

<論 文>

二次元 切削時 칩-工具 마찰상태에 따른 剪斷角 변화

이 영 문* · 송 지 복**

(1987년 11월 4일 접수)

Shear Angle Variation Depending on Chip-Tool Friction in Orthogonal Cutting

Y. M. Lee and G. B. Song

Key Words : Shear Angle(剪斷角), Friction Angle(摩擦角), Chip-Tool Contact Length(칩-工具 接觸길이), Internal Shear(內部剪斷), External Friction(外部摩擦)

Abstract

Through the careful interpretation of the results of the cutting tests carried out in this study, it is found that under the cutting conditions when the internal shear of the chips take place the cutting can be treated essentially as a steady state problem. A new shear angle equation has been developed employing the conditions of force and moment equilibrium about the tool edge and the stress distribution model suggested by Zorev. The equation contains the chip-tool contact length C and stress distribution index n as important parameters.

1. 序 論

二次元 切削의 剪斷角 예측에 對한 初期의 연구에서는 칩과 工具傾斜面사이의 마찰계수가 일정하다는 전제하에 마찰상태를 하나의 마찰각으로 나타내고, 切削力의 平衡條件下에서 摩擦角과 剪斷角사이의 解析的인 관계를 求하는데 초점을 두었다(1~3).

그러나 공구경사면에 작용하는 垂直 및 마찰應力의 크기 및 분포에 대한 실험적 연구결과에 의하면 칩과 공구경사면 사이의 마찰상태는 이들 初期 연구에서 假定한 바와 같이 단순하지 않으며, 대부분

의 實用 切削條件下에서는 칩-공구경사면 접촉부의 일부에서 칩의 內部剪斷이 일어나며 마찰계수는 垂直應력에 크게 의존한다는 사실이 밝혀진 바 있다(4~7).

따라서 보다 實際에 가까운 剪斷角의 예측을 위해서는 切削條件등에 따라 변하는 마찰상태의 영향이 전단각 解에 충실하게 반영될 것이 요구된다.

本 研究에서는 鋼의 2차원 절삭실험을 행하고 칩의 두께측정으로부터 구한 전단각 값과 既存의 전단각 解에 의한 전단각 값의 비교를 통하여 이들 전단각 解의 한계성을 고찰하였으며, Zorev⁽⁶⁾에 의해 제안된 전단과정과 마찰과정의 상호 의존성에 입각한 靜力學的인 平衡條件과 공구경사면에 작용하는 應力分布의 假定下에서 전단각 ϕ 의 새로운 解를 유도하고 이의 實現性を 검토하였다.

*정회원, 경북대학교 공과대학 기계공학과

**정회원, 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과

Table 1 Cutting test conditions

Cutting speed	: 15.75	30.44	37.38	44.06	65.42	74.76	88.12	108.14	130.84	186.92	216.92	m/min
Feed rate	: 0.061	0.079	0.099	0.122	0.159	0.176	mm/rev					
Width of cut	: 2.00mm(const.)											
Rake angle	: 0 deg.											
Cutting fluid	: none											

2. 切削實驗

2.1 被削材 및 切削條件

切削은 切削狀態를 2차원 절삭에 접근시키기 위하여 旋盤에서 管端面 切削을 행하였다. 被削材로

는 壓力配管用 炭素鋼管(KS, SPPS 38)을 사용하였으며, 均질화를 위하여 管의 內, 外皮를 각각 1.5mm 깎아내어 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 형상과 치수의 試片을 준비하였다.

切削條件은 Table 1에 나타내었다.

2.2 實驗結果 및 考察

(1) 實驗結果

Fig. 2는 各 절삭조건에서 生成된 칩의 두께측정으로부터 구한 전단각 ϕ 를 나타낸 것으로, ϕ 값은 低 절삭속도 영역을 제외하고는 移送 및 절삭속도가 커짐에 따라 완만하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 한편 Table 2는 各 절삭조건에서 측정된 切削二分力(F_r, F_q), 전단각 ϕ 및 칩-공구 접촉길이 C 와 이들값을 이용하여 계산한 마찰각 β , 평균마찰계수 μ , 전단변형률 γ 및 피삭재의 剪斷流動應力 τ_1 을 나타내고 있다.

(2) 工具傾斜면의 摩擦狀態

各 절삭조건에 대한 공구경사면의 마찰상태를 조사하기 위하여, 每 절삭시 새로운 공구로 절삭하였으며, 공구경사면의 관찰 및 칩-공구접촉길이의 측

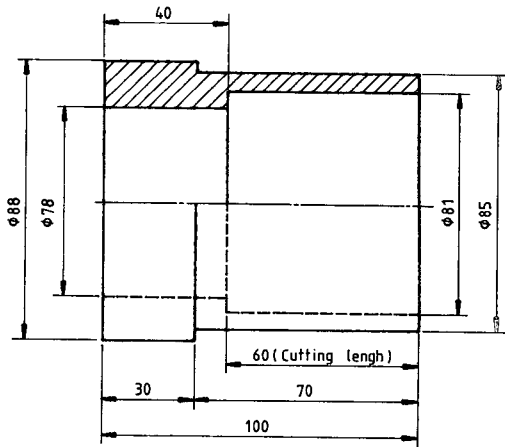


Fig. 1 Dimensions of workpiece

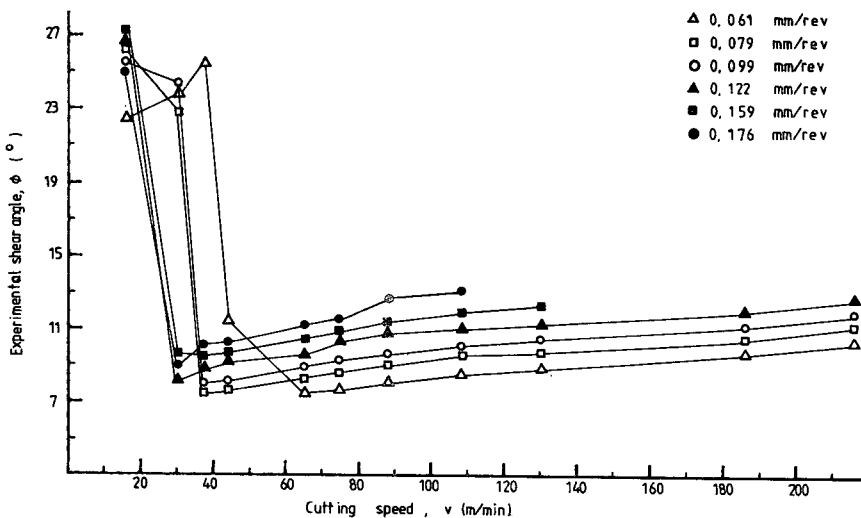


Fig. 2 Experimental shear angle (ϕ) vs. cutting speed (v) for various feed rates (f)

Table 2 Metal cutting data(steel) work material : SPPS 38, rake angle(α) : Odeg
width of cut : 2mm, cutting fluid : none

f mm/rev	V m/min	F_P kgf	F_Q kgf	ϕ deg	β deg	C mm	μ	γ	τ_1 kgf/mm ²
*0.061	15.75	34.73	17.64	22.53	26.92	0.845	0.507	2.824	79.53
*0.061	30.44	30.00	15.69	24.00	27.60	0.756	0.523	2.691	70.09
*0.061	37.38	28.42	15.69	25.48	28.90	0.695	0.552	2.574	66.66
*0.061	44.06	34.74	21.57	11.53	31.83	0.710	0.620	5.105	48.70
*0.061	65.42	44.21	39.21	7.65	41.56	0.720	0.886	7.576	42.12
0.061	74.76	43.42	39.21	7.78	42.08	0.720	0.903	7.448	41.88
0.061	88.12	41.84	35.29	8.16	40.14	0.680	0.843	7.110	42.39
0.061	108.14	41.05	35.29	8.60	40.68	0.660	0.859	6.757	43.31
0.061	130.84	41.05	37.25	9.53	42.22	0.630	0.907	6.406	44.89
0.061	186.92	39.47	37.25	10.66	43.34	0.620	0.943	5.975	45.33
0.061	216.92	38.68	37.25	10.85	43.92	0.610	0.963	5.642	46.27
*0.079	15.75	37.89	19.60	26.56	27.35	0.940	0.517	2.500	71.11
*0.079	30.44	44.21	27.45	22.79	31.83	0.960	0.620	2.799	73.85
*0.079	37.88	64.73	58.82	7.67	42.26	1.150	0.908	7.552	47.59
*0.079	44.06	63.15	56.86	7.66	41.99	1.040	0.900	7.564	46.43
0.079	65.42	56.84	52.94	8.30	42.96	0.880	0.931	6.994	44.44
0.079	74.76	56.05	50.98	8.63	42.28	0.850	0.909	6.734	45.39
0.079	88.12	55.26	49.01	9.10	41.26	0.790	0.886	6.400	46.87
0.079	108.14	53.68	47.05	9.64	41.23	0.760	0.876	6.055	47.74
0.079	130.84	53.68	47.05	10.06	41.23	0.735	0.876	5.969	48.30
0.079	186.92	53.68	47.05	10.33	41.23	0.720	0.876	5.638	50.57
0.079	216.92	53.68	47.05	10.55	47.23	0.700	0.876	5.263	53.59
*0.099	15.75	47.36	25.49	25.55	28.28	1.170	0.538	2.569	69.13
*0.099	30.44	64.73	52.94	24.22	39.27	1.260	0.817	2.672	77.31
*0.099	37.38	74.21	66.66	7.77	41.93	1.310	0.898	7.459	44.07
0.099	44.06	72.63	64.70	8.16	41.69	1.145	0.890	7.113	44.97
0.099	65.42	66.31	58.82	8.93	41.57	1.050	0.887	6.520	44.19
0.099	74.76	64.73	56.86	9.32	41.29	0.980	0.878	6.255	44.73
0.099	88.12	64.73	56.86	10.52	41.29	0.965	0.878	6.048	45.97
0.099	108.14	63.15	56.86	11.46	41.99	0.940	0.900	5.823	46.03
0.099	130.84	61.57	54.90	10.11	41.72	0.920	0.891	5.530	46.84
0.099	186.92	61.57	54.90	10.92	41.72	0.895	0.891	5.238	48.85
0.099	216.92	58.42	52.94	12.73	42.18	0.860	0.906	4.948	48.42
*0.122	15.75	50.52	27.45	26.94	28.63	0.398	0.546	2.475	60.12
*0.122	30.44	94.73	82.35	8.20	41.00	1.310	0.869	7.078	47.97
0.122	37.38	82.10	72.54	8.91	41.46	1.265	0.883	6.533	44.36
0.122	44.06	77.36	66.66	9.33	40.75	1.182	0.861	6.249	43.56
0.122	65.42	72.63	62.74	9.60	40.82	1.140	0.863	6.079	41.80
0.122	74.76	72.63	62.74	10.14	40.82	1.090	0.863	5.769	43.62

0.122	88.12	72.63	62.74	10.80	40.82	1.060	0.863	5.428	45.78
0.122	108.14	71.05	62.74	11.13	41.44	1.050	0.883	5.278	45.57
0.122	130.84	71.05	62.74	11.40	41.44	0.020	0.883	5.160	45.37
0.122	186.92	71.05	62.74	11.32	41.44	1.000	0.883	4.909	48.15
0.122	216.92	69.47	60.78	12.82	41.18	9.780	0.874	4.621	49.34
*0.159	15.75	66.32	29.40	27.00	23.90	1.500	0.443	2.471	65.30
*0.159	30.44	104.21	90.19	9.32	40.87	1.532	0.865	6.252	44.95
0.159	37.38	90.94	77.64	9.72	40.48	1.450	0.853	6.007	40.63
0.159	44.06	90.94	74.11	9.82	39.17	1.380	0.814	5.949	41.30
0.159	65.42	85.25	70.58	10.81	39.62	1.310	0.827	5.551	40.84
0.159	74.76	85.25	70.58	11.72	39.62	1.280	0.827	5.332	42.16
0.159	88.12	85.25	70.58	12.83	39.62	1.255	0.827	5.097	43.69
0.159	108.14	83.83	70.58	13.17	40.09	1.225	0.841	4.916	44.01
0.159	130.84	81.54	69.05	13.93	40.25	1.025	0.846	4.767	43.77
0.159	186.92	—	—	13.16	—	1.185	—	—	—
0.159	216.92	—	—	—	—	—	—	—	—
*0.176	15.75	71.05	33.33	25.20	25.13	1.595	0.469	2.595	60.59
*0.176	30.44	120.00	100.00	9.23	39.80	1.660	0.883	6.299	46.76
0.176	37.38	110.52	88.23	9.96	38.60	1.495	0.798	5.857	46.05
0.176	44.06	104.21	84.31	10.99	38.94	1.400	0.808	5.341	46.71
0.176	65.42	98.63	81.31	11.23	39.50	1.380	0.824	5.243	44.70
0.176	74.76	97.89	81.31	11.44	39.71	1.360	0.830	5.074	45.45
0.176	88.12	96.20	80.05	11.57	39.76	1.340	0.832	4.625	47.90
0.176	104.14	94.73	80.05	11.94	40.19	1.320	0.845	4.496	47.98
0.176	130.84	—	—	12.39	—	1.300	—	—	—
0.176	186.92	—	—	—	—	1.255	—	—	—
0.176	216.92	—	—	—	—	—	—	—	—

정은 공구현미경에 의했다.

Fig. 3은 移送이 0.061mm/rev인 절삭조건中 후술하는 3가지 절삭속도에 대한 공구경사면의 SEM 사진으로 각 조건에서의 마찰상태를 보이고 있다. (a)는 주어진 이송에서 최소의 절삭력을 나타낸 절삭속도 $V=37.38\text{m/min}$ 의 경우에 대한 것으로 칩이 附着된 흔적이 매우 微微함을 알 수 있다. 이는 칩-공구사이의 최대마찰응력이 칩의 内部剪斷流動應力 τ_2 보다 작아 칩과 공구사이에서 상대적인 마찰이 있었음을 나타낸다. (b)는 절삭력이 가장 큰 절삭속도 $V=65.42\text{m/min}$ 의 경우로, 附着層(built up layer)⁽⁹⁾의 발달이 甚함을 알 수 있다. 부착층은 마찰응력이 부분적으로 칩의 내부전단유동응력 τ_2 보다 커서 전단파괴된 칩의 일부가 공구경사면에 부착되어 발생된다고 판단된다. (c)는 절삭속도가

가장 큰 $V=216.92\text{m/min}$ 의 경우로서 절삭후 内部剪斷區域에 부착된 칩을 제거할 때 칩과 부착된 부분의 공구경사면이 파괴되어 떨어져나간 상태를 보이고 있다. Fig. 4는 칩이 부착된 工具의 切斷面 현미경사진으로, 부착된 칩에 의해 공구경사면의 일부가 파괴된 상태를 보이고 있다. 이와같은 형식의 공구파괴는 Lee등⁽⁹⁾에 의해 분류된 Type 2의 공구파괴에 해당된다.

현미경관찰결과 各 移送下에서 최대절삭력을 나타내는 절삭속도보다 절삭속도가 큰 경우, 절삭속도가 증가함에 따라 부착층은 점차 소멸하였으며 内部剪斷區域과 外部摩擦區域의 경계도 뚜렷해지며, 칩-공구접촉길이 c 가 짧아지는 경향을 나타내었다.

본 연구에서는 내부전단구역과 외부마찰구역이

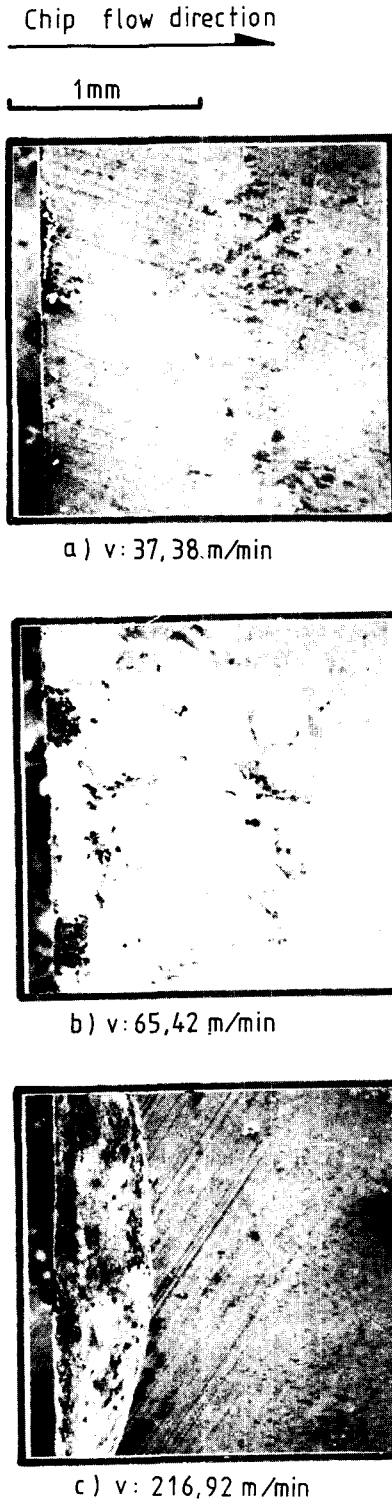


Fig. 3 SEM photographs of tool rake face ($f: 0.061$ mm/rev) 'd' marks denote cutting edges

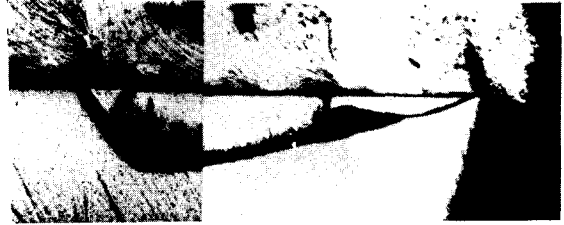


Fig. 4 Photomicrograph of cross section in a plane perpendicular to the cutting edge showing fractured portion of the rake face of the tool

뚜렷하게 구별되는 단계의 절삭을 '내부전단 단계의 절삭'으로 규정하였으며, Table 2에서 '*'표시의 절삭조건을 除外한 절삭조건에서의 절삭이 내부전단 단계의 절삭임을 확인 할 수 있었다.

3. 代表的인 剪斷角 解와 實驗結果에 의한 比較

3.1 代表的인 전단각 解

1940年代初부터 最近에 이르기까지 전단각에 대한 많은 數의 解析的인 解가 소개된 바 있다⁽¹⁰⁾. 이들中 後述하는 代表的인 解에 대해 검토하기로 한다.

Ernst 등⁽¹¹⁾은 전단은 최대전단응력 방향으로 일어난다는 假定下에 전단각 ϕ 의 解를 式(1)과 같이 구하였다.

$$\phi = 45^\circ - \frac{\beta}{2} + \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

式(1)을 유도함에 있어 切削合力 R 과 마찰각 β 는 전단각 ϕ 와는 독립적으로 변하는 값으로 가정하였다. Merchant⁽¹²⁾는 피삭재의 전단유동응력 τ_1 과 마찰각 β 는 전단각 ϕ 와 무관하게 결정되며, 전단은 切削動力이 最小로 되는 방향으로 일어난다는 가정하에 전단각 ϕ 의 解를 구한결과 式(1)과 동일한 解를 얻었다.

Lee 등⁽¹³⁾은 피삭재는 變形率硬化하지 않는 理想的인 塑性體와 같이 舉動하고 전단은 최대전단응력 방향으로 일어난다는 假定下에 전단방향과 45° 를 이루는 방향을 主應力方向으로 하는 均一應力미끄럼線場을 설정하고 전단각 ϕ 의 解를 式(2)와 같이 구하였다.

$$\phi = 45^\circ - \beta + \alpha \quad (2)$$

이들 解[式(1), 式(2)]는 次元解析的인 觀點에서 전단각 ϕ 를 마찰각 β 및 경사각 α 만의 함수로 나

타내고 있으며, 주어진 모든 절삭조건에 영향을 마찰각 β 의 변화만으로 나타내는 한계성을 지니고 있다.

Rowe등⁽¹¹⁾은 칩과 공구경사면 사이의 평균 마찰계수 μ 대신에 이들사이의 평균마찰응력 τ 와 피삭재의 전단유동응력 τ_1 의 비 λ 를 도입하고, 최소에너지 이론에 입각하여 變形率硬化 하지 않는 理想的인 塑性體에 대한 전단각 解를 式(3)과 같이 求하였다.

$$\cos \alpha \cdot \cos(2\phi - \alpha) - \lambda \frac{C}{t_1} \sin^2 \phi = 0 \quad (3)$$

式(3)에서 전단각 ϕ 는 λ , 절삭깊이 t_1 , 칩-공구 접촉길이 C 및 경사각 α 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

한편 Desai등⁽¹²⁾은 Rowe등⁽¹¹⁾에 의해 적용된 최소에너지이론과 절삭력의 평형조건을 동시에 만족시키는 解를 구한 결과 Merchant의 解(式(1))와 동일하다는 것을 밝힌 바 있다.

3.2 實驗結果에 의한 剪斷角 解의 比較

Fig. 5는 內部剪斷段階의 절삭조건에서 생성된 칩의 두께측정으로부터 구한 전단각(점선)과 절삭 실험결과를 式(1), (2) 및 (3)에 代入하여 구한 전단각을 移送別로 절삭속도에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이들 전단각 解에 의한 전단각은 실제의 전단각과 큰 차이를 보이고 있다. 이는 근본적으로 이들 解를 구하기 위해 設定된 理想的인 절삭모델과 假定에 의해서는, 여러

가지 절삭변수의 상호의존적인 작용에 의해 결정되는 전단현상을 정확하게 예측할 수 없음을 나타내는 것이라 판단된다.

최소 에너지이론에 입각한 Merchant⁽²⁾ 및 Rowe등⁽¹¹⁾의 解에 의한 전단각은 실제의 전단각보다 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 이는 이들 解가 切削過程이 保存系에서 이루어 진다는 전제하에 求해진 것으로, 전단각의 上界值를 나타내기 때문으로 사료된다. 그러나 Rowe등⁽¹¹⁾의 解에 의한 전단각은 Merchant⁽²⁾의 解에 의한 값보다 작은 값을 나타내며, 절삭조건에 따라 실제의 값과 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 Rowe등⁽¹¹⁾의 解의 경우, 절삭깊이 t_1 및 절삭속도 v 와 뚜렷한 상관관계를 가지고 변하는 칩-공구접촉길이 c 를 품고 있어 절삭조건에 따른 영향을 보다 잘 반영하기 때문이라 판단된다.

Lee등⁽³⁾의 解에 의한 전단각은 Merchant⁽²⁾의 解에 의한 경우와 마찬가지로 절삭조건에 따라 뚜렷한 경향을 보이지 않고 있으며, 실제의 값보다 상당히 작은 값을 나타내고 있다. 이는 解를 구하기 위하여 설정된 미끄럼線場의 단순성과 境界條件의 非現實性에 기인하는 것으로 사료된다.

4. Zorev의 전단각 解 및 修正 解

4.1 Zorev의 전단각 解

Zorev⁽⁸⁾는 鋼의 2차원 절삭실험을 통하여 칩과 공구경사면사이에 外部摩擦만이 일어나는 경우와

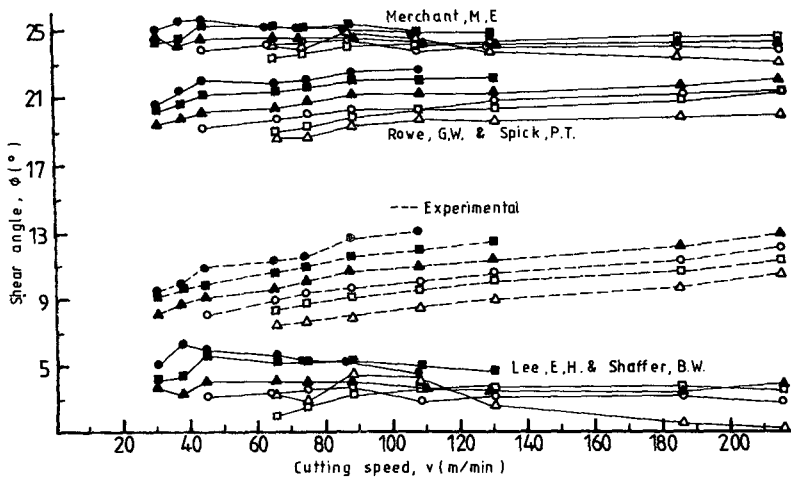


Fig. 5 Variations of shear angle obtained from the various analyses and experiments [SPSS 38]

칩의 内部剪斷과 외부마찰이 함께 일어나는 경우가 있음을 보이고, 後者의 경우 평균마찰계수가 평균 수직응력의 크기에 따라 단조롭게 변하는 실험결과와 Kattwinkel⁽¹³⁾의 광탄성 절삭실험결과를 근거로 공구경사면에 작용하는 수직 및 마찰응력의 분포모

$$\ln\left\{1 - \frac{\frac{2\tau_1}{C^n} - \mu \cos 2(\phi - \alpha) - \frac{1}{2}(1 - \mu^2) \sin 2(\phi - \alpha)}{2\mu \cos 2(\phi - \alpha) + (1 - \mu^2) \sin 2(\phi - \alpha) - \frac{2\tau_1}{C^n}} \cdot \left(\frac{\mu \tau_1}{C^n \cdot \tau_2} - 1\right)\right\}$$

$$= \frac{\frac{2\tau_1}{C^n} - \mu \cos 2(\phi - \alpha) - \frac{1}{2}(1 - \mu^2) \sin 2(\phi - \alpha)}{2\mu \cos 2(\phi - \alpha) + (1 - \mu^2) \sin 2(\phi - \alpha) - \frac{2\tau_1}{C^n}} \cdot \ln \frac{\frac{\tau_1}{C^n} \cdot \tau_2}{\mu \epsilon \cdot \tau_1} \quad (4)$$

式(4)는 매우 복잡한 형태를 취하고 있으며, 이에 의해 摩擦過程이 剪斷過程에 미치는 영향을 직접적으로 설명하기는 거의 不可能함을 알 수 있다.

4.2 修正解

Zorev 解(式(4))에 대한 修正解를 유도함에 있어 응력분포모델(Fig. 6) 및 平衡條件에 대한 假定을 도입하였으며, 靜力學的 解析은 Fig. 7에 나타낸 2차원절삭모델에 대해 행하였다.

修正解의 유도과정의 상당부분이 Zorev 解의 유도과정과 중복되나, 연속성은 갖도록 유도全過程을 기술키로 한다.

Fig. 6에서와 같이 공구경사면에 작용하는 수직 응력 σ 를

$$\sigma = kx^n \quad (5)$$

으로 나타내기로 한다. k 는 상수이고 n 은 수직응

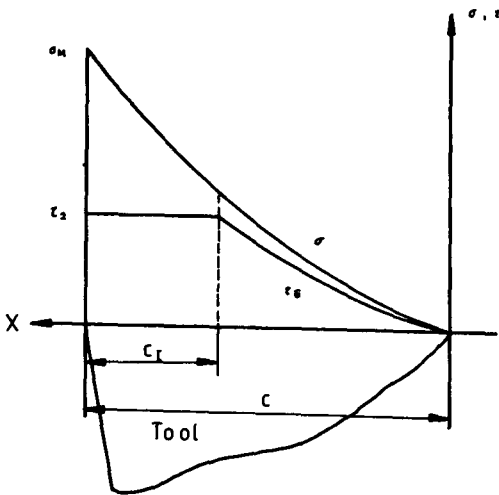


Fig. 6 Zorev's stress distribution model

델을 Fig. 6과 같이 제안하였다. 또한 전단은 절삭력의 평형조건 뿐만 아니라 모멘트 평형조건을 만족시키는 방향으로 일어난다는 가정하에 전단각에 대한 解를 式(4)와 같이 구하였다.

력분포 指數이다.

따라서 공구경사면에 작용하는 수직력 N 은

$$N = \int_0^c b k x^n dx = b k \frac{c^{n+1}}{n+1} \quad (6)$$

이다. b 는 切削幅을 나타낸다.

공구경사면에 작용하는 마찰응력은 그림과 같이 두 영역에 대한 것으로 나누어 생각할 수 있다.

外部摩擦域 ($0 \leq x \leq c - c_1$)에서의 마찰응력 τ_E 는

$$\tau_E = \mu \epsilon \sigma \quad (7)$$

이다. $\mu \epsilon$ 는 외부마찰계수로 일정한 값으로 가정한다. 式(5) 및 (7)로 부터

$$\tau_E = k \mu \epsilon x^n \quad (8)$$

이다. 한편 内部剪斷域 ($c - c_1 \leq x \leq c$)에서의 칩의 전단유동응력 τ_2 는

$$\tau_2 = k \mu \epsilon (c - c_1)^n \quad (9)$$

으로 나타낼 수 있다. 따라서 공구경사면에 작용하는 쏠마찰력 F 는 외부마찰에서의 마찰력 F_E 와 내부전단역에서의 전단력 F_I 의 합으로 나타낼 수 있다.

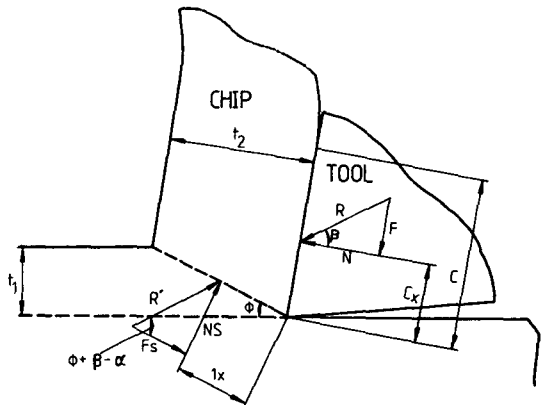


Fig. 7 Forces and moments diagram

$$F = F_E + F_I = bk\mu_E(c - c_I)^n \left(\frac{c + nc_I}{n+1} \right) \quad (10)$$

따라서 공구경사면의 평균마찰계수 μ 는 式(6) 및 (10)으로부터

$$\mu = \frac{F}{N} = \mu_E \left(1 - \frac{c_I}{c} \right)^n \left(1 + \frac{nc_I}{c} \right) \quad (11)$$

가 된다. 내부전단길이 c_I 가 0이면 평균마찰계수 μ 와 외부마찰계수 μ_E 는 같아짐을 알 수 있다.

(1) 切削力の 平衡條件

Fig. 7에 나타낸 바와 같이 절삭력의 평형조건을 만족시키기 위해서는

$$R = R' \quad (12)$$

이어야 한다. 切削合力 R 은

$$R = \frac{N}{\cos \beta} = \frac{bkcn^{n+1}}{(n+1)\cos \beta} \quad (13)$$

이고, R 에 대한 反力 R' 은

$$R' = \frac{F_s}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} = \frac{t_1 b}{\sin \phi} \cdot \frac{\tau_1}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (14)$$

이다. 式(12), (13) 및 (14)로부터

$$\frac{kc^{n+1}}{t_1 \tau_1 (n+1)} = \frac{\cos \beta}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (15-a)$$

의 관계가 얻어진다.

(2) 모멘트 평형조건

전단면에 작용하는 수직응력의 크기가 전단면에 걸쳐 일정하다고 가정하면, 工具刃先에 대한 切削力에 의한 모멘트 평형조건을 만족시키기 위해서는

$$NC_x = N_s l_x \quad (16)$$

의 관계가 성립하여야 한다.

Fig. 6의 응력분포로부터 공구경사면에 작용하는 垂直合力 N 의 작용점으로부터 工具刃先까지 거리 c_x 는

$$c_x = \frac{c}{n+2} \quad (17)$$

이다. 한편 전단면에 작용하는 수직력 N_s 는

$$N_s = F_s \tan(\phi + \beta - \alpha) = \frac{t_1 b \tau_1}{\sin \phi} \cdot \tan(\phi + \beta - \alpha) \quad (18)$$

이며, 前述한 假定에 의해 전단면상의 작용점으로부터 工具刃先까지 거리 l_x 는

$$l_x = \frac{t_1}{2 \sin \phi} \quad (19)$$

이다. 式(16), (6), (17), (18) 및 (19)로부터

$$\frac{2kc^{n+2}}{t_1^2 \tau_1 (n+1)(n+2)} = \frac{\tan(\phi + \beta - \alpha)}{\sin^2 \phi} \quad (20)$$

의 관계가 얻어진다.

절삭력의 평형조건과 모멘트 평형조건을 동시에 만족시키는 관계식을 얻기 위해 式(15-a) 양변에 $2c/t_1(n+2)$ 를 곱해주면

$$\frac{2kc^{n+2}}{t_1^2 \tau_1 (n+1)(n+2)} = \frac{2c}{t_1(n+2)} \times \frac{\cos \beta}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (15-b)$$

가 되며, 式(20) 및 (15-b)로부터

$$\frac{\tan(\phi + \beta - \alpha)}{\sin^2 \phi} = \frac{2c}{t_1(n+2)} \times \frac{\cos \beta}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (21-a)$$

가 얻어진다. 式(21-a)를 ϕ 에 대해 정리하면

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\cos \alpha \tan \beta - \sin \alpha}{\frac{2c}{t_1(n+2)} - \cos \alpha - \sin \alpha \cdot \tan \beta} \quad (21-b)$$

로 된다. 式(21-b)에서 전단각 ϕ 는 경사각 α , 마찰각 β , 칩-공구접촉길이 c , 절삭깊이 t_1 및 응력 분포지수 n 에 의해 결정된다. 이들중 α 및 t_1 은 미리 결정되는 값이며, β 와 c 는 절삭실험에 의해 용이하게 구해지는 값이지만, n 값은 式(6)에서 알 수 있는 바와 같이 單一하게 결정될 수 없는 값이다. 따라서 式(21-b)에 의해서는 전단각 ϕ 의 豫測이 불가능하다.

공구경사면에 작용하는 垂直應力分布에 대한 실험적 연구^(4~7,13)에 의하면 分布樣相이 약간의 차이는 있지만, 수직응력의 크기는 工具刃先으로부터 칩과 공구의 접촉이 끝나는 지점까지 점차적으로 감소하여 0에 이르는 결과를 보이고 있다.

이러한 실험결과를 근거로 실제 전단각 해석 및 공구응력해석時 n 값의 一次近似로서 $n=1$ 이 채택되고 있다^(14,15).

Fig. 8은 Fig. 5에 나타낸 4種의 전단각 外에 式(21-b)에 $n=1$ 을 代入하여 구한 전단각을 추가하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 式(21-b)에 의한 전단각($n=1$)은 式(1), (2) 및 (3)에 의한 전단각에 비해 실제전단각값(실선)과 잘 일치 하고 있다. 이는 式(3)에 대한 설명에서 언급한 바와 같이 式(21-b)는 절삭깊이 t_1 및 절삭속도 v 와 뚜렷한 상관성을 가지고 변화하는 칩-공구접촉길이 c 를 품고 있어 절삭조건에 따른 마찰상태의 영향을 비교적 충실하게 반영하였기 때문으로 사료된다.

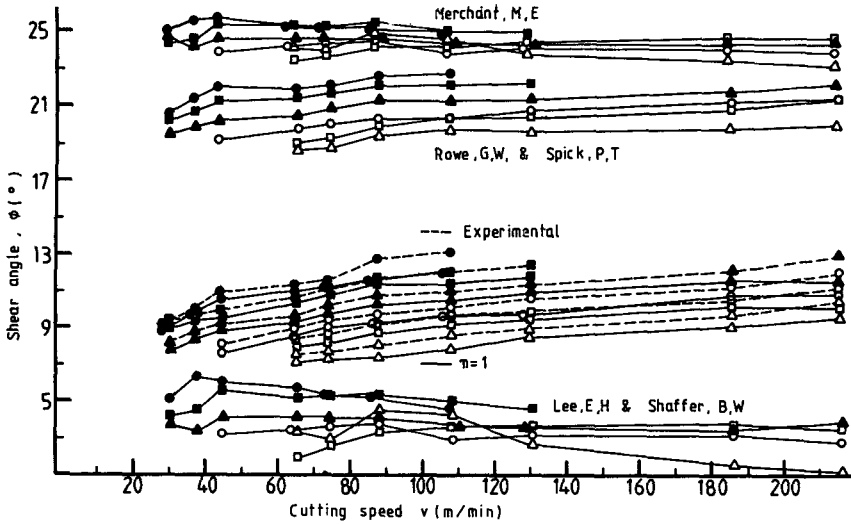


Fig. 8 Variations of shear angle obtained from the various analyses and experiments [SPPS 38]

5. 結 論

鋼에 대한 2차원 절삭실험결과 칩의 内部剪斷이 일어나는 절삭조건하에서의 전단각은 절삭깊이 t_1 및 절삭속도 v 에 따라 單調롭게 변함을 알 수 있었다. 따라서 정확한 剪斷角의 豫測을 위해서는 切削條件 또는 절삭조건과 밀접한 상관관계를 갖고 변화하는 파라미터가 전단각解에 포함되는 것이 바람직하다.

본 연구에서 유도한 Zorev 解에 대한 修正解(式 (21-b))는 마찰각 β 및 경사각 α 와 더불어 절삭깊이 t_1 , 칩-공구접촉길이 c 및 응력분포지수 n 을 파라미터로 가지며, 鋼의 경우 이 解에 $n=1$ 을 代入하여 계산된 전단각은 실제 전단각과 매우 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

- (1) Ernst, H.J. and Merchant, M.E., 1941, "Chip Formation, Friction and High Quality Machined Surface", Trans. ASME., Vol. 29, pp.299~328.
- (2) Merchant, M.E., 1945, "Mechanics of the Metal Cutting Processes", J.Appl. Phys., Vol. 16, pp. 267~318.
- (3) Lee, E.H. and Shaffer, B.W., 1951, "The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining", J. Appl. Mech., Trans. ASME., Vol. 73, pp.405~413.

- (4) Usui, E. and Takeyama, H., 1960, "A Photoelastic Analysis of Machining Stresses", J. Eng. Ind., trans. ASME., Vol.82, pp.303~308.
- (5) Hsu, T.C., 1966, "A Study of the Normal and Shear Stresses on a Cutting Tool", J. Eng. Ind., Trans. ASME., Vol. pp.51~64.
- (6) Kato, S., Yamaguchi, K. and Yamada, M., 1972, "Stress Distribution at the Interface between Tool and Chip in Machining", J.Eng. Ind., Trans. ASME., Vol. 94, pp.683~689.
- (7) Barrow, G. et al., 1982, "Determination of Rake Face Stress Distribution in Orthogonal Machining", M.T.D.R., Vol. 22, pp.75~85.
- (8) Zorev, N.N., 1963, "Interrelationship between Shear Processes Occuring along Tool Face and Shear Plane in Metal Cutting", Proc. Inter. Res. Prod. Conf., Carnegie Inst. of Tech., pp.42~49.
- (9) Lee, Y.M., Sampath, W.S. and Shaw, M.C., 1984, "Tool Fracture Probability of Cutting Tools under Different Exiting Conditions", J.Eng. Ind., Trans. ASME., Vol. 106, pp.168~170.
- (10) Shaw, M.C., 1984, "Metal Cutting Principles", Clarendon Press, Oxford, pp.168~181.
- (11) Rowe, G.W. and Spick, P.T., 1967, "A New Approach to Determination of the Shear-Plane Angle in Machining", J.Eng. Ind., Trans. ASME., Vol. 103, pp.530~538.
- (12) Desai, P.V. and Ramalingam, S., 1981, "On the Rowe-Spick Shear-Angle Relations for Orthogonal Machining", J.Eng. Ind., Trans. ASME., Vol. 103,

- pp.79~80.
- (13) Kattwinkel, W., 1957, "Untersuchungen an Schneiden Spander mit Hilfe der Spannungsoptik", Ind. Anzeiger, Nr. 36, ss. 29~36.
- (14) Oxley, P.L.B., 1963, "Mechanics of Metal Cutting", Proc. Inter. Res. Prod. Conf., Carnegie Inst. of Tech., pp.50~60.
- (15) Sampath, W.S., Lee, Y.M. and Shaw, M.C., 1984, "Tool Fracture Probability Under Steady State Cutting Conditions", J.Eng. Ind., trans. ASME., Vol. 106, pp.161~167.