

〈論 文〉

# 인볼류트 커터인선의 초기결손 예측에 관한 연구

김재갑\* · 김정두\*\*

(1992년 1월 27일 접수)

## Study on the Analytical Prediction of Premier Chipping in Involute Gear Cutting Process

Jae-Gab Kim and Jeong-Du Kim

**Key Words :** Involute Gear Cutting Process(인볼류트 기어가공), Premier Chipping(미세 칩핑), Analytical Prediction(해석적 예측), Stress Analysis(응력해석)

### Abstract

In the machining processes, the tool chipping are known to be the most dangerous when the variation of end of tool edges is largest. Therefore, chipping has been caused by the stress distribution in the moment of cutting. In this study, in order to predict the shapes of tool chipping with the tool shapes and the cutting conditions, the premier chipping shapes of involute cutter is predicted by the stress distribution value of cutting edges and it is verified by the experiments. The growth behavior of the tool chipping is considered through the experiment of gear cutting and in case of evaluation of specific cutting energy in the proper machining conditions through the simulation result, it can be known that the prediction of cutting force is possible accurately.

### 기 호 설 명

$\Delta Ax$ : X방향의 가공면적	$\sigma_n$ : 경사면의 수직응력
$\Delta Ay$ : Y방향의 가공면적	$\tau_t$ : 경사면의 전단응력
$n$ : 공구인선의 분할층수	$F_t$ : 경사면방향의 수평절삭력
$d$ : 분할층의 폭	$F_n$ : 경사면방향의 수직절삭력
$F_x$ : 이송방향의 절삭력	$\tau_s$ : 피삭재의 전단응력
$F_y$ : 이송방향의 수직절삭력	$L_c$ : 공구인선과 공작물과의 접촉길이
$\theta$ : 공구인선의 회전각	$N$ : 공구인선상의 거리
$(L_2)_i$ : 공구인선의 중심과 $i$ 번째 가공형상이 시작되는 점까지의 거리	$B$ : 상수
$(L_2)_i$ : 공구인선의 중심과 $i$ 번째 분할층이 끝나는 점까지의 거리	$L_f$ : 공구인선 종단부의 길이
$L$ : 공구인선의 분할층 번호	$L_f'$ : 공구인선 측면부의 길이
	$\theta_o$ : 공구인선 측면과 중심선과의 각
	$\sigma_x$ : X방향공구인선의 수직응력
	$\sigma_y$ : Y방향공구인선의 수직응력
	$\tau_{xy}$ : 공구인선의 전단응력

\*한국과학기술원 정밀공학과 대학원

\*\*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

1. 서 론

최근 고성능의 공작기계, 항공우주 및 자동차산업의 발달과 자동차 추세에 따라 정밀기어 가공에 대한 관심이 높아지고 있으며, 기어를 가공하는 공구에 대한 수명 예측의 해석을 통하여 생산성을 향상시키기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 현재까지 공구결손 및 마멸등 수명에 관한 일부 연구들이 이루어져 왔으며, 절삭날내 응력에 의하여 공구의 결손문제를 역학적으로 해석하고, 그 결과를 예측하는 연구<sup>(3,4,5)</sup>등이 다수 있다. 절삭가공시 결손의 발생은 절삭개시후 최초로 인선의 응력 변화가 가장 크게 되는 때에 그 위험이 가장 크다고 알려져 있으며, 따라서 절삭순간의 응력분포상태가 결손발생을 좌우하는 가장 중요한 인자이다.<sup>(6,7)</sup> 절삭날의 응력분포값은 절삭력의 최대값을 절삭날 경사면에 작용하는 수직응력과 전단응력으로 각각 측정하여, 유한요소법에 의하여 계산되었다. 계산된 응력분포값을 고속도 공구강의 기계적성질과 비교함으로써 절삭날 결손의 위치와 위험 정도를 알 수 있다.

본 연구에서는 공구의 형상과 절삭조건에 따른 공구의 결손형태를 예측하기 위하여 현재 가장 널리 쓰이고 있는 인블류우트커터의 결손형태를 절삭날의 응력분포 값으로 예측하고 실험에 의하여 검증함과 동시에 기어 절삭실험을 통한 공구 결손의 성장거동을 고찰하였으며, 또한 마멸과 결손이 발생함에 따른 절삭력의 변화와 파형을 관찰하여 상호관련성을 비교함으로써 인블류우트 기어커터의 초기 결손을 해석적으로 예측하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 절삭력 측정실험

Fig. 1은 절삭력 측정실험에서 사용한 장치의 기략도로써 커터와 기어에 관한 규격은 Table 1과 같다.

절삭저항은 공구동력계(AST식 절삭공구동력계)를 사용하여 절삭력을 측정하였다. 공구동력계와 A/D변환기를 거쳐 IBM XT 컴퓨터에 받아들여지는 데이터 처리능력은 5000/sec이다.

가공중에 발생하는 절삭력은 공구동력계에서 전압으로 변환되고 low-pass-filter에 노이즈를 제거한후 증폭기에서 증폭시킨다. 증폭된 신호를 A/D 변환기를 통하여 디지털량으로 변환시킨후 컴퓨터에 기록하여 분석한다.

절삭력 실험조건은 Table 2에서와 같이 4가지 절삭조건에 대하여 가공이 시작될 때와 가공을 위

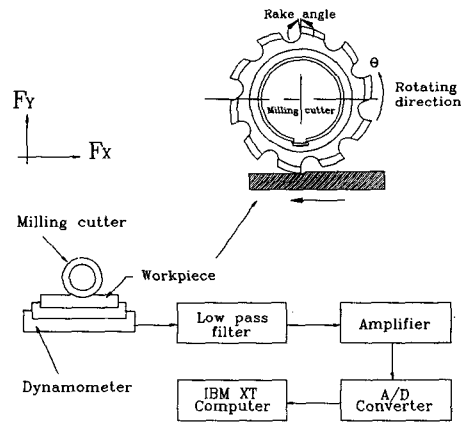


Fig. 1 Schematic diagram of cutting force measurement system

Table 1 Specification of involute cutter and spur gear

Gear(workpiece)		Involute Cutter	
Module	2.5	Module	3.25
Pressure angle	20°	Pressure angle	20°
Rake angle	0°	Rake angle	0°, 10°
Pitch circle dia.	90.0	Outer dia.	75
Material	SM45C	Number of cutter edge	12
Type of gear tooth	INVOLUTE	Material	H.S.S(SKS-9)
Number of gear tooth	36		

**Table 2** Cutting conditions( I, II, III, IV)

Cutting con.	Rake angle (°)	Feed(mm/rev)	Cutting speed(m/min)	Depth of cut(mm)
I	10	1	30	1
II	10	1	30	1
III	10	2	30	1
IV	0	1	30	1

Cutting fluid : Dry

I, IV : 1st cutting ( $d=1\text{mm}$ )

II, III : 2nd cutting ( $d=1\text{mm}$ )

해 커터가 30000, 60000 cycles을 회전하였을 때에 각각 구하였다. 그리고 절삭력 측정전후에 데이터를 받아서 측정계의 기준점을 확인함으로써 측정 오차를 보정하였으며, 이송방향의 주분력( $F_x$ )과 이송방향에 직각인 배분력( $F_y$ )를 측정하였다.

측정 데이터의 신뢰성과 공구손상에 의한 오차를 제거하기 위하여 하나의 결과에 대하여 2회~5회의 절삭력 측정을 하여 평균값을 구하였다. 절삭력 값 중 연속성을 갖지 않는 것은 측정 데이터에서 제외하였으며 절삭력 측정결과들로 제시된 자료들은 정상적인 절삭 상태에서의 공구들에 대한 평균치로 작성한 것이다. 절삭속도는 30 m/min을 선택하였다. 가공을 위한 공구의 회전속도가 2000사이클 경과하였을 때마다 공구현미경을 사용하여 칩핑발생 여부를 확인하였다.

여기에서의 결손 실험은 마멸을 일으키는 미세한 결손을 포함하고 단속절삭으로 인한 충격의 영향이 적은 상향절삭법으로 실험을 하였다.

## 2.2 고속도강의 인장 피로실험

중·저속 절삭에 많이 쓰이는 고속도강 재질의 절삭공구는 절삭이 진행되는 동안 피로 및 충격 하중을 받아 마멸됨과 동시에 진동하기 시작한다. 이로인하여 절삭날에 칩핑이 발생하여 공구로서의 수명을 다하게된다. 따라서 본실험에서는 공구의 칩핑현상이 피로현상과 어떠한 관련성을 가지고 있는지를 살펴본다.

고속도강의 인장에대한 피로 파괴응력값을 구하기 위한 실험으로 시험편의 재질은 커터와 동일한 SKH-9으로 하였으며 열처리조건도 커터와 동일하게 하였다. Table 3에 시험편용 커터의 열처리과정과 기계적성질을 나타내었다. 시험편은 ASME

**Table 3** Property and heat treatment of milling cutter for fatigue specimen

Chemical compositions(%)										
KS	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Co	
SKH-9	0.8-0.9	<0.4	<0.4	<0.03	<0.03	3.8-4.5	4.5-5.5	5.5-6.7	1.6-2.2	

Heat treatment Production process	
Quenched time & Temperature	Tempered time & Temperature
500°C, 30'	890°C, 4' 40"
	1150°C, 2' 20"
	500°C, 1h
	AC
	550°C, 3h
	AC
	550°C, 3h

Mechanical properties			
Tensile strength	Compressive strength	Young's modulus	Hardness
$\sigma_t$ (MPa) 2150	$\sigma_c$ (MPa) 2350	E (GPa) 220	(HRC) 64

규격에 의하였다. 피로시험기는 유압식으로 250 KN의 dynamic loadin rating을 가지고있는 Two-column frame의 Instron's 8000 series를 사용하였다. 실험 방법은 최대값과 0에가까운 양의 최소값을 주어 피로시험을 하였으며, 최대값은 인장강도 값을 기준으로하여 0.4ton(100 N/mm<sup>2</sup>의 인장응력)씩 줄여가면서 실험을 하였고 주속도는 10 Hz로하였다.

## 3. 이론적 해석과 절삭 시뮬레이션

### 3.1 이론 절삭력 파형

Fig. 2는 본실험의 전체적인 개략도를 나타낸 것으로, 절삭 면적과 형상을 구하기 위한 시뮬레이션 계통도이다. 시뮬레이션은 커터의 공구인선표면에 응력분포를 주기 위하여 필요한 절삭날 표면에 피삭재가 접촉하는 면적과 형상을 얻기 위한 해석이

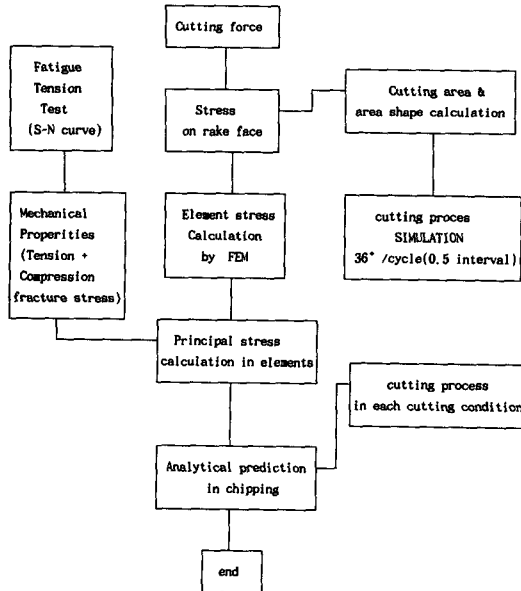


Fig. 2 Simulation experimental flow diagram

다. 인블류우트 밀링커터의 가공시물레이션은 각 절삭인선의 가공주기를 360°/10등분=36°로 하였고 (절삭인선의 갯수 : 10개), 매주기를 0.5° 간격으로 나누어 한주기마다 72개의 결과값들을 구하였다. 이때 각 결과값들은 절삭인선 형상 데이터가 피삭재 형상 데이터와 공유하는 면적을 계산한 결과들이고 이 결과값들을 회전각도에 대하여 나타내었다.

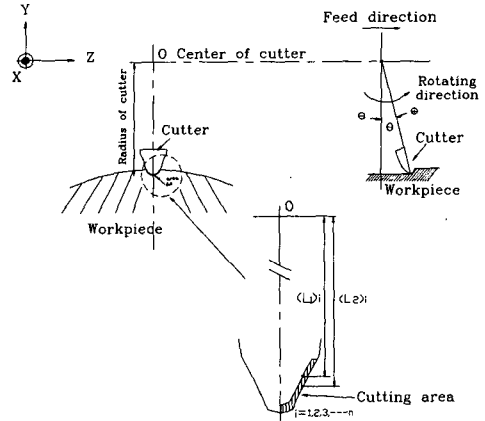


Fig. 3 Cutting process simulation method by milling cutter

공유하는 면적을 구하기 위하여 계산에 쓰여진 형상 데이터들은 공유하는 면적을 제외시킨 새로운 형상데이터들로 저장되고 다음 가공을 위한 새로운 형상 데이터들로 구하여진다.

Fig. 3은 커터의 가공 시물레이션을 하는 방법을 나타낸 것이며, 여기에서 가공 면적은

$$\Delta Ax = \sum_{i=1}^n \{((L_2)_i - (L_1)_i) \times d\} \times \cos \theta$$

$$\Delta Ay = \sum_{i=0}^n \{((L_2)_i - (L_1)_i) \times d\} \times \sin \theta \quad (1)$$

으로 나타낸다.

$\theta \backslash N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.5	39	40	40	40	40	41	42	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0	182	183	184	184	185	190	194	200	0	0	0	0	0	0	0
0.5	341	342	344	345	347	330	338	349	0	0	0	0	0	0	0
1.0	489	490	492	494	496	483	496	484	0	0	0	0	0	0	0
1.5	619	622	624	626	629	619	635	628	0	0	0	0	0	0	0
2.0	795	798	801	780	784	802	797	795	0	0	0	0	0	0	0
2.5	921	924	927	931	935	933	931	933	0	0	0	0	0	0	0
3.0	1102	1081	1086	1090	1095	1096	1099	1105	0	0	0	0	0	0	0
3.5	1222	1226	1231	1212	1218	1222	1228	1213	0	0	0	0	0	0	0
4.0	1384	1389	1394	1400	1382	1390	1409	1389	0	0	0	0	0	0	0
4.5	1523	1505	1511	1516	1524	1511	1525	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0	1681	1637	1679	1686	1694	1683	1702	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5	1801	1808	1814	1798	1807	1800	1821	0	0	0	0	0	0	0	0
6.0	1997	1980	1988	1995	1981	1977	1978	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5	2103	2111	2094	2102	2113	2113	2093	0	0	0	0	0	0	0	0
7.0	2280	2288	2297	2281	2292	2296	2279	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	2405	2389	2398	2383	2395	2402	2389	0	0	0	0	0	0	0	0
8.0	2586	2572	2581	2591	2580	2590	2581	0	0	0	0	0	0	0	0
8.5	2683	2692	2679	2689	2678	2692	2686	0	0	0	0	0	0	0	0
9.0	2869	2879	2890	2877	2867	2884	2883	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	2984	2971	2963	2970	2984	2961	2983	0	0	0	0	0	0	0	0
10.0	3176	3163	3175	3163	3179	3178	3184	0	0	0	0	0	0	0	0
10.5	3262	3274	3263	3275	3267	3270	3260	0	0	0	0	0	0	0	0
11.0	3459	3471	3459	3473	3466	3472	3460	0	0	0	0	0	0	0	0
11.5	3564	3553	3566	3556	3550	3559	3552	0	0	0	0	0	0	0	0
12.0	3765	3755	3769	3759	3753	3766	3762	0	0	0	0	0	0	0	0
12.5	3842	3832	3846	3837	3833	3846	3848	0	0	0	0	0	0	0	0
13.0	17	0	454	88	805	3298	4064	0	0	0	0	0	0	0	0
13.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) Cutting condition I

$\theta \backslash N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.5	4	4	4	4	4	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0	86	86	86	87	87	90	79	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	153	154	154	155	156	159	151	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0	238	226	228	228	230	235	229	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5	302	304	305	306	298	302	298	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0	378	379	380	382	384	380	378	0	0	0	0	0	0	0	0
2.5	451	441	443	445	447	445	445	0	0	0	0	0	0	0	0
3.0	529	531	533	523	526	526	410	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5	589	591	593	595	587	588	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0	680	671	674	676	680	671	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	738	741	732	734	738	732	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0	820	823	826	818	822	817	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5	875	879	882	885	878	887	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.0	939	963	967	971	964	975	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5	1025	1028	1020	1025	1029	1030	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.0	1075	1079	1082	1112	1118	1120	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	1173	1166	1171	1163	1169	1173	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.0	1222	1226	1219	1224	1260	1265	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.5	1311	1316	1309	1314	1309	1316	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.0	1357	1362	1367	1360	1367	1411	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	1460	1454	1459	1453	1461	1459	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.0	1503	1498	1503	1497	1505	1556	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.5	1598	1603	1598	1604	1600	1602	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.0	1639	1644	1639	1646	1658	1702	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.5	1747	1741	1736	1743	1740	1745	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12.0	1785	1780	1787	1782	1840	1847	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12.5	1884	1879	1887	1882	1880	1888	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.0	1921	1916	1923	1985	1982	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.5	2022	2029	2025	2021	2020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14.0	2103	2110	2118	2126	2125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(b) Cutting condition II

$\theta$ -N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.5	5	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0	87	88	88	88	89	91	80	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	156	156	157	158	158	162	154	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0	241	230	231	232	233	238	232	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5	307	308	309	310	300	307	302	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0	383	385	386	388	390	386	383	0	0	0	0	0	0	0	0
2.5	458	448	450	452	454	452	452	0	0	0	0	0	0	0	0
3.0	537	539	541	531	534	534	535	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5	598	600	602	605	596	597	600	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0	691	682	684	687	690	681	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	749	752	743	746	749	742	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0	833	836	839	830	834	829	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5	889	892	895	899	891	900	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.0	954	978	982	986	978	989	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5	1040	1044	1036	1040	1045	1045	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.0	1091	1095	1099	1129	1135	1136	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	1191	1184	1189	1193	1187	1190	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.0	1241	1245	1237	1242	1279	1284	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.5	1331	1336	1329	1334	1329	1335	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.0	1378	1383	1388	1381	1386	1432	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	1483	1476	1482	1475	1483	1481	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.0	1526	1521	1526	1520	1528	1580	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.5	1623	1628	1623	1628	1624	1626	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.0	1664	1670	1664	1671	1724	1727	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.5	1774	1768	1773	1770	1767	1771	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12.0	1813	1808	1814	1810	1868	1875	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12.5	1913	1908	1915	1911	1908	1916	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.0	1950	1946	1953	2015	2013	1943	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.5	2053	2061	2056	2052	2051	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14.0	2135	2142	2150	2138	2169	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(c) Cutting condition III

$\theta$ -N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.5	5	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0	87	88	88	88	89	91	80	83	0	0	0	0	0	0	0
0.5	156	156	157	158	158	162	154	158	0	0	0	0	0	0	0
1.0	241	230	231	232	233	238	232	239	0	0	0	0	0	0	0
1.5	307	308	309	310	300	307	302	311	0	0	0	0	0	0	0
2.0	383	385	386	388	390	386	383	381	0	0	0	0	0	0	0
2.5	458	448	450	452	454	452	452	452	0	0	0	0	0	0	0
3.0	537	539	541	531	534	534	535	538	0	0	0	0	0	0	0
3.5	598	600	602	605	596	597	600	605	0	0	0	0	0	0	0
4.0	691	682	684	687	690	681	686	680	0	0	0	0	0	0	0
4.5	749	752	743	746	749	742	749	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0	833	836	839	830	834	829	837	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5	889	892	895	899	891	900	898	0	0	0	0	0	0	0	0
6.0	987	978	982	986	978	989	989	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5	1040	1044	1036	1040	1045	1045	1047	0	0	0	0	0	0	0	0
7.0	1129	1133	1137	1129	1135	1136	1128	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	1192	1184	1189	1193	1187	1190	1183	0	0	0	0	0	0	0	0
8.0	1283	1287	1280	1285	1279	1279	1279	0	0	0	0	0	0	0	0
8.5	1331	1336	1329	1334	1329	1335	1332	0	0	0	0	0	0	0	0
9.0	1425	1430	1435	1428	1435	1432	1431	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	1483	1476	1482	1475	1483	1481	1482	0	0	0	0	0	0	0	0
10.0	1579	1572	1578	1572	1580	1580	1582	0	0	0	0	0	0	0	0
10.5	1622	1628	1623	1628	1624	1626	1630	0	0	0	0	0	0	0	0
11.0	1721	1727	1721	1727	1724	1727	1721	0	0	0	0	0	0	0	0
11.5	1774	1768	1773	1770	1767	1771	1767	0	0	0	0	0	0	0	0
12.0	1874	1869	1875	1871	1868	1875	1872	0	0	0	0	0	0	0	0
12.5	1913	1908	1915	1911	1908	1916	1916	0	0	0	0	0	0	0	0
13.0	0	0	193	1002	1716	2022	2024	0	0	0	0	0	0	0	0
13.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(d) Cutting condition IV

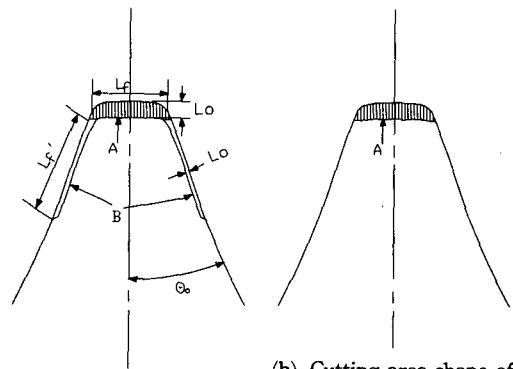
Fig. 4 Calculated cutting depth by cutting simulation ( $\times 10$  nm)

Fig. 4는 절삭공구의 회전 한주기 동안의 실제가공면적으로 나타내었다. 4가지 절삭조건에 대한 가공시뮬레이션을 분할층(x축)과 절삭날의 회전각  $\theta$ 에 의하여 나타낸 결과이다. X축 N(1 2 3...14 15)는 절삭날의 중심선을 기준으로 오른쪽 부분을 15등분한 분할층번호를 나타낸 것이고 Y축(...-0.5, 0.0, 0.5, ...2.0, 2.5...)은 절삭날의 회전각  $\theta$ 값을 나타낸 것이다. 그외 결과 값들은 각 분할층(1-15)의  $\theta$  값에 대한 반경방향으로의 가공깊이를 표시한 것이다. 가공되지않는 영역은 0으로 표시하였다. 이상의 계산결과에 의하면 절삭조건 I, IV는 6번째 분할층까지, II, III는 7번째 분할층까지 계산에 쓰여진 주요한 분할층임을 알 수 있다. I과 IV를 비교하여보면 I이 IV보다 경사각의 증가로 인해 가공접촉면적이 다소 증가하였음을 나타내었다.

여기서 각  $\theta$ 값에 대하여 가로축 방향의 결과값들을 더하여 (1-15) 분할층의 단위폭값  $d(0.33833)$ 을 곱하면 각  $\theta$ 값에 대한 가공면적이 계산되고 각  $\theta$ 값에 대한 가공면적을 연속적으로 표현하면 이론파형이 구하여진다. 이것은 가로축을  $\theta$ 값으로, 세로축은 피삭재의 재질인 SM45C의 비절삭 저항값  $3000\text{N/mm}^2$ 의 가공면적에 따라 계산된다.

3.2 커터인선의 응력분포와 해석

Fig.5는 절삭력 측정실험에서 구한 절삭력을 적



(a) Cutting area shape (b) Cutting area shape of A except B from (a)

Fig. 5 Division method of contact area of cutting force

용하기 위한 모델로서 A+B에 해당하는 절삭력은 Table 4(a)의 각 절삭조건에서 구한 평균값을 대입하였고 A에 해당하는 절삭력에는 A의 폭  $L_f$ 값을 길이방향으로 각 절삭조건에 따라서 구한 Table 4(b)를 대입하였다. 여기서  $F_x, F_y$ 는 공구동력계에서 구한 값이고  $F_l$ 와  $F_n$ 는 커터가  $\theta$ 만큼 회전하였을 경우의 절삭날면에 수직한 방향의 절삭력( $F_n$ )과 반경방향의 수평절삭력( $F_l$ )로  $F_x$ 와  $F_y$ 를 바꾸어준 값이다. B에 해당하는 절삭력은 (A+B)의 절삭력에 A의 절삭력을 소거시킴으로써

**Table 4** Results of transition data  $F_t$ ,  $F_n$  from tool dynamometer in  $\theta = 12.5^\circ$

(a): Total Cutting force Unit : N

Cutting con.		I		II		III		IV	
Cutting force									
$F_x$	$F_n$	205	186	283	261	460	426	233	212
$F_y$	$F_t$	65	108	71	130	105	202	71	119

(b): Edge Cutting force Unit : N

Cutting con.		I, II		III		IV	
Cutting force							
$F_x$	$F_n$	114	98	181	157	127	109
$F_y$	$F_t$	61	84	91	128	67	93

$F_t$ : Tangential force on rake face  
 $F_n$ : Normal force on rake face

계산된다. 적용된 절삭력으로 A,B 부분에서의 응력분포를 구하기 위하여 다음과 같은 응력분포식을 이용한다. (6)

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \exp(B \times (1 - L/L_c)) \\ \tau_t &= \tau_s \times 0.5 \times L/L_c \end{aligned} \quad (2)$$

상수  $B$ 와  $L_c$ 를 구하기 위하여 Table. 4(a)의 절삭력  $(F_t)_{A+B}$ ,  $(F_n)_{A+B}$ 와 Table. 4(b)의 절삭조건에 의하여 측정된 절삭력  $(F_t)_A$ ,  $(F_n)_A$ 를 적용하였다.

커터인선 끝단부의  $L_c$ 와  $B$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (F_t)_A &= \tau_s \times L_c \times 0.5 \times L_f \\ (F_n)_A &= \int_0^{L_c} \sigma_n \times L_f dl = \int_0^{L_c} \exp(B \times (1 - L/L_c)) \\ &\quad \times L_f dl \end{aligned} \quad (3)$$

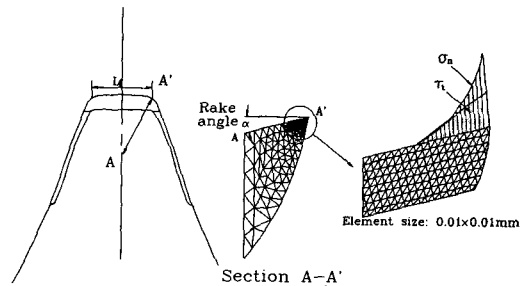
또한, 절삭날 측면부의  $L'_c$ 와  $B'$ 는 다음과 같이

해석되며, 따라서  $L_c$ ,  $L'_c$ ,  $B$ 와  $B'$ 가 구하여진다.

$$\begin{aligned} (F_t)_B &= [(F_t)_{A+B} - (F_t)_A] / \sin(\theta^\circ) \\ &= \tau_s \times L'_c \times 0.5 \times L'_f \times 2 \\ (F_n)_{A+B} - (F_n)_B &= \int_0^{L_c} \sigma_n \times L'_f dl \\ &= \int_0^{L'_c} \exp(B'(1 - L/L'_c)) \times L'_f dl \end{aligned} \quad (4)$$

Table 5는 계산된  $B$ ,  $B'$ 와  $L$ ,  $L'$ 값들을 나타낸 것으로, 이상과 같이 상수값들을 계산함으로써 절삭날 표면에서의 응력분포  $\sigma_n$ 과  $\tau_t$ 를 구할수있다.

계산된 절삭날 표면에서의 응력분포를 공구절삭날에 적용함으로써 절삭날내의 응력값들을 유한요소법에 의하여 계산할수있다. 절삭개시후 최초의 날끝변화가 가장 크게되는 때에 결손의 가장 큰 위험이 생기는데, 이러한 상태에서의 공구의 응력분포를 구한다. 유한요소법에 의한 해석방법은 Fig. 6에 나타내었다. 피삭재에 의하여 계산된 공구표면



**Fig. 6** Division of element condition

**Table 5** Calculated normal logarithm factor and contact length of tool

	B	B'	L	L'	$L_t$	$L'_t$	$\theta_0$
A part of I	7.7		0.132		2.6		
B part of I		7.79		0.082		1.69	20°
A part of II	7.7		0.132		2.6		
B part of II		7.74		0.093		2.90	20°
A part of III	7.75		0.201		2.6		
B part of III		7.77		0.15		2.90	20°
A part of IV	7.72		0.147		2.6		
B part of IV		7.85		0.0912		1.69	20°

의 접촉하는 거리결과에서 나타낸 바와같이 0.1 mm~0.2 mm의 값을 갖는다. 따라서 지지점에 의한 영향을 최소한으로 줄이기 위하여 접촉 길이의 15~20배만큼의 거리에 고정점을 두었고, 공구인선 응력해석 부분은 인선끝부분과 측면인선부분이 접하는 A-A'으로하였다. 이것은 절삭인선과 측면인선에서의 응력분포값의 중간값을 가지고 있고 절삭인선 결손 실험결과 이부분이 가장 약한 부분이었기 때문이다. 전체 요소수는 1000개로 하였으며 인선부근의 요소크기는 0.01 mm로 하여 경사면에서의 응력분포값을 충분히 줄 수 있도록 하였다. 여기서 응력분포값은 공구인선에서 구한 상수값들에 의하여 지수함수분포를 나타내는 수직응력  $\sigma_n$ 와 일차함수를 나타내는 전단응력  $\tau_s$ 의 분포로 구분하여 적용시켰다. 스퍼어 기어의 절삭가공이 진행되면서 공구의 경사면 마멸발생진행과 동시에 여유면 및 절삭날 모서리에도 마멸이 진행하였다. 그러나 칩핑발생에는 절삭순간의 응력분포가 가장 중요하고 절삭의 순간에는 여유면 마멸부는 공작물과 접촉하지않고 절삭력도 작용하지 않는다고 가정한다. 크레이터마멸은 마멸부의 공구재질에 변화를 주기 때문에 파괴응력이 다른 부분과 다르다고 생각된다. 그러나 크레이터 변질부의 두께는 얇고, 또한 그부분의 파괴응력은 모재보다 극단적으로 작기 때문에 크레이터의 변질부가 파괴된다 할지라도 칩핑에 의한 모재의 파괴에는 결부되지 않는다고 생각되어진다. 따라서 공구형상의 변화도 무시하고 근사적인 크레이터마멸부의 파괴는 절삭인선의 칩핑에 결부되지 않는다고 하여 칩핑발생을 해석하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 7에 절삭조건 I과 II에따라 가공시물레이션에 의하여 구한 이론 절삭력을 나타내었고 Fig. 8과 Fig. 9에 절삭조건 I과 II에대하여 절삭초기와 커터가 60000사이클 회전하였을 때의 절삭력을 나타내었다. 이론절삭력을 실제절삭력과 비교하여 보면, 비슷한 형상과 크기를 나타내고 있음을 볼수 있다. 비절삭저항값은 피삭재의 성질과 절삭조건에 따라 다른값을 갖으며, 여기서 구한 이론절삭력 파형은 커터와 피삭재의 접촉 면적을 나타내므로 각 절삭조건에 따른 비절삭저항값만 구한다면 비교적 정확한 절삭력을 예측할수 있을 것이라고 생각된다.

칩핑과 마멸이 발생함에따라 절삭력 파형의 폭은 10%~50%정도로 증가하였고 그 모양도 매우 거칠고 불규칙하게 나타났다. 이것은 절삭날의 인선이 손상됨에 따라 피삭성이 떨어짐과 가공면이 거칠어지는 결과를 가져오고, 그로인해 절삭력의 증가와 함께 매우 불규칙한 절삭력 파형을 나타내었다고 생각된다. Fig. 10에 절삭조건에 따라 측정된 절삭력을 나타내었다. 모든 절삭조건에서  $F_y$ 가  $F_x$ 의 25%~30%정도되는 크기였다. I과 II를 비교하여

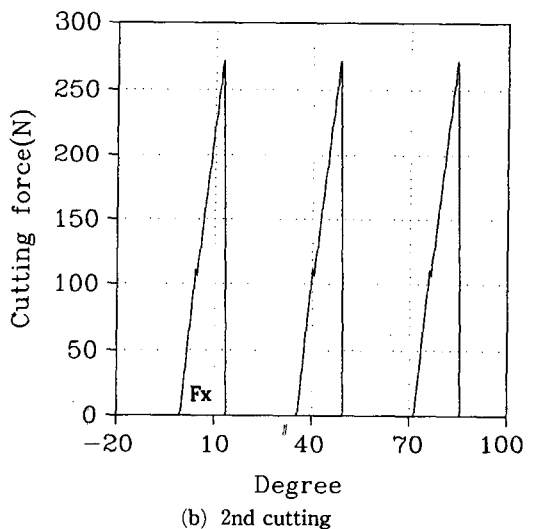
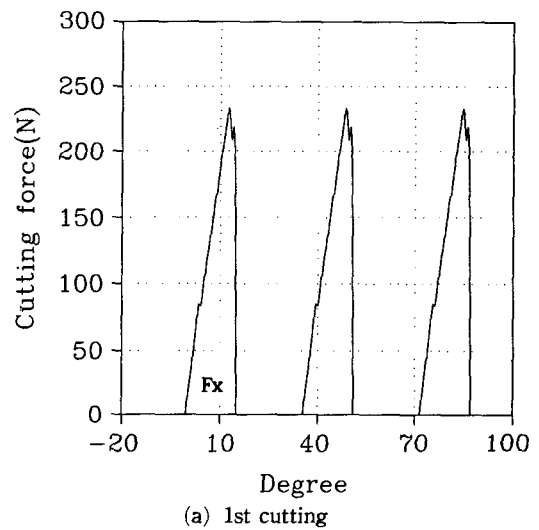
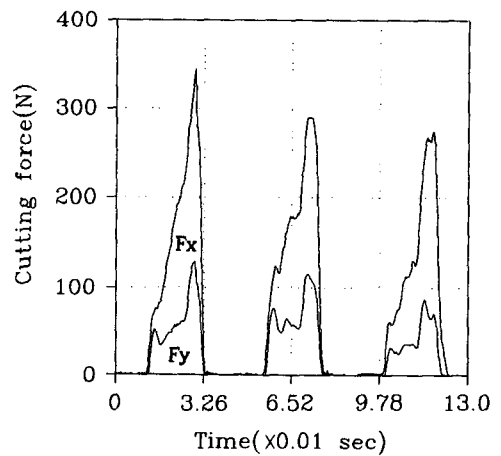
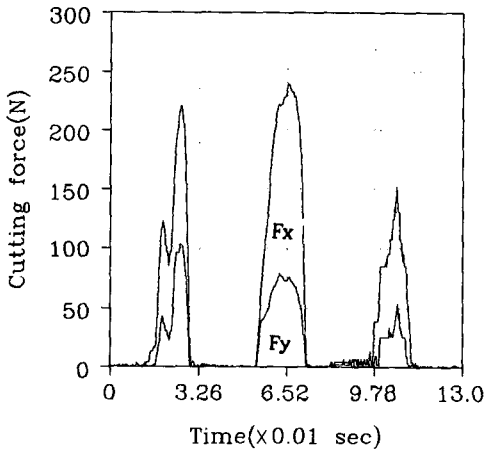
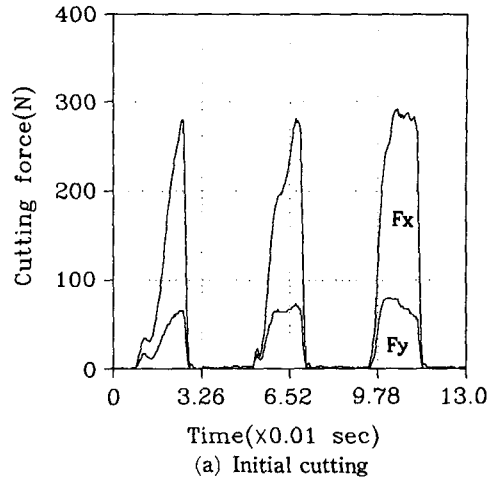
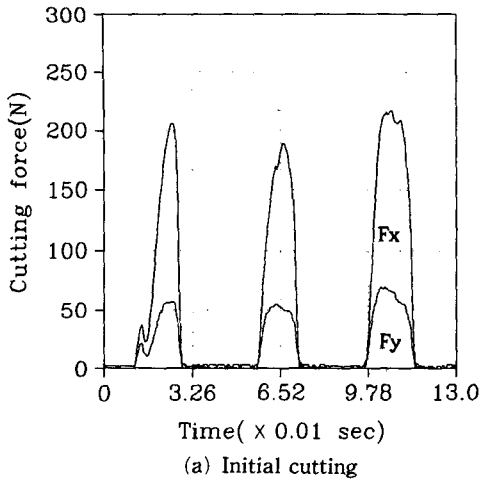


Fig. 7 Simulation results by cutting force  
Rake angle : 10°, Ferd : 1 mm/rev,  
Cutting speed : 30 m/min Depth of cut : 1 mm



(b) Cutting force Fx, Fy after 60000 cycles in cutting process

(d) Cutting force Fx, Fy after 60000 cycles in cutting process

**Fig. 8** Results of cutting force measurement (1st cutting)

Rake angle : 10°, Feed : 1mm/rev,  
Cutting speed : 30m/min, Depth of cut : 1mm

**Fig. 9** Results of cutting force measurement (2nd cutting)

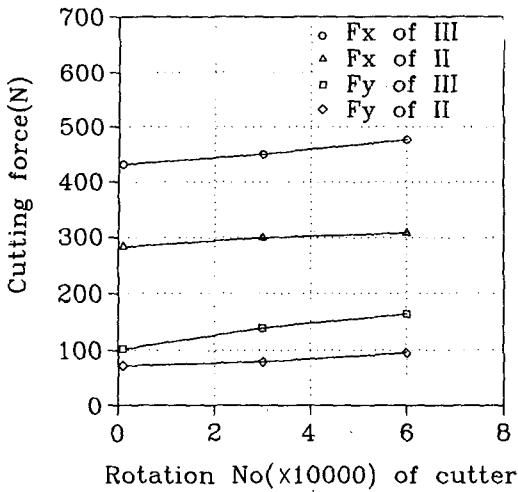
Rake angle : 10°, Feed : 1mm/rev,  
Cutting speed : 30m/min, Depth of cut : 1mm

보면 경사각이 0°인 경우가 10°인 경우보다 15% 정도 높은 절삭력을 나타내었으며, 커터의 가공회전수가 6만회였을 경우에 10% 정도의 절삭력이 증가하였음을 볼수있다. II와 III의 절삭력을 비교하면 이송량이 2배로 증가됨에따라 절삭력의 크기가 50%이상 증가하였으며, 마멸과 칩핑이 발생함에따른 절삭력증가의 정도는 절삭조건 I 및 IV와 비슷한 경향을 보였다. Fig. 11은 절삭날 결손 실험결과를 광학현미경에 의하여 관찰한 것을 그림으로 나타낸 것이다. 그 결과 인선에서 미세결손이 나타

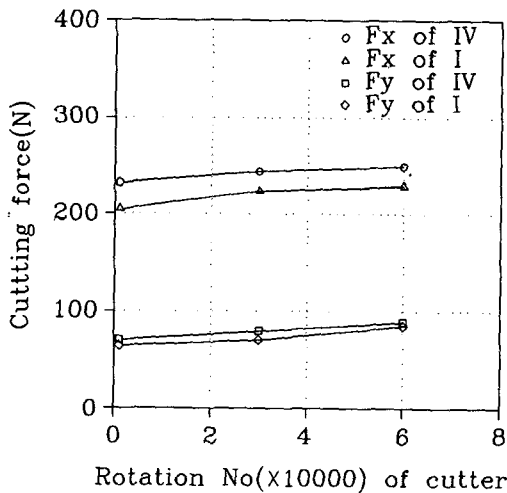
났다. 미세결손은 모든 절삭조건에 대하여 절삭초기부터 생성되기 시작하였으며, 그 과정은 step 1, step 2, step 3의 순서와 같이 가공이 진행되면서 얇은 층이 연속적으로 형성되어졌다.

Fig. 12는 이상의 칩핑원인분석을 위하여 절삭날의 인장피로실험 결과를 나타낸 것으로, 피로시험 1300 N/mm<sup>2</sup>의 부근에서 100000 cycles 이상을 나타내었다.  $\tau_{max} = \sigma_{max} / 2$ 의 계산방법에 의하여 인장피로시험 결과를 전단응력값으로 바꾼후 인선에서의 전단응력값과 비교하면 절삭조건 I, II, III의 경





(a) Cutting condition II / III (1st cutting)

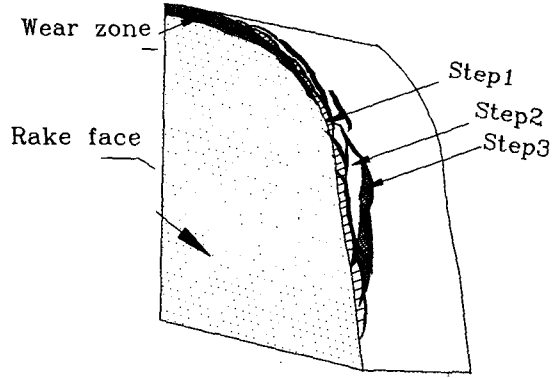


(b) Cutting condition I, IV (2nd cutting)

Fig. 10 Results of cutting force measurement

우는 100000~600000 cycles 사이에서 칩핑이 발생하고 절삭조건 IV의 경우는 100000 cycles 부근에서 칩핑이 발생되어짐을 피로실험결과에 의하여 알 수 있다.

가장 큰 절삭력이 작용하는  $\theta=12.5^\circ$ 일 경우의 이송방향의 절삭력  $F_x$ 와 이송 방향에 수직인 절삭력  $F_y$ 를 경사면에 수직인  $F_n$ 과 수평인  $F_t$ 로 바꾸어 Table 4에 나타내었다. 가공 시뮬레이션에 의한 가공면적과 형상값들을 이용하여 공구의 경사면에 지수함수형태인 수직응력과 1차함수형태인 전단응력으로 주었다.



- Step1: cutting process: 29000cycles
- Step2: cutting process: 46000cycles
- Step3: cutting process: 60000cycles

Fig. 11 Premier chipping generation process

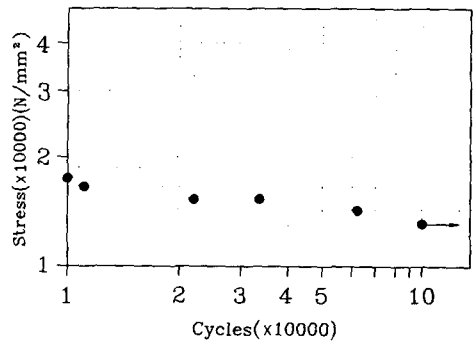


Fig. 12 Tension fatigue test results

Fig. 13~Fig. 16은 각 절삭조건에 대한  $\sigma_y$ 와  $\tau_{xy}$ 값을 나타낸 것으로 4가지의 절삭조건에 따라 절삭날 인선에서 0.01mm까지는 모두 큰 차이없이 압축강도에 가까운 높은 압축응력값( $\sigma_y$ )을 가졌고, 절삭인선 내부로 갈수록 응력값은 급격히 감소함을 볼 수 있다. 전단응력값의 결과에 의하면 절삭력의 변화에 따라서는 약간의 차이만을 보였으나, 경사각이  $0^\circ$ 인 경우가  $10^\circ$ 인 경우의 약 50%정도의 전단응력값을 나타내었다. 이것은 이송량의 증가로 큰 절삭력이 작용하였으나 경사각의 감소로 강성이 증가되었기 때문이라 생각된다. 따라서 최적의 경사각을 절삭인선에 부여함으로써 절삭력의 감소와 절삭인선의 강성유지로 피삭성을 증가시킬 수 있을

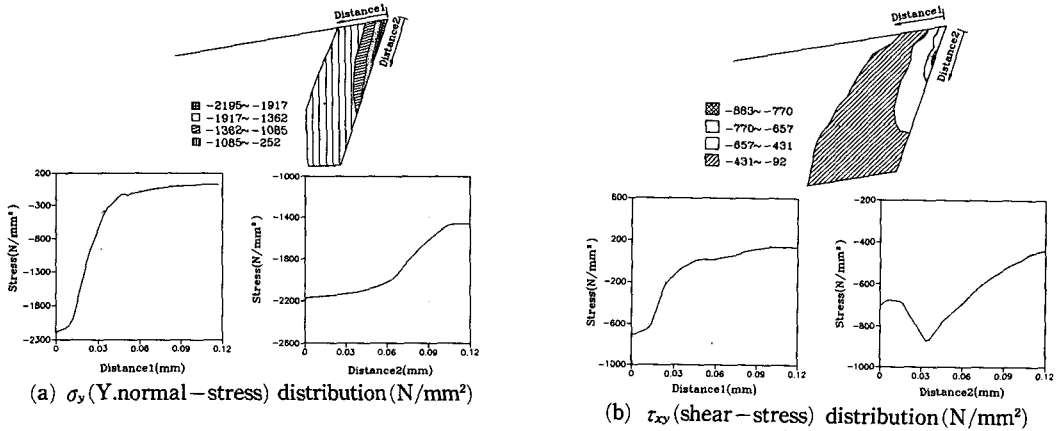


Fig. 13 Results of cutting stress analysis (cond. I)

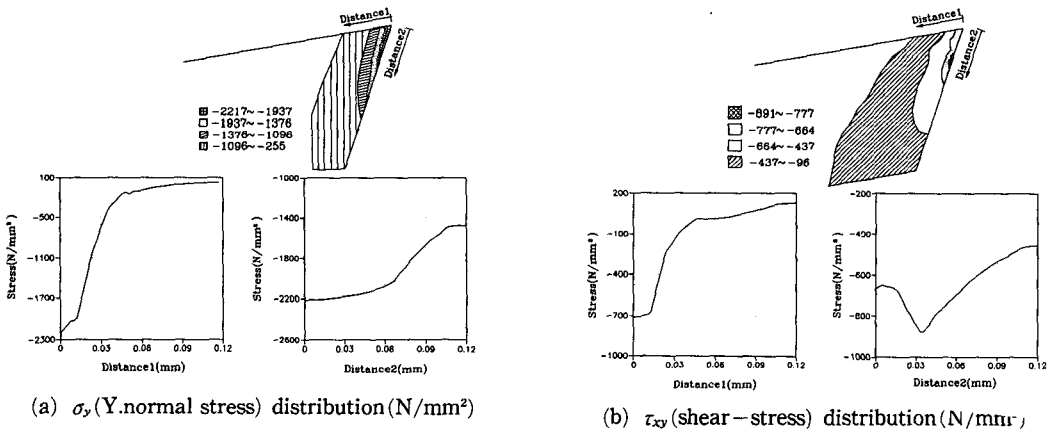


Fig. 14 Results of cutting stress analysis (cond. II)

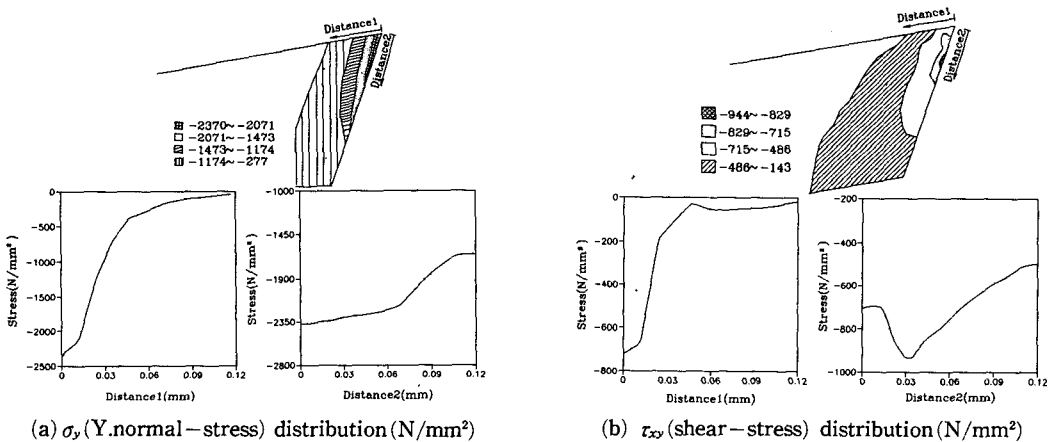
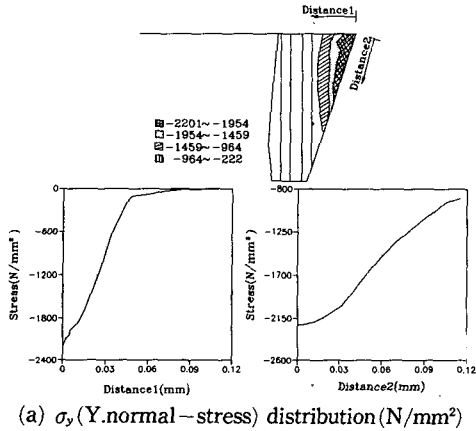
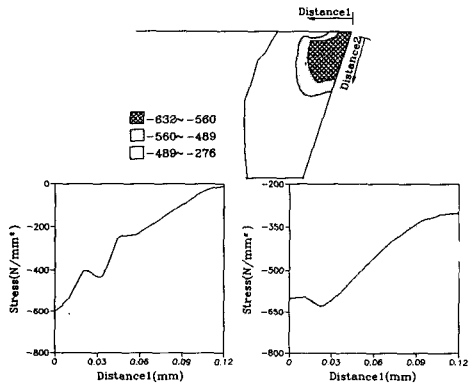


Fig. 15 Results of cutting stress analysis (cond. III)



(a)  $\sigma_y$  (Y.normal-stress) distribution (N/mm<sup>2</sup>)



(b)  $\tau_{xy}$  (shear-stress) distribution (N/mm<sup>2</sup>)

Fig. 16 Results of cutting stress analysis(cond. IV)

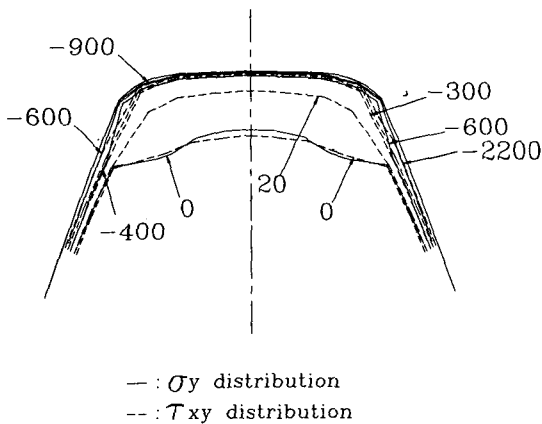


Fig. 17  $\sigma_y$  (Y.normal-stress) and  $\tau_{xy}$  (shear-stress) distribution (N/mm<sup>2</sup>) on rake face

것이다. 위와 같은 피로실험, 결손실험 그리고 절삭인선의 응력해석결과에 의하면 절삭인선에서의

전단응력값이 피로실험에 의한 결과에 따라 모두 100000 cycles이내에서 파괴가 일어남을 알수있다. 그러나 절삭가공시에 미치는 충격과 온도상승등에 의하여 피로실험에 의한 결과보다 빠르게 칩핑이 일어남이 관찰되었다.

즉, 절삭력에 의한 결손예측의 가능성을 인선첨단부위 0.01 mm까지는 전단강도의 90%정도값을 나타냈고, 0.01~0.03 mm에서 전단응력값이 급속히 상승하여 0.1 m부근에서는 0에 가까운 값으로 나타남을 볼 수 있다. 즉 결손의 위험이 높은 부위는 인선부근이며 그외는 비교적 안정되었음을 알 수 있다. Fig. 17에 절삭조건 I의  $\sigma_y$ 와  $\tau_{xy}$ 등고선을 나타내었다. 이것은 응력해석결과를 경사면에서 본 것이다. 경사면을 나타내는 등고선이 형성되어 이 부분이 가장 약한 부분임을 알 수 있다.

### 5. 결론

(1) 인블류우트 절삭 가공시 절삭날내에 생기는 응력분포를 구한 결과 경사면에서의 응력값이 가장 높았고 내부로 향할수록 급격히 감소하였다.

(2) 절삭인선 부근에서 압축강도에 가까운 압축 응력이 작용하여 미세결손이 절삭 초기에서부터 연속적으로 발생하였고, 그때의 전단응력값은 전단강도값의 80~90%의 값을 나타내고있다. 절삭인선의 경사면상에서 결손의 위험이 가장 큰 부분은 절삭인선 끝과 측면부분이 교차하여 곡률값을 갖는 부분임을 응력등고선에 의하여 알수있다.

(3) 인선마멸과 결손이 발생함으로 인해서 절삭력은 10~30%증가하였다. 절삭력 파형은 매우 거칠고 불규칙한 형상을 나타내었으며 파형의 폭도 10~50%증가 하였다.

(4) 인블류우트 커터에 의한 가공 시뮬레이션을 한 결과 절삭조건에 맞는 비절삭저항값을 구할 경우 정확한 절삭력 예측이 가능하였음을 알수있었다.

### 참고문헌

(1) Shirakashi, T., Ihara T. and Usui, E., 1980, "Analytical Prediction of Cutting Edge Chipping in Interrupted Turning Operation," JSPE, Vol.46, No.4, pp. 429~435.  
 (2) Kitagawa, T., Shirakashi T. and Usui, E., 1976,

- "Characteristic Equation of Crater Wear," JSPE, Vol.42, No.12, pp.1178~1183.
- (3) Shirakashi, T., Ihara T. and Usui, E 1987, "Analytical Prediction of Chipping Occurrence of Carbide Tool in Interrupted Turning Operation with Temperature Rise," JSPE, Vol.53, No. 10, pp.1589~1595.
- (4) Usui, E., Kitagawa T. and Shirakashi, T., 1977, "Prediction on Crater Wear of Carbide Tool through Simulation Analysis," JSPE, Vol.43, No. 10. pp. 1211~1217.
- (5) Umezaki, Y., Furumiya Y. and Suzuki, T., 1991, "The Numerical Analysis of Hobbing Torques," JSME, Vol.48, No.433, pp.1501~1510.
- (6) Usui, E., Shirakashi, T. and Kitagawa, T. 1978, "Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process," Trans. of the ASME, Vol. 100, pp.236~243.
- (7) Shirakashi, T., Ihara T. and Usui, E. 1990, "Analytical Prediction of Wear and Chipping Occurrence of Carbide Tool in Interrupted Turning," JSPE, Vol.56, No.03, pp. 515~520.