<학술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2011.35.10.1061** ISSN 1226-4881

공작기계용 HP Holder 분사노즐 유동특성에 관한 수치해석§

이중섭* · 윤지훈* · 정인국* · 송철기** · 서정세**†
*경상대학교 기계공학부, ** 경상대학교 기계공학부, ERI(공학연구원)

Numerical Analysis of the Flow Characteristics of High-Pressure Injection Nozzle for Machine Tools

Chung Seob Yi*, Ji Hun Yun**, In Guk Jeong**, Chul Ki Song* and Jeong Se Suh*†
* School of Mechanical Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.,
** School of Mechanical Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ., ERI

(Received April 12, 2011 ; Revised June 20, 2011 ; Accepted June 22, 2011)

Key Words: HP Holder(고압홀더), Nozzle(노즐), Machine Tool(공작기계)

초록: 본 연구에서는 절삭가공 시 생산성 향상을 위해 사용되는 고압분사 홀더(hp holder)에 들어가는 노즐의 유동특성을 파악하였다. 집중형의 노즐 분사형태를 유지하면서 분사되는 유동에 영향을 주는 설계인자로 입구 유입속도, 노즐 유입각도, 노즐 출구직경을 설정하여 이에 대한 수치해석을 수행하였다. 그 결과 입구 유입속도가 높을수록, 노즐 출구직경이 작을수록 분사되는 유체의 압력과 속도가 높은 것으로 나타났다. 노즐 유입각도의 경우에는 각도변화에 따른 유동특성의 차이가 크지 않았지만 약 15°일 때가 가장 높은 유동특성을 보였다. 또한 결과값을 이용하여 분사되는 유체의 힘에 의해 가공 시 발생하는 칩의 제거 가능 여부를 확인해 보았다.

Abstract: In this study, the flow characteristics of an injection nozzle installed in a high-pressure holder for improving productivity were determined. The inlet velocity, nozzle inflow angle, and nozzle outlet diameter were selected as design factors having an influence on the flow characteristics, and numerical analysis was conducted for these factors. As the inlet velocity is high and the nozzle outlet diameter is small, the pressure and velocity of the injected flow are high. In the case of the nozzle inflow angle, the variation of flow characteristics according to angle was slight, but the highest pressure and velocity were found at 15°. In addition, the possibility of chip elimination by the injected flow was analyzed on the basis of the numerical results.

1. 서 론

최근 세계적인 무역경쟁으로 생산성 향상과 원가절감이 산업계의 화두로 등장함에 따라 금속가공분야에서도 다각도로 노력하고 있는 실정이다.

가공속도는 생산성 향상에 크게 영향을 미치는 인자로 전체 생산공정에서 절삭가공이 차지하는 비율이 클수록 중요한 의미를 차지하고 하고 있다. 특히, Fig. 1과 같이 인성이 질긴 재질일 경우 Chip 말림 현상이 발생하여 작업자가 도중에 지속적으로 Chip 을 제거해야 되는 번거로움 발생하고 있다. 이로 인해 작업시간이 상대적으로 길어지게 되어 생산성 향상에 큰 걸림돌이 되고 있다.

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

보통 항공기 엔진부품에 사용되는 일반적인 소재는 Inconel 강, STS410 등 니켈 합금강이 주로 사용되고 있어 이는 가공 열변형이 심한 재질이며, 내인성 소재로써 가공이 어려운 난가공재 중의 하나이

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 유체공학부문 춘계학술대회(2011. 4. 15.-16., 포항공대) 발표논문임

† Corresponding Author, jssuh@gnu.ac.kr

ⓒ 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

다. 따라서 부품을 가공할 때 Chip 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. 특히 항공기 부품 가공의 주요 생산라인인 수직선반을 이용한 항공기 엔진부품의 가공 시 가장 취약하며 생산성을 증대 시킬 수 있는 공정 요소로서 선삭시 발생하는 Chip 에 대한 적절한 대처가 중요한 요소로 작용하고 있다. 인성이 강한 재질의 경우 칩 발생이 연속형 Chip 형태이며, 높은 전단변형률로 인해 변형 경화되어 제품에 손상을 초래하게 된다.

마찰에 의한 경작을 통해 절삭가공이 이루어질 때 Chip 표면의 온도가 증가하게 되는데 이때 제트노즐에 의한 집중적으로 냉각시킬 경우 급냉으로 인해 칩의 취성을 극대화시켜 분사압력에 의한 칩이 절단될 수 있는 조건이 중요하다.

항공기 부품 가공에서 사용되는 Law material이 주로 Inconel강과 STS410 등 니켈과 크롬이 다량 함유된 난삭재로서, 내인성 재질의 특성인 long chip의 배출과 이로 인한 작업 중의 불필요한 Chip 제거작업이 동반된다.

NC PGM의 불필요한 일시정지, Chip에 의한 제품 표면의 Surface Texture확보 실패, 공구의 급속마모 등 상당부분의 공정불안 요인이 있으며, 이와 함께 열에 의한 변형이 주는 제품의 가공정밀도 에러 등이 당면한 문제로 지적되고 있다.

본 연구의 발단은 Chip 블랭킹을 해소할 수 있는 대표적인 방법인 고압분사홀더를 사용하여 칩과 인서트 사이에 고압절삭유를 분사하여 칩을 상면으로 밀어냄으로써 Chip 말림현상을 해소하는 것이었다. 또한 고압분사홀더의 핵심부품인 노즐에 대한 연구 를 통한 최적설계 자료를 도출하고 추후 개발에 적용하고자 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 유동해석을 통한 설계자료를 도출하고자 한다. 또한 유동해석을 통해 분사되는 절삭유가 Chip 제거에 효과적인지 확인하고자 한다.

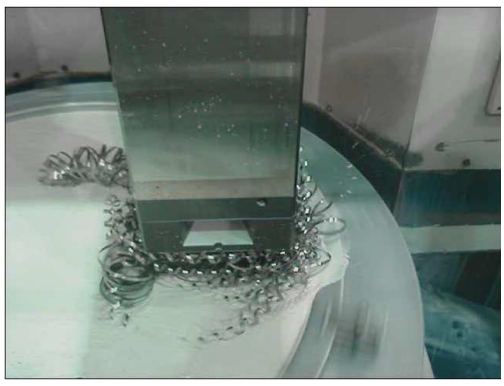


Fig. 1 Phenomenon of chip curling

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 제작되었고, 절삭유가 유입되

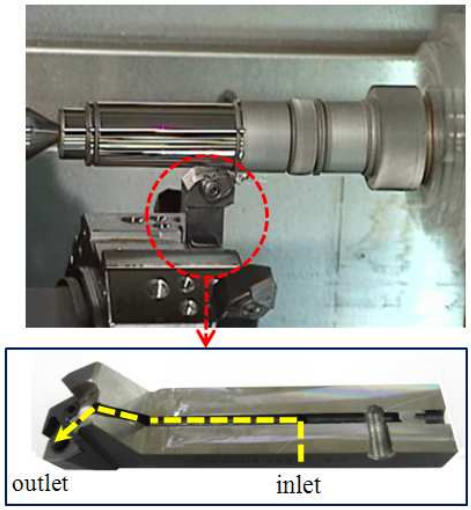


Fig. 2 Flow path in HP holder

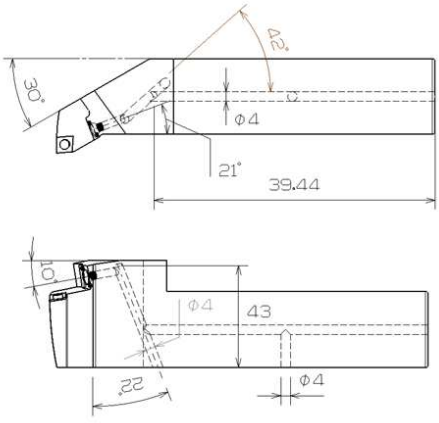
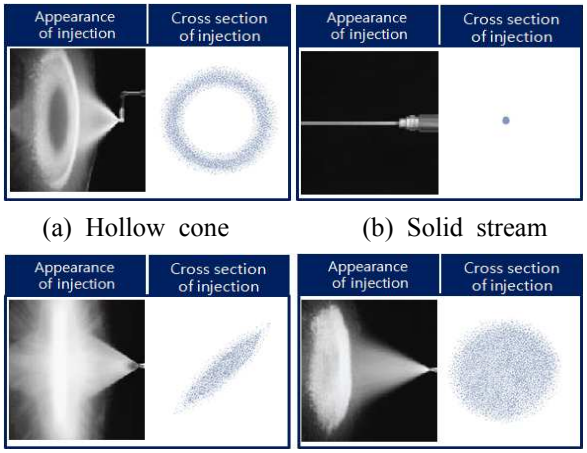


Fig. 3 Drawing of HP holder



(a) Hollow cone (b) Solid stream

(c) Flat (d) Full cone

Fig. 4 Injection shape according to nozzle type

는 입구직경은 4mm 이며 출구에는 분사노즐이 볼트 타입으로 삽입되어 있다.

3. 수치해석 방법 및 경계조건

3.1 지배방정식

본 연구에서는 지배방정식은 식 (1)과 같으며, 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 검증받은 Realizable k-ε two layer모델을 적용하였으며, 수치해석에 사용된 Solver는 STAR-CCM+를 사용하였다.

$$\Gamma\frac{\partial}{\partial\phi}\left[\int_v Q dV+\oint(F-G)da\right]=\int_v H dV \qquad (1)$$

3.2 경계조건

고압홀더에서 토출되는 절삭유의 분사형태는 Fig. 4와 같이 여러형태가 있을 수 있으며, 본 연구에서는 (b)와 같은 형태로 고압분사되는 노즐이 적용된다. 따라서 유동형태가 분무(spray)되지 않기 때문에 절삭유 구간과 대기쪽의 공기구간을 나누고 물성치를 별도 설정하여 그 경계에 인터페이스를 설정하였으며, 출구에서는 각각 대기압으로 설정하여 계산을 수행하였다.[5~10]

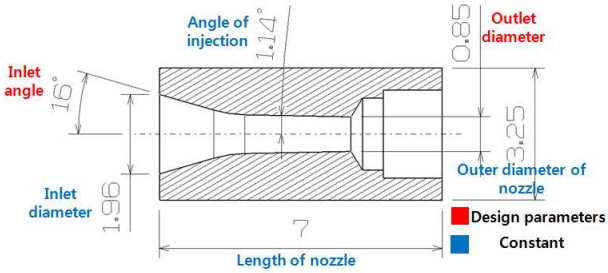


Fig. 5 Design parameters of nozzle at holder

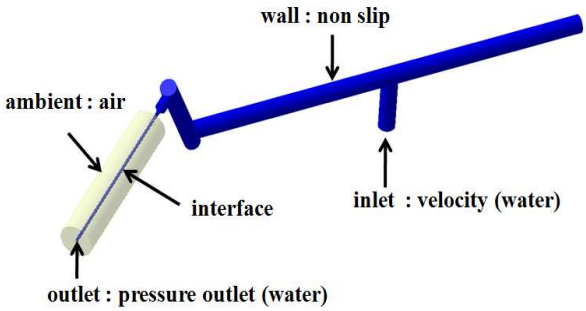


Fig. 6 Boundary conditions

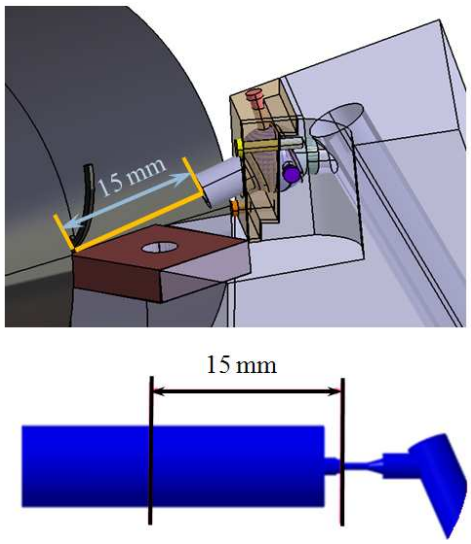


Fig. 7 Data acquisition part

홀더 입구는 절삭유가 공급되는 유속으로 설정하였고, 출구는 대기압으로 설정하였고, 노즐에 대한 설계변수는 Fig. 5와 같이 노즐 유입각도와 노즐 출구직경을 변수로 설정하였다.

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

또한 홀더에서 분사된 절삭유가 Chip 가해지는 힘을 식 (2)를 통해 구하여 구조해석시 하중조건으로 부여하였다.

$$F = \rho Q V = \rho A V 2 \tag{2}$$

여기서 ρ는 절삭유 밀도, Q는 체적유량, V는 노즐출구에서 Chip까지의 평균속도, A는 출구단면적을 나타내며, 결국 F=973.9N의 힘을 Chip의 분사위치에 하중조건으로 설정하여 구조해석을 수행하였다. 또한 구조해석에 사용된 지배방정식은 식 (3)과 같다.

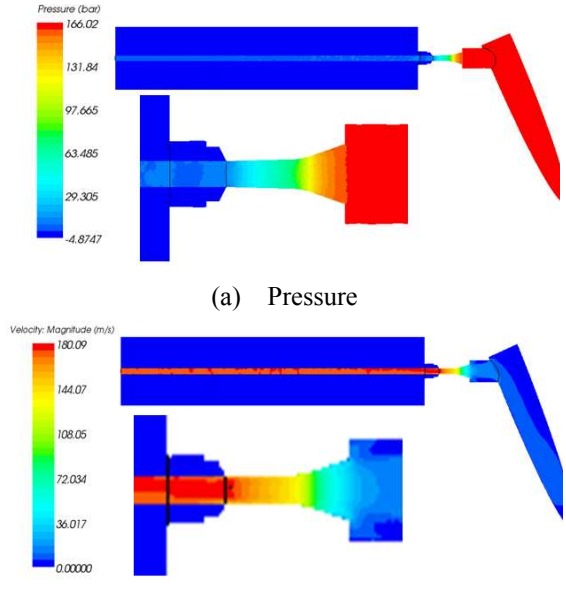
$$\int_V \omega_{,i} k \phi_{,i} dV - \int_V \omega q_g dV + \int_{S_q} \bar{q} \omega dS + \int_{S_q} \bar{h} \omega \phi dS = 0 \tag{3}$$

4. 수치해석 결과 및 고찰

4.1 노즐 유동특성

Fig. 8은 홀더 입구속도를5m/s, 노즐 유입각도가 16deg 노즐 출구직경이 0.85mm일 경우일 때 단면에 대한 압력과 속도를 나타내고 있다.

압력분포를 보면 홀더 내부에 약 166bar의 압력이 발생하였고, 노즐을 통과하면서 급격하게 압력회복이 발생되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 노즐 출구에서 속도가 약 180m/s로 급격하게 증가되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Pressure

(b) Velocity

Fig. 8 Results of pressure and velocity magnitude contour

Inlet 유입속도 변화가 분사되는 유동 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 노즐 유입각도를 16deg로, 노즐 출구 직경을 0.85mm로 고정한 상태에서 Inlet 유입 속도를 3m/s, 5m/s, 7m/s로 변화시키며 해석을 수행한 결과 Fig. 9와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Inlet 유입속도가 증가할수록 압력과 속도 모두 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 압력은 Inlet 유입속도가 3m/s, 5m/s, 7m/s인 경우 각각 2.6bar, 5.83bar, 15.93bar로 증가됨을 확인할 수 있었다. 토출속도 또한 각각 109.83m/s, 173.3m/s, 255.79m/s로 증가됨을 확인할 수 있었다.

노즐 유입 각도 변화가 분사되는 유동 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 Inlet 유입 속도를 3m/s로, 노즐 출구 직경을 0.85mm로 고정한 상태에서 노즐 유입 각도를 13deg에서 20deg까지 1deg 간격으로 변화시켜 해석을 수행하였고, 그 결과 Fig. 10과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

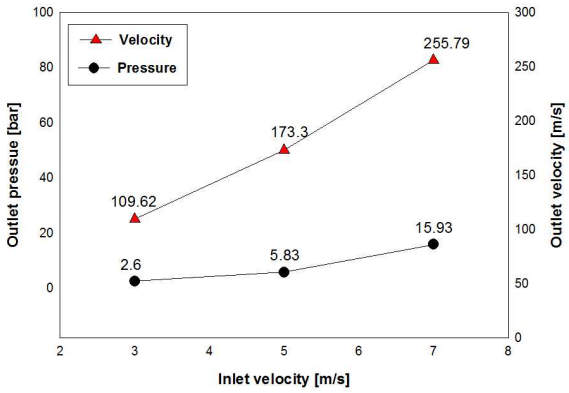


Fig. 9 Comparison of pressure and velocity at nozzle outlet

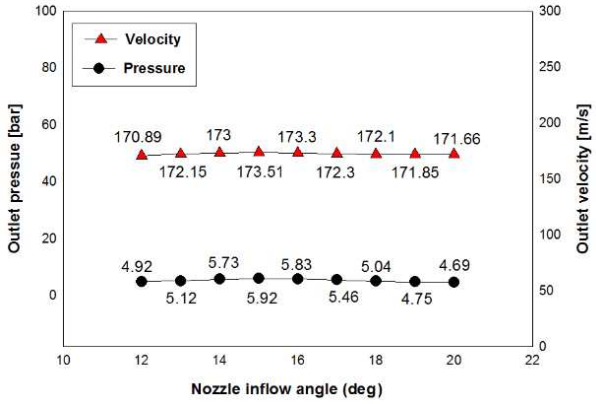


Fig. 10 Comparison of pressure and velocity according to nozzle inflow angle

노즐 유입 각도 변화에 따른 주요 단면에서의 압력 및 속도의 변화는 미미한 수준이었다. 그러나 압력과 속도 모두 노즐 유입 각도가 15°일 때 5.92bar와 173.51m/s로 그나마 양호하였으나, 전반적으로 각도변화에는 영향을 많이 미치지는 못하였다.

Fig. 11은 노즐의 출구직경을 변화시켰을 때 압력과 속도분포를 비교한 것이다. 노즐 출구직경이 커질수록 토출압력과 속도가 감소함을 알 수 있었다. 결국 노즐 출구직경이 0.2mm 증가함에 따라 압력은 약 2.9bar 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 Chip 응력해석

Fig. 12는 Chip에 발생되는 응력을 확인하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 현재 Chip절삭에 관한 응력분포 및 거동을 유한요소해석을 통해 파악하기 위해 ANSYS Workbench를 사용하였다.[7~9]

수직선반을 사용할 때 홀더는 가공시 피삭재의 수직선상에서 접근한다. 이때 Insert는 측면 부위로 피삭재를 가공하게 되므로 공구경사각 α는 0°라고 가정하였다.

Chip이 절삭될 때를 가정하여 두께 1mm의 Chip 형상을 모델링 하여 노즐에서 절삭유를 분사하였을 때 힘을 하중조건으로 부여하고, Chip에 수직으로 분사된다고 가정하여 응력이 Inconel 718의 인장강도보다 높은지를 판별하기 위해 Equivalent stress의 결과를 인장강도와 비교하였다.

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

그 결과 Chip의 모서리에서 최대응력 10,852 MPa이 발생하였고, 이는 Inconel 718의 인장강도 1,240 MPa보다 크게 초과하였기 때문에 Chip은 전단된다고 판단할 수 있었다. 또한 절삭유가 분사되는 부근에는 약 1,700MPa 이상 발생하기 때문에 절삭유를 Chip에 분사하였을 때 Chip이 제거될 것이라고 판단된다. 또한 실제 가공 시 Chip의 제거는 고압절삭유의 분사와 Insert의 가공이 같이 작용하므로 Chip은 충분히 제거될 것으로 판단된다.

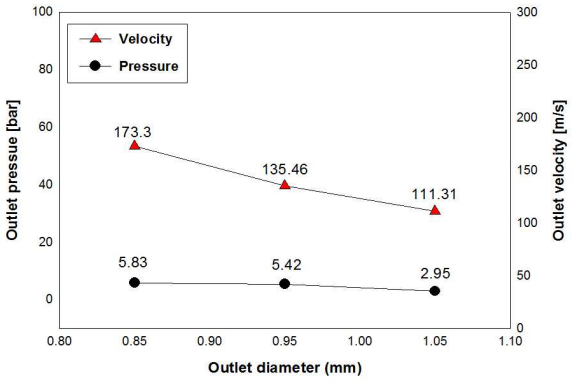
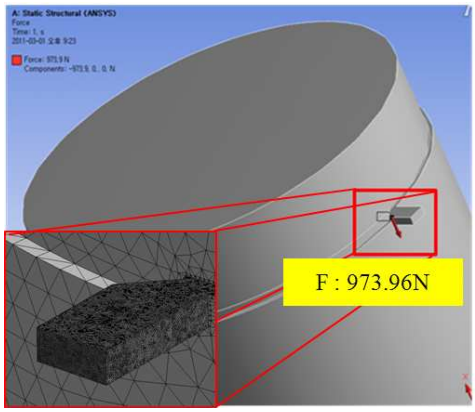


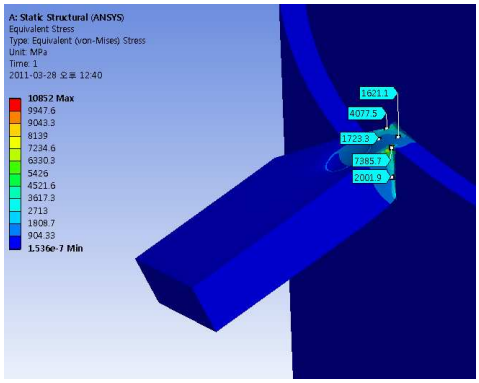
Fig. 11 Comparison of pressure and velocity according to nozzle outlet diameter

Table 1 Properties of inconel 718

Item list	Value
Elastic modulus(Tension)	211(GPa)
Poisson`s ratio	0.3
Yield strength	1,240(MPa)
Tensile strength	1,036(MPa)
Density	8,190(Kg/m^3)



(a) Load and mesh



(a) Equivalent stress

Fig. 12 Result of stress distribution

5. 결 론

본 연구는 절삭가공 공구인 홀더에서 고압의 절절삭유 분사되었을 때 Chip이 절단되는지에 대한 평가를 수행하였고, 노즐의 기하학적 형상 변화에 따른 유동특성을 수치해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 홀더로 유입되는 절삭유의 속도가 클수록 노즐에서 분사되는 출구 압력과 속도는 크게 증가하였다.

(2) 노즐 유입각도가 15deg에서 16deg부근에서 분사 압력과 속도가 미미하게 다소 높은 것으로 보이나 전반적으로 각도변화에 따른 영향은 없는 것으로 판단된다.

(3) 노즐출구 직경은 클수록 불리한 것으로 나타났고, 본 연구에서는 0.85mm일 경우가 가장 우수한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 노즐의 경우 출구직경이 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 노즐 출구속도를 통해 구한 하중을 Chip에 대한 유한요소해석을 한 결과 최대응력 6,667 MPa로 Inconel 718의 인장강도 1,240 MPa보다 크게 초과하였기 때문에 Chip에 전단이 발생될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구의 일부는 2단계 BK21 대학원 육성사업, 한국산업단지공단 2010년도 생산기술화사업 현장맞춤형 기술개발 사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

(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 Stud 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 KSMPE*, Vol. 5, No. 2, pp. 10~15.

(5) 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.

(6) 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.

(7) 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.

(8) 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

(9) Choi, Y. C., Jung, J. W. and Kim, D. J., 2001, “Characteristics of Spray from Pressure-Swirl Nozzle with Different Liquid Properties and Nozzle Geometries,” *Trans Of the KSME(B)*, Vol. 25, No. 12, pp. 1813~1820.

(10) Kim, S. R., Ku, K. W., Hong, J. G. and Lee, C. W., 2010, “Experimental Study of Discharge Coefficient and Cavitation for Different Nozzle Geometries,” *Trans Of the KSME(B)*, Vol. 34, No. 10, pp. 933~939.