

밀링 공정시 공구 파손 검출 (Ⅱ)

- 제 2 편: 주축모터 전류를 이용한 밀링의 황삭 가공 중 공구 파손 검출 -

김기대*, 이강희**, 주종남***

Tool Fracture Detection in Milling Process (Ⅱ)

-Part 2: Tool Fracture Detection in Rough Milling Using Spindle Motor Current-

Gi D. Kim*, Kang H. Lee**, Chong N. Chu***

ABSTRACT

Dynamic cutting force variations in milling process were measured indirectly using spindle motor current. Magnitude of the spindle motor current is independent of cutting direction. Quasi-static sensitivity of the spindle motor current is higher than that of the feed motor current. Dynamic sensitivity of the spindle motor current is lower but cutting force was correctly represented by spindle RMS current in rough milling. In rough milling, chipping and tool fracture were well detected by the proposed tool fracture index using spindle motor current.

Key Words : Spindle motor RMS current (주축모터 실효 전류), Rough milling (밀링 황삭 가공), Dynamic sensitivity (동적 민감도), Tool fracture index (공구 파손 지수), Chipping (칩핑), Tool fracture (공구 파손).

1. 서 론

자동화/무인화 가공의 궁극적인 목적은 생산성의 향상이며 이러한 목적을 위한 절삭상태 감시 시스템(Monitoring & Diagnosis system)이 갖추어야할 조건은 다음 3 가지로 요약된다.

첫 번째 조건은 시스템의 "신뢰성"이다. 감시하고자 하는 기계의 오작동(malfunction)을 정확하게 검출하고 진단하는 것이 중요하며 이를 위해 센서의 민감도(sensitivity), 주파수 대역폭(bandwidth), S/N(signal to noise) 비율 등이 감시의 목적에 부합되는 센서를 선택해

야하며 적합한 필터링(filtering) 장치, 데이터 습득 장치 등을 사용해야 한다.

두 번째 조건은 시스템의 "실용성"이다. 현재까지 절삭 상태 감시 시스템을 구축하기 위한 연구가 많이 수행되어 왔으나 실제 산업 현장에서 적용할 수 있는 연구 결과는 매우 드문 실정이다. 또한 일부 선진국에서 공작기계에 적용하고 있는 상태 감시 시스템에서 공작기계의 이상 상태를 판별하는 한계치(threshold)의 설정 등에 있어서 신뢰성에 문제가 있다고 보고되고 있다.

세 번째 조건은 "경제성"이다. 시스템의 신뢰성을 높이려면 센서 및 부대 장치의 성능이 향상되어야하고 이러한

* 삼성자동차 기술연구소
 ** 서울대학교 대학원 기계설계학과
 *** 서울대학교 기계설계학과

상태 감시 장치의 성능은 곧 전체 절삭상태 감시 시스템의 가격과 밀접한 관계가 있다.

현재까지 보고된 바로는 절삭 공정의 상태를 가장 잘 나타내어 주는 센서는 절삭력 및 절삭토크를 측정할 수 있는 공구동력계(tool dynamometer)인 것으로 알려져 있다. 그러나 이 센서를 사용하는 것은 그 신뢰성 면에서는 만족할 수 있으나 실용성 및 경제성 측면에서는 적당하지 않다. 그러나 절삭상태 감시 시스템을 구축하기 위해서 전류 센서를 사용하면, 절삭 공정에 아무런 방해를 주지도 받지도 않으며, 센서의 위치가 절삭 위치와 떨어져 있으므로 센서가 안정되고, 또한 가격이 저렴하기 때문에 시스템의 실용성 및 경제성 조건을 동시에 만족시켜 준다. 잡음(noise)을 제거하는 문제, 낮은 주파수 대역폭을 극복하는 문제 등 전류 센서의 문제점을 극복하기 위하여 많은 연구를 하고 있으며 차츰 센서의 성능 향상과 절삭공정 감시 기술의 향상으로 센서의 신뢰성이 높아져 가고 있는 추세이다. 이러한 이유로 인해서 최근 들어 전류 센서를 사용하여 절삭 공정의 이상 현상을 검출 및 진단하기 위한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.

절삭 공정을 감시하기 위한 전류 신호로는 주파수 대역폭이 상대적으로 비교적 높은 장점을 가진 이송모터 전류 신호와 절삭방향에 관계없이 절삭토크 및 절삭력을 간접적으로 측정할 수 있는 주축모터 전류 신호가 있으며 각각의 장, 단점을 파악한 후에 감시의 목적에 적절한 전류 신호를 선택하여야 한다. 현재까지 이송모터 전류를 이용하여 절삭력 및 절삭토크를 간접 측정하고 절삭 공정을 감시한 연구는 비교적 많이 수행되었으나, 본 연구에서 사용한 주축모터를 이용하여 절삭 공정을 감시한 연구는 상대적으로 많이 수행되지는 않았다.

주축모터를 이용하여 절삭 공정을 감시한 연구를 살펴보면 Stein⁽¹⁻²⁾ 등은 모터가 정상상태(steady-state)일 때 DC 및 AC 유도 주축모터 시스템에서 로터의 인입 동력(power)과 절삭토크와의 선형적인 관계를 밝혔으며, Park 과 Settineri⁽³⁾ 는 3 상의 유도 모터에서 주축의 동력, 동력의 미분값, 주축 회전 속도, 기어비를 측정하여 절삭토크를 예측하였다. Tarnq⁽⁴⁾ 등은 3 상의 유도모터 전류로서 드릴 공정 중 공구 파손을 검출하였으며, Man-nan 과 Broms⁽⁵⁾ 는 주축모터와 이송모터의 동력과 전류를 측정하여 절삭 공정을 감시하고 절삭력을 제어하는 문제를 개략적으로 간단히 언급한 바 있다. 그러나 이들 연구는 대부분 드릴 공정에 한정되었으며 또한 주축모터를 이용하여 절삭토크를 예측하는데에만 그쳤다. 김 기대⁽⁶⁾

등은 주축모터 전류를 이용하여 절삭력을 간접적으로 측정 한 후 이송속도 제어를 통하여 공구 1 회전당 최대 절삭력을 일정하게 추정 제어하였다.

본 연구에서는 절삭 방향과 관계없이 절삭력을 예측할 수 있는 주축모터 전류의 동적 민감도 및 절삭력의 추종 정도를 살펴보고, "밀링 공정시 공구 파손 검출 - 제 1 편: 공구 파손 지수의 도출" 에서 정의한 공구 파손 지수 (Tool Fracture Index)를 이용하여 밀링의 황삭 가공 중 공구의 파손을 검출하는 연구를 수행하였다.

2. 실험 장치의 구성

이 장에서는 주축모터 전류와 이송모터 전류의 비교를 위한 실험 장치와 주축모터 전류를 이용하여 공구 파손 검출을 위한 실험 장치에 대해 소개하며 그 전체적인 구성도를 Fig. 1 에 나타내었다.

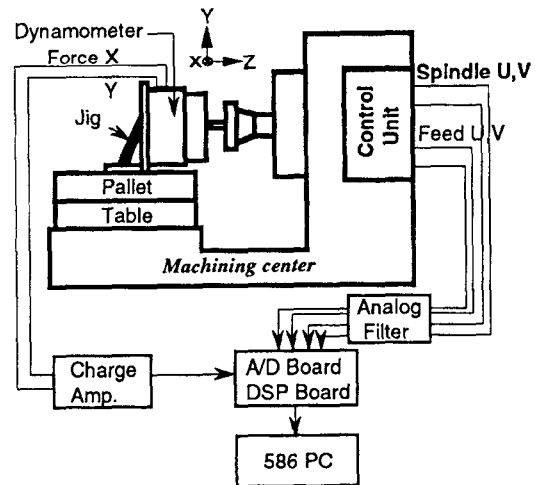


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

실험에서 사용된 공작기계는 (주) 통일중공업의 수평형 머시닝센터 MCH-10 이다. MCH-10 에서 이송모터는 영구자석형 동기모터(permanent magnet synchronous motor)인 FANUC 20S 을, 주축모터는 농형 유도모터(squirrel-cage induction motor)인 FANUC 15S (최고 속도: 4,500 rpm)을 장착하고 있다.

절삭력(F_x , F_y)을 측정하기 위한 공구동력계로 Kistler 9257B를 사용하였으며 측정된 신호는 Kistler 5019A 4채널 전하 증폭기(charge amplifier)를 통하여 필터링

(filtering)을 하고 및 스케일(scale)을 조정하여 데이터 습득장치에 전압 형태로 입력된다. 전하 증폭기에서 300 Hz의 LPF(low pass filter)를 사용하여 고주파수의 잡음을 제거하였다.

데이터 습득장치(data aquisition system)로는 2 가지를 사용하였는데, 주축모터 전류와 이송모터 전류를 비교하기 위하여 아날로그 입력 채널이 많은 AD2210 AD 보드를 사용하였고, 실시간 공구 파손 검출을 위하여 TMS320C32 DSP 보드를 사용하였다.

주축모터와 이송모터의 전류를 측정하기 위하여 주축 및 이송모터 동력의 인입선 중 U 상과 V 상 전류 공급선에 홀센서(Hall sensor: 100A/4V, 50A/4V)를 설치하였다. 홀센서의 설치 위치 및 형상이 Fig. 2 에 나타나 있다. 전류소스(current source)를 사용하여 홀센서의 주파수 대역폭을 측정한 결과 1 kHz 까지 주파수대역에 아무런 문제가 없었으며(Fig. 3), 실제 실험에서는 고주파수의 잡음을 제거하기 위하여 주축모터에서는 차단주파수(cutoff frequency)가 200 Hz, 이송모터에서는 차단주파수가 50 Hz인 아날로그 필터를 사용하였다.

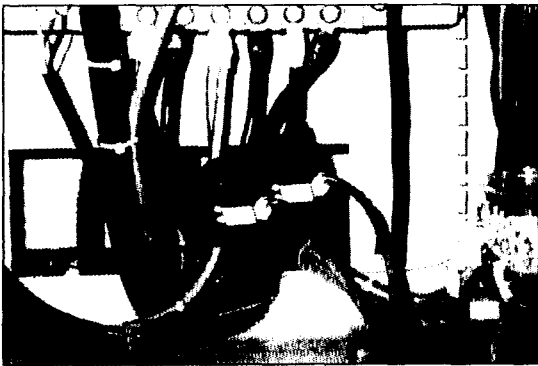


Fig. 2 Location of current hall sensor

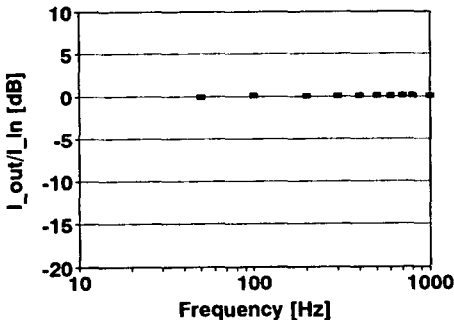


Fig. 3 Bode plot of current hall sensor used in experiments

다양한 절삭 조건하에서 공구의 파손을 검출하는 실험을 하기 위하여 공작물 및 절삭 공구 종류를 다양하게 하였다. 먼저 공작물의 종류를 일반 탄소강인 SM45C 와 특수강인 SKD11, 두 종류를 사용하였고, 절삭 공구로는 직경이 20 mm 인 2 날 초경 평엔드밀과 직경이 100 mm 인 정면 밀링으로 3 날과 6 날 인서트(inserts)를 사용하였다. 또한 실제적인 공구 파손의 형태를 얻기 위하여 평엔드밀 및 정면 밀링의 인서트에 방전 가공을 하지 않은 채 공구를 파손시켜 실제의 파손 현상과 가깝게 하였다.

3. 주축모터 전류의 동적 민감도 및 절삭력 추종

3.1 동적 민감도 (Dynamic sensitivity)

3 상의 교류 전류에서 동가의 직류 전류의 성분을 도출하기 위하여 식 (1) 과 같은 3 상 교류 전류의 실효값(RMS: root mean square)을 사용하였다. 주축모터 전류의 실효값은 밀링 가공 중 절삭토크 및 절삭력과 선형적인 관계를 가진다.⁽¹⁶⁾

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_u^2 + I_v^2 + I_w^2}{3}} \quad (1)$$

과도한 절삭력으로 인한 공구의 과부하를 검출하기 위해서는 공구 1 회전당 최대절삭력의 절대적인 크기가 모터 전류 신호에 반영되는 정도가 중요한 값이다. 주축 회전 속도가 증가하여 이물림 주파수 (tooth passing frequency) 가 증가함에 따라 이송계에서는 이러한 준정적 민감도 (quasi-static sensitivity) 가 낮아지는 반면, 주축계에서는 오히려 높아지는 것으로 밝혀졌다.⁽¹⁶⁾

그러나 공구의 파손 등과 같은 순간적인 변화를 수반하는 패턴을 검출하기 위해서는 주파수 대역폭이 높은 센서를 사용하여 신호의 동적인 특성 변화를 측정해야할 필요성이 있다. 2 날의 정면 밀링으로 절입각을 45° 로 절삭하여 이물림 주파수에 따라 변화하는 동적 절삭 공정을 반영하는 정도를 측정하였으며 다음과 같은 과정으로 이송계와 주축계의 동적 민감도를 측정하였다.

주축 회전 속도만을 변화시켜가면서 이송계에서는 공구 1 회전당 이송분력(F_x)의 최대 PV 값(최대 극대값과 최소 극소값의 차이값)에 대한 동일 방향의 이송모터 전류(I_f) RMS의 최대 PV 값의 비율(rate)의 평균값을 구하였고, 주축계에서는 공구 1 회전당 절삭토크(T_c)의 최대 PV 값에 대한 주축모터 전류(I_c) RMS의 최대 PV 값의

비율의 평균값을 구하여 밀링 공정 중 이송계와 주축계의 동적 민감도(dynamic sensitivity)"라고 정의하였으며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Dynamic sensitivity} = & \\
 & \frac{1}{\text{rev}} \sum_{i=1}^{\text{rev}} \frac{\max. I_{rms}_f[i] - \min. I_{rms}_f[i]}{\max. F_x[i] - \min. F_x[i]} \quad (\text{In feed drive system}) \\
 & \frac{1}{\text{rev}} \sum_{i=1}^{\text{rev}} \frac{\max. I_{rms}_s[i] - \min. I_{rms}_s[i]}{\max. T_c[i] - \min. T_c[i]} \quad (\text{In spindle drive system})
 \end{aligned} \quad (2)$$

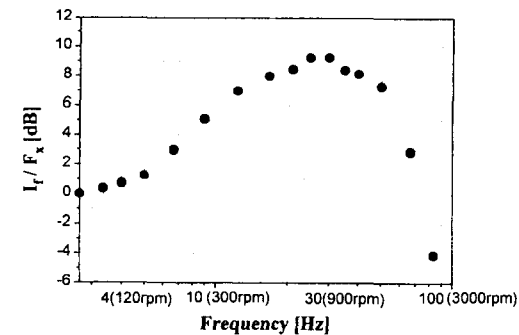
Figure 4 에 이송계와 주축계의 동적 민감도를 나타내었다. 이송계에서는 이물림 주파수가 약 50 Hz 이내에서는 이송모터 전류로서 대체로 정확하게 절삭력이 반영되었지만, 주축계에서는 공구에 직접 부하되는 절삭력에 의한 토크가 주축과 기어, 벨트 전달 장치부를 경유함으로써 변형된 전달토크가 부하토크로 인가됨으로써 이물림 주파수가 약 6 Hz 이내에서만 주축모터 전류로서 대체로 정확하게 절삭력이 반영됨을 알 수 있어, 동적 민감도 면

에 있어서는 이송모터 전류가 주축모터 전류보다 훨씬 높음을 알 수 있다.

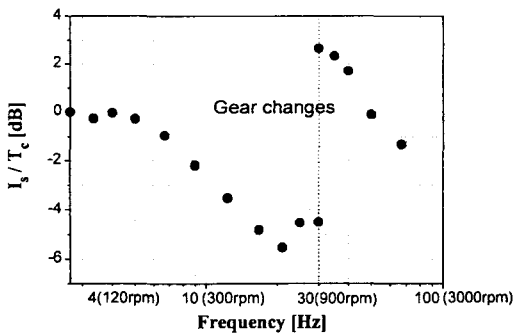
3.2 주축모터 전류의 절삭력 추종

앞 절에서 밝힌 대로 절삭력을 간접 측정하기 위하여 모터 전류를 이용함에 있어서 동적민감도 측면에서는 이송모터 전류가 훨씬 유리하다. 하지만 이송모터 전류는 동일 방향의 절삭력만을 예측할 수 있다는 한계점을 가지고 있는 반면 주축모터 전류는 준정적민감도(Quasi-static sensitivity)가 높고, 또한 절삭 방향에 관계없이 절삭력을 예측할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁽¹⁶⁾ 또한 모터 전류를 이용하여 절삭력을 간접 측정하고 절삭력을 일정하게 추종 제어하기 위해서는 모터 전류와 절삭력 사이의 선형적인 관계가 보장되어야 하지만, 공구의 파손을 검출하기 위하여 모터 전류로서 절삭력을 예측하는데 있어서는 절삭력의 절대적인 크기가 중요한 것이 아니라 모터 전류로 절삭력의 상대적인 변화가 반영되는 정도가 중요하다.

Figure 5 는 정면 밀링으로 상향 밀링과 하향 밀링시에 공구동력계로 x, y 방향 절삭력 신호(F_x , F_y)를 측정

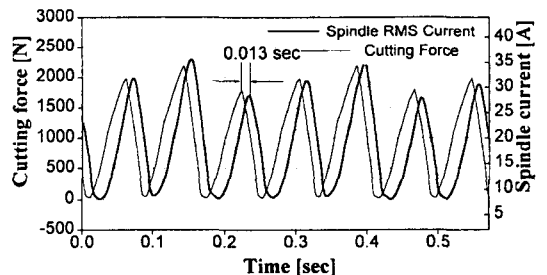


(a) Feed drive system

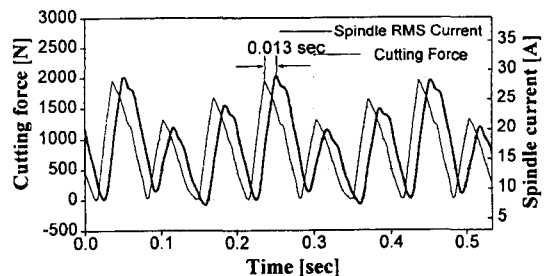


(b) Spindle drive system

Fig. 4 Dynamic sensitivities of feed and spindle drive systems (Facemill (2 teeth, ϕ 100 mm), 0.15 mm/tooth, DOC = 2.5 mm)



(a) Up Milling (3 teeth, 250 rpm, 0.53 mm/tooth, DOC = 3 mm)



(b) Down Milling (3 teeth, 300 rpm, 0.44 mm/tooth, DOC = 2 mm)

Fig. 5 Similarity between cutting force and spindle RMS current

한 후 이들의 합력인 절삭력(F_c)을 나타내었고 또한 홀센서로 주축모터 전류 신호(U상, V상)를 측정하여 이의 실효값(I_{rms})을 나타낸 것이다. 절삭부하의 변화로 인한 절삭토크 및 절삭력의 변화는 주축과 기어 등 전달 장치부를 경유하여 주축모터 전류로 나타나므로 약 0.013 초 정도의 시간 지연(time delay)을 가지고 있었으나 절삭력의 변화 양상과 주축모터 전류 RMS 값의 변화 양상은 거의 일치하였다. 실험 결과 선형성이 보장되지 않더라도 이물림 주파수가 약 20 Hz (6날 밀링시 200 rpm, 3날 400 rpm, 2 날 600 rpm) 이내에서는 주축모터 전류의 RMS 신호는 절삭력의 상대적인 변화를 충분히 반영하는 것으로 나타났다.

그러나 Fig. 6에 나타난 바와 같이 절삭력이 낮게 부하될 시에는 주축모터 전류로 절삭력의 변화를 정확하게 반영하지 못하고 왜곡된 형태로 나타났다.

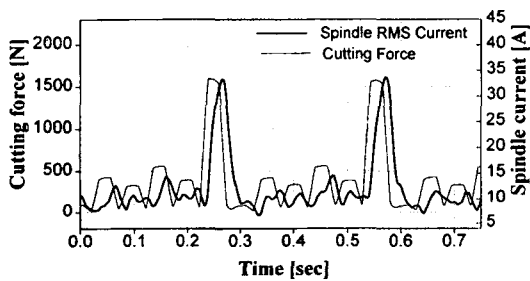


Fig. 6 Spindle RMS current distortion with severe run-out and light cutting conditions (6 teeth, 200 rpm, 0.083 mm/min, DOC = 2 mm)

실험 결과 낮은 주축 회전 속도로 가공하여 이물림 주파수가 낮은 경우이라도 공구의 런-아웃이 심하여 한 날의 절삭부하가 적은 경우이거나 절삭깊이, 날당 이송 등 절삭 조건이 경미하여 각 날당 부하되는 절삭력이 약 500 N 이하가 될 때는 각 날의 부하가 주축모터 전류에 잘 반영되지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 일반적으로 실제 산업 현장에서는 정면 밀링이나 평엔드밀로 황삭(roughing) 가공을 할 때는 비교적 낮은 주축 회전 속도로 가공하며, 절삭깊이 및 날당 이송을 비교적 크게 하여 가공한다. 그러므로 밀링의 황삭 가공시에는 낮은 이물림 주파수 및 각 날당 500 N 이상이라는 두가지 조건을 동시에 만족하므로 주축모터 전류 신호는 절삭력을 잘 추종한다고 할 수 있다.

4. 공구 파손 실험 및 결과

다양한 절삭 조건에서 공구 파손 실험을 하였다. 공구 동력계로 측정된 절삭력 신호와 홀센서로 측정된 주축모터 전류 신호 RMS 값의 변화를 살펴보았으며 칩핑(chipping), 미소 파손(fracture), 큰 파손 등에 따른 공구 파손 지수(TFI)의 크기와 변화 양상을 살펴보았다. Figure 7에 공구가 파손된 형태가 나타나 있다.

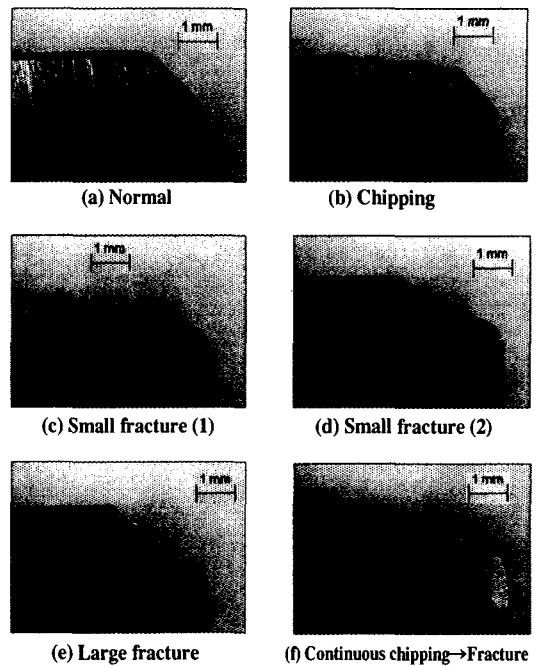
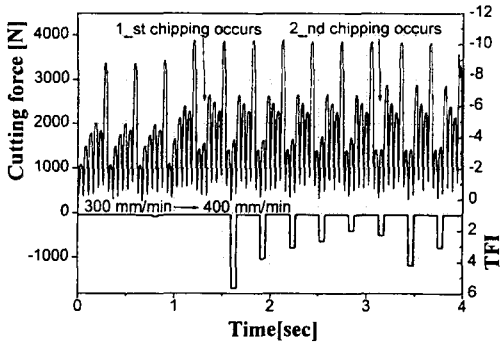


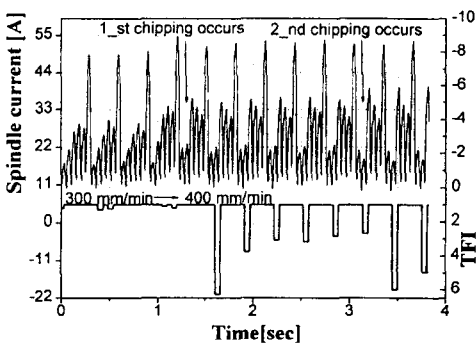
Fig. 7 Tool fracture pattern

4.1 칩핑(chipping)의 발생시 공구 파손 지수의 변화

Figure 8는 6 날 정면 밀링으로 공작물(SKD11)을 절삭깊이 3 mm, 주축 회전 속도 200 rpm으로 하여 이송속도를 점점 증가시켜가면서 절삭하다가 이송속도가 300 mm/min에서 400mm/min로 증가하는 시점에서 공구에 칩핑이 발생한 경우(사진: Fig. 7(b))에 대해 절삭력 및 주축모터 RMS 전류의 변화, 그리고 이러한 공구 상태의 변화에 대한 TFI의 변화를 나타낸 것이다. 칩핑의 발생에 의하여 공구의 런-아웃에 의한 각 날당의 절삭 부하의 차이보다도 훨씬 더 작은 절삭 부하의 변화가 발생하였다. TFI 값의 변화를 살펴보면 공구의 상태가



(a) Cutting force and TFI variations



(b) Spindle current and TFI variations

Fig. 8 Cutting force, spindle current and TFI variations (Chipping, DOC = 3 mm, 0.25→0.33 mm/tooth, 200 rpm, 6 teeth, SKD11)

변함이 없는 한 "1" 또는 이에 가까운 값을 유지하다가 칩핑이 발생한 직후부터 비교적 큰 값이 주기적으로 나타났다. 이후 TFI 는 감소하다가 두번째 칩핑 발생으로 인해 다시 커졌다.

주축모터 전류는 절삭력을 그대로 반영하였으므로 주축모터 전류 RMS 로 구한 TFI 와 절삭력 신호로 구한 TFI 의 크기 및 경향은 비슷하게 나타났다.

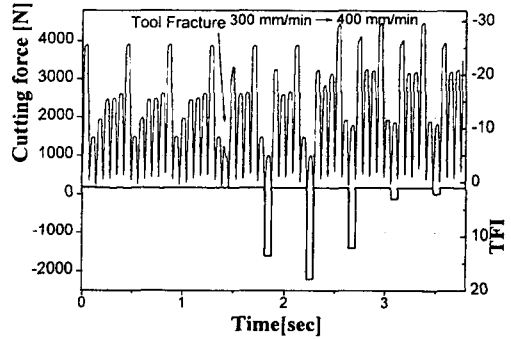
4.2 공구의 파손(fracture)시 공구 파손 지수의 변화

Figure 9 에서 Fig. 12 까지는 공구에 파손이 발생하였을 때의 절삭력과 주축모터 전류의 RMS, 그 때의 TFI 의 값의 변화를 나타낸 것이며 각각의 절삭 조건은 Table 1 과 같다.

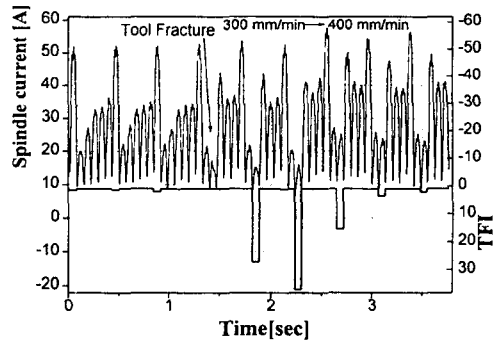
모든 경우에 절삭력의 변화와 주축모터 전류의 RMS 변화는 유사하였고 파손된 직후 큰 값의 TFI 가 주기적으로 나타나고 있다. 미소 파손이 발생하였을 경우에는 절삭력 신호로 TFI 를 구했을 때와 주축모터 전류로 TFI

Table 1 Cutting conditions for tool fracture experiments

	공구 (직경, 날수)	주축회전속도 (RPM)	날당 이송 (mm/tooth)	절삭깊이 (mm)	가공재료	파손 형태 (사진)
I	정면 밀링 (Fig. 9) (100 mm, 6)	150	0.33→0.44	3	SKD11	미소 파손 (Fig. 7-c)
II	정면 밀링 (Fig. 10) (100 mm, 3)	250	0.53→0.67	2	SM45C	미소 파손 (Fig. 7-d)
III	정면 밀링 (Fig. 11) (100 mm, 3)	300	0.56	2	SM45C	파손 (Fig. 7-e)
IV	평연드밀 (Fig. 12) (20 mm, 2)	400	0.3125	4	SM45C	파손



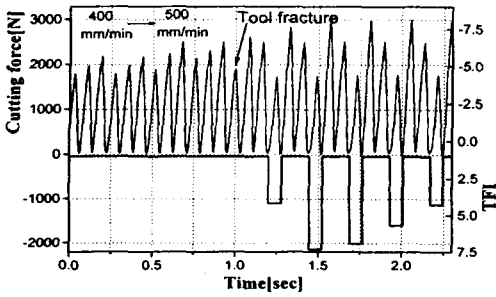
(a) Cutting force and TFI variations



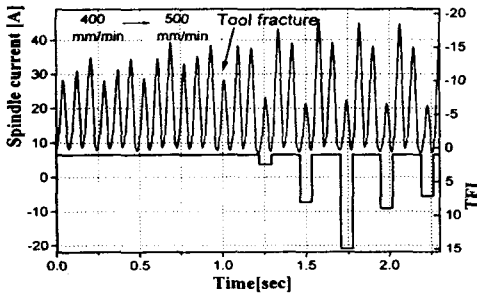
(b) Spindle current and TFI variations

Fig. 9 Cutting force, spindle current and TFI variations (Small fracture, DOC = 3 mm, 0.33 mm/tooth, 150 rpm, 6 teeth, SKD11)

를 구했을 때 그 크기 및 경향이 비슷하게 나타났다. 그러나 공구가 크게 파손되었을 경우에는 파손된 날이 거의 절삭에 참여하지 않아 절삭 부하가 500 N 보다도 작게 되어 절삭력의 변화가 주축모터 전류로 제대로 반영되지 않기 때문에 실제보다 더 작은 절삭 부하로 인식하게 된다. 이 때 주축모터 전류로 구한 TFI 는 절삭력 신호로 구한 TFI보다 약 10³ 배 더 큰 값을 나타내었다.

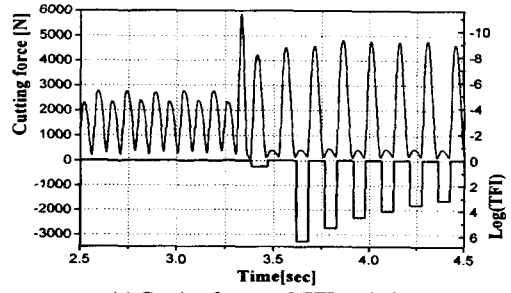


(a) Cutting force and TFI variations

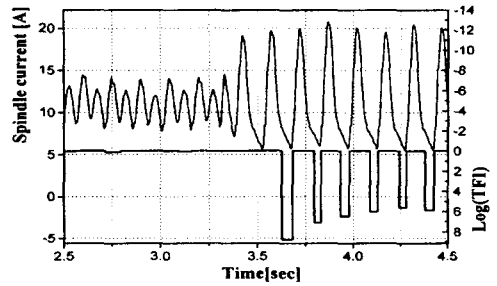


(b) Spindle current and TFI variations

Fig. 10 Cutting force, spindle current and TFI variations (Small fracture, DOC = 2 mm, 0.67 mm/tooth, 250 rpm, 3 teeth, SM45C)

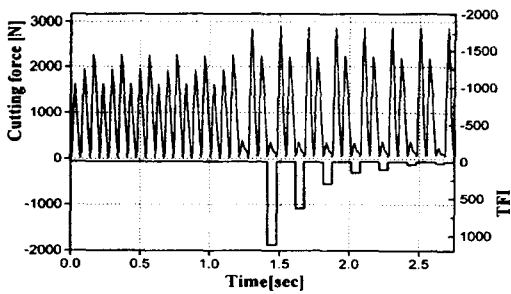


(a) Cutting force and TFI variations

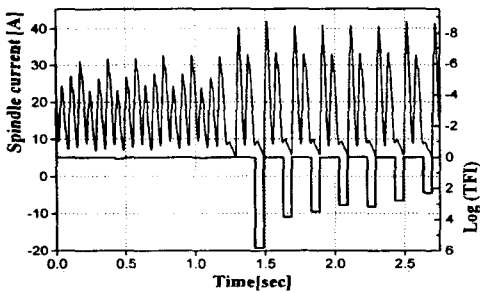


(b) Spindle current and TFI variations

Fig. 12 Cutting force, spindle current and TFI variations (Large fracture, DOC = 4 mm, 0.3125 mm/tooth, 400 rpm, 2 teeth flat end mill, SM45C)



(a) Cutting force and TFI variations



(b) Spindle current and TFI variations

Fig. 11 Cutting force, spindle current and TFI variations (Large fracture, DOC = 2 mm, 0.56 mm/tooth, 300 rpm, 3 teeth, SM45C)

4.3 연속적 칩핑(Continuous chipping) 발생시 공구 파손 지수의 변화

Figure 13 은 공작물(SKD11)을 테이퍼로 가공한 후 날당 이송을 0.44 mm/tooth 으로 고정시켜놓고 절삭깊이를 증가시켜가면서 절삭할 때 공구에 연속적으로 칩핑이 발생하였을 경우이다(사진: Fig. 7-(f)). 공구에 칩핑이 발생한 후에도 한 번 칩핑이 발생한 날의 강도가 약해져서 칩핑이 발생한 채로 더 절삭함에 따라 칩핑된 날에서 계속적으로 칩핑이 발생하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 칩핑된 날(화살표로 표시)의 절삭 부하가 계속 줄어들다가 약 공구 10 회전 후에는 완전히 절삭 부하를 받지 않을 정도로 칩핑이 심화되었으며 결국 파손되었다. 이 경우의 TFI 의 값의 변화를 살펴보면 처음 약간의 칩핑이 발생하였기 때문에 정상적인 공구의 상태와 크게 차이가 나지 않으므로 TFI 의 값은 작은 값을 나타낸다. 그러나 단속적인 칩핑과는 달리 연속적으로 조금씩 칩핑이 심화되어가면서 현재까지의 공구 상태와 조금씩 달라지기 때문에 TFI 의 값은 줄어들지 않고 어느 정도의 값을 계속 유지하였다.

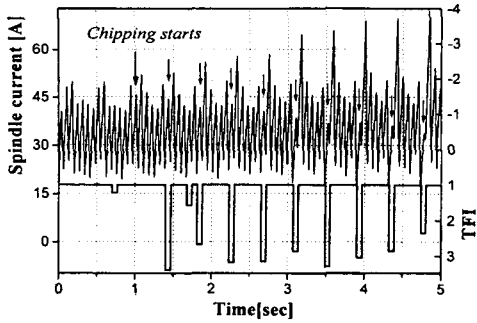


Fig. 13 Spindle current RMS & TFI variations (Continuous chipping, 0.44 mm/tooth, 150 rpm, 6 teeth face milling, SKD11)

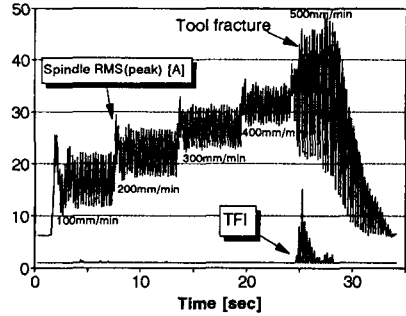


Fig. 14 Spindle current (peak per rev.) and TFI variations during transient cutting (DOC = 2 mm, 0.13→0.27→0.4→0.53→0.67 mm/tooth, 250 rpm, 3 teeth face milling, SM45C)

4.4 과도 절삭 상태일 때의 공구 파손 지수의 변화

TFI는 공구의 상태 즉 공구가 파손된 정도만을 나타내야 하며 절삭 조건의 변화에는 무관하여야 한다. 여기서는 진입(entry) 및 진출(exit) 절삭, 가공 중 구멍(hole)과 슬롯(slot)을 지나는 경우 및 이송속도의 변경 등 과도 절삭 상태인 경우 주축모터 전류의 변화 및 TFI의 변화를 살펴보았으며, 각각의 절삭 조건은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 Cutting conditions for transient cutting experiments

	공구 (직경, 날수)	주축회전 속도(RPM)	이송속도 (mm/min)	절삭깊이 (mm)	과도 절삭 조건
I (Fig. 14)	정면 밀링 (100 mm, 3)	250	100→200→300 →400→500	2	이송속도 변경
II (Fig. 15)	평엔드밀 (20 mm, 2)	400	160	5	φ 13 mm hole 을 지남
III (Fig. 17)	정면 밀링 (100 mm, 3)	300	200	3	φ 40 mm hole 과 20 mm slot 을 지남

Figure 14는 Case I의 절삭조건으로 절삭하다가 이송속도가 500 mm/min 일 때 미소 파손이 발생한 경우에 대해 진입 절삭에서부터 진출 절삭까지 측정된 주축모터 전류의 공구 1 회전당 최대 RMS 전류의 변화 및 이때의 TFI의 값을 나타낸 것이다. 이송속도가 증가하여 전류치의 변화가 나타났지만 공구가 파손되고 난 뒤에 나타날 수 있는 신호의 변화가 아니라고 판단하였으므로 "제1편 - 3.2절 공구 파손 지수의 최종 결정"에 의해 TFI의 값을 "1"로 환원해 주어 이송속도의 변화로 인한 TFI의 변화가 없었고 공구 파손 직후에 비로소 TFI가 크게 주기적으로 나타났다. Figure 15는 Case II의 절삭 조건에 대해 공구 1 회전당 최대 RMS 전류 및 이때의

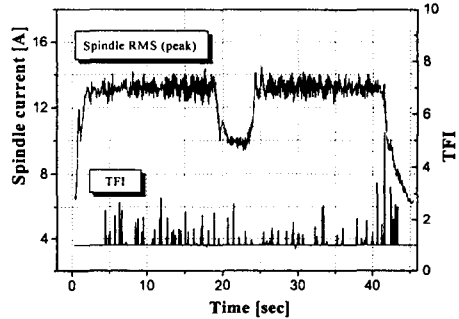


Fig. 15 Spindle current (peak per rev.) and TFI variations during transient cutting (DOC = 5 mm, 0.2 mm/tooth, 400 rpm, 2 teeth flat endmill, SM45C)

TFI의 값을 나타낸 것으로 신호에 포함되어 있는 잡음으로 인한 불규칙적인 값 이외는 주기적으로 큰 값의 TFI는 나타나지 않았다. 또한 본 논문의 "제 1편"에서 밝힌 대로 2 날 절삭인 경우 날수가 많은 공구에 비해 TFI 값이 커지므로, Case I (Fig. 14)에 비해 Case II (Fig. 15)의 경우가 잡음의 영향도 더 많이 받고 있음을 알 수 있다. Case III의 절삭 조건에 대한 공구 및 공작물 형상을 Fig. 16에 나타내었으며, 이러한 경우에 대한 주축모터 RMS 전류 및 TFI의 변화를 Figure 17에 나타내었다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 진입 및 진출 절삭시, 이송속도의 변화시, 구멍 및 슬롯을 지나는 경우 등의 과도 절삭시에도 공구의 상태가 변함이 없는 한 TFI는 "1" 또는 잡음의 영향에 의한 비주기적인 작은 값을 나타내고 있다. 그러므로 본 연구에서 도출한 공구 파손 지수 (TFI)는 절삭 조건의 변화로 인한 과도 절삭과 공구의 파손을 구별할 수 있음을 알았다.

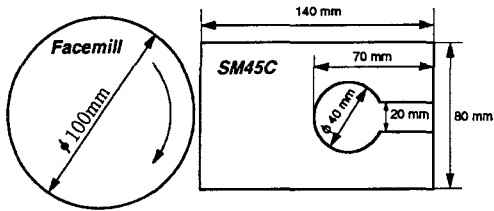


Fig. 16 Tool and workpiece shape for transient cutting

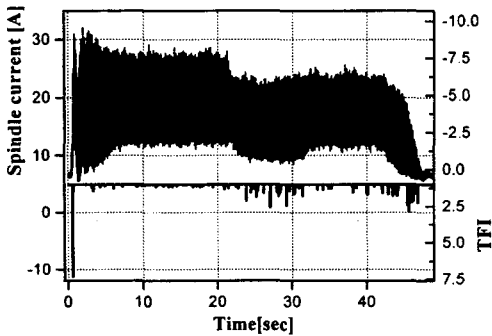


Fig. 17 Spindle current and TFI variations during transient cutting (DOC = 3 mm, 0.22 mm/tooth, 300 rpm, 3 teeth face milling, SM45C)

5. 공구의 상태와 공구 파손 지수와의 관계

앞에서 살펴보았듯이 공구의 상태가 변화하면 TFI의 값이 커진다. 또한 주축모터 전류에서 잡음의 영향으로도 TFI는 변할 수 있다. "제 1편"에서 밝힌 절삭력 모델을 통한 공구 파손 시뮬레이션을 참고로 하고 공구 파손 실험을 통해 주축모터 RMS 전류로부터 구한 TFI와 공구의 상태와의 관계를 정리하면 다음과 같다.

단속적 칩핑 혹은 미소 파손이 발생하면 큰 파손의 발생에 비해 비교적 작은 크기(2 이상 10 이하)의 TFI가 공구 1 회전을 주기로 하여 반복되다가 차츰 감소하였다. 연속적 칩핑이 발생하면 비교적 작은 크기의 TFI가 일정한 시간동안 크기가 감소하는 추세없이 주기적으로 반복되었다. 여기서 TFI의 크기가 10이라는 수치는 절삭력 시뮬레이션을 통해서 날당 이송에 대해 약 37%의 크기로 공구에 파손이 발생한 경우에 해당되는 양이다. TFI의 크기가 감소하지 않고 공구 1 회전을 주기로하여 계속적으로 반복한다면 연속적 칩핑이 발생하고 있다고 판별하고 TFI의 크기가 차츰 감소하면서 주기적으로 나

타난다면 단속적 칩핑 또는 미소 파손이 발생하였다고 판별한다.

공구에 미소 파손이 발생하면 100 이하의 TFI가 주기적으로 나타나다가 차츰 감소하였으며 큰 파손이 발생하였다면 10,000 이상의 큰 TFI가 주기적으로 차츰 감소하면서 나타났다. TFI의 크기가 100이라는 수치는 절삭력 시뮬레이션을 통해서 날당 이송에 대해 약 64%의 크기로 공구에 파손이 발생한 경우에 해당되는 양이다. 그러나 앞에서 설명한 바와 같이 공구가 크게 파손되면 절삭력 시뮬레이션 또는 절삭력 측정 신호를 통해 얻은 값보다 주축모터 전류를 통해 훨씬 큰 값의 TFI를 얻는다. 그러므로 100이하의 TFI가 나타나서 공구 1 회전을 주기로 하여 주기적으로 감소하면서 반복하고 있다면 공구에 미소 파손이 발생하였다고 판별하며, 10,000 이상의 TFI가 나타나서 주기적으로 감소하면서 반복하고 있다면 이는 공구에 큰 파손이 발생하였다고 판별한다.(Table 3)

Table 3 Discrimination of tool condition according to TFI pattern

최대 TFI의 크기	TFI의 변화 형태 (주기: 공구 1회전)	날당 이송에 대한 공구 파손 크기의 비율 -절삭력 시뮬레이션	판별
2-10	불규칙적 (비주기적)	12%~37%	노이즈의 영향
	주기적, 크기의 감소추세 뚜렷		단속적 칩핑 또는 미소파손 발생
10-100	주기적, 감소추세가 거의 없음	37%~64%	연속적 칩핑 발생
	불규칙적 (비주기적)		노이즈의 영향 또는 절삭조건이 경미하여 전류 신호가 왜곡 미소 파손 발생
100-10,000	불규칙적 (비주기적)	64%~91%	전류 신호가 왜곡된 결과
	주기적		파손 발생
10,000 이상	주기적	91% 이상	큰 파손 발생

6. 결론

밀링 공정 중 주축모터 전류를 측정하여 "제 1편: 공구 파손 지수의 도출"에서 새롭게 구성한 공구 파손 검출 알고리즘을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 이송모터 전류의 주파수 대역폭은 50 Hz, 주축모터 전류의 주파수 대역폭은 6Hz로 나타나 주축모터 전류의 동적 민감도(dynamic sensitivity)는 이송모터

전류에 비해 낮았다.

- (2) 한 날당 최대 절삭력이 500 N 이상이 부하되고 이물림 주파수가 20 Hz 이내에서 주축모터 전류의 실효값(RMS value)은 절삭력과의 선형성이 보장되지는 않지만 절삭력의 변화양상을 잘 반영하였다.
- (3) 공구에 칩핑 또는 미소 파손이 발생하였을 때 절삭력 신호 및 주축모터 전류로 구한 공구 파손 지수의 크기 및 변화 양상은 비슷하였으나, 큰 파손이 발생하였을 때 주축모터 전류로부터 구한 지수는 절삭력으로부터 구한 지수에 비해 10^3 배 큰 값을 가졌다.
- (4) "공구 상태 벡터(tool condition vector)", "기준 공구 상태 벡터" 및 "공구 상태 변화 벡터"를 이용하여 도출한 5 가지 요소의 곱으로 나타나는 "공구 파손 지수(tool fracture index)"을 이용하여 진입(entry) 및 진출(exit) 절삭, 이송속도의 변화, 구멍(hole) 및 슬롯(slot)을 지나는 경우 등의 과도 절삭과 공구의 파손을 구별할 수 있었으며, 공구 파손 지수의 크기 및 패턴의 변화를 관찰함으로써 공구의 단속적 및 연속적 칩핑, 공구 파손을 구별하여 검출할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. J. L. Stein and C. H. Wang, "Analysis of Power Monitoring on AC Induction Drive Systems," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 112, 239-248, 1990.
2. J. L. Stein and K. C. Shin, "Current Monitoring of Field Controlled DC Spindle Drives," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 108, 289-295, 1986.
3. J. J. Park and L. Settineri, "Cutting Torque Estimation Using Spindle Power Measurements," *Transactions of NAMRI of SME*, 24, 85-90, 1994.
4. H. S. Liu, B. Y. Lee and Y. S. Tarn, "Monitoring of Drill Fracture from the Current Measurement of a Three-Phase Induction Motor," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 36(6), 729-738, 1996.
5. M. A. Mannan and S. Brooms, "Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements," *Annals of the CIRP*, 38(1), 347-350, 1989.
6. M. A. Mannan and S. Brooms, "Investigation into

Temperature Dependence of Motor Current Measurement Applied to Monitoring and Adaptive Control," *Annals of the CIRP*, 41(1), 451-454, 1992.

7. J.L. Stein, D. Colvin, G. Clever and C.H. Wang, "Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 108, 279-288, 1986.
8. J. Tlustý and Y. S. Tarn, "Sensing Cutter Breakage in Milling," *Annals of the CIRP*, 37, 45-51, 1988.
9. Y. Altintas, I. Yellowley and J. Tlustý, "The Detection of Tool Breakage in Milling Operations," *ASME Journal of Engineering for Industry*, 110, 271-277, 1988.
10. Y. Altintas and I. Yellowley, "In-process Detection of Tool Failure in Milling using Cutting Force Models," *ASME Journal of Engineering for Industry*, 111, 149-157, 1989.
11. Y. Altintas, "In-process Detection of Tool Breakages using Time Series Monitoring of Cutting Forces," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 28(2), 157-172, 1988.
12. Y. Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements," *ASME Journal of Engineering for Industry*, 114, 386-391, 1992.
13. J. M. Lee, D. K. Choi, J. Kim and C. N. Chu, "Real-Time Tool Breakage Monitoring for NC Milling Process," *Annals of the CIRP*, 44, 59-62, 1995.
14. S. Takata, T. Nakajima, J.H. Ahn and T. Sata, "Tool Breakage by Means of Fluctuations in Spindle Rotational Speed," *Annals of the CIRP*, 36, 49-52, 1987.
15. 김기대, 오영탁, 황지홍, 주종남, "밀링시 공구 파손 검출을 위한 공구 파손 지수 도출," *한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집*, 881-888, 1997.
16. 김기대, 권원태, 주종남, "주축모터 전류를 이용한 절삭력 간접 측정 및 절삭력 추종제어," *한국정밀공학회 논문집*, 14(10), 15-27, 1997.