

## 칩 말림 방지를 위한 고압 분사 노즐 설계에 관한 연구

이중섭\*, 윤지훈<sup>+</sup>, 정인국<sup>+</sup>, 송철기<sup>++</sup>, 서정세<sup>++</sup>

(논문접수일 2011. 07. 12, 수정일 2011. 07. 27, 심사완료일 2011. 07. 28)

### A Study on Design of High Pressure Injection Nozzle for Avoiding Chip Curling

Chung Seob Yi\*, Ji Hun Yun<sup>+</sup>, In Guk Jeong<sup>+</sup>, Chul Ki Song<sup>++</sup>, Jeong Se Suh<sup>++</sup>

#### Abstract

In this study, it was grasped to the flow characteristics of cutting fluid injected by nozzle installed in high pressure holder for avoiding chip curling occurred during machining process. And for avoiding chip curling, the possibility of elimination under various chip conditions was checked. Consequently, the highest discharging pressure and velocity was shown in 15° of nozzle inflow angle. Also as nozzle outlet diameter is small, the pressure and velocity of injected flow are high. Moreover, It could be confirmed that width and thickness of chip have no direct effect on chip elimination and it is achieved by torque generated by injected cutting fluid.

**Key Words :** Injection Nozzle(분사노즐), Chip Curling(칩 말림), HP Holder(고압홀더), CFD(전산유체역학), FEM(유한요소해석)

### 1. 서론

최근 세계적인 무역경쟁으로 생산성 향상과 원가절감이 산업계의 화두로 등장함에 따라 금속가공분야에서도 다각도로 노력하고 있는 실정이다. 가공속도는 생산성 향상에 크게 영향을 미치는 인자로 전체 생산 공정에서 절삭가공이 차지하는 비율이 높게 차지하고 있다.

현재 절삭기계는 산업의 광범위한 분야에서 제품 가공공정에서 제품품질을 결정하는 중요한 공작기계이다. 특히, 자동차 부품 제조전기전자 부품제조업과 정보화 시대에 요구되는 정보통신기기, 일반기계제조, 금형, 광통신부품, 우주항공 및 군사 분야 등에 쓰이는 정밀광학부품에 이르기까지 절삭분야에 적용되어 제품 품질을 좌우하고 있다<sup>(1~4)</sup>.

보통 항공기 엔진부품에 사용되는 일반적인 소재는 인코넬

강, STS410 등 니켈 합금강이 주로 사용되고 있어 이는 가공열 변형이 심한 재질이며, 내인성 소재로서 가공이 어려운 난가공재 중의 하나이다. 따라서 부품을 가공할 때 칩 블로킹 현상이 발생하기 때문에 가공시간을 길게 할 경우 가공의 정도를 악화시키는 요인으로 작용하기 때문에 생산성 저하로 연결된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 새로운 기술이 절실히 필요한 현실이다<sup>(5~6)</sup>.

특히, 항공기 부품 가공의 주요 생산라인인 수직선반을 이용한 항공기 엔진부품의 가공 시 가장 취약하며 생산성을 증대시킬 수 있는 공정 요소로서 선삭시 발생하는 칩에 대한 적절한 대처가 중요한 요소로 작용하고 있다. 인성이 강한 재질의 경우 칩 발생이 연속형이며, 높은 전단변형률로 인해 변형 경화되어 제품에 손상을 초래하게 된다.

마찰에 의해 절삭가공이 이루어질 때 칩 표면의 온도가 증가

\*\* 경상대학교 BK21(첨단기계항공) (cs\_yi@hotmail.com)

주소: 경상남도 진주시 가좌동 진주대로 501

+ 경상대학교 대학원

++ 경상대학교 기계공학부, 공학연구원(ERI)

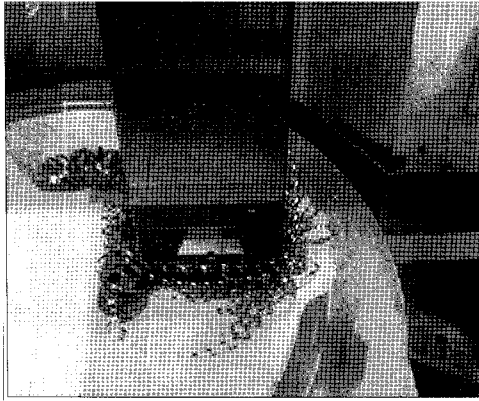


Fig. 1 Phenomenon of chip curling

하게 되는데 이때 제트노즐에 의한 집중적으로 냉각시킬 경우 급랭으로 인해 칩의 취성을 극대화시켜 분사압력에 의한 칩이 절단될 수 있는 조건이 중요하다.

항공기 부품 가공에서 사용되는 주로 인코넬 강과 STS410 등 니켈과 크롬이 다량 함유된 난삭재로서, 내인성 재질의 특성인 긴 칩의 배출과 이로 인한 작업 중의 불필요한 칩 제거작업이 동반된다.

NC 작업시 불필요한 일시정지 또는 칩에 의한 제품 표면조도 확보 실패, 공구의 급속마모 등 상당부분의 공정불안 요인이 있으며, 이와 함께 열에 의한 변형이 일으키는 제품의 가공 정밀도 에러 등이 당면한 문제로 지적되고 있다. 특히, Fig. 1과 같이 인성이 질긴 재질일 경우 칩 말림 현상이 발생하여 작업자가 도중에 지속적으로 칩을 제거해야 되는 번거로움 발생하고 있고, 이로 인해 작업시간이 상대적으로 길어지게 되어 작업현장에서는 생산성 향상에 큰 걸림돌이 되고 있는 실정이다.

본 연구의 발단은 칩 블로킹을 해소할 수 있는 대표적인 방법인 고압분사홀더를 사용하여 칩과 인서트 사이에 고압절삭유를 분사하여 칩을 상면으로 밀어냄으로써 칩 말림현상을 해소하기 위해 고압분사홀더의 핵심부품인 노즐에 대한 연구를 통하여 칩 제거에 가장 유리한 노즐을 설계하고, 이를 적용한 고압홀더로 다양한 조건의 칩을 제거할 수 있는지 유한요소해석을 이용하여 예측해 보았다.

## 2. 고압홀더 구조

본 연구에 적용되는 고압홀더의 구조는 Fig. 2와 같은 형태를 가지고 있으며, 내구성을 고려하여 홀더 자체를 주조가 아닌 가공을 통해 생산되고 있다. 따라서 절삭유 통로가 유동특성에 의한 유로로 설계되지 못하고 드릴링을 통한 직선형태의 유로를 가지고 있는 것이 특징이다.

Fig. 3은 본 연구에 적용되는 고압홀더 도면을 나타내고 있다. 홀더 자체 재질은 기계구조용 탄소강 SCM 440으로 제작

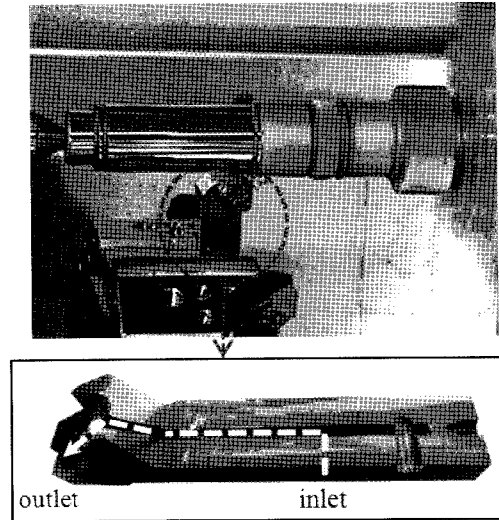


Fig. 2 Flow path in HP holder

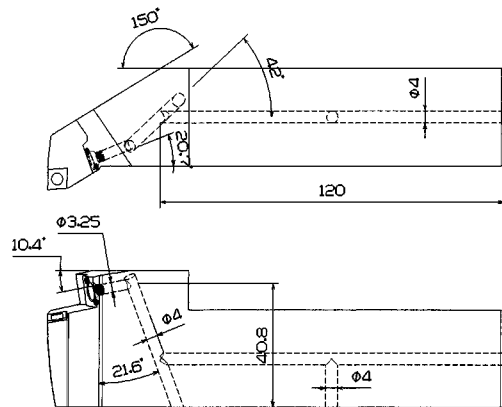


Fig. 3 Drawing of HP holder

되었고, 절삭유가 유입되는 입구직경은 4mm 이며 출구에는 분사노즐이 볼트 타입으로 삽입되어 있다.

## 3. 해석모델 및 경계조건

### 3.1 노즐 유동해석

본 연구에서는 고압홀더 분사에 대한 유동현상을 기술하는 지배방정식에 대하여 3차원 정상상태의 난류유동으로 가정하였다. 또한 공작유 유동에 관한 연속 방정식, 운동량 방정식, 난류운동에너지 방정식 그리고 난류운동량 소산 방정식이 함께 계산되었다. 유동장 내의 밀도는 일정한 것으로 간주하여 온도변화에 대한 점성은 무시하여 순수 유동분포에 대한 계산만 수행하였다. 난류모델은 이미 공학적으로 타당성을 검증 받은 Realizable k-ε two layer 모델을 적용하였으며, 수치해석에 사용된 상용코드는 STAR-CCM+를 사용하였다.

고압홀더에서 송출되는 절삭유의 분사형태는 Solid Stream

(직선형)이 노즐에 적용되었다. 유동형태가 분무(Spray)되지 않기 때문에 절삭유 구간과 대기쪽의 공기구간을 나누고 물성치를 별도 설정하여 그 경계에 인터페이스를 설정하였으며, 출구에서는 각각 대기압으로 설정하여 계산을 수행하였다<sup>(7~10)</sup>.

홀더 입구는 절삭유가 공급되는 유속으로 설정하였고, 출구는 대기압으로 설정하였다. 또한, 노즐에 대한 설계변수는 Fig. 4와 같이 노즐 유입각도와 노즐 출구직경을 변수로 설정하였다.

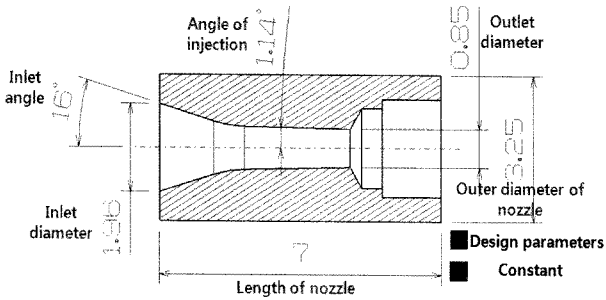


Fig. 4 Design parameters of nozzle at holder

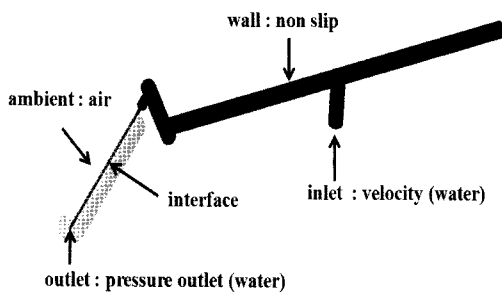


Fig. 5 Boundary conditions

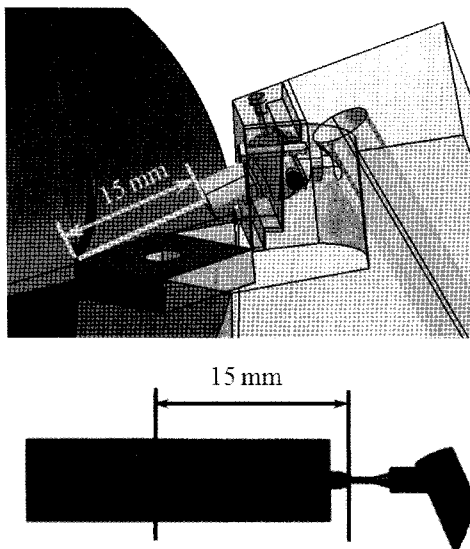


Fig. 6 Determination of data acquisition section

노즐 유입각도는 12°에서 20°까지 1°씩 증가시켰고, 노즐 출구직경은 0.85mm에서 1.05mm까지 1mm씩 증가시켜 노즐에서 송출되는 15mm지점에서의 속도와 압력에 대한 경향성을 파악하였다.

### 3.2 칩 응력해석

칩에 발생하는 응력을 확인하여 분사되는 절삭유에 의한 칩 제거 가능성을 판단하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 현재 칩 절삭에 관한 응력분포 및 거동을 유한요소해석을 통해 파악하기 위해 ANSYS Workbench를 사용하였다<sup>(11~12)</sup>.

먼저 폭( $w$ )과 두께( $t$ )가 각각 1mm인 칩 형상을 모델링 하여 피삭재의 인장강도보다 높은 응력을 발생시키는 힘을 구하였다. 그리고 이 힘을 하중조건으로 하여 그림 Fig. 7과 같이 발생할 수 있는 칩의 폭 및 두께를 변수로 하여 칩 제거 가능 여부를 확인해 보았다. 또한 하중조건을 식 (1)에 적용하여 칩 제거에 필요한 노즐 출구 속도를 확인하였다.

Table 1 Properties of inconel 718

Item list	Value
Elastic modulus(Tension)	211GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield strength	1,240MPa
Tensile strength	1,036MPa
Density	8,190kg/m <sup>3</sup>

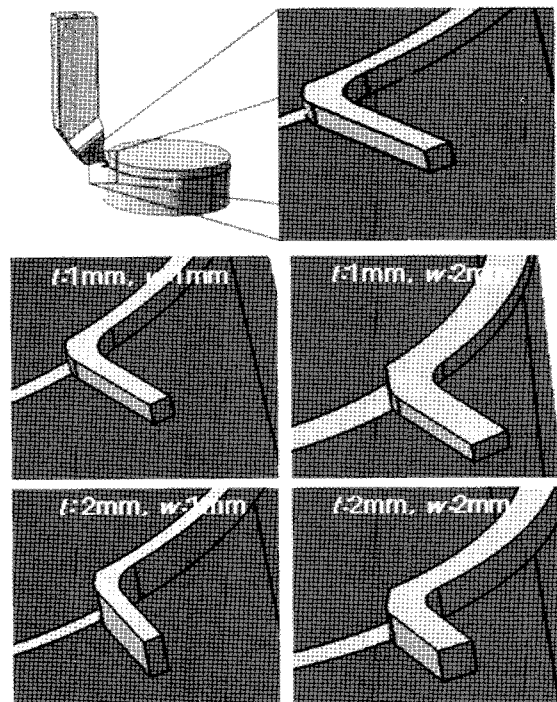


Fig. 7 Chip shape according to width and thickness

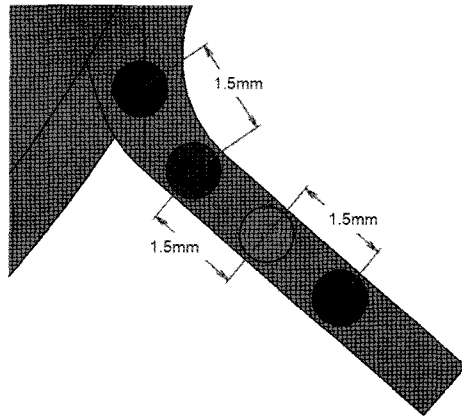


Fig. 8 Setting up the injected positions on chip

$$F = \rho QV = \rho AV^2 \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 절삭유 밀도,  $Q$ 는 체적유량,  $A$ 는 출구단면적을 나타내며,  $V$ 는 노즐출구에서 칩까지의 평균속도를 나타낸다.

Table 1은 인코넬 718(Ni: 52.5%, Cr : 19%, Fe: 18.5%, Nb+Ta : 5.1, Mo : 3%)에 대한 물성치를 나타내고 있다. 인코넬강은 니켈합금강의 종류이며, 브리넬 경도가 382인 금속이다.

다음으로 피삭재의 재질에 따른 칩 제거 가능 여부를 확인해 보았다. 절삭가공에서 많이 사용되는 피삭재의 소재인 인코넬 718, 스테인리스 강, 알루미늄 합금, 티타늄 합금으로 바뀌 가며 칩 제거 가능 여부를 확인해 보았다.

마지막으로 칩의 두께와 폭을 모두 1mm로 고정된 상태에서 절삭유가 분사되는 위치가 칩 제거에 미치는 영향을 확인해 보았다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 칩 상의 세 위치에 각각 앞서 제시한 하중조건을 적용하여 발생하는 등가응력을 확인해 보았다.

#### 4. 수치해석 결과 및 고찰

##### 4.1 최적 노즐 결정

노즐 유입 각도 변화가 분사되는 유동 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 입구 유입 속도를 3m/s로, 노즐 출구 직경을 0.85mm로 고정된 상태에서 노즐 유입 각도를 13°에서 20°까지 1°간격으로 변화시켜 해석을 수행하였고, Fig. 9와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

해석 결과 노즐 유입각도에 따른 유동특성의 변화는 미미한 수준이었다. 하지만 13°에서 유입각도가 높아질수록 압력과 속도가 약간 증가하다가 유입 각도가 15°일 때 송출되는 절삭유의 압력과 속도가 각각 0.592MPa과 173.51m/s로 최고점을 나타내었고 다시 낮아지는 경향을 보였다.

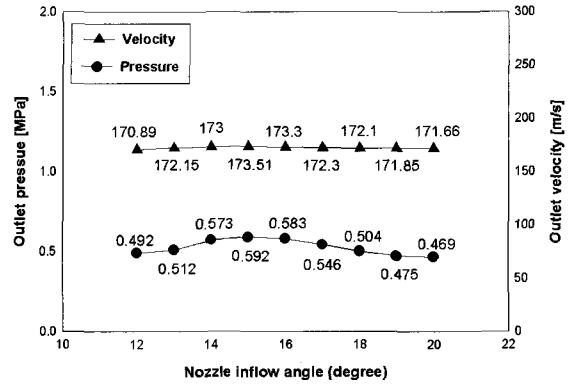


Fig. 9 Pressure and velocity on data acquisition section according to nozzle inlet angle

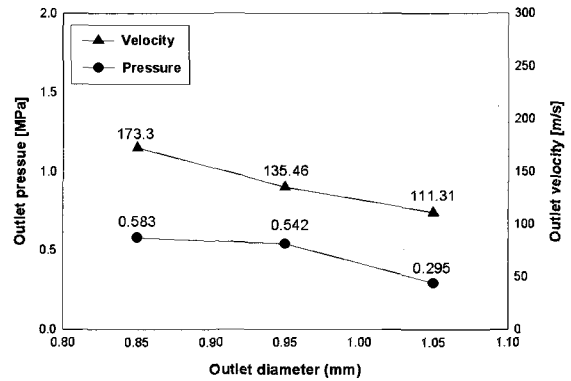


Fig. 10 Pressure and velocity on data acquisition section according to nozzle outlet diameter

Fig. 10은 노즐 출구 15mm지점에 노즐 출구직경에 따른 압력과 속도분포를 비교한 것이다. 노즐 출구직경이 커질수록 토출압력과 속도가 감소함을 알 수 있었다. 결국 노즐 출구직경이 0.2mm 증가함에 따라 압력은 약 0.29MPa 감소하였고, 속도 또한 약 62m/s 로 크게 감소함을 확인할 수 있었다. 따라서 크기가 작고 고압이 걸리는 노즐의 경우 출구각도보다 출구직경에 대한 설계가 세밀히 검토되어야 할 것으로 사료된다.

##### 4.2 칩 제거 여부 확인

먼저 폭과 두께가 각각 1mm인 칩을 제거하는데 요구되는 힘을 확인한 결과, 500N의 힘이 작용하였을 때 1361MPa의 등가응력이 발생하였고, 이는 피삭재인 인코넬 718의 인장강도인 1240MPa을 넘기 때문에 칩이 제거 될 것이라 판단하였다. 앞서 제시한 식 (1)을 통하여 500N의 힘이 칩에 작용하기 위해서는 약 950m/s의 노즐 출구 속도가 요구되었다.

또한 유동해석을 통하여 가장 좋은 유동특성을 보인 유입각도 15°, 출구 직경이 0.85mm인 노즐을 적용했을 때, 950m/s의 노즐출구 속도를 보이기 위해서는 홀더로 약 42m/s의 절삭유가 유입되어야 함을 확인할 수 있었다.

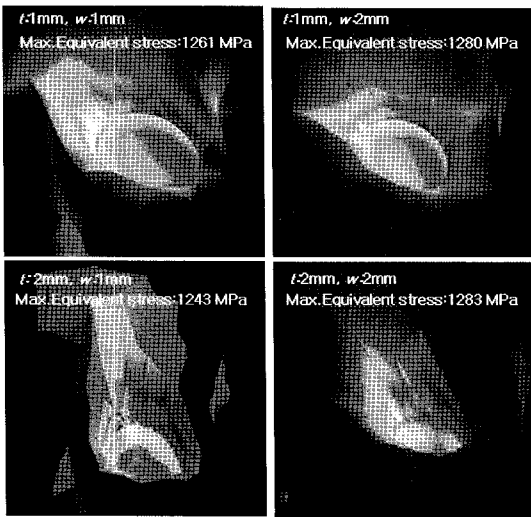


Fig. 11 Distributions of equivalent stress according to width and thickness of chip

Table 2 Maximum equivalent stress of chip and ultimate stress of various materials

	Max. equivalent stress [MPa]	Ultimate stress [MPa]
Inconel718	1316	1240
Stainless steel	1313	586
Aluminium alloy	1306	310
Titanium	1296	1070

Fig. 11은 폭과 두께를 각각 1mm, 2mm로 변화시켰을 때 하중조건 500N에 의해 발생하는 등가응력 분포를 나타낸 것이다.

해석결과 네 가지 경우 칩에 발생하는 최대 등가응력이 각각 1261, 1260, 1243, 1283MPa로 차이가 없었다. 이를 통하여 칩의 두께나 폭은 칩 제거에 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한 폭이 2mm인 칩의 경우 절삭유가 닿는 부분에서만 높은 등가 응력을 나타내었고 절삭유가 닿지 않는 부분에서는 응력이 거의 발생하지 않아 칩이 제거되지 않을 것이라 예측되었다.

피삭재 재질에 따라 폭과 두께가 각각 1mm인 칩에 발생하는 응력의 분포형태는 모두 동일하였다. 이는 피삭재의 재질이 응력분포형태에는 아무런 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 다만 발생하는 최대 등가응력은 각 소재마다 약간의 차이를 보였다.

Table 2는 각 소재별로 발생하는 최대 등가응력과 극한강도를 나타낸 것이다. 모든 재질에 있어 발생하는 최대등가응력이 극한강도보다 높았기 때문에 본 해석조건에서는 칩이 분사되는 절삭유에 의해 제거될 것이라 예측된다.

Fig. 12는 앞서 제시한 Fig. 8의 각 지점에 절삭유가 분사되

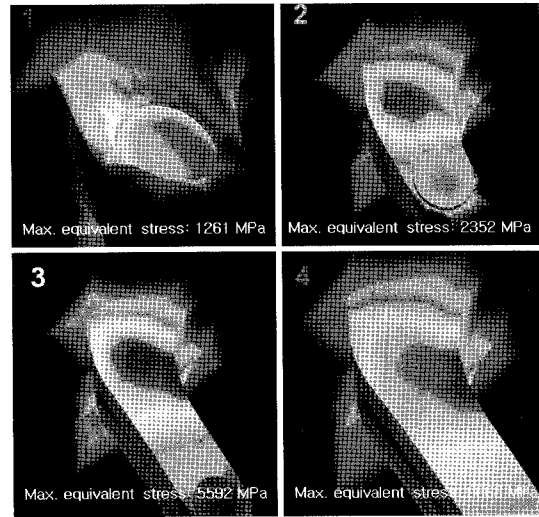


Fig. 12 Distributions of equivalent stress on chip according to injected position

었을 때 칩에 발생하는 등가응력을 나타낸 것이다. 칩의 두께와 폭이 각각 1mm인 칩을 적용하였고, 그 결과 1, 2, 3, 4번 지점에서 각각 1261, 2352, 5592, 9668 MPa의 최대 등가응력이 칩 뿌리 부분에 발생하였다. 이를 통하여 절삭유가 분사되는 위치가 칩의 뿌리 부분에서 멀어질수록 칩의 뿌리 부분에 높은 하중이 작용하여 발생하는 최대 등가응력은 큰 폭으로 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 칩이 발생하는 형태를 정확히 파악하여 칩이 발생하는 뿌리부분에서 먼 지점에 절삭유를 분사시킨다면 칩 제거에 상당히 유리할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 칩 말림 방지를 위한 고압 분사 노즐 설계를 위하여 노즐 설계변수에 따라 분사되는 절삭유의 유동특성을 파악하였고, 다양한 조건의 칩에 대한 제거 가능성을 예측해보았다. 그 결과 다음과 같은 결론은 얻을 수 있었다.

- (1) 유동해석 결과 노즐유입각도가 약 15°이고, 노즐 출구 직경이 작을수록 고압분사에 유리함을 확인할 수 있었다.
- (2) 칩의 폭과 두께는 실제로 칩이 절단되는데 큰 영향을 주지 않으며 칩이 절단되는 것은 분사되는 절삭유가 칩을 누르는 힘에 의해 발생하는 하중과 관련이 있는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 칩에 절삭유가 분사될 때 칩이 발생하는 뿌리부분에서 먼 지점에서 절삭유가 분사될수록 칩 제거에 매우 유리하였다.
- (4) 칩이 형성될 때 가공경화에 따른 칩 뿌리부분의 경도가 높아질 경우 조직이 조대해져 분사압력이 높은 절삭유에 의해 칩 제거가 용이할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구의 일부는 2단계 BK21 대학원 육성사업, 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

## 참 고 문 헌

- (1) Lee, E. S., Kim, J. D., and Hyun, D. H., 1993, "A Study on the Analysis of Stress Distribution by Orthogonal Cutting Chip Model," *Trans of the KSME*, Vol. 17, No. 12, pp. 2926~2935.
- (2) Sim, G. J., Cheong, C. Y., Oh, S. H., and Seo, N. S., 1995, "A Study on the Classification and Prediction of the Chip Type under the Specified Cutting Conditions in Turning," *Journal of the KSPE*, Vol. 12, No. 8, pp. 53~62.
- (3) Choi, J. P., and Lee, S. J., 1999, "Chip Breaking Prediction in Turning Process Considering Cutting Conditions and Chip Breaker Parameters," *Journal of the KSPE*, Vol. 16, No. 9, pp. 191~199.
- (4) Kim, K. W., Ahn, T. K., and Lee, W. Y., 2006, "Finite Element Analysis of an Orthogonal Cutting Process with Low Speed," *Journal of the KSMTE*, Vol. 5, No. 2, pp. 10~15.
- (5) Sim, K. J. and Mun, S. D., 2006, "Analysis of Chip Thickness Model in Ball-end Milling," *KSMTE*, Vol. 15, No. 2, pp.73~80.
- (6) Lee, S. Y., Han, J. A., Kim, J. W., Gwak, Y. K., Kang, D. B., and Ahn, J. W., 2010, "Development on Tool Holder of Vibration Cutting System for Ultraprecision Machining," *KSMTE*, Vol. 20, No. 3, pp.268~273.
- (7) Kim, K. M., Choi, D. K., and Ju, J. N., 1988, "Development of a Minute Electric Discharge Machine for Machining of Shaft Hole," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 15, No. 12 pp. 55~61.
- (8) Lee, J. W., and Min, K. D, 2006, "A Study on Nozzle Flow and Spray Characteristics of Piezo Injector for Next Generation High Response Injection," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 30, No. 6, pp. 553~559.
- (9) Kim, Y. J., Park, J. W., and Seo, L. S., 2009, "Effect of Nozzle Geometry on the Suction Flow Rate in a Ejector", *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 12, No. 6, pp. 13~17.
- (10) Park, S. H., Suh, H. K., and Lee, C. S., 2007, "Effects of Nozzle Length-diameter Ratio on Internal and External Flow Characteristics of Biodiesel Fuel," *Transactions of KSAE*, Vol. 15, No. 4, pp. 94~100.
- (11) Min, K. T., and Jang, H. S., "Deformation analysis of Tool and Tool Holder for Micromachining by FEM," *KSMTE*, Vol. 9, No. 1, pp. 87~92.
- (12) Kwon, K. H., and Chung, W. J., "Stress and Deformation Analysis of a Tool Holder Spindle using iSight®," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 27, No. 9, pp. 103~110.