

## 정면밀링가공시 공구 파손 검출에 관한 실험적 연구

김우순\*, 김동현\*\*

### An Experimental Study on the Detection of Tool Failure in Face Milling Processes

Woo-Soon Kim\*, Dong-Hyun Kim\*\*

#### Abstract

In this paper present a new technique (strain-telemetering) for detection of coated tool failure in face milling processes. In the cutter body, the strain signals received from the transmitter is transformed into frequency modulation(FM) signals in face milling processes. A receiver which is placed near by the Vertical milling machine receives the FM signals, then the signals will be sent to a computer, which determines whether the tool is failure. And machined surface of workpiece is detected by the SEM. In this paper, A on-line monitoring of the tool failure detection system based on the strain-telemetering apparatus has been represented.

Key Words : tool failure detection (공구파손검출), face milling (정면밀링), strain telemetering(스트레인 텔레미터링), transmitter (송신기), receiver (수신기), machined surface (가공면)

## 1. 서 론

### 1-1 연구배경

현재 고도로 발달하고 고성능화된 공작기계의 자동화 추세에 따라 다양한 제품과 더욱 향상된 제품의 질을 요구하고 있다. 가공 공정의 자동화와 무인화를 실현하기 위한 기술로서 기계가공시 발생하는 공구 마모 및 파손 등의 이상 상태 검출의 필요성이 크게 강조되고 있으며 기계 공구의 정밀도와 생산성을 향상시키기 위해 FMS,

CIM, IMS등을 이용하는 생산시스템이 도입되고 있다. 공구 마모나 파손 현상<sup>[1,2]</sup>은 재료의 불균일성으로 인한 강도의 증가, 공구의 불량, 공구가 수명한계에 달했을 때 등의 이유로 발생되며, 일단 마모나 파손이 일어난 공구로 계속 절삭을 수행하게 되면 공작물의 품질에 나쁜 영향을 줄 뿐만 아니라, 기계자체에도 영향을 미쳐 심각한 피해를 주게 된다. 공구 이상 상태의 감시는 무인 가공시 공구 파손이 제품의 불량 발생과 비가공 시간의 증가요인이 되므로 이를 신속하게 검출하는데 필요하

\* 원광대학교 대학원

\*\* 원광대학교 기계공학과

며 가공중 공구의 마멸이 가공오차를 발생시키는 직접적인 원인이 되므로 정밀가공을 위해서는 매우 중요하다고 할 수 있다.

공구 파손의 검출을 위한 기술은 많은 문헌에 나타나고 있으며 이러한 밀링 절삭의 연구로는 Martellotti<sup>13)</sup>의 칩형성의 기초적인 부분과 공구경로의 운동에 관한 연구가 있었고, E. N. Diei<sup>14)</sup> 등은 정면밀링시 조건의 변화에 따른 AE신호 특성에 관한 연구에서 인서트에 공구의 파손을 유도하기 위해 slot을 가공하고서 절삭실험을 수행하였다. H. J. Fu<sup>15)</sup> 등은 정면밀링에서의 절삭조건, 커터형상, 피삭재, 런-아웃의 영향에 따른 절삭력 예측을 위한 모델을 연구하였다.

공구 파손검출방법들중 일반적으로 절삭력을 이용한 방법이 사용되고 있는데, 절삭력의 정확한 예측은 현재 선진각국 및 국내에서 활발히 추진되고 있는 공장 무인화, 자동화에 있어서 공구 제어(tooling control)의 관점에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있으며 컴퓨터와 제어 장비의 효과적인 사용으로 인해 고도화, 고정밀화, 고능률화등의 다양한 요구를 수용하기 위해 밀링가공의 활용 범위는 급진적으로 가속화되고 있다. 그러나, 연속 절삭인 선삭에서는 신호가 연속하여 발생되지만, 밀링가공에서는 절삭 과정이 단속 절삭이 되므로 신호가 단속적으로 발생되며 공구가 회전하기 때문에 공구상태 감시를 위한 센서의 부착이 어렵다는 점을 들 수 있다. 정면 밀링가공의 특징은 여러개의 인서트로 절삭할 때, 각 인서트가 절삭과정에 들어가면서 충격하중을 받게 되고 그 충격의 크기는 피삭재, 커터의 위치, 절삭조건, 커터의 기하학적 형상등에 의존하게 된다<sup>16)</sup>. 또한, 절삭과정중 칩의 두께가 변하게 되므로, 선삭에서와 같은 신호처리 방법을 택하기는 여러가지 문제가 따른다. 밀링 가공은 미소 절삭두께를 포함하는 과도적 현상이 존재되어 절삭 두께가 일정한 일반적인 절삭과는 달리 공구마모나 파손, 가공면의 치수정밀도 및 표면상태등에 많은 문제점이 있어 해석적으로나 실험적으로도 그 취급이 간단하지는 않다.

지금까지의 정면밀링의 연구동향은 해석의 난이성, 인서트 초기위치오차(run-out)의 영향, 인서트 수의 영향 등으로 인하여 대부분 단인(single-insert)절삭을 실시하여 다인(multi-insert)절삭의 결과를 예측하였다. 그러나, 실제의 밀링작업은 단인으로 절삭하는 경우는 거

의 없으므로 다인을 이용한 절삭의 연구가 필요한 실정이다<sup>17)</sup>.

본 연구는 밀링가공시 절삭력에 의해 플런지 커터 홀드축에 변형이 발생하는데 이 변형값을 스트레인 게이지를 이용하여 정량화하며 센서에 공급되는 전원과 신호는 회전축에 부착된 송신기와 밀링 몸체에 고정된 수신기에 의해 상호 전달된다. 무선으로 전달된 신호는 앰프를 통하여 증폭되고 A/D모드를 거쳐 컴퓨터에 데이터화 한다. 이 때, 측정된 실험데이터로 부터 공구 인서트의 파손 여부를 평가하는 검출 시스템을 구성하고자 한다.

## 2. 관계 이론

### 2-1. 정면밀링가공

정면밀링가공에서의 절삭력예측에 관한 Martellotti의 연구에 의하여 커터의 경로를 나선형태로 간주하고 이송량이 커터 반경에 비해 매우 작기 때문에 절삭날의 경로를 원호(arc)로 근사하는 것이 실제 가공환경에서 적합한 가정이라고 하였다. 또 다른 학자들은 절삭면에 작용하는 순간의 주분력은 특별한 절삭력의 생산과 칩 cut의 횡단면영역이라고 제안했다.<sup>18)9)10)</sup> 지금까지의 연구에 의하면 밀링공구 인서트의 파손은 절삭속도에 따라 저속 칩핑과 파손을 포함하는 것으로 공구재질의 피로파괴를 의미한다.

공구재질에서의 피로는 단속절삭을 하는 밀링가공에서 매회전마다 증가하여, 결국 어떤 회전수에서 파괴가 일어나게 된다. 고속에서의 파괴는 여러가지 유형으로 구성되어 있고 이 각각은 서로 각각 다른 피로균열을 일으킨다.

### 2-2. 밀링공구의 마모 및 파손<sup>(11)</sup>

밀링공구의 손상에는 마모, 칩핑, 파손, 열균열, 피로균열등이 있다. 정면밀링에 있어서의 마모는 선삭과 거의 동일하나 단속절삭인 특성으로 인해 공구는 항상 가열과 냉각을 반복하기 때문에 온도의존성이 높은 크레이터마모의 발생은 적은편이다. 밀링공구에 있어서 플랭크 마모의 거동은 매우 복잡적이며 미소입자의 탈락에 따른 마모와 공작물과의 용착과 분리의 반복에 의한 미소 칩핑, 충격에 의한 칩핑등이 동시에 작용하여 플랭크 마모를 발생시킨다.

밀링공구의 파손은 절삭인 절입시의 급격한 충격과 절삭날 이탈시의 에너지 해방으로 인해 돌발적으로 발생하게 된다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 제원 및 장치

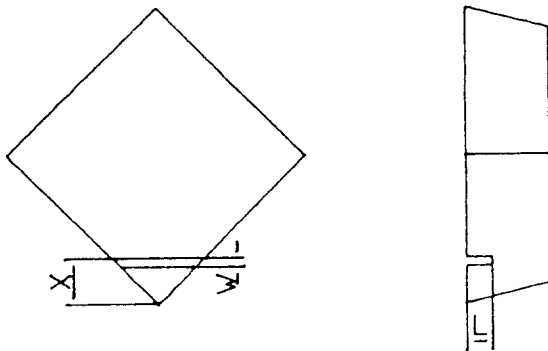
본 실험에서 사용한 절삭가공 재료는 자동차 분야의

Table 1. The specifications of milling cutter

milling cutter	M345SNP
lead angle	45 °
axial rake angle	+15
radial rake angle	-3
insert type	SDKN53MT
number of insert	4
cutting direction	right
cutting diameter(mm)	φ80
maker	KOREA TUNGSTEN

Table 2. The specifications of inserts

Material	TiN Coated insert
Ordering code	SDKN53MT



W = 1.60 - 1.75 (mm)  
 X = 2.78 - 2.88 (mm)  
 L = 0.76 - 0.85 (mm)

Fig 1. The slotted cutter insert

기어, 감속기, 모터축등에 주로 많이 쓰이는 기계구조용 합금강 SCM 440을 사용하였다.

SCM 440시험편은 60×150×10의 치수로 가공하였으며 실험에 사용한 정면밀링커터의 사양은 Table 1와 같다. 공구 파손 검출을 위한 실험의 인서트의 사양은 Table 2와 같고 Fig 1에서 처럼 특정 위치에 방전가공과 다이아몬드 커터휠(diamond cutter-wheel)가공을 하였다.

Fig 2는 수직 밀링 머신에서의 실험장치 전체 구성도이다.

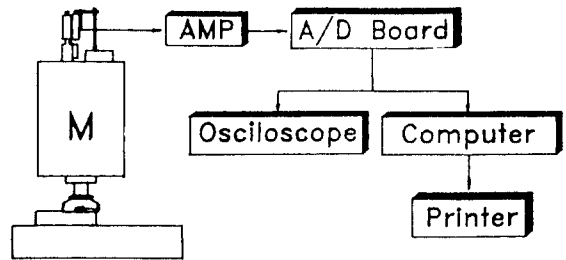


Fig 2. Schematic diagram of the experimental apparatus

밀링가공시 절삭력에 의해 플런저 커터 홀드축에 변형이 발생하는데 이 변형값을 스트레인 게이지를 이용하여 정량화하며 센서에 공급되는 전원과 신호는 회전축에 부착된 송신기와 밀링 몸체에 고정된 수신기에 의해 상호 전달된다. 무선으로 전달된 신호는 앰프를 통하여 증폭

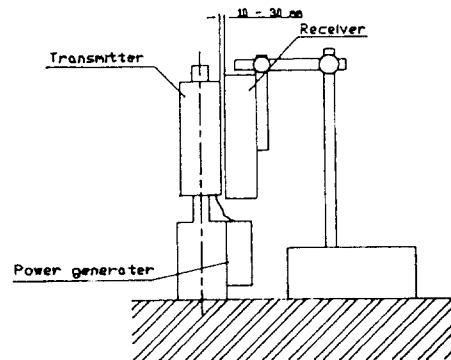


Fig 3. Arrangement of transmitter & receiver

되고 A/D변환기를 거쳐 오실로스코프에서 모니터링을 하고 컴퓨터에서 데이터화 한다. 밀링가공이 끝난 후, 전자주사현미경을 이용하여 피삭재의 가공면을 촬영하였다.

본 실험에 사용한 송신기와 수신기는 무선으로 신호 전달이 가능하므로 Fig 3에서와 같이 배열하였다.

### 3.2 실험 조건 및 측정 방법

절삭실험을 위한 밀링커터의 직경은  $\phi 80$ 를 사용하였고, 실험은 10mm의 절삭폭을 가공하는 것으로서 단속절삭이 이루어지도록 하였다. 모니터에 공구 파손의 신호가 나타날 때까지 절삭깊이 1.5mm, 주축회전수 200 rev/min, 이송속도 105 mm/min의 절삭조건으로 반복하여 실험하였다.

본 연구에서는 공구 파손 검출 실험을 수행하기 위하여 수직밀링머신을 사용하였으며 절삭시 발생하는 회전축의 변형율을 측정하기 위하여 먼저 수직밀링머신에서 주축부를 분리하였다. 분리한 후, 스트레인 게이지를 Photo 1와 Fig 4에서와 같이 방전가공을 실시하여 제작한 커터바디에 부착한 후, 가공된 홈을 통하여 결선을 하였다.

방전가공된 밀링머신의 회전주축을 따라 결선을 뽑아



Photo 1. Photograph of cutter body attach to strain gauge

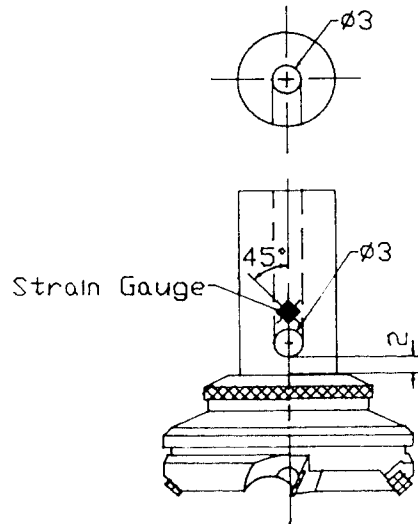
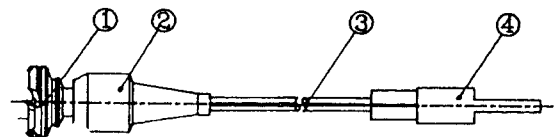


Fig 4. Cutter body attach to strain gauge

내어 송신기와 연결한다. Fig 5에서는 스트레인이 부착된 밀링커터바디, 척, 주축, 고정구를 연결한 모양을 보여준다. Fig 5와 같이 결합한 주축부를 수직밀링머신에 재장착하여 신호를 송수신할 수 있도록 설치하였다. 이때, 송신기와 수신기사이의 거리는 Fig 3처럼 약 10~30mm가 되도록 설치하며, 수신기에서 얻어진 FM신호는 앰프(amplifier)를 통하여 증폭시킨 후, A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에서 데이터화 한다.



1. Cutter Body (+ Strain gauge)
2. Chuck
3. Spindle
4. Fixture

Fig 5. Spindle part of the attachment

#### 4. 실험결과 및 고찰

정면밀링커터는 평면을 가공하기 때문에 선삭과는 달리 공구 파손시 절삭력 신호가 파손됨과 동시에 감소하는 양상을 보였다. 원인은 공구의 파손으로 인하여 절삭날이 손상되어 가공을 위한 본래의 물림깊이를 상실하는 비가공(non cutting)이 되기 때문이며, 스트레인 역시 감소하게 된다. 본 실험에서 이러한 특성을 감안하여 공구파손을 검출하였다.

φ80mm인 밀링커터는 등간격으로 4개의 인서트를 삽입하였고 Fig 6에서 Fig 8의 그래프에서는 시간과 신호의 변형값을 토오크로 환산하여 나타낸 값과의 관계를 나타낸 것이다. 회전주기는 삽입 인서트의 갯수인 4개의 피크 파동곡선으로 표현되어짐을 알 수 있었다. 절삭실험을 진행하는 동안 스트레인신호의 변화를 모니터링하면서 스트레인 신호의 변화가 급격하게 감소하는 부분을 공구 파손이 발생한 것으로 판정하였다.

Fig 6은 4개의 인서트중 각 각의 인서트가 파손되지 않고 정상적으로 절삭하는 경우를 나타내고 있는 것으로 일정한 크기를 유지하면서 4개의 파동 형태가 규칙적으로 움직인다는 것을 알 수 있었다. 4개의 파동형태에서 피이크가 차이를 보이는 것은 정면밀링가공시 충격과 굽힘에 의한 변형값들이 영향을 주기 때문인 것으로 사료된다.

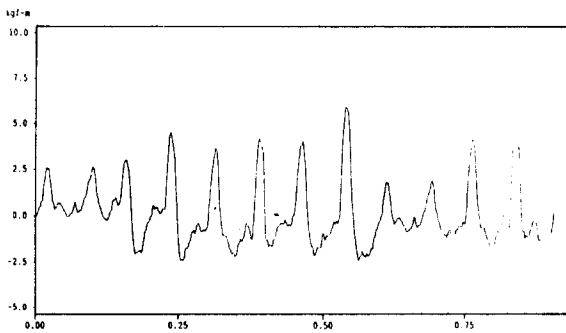


Fig 6. Experimental result of unbroken cutter

Fig 7는 공구파손 이전까지 정상적인 절삭을 진행하다가 한 개의 인서트가 파손됨과 동시에 절삭력신호가

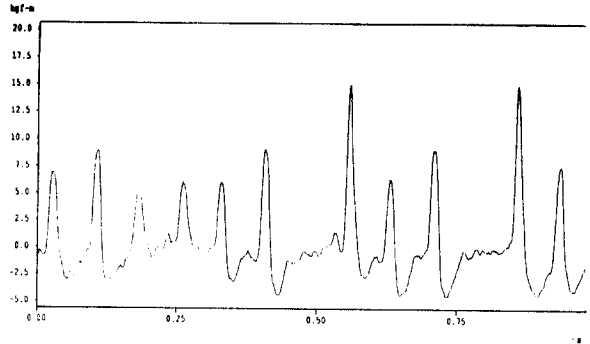


Fig 7. Experimental result of one insert broken cutter

급격히 감소의 모양을 나타낸다. 이것은 인서트상에 가공한 홈부위가 파손과 함께 탈락되어 절삭깊이가 변화되는 비절삭작용이 발생하기 때문이다. 또한, 한 개의 인서트 날이 파손되면서 파손된 일정량의 절삭을 해주지 못하고 인접한 두 번째 인서트가 절삭과정에 들어가면서 절삭력을 받게 되어 칩의 두께가 변하게 되므로 두 번째 인서트에서의 절삭력은 다른 인서트의 절삭력보다 증가하게 된다. 따라서 일정한 4개의 피이크 파동곡선을 유지하던 그래프가 파손과 함께 3개의 피이크 파동곡선만으로 나타나며 이것은 확실한 파손검출을 할 수 있음을 보여주고 있다.

Photo 2는 밀링절삭가공시 공구마모가 발생하면서 피삭재의 가공면 상태가 변화한 것을 잘 보여주고 있다. 절삭가공시 심한 충격이나 진동, 과부하 절삭으로 인하

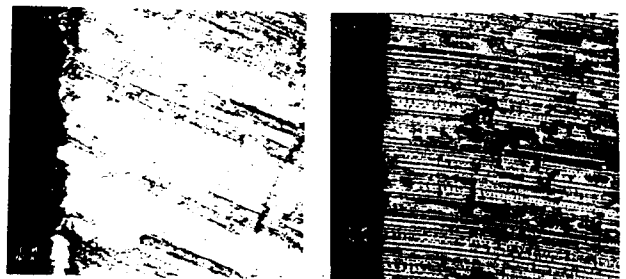


Photo 2. A situation of machined surface by tool wear

여 공구 파손과 마모가 발생하게 된다. 파손 현상이 나타나기전에 공구마모가 이루어지며 가장 돌출된 인서트가 절삭날의 역할을 하고 떨림이 발생하기 때문에 공구마모가 발생했을 때의 가공면은 정상적 절삭상태에서의 가공면보다 더욱 거칠어진다.

Fig 8은 인접한 두 개의 인서트 파손시 절삭하는 경우의 실험적 결과를 나타내고 있으며 Fig 7와 같이 공구 파손과 함께 물림깊이 상실로 인하여 파손된 인서트들의 피크 파동곡선이 급격히 감소하고 있음을 잘 나타내고 있다.

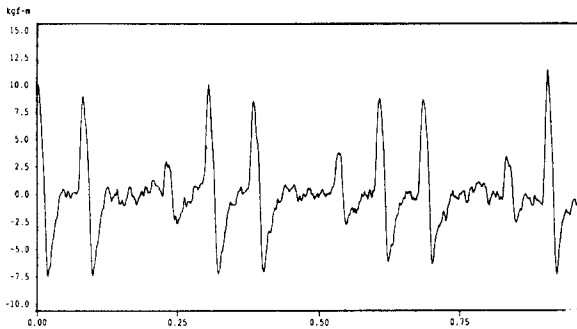


Fig 8. Experimental result of two insert broken cutter

Fig 6로 부터 4개의 인서트가 파손되지 않았을 경우의 피크 파동곡선은 회전주기에 따라 어느 정도 일정하게 유지되는 것과는 달리 Fig 7와 8은 규칙적이던 피크 파동곡선이 파손과 함께 물림깊이가 상실되면서 절삭력의 하락으로 파손된 인서트에서의 피크가 급격히 감소하는 현상을 보여주고 있다. 각 인서트의 파손에 따른 절삭력 변형의 차이를 보이고 이에 따라 피크 파동곡선의 양상이 뚜렷하게 나타남으로서 정면밀링가공시 공구파손 검출의 가능성을 보여주고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서 정면밀링가공시 발생하는 이상상태중 공구 파손을 검출하기 위하여 스트레인을 이용한 공구파손

검출 시스템을 구성하였고 절삭실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 신호를 무선으로 송·수신할 수 있는 검출시스템을 구성하여 밀링공구 파손검출에 적용하였다.
2. 절삭력에 의한 스트레인을 이용하여 공구 파손의 온라인검출을 하였고 회전하는 공구의 파손을 모니터링 하는데 이용할 수 있을 것으로 본다.

## 참고문헌

- [1] G. Boothroyd, "Fundamentals of Mital Machining and Machine Tools", McGAW-Hill, pp.133-142, 1975
- [2] M.C.Shaw, "Metal Cutting Principles", Clarendon Press Oxford, pp.224-250, 1984
- [3] Martellotti. M.E, "An Analysis of the Milling Process", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 63, pp.667-700, 1941
- [4] E.N.Diei and D.A.Dornfeld, "Acoustic Emission From the Face Milling Process the Effects of Process Variable", ASME, Vol.109, MAY, pp.92-99, 1987
- [5] H. J. Fu, R.E.Devor, S.G.Kapoor, "A Mechanistic Model for the Prediction of the Force system in Face Milling Operations", Journal of Engineering for Industry, pp.81-88, Vol.106, February, 1984
- [6] 이우영, "정면밀링의 절삭성 향상을 위한 밀링커터의 설계에 관한 연구", 서울대학교, 박사학위논문, pp.11-12, 1990
- [7] 김성일, "切削力 및 Acoustic Emission에 의한 정면밀링의 工具磨耗 및 破損 檢出에 關한 研究", 전북대학교, 박사학위논문, pp.2-4, 1995
- [8] Y. Altintas and I. Yellowley, Journal of Engineering for Industry, pp.149-157, Vol.111, 1989
- [9] A. Ber, J. Rotverg and S. Zombach, Annals of the CIRP 37, pp.37-40, 1988

- [10] Y.S. Tarnag, Int. J. Mach. Tools Manufact. 31, pp.295-304. 1991
- [11] 서재영, "SUS304의 정면밀링 가공시 발생하는 공구파손 검출에 관한 실험적 연구", 전북대학교 석사학위논문, pp.8, 1994
- [12] Elso Kuljanic, " An Investigation of Wear in Single-Tooth and Multi-Tooth Milling ", Int.J.Mach.Tool Des.Res.Vol.14, pp.95-109, 1974
- [13] 徐南燮, "金屬切削理論", 東明社, p.13-17, 1991
- [14] 金東烈, 朴程甫, "切削理論과 實際", 機電研究社, p.223-238, 1993
- [15] 姜求鳳, 黃榮東, " 切削 工具와 加工技術 ", 機電研究社, p.121-148, 1994
- [16] "밀링가공기술", 중소기업진흥공단, p.41-44, p.83-85, 1993