

볼트형 피에조 센서를 활용한 피어싱 펀치의 얼라인먼트 불량 검출에 관한 연구

전용준¹ · 김동연[†]

한국생산기술연구원 금형성형연구부^{1,†}

A study on the detection of misalignment between piercing punch and die using a bolt-type piezo sensor

Yong-Jun Jeon¹ · Dong-Earn Kim[†]

Mold & Metal Forming R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology^{1,†}

(Received December 23, 2021 / Revised December 29, 2021 / Accepted December 31, 2021)

Abstract: Piercing is the process of shearing a circular hole in sheet metal, whose high shear force makes it difficult to secure the durability of tools. In addition, uneven clearance between tools due to poor alignment of the piercing punch causes accelerated die wear and breakage of the tool. This study reviewed the feasibility of in-situ determining alignment failure during the piercing process by analyzing the signal deviation of a bolt-type piezo sensor installed inside the tool whose alignment level was controlled. Finite element analysis was performed to select the optimal sensor location on the piercing tool for sensitive detection of process signals. A well-aligned piercing process results in uniform deformation in the circumferential direction, and shearing is completed at a stroke similar to the sheet thickness. Afterward, a sharp decrease in shear load is observed. The misaligned piecing punch leads to a gradual decrease in the load after the maximum shear load. This gradual decrease is due to the progressive shear deformation that proceeds in the circumferential direction after the initial crack occurs at the narrow clearance site. Therefore, analyzing the stroke at which the maximum shear load occurs and the load reduction rate after that could detect the misalignment of the piercing punch in real-time.

Key Words: Alignment, Eccentricity, Piercing, PiezoBolt, Sensor

1. 서 론

프레스 성형 공정에서의 피어싱 공정은 성형품 내부에 구멍을 뚫어내는 가공으로 소재 전단 시 높은 전단하중이 발생되어 금형 내구성 확보가 어려운 공정이다. 특히 펀치와 다이 간의 얼라인먼트(Alignment) 불균일은 금형 간의 간섭을 발생시켜 금형이 파손된다. 또는 클리어런스의 편차로 인해 펀치의 마모가 가속화되고 높은 하중이 펀치에 부과되어 피로에 의한 파손이 발생되기도 한다.

금형 손상의 경우 가공 및 조립 후 피어싱 공정

중 금형이 파손되기 전까지 금형 내에서 발생하는 문제점을 실시간 확인이 어려워 수명 확보가 어려웠다. 특히 금형의 얼라인먼트 불량은 금형 가공 불량이나 조립에 의해 발생되기도 하지만 프레스 성형 공정 중의 프레스 편향력 또는 펀치 진동에 점진적으로 불일치가 발생 한다¹⁾.

최근 4차 산업혁명에 따라 산업 전반에 인공지능이나 사물인터넷 기술 적용이 활발히 진행됨에 따라 센싱 기술 또한 핵심 기술 중 하나로 주목 받고 있다²⁾. 프레스 공정 또한 센싱 기술과 딥러닝을 통해 제품 성형 중에 발생하는 불량을 예측하고 공정 조건을 자동제어하여 성형성과 생산성을 높이기 위한 연구가 진행되고 있다.

기존의 센서를 적용한 공정 모니터링의 경우 드릴링 및 밀링과 같은 가공 공정에서의 공구 모니터

1. 한국생산기술연구원 금형성형연구부

† 교신저자: 한국생산기술연구원 금형성형연구부

E-mail: kdu0517@kitech.re.kr

링에 초점을 맞춘 연구가 주로 이뤄졌으며, 이 또한 진동센서나 음향 센서를 통해 얻어진 신호를 사진 처리 후 패턴을 추출하여 마모를 예측하였다³⁻⁶⁾. 피어싱 공정 또한 하중 센서, 진동 센서, 최종 성형품의 비전 검사를 통해 펀치의 마모를 예측하는 연구가 진행되었다⁷⁻⁸⁾. 그러나 성형성과 펀치 수명에 큰 영향을 미치는 얼라인먼트 불일치에 따른 공정 모니터링에 의한 불량 예측에 대한 연구는 미미하다.

공정 모니터링 기술은 센서에서 얻어진 신호에 대해 불량 기준 선정을 위한 분석이 필요하다. 불량 예측 공정 모니터링을 위한 센싱 기술과 더불어 센서에서 계측되는 신호에 대하여 불량 기준을 정하는 과정이 중요하며 선행되어야 한다. 본 연구에서는 펀치와 다이 간의 얼라인먼트 불일치 불량을 피어싱 공정 중 검출하기 위한 연구를 진행하였다. 이를 위해 얼라인먼트 불일치 수준이 조절되는 금형 내부에 볼트형 피어조 센서 2개를 설치하였다. 조건별 발생하는 신호의 편차 및 원인을 분석하여, 피어싱 공정 얼라인먼트 불량 검출을 위한 센서 신호 기준을 선정하고자 하였다.

2. 공정 신호 검출 센서 위치 선정

2.1. 공정 신호 검출 적용 센서

피어싱 공정 중에 다이와 펀치간의 불일치에 따른 신호 검출을 위해 Fig. 1과 같은 ConSenses GmbH⁹⁾에서 개발한 볼트형 압전 하중 센서인 PiezoBolt를 적용하였다. 금형에 조립에 적용된 기존의 체결형 볼트를 센서설치를 위한 추가 가공이 필요 없이 볼트형 피어조 센서로 교체하여 적용이 가능해 설치가 용이하다.¹⁰⁾ 또한 금형 내 설치 자유도가 높아 주요 신호 발생 부위에서 근접하여 유효한 이상신호 검출에 유리하다. 실험에 적용된 PiezoBolt의 경우 M12를 적용하였으며, -55~55 kN의 인장 압축 하중 측정이 가능하다.



Fig. 1 The shape of piezobolt and connector

2.2. 센서 위치 선정 유한요소해석

얼라인먼트 불일치 변수별 피어싱 실험에 앞서 피어싱 공정에서의 발생하는 신호 검출을 위한 볼트형 센서의 위치 선정 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석의 경우 피어싱이 이뤄지는 펀치, 다이, 블랭크 홀더, 소재에 대하여 모델링 하였다. 유한요소모델은 Fig. 2와 같이 소재와 피어싱 펀치의 경우 강소성체, 다이와 홀더의 경우 강체를 적용하였으며 1/4 대칭모델을 적용하였다. 강소성체를 적용한 소재와 피어싱 펀치의 경우 각각 336,752개, 287,743개의 사면체 요소를 적용하였다. SFTCS사의 DEFORM-3D를 사용하여 SABC1470 소재 기준 20.8 mm/s 속도로 피어싱 해석을 수행하였다.

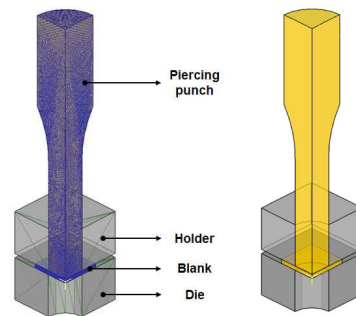


Fig. 2 Finite element model for piercing analysis

피어싱 공정에서의 스트로크에 따른 하중 분포를 확인하면 Fig. 3과 같이 전단 초기 다이에 14 kN의 하중이 부과되는 것을 확인하였다. 또한 Fig. 4에서 보는 바와 같이 피어싱 펀치의 어깨 반경부에 높은 응력과 변형률 분포를 보이고 있어 피어싱 펀치부와 다이부를 센서 적용 위치로 선정하였다.

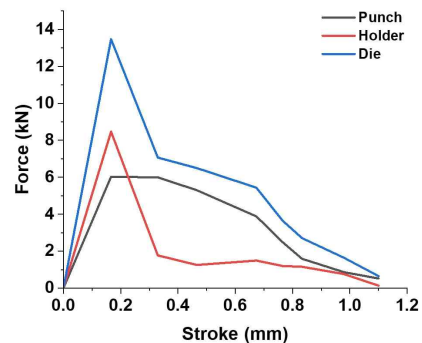


Fig. 3 Distribution of the cutting force according to punch stroke in piercing process

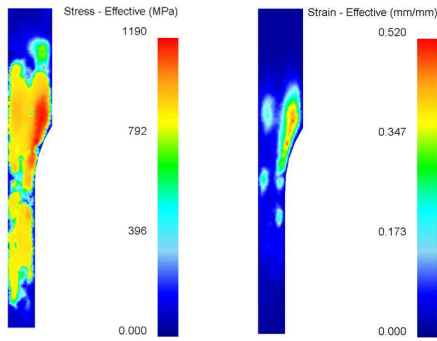


Fig. 4 Distribution of stress and strain for punch during piercing process

2.3. 공정 신호 검출 센서 금형 내부 장착

유한요소해석으로 얻어진 센서 적용부에 대하여 피어싱 금형에 적용 가능한 위치를 선정하였다. 피어싱 펀치부의 경우 펀치 플레이트와의 고정을 위한 피어싱 펀치 후면 볼트 체결 홀에 장착하였다. 다이부의 경우 다이 플레이트 볼트 체결 홀에 장착하였다. 설치 위치는 Fig. 5와 같다.

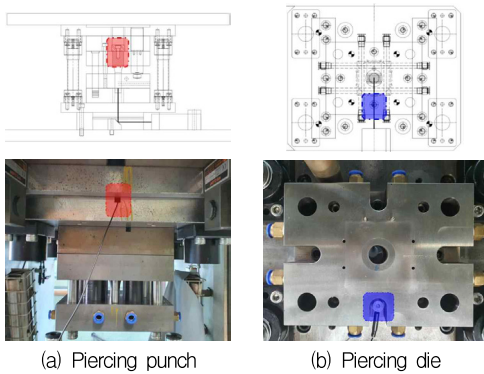


Fig. 5 The installation location of piezobolt on piercing die

3. 얼라인먼트 조건별 신호 분석 실험

3.1. 얼라인먼트 변수별 피어싱 실험

유한요소해석으로 도출된 볼트형 압전센서를 금형에 체결하고 펀치와 다이 간의 얼라인먼트 변수에 따른 피어싱 실험을 수행하였다. 얼라인먼트 불일치에 따른 불량 신호 분석을 위해 Fig.6에서 보는 바와 같이 정심과 다이의 중심축이 0.2 mm, 0.35 mm 이동한 편심 2개를 변수로 선정하였다. 실험에 적용된 다이의 클리어런스는 정심 기준 편측 0.4

mm 적용하였으며, 20.8 mm/s의 속도로 피어싱을 하였다. 실험에 적용된 소재는 SABC1470 두께 1 mm 열처리 전 소재를 적용하였다.

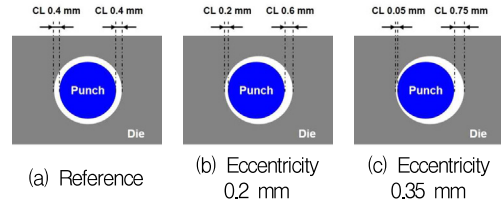


Fig. 6 Variable of alignment between die and punch

3.2. 얼라인먼트 조건별 센서 신호 분석

얼라인먼트 변수에 따른 센서 신호를 분석하였다. 다이에 설치된 센서 신호의 경우 미세한 하중 변화로 신호 분석이 어려워 Fig.7과 같이 피어싱 펀치에 설치된 센서에 대한 신호 분석을 수행하였다.

정심 조건의 경우 최대 하중 발생 이후 하중이 바로 감소되는 경향을 보이나 편심 조건의 경우 최대 전단 하중 발생 이후 서서히 감소되는 경향을 보인다. 이는 정심의 경우 원주 방향으로 동시에 전단이 이뤄져 과단 이후 하중이 급속히 감소하는 반면, 편심의 경우 편측 클리어런스가 불균일하여 원주 방향으로 점진적인 전단이 발생된다. 또한 Fig. 8에서 보는 바와 같이 편심 0.35 mm 조건이 0.2 mm 조건보다 높은 하중과 짧은 피어싱 스트로크를 보이는데 이는 얼라인먼트 불일치에 의한 펀치 클리어런스가 협소하여 하중이 소폭 상승하고 빠른 전단이 이뤄진다고 판단된다.

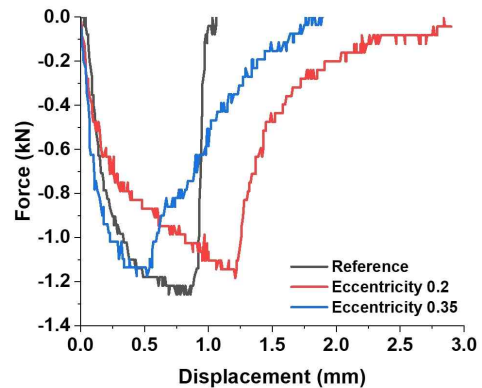


Fig. 7 Sensor signal for a force of according to piercing stroke

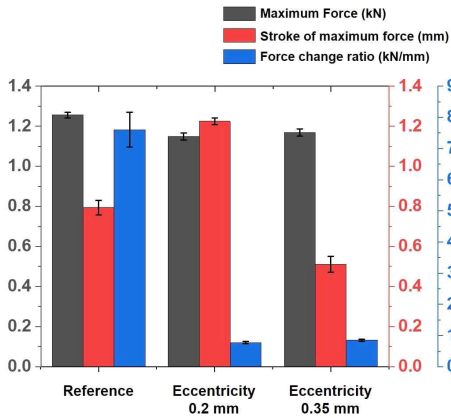


Fig. 8 Force and stroke according to alignment parameters

3.3. 얼라인먼트 변수별 신호 발생 원인 분석

피어싱 펀치부에서 측정된 센서 신호의 발생 원인을 분석하고자 스트로크별 피어싱 거동을 분석하였다. 스트로크 0.1 mm 단위로 각 변수별로 피어싱 시험을 수행하고 3차원 형상 측정기를 통해 각 스트로크에서의 단면 프로파일을 확인하였다.

Fig. 9는 각 변수별 파단 발생 직전 스트로크에서의 높이 단차를 도시한 결과로 정심의 경우 펀치가 하강하여 전단이 이뤄질 때 피어싱 부 중심부가 가장 낮은 높이를 보이고 있다. 편심 조건의 경우 편

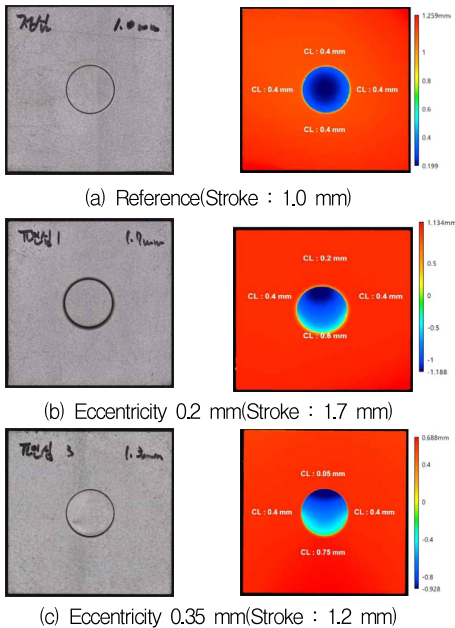


Fig. 9 Height deviation according to alignment parameters

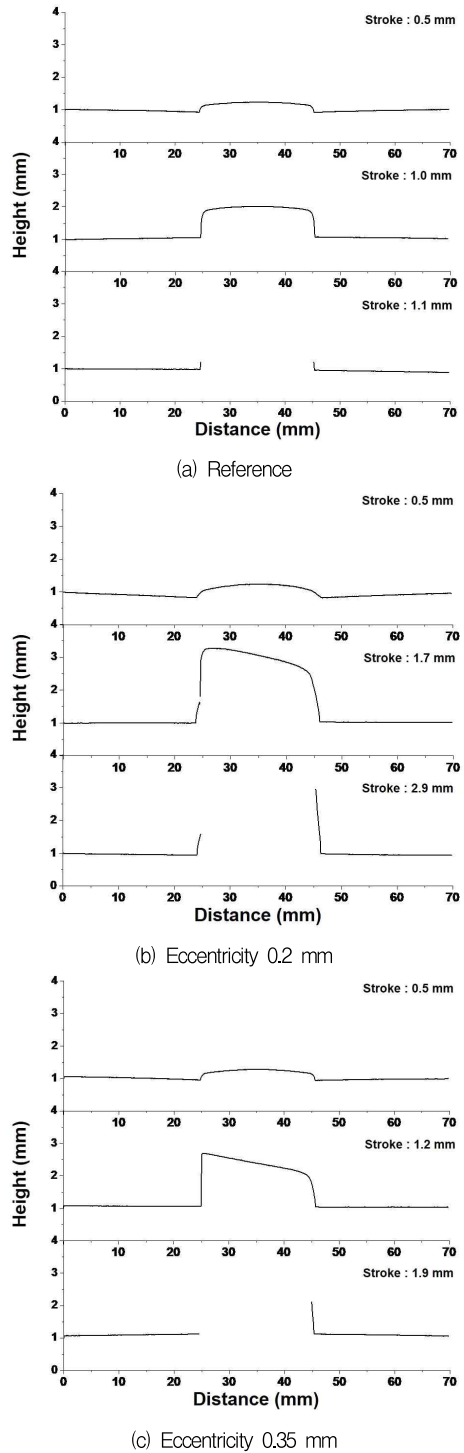


Fig. 10 Cross-sectional profile for each stroke according to alignment

심에 의해 클리어런스가 협소해진 부위의 높이가 가장 낮게 나타남을 확인할 수 있다.

각 변수별 주요 스트로크에 따른 단면 변화를 확인하기 위해 소재 중심부의 프로파일을 Fig. 10과 같이 확인하였다. 정심의 경우 스트로크가 진행됨에 따라 펀치 형상과 같이 스크랩부가 펀치 진행방향으로 인장이 이뤄지다가 파단이 발생됨을 확인할 수 있다. 이는 원주 방향으로 균일한 클리어런스가 적용되어 전단선에 균일한 전단 하중이 적용된다고 판단된다.

편심 조건의 경우 다이축 불균일에 의해 클리어런스가 협소해진 부위부터 전단이 이뤄지며 이후 초기 파단 발생 부위 좌우로 순차적으로 전단이 이뤄져 초기 파단 이후 전단 하중이 서서히 감소된다고 판단된다. 또한 마지막 전단이 이뤄지는 편심 적용부 반대 방향의 클리어런스가 넓어 버가 크게 발생하는 문제를 확인 할 수 있다. 편심 0.35 mm의 조건의 경우 편심 0.2 mm 보다 초기 파단부의 클리어런스가 협소하여 파단이 먼저 이뤄진다고 판단된다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 피어싱 금형에 볼트형 센서를 적용하여 얼라인먼트 불일치 불량 신호 기준을 선정하기 위해 센서 신호 분석을 수행하였다. 이를 위해 유한요소해석을 통한 센서 위치 선정 후 정심 조건과, 얼라인먼트가 0.2 mm, 0.35 mm 이동한 2가지 편심 조건에 대하여 피어싱 실험을 수행하여 각 변수별 센서 신호와 원인을 분석하였다.

1) 정심 조건의 경우 펀치 스트로크가 소재두께인 1 mm 부근에서 1.25 kN 수준의 하중을 보인 후 하중이 급속히 감소하여 스트로크 1 mm 부근에서 완전 파단이 이뤄지나 편심의 경우 하중이 서서히 감소하여 편심 0.2 mm 조건과 0.35 mm 조건의 경우 각각 0.29 mm, 0.19 mm에서 완전 파단이 이뤄짐을 확인하였다.

2) 편심 조건의 경우 편심량이 커질수록 하중이 커지고 피어싱 스트로크가 짧아지는 경향을 보이는데 이는 편심량이 커질수록 편측 클리어런스가 협소하여 하중과 초기 크랙 발생이 빨라진다고 판단된다.

3) 피어싱 공정 중 완전 파단 직전의 소재에 대한 3차원 형상 측정을 통한 위치별 높이 측정 결과 정심의 경우 피어싱 중심부가 가장 낮게 나타났으며 편심 조건의 경우 클리어런스가 협소해진 부위의 높이가 가장 낮게 나타나 협소해진 클리어런스 부위부터 파단이 이뤄진다고 판단된다.

4) 피어싱 스트로크에 따른 피어싱 부 단면 프로파일 측정결과 정심 조건의 경우 피어싱부가 펀치 진행방향으로 균일하게 인장이 이뤄지다가 파단이 되는 것을 확인하였다.

5) 편심 조건의 경우 클리어런스가 협소해지는 부위부터 파단이 발생되며, 이후 초기 파단 발생 방향 좌우로 파단이 전파되어 순차 전단이 이뤄져 최대 하중 발생 이후 하중이 서서히 감소하는 경향이 나타난다.

6) 최대 전단하중이 발생하는 스트로크 및 이후 하중 특성의 편차를 통해 피어싱 펀치의 얼라인먼트 불량을 실시간 감지가 가능할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 산업통상자원부 ‘글로벌주력산업품질 대응뿌리기술개발사업(과제번호 : 1415173673)’ 지원으로 진행하였습니다.

참고문헌

- 1) T. Altan, A. E. Tekkaya, “Sheet metal forming : Rrocess and applications”, ASM International, Materials Park, Ohio, 2012.
- 2) H. Kagermann, W. Wahlster and J. Helbig, “Final report of the Industrie 4.0 working group”, ACATECJ pp. 1-82, 2013.
- 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. 78-84, 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) Y. D. Chethan, H. V. Ravindra, Y. T. Krishnegowda, S. Bharath Kumar, “Machine Vision for Tool Status Monitoring in Turning Inconel 718 using Blob Analysis”, Materials Today, Vol. 2, pp. 1841-1848, 2015.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 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.

저자 소개

전 용 준(Yong-Jun Jeon)

[정회원]



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

< 관심분야 >

판재성형 및 금형, 판재성형해석

김 동 언(Dong-Earn Kim)

[정회원]



- 2006년 8월 : 서울대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 9월~2008년 8월 : 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, 연구원
- 2008년 9월~2013년 11월 : 삼성전자 삼성종합기술원, 전문연구원
- 2013년 12월~현재: 한국생산기술연구원 금형성형연구부, 수석연구원

< 관심분야 >

판재성형 및 금형, 복합소재(CFRP) 성형/가공