

공작물 받침대를 이용한 무심관통이송 공작물의 테이퍼링 오차 개선

김 강[#]

Improvement of the Tapering Error in the Centerless Through-feed Ground Parts Using a Work-rest Blade

Kang Kim[#]

ABSTRACT

The centerless through-feed grinding is performed by passing the workpiece between the grinding wheel and the regulating wheel. So, the amount of removed material around the leading end of the workpiece is always more than that around the trailing end until the leading end leaves the grinding wheel. Because of this, there are differences in diameters along the workpiece axis during grinding, and workpiece axis is not parallel to the grinding wheel axis and the contact lines between the workpiece and wheels. Thus the ground workpiece shows tapering error inherently. To eliminate this error, the workpiece axis must be kept to be parallel to the grinding wheel axis. And, the direction of the workpiece axis can be controlled by the work-rest blade. Therefore, the effects of work-rest blade inclination angle on the through-feed centerless ground part are investigated in this study. As a result, it is found that there is a positive inclination angle of the work-rest blade for minimizing the tapering error of a ground workpiece.

Key Words : Centerless Through-feed Grinding(무심관통이송연삭), Tapering Error(테이퍼링 오차), Work-rest Blade(공작물 받침대)

1. 서론

무심연삭은 원형 단면 형상의 공작물을 여타의 다른 가공법에 비해 상대적으로 높은 정밀도로 단시간에 가공할 수 있으므로 100 여 년 전부터 사용되어 왔다. 사용 초기부터 무심연삭 공정의 형상창성 원리를 밝히기 위하여 노력하였으나, 50 여 년이 경과한 후에야 비로소 Dall¹에 의하여 그 원리가 규명되었다. 연구 결과, 무심연삭으로 생산

된 부품에는 수많은 로브(Lobe)가 형성되며 단면 형상이 진원에 가까운 형상으로 가공될 수는 있으나, 절대로 진원이 될 수는 없다는 사실이 확인되었다. 이후, 이 연구결과를 토대로 두 슷돌 회전 중심축의 연결선에 대한 공작물의 상대적 높이 변화와 진원도의 상관관계에 대한 연구 및 가공 안정성에 대한 연구가 수행되었으며, 대표적인 연구 결과로는 Yonetsu²의 연구를 들 수 있다.

아울러 Yonetsu³는 관통이송에 대한 연구도 수

^{1,2,3} 접수일: 2003 년 2 월 11 일; 게재승인일: 2003 년 5 월 6 일
교신저자: 국민대학교 기계자동차공학부
Email: kangkim@kookmin.ac.kr, Tel: (02) 910-4676

행하였으며, 이 연구에서 관통이송을 위한 조정숫돌의 형상변화에 대하여 해석적인 접근을 시도하였다. 근래에는 무심 관통이송에 의한 공작물의 연삭 과정을 3차원으로 해석하는 연구⁴가 수행되었으며, 이 연구 내용을 토대로 수행된 시뮬레이션 및 실험을 통하여, Fig. 1 에서 볼 수 있듯이, 공작물에 항상 테이퍼 형상 오차가 발생하는 것이 확인되었다.

관통이송 연삭 공정 중에는, 공정 특성상, 공작물 표면의 소재제거가 축방향 위치에 따라 점진적으로 수행된다. 따라서, 가공 중인 공작물의 직경은 공작물 축방향 위치에 따라 변화될 수 밖에 없으며, 이로 인하여 공작물이 축방향으로 직선 이송됨에 따라 공작물 축이 공작물 받침대 쪽으로 기울어지는 현상이 발생된다. 이 현상은 앞에 언급한 테이퍼 발생과 밀접한 관계가 있을 것으로 추정된다. 그러므로 본 연구에서는 공작물 직선이송 방향의 경사각을 조절할 수 있는 별도의 공작물 받침대를 제작하여, 이 경사각의 조절에 의한 관통이송 연삭 공작물의 형상정밀도 향상 가능성을 확인하고, 관통이송 공정의 주요 가공변수 중의 하나인 공작물 직선이송 속도를 결정하는 조정숫돌의 기울기와 공작물 받침대의 경사각과의 관계를 실험을 통하여 알아보고자 한다.

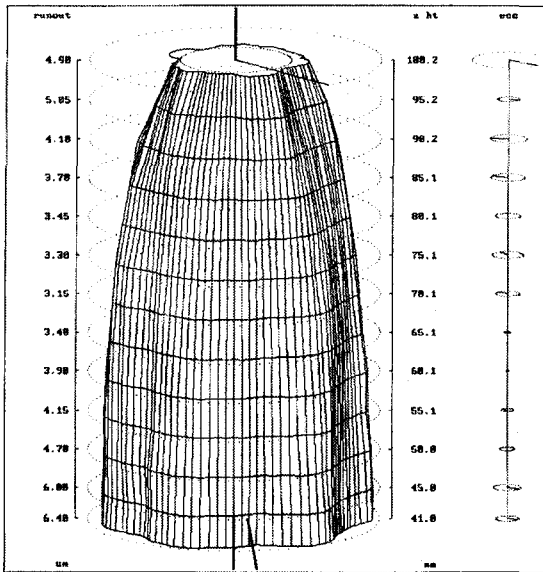


Fig. 1 Typical 3-D shape of through-feed ground part

2. 무심관통이송연삭

일반 원통연삭은 주축대와 심압대 사이에서 공작물을 고정하여 연삭이 행하여지나, 무심연삭 공정은 공작물을 고정시키지 않는다는 점에서 일반 원통연삭과는 크게 다르다. 따라서, 일반 원통연삭 공정이 반경 가공법인 것에 비해 무심연삭 공정은 직경 가공법으로 알려져 있다. 이러한 특징으로 인해 무심연삭 공정은 원형 단면을 가진 가는 봉이나 중공 원형, 테이퍼, 단 등을 가진 공작물을 가공하고, 대량 생산하는데 사용된다.

Fig. 2 는 무심연삭기의 구조를 나타낸다. 무심연삭기는 크게 연삭숫돌과 조정숫돌, 공작물 받침대로 이루어져 있다. 무심연삭 방법은 연삭숫돌과 조정숫돌 사이에 위치한 공작물을 공작물 받침대로 지지하며 표면을 연삭하는 방법이다. 조정숫돌은 공작물을 구동 및 제동하는 역할과 공작물을 이송시키는 역할을 하고, 공작물 받침대는 공작물 단면의 진원도와 밀접한 관계가 있는 공작물의 높이를 조정하는 역할을 한다.

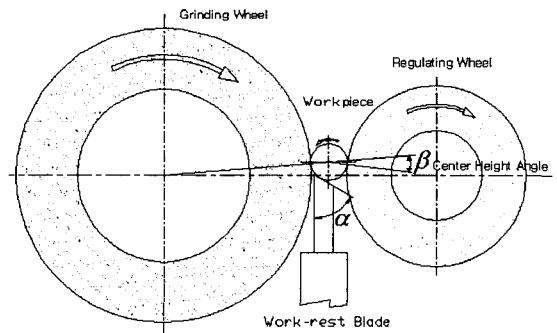


Fig. 2 Schematic diagram of centerless grinding machine

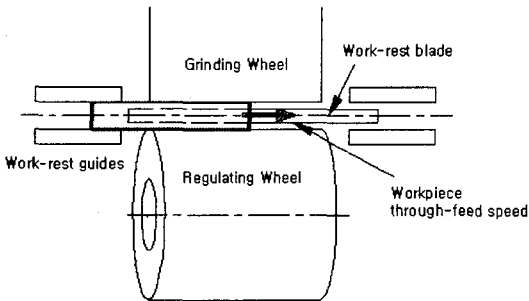
관통이송 연삭법은 조정숫돌과 연삭숫돌 사이로 공작물을 통과시켜 연삭하는 방법이다. 이러한 관통이송으로 연삭되어지는 공작물의 축방향 이송 속도는 조정숫돌의 직경, 속도, 기울기에 의해 결정되며, 연속적인 작업이 가능하므로 축방향의 직경 변화가 없으며, 상대적으로 가늘고 긴 형상을 용이하게 연삭할 수 있다.

Fig. 3 은 무심 관통이송 연삭 공정을 보여주고 있다. 공작물에 축방향 이송을 주기 위하여 조정숫돌을 기울인 결과, 공작물과 조정숫돌은 숫돌의

모든 쪽에 대해서 접촉하지 않고, 국부적으로 점 접촉을 하게 되어 불안정한 상태를 이루게 된다. 따라서 공작물과 조정숫들의 접촉선이 일직선이 될 수 있도록 조정숫들을 트루잉(Truing)하여야 한다.

이 때, 공작물의 형상공차를 최소화하려면 가공 중에 각 접촉선(연삭숫들과 공작물, 공작물과 조정숫들)과 공작물의 회전축은 항상 서로 평행을 유지하여야 한다. 그러나 가공 중에 공작물은 공정 특성상 축방향 위치에 따른 소재제거량이 다르므로 공작물의 회전축이 공작물 받침대 쪽으로 기울어지게 된다. 따라서 공작물의 회전축은 다른 접촉선과 평행상태를 유지할 수 없게 된다. 따라서, 관통이송연삭 가공된 공작물은, 여타의 무심연삭공정으로 가공된 공작물과는 달리, 3 차원 형상 오차 중에서 진원도보다 테이퍼 오차가 상대적으로 더 큰 특징을 갖게 된다.

a) Top view



b) Side view

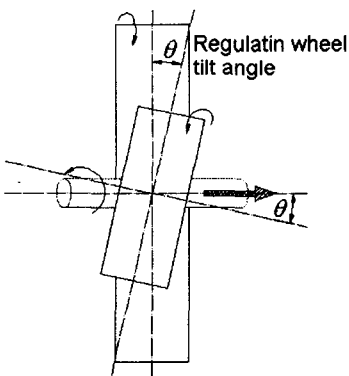


Fig. 3 Through-feed centerless grinding

3. 실험

3.1 실험가정

무심 연삭기에서 연삭숫들의 회전축은 고정되어있다. 그러므로, 가공 중 공작물의 회전축을 연삭숫들의 회전축과 평행하게 만들기 위하여 공작물 받침대의 높이를 조정하여 공작물과 연삭숫들의 접촉선을 일직선으로 만든다. 아울러 조정숫들이 기울어져 있는 상태에서 조정숫들과 접촉하고 있는 드레서를 연삭숫들의 회전축에 평행하게 직선운동 시키는 트루잉을 수행하여, 조정숫들과 공작물의 접촉선이 공작물과 연삭숫들의 접촉선과 평행을 유지할 수 있도록 조정숫들의 원주면에 2 차 하이퍼볼로이드(2nd order hyperboloid) 곡면을 생성시킨다. 이 때 통상 사용되는 무심연삭기의 공작물 받침대는 연삭숫들의 회전축과 평행한 상태로 고정이 되어있는 것이 일반적이다.

앞에서 언급한 바와 같이, 연삭량이 공작물의 직경에 비해 상당히 작더라도, 가공 중 공작물의 축방향으로, 상대적인 직경의 차이가 발생되며 이로 말미암아 공작물의 회전축이 공작물 받침대 쪽으로 기울게 된다. 따라서, 가공 중 발생하는 탄성 변형 등을 무시하고 공작물의 직경이 선형적으로 변화된다고 가정하면, 공작물 선단이 기우는 양은 공작물 양 단의 직경 차이의 반이 되는 것으로 추정할 수 있다. Fig. 4는 이 가정 하에서 공작물 받침대의 기울기 조정으로 공작물 축의 방향을 보정하는 것을 개략적으로 보여주고 있으며, Fig. 5는 본 실험을 위하여 고안된 공작물 받침대의 경사각 조정 기구를 나타낸 그림이다.

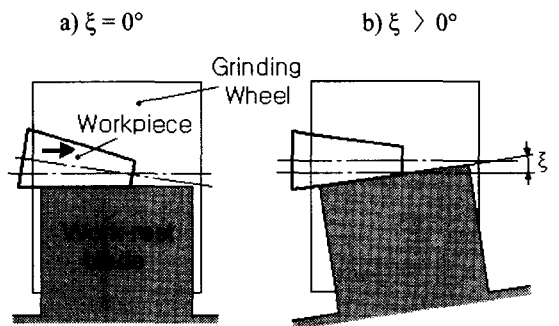


Fig. 4 Relationship between inclination angles of work-rest blade (ξ) and the workpiece axis

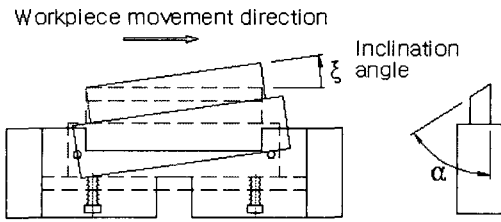


Fig. 5 Inclination angle adjusting mechanism

3.2 시편

시편은 열처리된 기계구조용 합금강 SM45C 연마봉(원통도 평균 $7.18\mu\text{m}$)을 사용하였다. 시편의 경도는 소재제거율과 밀접한 연관이 있으므로, 시편의 표면경도를 측정하였다. 경도 측정 결과, 평균값($H_{RC} 56$)에 대해 4% 오차 범위 내에 있는 시편을 선정하여 실험하였다. 시편의 크기는 지름 $20\pm 0.005\text{mm}$, 길이 75mm 이며, 시편의 절단 시 발생한 버(Burr)로 인한 공작물의 축방향 이송 시 저항 발생 가능성을 제거하기 위하여 가공 전에 모든 시편에 대해서 모따기를 실시하였다. 또한, 가공 전 시편의 원통도가 가공 후 시편의 원통도에 영향을 미치므로, 가공 전 원통도는 $5.0\pm 2\mu\text{m}$ 으로 제한하였다.

3.3 무심연삭기

실험에 사용된 숫돌의 사양은 Table 1 에 나타나 있다. 또한, 실험에 사용된 드레서는 크기가 1/2 캐럿으로, 단인 다이아몬드 드레서이다. 연삭액은 한국 셀석유(주)의 셀루브리클 그린으로 수용성 W2 중 1 호를 물과 중량비 4%로 혼합하여 사용하였다.

공작물 받침대의 재질은 초경합금을 사용하였

Table 1 Specification of centerless grinding machine

	Grinding wheel	Regulating wheel
Specification	A60L8V	A120R3
Out Dia. (mm)	405	228
Width (mm)	150	145
Speed (rpm)	1800	25
Dressing ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	20	30

으며, 상면 각도(α)는 60° 를 주었다. 또한, 공작물 받침대의 하부 양 단에 있는 나사로서 상하 및 경사각 조절을 할 수 있도록 제작하였다.

참고문헌 4, 5 에 따르면 공작물 받침대의 높이는 공작물의 중심각(β)으로 결정된다. 일반적으로 황삭일 때 β 는 7° 부근에서 결정되고, 정삭일 때 β 는 $2\sim 4^\circ$ 로 결정된다. 본 실험에서는 β 가 2.1° 되도록 공작물 회전축을 두 숫돌의 중심축의 연결선보다 3mm 높게 조정하였다.

3.4 실험가공 및 측정

공작물에 축방향 운동을 주기 위한 조정숫돌의 기울기는 각각 $1^\circ, 1.5^\circ, 2^\circ$ 를 선정하였고, 조정숫돌의 표면과 공작물의 접촉선이 일직선이 나올 수 있도록 조정숫돌의 기울기에 맞추어 조정숫돌의 드레서 각도를 맞춘 후, 조정숫돌을 트루잉하였다. 또한 조정숫돌을 회전하여, 공작물이 두 숫돌사이를 통과할 때 점진적인 소재제거가 일어날 수 있도록, 공작물 진입 위치에서의 두 숫돌 사이공간이 출구 위치에서 보다 $80\mu\text{m}$ 더 넓게 되도록, 다이알 게이지와 블록 게이지를 이용하여 조정하였다. 그리고 공작물의 표면상태는 숫돌의 드레싱과 관련이 있으므로, 모든 공작물을 가공하기 전에 드레싱을 깊이 $20\mu\text{m}$ 로 하여 2 회 실시하였다.

공작물 받침대의 경사각은 공작물 진입방향의 높이는 고정시키고, 공작물 출구방향의 높이를 상하로 조정하여 각각 $0^\circ, \pm 0.006^\circ, \pm 0.012^\circ, \pm 0.018^\circ, \pm 0.023^\circ, \pm 0.029^\circ$ 가 되도록 조정하였다. 아울러, 절입깊이는 공작물 진입 위치에서의 두 숫돌간 간격을 블록게이지를 이용한 측정함으로써 조절하였다.

각 실험 조건 당 7 개의 시편에 대하여 무심관통이송 연삭을 연속적으로 수행하였으며, 숫돌 폭 150mm 를 기준으로 하여 생각할 때, 과도상태에 해당하는 처음 2 개와 마지막 2 개의 공작물은 측정에서 제외시키고 정상상태의 연삭력이 작용하는 중간 3 개의 공작물만 원통도를 측정하였다.

측정기는 Taylor-Hobson 사의 Talyrond 252 를 사용하였다. 측정은 공작물 양 단의 7.5mm 를 제외하고, 공작물의 진입방향에서 출구방향으로 5mm 간격으로 13 단을 측정을 하였으며, 측정 결과를 축방향으로 연결하여 시편 형상을 3 차원 형상화 하였고 원통도 값을 구였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 결과

Fig. 6 은 공작물 받침대의 경사각을 -0.029° 에서 0.029° 까지 변화시키며 관통이송 연삭된 공작물의 원통도 측정값 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 공작물 받침대의 경사각이 (-)값인 경우의 원통도는 (+)값인 경우의 원통도에 비하여 상대적으로 불규칙적으로 변화됨을 알 수 있다. 이는 앞에서 제시한 실험 가정이 부분적으로 타당함을 보여준다고 할 수 있다.

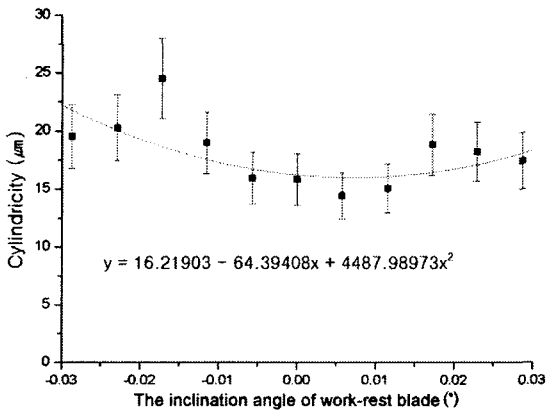


Fig. 6 Relationship between inclination angle of work-rest blade and cylindricity
(Regulating wheel tilt angle : 1.5° , Inclination angle of work-rest blade : $-0.029^\circ \sim 0.029^\circ$)

따라서, Fig. 7, 8, 9 는 공작물의 이송 속도를 결정하는 조정숫들의 기울기가 각각 1.0° , 1.5° , 2.0° 인 경우의 실험 결과를 공작물 받침대의 경사각이 (-)값인 경우를 제외한 (+)인 경우에 대하여 보여주고 있다. 조정숫들의 기울기가 1.0° , 1.5° 인 경우에는, 공작물 받침대의 경사각이 0° 에서 각각 0.017° , 0.006° 까지 증가하는 동안은 원통도가 감소하다가, 그 이후부터 0.029° 까지는 원통도가 다시 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 아울러, 실험 결과를 곡선적합(Curve Fitting)한 식에 의하면, 공작물 받침대 경사각이 각각 0.015° , 0.009° 일 때 공작물 원통도가 최소값을 갖을 것으로 추정된다.

Fig. 9 에서 볼 수 있듯이, 공작물의 축방향 이송속도가 더욱 빨라진, 조정숫들의 기울기가 2.0° 인 경우의 실험 결과에 대한 곡선적합식의 극소값

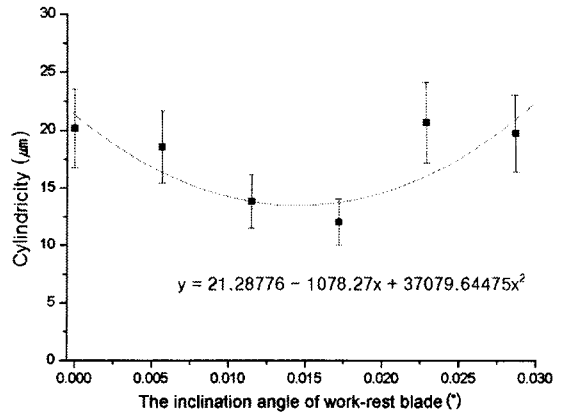


Fig. 7 Relationship between inclination angle of work-rest blade and cylindricity
(Regulating wheel tilt angle : 1.0° , Inclination angle of work-rest blade : $0^\circ \sim 0.029^\circ$)

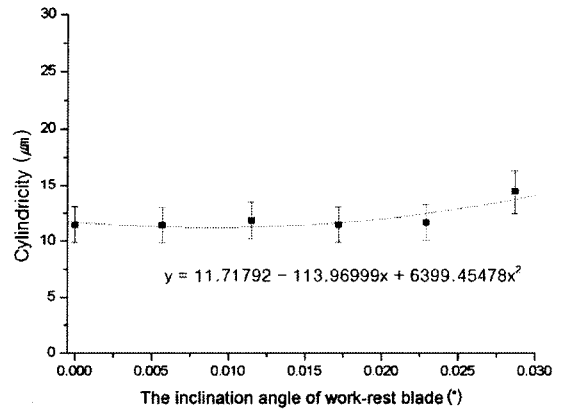


Fig. 8 Relationship between inclination angle of work-rest blade and cylindricity
(Regulating wheel tilt angle : 1.5° , Inclination angle of work-rest blade : $0^\circ \sim 0.029^\circ$)

은 (-)값을 갖는 것을 나타낸다. 그러나, 실험 결과는 앞의 두 경우와 마찬가지로, 공작물 받침대의 경사각이 0° 에서 0.006° 까지 증가하면서 원통도가 감소하다가 (0° 일 때 원통도: $15.85\mu\text{m}$, 0.006° 일 때 원통도: $14.42\mu\text{m}$), 0.006° 에서 0.029° 까지는 원통도가 다시 증가하는 (0.012° 일 때 원통도: $15.07\mu\text{m}$) 경향을 보여 주고 있을 뿐만 아니라, 이 때 곡선적합계적의 기울기 변화가 앞의 경우들에 비하여 상대적으로 작다는 점을 감안하여 보면, 앞의 두

경우보다는 작은 값이지만 (+)값의 최적 공작물 받침대 경사각이 존재함을 유추할 수 있다.

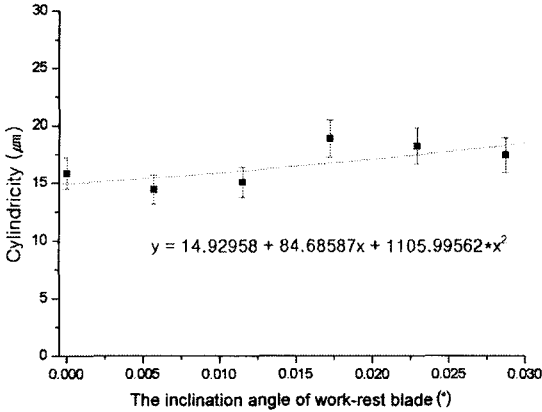


Fig. 9 Relationship between inclination angle of work-rest blade and cylindricity (Regulating wheel tilt angle : 2.0°, Inclination angle of work-rest blade : 0° - 0.029°)

위의 실험 결과를 종합하여 볼 때, 조정숫들의 기울기가 증가되어 공작물의 축방향 이송속도가 빨라지면, 공작물의 테이퍼 오차를 포함하는 원통도를 최소화할 수 있는 최적의 공작물 받침대 경사각이 감소됨을 알 수 있다. 아울러, 공작물의 축방향 이송속도가 어느 한계값을 초과하면 공작물 받침대 경사각에 의한 원통도의 개선이 불가능하다는 사실도 확인되었다.

4.2 고찰

관통이송 연삭은, 공작물 1 회전 시 직선 이송 거리에 해당하는 두께를 갖는 납작한 가상의 공작물들을 가정하여, 상응하는 인피드(Infeed) 연삭으로 분석할 수 있다. 실험에서 공작물 진입 위치보다 출구 위치에서의 숫돌 간의 간격이 80µm 작으므로 숫돌 전체 폭에 대하여 선형적으로 감소되는 것으로 추정할 수 있다. 따라서, 가상의 공작물이 1 회전 시 가해지는 인피드량은 가상의 공작물 두께에 해당하는 거리를 이송할 때 감소되는 숫돌 간격에 해당된다. 그러므로 축방향 위치에 따라서 연삭숫돌과의 접촉 회수가 달라서 서로 다른 직경을 갖는 가상의 공작물들이, 마치 동전이 쌓여 있는 형태로 적층되어, 숫돌 사이에서 인피드 연삭

되는 것으로 가정할 수 있다.

아울러, 연삭가공 중에는 탄성변형으로 인하여 실제절삭깊이가 기하학적 절삭깊이보다 작은 특성이 나타난다. 이 특성은 기하학적 절삭깊이에 대한 실제절삭깊이의 비율로 정의되는 가공탄성계수로 표현할 수 있다. 가공탄성계수는 기하학적 절삭깊이에 따라 변화되며, 일반적으로 0.08 에서 0.224 까지의 값을 갖는 것으로 알려져 있다.^{6,7} 그러므로, 가상의 공작물에 대한 인피드 연삭에 대하여 기하학적 절삭깊이에 비례하여 변화하는 가공탄성계수 개념을 적용하면, Fig. 10 에서 보여지는 것과 같이, 연삭숫들의 축방향 변위에 대한 공작물 직경 변화를 시뮬레이션할 수 있다.

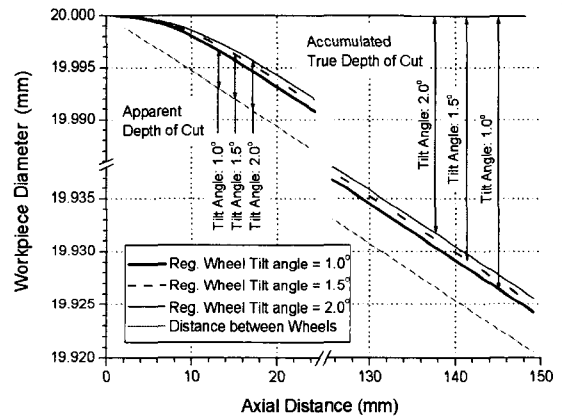


Fig. 10 Workpiece diameter change (Simulation)

조정숫들의 기울기가 증가되어 공작물의 직선 이송 속도가 증가되면 공작물이 숫돌 사이를 통과할 때 총 회전수가 감소되어 연삭에 의하여 제거되는 깊이가 감소된다. 그러므로, Fig. 10 에서 보여주는 것과 같이, 가공이 시작되어 공작물이 임의의 위치까지 이송되며 실제로 제거되는 깊이의 누적값(Accumulated true depth of cut)은 조정숫들의 기울기가 작은 것이 크게 된다.

그러나, 조정숫들의 기울기가 증가되면, 앞에서 언급한 가상의 공작물이 상대적으로 길어져서 이에 해당하는 인피드량이 증가되므로, 가공 중 단위 시간동안 제거되는 소재의 양을 의미하는 소재제거율은 더욱 커지게 된다. Fig. 11 과 12 는 연삭숫들의 축방향 변위에 대하여 기하학적 절삭깊이와 실제절삭깊이의 변화를 각각 나타낸 시뮬레

이선 결과이다. 이 그림들을 통하여서도 알 수 있듯이, 조정숫들의 기울기가 증가되면 임의의 위치에서 도달하는 순간의 기하학적 절삭깊이와 실제 절삭깊이는 모두 증가된다.

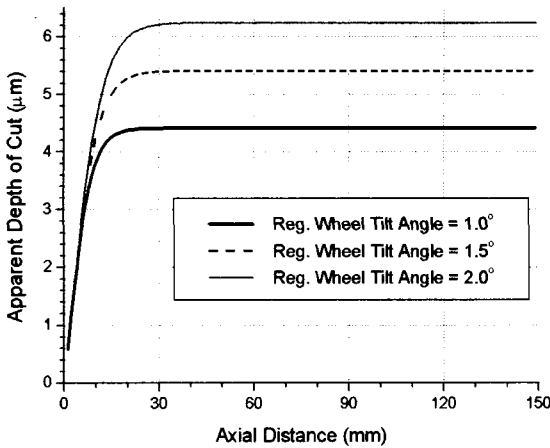


Fig. 11 Apparent depth of cut (Simulation)

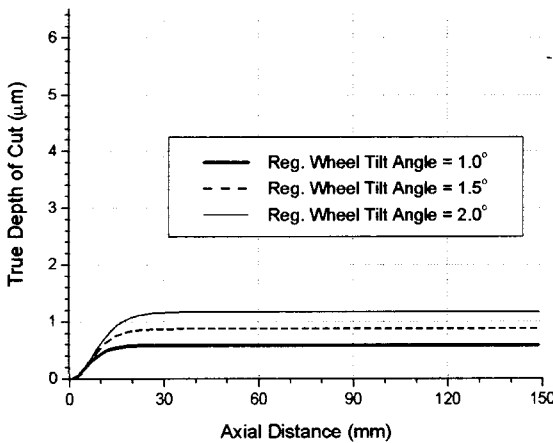


Fig. 12 True depth of cut (Simulation)

실험 중 조정숫들의 기울기가 커질수록 불꽃이 과다하게 발생하는 것을 관찰할 수 있었는데, 이는 Fig. 11 과 12 이 의미하는 내용과 일치하는 것이다. 따라서, 실제 관통이송 연삭공정을 가상의 공작물을 이용한 인피드 연삭공정으로 시뮬레이션하는 것이 가능하다고 사료된다.

Fig. 13 은 시뮬레이션 결과를 활용하여 직선이송 중에 공작물의 축이 기울어지는 각도를 연삭수

들의 축방향 변위에 대하여 나타내고 있다. 무심연삭 공정은 직경가공 공정이므로, 그림에서 보여주는 기울기는 각 위치에서 실험에 사용된 공작물의 실제 길이와 일치하는 연이어 누적된 가상의 공작물들의 직경감소량의 1/2 을 실제 공작물 길이로 나눈 것의 아크사인(arc-sine)값으로 정의하였으나, 공작물이 완전히 숫들 사이에 위치할 때까지는 숫들 사이에 존재하는 길이에 해당하는 가상의 공작물들 만을 이용하여 그 기울기를 구하였다.

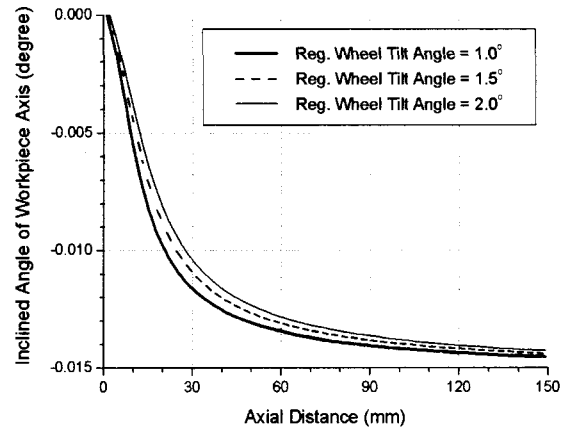


Fig. 13 Inclined angle of workpiece axis (Simulation)

위의 그림에 의하면, 조정숫들의 기울기가 증가할수록 임의의 위치에서 공작물의 축이 상대적으로 덜 기울는 것을 알 수 있다. 따라서, 공작물의 축이 연삭숫들의 축과 평행을 유지하기 위한 공작물 받침대의 경사각도 감소되어야 함을 의미한다. 아울러, 관통이송이 진행됨에 따라 공작물 축이 급격히 기울다가 공작물이 완전히 숫들 사이에 위치하면서 점차 기울어지는 변화율이 완만해지는 특징도 보여준다. 그러므로, 공작물이 직선이송을 시작해서 완전히 숫들 사이에 위치할 때까지가 테이퍼링 현상에 미치는 영향이 그 이후보다 클 것으로 추정된다. 위의 그림에서 조정숫들의 기울기가 1.0°, 1.5°, 2.0°일 때 0 부터 75mm까지의 구간에 대한 기울기를 평균한 값은 각각 0.0109, 0.0104, 0.0101 이다. 이 값들을 실험에서 구한 공작물 받침대의 최적 경사각과 비교해 볼 때, 정성적인 측면에서의 경향은 일치하나, 정량적인 측면에서는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이 차이는 실험 및 측정에서 기인할 뿐만 아니라, 시뮬레이션

을 위한 가정과도 밀접한 관련이 있다.

실험에 사용된 무심연삭기 자체에도 반복오차가 있었으나, 공작물 받침대의 경사도 조절을 위하여 마이크로메타 및 다이알 게이지를 사용하였음에도 불구하고 그 조절량이 아주 미소하여 실험 오차 발생의 주요인이 되었던 것으로 판단된다. 시편 형상 오차 및 반복 측정 오차 등의 모든 요인들을 포함하여 고려하여 볼 때, 총 실험 오차는 약 $\pm 5-7\mu\text{m}$ 정도로 추정된다. 실험과 시뮬레이션 결과의 차이를 유발하는 가장 큰 이유는 공작물의 가공 전 형상과 관련이 있다. 시뮬레이션을 위한 가공 전 공작물의 단면은 편의상 진원으로 가정하였으나, 실제 가공물은 축방향 뿐만 아니라 반경방향으로도 진원도 형상과 편차를 보이므로 가공 후 실험 결과도 시뮬레이션 결과에 비하여 큰 편차를 나타내는 것이 일반적이다. 그러나 이 모든 요인들을 감안하더라도 정성적인 경향에 대한 결과는 신뢰할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

관통이송 연삭되는 공작물의 직경은 진입방향의 끝이 반대쪽 끝보다 상대적으로 가늘어지는 테이퍼링 특성이 있다. 그러므로, 본 연구에서는 공작물 받침대의 축방향 경사각 조절에 의한 이 현상의 개선 가능성을 실험을 통하여 알아보았다. 연구 결과, 공작물 받침대의 경사각은 조정숫들의 기울기의 변화에 대하여 다음과 같은 관계가 있음이 확인되었다.

- 조정숫들의 기울기에 대하여, 연삭 후 테이퍼링에 의한 원통도 오차를 최소화하는 공작물 받침대의 (+)경사각이 존재한다.
- 조정숫들의 기울기가 증가할수록, 연삭된 공작물에 발생하는 이 현상을 최소화하는 공작물 받침대의 경사각은 감소하여 0°로 수렴한다.

참고문헌

1. Dall, A. H., "Rounding Effect in Centerless Grinding," Mechanical Engineering, Vol. 68, No. 4, ASME, pp. 325~329, Apr. 1946.
2. Yonetsu, S., "Out-of-Roundness Characteristics of Centerless Grinding," Proc. Fujihara Memorial

Faculty of Engineering, Keio University, Vol. 13, No. 48, pp. 17~48, 1960.

3. Yonetsu, S., "Consideration on the Control Wheel Truing of a Centerless Grinder," Proc. Fujihara Memorial Faculty of Engineering, Keio University, Vol. 13, No. 49, pp. 1~9, 1960.
4. Kim, K., Barash, M. M. and Chu, C. N., Cylindricity control in precision centerless grinding, A Technical Report for the Purdue Engineer Research Center for Intelligent Manufacturing Systems, pp. 23~76, 1992.
5. Rowe, W. B., Miyashita, M. and Koenig, W., "Centerless Grinding Research and its Application in advanced Manufacturing Technology," Annals of the CIRP, Vol. 38/2, pp. 617~625, 1989.
6. Yim, G. H. and Kim, K., "Effects of the Surface Grinding Conditions on the Machining Elasticity Parameter," J. of the KSPE, Vol. 15, No. 8, pp. 26~32, 1998.
7. Rowe, W. B. and Barash, M. M., "Computer Method for Investigating the Inherent Accuracy of Centerless Grinding," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 4, pp. 91~116, 1964.