

난삭성 재료의 가공환경변화에 따른 고속가공 특성 평가 (압축공기냉각에 의한 공구수명 평가)

김석원*, 안철수*, 이득우**

Evaluation of Machinability by Cutting Environments in High-Speed Machining of Difficult-to-cut Materials (Test for Tool Life Using Compressed Chilly Air Cooling)

Seok-Won Kim*, Chul-Soo Ahn*, Deug-Woo Lee**

Abstract

High speed machining of difficult-to-cut materials generates the concentrated thermal/frictional damage at the cutting edge of the tool and rapidly decreases the tool life. In this paper, the cutting environments, such as dry, fluid coolant, and compressed chilly air coolant, were investigated to improve the tool life.

For this study, the compressed chilly air system was manufactured. The experiments were performed for various difficult-to-cut materials and various coated tools. The effectiveness of the developed methods on the basis of tool life was estimated. The results show that the cutting environment using compressed chilly air coolant provided better tool life than using the fluid coolant or using the dry.

Key Words : Difficult-to-cut Materials(난삭재), High-speed Machining(고속가공), Compressed Chilly Air System(압축냉각공기 시스템)

1. 서 론

최근 공작기계의 고속화와 공구재료의 개발, 코팅기술의 발전 등으로 종전에는 알루미늄합금에서만 국한되었던 고속가공이 고경도재 등에서도 가능하게 되었다. 고속가공

기술은 고능력, 고정도의 가공을 실현한다는 측면에서 효율 가치가 아주 높아 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾

그러나 초내열합금과 같은 난삭재의 절삭가공에서는 절삭속도가 증가할수록 공구의 수명은 상대적으로 감소한다. 특히 고속가공에서는 공구수명의 지배적인 요인이 되

* 부산대학교 일반대학원 ERC/NSDM
** 부산대학교 ERC/NSDM

는 절삭온도가 증가하여 공구수명을 급격히 감소시킨다.¹²⁾ 절삭온도의 상승은 공구 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 피삭재의 표면에 가공변질층이나 잔류응력과 같은 여러 가지 열적 문제도 발생한다.

T. I. EL-WARDANY¹³⁾ 등은 고경도재인 AISI 1552(HRC60~65)와 니켈기 초내열합금인 인코넬 718의 절삭시 여유면의 절삭온도에 의한 영향을 실험과 유한요소법에 의하여 해석하였다. 고경도재의 선삭가공에서는 절삭속도, 이송속도, 절입깊이를 증가시키에 따라 절삭날의 온도도 상승하는 결과를 보여주고 있다. N. Narutaki¹⁴⁾ 등은 인코넬 718의 선삭가공시 공구마멸과 절삭온도, 그리고 공구와 공작물간의 고속절삭특성을 관찰하였다. 그 결과, 인코넬 718의 절삭가공에 있어 세라믹공구는 정상적인 플랭크 마멸보다는 노치마멸이 주로 발생하여 이에 대한 개선이 필요함을 주장하고 있다.

최근에는 난삭재의 고속가공에서 절삭부에 절삭유제를 효율적으로 공급하여 공구수명을 향상시키고 가공 정밀도를 높이기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 절삭유제를 고압으로 공급하는 방법에 의하여 가공성을 향상시키는 방법으로 유활/냉각 제트(jet)를 외부노즐을 통하여 공구-칩 계면사이에 공급하는 방법, 플랭크와 가공면 사이에 직접 분사하는 방법 및 공구-칩 계면사이에 공구의 경사면을 통하여 직접 분사하는 방법 등이 제시되고 있다.¹⁵⁻⁹⁾

그러나, 절삭공정에서 절삭유제는 가공환경 측면에서 고려해야 할 중요한 요소 중 하나로 환경오염을 줄이기 위한 절삭방법에 관한 연구도 이루어지고 있다.¹¹⁰⁾

본 연구에서는 난삭성 소재의 고속가공에서 건삭, 습삭, 압축냉각공기 등 여러 가지 가공환경에 대해 절삭성을 평가하기 위하여 공구수명을 기준으로 실험하였다.

2. 압축냉각공기 시스템

Fig. 1은 압축냉각공기를 절삭점에 공급하기 위한 공기냉각장치 시스템을 나타낸 그림이다. 액체질소를 이용하여 저온의 기체를 절삭점에 공급할 수도 있으나, 이러한 냉각장치는 온도를 안정되게 사용할 수 없고 경비가 높아 곤란하다. 따라서 본 연구에 사용된 냉각장치는 작업현장에서 사용되는 공기압축기(Air compressor)에서 생성된 압축공기를 필터와 드라이어를 이용하여 공기 중에 포함된 수분 등을 충분히 제거시켜서 바로 사용할 수 있는 실용적인 장치이다. 건조된 공기는 공기냉각장치에서 열교환을 하게 되나 공기는 유체에 비하여 열전도가 나쁘기

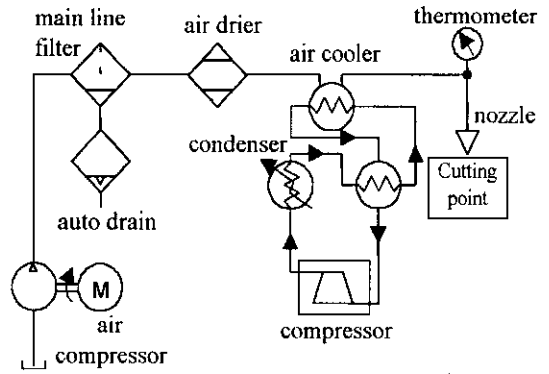


Fig.1 Schematic diagram of compressed chilly air system

때문에 열교환을 하고 난 후에는 약 -2℃ 정도로 냉각이 된다. 그러나 노즐을 통하여 분사되는 압축공기는 분사 순간에 단열팽창을 하게 되는데 이 때의 분사되는 공기의 온도는 약 -12℃ 정도의 저온으로 되며 공급되는 압축냉각공기의 압력은 약 7.5kgf/cm²이다. 압축냉각공기를 가공 중에 절삭날과 피삭재의 접촉점에 공급하기 위하여 직경 5mm인 노즐을 사용하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험은 최대 주축회전수가 20,000rpm, 최대이송속도 50m/min인 수직형 고속머시닝센터에서 수행하였으며 Fig. 2는 실험 장치도를 보여주고 있다.

피삭재와 공구의 절삭부위에 압축냉각공기를 분사시켜

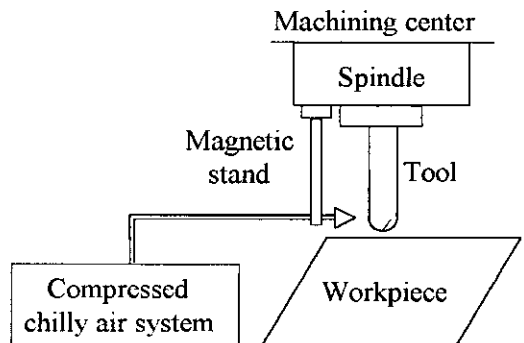


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

주기 위하여 마그네틱 스탠드를 사용하여 분사노즐을 고정시켰으며 시편에 경사각을 주기 위하여 회전바이스를 사용하였다. 그리고 본 실험에서는 4%의 수용성 절삭유제를 사용하였으며, 8개의 노즐을 통하여 20 l/min의 유량으로 절삭점에 분사하였다.

3.2 실험방법

Table 1에는 실험조건을 나타내었다. 절입깊이와 피크피드는 황삭조건으로 하였으며, 한 날당 이송량 등은 일정하게 유지하고 절삭속도는 90m/min과 210m/min에서 실험을 하였다. 가공환경은 건식, 습식(수용성 절삭유제, 20bar), 압축냉각공기에 대한 가공성 평가 실험을 하였으며, 공구마멸량은 0.3mm을 기준으로 설정하였다. 그리고 압축냉각공기의 영향만을 고려하기 위하여 미스트 등을 이용한 윤활효과는 주지 않았다.

볼엔드밀을 이용한 절삭가공은 주로 3차원의 형상가공에 주로 이용이 되며, 가공시에는 볼엔드밀의 기하학적 형상의 특성으로 인해 공구의 절삭날 중심에서는 절삭속도가 0이 되어 실제 절삭이 이루어지지 않게 된다. 가공시 칩에 의한 재절삭이 되지 않게 하기 위해 공구와 공작물 간에 경사각을 주어 유효 칩배출공간을 넓게 하는 것이

필요하게 된다. 따라서 본 실험에서는 Fig. 3과 같이 공구와 공작물 간에 회전바이스를 이용하여 45도의 경사각을 주어 실험하였으며 공구경로는 피크피드를 경사면의 경사각에 따라 증가시키고 이송방향(Feed direction)은 수평방향이 되는 수평하방향로 설정하여 하향절삭이 되게 하였다. 매 절삭조건에 따른 공구마멸량은 공구현미경을 이용하여 측정하였다.

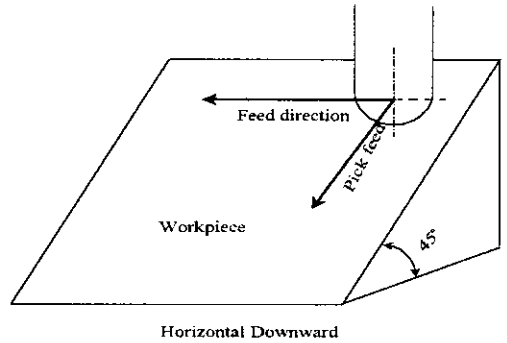


Fig. 3 Cutter orientation

Table 1 Experimental conditions

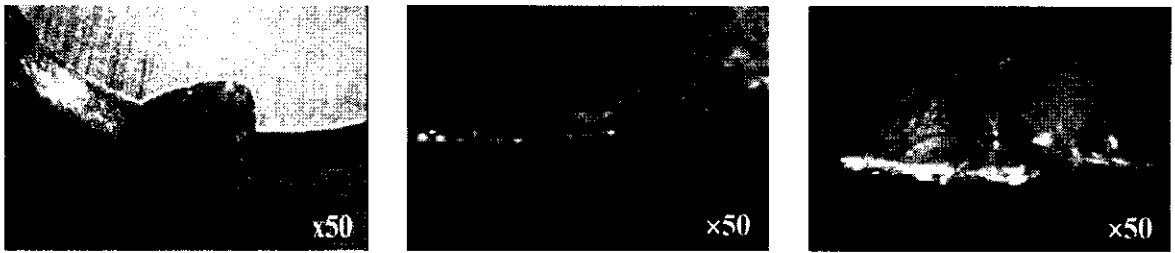
Machining Parameters	
Workpiece Hardness	HRC28 ~ 60
Cutting Tool	φ8 HSS (TiN coating) WC (TiAlN Coating)
Number of Flutes	2
Operation	Down milling
Cutter Orientation	Horizontal downward
Tool Overhang	40mm
Cutting Speed	90m/min
	210 m/min
Feed Rate	0.1 mm/tooth
Depth of Cut	Axial : 0.5mm
	Radial : 2mm
Cutting Environment	Dry, Wet
	Compressed Chilly Air

4. 실험결과 및 고찰

4.1 공구마멸특성

공작물의 경도와 공구재종에 따른 공구마멸특성을 검토하기 위하여 절삭유제를 공급하였을 때의 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

(a)는 TiN코팅된 고속도강으로 경도가 $H_R C28$ 인 공작물에 대한 실험에서 공구마멸형태를 나타내었다. 6.4m 정도를 절삭하였을 때의 공구날에 이상마멸이 발생하였다. 초기 절삭에서부터 마이크로 치핑이 발생하여 절삭거리가 증가함에 따라 정상마멸형태를 보이며 마멸량이 적지만 어느 절삭거리 영역에 도달하면 절입경계부위의 절삭날이 치핑과 파손이 아닌 절삭열에 의하여 닳아 버리는 마멸현상이 생겼다. (b), (c)에는 TiAlN코팅된 초경공구로 피삭재 경도가 $H_R C42$ 와 $H_R C60$ 를 절삭하였을 때의 공구마멸형태를 나타내었다. (b)에서는 정상적으로 마멸이 진행되어 치핑이 발생하나 (c)에서는 이상마멸의 한 형태인 브레이킹이 발생하였다. 이상에서 고경도재의 엔드밀을 이용한 단속절삭에서는 절삭시 발생하는 절삭력에 의한 충격과 비절삭성 절삭유제에 의한 냉각 때문에 발생하는 열적 충격이 주기적으로 절삭날에 작용하기 때문에 응력



(a) TiN coating HSS,
Workpiece hardness : $H_R C28$
Cutting distance : 6.4m

(b) TiN coating WC
Workpiece hardness : $H_R C42$
Cutting distance : 56m

(c) TiN coating WC,
Workpiece hardness : $H_R C60$
Cutting distance : 1.2m

(Cutting speed : 210m/min, Fluid coolant)

Fig. 4 Tool wear pattern

집중에 의하여 박리손상이 발생한 것으로 보인다.

4.2 공구수명평가

본 연구는 공구수명을 기준으로 가공성 향상과 환경오염을 고려하여 제작한 압축냉각공기시스템의 효과를 검토하기 위하여 절입깊이, 한 날당 이송량, 피크피드는 일정하게 유지하고 여러 가지 피삭재 및 공구 재질에 대하여 공구수명을 기준으로 가공성 평가 실험을 하였다.

Fig. 5는 TiN코팅된 고속도강 공구를 이용하여 경도가 $H_R C28$ 인 피삭재에 대한 결과이다.

건식과 습식에서는 마멸이 공구한계수명조건인 0.3mm에 도달하였을 때 절삭거리가 약 2m와 5m였으나 압축냉각공기에서는 9m였다. 모든 가공환경에서 Fig. 4의 (a)와 같은 마멸형태가 발생하였다.

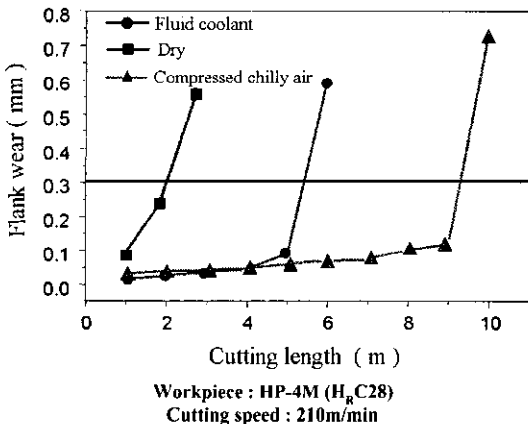


Fig. 5 Tool wear vs. Cutting length

Fig. 6은 TiAlN 코팅된 초경공구로 경도가 $H_R C42$ 인 피삭재를 실험하였을 때 가공환경변화에 따른 절삭거리가 나타낸 것이다.

습식과 건식의 공구한계수명인 0.3mm에 도달하였을 때, 절삭거리가 약 65m와 110m이었으나, 압축냉각공기의 경우에는 절삭거리가 220m정도였다. 압축냉각공기의 경우가 습식보다 약 3.5배, 건식보다는 약 2배 정도 공구수명이 향상되었다.

Fig. 7는 TiAlN코팅된 초경공구로 절삭속도 210m/min에서 피삭재의 경도가 $H_R C50$ 인 열처리된 STD61을 가공 환경변화에 따라 공구수명을 실험한 결과이다. 건식과 압축냉각공기로 절삭하였을 경우는 절삭거리가 각각 6.6m와 9m정도였으나, 습식의 경우는 약1.2m에서 공구 한계수명조건인 0.3mm에 도달하였다. 압축냉각공기에서는

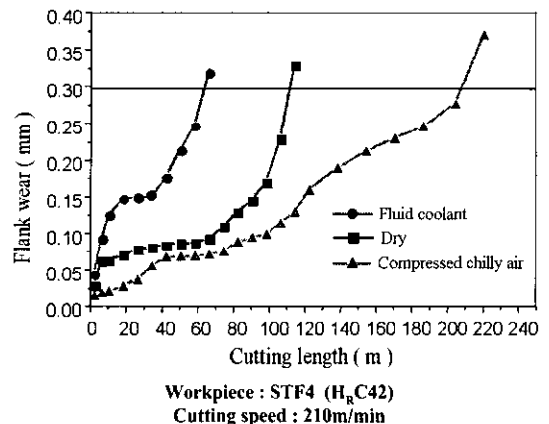


Fig. 6 Tool wear vs. Cutting length

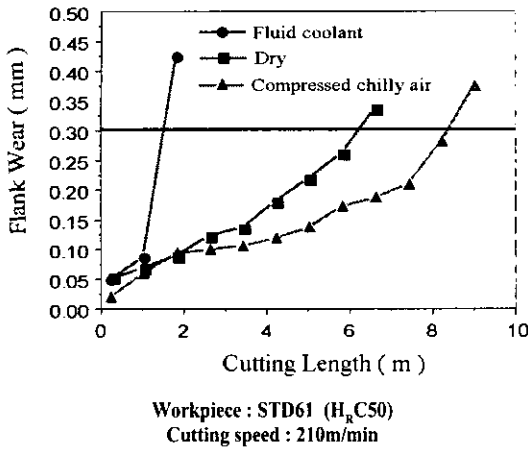


Fig. 7 Tool wear vs. Cutting length

건식보다는 약 2m, 습식보다는 8m정도 가공성이 향상되었다. Fig. 4의 (c)에 보인 바와 같이 습식의 경우 열적 충격에 의한 브레이킹이 발생하고 건식과 압축냉각공기의 경우는 칩핑이 마멸 형태가 된다. 이전에 설명한 것처럼 불엔드밀 가공은 절삭시의 가열과 비절삭시의 냉각을 주기적으로 반복하는 단속절삭의 형태를 취하게 되는데, 습식의 경우 절삭유의 냉각작용으로 인해 공구는 심한 열적 피로를 받게 되므로 공구수명이 건식과 압축냉각공기에 비해 공구수명이 감소함을 알 수 있다. 압축냉각공기의 경우 칩 배출이 원활하게 이루어지고 유체인 절삭유에 비해서 기체인 압축냉각공기는 열전도성이 떨어지므로 절삭

시 발생하는 절삭열을 냉각시키는 정도가 습식에 비해 상당히 약하므로 습식과 비교하여 공구에 전달되는 열적 충격은 감소하여 결과적으로 공구수명을 증가된 것으로 생각된다.

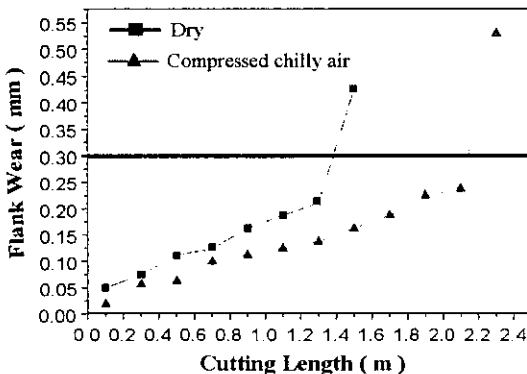
Fig. 8은 초내열합금의 일종인 인코넬 718을 가공하였을 때의 절삭거리를 나타낸 그래프이다. (a)는 절삭속도 90m/min에서 가공환경에서 실험한 결과이다. 건식에서는 절삭거리가 1.4m정도였으나 압축냉각공기를 이용하였을 경우에는 약 2.2m였다. (b)는 절삭속도 210m/min에서 실험한 결과인데 모든 조건에서 절삭거리가 1.1m~1.3m정도로 거의 비슷한 절삭거리를 보였다.

니켈계 초내열합금의 일종인 인코넬 718은 고온강도와 고인성으로 인하여 고속절삭시 공구는 칩과 피삭재와 접촉하는 계면사이에는 매우 큰 압력이 작용하기 때문에 심각한 열/마찰(thermal/friction)조건에 놓이게 되어 절삭유제와 압축냉각공기가 공구-칩, 공구-피삭재의 계면에 효과적인 침투가 이루어지지 않아 공구수명 연장에 효과가 없는 것으로 여겨진다.

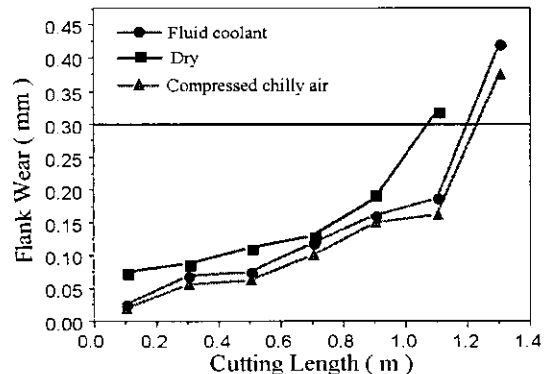
5. 결론

난삭재의 고속절삭시 가공특성에 대한 실험과 가공환경 변화에 대한 가공성 평가 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 환경 및 경제적인 측면을 고려한 압축냉각공기 시스템



(a) Cutting speed : 90m/min



(b) Cutting speed : 210m/min

Workpiece : Inconel 718 ($H_R C42$)

Fig. 8 Tool wear vs. Cutting length

템을 제작하여 절삭유제를 대신할 수 있는 냉각방법을 제시하였다.

- (2) 고경도재의 볼랜드밀을 이용한 단속절삭에서는 기계적인 충격과 열적 충격에 의하여 습식에서 공구수명이 가장 짧았다.
- (3) 경도가 $H_R C42$ 인 STF4를 가공환경변화에 따라 공구수명을 실험한 결과 압축냉각공기에 의한 경우가 건식보다는 약 2배, 절삭유제를 사용한 경우보다는 약 3.5배 정도 절삭거리가 증가하였다.
- (4) 인코넬 718($H_R C42$)의 단속절삭시 고속영역(210m)에서는 압축냉각공기, 습식, 건식에서 공구수명이 1m 정도였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 기성희 재원 학술연구조성비에 의한 것임.

참 고 문 헌

- (1) Robert I. King, "Hand of High-speed Machining Technology", CHAPMAN AND HALL, 1985.
- (2) T. Kitagawa, A. Kubo, K. Maekawa, "Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel718 and Ti-6Al-6V-2Sn", *Wear* 202, 1997, pp. 142~148.
- (3) T. I. El-Wardany, E. Mohammed and M. A. Elbestawi, "Cutting Temperature of Ceramic Tools in High Speed Machining of Difficult-to-cut Materials", *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 36, No. 5, pp. 611~634, 1996.
- (4) N. Narutaki, Y. Yamane, K. Hayashi, T. Kitagawa, "High-Speed Machining of Inconel718 with Ceramic Tools", *Annals of the CIRP* Vol.42/1/1993, pp. 103~106.
- (5) R. Kovacevic, C. Cherukuthota and M. Mazurkiewicz, "High Pressure Waterjet Cooling/Lubrication to Improve Machining Efficiency in Milling", *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 35, No. 10, pp. 1459~1473, 1995.
- (6) R. J. S. Pigott and A. T. Colwell, "Hi-jet system for

increasing tool life", *SAE Q. Trans.* 6(3), pp. 547~564, 1952.

- (7) M. Mazurkiewicz, Z. Kubala and J. Chow, "Metal machining with high-pressure waterjet cooling assistance - a new possibility", *J. Engng Ind.* 111, 7~12, 1989
- (8) H. S. Ramaiyengar, R. Salmon and W. B. Rice, "Some effects of cutting fluids on chip formation in metal cutting", *Trans. ASME* 86, pp. 36~38, 1964.
- (9) R. R. Lindeke, F. C. Schoenig Jr, A. K. Khan and J. Haddad, "Machining of α - β titanium with ultra high pressure through the insert lubrication/cooling", *Trans. NAMRI/SME*, pp. 154~161, 1991.
- (10) Byrne. G. and Scholta. E., "Environmentally Clean Machining Processes-A Strategic Approach", *Annals of CIRP*, Vol.42, pp. 471~474, 1993.