

# 알루미늄 홀 가공 하중 분석을 통한 펀치 마모수준 예측에 관한 연구

전용준<sup>1†</sup>

한국생산기술연구원 금형성형연구부<sup>1,†</sup>

## A study on the prediction of punch wear level through analysis of piercing load of aluminum

Yong-Jun Jeon<sup>1†</sup>

Mold & Metal Forming R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology<sup>1,†</sup>

(Received December 06, 2022 / Revised December 27, 2022 / Accepted December 31, 2022)

**Abstract:** The piercing process of creating holes in sheet metals for mechanical fastening generates high shear force. Real-time monitoring technology could predict tool damage and product defects due to this severe condition, but there are few applications for piercing high-strength aluminum. In this study, we analyzed the load signal to predict the punch's wear level during the process with a piezoelectric sensor installed piercing tool. Experiments were conducted on Al6061 T6 with a thickness of 3.0 mm using piercing punches whose edge angle was controlled by reflecting the wear level. The piercing load increases proportionally with the level of tool wear. For example, the maximum piercing load of the wear-shaped punch with the tip angle controlled at 6 degrees increased by 14% compared to the normal-shaped punch under the typical clearance of 6.7% of the aluminum piercing tool. In addition, the tool wear level increased compression during the down-stroke, which is caused by lateral force due to the decrease in the diameter of pierced holes. Our study showed the predictability of the wear level of punches through the recognition of changes in characteristic elements of the load signal during the piercing process.

**Key Words:** Al6061, Load sensor signal, Piercing, Punch shape, Punch wear

### 1. 서론

차체 관넬은 다른 부품과의 기계적 체결이나 버링 등의 후속 공정을 위해 피어싱을 적용하고 있다. 피어싱 공정은 성형품 내부에 구멍을 뚫어내는 가공으로 소재 전단 시 펀치에 높은 하중이 전달된다. 이에 피어싱 펀치는 전단 시 발생하는 높은 하중에 의한 파손, 소재와의 마찰로 인한 마모 등의 내구성 문제가 발생된다. 특히 펀치의 마모는 전단면 불균일, 치수 불량을 발생시켜 기계적 체결 불량, 플랜지부 스트레치와 같은 후속 성형 공정에서 파단을 유발할 수 있다<sup>1)</sup>.

최근 자동차와 항공기 등의 산업 전반에서 경량화 추세가 가속화됨에 따라 알루미늄 합금과 같은 경량 소재의 사용이 증가되고 있다<sup>2)</sup>. 이에 따라 알루미늄 부품 또한 기계적 체결을 위한 피어싱 공정이 이뤄지게 된다. 알루미늄 피어싱의 경우 버, 슬리버와 같은 불량이 대표적이다. 슬리버는 알루미늄 전단 공정 시 실과 같은 조각이 발생하는 현상으로 제품 표면에 각인이 되는 불량을 유발한다. 버의 경우 기계적 체결 불량이나 다른 부품의 표면을 긁는 등의 문제가 발생된다. 또한 슬리버와 같은 조각들이 축적되어 금형의 손상을 유발한다.

이와 같은 피어싱 공정에서 금형 손상과 제품 불량을 방지하기 위해 공정 중에 발생하는 문제를 예측하고 보정하는 기술이 중요하다. 최근 성형 공정에 센싱 기술을 접목하여 마모 불량 예측을 하는 연구가 진행되고 있다. 기존 센서를 통한 마모 불량을

1. 한국생산기술연구원

† 교신저자: 한국생산기술연구원

E-mail: yjjeon@kitech.re.kr

예측하는 연구로는 주로 드릴링 및 밀링과 같은 가공 공정에서 공구 모니터링에 초점을 맞춘 연구가 주로 이뤄지고 있다. 주로 음향방출신호, 가속도계를 이용한 진동 신호, 스트레인게이지를 통해 얻어진 신호를 사전 처리 후 신호 패턴을 추출하여 공구 모니터링에서의 마모를 예측하였다<sup>3-6)</sup>.

프레스 공정에서의 센싱 기술을 적용한 불량 예측의 경우 압전 변형 센서를 적용하여 스탬핑 공정에서 정상 신호와 비정상 신호를 구분할 수 있는 신호 검출 방법을 분석하였다<sup>7)</sup>.

센싱 기술을 기반으로 공정 중에 공구 마모를 예측하기 위해서는 센서 신호 분석을 통한 기준 선정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 알루미늄 피어싱 공정에서의 펀치 마모불량 예측을 위한 하중 신호 분석을 하였다. 정상 펀치와 마모된 펀치에 대하여 클리어런스별 피어싱 실험 후 전단면 분석을 통해 하중 센서 신호 발생 원인을 연구하였다.

## 2. 피어싱 하중 신호 도출 실험

### 2.1. 피어싱 실험 기구

펀치 마모 변수에 따른 하중 신호 분석을 위해 Fig. 1과 같이 피어싱용 금형에 하중 센서를 설치하여 실험하였다. 펀치에 직접적으로 전달되는 하중을 분석하기 위해 펀치 후면에 센서를 설치하였다. 하중 센서의 경우 ConSenses GmbH에서 개발한 볼트형 압전 하중 센서인 PiezoBolt를 적용하였다<sup>8)</sup>. 실험에 적용된 PiezoBolt의 경우 볼트 타입으로 피어싱 펀치에 직접 체결이 용이하며, -55~55 kN 범위의 인장 압축 하중 측정이 가능하다<sup>9)</sup>.

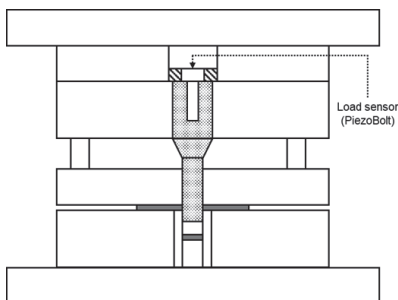


Fig. 1 Die for analysis of the load sensor signal in the piercing process

### 2.2. 피어싱 펀치 변수 선정

하중 신호 분석을 위한 피어싱 공구는 직경 20

mm로 각진 전단 날 형상과 라운드형으로 마모된 형상의 펀치를 각각 가공하여 적용하였다. 마모 펀치의 경우 1060 고탄소강 두께 3.5 mm 소재를 클리어런스 10% 조건에서 20,000타 피어싱한 펀치 형상을 참고하였다<sup>10)</sup>. 또한 펀치 마모 변수의 경우 전단 날에서 마모가 발생된 뒤 측벽부로 마모가 진행됨<sup>11)</sup>을 고려하여 Fig. 2와 같이 측벽부 각도를 2, 4, 6 °로 하는 3종의 펀치를 선정하였다.

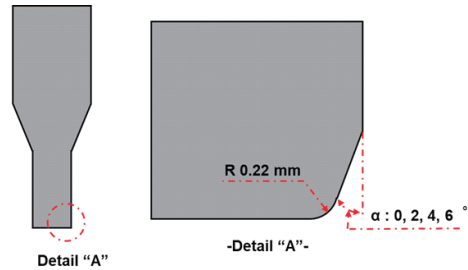


Fig. 2 The shape of wear punch(wear edge)

### 2.3. 펀치 변수별 피어싱 시험 조건

정상 펀치 1종과 마모량을 고려한 펀치 3종에 대하여 피어싱을 수행하였다. 피어싱에 적용한 소재는 Alcoa사의 Al6061 T6 두께 3 mm를 적용하였다. 펀치와 다이간의 간극에 따른 신호 분석을 위해 편측 0.1 mm(3.3%), 0.2 mm(6.7%), 0.3 mm(10%)의 클리어런스 변수를 적용하였다. 시험에 적용한 피어싱 속도는 20.8 mm/s 이다.

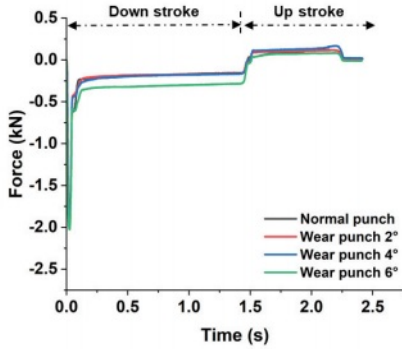
## 3. 피어싱 펀치 변수별 하중 신호 분석

### 3.1. 펀치 변수에 따른 하중 신호

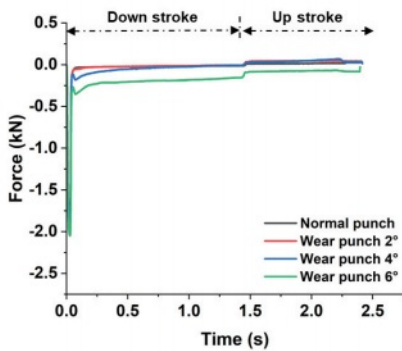
펀치 변수에 따른 하중 신호는 Fig. 3과 같이 피어싱 공정 초기 최대 하중 발생 이후 감소 과정에서 소재 완전 파단 시 일부 상승하는 경향을 보인다. 완전 파단 이후 펀치에 압축하중이 유지되고 취출시 인장하중이 발생하는 경향을 보인다. 이는 피어싱 홀에 의한 측방력이 펀치에 작용한다고 판단된다. 클리어런스가 커짐에 따라 정상 펀치에서는 완전 파단 시 발생하는 하중 일시 상승 경향이 발생되지 않는 것을 확인 할 수 있다. 또한 파단 이후 펀치에 작용하는 압축 하중과 취출 시의 인장 하중이 감소하는 경향을 보인다. 이는 정상 펀치의 경우 클리어런스가 커짐에 따라 홀직경이 커지게 되어 측방력이 감소된다고 판단된다. 마모 펀치의 경우 무딘 전단 날에 의해 소재로 침투되지 않고 파단 시점이

지연 된다. 정상 펀치 보다 작은 직경을 가지는 펀치 측벽부의 마모된 영역에서 전단이 발생되어 홀 직경이 상대적으로 작아져 클리어런스가 커져도 측방력이 유지한다고 판단된다.

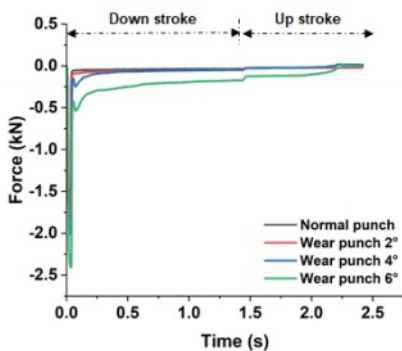
질수록 하중이 상승 하는 경향을 보인다. 이는 마모 펀치의 전단 날이 소재로 침투되지 않고 전단부를 펀치 진행방향으로 인장시킨 뒤 마모된 측벽부에서 전단이 이뤄진다. 이에 정상 펀치 대비 펀치와 다이 크랙 발생부의 간극이 커지면서 굽힘 모멘트 증가에 의해 하중이 커진다고 판단된다. 또한 클리어런스가 커질수록 전단 하중이 커지게 되는데 이 또한 굽힘 모멘트가 높아져 하중이 증가한다고 판단된다. 취출 시 펀치에 작용되는 인장하중의 경우 마모펀치의 적용 시 커지는 경향을 보인다.



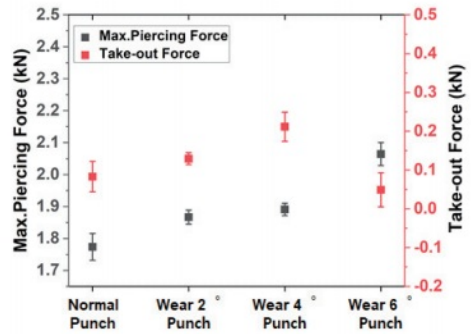
(a) Clearance 3.3%



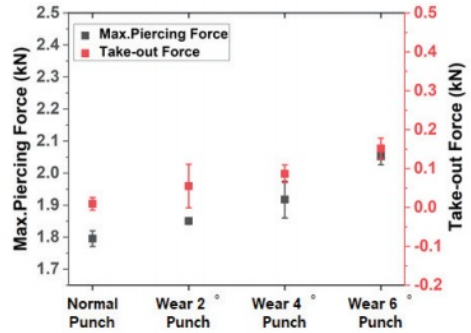
(b) Clearance 6.7%



(c) Clearance 10%



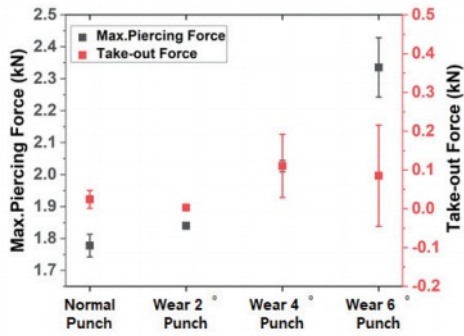
(a) Clearance 3.3%



(b) Clearance 6.7%

Fig. 3 Load sensor signal according to punch parameters

펀치 변수에 따른 최대 피어싱 하중과 취출 하중 경향은 Fig. 4와 같다. 최대 하중의 경우 마모가 커



(c) Clearance 10%

Fig. 4 Maximum piercing force and take-out force according to punch parameters

### 3.2. 하중 신호 발생 원인 분석

피어싱 공정에서 발생하는 하중 센서 신호의 발생 원인을 분석하기 위해 각 변수별 전단부 특성을 평가하였다. 전단부의 경우 Fig. 5와 같이 롤러면(rollover), 전단면(burnish), 파단면(fracture) 분포를 측정하였다. 펀치 변수에 따른 전단부 형상은 Fig. 6과 같다.

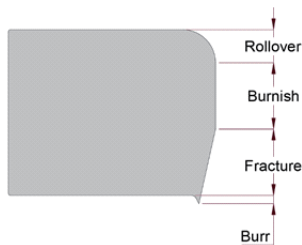
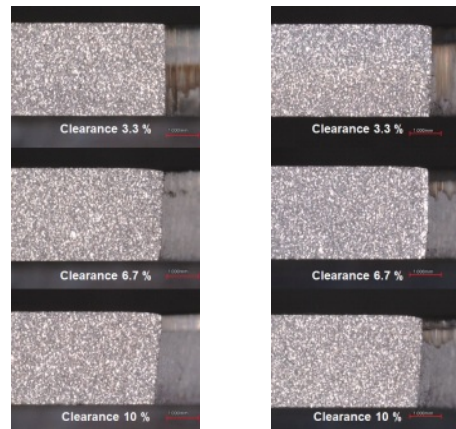


Fig. 5 Characterization of rollover, burnish and fracture for shear surface



(a) Normal punch

(b) Wear 2° punch



(c) Wear 4° punch



(d) Wear 6° punch

Fig. 6 Profiles of the shear zone according to piercing conditions

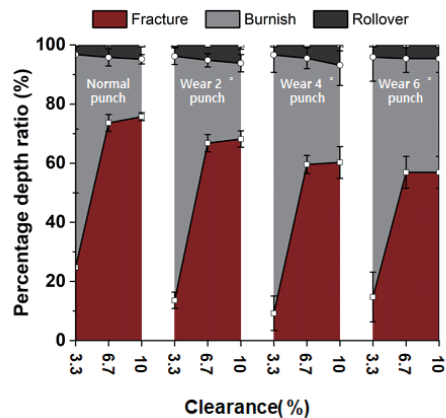


Fig. 7 Shear surface distribution according to punch parameters

전단부 분포 비율을 확인하여 보면 Fig. 7에서 보

는 바와 같이 클리어런스가 작을수록 고른 전단면을 보인다. 또한 전단 날이 상대적으로 무딘 마모 펀치의 전단면 분포가 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적으로 압축 응력 상태일 때 소재는 연성이 커진다<sup>12)</sup>. 마모 펀치의 경우 무딘 전단 날이 소재로 침투되지 않고 전단선 부근에 압축 응력을 부여하게 된다. 이에 따라 소재의 연성이 증가되어 상대적으로 고른 전단면을 가진다고 판단된다. 마모 각도가 증가될수록 전단면 비율 또한 증가되고 마모 각도 6 ° 조건의 경우 클리어런스 6.7%와 10%의 전단면 분포 차이가 미미하다. 이는 하중 신호에서 확인된 바와 같이 마모 각도가 커질수록 클리어런스에 따른 하중 패턴이 달라지지 않는 경향과 관련되어진다. 또한 마모 펀치가 정상 펀치 대비 고른 전단면이 펀치에 측방력을 발생시켜 완전 파단 이후의 압축 하중과 취출 시 인장 하중을 발생시킨 것을 확인할 수 있다.

눌림면의 경우 정상 펀치 대비 마모 펀치에서 크게 발생되는데 이는 하중 신호에서 확인 한 바와 같이 굽힘 모멘트의 증가가 원인이라 판단된다.

하중 신호에서 발생하는 측방력 발생 원인을 검증하기 위해 Fig. 8과 같이 전단부의 홀 직경을 분석하였다. 모든 펀치 변수에서 측방력이 발생하는 클리어런스 3.3 % 제외한 조건에서 마모 펀치의 내경이 정상 펀치보다 작은 것을 확인하였다. 이는 정상 펀치 대비 작은 홀 직경에 의해 펀치에 인장과 압축 하중이 발생된다고 확인하였다. 또한 클리어런스가 작을수록 펀치 날 형상에 대한 영향이 미미하다고 판단된다.

이와 같은 센서를 통해 얻어진 하중 신호를 통해 마모 펀치의 하중 신호 특성을 확인할 수 있다고 판단된다. 특히 알루미늄 전단 공정에서 적용하고 있는 4.5~6 % 수준의 클리어런스 조건에서는 정상 펀치와 마모 펀치의 하중 신호 검출이 원활할 것으로 판단된다.

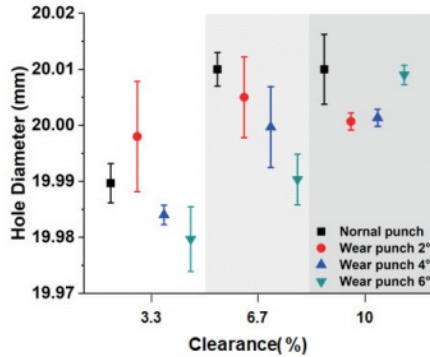


Fig. 8 Hole diameter according to piercing parameter

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 피어싱 공정에서 하중 센서를 통한 펀치 마모 불량 예측을 위해 하중 신호 분석을 수행하였다. 이를 위해 정상 펀치와 전단 날에 마모 형상을 부여한 펀치에 대하여 클리어런스별 피어싱 실험을 수행하였다. 전단부 분포와 홀 내경 평가를 통해 하중 신호 발생 원인을 분석하였다.

- 1) 피어싱 공정 초기 최대 하중 발생 이후 하중 감소 과정에서 소재 완전 파단 시 일부 상승하는 경향을 보였다.
- 2) 소재 완전 파단 이후 피어싱 펀치에 측방력이 발생되어 펀치에 압축 하중이 유지되고 취출 시 인장 하중이 발생됨을 확인하였다.
- 3) 클리어런스가 증가됨에 따라 정상펀치에서 측방력이 발생되지 않는 것을 확인하였다. 이는 클리어런스 증가에 의해 펀치 크랙 발생부와 다이 크랙 발생부의 간극이 커져 홀 직경이 증가되어 측방력이 감소한다고 판단된다.
- 4) 마모된 펀치의 경우 상대적으로 직경이 작은 펀치의 마모된 측벽부 부근에서 전단이 이뤄져 측방력이 유지된다고 판단된다.
- 5) 피어싱 하중의 경우 마모가 커질수록 증가하는 경향을 보이는데 마모된 측벽부에서 파단이 이뤄지게 되어 정상 펀치 대비 간극이 증가함에 따라 굽힘 모멘트 또한 증가하여 피어싱 하중이 증가한다고 판단된다.
- 6) 마모 펀치가 정상 펀치 대비 높은 전단면 분포를 보인다. 이는 마모 펀치가 소재로 바로 침투되지

않고 전단선 부근에 압축응력을 부과하여 소재의 연성이 높아짐에 따라 전단면 분율이 증가한다고 판단된다.

7) 마모 펀치의 피어싱 홀 직경이 정상 펀치보다 작은 것을 확인하였다. 이는 하중 신호에서 검출된 측방력 발생 원인으로 판단된다.

8) 센서를 통해 얻어진 하중 신호를 통해 마모 펀치의 신호 특성을 검출 할 것으로 판단된다.

## 후기

본 연구는 한국생산기술연구원 기관주요사업 “Add-on 모듈 탑재를 통한 지능형 뿌리 공정 기술 개발(KITECH EO-22-0005)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

## 참고문헌

- 1) M. Li, “An experimental investing on cut surface and burr in trimming aluminum autobody sheet”, Int. J. Mech. Sci, Vol. 32, No. 5, pp. 889~906, 2000.
- 2) S. Golovshchenko, N. Wang, Q. Le, “Trimming and sheared edge stretchability of automotive 6xxx aluminum alloys”, J. Mater. Process. Technol., Vol. 264, pp. 64~75, 2019.
- 3) H. V. Ravindra, Y. G. Srinivasa and R. Krishnamurthy, “Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting”, Wear, Vol. 212, No. 1, pp. 87~84, 1997.
- 4) W. Rmili, A. Ouahabi, R. Serra, R. Leroy, “An automatic system based on vibratory analysis for cutting tool wear monitoring”, Measurement, Vol. 77, pp. 117~123, 2016.
- 5) W. H. Hsieh, M. C. Lu, “Application of backpropagation neural network for spindle vibration-based tool wear monitoring in micro-milling”, Int. J. Adv. Manuf. Technol, Vol. 61, pp. 53~61, 2012.

- 6) H. Chelladurai, V. K. Jain and N. S. Vyas, “Development of a cutting tool condition monitoring system for high speed turning operation by vibration and strain analysis”, Int. J. Adv. Manuf. Technol, Vol. 37, pp. 471~485, 2007.
- 7) X. Li, A. M. Bassiuny, “Transient dynamical analysis of strain signals in sheet metal stamping processes”, Int. J. Mach. Tool. Manu, Vol. 48, pp. 576~588, 2008.
- 8) J. Stahlmann, M. Brenneis, “Understanding and improvement of industrial production how technology paves the way for productivity”, New Development in Forging Technology, Vol. 2017, pp. 109~117, 2017.
- 9) S. Y. Kim, A. Ebina, A. Sano, S. Kubota, “Monitoring of process and tool status in forging process by using bolt type piezo-sensor”, Procedia Manufacturing, Vol. 15, pp. 542~549, 2018.
- 10) R. Hambli, “Blanking tool wear modeling using the finite element method”, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 41, pp. 1815~1829, 2001.
- 11) R. Shivpuri, S. Singh, K. Agarwal, C. Liu, “Energy release rate based approach for the wear of punches in precision blanking of high strength steel”, CIRP Annals, Vol. 60, pp. 307~310, 2011.
- 12) S. Golovshchenko, “Analysis of Trimming of Aluminum Closure Panels”, JMEP, Vol. 16, Vo. 2, pp. 213~219, 2007.

## 저자소개

전 용 준(Yong-Jun Jeon)

[정회원]



- 2012년 2월 : 대구대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2012년 3월~현재 : 한국생산기술연구원 금형성형연구부, 연구원

< 관심분야 >

판재성형 및 금형, 판재성형해석