

# 피에조 볼트 측정 데이터에 기반한 자동차 부품 트리밍 공정에서의 금형 마모 예측 연구

권오동<sup>1</sup> · 문희범<sup>2</sup> · 강경필<sup>3</sup> · 이경훈<sup>4, #</sup> · 허민철<sup>5</sup>

## A Study on the Prediction of Die Wear Based on Piezobolt Sensor Measurement Data in the Trimming Process of an Automobile Part

O. D. Kwon, H. B. Moon, G. P. Kang, K. Lee, M. C. Hur

(Received March 7, 2022 / Revised March 16, 2022 / Accepted March 17, 2022)

### Abstract

Systematic quality control based on real time data is required for modern factories. This study introduced a method of predicting punch wear in the trimming process of automobile parts. Based on monitoring data of the mass production process using a bolt-type piezo sensor, it was shown that precursor symptoms of die wear could be predicted from the change in load pattern with respect to production volume. The load pattern that changed according to the wear of the die was verified by numerical analysis.

**Keywords** : Process Monitoring, Die Wear, Tool Sharpness, Smart Factory, Real-time Measurement, Piezo-Sensor

## 1. 서 론

지난 20년간 소재부품 산업은 빠른 규모의 확대를 달성하고 전체 제조업을 상회하는 성장 속도와 생산성이 개선되었던 반면에, 제조 현장의 기술 숙련자들이 지속적으로 감소하고 있는 추세이다. 최근 현장 기술자의 노령화와 작업자의 안전성을 강화하기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 기술자의 경험에 의존한 제조 산업 활동의 부분들을 개선하려는 시도가 진행되고 있다.

소재부품 산업에서 주축을 이루고 있는 자동차 부품, 수송기계 부품, 전자부품 등은 성능 및 디자인 경쟁력 강화를 위해 핵심 부품들의 치수 및 요구 정밀도가 매우 높아지고 있다. 그러나 이를 결정

하는 금형 치수의 안정성은 공정 중 발생하는 금형의 마모, 파단 등의 인지 및 예측이 어려워 관리 부재 시 최종 제품의 불량으로 이어지게 된다.

프로그래시브 공법은 다수의 가공공정에 대해 소재를 순차적으로 이송시키며, 연속작업을 하는 프레스 가공 방식이다. 프로그래시브 공법에 의해 생산되는 제품은 정밀도가 높고, 복잡한 형상을 여러 개의 공정으로 효율적으로 분할 가공할 수 있는 장점이 있다. 반면, 금형 가격이 상대적으로 높고, 대부분 숙련된 기술자의 경험과 직관적 판단에 의해 수행되어, 작업 관리 기술의 고도화가 필요하다[1].

특히 공법 내 트리밍 공정에서 형성된 버는 성형된 부품의 표면에 손상 또는 부품을 조립하거나 용접할 때 간섭을 일으키고 부품을 다루는 과정에서도 안전성에 대한 문제를 야기한다. 다이와 펀치의 클리어런스 증대와 펀치의 날의 무딘 정도에 따라 심각한 버의 형성으로 치수정밀도에 악영향을 미칠 수 있다[2].

1. ㈜솔루션랩, 해석기술연구소, 대리

2. ㈜솔루션랩, 해석기술연구소, 대리

3. ㈜솔루션랩, 해석기술연구소, 부장

4. ㈜솔루션랩, 대표이사

5. ㈜세동산업, 기술연구소, 차장

# Corresponding Author : Solution lab, E-mail: klee@solution-lab.co.kr

ORCID: 0000-0003-3840-4767

현재 생산되는 제품의 불량 검출은 작업자가 육안 검사를 진행하여 진전되는 버 발생 위치와 크기에 따라 현장 맞춤식으로 문제를 해결하고 있다. 이에 따라 인력에 의존하지 않고, 체계적인 정비 관리를 수행할 수 있는 기반 마련이 필요하고, 이를 뒷받침할 현장에서 수집할 수 있는 데이터의 확보와 분석 작업이 필요할 것이다.

전단 하중 특성에 대해 유한 요소 해석을 통한 연구들은 최적의 전단 각과 클리어런스의 조합을 선정함으로써 전단 하중 감소와 금형 마모의 저감을 이루고자 시도하였다[3]. 그러나, 대량 생산공정에서 금형의 마모를 시뮬레이션을 통해 정량적으로 예측하는 것은 마모 모델이 구축된 이상적인 환경과 실 환경과의 차이점, 수천 타의 공정을 거친 이후 나타나는 마모의 진행과정을 전산 모사로 진행하는 것은 계산 시간과 비용상 정확한 시점을 파악하기에는 한계를 지닌다.

본 연구에서는 전단 하중을 성형 시간과 프레스 변위에 대해 세분화하여 계측할 수 있는 볼트형 피에조 센서를 트리밍 공정에 적용하여, 실제 제조 현장에서 수집한 빅데이터에서 마모에 의한 펀치 정비 내지 교체 시점을 예측할 수 있는 금형 마모의 전조 양상을 패턴화 할 수 있는지 검토하고자 한다.

## 2. 연구 대상 공정 및 연구 방법

### 2.1. 트리밍 공정 계측

적용 대상 공정은 400톤 기계식 프레스에서 14 SPM(Stroke Per Minutes)의 빠른 생산속도로 1 Lot 당 약 9000개의 자동차 부품을 생산하고 있다. 프로그래시브 공법이 적용된 본 제품의 공정은 총 8단으로 설계되어 있으며, 4단에 걸친 드로잉 공정 이후 트리밍 공정에서 계측 및 분석을 진행하였다. 트리밍 공정에서는 펀치의 마모로 인한 제품의 버 발생 불량율이 높는데, 생산이 진행되는 동안 펀치의 마모도를 확인할 수 있는 일반화된 방법이나 기술이 없기 때문에 펀치의 주기적인 점검 및 정비가 이루어지고 있다. 트리밍 공정은 Fig. 1과 같이 가공물이 다이에 안착되고, 블랭크 홀더에 의해 고정된 상태에서 펀치로 가공물의 불필요한 부분을 트리밍한 이후에 플래시가 원활하게 배출되도록 스크랩 커터(Scrap Cutter)에 의해 절단되는 복합적인 공정으로 구성된다. 상, 하금형에 하중 측정 센서를 각 1개씩

설치하여 약 18,000개의 생산 제품에 대한 계측 데이터를 확보하였다.

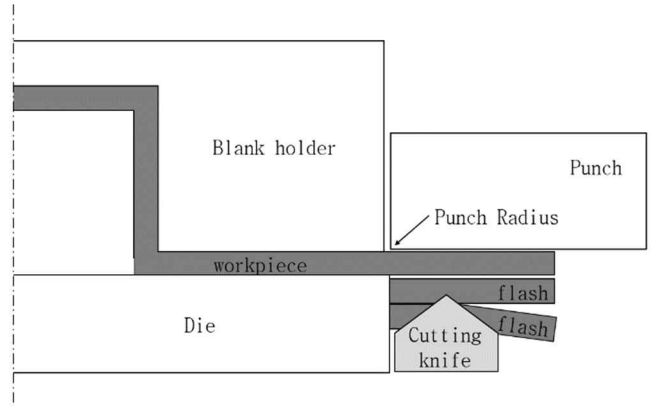


Fig. 1 Schematic diagram of combined trimming process of automobile part



Fig. 2 Process monitoring & analysis system using for Bolt type piezo sensor

### 2.2. 하중 계측 센서 선정

금형 부품을 조립하는 일반 규격 볼트의 기능과 하중을 계측하는 센서의 기능을 융합한 볼트형 피에조 센서는 압력을 받으면 방출되는 전하들이 전용 증폭기에 의해 전압신호로 출력된다. 출력된 전압신호(V)는 힘의 단위(N)로 환산되어 나타난다. 측정되는 값에 따라서 두 종류의 힘을 측정할 수 있는데 양(+)의 방향으로 측정되는 하중은 인장력, 음(-)의 방향으로 측정되는 하중은 압축력을 의미한다.

일반 스트레인 게이지에 비해 센서 감도는 백만 배 높으며, 센서가 초당 출력할 수 있는 데이터 값의 양을 나타내는 동적응답성(Dynamic Response)도 천 배 높다[4,5]. 프레스의 성형 하중을 계측하여 제품의 불량, 금형의 파단 등과 같은 소재부품 생산에서 발생하는 다양한 이슈들을 검출할 수 있는 센서이며 그 밖에도 절삭, 압연, 압출과 같은 다양한 분야에서도 사용되고 있다[4,5,6].

볼트형 피에조 센서는 계측하는 대상 공정 및 환경에 따라 효율적인 데이터 수집 및 분석을 할 수 있는 시스템을 구축하기 위해서 동기화하는 센서가 다양하다. 그 중에서 프레스의 움직임을 계측하는 변위 센서(Linear Encoder)를 본 공정에 적용하였다.

변위 센서는 공정이 진행되는 과정의 하중 패턴을 세분화하여 분석하는데 필요하며, 프레스의 스트로크 정보는 변위 센서에 내장되어 있는 와이어의 움직임에 의해 결정된다.

### 3. 결과 분석

#### 3.1. 상, 하금형에서의 하중 패턴

Fig. 3 에는 하금형에 장착한 센서의 계측 결과를 나타내었으며, 프레스의 1 회 스트로크에서 변위에 따라 하중 패턴을 4 개의 구간으로 나누어 분석을 진행하였다. #HD1 과 #HD2 구간은 파단이나 주름이 발생하는 것을 방지하기 위해 가공물을 고정시키는 홀딩력이 작용하는 구간이다. #TR 구간은 펀치의 전단 하중이 나타난 구간이며, #SP 구간은 트리밍 이후 다이 아래로 누적된 플래시가 스크랩 커터에 의해 분리 절단되면서 나타나는 하중 구간이다.

장시간 측정하여 수집한 데이터를 시간대별로 겹쳐서 하중 패턴 분석을 진행하였고, 생산일지와 비교하여 변화 유무를 살펴보았다. 실제 생산 일지에는 초도품 생산으로부터 7시간 후(7,000개 생산) 제품의 버로 인해 불량품이 발생되었고, 펀치의 마모가 약 20% 정도 진행된 상태였다. 하지만 하금형에 장착된 볼트형 피에조 센서로 계측된 패턴에서는 전단하중으로 판단되는 #TR 구간에서 전단면과 파단면의 구분도 명확하지 않았으며, 펀치 마모의 진행을 유추할 수 있는 패턴의 변화를 관찰할 수 없었다. Fig. 4 (a)는 상금형에서 계측한 결과를 보여주고 있는데, #TR 구간에서는 트리밍 공정에서 전형적으로 나타나는 전단과 파단으로 분리된 하중 변화를 보여주고 있다.

세밀한 분석을 위해 구간을 확대하여 전단면의 영역을 3 개의 구간으로 나눠서 Fig. 4 (b)와 같이 나타내었다.

(A)는 눌림 구간을 의미하며, 변위가 약 0.5mm 이동했음을 알 수 있다. (B)는 전단 구간을 의미하며 변위가 약 1.6mm 가 이동하였다. (C)는 파단 구간으로 전단 이후에 하중이 감소하는 경향을 보이고 있

다. 실제 제품의 전단면 영역이 측정된 변위량에 따른 하중 패턴이 일치함을 확인하였다.

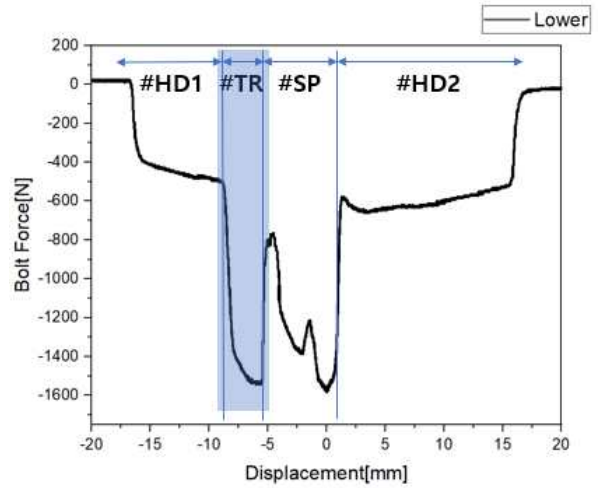
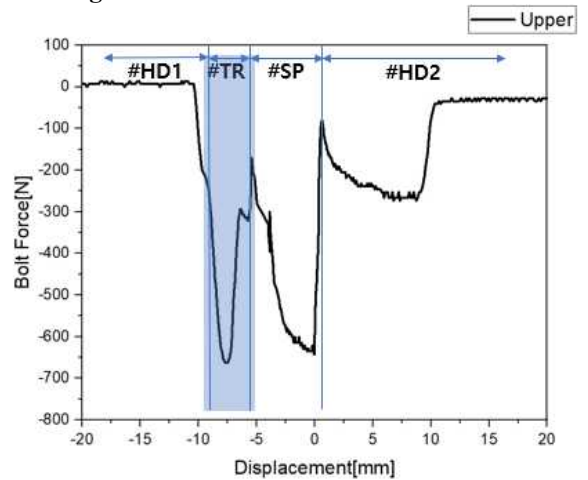
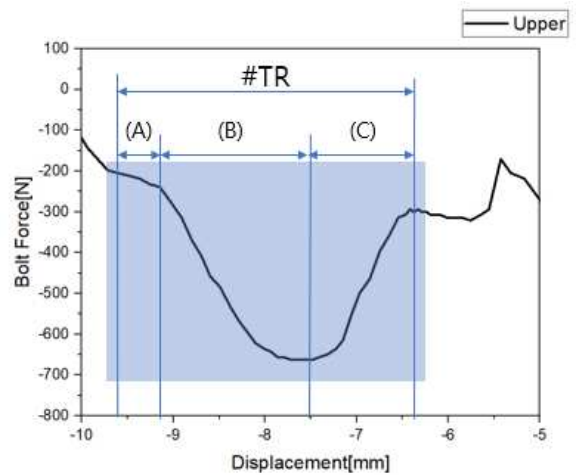


Fig. 3 Measured bolt force in lower die



(a)



(b)

Fig. 4 Measured bolt force in upper die

### 3.2. 금형의 마모 예측

상금형에 계측한 데이터를 활용하여 생산수량 시점 별 패턴을 Fig. 5 에 나타내었다. 전단의 최대 하중 시점인 1.5mm 부근에서 생산 수량 시점 별 명확한 구분이 어렵지만, 전단에서 파단으로 진행되는 P 시점 이후로는 누적된 생산량별로 하중의 차이를 보이고 있다. 생산 일지에서는 초도품 생산 이후 공정상의문제 혹은 불량품이 발생하지 않다가 7,000 여 개가 생산된 시점 부근에서 펀치 마모에 의한 버 발생으로 생산을 멈추고 펀치의 수리가 진행되었다. 트리밍 펀치 날의 무더짐에 의한 펀치와 다이의 간격이 증가하여 버의 증대와 같은 불량품 발생을 초래하였다. Fig. 5 의 P 시점은 최대 전단 하중 이후에 파단이 시작되는 시점으로써 각 누적 생산량 별 하중 패턴의 변화가 구분되는 시점으로 볼 수 있다. P 시점의 데이터를 추적하여 초도품 생산부터 제품의 불량이 나타난 시점까지 생산수량 별로 Fig. 6 에 나타내었다. 생산 초, 중기(누적 생산 수량 약 4000 여개)에는 평균적으로 약 660N 의 하중이 나타나고 있으며, 불량품 생산 시점에 근접할수록 하중이 증가하는 것을 볼 수 있다. P2 시점은 버로 인한 불량 발생 시점과 같으며, 생산 초기 대비 약 15% 이상 증가하였다. P1 시점은 누적된 데이터 중 기존 측정된 하중 범위를 벗어나는 시점으로써 생산 초기 대비 10% 이상 하중이 계측되었다. 불량품이 생산되지는 않았지만, 펀치 마모의 전조로 판단되어진다. 전조 시점으로부터 약 1,000 개의 제품이 생산된 이후에 불량이 발생되었으므로 P1 시점을 금형 펀치의 정비 시점으로 삼는 것이 합리적일 것이다.

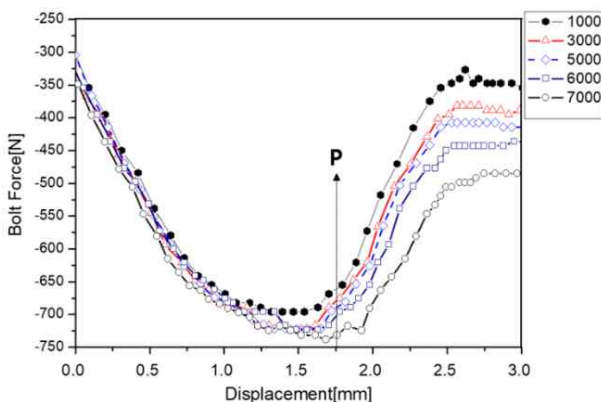


Fig. 5 Comparison of measured bolt force in the upper die during the production

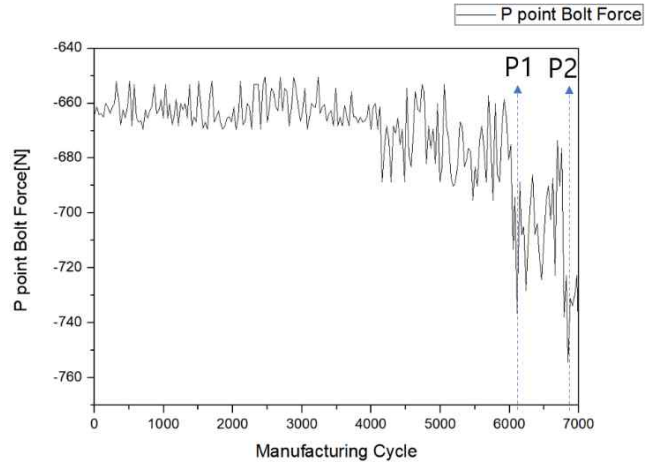


Fig. 6 Measured bolt force at the fracture point

### 4. 트리밍 공정의 해석

Fig. 5의 P 시점에서 누적 생산 수량 별 변화와 펀치 마모의 연관성을 분석하였다. 최대 전단 하중이 발생한 시점이 아닌 P 시점에서의 펀치 마모에 대한 모니터링의 유효성을 확인하기 위해 해석적으로 검증하였다. 검증을 위해 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D™를 활용하였다.

해석 모델은 상금형에 장착된 볼트에 전달되는 하중 경향을 확인하기 위해 전단되는 부분을 모델링하였고, 강소성 객체 및 대칭 조건으로 수행하였다. 소재는 SAPH440으로써 물성은 Table 1. 과 같다.

Table 1 Material properties

| Material             | SAPH440 |
|----------------------|---------|
| Yield Stress [MPa]   | 350     |
| Tensile Stress [MPa] | 440     |
| Elongation [%]       | 35      |

생산량이 누적됨에 따라 진행되는 펀치의 마모를 구현하기 위해 펀치의 곡률반경을 인위적으로 선정하여 곡률반경에 따른 하중의 변화를 확인하였다. 메쉬는 전단이 진행되는 부분을 메쉬 윈도우를 활용하여 조밀하게 부여했고, 최소 요소크기를 2 $\mu$ m 로 설정하였다. 전단면 형성에 따른 결과를 보기 위해 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이한 Normalized Cockcroft & Latham 모델을 이용하였고, 임계값을 0.7

로 설정하였다[8].

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \approx C \quad (1)$$

여기서  $\bar{\epsilon}_f$  는 파단 시의 유효 변형률,  $\sigma^*$  는 최대 주인장응력,  $\bar{\sigma}$  는 유효응력,  $\bar{\epsilon}$  는 유효 변형률,  $C$  는 Cockcroft-Latham 모델의 재료상수로서 임계손상치(Critical Damage Value)이다.

본 해석에서는 연성과괴기준에 도달한 요소는 유동 응력의 비율을 1%로 적용하여 변형저항을 상실하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 장기간 생산에 의한 금형 펀치의 마모를 구현하기 위해 펀치의 곡률반경에 따른 전단하중을 확인하였다.

본 공정의 도면상에서는 펀치의 곡률반경이 10 $\mu$ m 로 설계되었고, 마모의 진행을 모사하기 위해 곡률반경을 각각 10 $\mu$ m, 30 $\mu$ m, 50 $\mu$ m 로 모델링하여 해석 조건을 구성하였다. 클리어런스는 100 $\mu$ m 으로 고정된 값으로 해석을 수행하였다. 해석 결과 펀치의 곡률반경에 따른 상금형에서의 하중을 Fig. 7 과 같이 나타내었다. 최대 전단하중이 발생한 지점이 곡률반경의 크기에 따라 지연되는 것을 볼 수 있었다. 지연된 이후 P'시점에서의 하중이 볼트형 피에조 센서로 측정한 결과를 나타낸 Fig. 5 의 P 시점과 같이 최대 전단 하중 이후에 하중의 변화를 확인하였다. 최대 전단 하중 시점이 아닌 P'시점에서 펀치의 마모량을 판단할 수 있듯이, 볼트형 피에조 센서로 측정한 Fig. 5 의 P 시점에서 펀치 마모량을 확인하는 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

Fig. 8 과 Fig. 9 에서 곡률 반경을 각각 10 $\mu$ m 와 50 $\mu$ m 으로 해석한 결과이며, 곡률반경이 클수록 늘림면과 버의 증가를 확인할 수 있었다.

Fig. 10 과 같이 누적 생산량에 따른 Fig. 5 P 시점의 하중과 펀치 곡률반경에 따른 Fig. 7 P'시점의 하중의 경향성을 확인하기 위해 나타내었다. 곡률 반경이 커짐에 따라 볼트 하중도 점차 증가함을 확인할 수 있었다. 전단 해석을 통해 펀치의 마모 시점을 볼트형 피에조 센서를 활용하여 모니터링 할 수 있는 방안이 마련되었고, 본 연구를 응용하여 다른 공정에서도 적용이 가능하리라 판단된다.

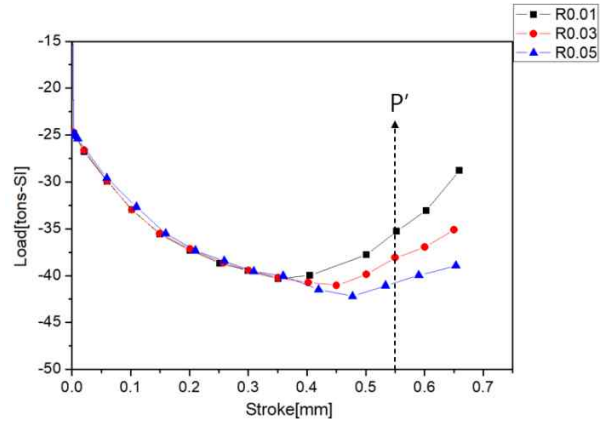
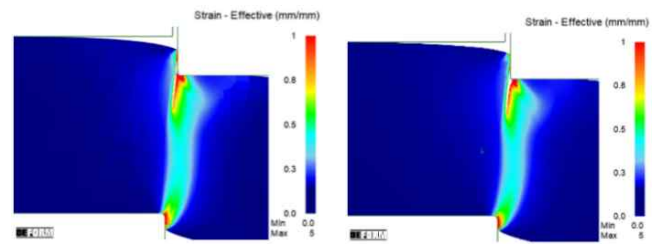
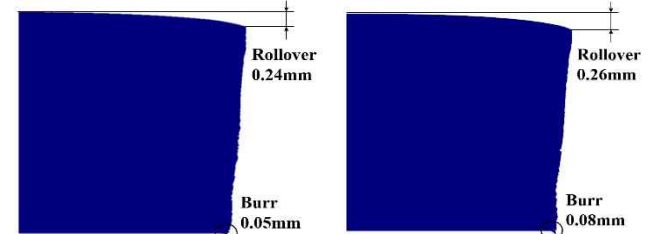


Fig. 7 Comparison of predicted punch load for each punch edge radius



(a) Punch Radius 10 $\mu$ m (b) Punch Radius 50 $\mu$ m

Fig. 8 Result of FE analysis for difference punch radius



(a) Punch Radius 10 $\mu$ m (b) Punch Radius 50 $\mu$ m

Fig. 9 Sheared surface for difference punch radius

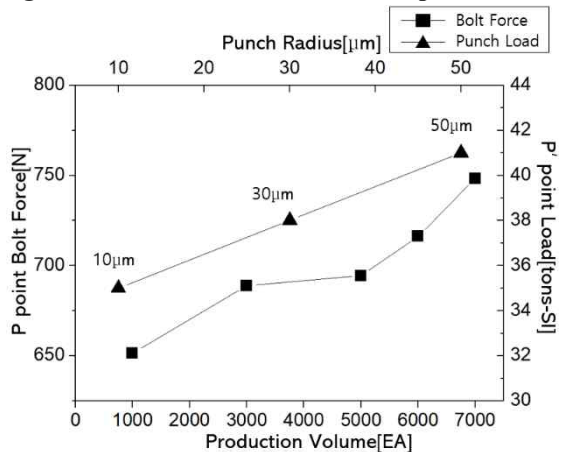


Fig. 10 Comparison of trends measured bolt force and predicted punch load



#### 4. 결론

본 연구에서는 프로그레시브 공법의 트리밍 공정에서 펀치의 마모 시점을 예측하기 위한 연구를 수행하였다.

볼트형 피에조 센서를 실제 양산 공정에 적용하여 하중데이터의 수집 및 분석을 진행하였다. 펀치에 설치한 피에조 센서로부터 소재/펀치에 작용하는 하중패턴을 관찰할 수 있었는데, 전단면에서의 롤오버, 전단, 파단 구간을 확인할 수 있었다. 초도품 생산부터 제품의 불량률이 검출된 시점까지 생산수량별로 하중패턴의 변화를 추적한 결과 버 발생의 문제점이 전산 모사를 통해 펀치의 초기 곡률반경은 약 5 배로 증가하였음을 예측해 볼 수 있었다. 불량 발생 시점에서 약 1,000 개의 제품 생산 이전부터는 전조현상으로 볼 수 있는 초기 대비 10%가 증가된 하중 패턴을 관찰 수 있어, 피에조 볼트의 계측 모니터링으로 펀치의 정비시점을 판별할 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구를 바탕으로 해석 시뮬레이션과 센서 계측을 융합한 솔루션을 제공할 수 있으며, 향후 양산 공정에서의 품질관리에 있어 데이터 기반의 시스템 도입이 활성화될 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 2021 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국산업기술진흥협회의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### REFERENCES

- [1] B. C. Hwang, C. Kim and W. B. Bae, 2008, Automated Progressive Design System for Manufacturing Product with Multi Processes, Piercing, Bending, and Deep Drawing, *Journal of KSPE*, Vol.25, pp. 55~64
- [2] D. L. Ko, D.W. Jung, J. M. Kim and K. S. Lee, 2007, A Study on the Burr Height in Shearing Steel Sheet for Automobile Parts, *The J. of the Korean Soc. for Power Syst. Eng.*, Vol.11, pp. 47~52
- [3] C. K. Yoo, S. T. Won, 2015, A Study of the Shearing Force as a Function Trim Punch Shape and Shearing Angle, *Trans. Mater. Process.*, Vol.24, pp. 77~82
- [4] J. Stahlmann, M. Brenneis, 2017, Understanding and improvement of industrial production how technology paves the way for productivity, *J Mater Process Technol*, pp. 257~266.
- [5] S.Y. Kim, M. Yamanaka, K. Tsuruoka, S. Kubota, 2017, Development of high value added cold forging product using multi-axis servo press machine, *J Mater Process Technol*, pp. 109~117.
- [6] S.Y. Kim, A. Ebina, A. Sano, S. Kubota, 2018, Monitoring of process and tool status in forging process by using bolt type piezo-sensor, *Procedia Manuf.*, pp. 542-549
- [7] S. K. Hong, B. M. Lee, J. J. Kang, J. D. Kim, 2008, Prediction of forming accuracy using FEM analysis in slitting process for connector terminal with micro width, *Journal of the KSDME*, Vol.2, pp. 45~50
- [8] K. H. Shim, S. K. Lee, B.S. Kang, S. M. Hwang, 2004, Investigation on Blanking of Thin Sheet Metal Using the Ductile Fracture Criterion and Its Experimental Verification, *J. Meter. Process. Technol.*, Vol. 155-156, pp 1935~1942.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.284>
- [9] T. M. Chang and H. W. Swift, 1950, "Shearing of Metal bars", *J. of Inst. Of Met.*, Vol.78, pp.393.
- [10] J. H. Sin, 2016, Mechanical Press Trimming Using Hot Half-Trimming for Hot Stamped Parts, M. S. thesis, Convergence Science, Pusan National University
- [11] E. Taupin, J. Breiting, W. T. Wu and T. Altan, 1996, "Material fracture and burr formation in blanking and results of FE simulations with experiments", *J Mater Process Technol*, pp.66~78.
- [12] D. C. KO, B. M. Kim, J. C. Choi, 1997, "Finite-element simulation of the shear process using the element-kill method", *J Mater Process Technol*, pp. 129~140.
- [13] Ming Li, 2000, "An Experimental Investigation on Cut Surface and Burr in Trimming Aluminum Autobody Sheet", *Int. J. Mech. Sci.*, pp. 889~906.
- [14] Ming Li, Da-Sen BI, Kun-Ke HAO, 2014, Automotive Sheet Metal SAPH440 and Q235 Formability of Comparative Study, *Met. Mater. Int.*, pp. 1027~1030.