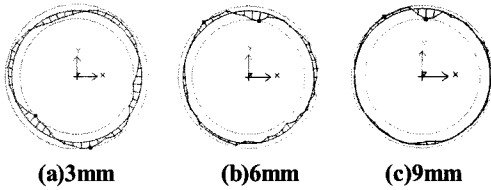


Fig. 5 Roundness on variation of measurement point (12bar)

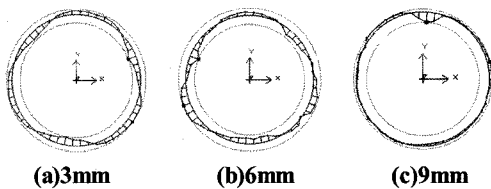


Fig. 6 Roundness on variation of measurement point (16bar)

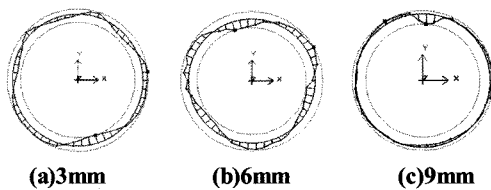


Fig. 7 Roundness on variation of measurement point (20bar)

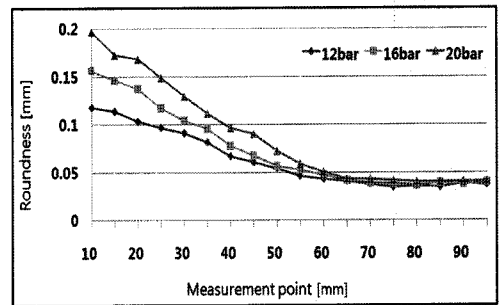


Fig. 8 Variations of roundness with position of measurement point (workpiece thickness : 3mm)

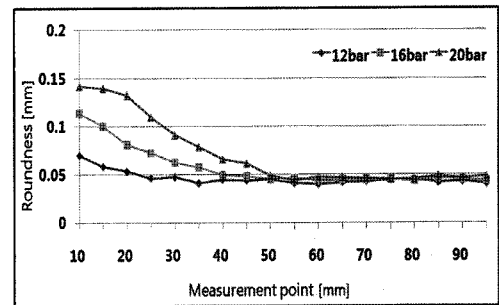


Fig. 9 Variations of roundness with position of measurement point (workpiece thickness : 6mm)

Fig. 9의 결과에서 알 수 있듯이 고정압 12bar의 조건에서 진원도 결과는 다른 고정압 조건에 비하면 결과에 대한 편차는 매우 완만하게 나타났다. 이것은 Fig. 8에 비하여 벽 두께가 6mm로 증가되었으며, 고정압의 감소가 진원도에 미치는 영향을 감소시켰기 때문이다. 측정 위치에 따른 결과는 측정 지점이 50mm이상 떨어진 지점에서 진원도 값의 차이가 거의 발생하지 않았다. 이와 같은 결과는 Fig. 8의 경우와는 다른 결과로써 시험편의 벽 두께가 6mm로 증가됨에 따라 고정압에 대한 영향이 감소되었으며 시험편의 항절력에 변화가 발생하였기 때문이다. 더불어 시험편의 소성변형에 미치는 영향이 감소되었기 때문이다.

Fig. 10은 본 실험에 적용된 가장 두꺼운 9mm의 벽 두께를 갖는 공작물을 선삭 후 측정 위치 변화에 따른 진원도 결과로써 두께가 3, 6mm인 공작물을 대상으로 한 Fig. 8~9와는 매우 다른 결과를 나타내었다. Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 고정압 20bar의 경우에서만 공작물 고정단 내의 진원도 값이 다소 변화가 있는 것으로 나타났으며 12, 16bar 고정압에서는 측정위치의 변화에 따른 진원도의 값은 거의 변화가 발생되지 않았다. 이와 같은 결과는 벽 두께가 9mm 이상인 공작물인 경우 고정압의 변화가 진원도에 미치는 영향이 거의 없음을 나타내는 결과이다. 또한 Fig. 8, 9의 벽 두께가 3, 6mm인 공작물에 비하여 진원도의 편차는 매우 미미하게 나타났는데, 두께가 두꺼울수록 소성변형에 대한 영향이 작을 뿐만 아니라 기타 변수의 영향이 감소되었기 때문으로 사료된다. Fig. 8~10의 결과에서 알 수 있듯이 벽 두께가 가장 작은 3mm인 경우는 이보다 두꺼운 6, 9mm인 시험편보다 진원도 오차 값이 가장 크게 나타났으며, 두께가 두꺼울수록 작게 나타난다. 이와 같은 결과는 벽 두께가 얇은 공작물일수록 고정압에 의한 소성변형의 영향을 크게 받고 있기 때문이다. 또한 공작물의 고정단인 척과 직접적으로

접촉, 고정되어 있는 조(jaw)에서 거리가 멀어질수록 선삭 후 진원도 상태는 양호해지는 것으로 나타났다. 이는 고정단으로 부터의 거리가 멀어질수록 고정압에 의한 소성변형의 영향에서 벗어나기 때문이다.

3.2 지름 변화량

Fig. 11~13은 고정압 12, 16, 20bar의 조건으로 벽 두께가 3, 6, 9mm인 각각의 중공 시험편을 대상으로 내경 선삭 후 공작물의 지름 변화량을 측정된 결과이다. 모든 시험편에 대한 지름 변화량은 진원도 오차가 작은 고정단으로 부터 95mm 지점을 기준으로 측정되었다.

Fig. 11은 12bar의 고정압 상태에서 선삭 후 지름 변화량을 측정된 것이다. 벽 두께가 가장 얇은 3mm의 경우, 초기 40mm까지는 지름 변화량에 대한 기울기가 다소 크게 나타났다. 그 이상 떨어진 지점부터는 지름의 변화가 매우 완만하게 변화하며 감소되는 것으로 나타났다. 시험편의 내경 관통 절삭한 후 공작물이 고정단으로부터 분리되었을 때 재료는 탄성변형 상태에서 원상태로 복귀하려 한다. 측정 지점 45mm까지는 지름 변화량에 대하여 고정압에 의한 영향을 크게 받는 부분으로 탄성변형 후 원상태로 복귀하면서 내경 가공된 부분의 정밀도가 오히려 더 악화된 것으로 사료된다. 이에 비하여 벽 두께 6, 9mm인 시험편을 대상으로 실험한 결과를 살펴보면 벽 두께 3mm에 비하여 지름의 변화량에 대한 기울기가 매우 완만하게 나타났음을 확인할 수 있다. 벽 두께가 두꺼울수록 고정압에 의한 영향을 적게 받기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것이다. 특히, 모든 벽 두께에 대하여 측정 지점 45mm까지는 지름의 변화량이 뚜렷하게 나타난 반면, 그 범위를 넘어선 지점에서는 모든 벽 두께에서 지름의 변화량이 매우 완만하게 감소 되었다. 이것은 내경 지름의 변화 값은 고정압에서 뿐만아니라 고정단으로

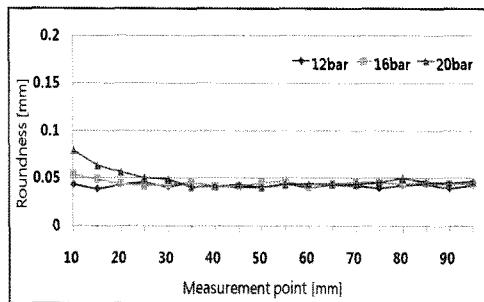


Fig. 10 Variations of roundness with position of measurement point (workpiece thickness : 9mm)

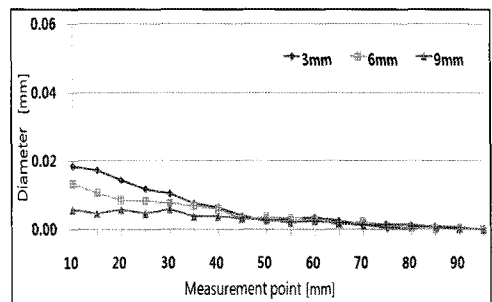


Fig. 11 Variations of diameter with position of measurement point (12bar)

부터 떨어진 거리에서도 영향을 받는다는 것을 나타내는 결과이다. 그러므로 선삭공정을 이용하여 중공축을 내경가공할 경우에는 벽 두께에 따른 고정압의 적절한 선택과 함께 고정단으로부터의 거리도 고려되어야 한다.

Fig. 12는 16bar의 고정압으로 시험편을 고정, 선삭 후 지름 변화량을 측정하는 것이다. 벽 두께가 가장 얇은 3mm에서 초기 지름 변화량에 대한 값이 크게 나타났다. 측정 위치 55mm까지는 모든 시험편에 대하여 지름 변화량에 대한 기울기가 뚜렷하게 감소되었으며, 이후 지점부터는 상대적으로 작은 값의 지름 변화량을 나타내면서 매우 완만하게 감소되는 것으로 나타났다. 벽 두께 6, 9mm의 경우, 12bar 고정압 조건인 Fig.11과 비교할 때 고정압이 16bar로 증가되었을 때가 지름 변화량 값이 두드러지게 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 고정압이 16bar로 증가되면서 벽 두께 6, 9mm 시험편에 대한 지름 변화량에 크게 영향을 주었기 때문이다.

Fig. 13은 본 실험에서 고정압이 가장 높은 20bar의 조건으로 시험편을 고정, 선삭 후 측정 지점에 따른 지름 변화량

을 나타낸 것이다. 벽 두께가 가장 얇은 3mm의 경우 초기 20mm지점까지는 지름 변화량이 다른 중공축 시험편과 비교할 때 가장 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 Fig. 11~12에 나타내었듯이 고정압 12, 16bar의 조건에서 벽 두께 3mm에서 지름 변화량이 가장 크게 나타난 것과는 다른 결과이다. 벽 두께가 가장 얇은 3mm의 경우 20bar의 고정압으로 고정하였을 때 이미 소성변형이 크게 발생되었으며, 선삭 가공으로 변형된 내경 부분을 절삭하였다. 이후 시험편이 분리되면서 변형량의 일부는 탄성 복귀되며 소성 변형된 부분은 영구 변형되어 남아있게 된다. 20bar의 고정압에서 벽 두께가 가장 작은 3mm 시험편에서 지름의 변화량이 가장 작게 나타난 이유는 이와 같은 원인에 기인한 현상으로 파악된다. 벽 두께 6, 9mm의 경우, 지름 변화량이 다른 고정압 조건에 비하여 비교적 크게 나타났으며 측정 위치에 따른 변화량에 있어서도 큰 편차를 나타내었다. 6mm 벽 두께를 갖는 시험편의 경우 측정 지점 35mm까지는 가장 큰 기울기를 보이면서 변화량의 감소를 보였으며, 벽 두께 9mm 시험편의 경우 측정 지점 25mm까지는 큰 기울기를 보이며 감소하였다. 이후 지점에서는 점점 완만한 기울기를 보이면서 변형량의 감소를 나타내었다. 그러나 측정 위치 75mm 이후 지점에서는 다른 고정압 조건에 비해 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

4. 결론

본 연구는 중공축의 벽 두께에 따른 고정압이 내경의 진원도와 지름 변화량에 미치는 영향을 실험적으로 연구한 것이다. 고정압의 변화는 진원도와 지름의 변화량에 영향을 주었으며 세부 결과는 다음과 같다.

- (1) 실험에 적용된 중공축 시험편은 12, 16, 20bar의 모든 고정압 조건에서 측정 위치가 고정단 내의 10mm지점에서 진원도 오차 값이 가장 크게 나타났으며 벽 두께가 가장 얇은 3mm 시험편에서 가장 큰 진원도 오차가 발생하였다.
- (2) 벽 두께와 고정압의 변화가 진원도 오차에 미치는 영향은 고정단 내에서 가장 크게 작용하였으며 고정단에서 멀어질수록 그 영향은 점차 감소하였다.
- (3) 지름 변화량은 고정압이 가장 높은 20bar의 조건에서 가장 크게 나타났다. 또한 모든 조건에서 벽 두께 변화에 따른 지름 변화량은 일정 지점까지는 큰 기울기를 보이며 감소하다가 측정 지점이 멀어짐에 따라 변화량 값은 작아지고 완만한 기울기를 보이며 감소하였다. 그러

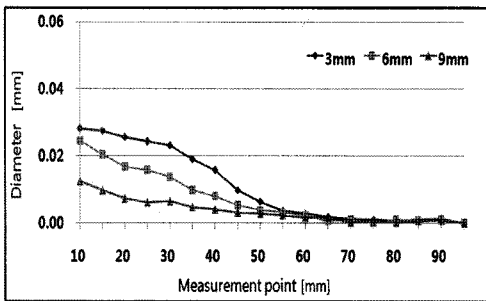


Fig. 12 Variations of diameter with position of measurement point (16bar)

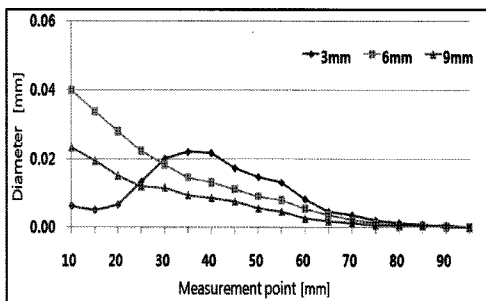


Fig. 13 Variations of diameter with position of measurement point (20bar)

나 가장 큰 20bar 고정압 조건에서 벽 두께가 가장 작은 3mm 시험편은 고정단의 20mm 지점까지는 지름 변화량이 가장 작게 났는데, 그 이유는 시험편이 고정단에 고정된 직후 고정압에 의한 시험편의 영구 소성변형이 크게 발생되었으며, 내경 선삭으로 인하여 변형량의 대부분은 소멸되었으나 고정단에서 해제된 후 일부만 탄성 복귀되었기 때문이다.

후 기

본 연구는 동양미래대학 연구비지원에 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*, Vol. 26, No. 2, pp. 138~145.
- (2) Son, S. M., Her, S. W., and Ahn, J. H., 2003, "A Study on the minimizing of cutting depth in sub-micro machining," *Proceeding of the KSMTE Spring Conference 2003*, pp. 376~381.
- (3) Kim, K. W., 2002, "A Study on the Critical Depth of Cut in Ultra-precision Maching," *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 1997*, pp. 482~486.
- (5) Yoon, M. M., Kim, J. S., Cho, H. K., and Kim, Y. K., 2005, "A Study on the Roundness Characteristics of Round Shape Machining" *Proceeding of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference 2005*, pp. 1134~1137.
- (6) 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.
- (7) Jung, S. J., 1986, "The Effects of Chuck Clamping Conditions on Roundness and Chatter Stability in Turning" *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 26, No. 3, pp. 195~199.
- (8) Song, C. S. and Kim, J. H., 2005, "Cutting Characteristics of Dry Turning Using Compressed Air" *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 1, pp. 8~14.
- (9) Oh, S. L., Lee, G. J., and Kim, J. K., 2005, "A study on the prediction of NC Machine Roundness using Neural Network" *Proceeding of the KSMTE Spring Conference 2005*, pp. 209~215.