

이 석 우 한국생산기술연구원 수석연구원 | e-mail : swlee@kitech.re.kr

이 글에서는 티타늄 합금의 절삭가공 시 공구수명을 향상시키기 위해 적용하는 액체질소를 사용한 극저온가공에서, 공구의 냉각 균일성을 향상시키기 위한 방법으로 극저온간접냉각(Indirect cryogenic cooling) 방식을 소개한다.

티타늄 합금은 경량, 고온에서도 유지되는 고강도 특성, 우수한 내부식성의 특성 때문에 우주/항공 분야의 부품에 주로 사용된다. 부품제작을 위한 절삭가공 중 티타늄 합금이 갖는 낮은 열전도도, 고강도, 높은 화학적 활성은 1,100℃가 넘는 고온의 절삭열을 발생시키고, 크레이터마모와 같은 공구마모를 가속한다. 기존의 스틸, 알루미늄과 같은 메탈가공 시 대비 공구수명이 극단적으로 짧으므로 난삭재(hard-to-cut material)로 불린다. 절삭가공 시 발생하는 고온의 절삭열을 효과적으로 냉각하기 위해 제안된 방법이 액체질소를 분사하여 공구를 냉각하는 극저온가공이다.

액체질소 제트분사 시 발생 가능한 불균일 냉각

초저온 진공 용기에 보관된 액체질소는 진공단열 이송관을 지나 노즐을 통해 고온이 발생하는 공구의 경사면에 분사된다. 액체질소는 대기압에서 -196℃의 끓는점을 지니므로 보관용기에서 나온 후 열교환이 발생하면서 기화되기 시작한다. 보관용기 및 이송관 내부에서 발생하는 액체질소의 불균일한 기화는 분사압력의 변화를 야기한다. 액체질소 분사압력의 변화는 동일 직경의 노즐에서 분사 속도와 유량의 차

이를 발생시키고, 결과적으로 가공 중 불균일한 냉각으로 인한 절삭성의 변화를 야기할 수 있다. 한편 고압의 액체질소는 노즐을 통해 공구의 경사면에 분사되므로, 가공 중 발생하는 칩이 액체질소 제트의 분사를 방해하면서 역시 불균일한 냉각을 야기할 수 있다.

공구 인서트의 경사면에 쿨런트를 분사할 수 있는 공구홀더(PCLNR 2020K 12HP, Sandvik)를 사용하여 액체질소를 분사하면, 보관용기 및 진공단열이송관 내부에서 발생하는 기화에 의해 분사량이 일정하지 않은 불균일한 분사가 이뤄진다. 불균일 분사 여부를 평가하기 위해 노즐에서 액체질소가 분사되는 형태를 관찰하고, 노즐 직전에 장착한 디지털 압력 트랜스듀서(PXM 409, OMEGA Engineering)를 사용하여 분사압의 변화를 측정하였다. 충분히 분사가 안정된 이후 노즐에서의 분사 형태를 육안으로 관찰한 결과, ‘액체’ 상태로 분사되는 도중 ‘기체’ 상태로 불균일하게 분사되면서 주기적으로 분사 세기가 감소하였다. 액체질소의 불균일 분사를 평가하기 위해 디지털 압력 트랜스듀서를 제트노즐 홀더 직전에 설치하여 가공 도중의 압력을 실시간으로 측정하였다. 다양한 분사압력에서 측정한 결과, 압력의 변화(fluctuation)가 주기적으로 발생하였다. 분사영상과 압력 그래프를 비교한 결과 분사 세기가 감소하는 순간 압력이 감

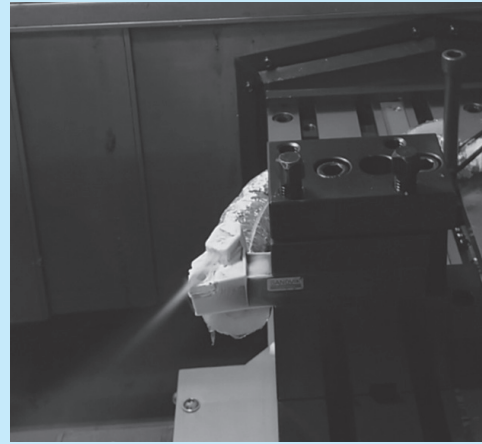
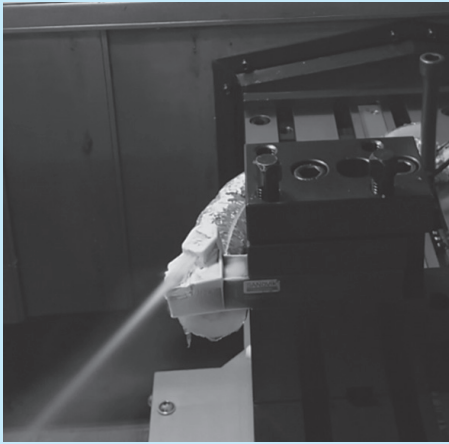


그림 1 액체질소 제트분사 시 보관용기 및 이송관 내부에서의 기화에 의한 불균일한 분사와 세기의 감소(분사 안정화 이후 측정된 모습)

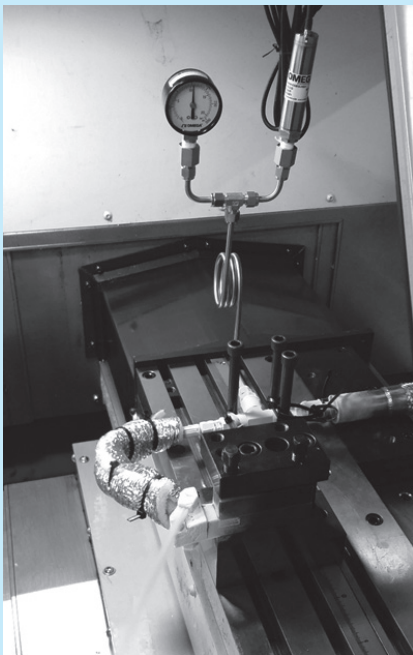


그림 2 디지털 압력 트랜스듀서를 사용한 액체질소 제트분사 시 분사압력의 실시간 측정

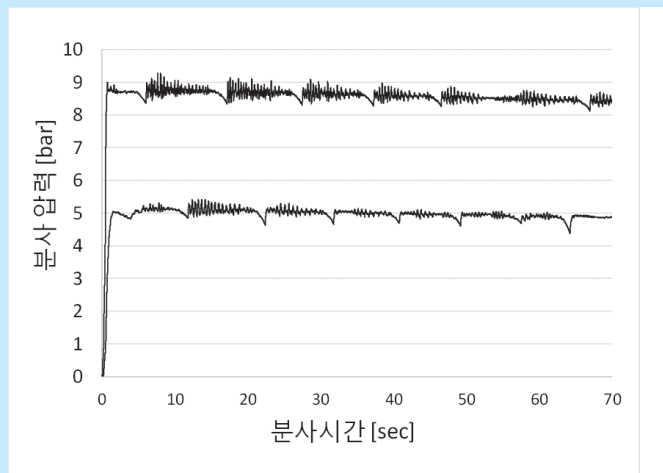


그림 3 디지털 압력 트랜스듀서로 분사시간에 따라서 다양한 압력에서 실시간으로 측정된 액체질소 제트분사 압력의 변화

소하는 것을 확인할 수 있었다. 노즐을 사용하여 액체 질소를 공구에 분사하는 경우, 보관용기와 이송관 내부에서 발생하는 기화에 의해 불균일한 분사가 발생할 수 있으며, 이는 압력의 변화를 야기함으로써 결과적으로 절삭과정 중 불균일한 냉각에 의한 절삭성의 변화를 일으킬 수 있다.

극저온간접냉각을 사용한 공구의 균일 냉각

공구 인서트에 부착된 액체질소 챔버를 사용하여 공구를 전도 냉각하는 극저온간접냉각 방식은 극저온 가공에서 가공물의 냉각을 방지하고 공구만을 냉각하기 위해 등장한 냉각방법이다. 이 간접냉각방식은 칩 발생 등의 방해 없이 전도방식으로 냉각하므로 지속적인 균일 냉각이 가능하다.

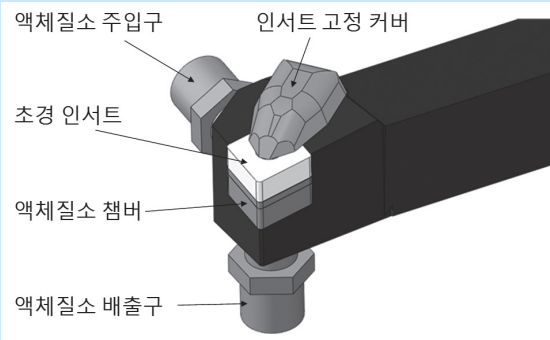


그림 4 3D 캐드를 사용한 간접냉각방식 공구홀더의 설계



그림 5 스테인리스스틸 챔버를 포함하는 개발된 간접냉각방식 공구홀더

티타늄합금의 극저온 선삭가공에서 간접냉각방식의 공구냉각 균일성 향상을 평가하기 위해, 액체질소 챔버가 장착된 전용의 공구를 개발하였다. 상용 홀더를 개조하여 챔버를 장착하는 방식으로 전용 홀더를 개발하였으며, 액체질소 챔버는 높은 강성과 내부식성, 열전달을 위해 스테인리스스틸(SUS 304)로 제작하였다. 공구 홀더 측면의 주입구를 통해 공급된 액체질소는 초경 인서트 하단의 챔버를 냉각시킨 후 하단의 배출구멍을 통해 대기 중으로 기화된다. 공구의 극저온 냉각

액체질소를 노즐을 사용하여 공구에 제트분사 하는 경우, 이송과정에서 발생하는 기화에 의해 불균일한 분사가 발생할 수 있으며, 이는 분사압력의 변화로 나타난다.

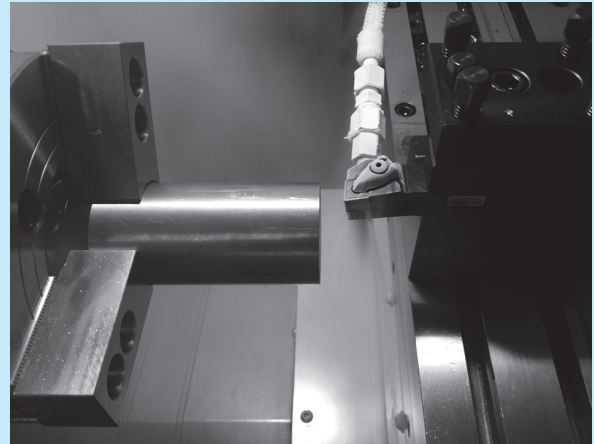


그림 6 공구간접냉각 방식을 사용한 티타늄 합금의 외경 선삭 극저온가공

과정에서 액체질소는 가공물에 접촉 없이 공구만을 냉각한다.

개발한 간접냉각방식 공구의 냉각 균일성을 평가하기 위해 열전대(thermocouple)와 레이저 적외선 온도계(laser IR pyrometer)를 사용하여 공구의 경사면 온도를 측정하였다. 초경인서트의 경사면과 측면에 각각 직경 0.5mm와 2.0mm의 구멍을 방전가공(EDM)으로 드릴링 가공하였으며, 각 구멍과 동일한 직경의 $-200^{\circ}\text{C} \sim 1,200^{\circ}\text{C}$ 의 온도측정범위를 갖는

K-type 열전대(K-type thermocouple, OMEGA Engineering)를 삽입하였다. 경사면 하단에 삽입된 열전대가 공구의 경사면 온도를 측정하고 있는지 평가하기 위해 2mm의 미소면적의 온도를 측정할 수 있는 $-35^{\circ}\text{C} \sim 950^{\circ}\text{C}$ 의 측정범위를 갖는 레이저온도계(testo 845, Testo AG)

를 사용하여 경사면의 온도를 측정하여 열전대 측정값과 비교하였다.

코팅된 초경 인서트(CNMG 120408 SM1105, Sandvik)를 사용하여 정삭조건(절삭 속도 60 m/

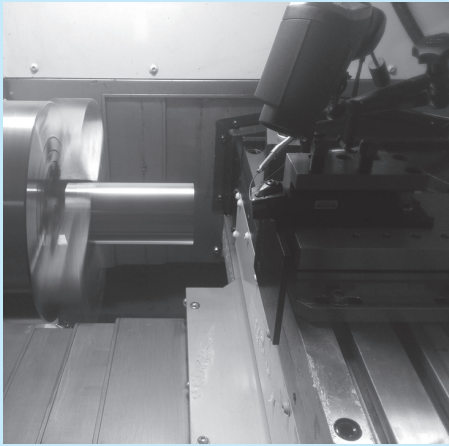


그림 7 열전대와 레이저 적외선온도계를 사용한 티타늄 합금 선삭가공 중 공구온도의 측정



그림 8 초경 인서트에 삽입된 열전대와 경사면에 조사된 레이저의 모습

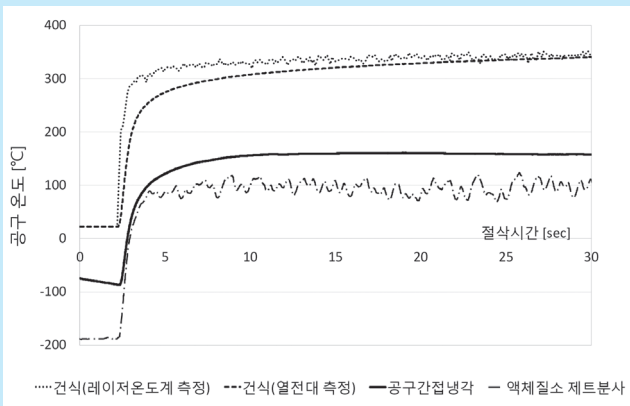


그림 9 선삭 가공 중 공구 경사면의 온도 측정 결과

min, 절삭 깊이 2.0 mm, 이송량 0.25 mm/rev)에서 절삭시간에 따른 공구온도를 측정하였다. 경사면 온도측정 여부 평가를 위해 건식가공에서 열전대로 측정된 온도와 레이저 적외선온도계로 동시에 측정된 온도를 비교하였다. 모두 절삭시간 25초 이후 정상상태에서 약

공구간접냉각 방식은 극저온 가공 시 액체질소 제트분사에 비해 안정적이고 균일한 공구의 냉각이 가능하며, 이를 바탕으로 절삭성의 향상을 기대할 수 있다.

340℃로 비슷하게 측정되었다. 이를 바탕으로 공구에 삽입된 직경 0.5 mm의 K-type 열전대가 경사면의 온도를 측정하고 있다고 볼 수 있다. 정상상태인 25초부터 5초 동안 공구 내부에 삽입된 열전대로 측정된 온도의 평균온도와 표준편차를 구하였다. 액체질소 제트분사 시 정상상태에서 평균온도는 99.3℃였으며, 표준편차는 11.9℃로 측정되었다. 공

구간접냉각 방식의 경우 정상상태에서 평균온도는 158.0℃였으며, 표준편차는 0.3℃였다. 액체질소 제트분사의 경우 공구 온도의 변화가 크게 발생하는데 이는 이송과정에서의 액체질소의 기화로 인한 분사압력의 변화에 의한 것이다. 실험결과에서 보듯이 공구간접냉각 방식을 사용한 경우 액체질소 제트분사 방식에 비해 냉각 균일성이 우수함을 알 수 있다. 현재 이러한 결과를 바탕으로 티타늄 합금의 선삭가공에서 극저온 가공 시 냉각의 균일성이 절삭성에 미치는 영향에 대한 실험적인 분석이 진행 중이다.