

# SKD11의 2차원 절삭실험을 통한 절삭 특성 해석

## The Analysis of Machining Characteristics of SKD11 by Orthogonal Cutting Experiments

김남규\*, 전태수(한양대 대학원 기계설계학과), 정성중(한양대 기계공학부)  
N.K.Kim\*, T.S.Jun(Hanyang Univ. Graduate School), S.C.Chung(Hanyang Univ.)

### Abstract

SKD11 is one of the most difficult workpiece for machining, so it is necessary to evaluate the machining characteristics of SKD11. The workpiece was made to be the pipe form and heat-treated to HRC 45.

In this paper, the orthogonal cutting experiment of this material was carried out with TiAlN coated WC cutting tool of 4 kinds of rake angle. After cutting experiment, cutting characteristics of SKD11 were investigated according to variation of cutting speed, feedrate and rake angle.

**Key Words** : SKD11, Cutting Ratio(절삭비), Normal Rake Angle(수직 경사각), Principal Cutting Force(주절삭력), Axial Force(횡분력), Shear Stress(전단응력), Friction Angle(마찰각), Shear Angle(전단각)

### 1. 서 론

최근 산업사회의 급속한 발전은 다품종 소량 생산의 추세를 더욱 가속화시키고 있으며 이로 인한 신속 정밀한 금형 제작 기술의 필요성이 요구되고 있다. 또한 신소재의 개발에 따른 금형 재료의 고경도화, 난삭화로 가공의 어려움을 극복하기 위해서 고속가공에 대한 관심이 높아지고 있다.<sup>(1,2)</sup> 공작기계의 가공속도가 고속화되고 있는 상황에서 절삭공구의 형상에 따른 금형 재료의

절삭 특성에 관한 데이터는 적절한 절삭조건 선정에 가능하게 하여 고속가공을 실현할 수 있다.

손창수 등<sup>(3)</sup>은 볼엔드밀을 이용하여 항공기 엔진부품 제작에 쓰이는 인코넬 718 (Inconel 718) 소재의 고속가공에서의 절삭성을 평가했으며 최상우 등<sup>(4)</sup>은 CBN 볼엔드밀을 사용하여 SKD11의 경도변화에 따른 절삭 특성을 평가했다. 그리고 Altintas<sup>(5)</sup>는 볼엔드밀의 절삭력을 분석하기 위해 절삭실험을 통해 얻어진 비절삭계수를 이용하였으며 최대 전단응력과 최소 에너지법을 이용해서 경사절삭에서 절삭력에 영향을 미치는 전단각의 예측에 관한 연구를 하였다.

본 논문에서 고강도의 금형재료로 널리 쓰이는 SKD11에 대한 절삭특성을 규명하기 위하여 시편을 일정한 두께의 관 형태로 만들어 열처리하고, 공구의 형상에 따른 절삭 특성을 평가하기 위하여 4 종류의 수직경사각을 갖는 TiAlN코팅 초경 공구를 제작하여 2차원 절삭실험을 수행하였다. 다양한 절삭조건에 따른 절삭 실험을 실시하여 공구의 수직 경사각에 따른 절삭성을 평가하였다.

### 2. 2차원 절삭력 모델

고전적인 절삭력 모델은 불연속 칩의 경우 수학적 접근이 어렵기 때문에 구성인선이 없는 연속 칩이 발생하는 경우에 있어서 전단면 이론을 취급하고 있으며 제3분력이 없는 2차원절삭만을 고려함으로써 절삭조건을 단순화한 모델을 사용하고 있다. 2차원절삭은 절삭공구 날의 폭 보

다 가공물의 폭이 작은 관의 단면을 선삭 할 때의 절삭이라고 할 수 있다. 이러한 조건에서 절삭 속도는 스핀들 회전속도와 피삭재 직경의 곱의 형태로 나타낼 수 있으며 회전방향은 절삭공구 날에 직각이 된다.

Fig. 1은 2차원 절삭에서의 칩의 생성 및 절삭력 관계를 나타내고 있으며 주절삭력  $F_p$  와 횡분력  $F_q$  은 식(1)과 같이 주어진다.

$$F_p = \frac{\cos(\beta - \gamma_o)}{\cos(\phi_o + \beta - \gamma_o)} \cdot \frac{\tau_s b h}{\sin(\phi_o)} \quad (1)$$

$$F_q = \frac{\sin(\beta - \gamma_o)}{\cos(\phi_o + \beta - \gamma_o)} \cdot \frac{\tau_s b h}{\sin(\phi_o)}$$

여기서  $\tau_s$ 는 전단응력,  $\gamma_o$ 는 수직경사각,  $\beta$ 는 마찰각,  $\phi_o$ 는 전단각을 나타내고 있다.

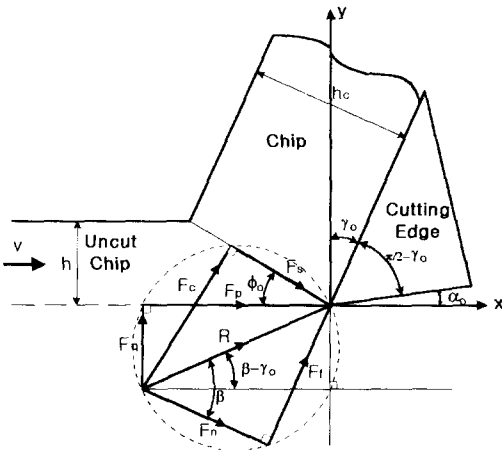


Fig. 1 Chip Geometry and Force Relationships for Orthogonal Cutting

전단응력  $\tau_s$  은 식 (1)을 변환하여 식 (2)와 같이 전단각 및 주절삭력과 횡분력의 함수로 나타낼 수 있다. 여기서  $b$ 와  $h$ 는 각각 절삭폭과 절삭 깊이를 나타낸다.

$$\tau_s = \sin(\phi_o) \cdot \left( \frac{\cos(\phi_o)F_p - \sin(\phi_o)F_q}{b h} \right) \quad (2)$$

전단각  $\phi_o$ 은 피삭재의 성질에 따라 좌우되므로 Ernst-Merchant는 전단각의 결정을 식 (3)으로 제안하였다.

전단각의 예측을 위하여 절삭 전 칩두께와 절삭 후 칩두께의 비로 나타내어지는 절삭비  $r$  와 수직경사각  $\gamma_o$ 의 함수로 전단각을 나타내면 다음과 같다.

$$\phi_o = \tan^{-1} \left( \frac{r \cos(\gamma_o)}{1 - r \sin(\gamma_o)} \right) \quad (3)$$

여기서 절삭비  $r$  는 실험에 의해서 얻어질 수 있다. 마찰각  $\beta$  은 다음 식과 같이 구해진다.

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{F_p + F_q \tan(\gamma_o)}{F_q - F_p \tan(\gamma_o)} \right) \quad (4)$$

### 3. 실험방법 및 실험장치

#### 3.1 실험방법

본 실험에 사용된 공구는 Table 1과 Fig. 2에서와 같이 초경 공구를 4 종류의 수직 경사각을 갖도록 제작하여 날부위를 TiAlN 코팅하였다. 피삭재는 금형재료로 많이 쓰이는 냉간 금형용 합금강인 SKD11로 탄소(C)와 크롬(Cr)이 많아 내마모성이 크며 부식에 강하다. 그리고 SKD11을 120 mm의 길이에 지름 40 mm, 두께 5 mm의 관 형태로 제작한 후에 열처리하여 로크웰 C스케일로 45가 되게 하였다.

Table 1 Cutting Tools with 4 Normal Rake Angles

Rake Angle	Cutting Edge Length	Length	Total Length
Positive	10° 5°	10mm	70mm
Zero	0°		
Negative	-5°		

피삭재는 Fig. 3과 같이 선반 주축에 장착하고 공구동력계는 선반의 왕복대에 설치하여 공구를 장착할 수 있게하였다. 절삭깊이와 절삭속도 그리고 수직경사각에 따른 절삭성을 평가하기 위하여 Table 2와 같은 실험조건으로 절삭실험을 수행하였다.

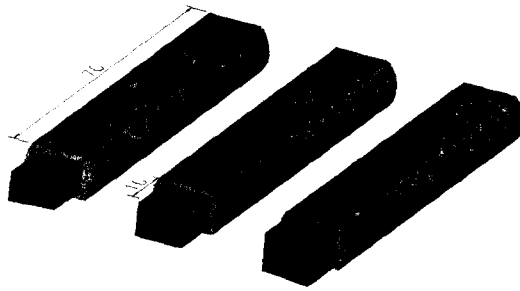


Fig. 2 TiAlN Coated WC Cutting Tool

Table 2 Experimental Conditions

Rake Angle ( ° )	-5, 0, 5, 10
Depth of Cut ( mm )	0.06, 0.09, 0.12, 0.15
Cutting Speed rpm, ( m/min )	85 ( 9.346 )
	160 ( 17.593 )
	240 ( 26.389 )
	440 ( 48.381 )

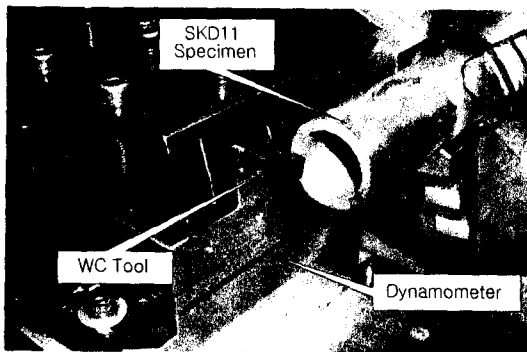


Fig. 3 Experimental Setup

### 3.2 실험장치

본 실험에는 화천기계의 HL-380 선반에서 공구동력계(Kistler, 9257B)를 설치하여 절삭저항을 측정하였다. 공구동력계에서 얻어진 신호는 공구동력계 앰프(Kistler, 5011B)를 사용하여 증폭되었고 이러한 신호는 오실로스코프(LeCroy, 9314A) 및 PC의 A/D보드를 이용하여 관찰되거나 디지털화되어 저장되었다. Fig. 4는 이러한 측정 시스템을 나타내고 있다.

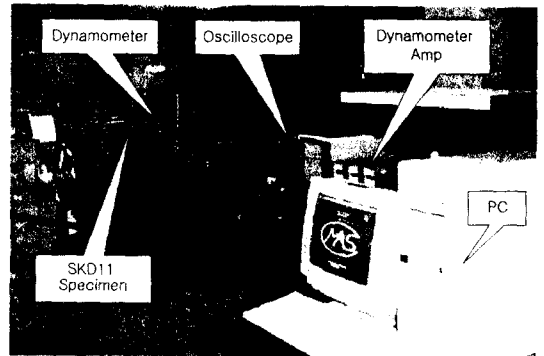


Fig. 4 Experimental System

### 4. 실험결과 및 고찰

절삭비는 재료의 성질뿐만 아니라 절삭속도 및 공구의 수직 경사각에 따라 변하므로 실험을 통해 얻어진 칩의 두께를 측정하므로써 얻어질 수 있다. 본 실험에서는 가공 중 생성된 칩을 수집하고 마이크로미터를 사용하여 수회에 걸쳐 칩 두께를 측정한 후 데이터를 평균하여 절삭비를 구하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 수직 경사각이 둔각인  $-5^\circ$  와 예각인  $+5^\circ$  일 때 이송속도와 절삭속도에 따른 절삭비를 보여주고 있다. 절삭비는 이송속도와 절삭속도가 커질수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 여기서 이송속도와 절삭속도가 작을 때 데이터 값이 불균일한 경향이 보이는데 절삭속도가 작으면 불연속 칩이 생성되므로 실제로 칩의 두께는 일정하지 않아 생기는 원인에 기인한다.

Fig. 7과 Fig. 8은 절삭속도가 26.389(m/min) 와 48.381(m/min)일 때 수직 경사각과 이송속도에 따른 절삭비를 보여주고 있다. 여기서 이송속도가 증가함에 따라 절삭비가 상당히 증가하는 경향은 Fig. 5와 Fig. 6과 같으나 수직 경사각의 변화에는 영향이 작은 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 이송속도 0.15 mm/rev과 절삭속도 17.593 m/min에서 수직 경사각의 변화에 따른 칩의 모양을 나타내고 있다. 수직 경사각이  $-5^\circ$  일 때는 칩의 모양이 단속적으로 생성되나 수직 경사각이 증가하면서 연속형으로 되어 길게 이어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 수직 경사각이 둔각일 때는 전단각이 작아서 칩이 짧게 끊어지는 것으로 생각된다.

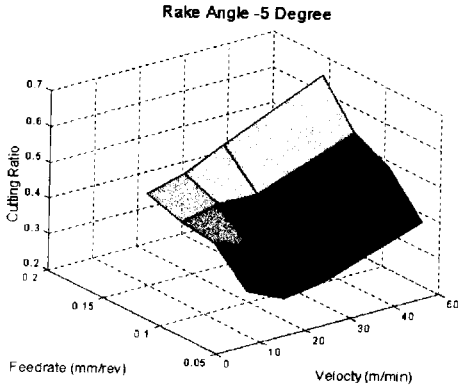


Fig. 5 Cutting Ratio by Feedrate and Cutting Speed with  $-5^\circ$  Cutting Tool

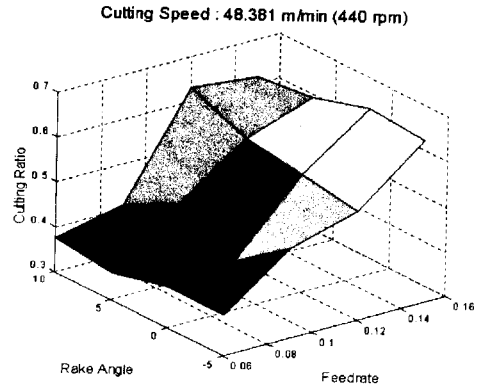


Fig. 8 Cutting Ratio by Feedrate and Rake Angle with Cutting Speed 48.381 m/min

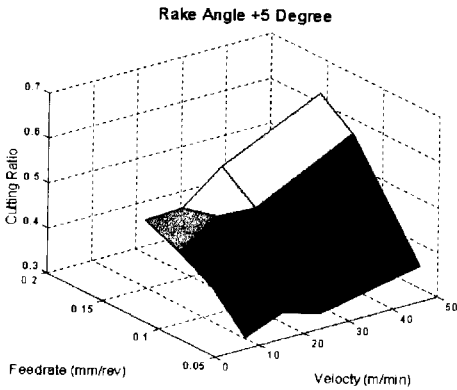


Fig. 6 Cutting Ratio by Feedrate and Cutting Speed with  $+5^\circ$  Cutting Tool

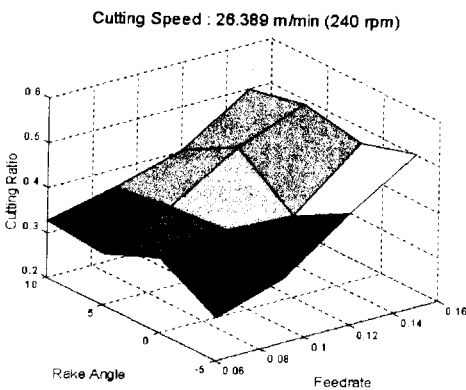


Fig. 7 Cutting Ratio by Feedrate and Rake Angle with Cutting Speed 26.389 m/min

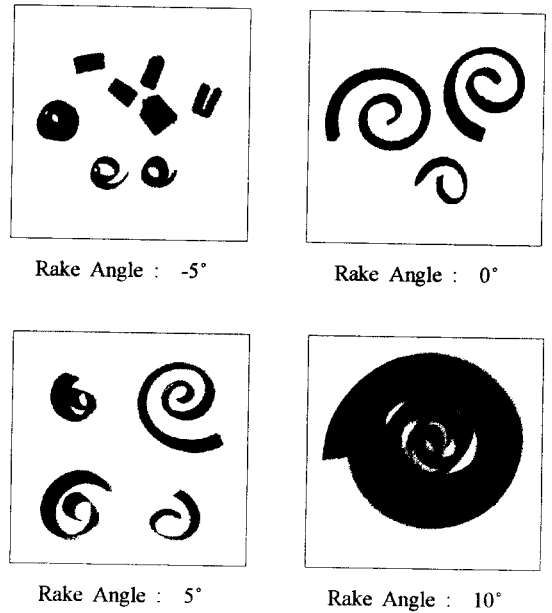


Fig. 9 Chip Configuration of Feedrate ( 0.15 mm/rev ), Cutting Speed ( 17.593 m/min )

절삭비는 전단각에 의해 정해지는데 전단각이 증가하면 칩의 두께는 작아지고 이에 따라 절삭비도 증가하게 된다. 식 (3)에서 수직 경사각이 증가하면 전단각이 증가함을 알 수 있으나 절삭속도나 이송속도에 의한 영향은 실험에 의한 결과로 Fig. 10 와 Fig. 11에서 나타나고 있다. Fig. 10은 절삭속도가 48.381 m/min 일 때 수직 경사

각과 이송속도의 변화에 따른 전단각의 변화를 나타내고 있으며, Fig. 11은 수직 경사각이 0° 일 때 이송속도와 절삭속도의 변화에 따른 전단각의 형태를 보여주고 있다. Fig. 10에서 전단각은 이송속도의 수직 경사각에 대해 확연히 증가하고 있는 것을 볼 수 있으며 이송속도에 대해서도 완만히 증가하고 있다. Fig. 11에서는 동일한 이송속도에 대해서 절삭속도가 빨라지면 전단각이 증가함을 볼 수 있다.

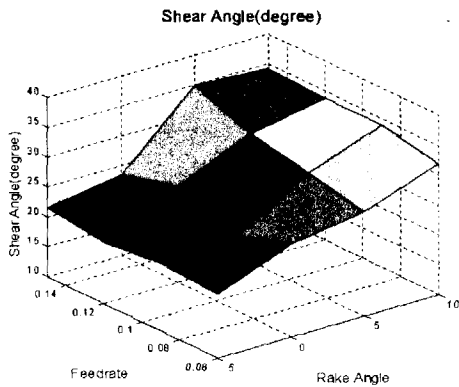


Fig. 10 Shear Angle at Cutting Speed 48.381 m/min

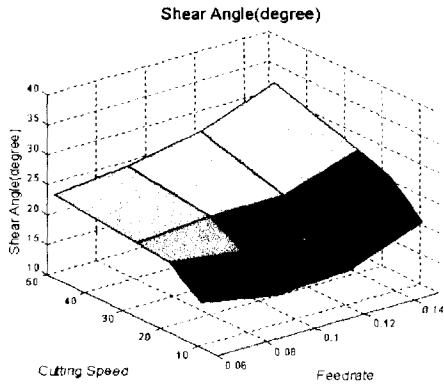


Fig. 11 Shear Angle at Rake Angle 0°

Fig. 10과 Fig. 11의 결과로 전단각은 수직 경사각, 절삭속도, 이송속도의 순서대로 영향을 받는 것을 알았다.

전단응력은 Fig. 12에서 보여지는 것과 같이 절삭속도와 이송속도가 증가할수록 낮아지는 것을 볼 수 있는데 이것은 이송속도가 낮으면 절삭

날에 많은 면적이 닿을 때와 달리 피삭재의 좁은 영역에서 상대적으로 많은 변형이 일어나게 되는 원인에 기인한다.

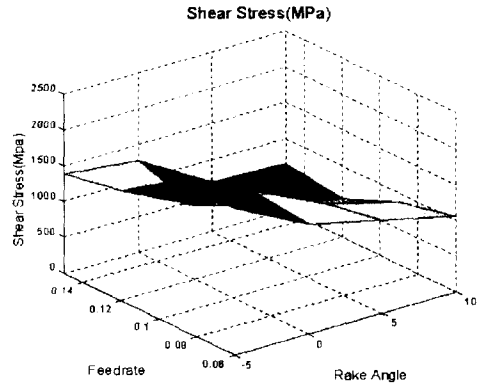


Fig. 12 Shear Stress at 48.381m/min Cutting Speed

마찰각은 Fig. 1에서와 같이 절삭공구의 경사면에 걸리는 수평력과 수직력의 합력의 방향을 나타내며 식 (4)에서 정의되었다. Fig. 13은 이송속도가 0.09mm/rev 일 때 절삭속도와 수직 경사각에 따른 마찰각의 변화를 나타내고 있다.

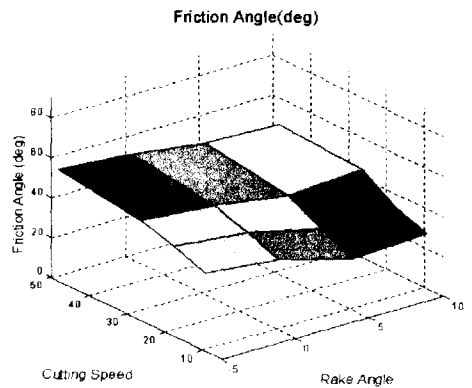


Fig. 13 Friction Angle at Feederate 0.09 mm/rev

절삭력은 주절삭 방향과 횡방향 절삭력으로 나눌 수 있는데 절삭력은 재료가 가진 물리적 성질뿐만 아니라 절삭조건에 많이 좌우되는 인자이다. Fig. 14와 Fig. 15에서 절삭력은 수직 경사각이 증가함에 따라 절삭력은 높아진다. 그러나 일

반적인 직교 2차원 절삭식에서는 이와 반대 현상으로 식들이 표현된다. 실제로 이송속도가 증가하면 단위 절삭 회전당 예상되는 절삭력은 많이 걸려야 하나 이와는 반대 현상이 나타나고 있다. 이것은 이송속도의 증가는 전단각이 증가하여 절삭비의 증가를 야기시켜서 결국 절삭저항이 작아지는 것을 볼 수 있다.

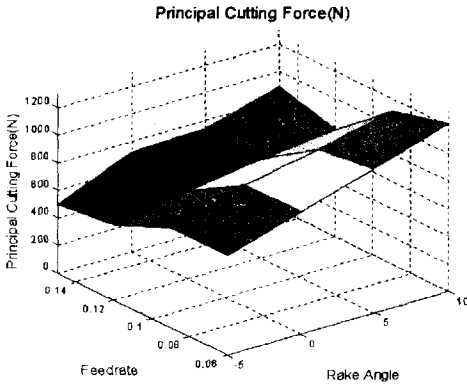


Fig. 14 Principal Cutting Force at Cutting Speed 48.381m/min

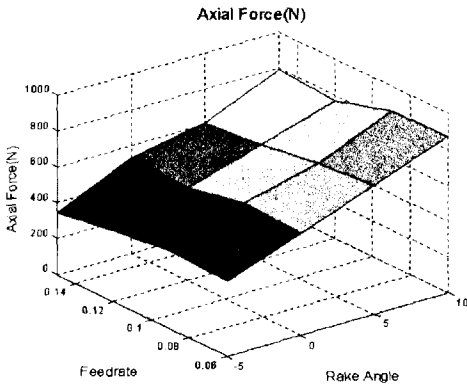


Fig. 15 Axial Cutting Force at Cutting Speed 48.381m/min

## 5. 결론

고강도 금형재료인 SKD11의 절삭성을 평가하기 위하여 다양한 절삭조건 하에서 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 절삭실험을 통해 얻어진 칩의 두께를 조사하

여 절삭조건에 따른 절삭비를 구하였다.

(2) 전단각과 절삭비, 절삭속도, 이송속도 사이의 관계를 규명하였다.

(3) 전단응력은 절삭속도와 이송속도가 증가할수록 낮아지는 것을 보였다.

(4) 마찰각을 절삭속도와 수직 경사각에 따른 변화에 대해 나타내었다.

## 참고문헌

(1) J. Tlustý, 1992, "High Speed Machining", *Annals of the CIRP*, vol.41.2, pp 733-738.

(2) Herbert Schulz, 1992, "High Speed Machining", *Annals of the CIRP*, vol.41.2, pp 637-643.

(3) 손창수, 강명창, 김정석, 이득우, 황경현, 김종관, 1997, "불 엔드밀을 이용한 난삭재의 고속가공 특성", 정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 139-142.

(4) 최상우, 이기우, 이원화, 이세균, 강추욱, 이종찬, 1997, "STD-11의 경도변화에 따른 CBN불 엔드밀의 절삭특성", 정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1078-1082.

(5) E. Shamoto, Y. Altintas, 1997, "Prediction of shear angle in oblique cutting with maximum shear stress and minimum energy principles", *MED-Vol. 6-1, Manufacturing Science and Technology*, vol. 1, ASME 1997.