

드릴구멍 상사성이 칩형상에 미치는 영향

최만성*

Effect of Geometrical Similarity between Twist Drill on the Shape of Chip Produced

M.S. Choi*

Abstract

In this study, geometrical similarity conditions for drills of various diameters are discussed. The effect of geometrical similarity on the chip shape and forces of different sized conventional drills has been experimentally confirmed. Drilling tests are carried out for SM45C by using the conventional HSS drills. The torque and thrust forces are measured and compared with those chip forms. Chip shape in drilling are affected by three factors being flow angle, side and up curl of the chip. It is found that the feedrate and drill diameter are more affected than cutting speed on the chip form and cutting forces. The similarity conditions gives easily to estimate the chip shape, the thrust and the torque for drills of different diameters.

Key Words : English Key Word: Cutting force (절삭력), Thrust force (이송력)

1. 서론

절삭가공 중에서 드릴에 의한 구멍 뚫기 가공은 양적으로 큰 비중을 차지할 뿐 만 아니고 트러블의 원인이 되기 쉽다고 하는 점에서도 많은 연구를 요하는 가공법이다. 드릴은 트위스트 드릴(이하 드릴이라 한다)이 가장 널리 사용되고 있지만 이것에는 칩의 배출과 진동 회전 등의 문제가 있고 이것과 관계 깊은 드릴 수명이나 구멍 정도의 면에서 개선이 필요하다. 드릴로 연성재료를 구멍 뚫기 할

때 칩은 구멍깊이가 증가하면 구멍주벽이 강한 구속을 받아서 칩 유출이 방해받고 이 결과 칩 외측 부분의 두께가 증가하여 주기적으로 파단되어 절삭저항이나 토크의 변동이 심한 것으로 밝혀져 있다.⁽¹⁾ 따라서 드릴의 구멍 뚫기 성능의 향상을 위해서는 칩의 유출을 용이하게 하고 칩의 형상으로써는 폭이 좁고 긴 피치형으로 하는 것이 매우 유효하다.

한편 드릴은 치질 날의 절삭성능이 낮고 구심성이 악화 때문에 두개의 공구 날이 충분한 대칭성을 얻기 어렵고,

* 한국기술교육대학교

구멍 뚫기 초기에 진동회전을 일으키기 쉬우므로 고정도의 구멍가공은 쉽지 않다.

이 진동회전에 대해서는 발생기구에 관한 많은 연구⁶⁾가 발표되어 있으며 구체적인 발생방지책으로써는 종래의 타원 연마법 대신 새로운 선단 연마법이 제안되어 있다. 이들의 연마법에는 전용의 연마장치를 필요로 하기 때문에 거의 보급되어 있지 않고 타원 연마한 드릴에 사냥을 해서 치질의 폭을 좁게 한 드릴이 널리 사용된다. 트위스트 드릴에 의한 구멍 뚫기 가공은 마진이 구멍 내면에 접촉해서 드릴의 진행을 안내하지만 구멍 뚫기 초기의 마진이 접촉하기 전 진동회전에 대해서는 마진의 기능은 미미하다. 또한 마진폭은 마찰의 증대를 막기 때문에 거의 확대되지 않고 드릴은 직경 상의 두 점에서 구멍의 내면에 접촉하기 때문에 구멍 뚫기 초기의 진동회전의 증대로 구멍의 진원도는 악화된다. 이것을 막기 위해 구멍 뚫기 초기의 마진이 접촉하기 전 단계에서 진동회전을 최소화하는 것이 필요하다.

현재 드릴가공에 있어서 칩의 생성 상태와 절삭저항의 정량적인 해석이 꽤 이루어지고 있는데,^{6,67)} 주로 2차원절삭에 있어서 곡면의 슬립선장을 이용하여 2차원 절삭 데이터를 구하고 드릴을 직선의 공구 날로 가정하여 3차원화 한 것이다. 그러나 이와 같은 모델에서는 실제 드릴가공을 시뮬레이션 하기가 어렵고 그 해석 절차 또한 복잡하여 응용에 있어서 제한이 따른다. 또한 경사면이 평면이라 가정하고 칩 생성기구를 해석한 경우도 있는데⁶⁸⁾ 이러한 가정이 많이 포함되어 있는 것은 그만큼 드릴가공의 절삭성능이나 칩 형태의 예측이 이론적으로 접근하기가 어렵다는 의미가 된다. 따라서 본 연구에서는 지름이 다른 드릴 사이의 기하학적 상사를 고려하여 절삭저항과 칩 형상을 정성적으로 검토하여 이러한 문제를 해결하고자 한다. 보통 절삭가공에서는 절삭 동력의 대부분이 칩 생성에 소비되고 드릴 가공에서는 칩의 배출성이 절삭 저항, 드릴 수명, 구멍 정도 등에 크게 영향을 미치므로 칩은 절삭상태에 대한 정보원이 될 수 있다. 드릴은 경사각이나 절삭속도가 경우에 따라 바뀌기 때문에 이론적 취급이 매우 어렵지만 K.Nakayama⁶⁹⁾의 문헌에서 보듯이 본 연구에서는 정상적인 칩을 하나의 나선면으로 간주함으로써 비교적 간단하게 칩 생성 상태를 예측할 수 있다. 한편 공작기계의 가공능력을 활용하여 고능률의 절삭가공을 하기 위해서는 절삭저항을 고려한 절삭조건을 선정하는 것이 필요하다. 드릴 가공에서의 절삭실험 데이터들을 이용하여 절삭 저항을 간단하게 평가하기 위한 방법, 혹은

피삭재의 경도 등을 매개변수로 한 실험식이나 차원 해석을 적용하여 유도한 실험식이 발표되어 있는데, 본 연구에서는 지름이 다른 드릴의 기하학적 상사성을 생각하여 절삭저항의 실험적인 경향과 칩 배출의 관계를 동시에 고찰하였다.

2. 칩 형상의 일반적 성질

칩의 형상은 동일조건 하에서 절삭해도 그 상태가 변동하는 것이 많다. 그 이유 중의 하나는 공구 날 부근은 절삭력에 의해 소성 변형되고 힘이 조금만 가해져도 슬립(slip) 변형되어 칩의 형상이 바뀌기 때문이다. 절삭 중에는 칩의 길이가 점차 증가되고 무게중심의 위치도 변화하여 절삭토크도 변동한다. 따라서 변동하는 칩은 각 순간의 조건에 대한 정상 칩의 조합이라 생각하고 정상 칩에 대한 고려를 먼저 한다. 정상 칩의 일반적인 형은 나선형으로써 경사면이 접 평면이 된다. 나선의 특별한 경우로써 곡률이 0이면 직선형의 칩이 되고 피치가 0이면 원호가 된다. 나선형을 결정하는데는 3개의 독립 량이 필요하고 절삭기구와 관련시키기 위해서는 상향 커일의 곡률, 횡방향 커일의 곡률, 유출각을 이용하면 편리하지만 배출된 칩의 분류에 따라 나선의 외경 2, 피치 p, 나선의 축과 모선이 이루는 각 θ 를 이용하는 것이 편리한 경우가 많다. 이외에 칩의 폭 b, 두께 t 및 칩의 감긴 수 n(혹은 칩의 길이 l)이 주어지면 칩의 형태는 완전히 결정할 수 있다.

Fig. 1(a)로부터 공구경사면에서 공구-칩 접촉면의 종단부를 칩 분리선과 이 선을 기준으로 하여 좌표계 (x, y, z)를 그림과 같이 잡고 칩 생성점에서의 운동을 생각한다. 칩은 그 생성점에서 x축과 평행한 점 주위의 회전운동(상

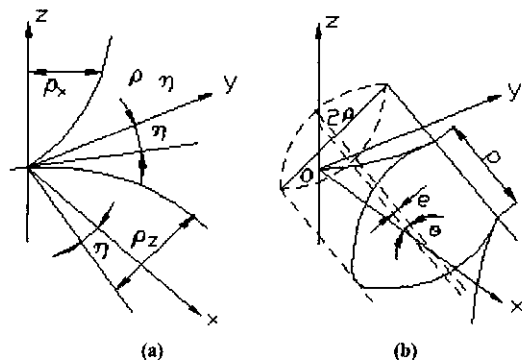


Fig. 1 Helix as the compound of two orthogonal circular arcs

향 커일 각속도 ω_x , 곡률반경 ρ_x)과 z축에 평행한 축 주위의 회전운동(횡방향 커일 각속도 ω_z , 곡률 반경 ρ_z 을 해가면서 y축에 대해 η 만큼 기울어져 유출하므로, 칩의 형상을 결정하는 량(ρ , p 및 θ)을 ρ_x , ρ_z 및 η 로 나타낼 수 있다. 즉 모든 칩의 형상은 상향 커일, 횡방향 커일, 유출각으로 나타낸다. 이들이 합성되어 회전축에 대해서 회전운동과 병진 운동을 한다. 여기에서 중요한 것은 경사면은 칩의 접 평면에 있기 때문에 이 단면에 있어서 칩의 속도벡터는 어디든 경사면에 평행하고 z방향의 속도성분은 가지지 않는다. 따라서 당연히 그 속도성분의 장소에 의한 차도 0이고 y축 주위의 회전운동성분은 전혀 없다. 즉 좌표축을 이와 같이 잡으면 칩의 회전운동의 운동축은 x-z평면 혹은 이것과 평행한 평면 내에 있을 것이다. 이에 관한 관계를 그림으로 나타내면 Fig. 1(b)와 같다. 이 나선의 중심축은 x-z평면에 평행한 평면, 즉 y=일정(=e로 한다)인 평면 내에 있고 x축에 대해 각 θ 만큼 기울어져 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\rho_x}{\rho_z \cos \eta} \quad (1)$$

또한 나선이 말리는 원주의 반경 ρ 와 나선의 피치 p는 다음과 같다.

$$\rho = \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \eta \cos^2 \theta}{(\cos \eta / \rho_x)^2 + (1 / \rho_z)^2}} \quad (2)$$

$$p = 2\pi\rho \tan \lambda = \frac{2\pi\rho \sin \eta \cos \theta}{\sqrt{1 - \sin^2 \eta \cos^2 \theta}} \quad (3)$$

또한 x-z평면으로부터의 거리 e와 나선의 리드각 λ 는 다음과 같이 구해진다.

$$e = \frac{\rho \sin \eta \sin \theta}{\sqrt{1 - (\sin \eta \cos \theta)^2}} \quad (4)$$

$$\lambda = \sin^{-1}(\sin \eta \cos \theta) \quad (5)$$

이상으로 칩이 취하는 나선의 형상과 위치에 관한 모든 정보가 3개의 량에 의해 일 의적으로 정해짐을 나타내었다. 즉 예를 들면 유출각 η , 상향 및 횡 방향 커일의 곡률 반경 ρ_x 와 ρ_z 의 3자가 주어지면 나선의 반경 ρ 와 피치 p, 및 나선의 폭의 기울기각 θ 가 위에서 나타낸 여러

식으로 주어진다.

3. 실험방법 및 장치

비틀림 드릴에서는 공구 날 위의 장소에 따라서 경사각이나 절삭속도가 다르지만 양 공구 날로부터 나오는 칩은 보통은 각각 일체가 된다. 일체이기 위해서는 공구 날 상의 각 점으로부터 나오는 칩 요소의 유출속도와 유출방향이 앞 절에서 나타낸 조건을 만족하고 칩 전체가 하나의 나선면을 구성하지 않으면 안 된다. 그러나 드릴의 공구 날 각부의 형상이 이 조건을 완전히 만족하지 않고 칩 형상의 외부조건에 대한 큰 “적응성”이 칩 내의 각 요소에도 존재하기 때문에 각 요소간의 상호 간섭에 따라 유출속도와 방향이 수정되고 그 결과 일체조건이 유지되는 것으로 생각된다.

드릴로부터 나오는 칩이 일체인 것은 드릴형상이 합리적인가 혹은 칩 내부의 상호 간섭에 의한 것이 큰가를 조사하기 위해 지름이 다른 밀구멍을 판 가공물에 드릴 가공한 칩 형상의 변화를 측정했다. 먼저 드릴가공에 대해서 구멍의 깊이에 따라 절삭에 따른 종속변수의 변화를 실험을 통하여 알아보았고, 이에 대한 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 The specification of the experimental instruments

Name	Model	Co. Ltd
Machining Center	NT 80	SAEIL Heavy Co.
Dynamic Strain Amp.	N9354	SHOWA
Tool Dynamometer	TSM-B Series	TOKYO testing M/C
Data Acquisition Sys.	DT3831-G	DATA TRANSLATION

피삭재는 SM45C로 두께 200mm의 시편을 가공하여 사용하였고, 드릴은 시편의 표준 비틀림드릴로, 비틀림각 28°, 선단각 118°의 형상으로 지름이 $\Phi 3$, $\Phi 6$, $\Phi 9$, $\Phi 12$, $\Phi 16$ mm의 5가지 종류로 하였다. 절삭조건으로써는 절삭속도 15, 17, 19, 21, 23 m/min로 바꾸고 이송은 0.1~0.32 mm/rev의 범위에서 실험을 하였다.

절삭저항은 Table 1과 같이 공구동력계 (탄성원통의 비

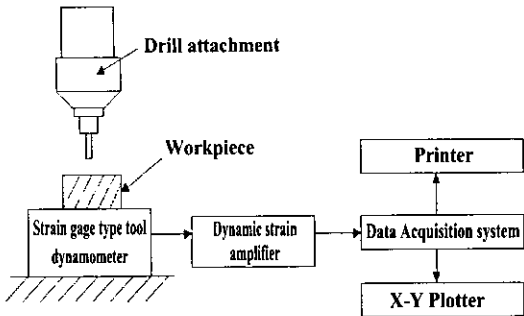


Fig. 2 Experimental setup

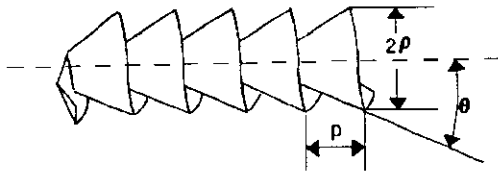


Fig. 3 Measurement of chip

틀림과 압축변형률을 저항성 변형률 게이지로써 측정(한 것)의 위에 가공물을 붙이고 토크와 추력을 Fig. 2와 같이 측정했다. 칩 형태의 측정은 칩을 공구현미경 위에 두고 Fig. 3처럼 외경 $2p$, 피치 p 를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

드릴의 지름이 $\Phi 3\text{mm}$, $\Phi 6\text{mm}$, $\Phi 9\text{mm}$, $\Phi 12\text{mm}$, $\Phi 16\text{mm}$ 일 때 칩 형상을 표현할 수 있는 변수에 대한 변화를 Fig. 4-Fig. 7처럼 나타내었다. Fig. 4는 절삭속도를 15, 17, 19mm로 바꾸었을 때 칩의 감긴 수 n 을 나타낸 것으로 긴 피치형의 칩을 배출하는데 있어서 드릴지름의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 드릴구멍의 지름이 $\Phi 9\text{mm}$, $\Phi 12\text{mm}$ 일 때 절삭속도에 관계없이 가장 긴 피치형의 칩이 배출됨을 알 수 있다. 이것은 칩의 구속조건이 드릴의 직경에 의해 그 배출조건이 최적화 될 수 있음을 보여주는 것이다. Fig. 5는 같은 절삭속도의 변화에 따라 칩 피치 p 의 변동을 나타낸 것인데 $\Phi 9\text{mm}$, $\Phi 12\text{mm}$ 일 때 칩의 피치가 짧아짐을 알 수 있다. 따라서 칩의 피치가 짧아질수록 칩이 감기는 수가 많음을 볼 수 있고 칩의 피치와 칩의 감기는 수는 역함수 관계가 있다. 또한 Fig. 4와 Fig. 5로부터 드릴의 지름이 너무 작거나 크면 칩은 빨리 절단됨을 의미하기

도 한다. 보통 긴 피치형 칩이 생기는 것은 구멍 주변의 구속이 심하기도 하고 외주의 공구날의 상태가 나쁠 때 두꺼운 칩을 내는 경우가 있다. 그 내측은 크랙을 일으키는 경우가 많다.

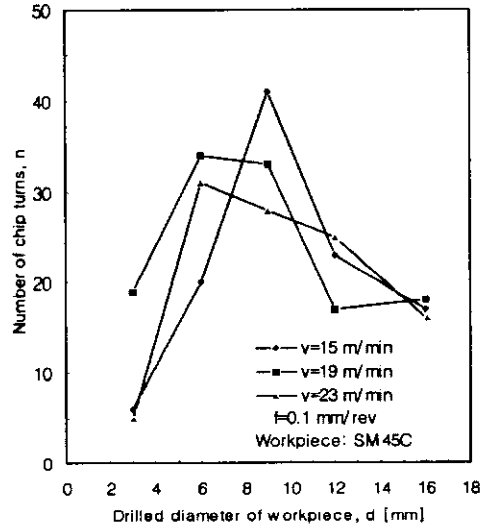


Fig. 4 Effect of drilled diameter on number of chips with cutting speed

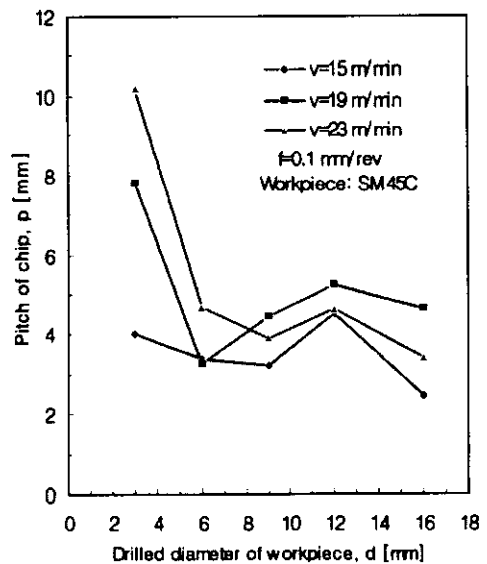


Fig. 5 Effect of drilled diameter on chip pitch with cutting speed

Fig. 6은 지름의 변화에 의한 칩 폭의 변동을 나타낸 것으로 그 변화의 양상은 일정하지 않으나 대체로 구멍의 크기가 증가할 때 동시에 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이것은 칩이 생성될 때 열팽창에 의한 폭의 증가로 생각되고 구멍가공 시 생성되는 절삭열의 영향이 적지 않음을 시사하는 것이다.

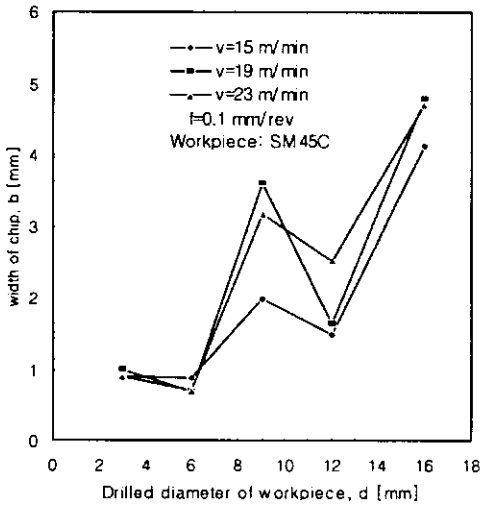


Fig. 6 Effect of drilled diameter on width of chips with cutting speed

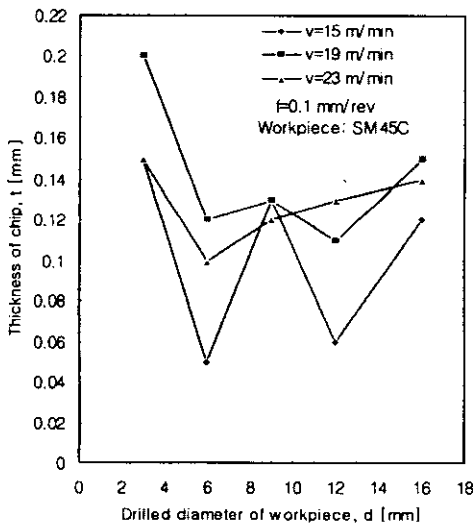


Fig. 7 Effect of drilled diameter on thickness of chip with cutting speed

Fig. 7은 절삭속도의 변화와 함께 드릴지름의 증가에 따른 칩 두께의 변동을 표시한 것인데 그림을 살펴보면 변화의 경향은 뚜렷하지 않으나 절삭속도의 증가에 따른 칩 두께의 감소라는 일반적인 성향은 보인다. 드릴 가공 시 드릴의 상사성에 의한 칩 두께의 변화가 일정하지 않음은 드릴가공에서 흔히 보이는 떨림에 의한 영향으로 생각된다.

Fig. 8은 식(5)에 따른 칩의 리드 각 λ 의 변화를 나타낸 것인데 드릴지름이 증가할 수록 칩의 리드 각은 점차 감소한다. 그림에서 알 수 있듯이 칩의 리드 각은 절삭속도에 관계없이 일정한 함수 관계를 갖는데 이것은 절삭저항에 직접적인 영향을 받지 않고 칩의 배출 방향에 의한 칩의 운동 그 자체에 더 큰 영향을 받는 것을 의미한다.

Fig. 9는 지름의 변화에 대한 추력의 변화를 나타낸 것인데 절삭속도에 관계없이 거의 선형적인 함수관계를 보여주고 있다. 따라서 드릴의 상사성에 관련된 종속변수로써는 추력임을 여기서 볼 수 있고 드릴에서 배출되는 칩의 형상에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 드릴의 상사성에 따른 드릴의 구멍 뚫기 성능을 비교하기 위해서 직경 $\Phi 3\text{mm}$, $\Phi 6\text{mm}$, $\Phi 9\text{mm}$ 의 드릴로써 절삭속도를 15, 17, 19, 21, 23 m/min 로 바꾸고, 이송을 0.1, 0.22mm/rev로 바꾸어 실험하였다. Fig. 10은 이송을 0.1 mm/rev로 하고 절삭속도를 주어진 조건에서 변화시켰을

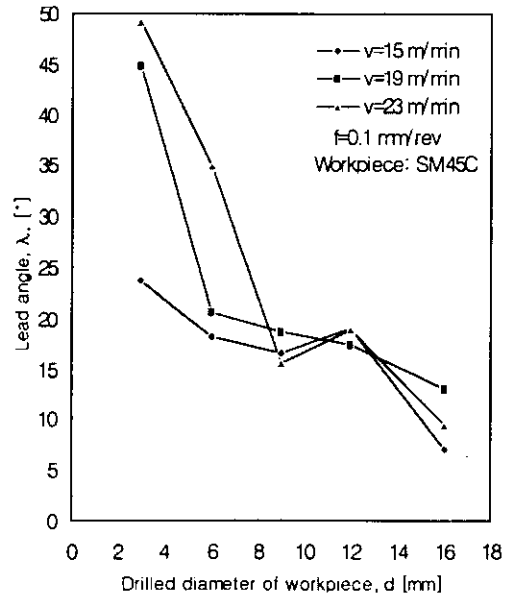


Fig. 8 Effect of drilled diameter on lead angle with cutting speed

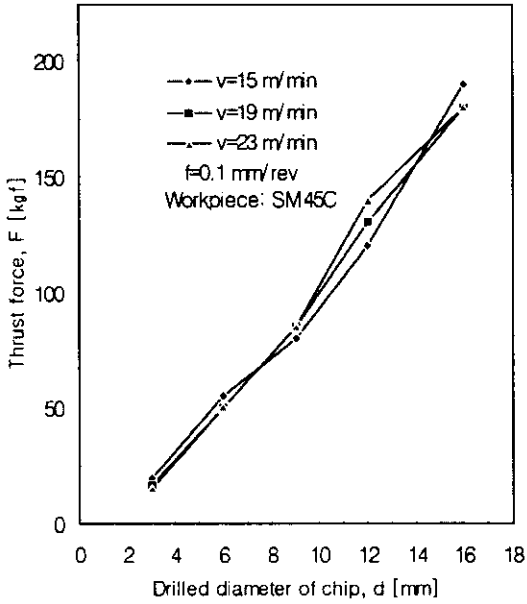


Fig. 9 Effect of drilled diameter on thrust force with cutting speed

때 절삭토크의 변화를 측정된 결과이다. 드릴지름이 3, 6mm일 때는 거의 일정하나 지름이 커짐에 따라 그 변동의 폭이 큼을 알 수 있다.

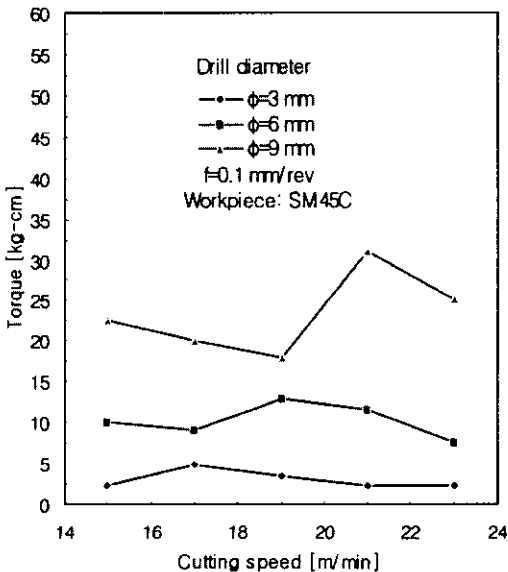


Fig. 10 Variation of torque with cutting speed, cutting fluid: dry

이것은 칩이 커열하고 절단, 배출될 때 칩이 배출되는 홈 및 배출구멍으로부터 강한 구속을 받아 소요에너지가 증가되었기 때문이라 생각된다. Fig. 11은 이송속도를 0.22 mm/rev로 바꾸어 Fig. 10과 같은 조건에서 실험한 결과이다. Fig. 10과 Fig. 11에서 알 수 있듯이 이송속도의 변화에 따라 지름이 작은 드릴의 경우는 거의 절삭속도에 따라 변화가 적은 반면 드릴지름이 커질수록 변화의 폭은 커지게 된다. 이것은 K.Nakayama⁹⁾의 문헌에서 언급하였듯이 구멍 주변의 심한 구속이 있는 경우 칩이 주기적으로 잘려서 절단형 칩을 내고, 이에 따라 절삭저항 특히 토크가 심하게 변동하고, 아울러 칩의 두께가 두꺼워져서 칩의 곡률 반경 ρ_x 가 무한대로 증가하기 때문이다.

Fig. 12와 Fig. 13은 이송속도 0.1, 0.22 mm/rev으로 바꾸고 절삭속도를 바꾸었을 때의 추력의 변화이다. 양자 모두 절삭속도가 증가할 때 그 크기의 변화는 거의 볼 수가 없다.

따라서 드릴지름에 대한 절삭저항의 크기의 변화는 유사함을 알 수 있다.

이것은 E.J.A. Aarnarego¹⁰⁾ 와 K.Kasahara¹¹⁾가 언급하였듯이 드릴지름 등이 달라도 기하학적으로 상사한 조건을 만족하는 주 공구 날 부 및 비 절삭저항은 각각 일정한

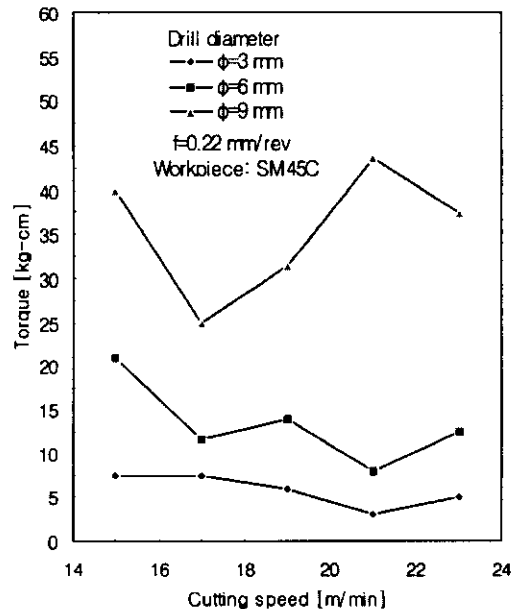


Fig. 11 Variation of torque with cutting speed, cutting fluid: dry

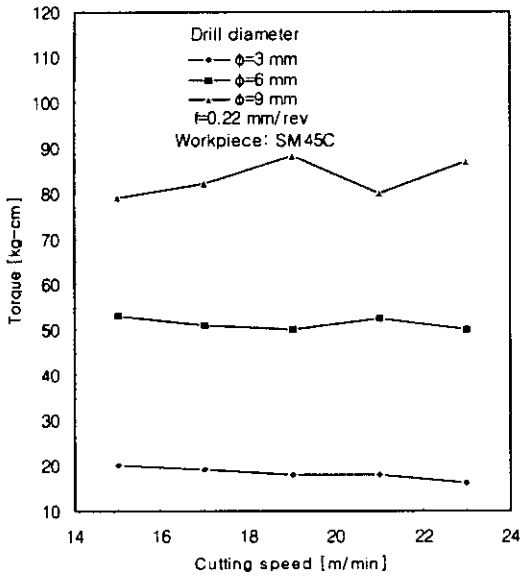


Fig. 12 Variation of thrust force with cutting speed, cutting fluid: dry

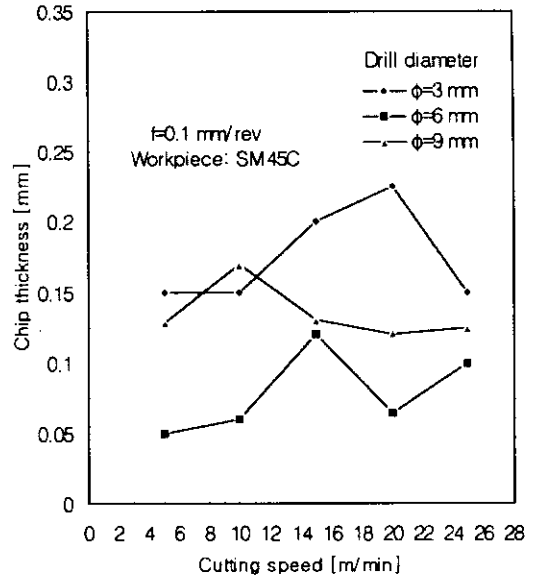


Fig. 14 Variation of chip thickness with cutting speed, cutting fluid: dry

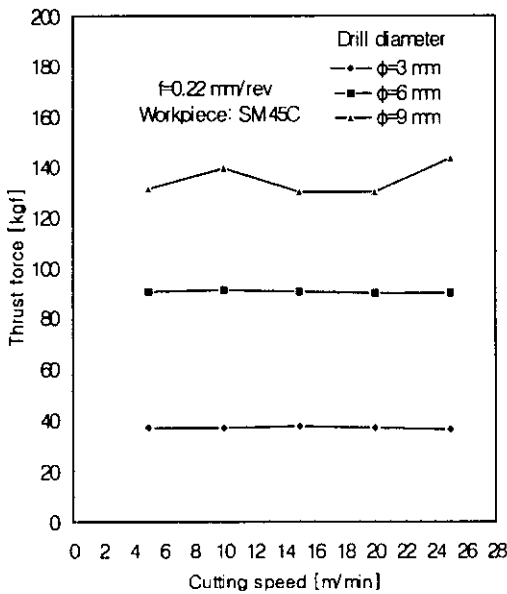


Fig. 13 Variation of torque with cutting speed, cutting fluid: dry

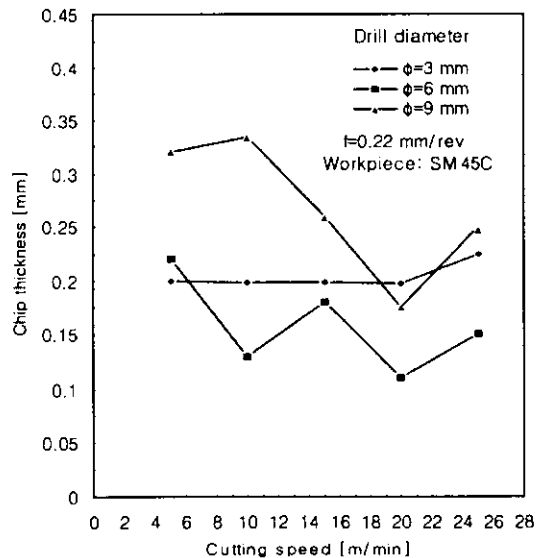


Fig. 15 Variation of chip thickness with cutting speed, cutting fluid: dry

값을 가지는 이유에 기인한다. 또한 이러한 상사성에 벗어나면 절삭저항은 대개 드릴가공 시 칩의 배출과 절단에 관계 있고 결국 가공정도는 칩의 형상에 크게 관계가 있

다. 보통 드릴에 의한 구멍 뚫기는 처음에 드릴이 가공물에 접촉하여 공구 날 전체가 절삭하기까지 토크는 점증하고 칩을 날의 절삭정도가 나빠지므로 추력은 최초로 급증

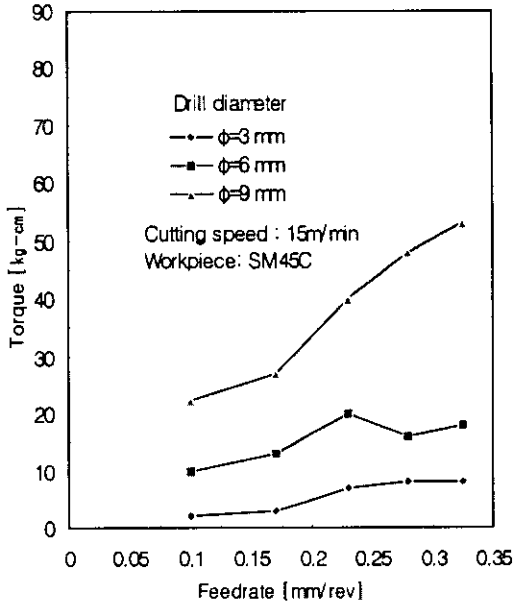


Fig. 16 Variation of torque with feedrate, cutting fluid: dry

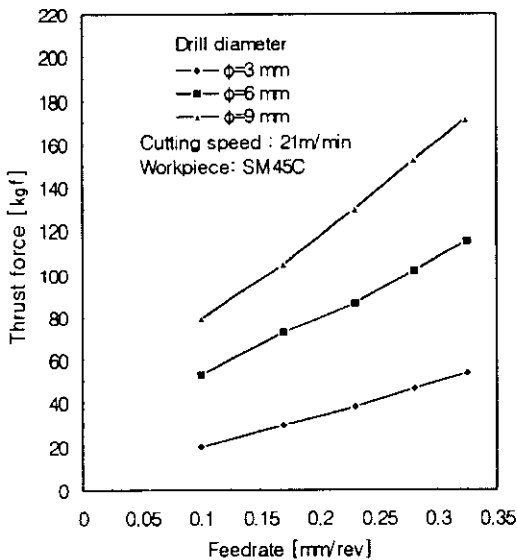


Fig. 17 Variation of torque with feedrate, cutting fluid: dry

한다. 이후에는 공구 날 전체가 절삭하여 연속한 타원 나선형 칩을 배출하는데 이때 처음에는 칩이 비교적 자유로이 배출하지만 구멍이 깊어지면 구멍 벽의 구속이 증가하

여 토크, 추력 모두 점증한다. 이 단계에서 칩의 여러 측정값은 구멍깊이가 증가하여 구속이 강해지면 외경 2ρ 가 감소할 뿐 아니라 칩 두께가 현저히 증가한다.

Fig. 14와 Fig. 15는 이송속도를 0.1, 0.22 mm/rev로 하고 절삭속도를 바꾸어 실험하였을 때의 칩 두께 변화이다. 보통 절삭에 있어서는 절삭속도가 증가할 때는 특별한 조건 이외에는 칩 두께가 감소하는 것으로 되어 있으나 그림에서 보듯이 드릴에서는 일반적인 감소 경향을 보이지 않는 데 이것은 드릴가공 시 발생하는 칩의 배출 상태가 일정하지 않고 여기에다 드릴의 떨림 현상²⁾, 진동특성³⁾에 따라 이런 불규칙한 변화에 영향을 미치기 때문이라 여겨진다.

Fig. 16과 Fig. 17은 이송속도를 변화시키고 절삭속도를 15, 21m/min으로 하였을 때 토크의 변화인 데 선형적인 변화를 볼 수 있다. 여기서 분명한 사실은 드릴의 구멍이 커지고 이송속도를 증가시켰을 때 절삭저항의 변화는 선형적 함수 관계에 있다.

5. 결론

비틀림 드릴의 칩 형상을 드릴의 기하학적 상사성과 관련하여 실험한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 드릴저름의 변화에 따른 드릴의 기하학적 상사성에 가장 뚜렷한 관계를 갖는 인자는 리드각이며, 칩의 감긴 수와 피치는 역함수 관계가 있다.
- (2) 드릴구멍의 상사성에 의한 절삭 토크는 거의 독립적이고 추력은 함수 관계를 가지고 있다.

참고 문헌

- (1) 中山一雄, 小川 誠, "切りくず形状から見たねじれ刃ドリルの切削性能", 精密機械, 43, 4 p. 427, 1977.
- (2) S.J.Lee, K.F.Eman, S.M.Wu, "An Analysis of the drill wandering motion", Transactions of ASME, Vol.109, pp. 297~305, 1987.
- (3) H.Onikura, K.Sakuma, A.Katsuki, "Vibration Characteristics of Drills with Reference to Effects of Main Cutting Edges, a Chisel Edge and Margins", JSPE, Vol.54, No.9, p. 6974, 1988.
- (4) K.Nakayama, "Chip Control in Metal Cutting",

- Bull.JSPE, Vo.118, No.2, pp. 97~103, 1984.
- (5) A.Hirota, K.Kasahara, "Analytical Prediction of Chip Formation and Cutting Forces in Drilling Operation" (1st Report), - Cutting Model, Energy Method and Preliminary Results-, JSPE, Vol.47, No.8, pp. 987~1108, 1981. No.8, pp. 987~1108, 1981.
- (6) A.Hirota, K.Kasahara, "Analytical Prediction of Chip Formation and Cutting Forces in Drilling Operation" (2nd Report),-Comparison of Predicted and Experimental Results-, JSPE, Vol47, No9, pp. 74~80, 1981.
- (7) A.Hirota, M.Tanaka, K.Kasahara, "Analytical Prediction of Chip Formation and Cutting Forces in Drilling Operation" (3rd Report), -A Cutting Model for Chisel Edge with Restricted Tool-Chip Contact Length-, Vol.53, No.8. pp. 106~112, 1987.
- (8) K.Kasahara, A.Hirota, "Drilling with Flat Rake Face Drills and Analysis of Long -Pitch Helical Chip Formation Process", JSPE, Vol.56, No.6, pp. 117~123, 1990.
- (9) K.Nakayama, M.Ogawa, "Cutting Performance of Twist Drills in Relation to the Shape of Chip Produced", JSPE, Vol.43, No.4, pp. 39~44, 1977.
- (10) E.J.A.Armarego, C.Y.Cheng, "Drilling with Flat Rake Face and Conventional Twist Drills-I,II", Int.J.MTDR, Vol..12, No.17, pp. 17~35, 1972, Vol.12, No.37, pp. 37~54,1980.
- (11) K.Kasahara, A.Hirota, "Cutting Force Prediction Based on the Geometric Similarity between Drills", JSPE, Vol.55, No.3, pp. 111~116, 1989.
- (12) M. Kato, S. Enomoto, Y. Saito, T.Hanaoka, "Cutting Behavior of Drill Point at Beginning of Drill", JSPE, Vol.56, No.8, pp. 108~113, 1990.