

원통형 단조금형의 정렬을 위한 측정시스템에 관한 연구

윤재웅*

(논문접수일 2008. 10. 8, 심사완료일 2009. 1. 7)

A Study on the Measurement System for Alignment of Cylindrical Forging Die

Jae-Woong Youn*

Abstract

In most multi-stage forging processes, the die spotting process or alignment of punch and die depends on the manual operation. It results a very tedious and inefficient procedure, thus the proper measurement system is needed to improve productivity and accuracy. This paper proposes a measurement system for alignment of die and punch which has a cylindrical holder, and describes the system concepts using 3 eddy-current displacement transducers and precise measurement jig. In order to apply this measurement system to real situations, the measuring procedures and system calibration method, etc. are proposed. Finally, the accuracy and productivity of this measurement system are investigated in this paper.

Key Words : Multi-stage forming(다단계 성형), Alignment of die and punch(핀치와 다이의 정렬), Die spotting(다이 스포팅), Measurement system(측정시스템), Eddy-current transducer(와전류 센서)

1. 서론

단조는 여러 가지 금형 및 공구로 소재에 압축하중을 가하여 성형하는 공정이다. 일반적으로 복잡한 형상을 갖는 부품이나 성형하중이 높은 경우의 단조는 다단계 성형(Multi-stage Forming)을 이용하는데, 이러한 다단계 단조공정에서는 Fig. 1에서와 같이 쌍을 이루는 펀치(Punch)와 다이(Die)(혹은 상형과 하형), 그리고 이 각각의 금형을 지지하는 홀더(Holder)가 필요하게 되고, 초기에 설치 시 각각의 쌍이 잘 정합되

도록 맞추는 작업이 매우 중요하다. 이는 정밀한 부품을 제조하기 위한 것은 물론이고, 정합이 잘 되지 않았을 때 금형이 파손되는 것을 방지하기 위해서도 매우 중요한 공정이라고 할 수 있다. 일반적으로 여러쌍의 금형을 설치하는 경우에 적게는 수 시간에서 수십 시간까지 많은 시간이 소요되고 있어, 다양한 제품을 단조하는 사업장의 입장에서는 금형 교환시간이 결국 생산성에 막대한 손실을 가져올 수 있게 된다. 일반적으로 각 쌍의 금형을 정합시키기 위해서는 수동으로 측정하고 테스트 성형 및 시행착오를 여러번 거친 후에

* 대구대학교 자동차·산업·기계공학부 (jwyoun@daegu.ac.kr)
주소: 712-714 경북 경산시 진량읍 내리리 15번지

설치가 마무리되는데, 이것은 생산성의 문제뿐만 아니라, 작업자가 대형 프레스 설비 안에서 장시간 동안 위험에 노출되어 있는 안전에 문제가 생길 수도 있게 되는 등 현장에선 매우 문제가 많은 공정이라 할 수 있다.

일반적인 성형 공정에서는 이와 같은 금형의 정합과 내부 소재의 정밀도 등을 맞추기 위해 별도의 다이 스폿팅(Die spotting) 공정을 두고 있으며, 이는 수동으로 금형의 정합성과 가공 정밀도 등을 맞추는 공정이기 때문에 매우 많은 시간이 소요되는 비효율적인 공정이라고 할 수 있다⁽¹⁻³⁾. 최근, 이러한 다이 스폿팅 공정을 자동화하기 위해 다이 스폿팅 모드를 갖고 있는 프레스에 대한 연구⁽⁴⁾와 다이 스폿팅을 위한 3차원 측정 코드의 자동생성 등에 대한 많은 연구가 수행되고 있다^(5,6). 일반적인 성형 공정에서의 다이 스폿팅은 금형의 정합성 문제와 금형가공의 정밀도 문제를 모두 포함하고 있으며, 이 중 금형의 정밀 가공과 관계된 문제는 금형 형상의 다양성 때문에 실질적으로 자동 측정을 통해 다이 스폿팅 공정 전체를 자동화하기는 어렵다고 할 수 있다. 그러나, 본 연구의 대상인 냉간단조 공정에 주로 사용되는 다단성형기의 경우에는, Fig. 1에서와 같이 원통형 홀더를 갖는 경우가 많으며, 이러한 경우의 금형정렬은 일반적인 축 정렬의 문제와 유사한 점이 많아 일반적인 다이 스폿팅과는 조금 다른 관점에서 접근할 수도 있을 것이다.

본 연구에서는, Fig. 1과 같이 주로 원통형 홀더를 갖는 단조금형의 정합성 문제를 해결하기 위하여 측정을 통해 금형의 정렬을 자동화하고자 한다. 즉, 단조제품이 바뀔 때 마다 여러 쌍의 금형을 신속하게 설치하기 위한 금형의 위치 측정 시스템을 개발하고자 한다. 이는 금형의 설치 시 대부분의 시간을 소요하는 각 쌍의 금형 위치를 정확하게 측정함으로써 금형을 빨리 손쉽게 정합할 수 있도록 해주는 시스템이며, 이는 향후 금형의 자동 교환시스템으로 발전하기 위한 가장 중요한 공정이라고 판단되어 진다.

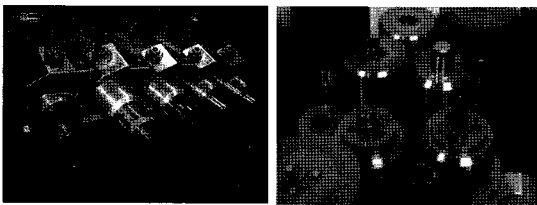


Fig. 1 Multi-stage former and forming dies

2. 측정 목표 및 측정 방법

2.1 측정 목표

본 연구에서는 원통형 단조금형의 정렬을 위한 펀치와 다이의 상대위치를 측정하는 것을 목표로 하며, 측정에 있어서 다음과 같은 전제 조건을 만족하는 것으로 가정한다.

① 펀치와 다이는 각각의 금형 홀더에 대해 충분히 정밀하게 가공되어 있어 펀치 홀더와 다이 홀더의 정렬만 맞추면 금형의 정합성은 만족된다.

② 금형의 홀더부분과 가공된 코어 부위는 홀더 축에 대한 각도 오차가 없으며, 펀치와 다이의 거리오차도 없다.

이와 같은 가정의 의미는, 펀치와 다이의 상대위치 측정시 계속해야할 위치(x, y, z)와 회전각도($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)들 중에 회전각도 및 거리(z)의 오차는 가공오차가 허용오차 한계 안에 들기 때문에 계속할 필요가 없고, 두 원통형 펀치와 다이의 중심 위치(x, y)만 측정하면 된다는 것을 의미하며, 이는 원통형 단조를 수행하는 실제 현장에서 적절한 것으로 판단되었다. 즉, 실제 현장에서의 금형 정합에 있어서 두 금형사이의 상대적인 중심좌표 편차만 계속할 수 있다면, 금형의 정렬문제를 해결할 수 있는 것이라 볼 수 있다. 작업 현장의 상황을 감안 할 때 본 연구에서 추구하고자 하는 측정 정밀도 및 계속시간의 목표는 다음과 같다.

- 위치 정밀도 : $\pm 0.05\text{mm}$ 이내
- 측정시간 : 5분 이내

2.2 측정 방법

본 연구에서는 금형의 위치 측정을 위한 센서의 결정을 위해, 유사한 다른 공정에 적용하고 있는 측정시스템을 검토하였다. 금형의 상대위치 측정과 유사한 공정으로서 축의 정렬(Alignment)을 측정하기 위한 공정을 검토하였다. 단조금형의 정렬 및 축 정렬을 위한 측정으로서 가장 많이 활용되는 방법은 다이얼게이지를 이용한 수동 계속이다. 그러나 이와 같은 방법에는 다양한 측정오차가 존재하기 때문에 실질적으로 원하는 오차범위 이내에서의 계속이 불가능하다고 할 수 있다. 최근, 이러한 다이얼 게이지 방식의 오차를 극복하기 위해 비접촉식의 광학적인 방법으로 측정하는 방법에 대한 연구가 많이 수행되고 있으며^(7,8) 일부 시스템은 상품화되고 있으나, 고가의 제품이며 축 정렬을 전문으로 하기 때문에 본 연구에서와 같은 금형의 위치측정 용으로는 적합하다고 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 새로운 방법으로서 금형의 상대위치를 측정할 수 있는 비접촉 센서시스템을 개발하고자 하였다.

먼저, 본 연구에서는 다양한 비접촉센서에 대해 각각의 장 단점을 분석함으로써 금형의 상대위치 측정 가능성을 검토 하였다. 검토 결과, 여러 가지 비접촉 센서 중에서 와전류 센서가 산업현장에서의 적용성, 요구 정밀도 및 경제적인 측면에서 바람직하다고 판단되어 본 연구에 적절한 센서로 판단되었다. 와전류센서(Eddy current sensor)는 센서 헤드 부분에서 고주파의 교류를 발생시키고 여기에 전도체가 가까워지면 와전류의 밀도가 커져 액티브 코일(Active coil)의 임피던스(Impedance)를 변화 시키게 된다. 이를 이용하여 센서 헤드와 전도체까지의 거리를 측정하게 되며, 이 때 측정 가능한 거리는 수 mm이며 0.001mm 정도의 측정 분해능을 얻을 수 있게 된다. 본 연구에서 사용한 와전류센서의 사양은 Table 1과 같다.

금형의 상대위치 측정이라고 하는 것은 결국 다이 홀더와 펀치 홀더의 동심도가 정확히 맞는 지를 측정하게 되는 것이고, 이를 위해서는 다이 홀더부에 부착된 센서 유닛(Unit)이 펀치 홀더의 동심도 여부를 측정하는 형태로 측정 공정이 이루어지는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 정확하게 제작된 센서

지그(Jig)에 각각 120도를 이루는 세 개의 와전류 센서를

Table 1 Specifications of eddy current sensor

Item	Specifications
Model	Keyence EX-110
Measurement Range	2mm
Resolution	1 μ m

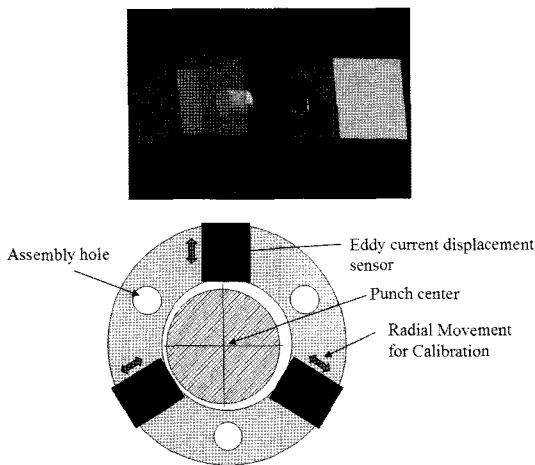


Fig. 2 A Schematic diagram of sensor system

부착하고 이를 다이 홀더에 고정시키고자 하였다. 이 때 센서 지그와 다이는 정확하게 동심도를 맞추어야 한다. 센서부를 다이 홀더에 고정시키고 펀치 홀더를 다이쪽으로 밀어 넣었을 때 각각 세 개의 센서는 현재의 위치에서 펀치의 외경부분까지의 거리(Δ)를 측정하게 되는 것이다. 이를 통해 다이 홀더에 대한 펀치 홀더의 편심도를 측정하게 되고, 이 편심도를 기준으로 펀치 홀더의 위치를 교정하면 다이와 펀치의 동심을 일치 시킬 수 있게 되는 것이다.

한 개의 센서지그를 이용하여 다양한 크기의 펀치와 다이를 측정하기 위해서는 와전류 센서가 센서 지그의 직경 방향으로 움직일 수 있어야 한다. 이는 센서의 측정 영역이 2mm로 좁기 때문이다. 이렇게 센서의 위치가 바뀌게 되면 세 센서의 동심도를 다시 맞춰 주어야 하는데, 이는 다양한 보정(Calibration) 지그를 이용하여야 한다. 보정 지그는 사전에 정확한 동심도를 갖도록 제작된 후 센서 지그에 고정하고 계측을 통해 두 지그의 동심도가 맞도록 센서의 위치를 조절하여 주면 완료된다.

3. 동심원의 측정

센서 지그에 장착된 세 개의 와전류 센서로부터 임의의 위치에 있는 펀치원의 중심을 구하는 것이 본 측정의 개념이라고 할 수 있다. 먼저, Fig. 3에서와 같이 각각의 와전류 센서에서 측정된 거리를 Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 라 하면, 센서가 장착된 원(센서원)의 반지름 R의 크기에 상관없이 펀치원의 중심좌표는 측정된 세 거리로부터 구할 수 있게 된다. 따라서 센서원의 지름을 임의의 값으로 가정하고 다음과 같이 펀치원의 중심을 계산할 수 있다.

- ① 센서원의 반지름 R을 임의의 값으로 가정(100mm)
- ② 측정된 거리값으로부터 세 점의 위치를 계산(Fig. 4)

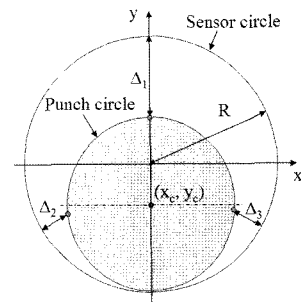


Fig. 3 Sensor circle and punch circle

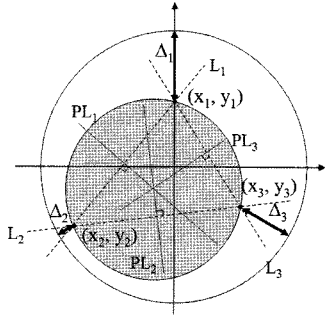


Fig. 4 Calculation of punch holder center

$$x_1 = 0.$$

$$y_1 = R - \Delta_1$$

$$x_2 = -(R - \Delta_2) \cos \frac{\pi}{6}$$

$$y_2 = -(R - \Delta_2) \sin \frac{\pi}{6}$$

$$x_3 = (R - \Delta_3) \cos \frac{\pi}{6}$$

$$y_3 = (R - \Delta_3) \sin \frac{\pi}{6}$$

- ③ 각각 세 점을 연결하는 직선(L₁, L₂, L₃)의 방정식을 구함
- ④ L₁, L₂, L₃를 수직 이등분하는 직선의 방정식을 구함 (PL₁, PL₂, PL₃)
- ⑤ PL₁과 PL₂ 두 직선의 교점을 구함(x_{c1}, y_{c1})
- ⑥ PL₂와 PL₃ 두 직선의 교점을 구함(x_{c2}, y_{c2})
- ⑦ PL₃와 PL₁ 두 직선의 교점을 구함(x_{c3}, y_{c3})
- ⑧ 각 교점의 평균교점을 구함(x_c, y_c)

이와 같이 최종적으로 구해진 편치원의 중심 좌표(x_c, y_c)는 센서원의 중심으로부터 편심된 편치원의 중심좌표이므로 이 값 만큼(부호는 반대 방향으로) 편치의 위치를 조정하여 주면 편치와 다이는 동심원을 이루게 되어 정확하게 배열되었다고 할 수 있다. 이 때 계속된 값은 계속 오차를 포함하게 되므로 본 연구에서는 같은 위치를 여러번 측정하여 그 평균값을 계산해 줌으로써 계속에서 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있도록 하였다.

4. 센서시스템의 설계 및 제작

전체 센서시스템은 크게 두 부분으로 나뉜다. 첫 번째는

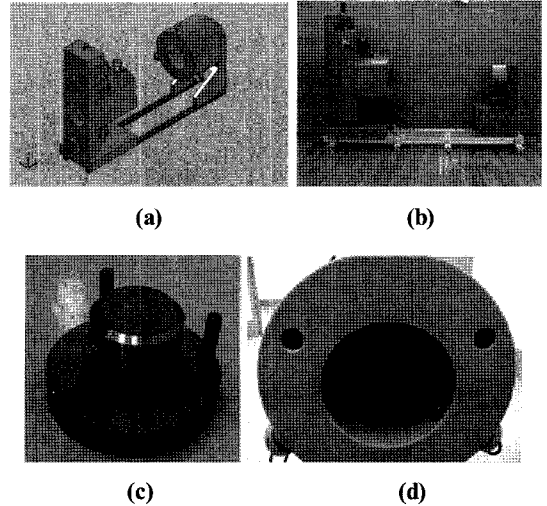


Fig. 5 Measurement system & simplified test bed of former

- (a) Detail design of test bed
- (b) Manufactured test bed
- (c) Calibration jig
- (d) Sensor system

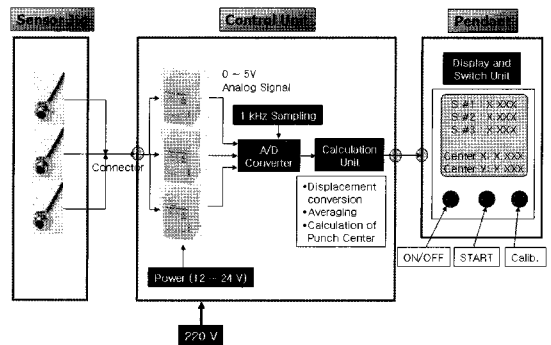


Fig. 6 A schematic diagram of sensor controller

세 개의 와전류 센서를 포함하고 다이 홀더에 부착되는 센서 지그부와 두 번째는 센서에서 나오는 신호를 이용하여 계산하고 그 결과를 표시하는 센서 콘트롤러(Controller)부이다. 먼저, 센서 지그부는 실제 프레스의 장착부위를 고려하고 또한 작업자가 핸들링 할 수 있는 무게와 크기 등을 감안하여 설계/제작하였다. 또한, 센서시스템의 성능을 검증하고 그 정밀도를 높이기 위해 다양한 조건에서의 실험이 필요하다. 그러나 단조 프레스는 계속해서 생산현장에서 작업을 진행하고 있기 때문에 실험을 진행할 수가 없어 본 연구에서는

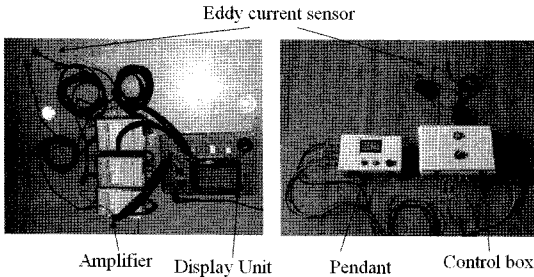


Fig. 7 Manufactured sensor controller

Fig. 5에서와 같이 단조 프레스와 유사한 테스트 베드(Test bed)를 설계 제작하여 계속적으로 실험을 할 수 있도록 하였다. 한편, 측정에 필요한 계산과 User Interface 등을 위한 센서 컨트롤러의 구성과 제작된 형상은 각각 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

5. 측정절차 및 시스템의 운영

5.1 시스템의 보정(Calibration)

센서 시스템을 사용하기 전에 먼저 시스템의 보정이 필요하다. 센서 시스템의 보정은 측정하려고 하는 펀치와 다이의 크기가 달라졌을 때 측정 전에 해주어야 한다. 이것은 앞서도 언급한 바와 같이 와전류 센서가 2mm의 측정 영역을 갖고 있기 때문에 다양한 펀치와 다이의 직경에 관계없이 측정을 하기 위해서는 세 센서의 위치를 펀치의 크기에 맞게 조정해 주어야 한다. 따라서 다양한 크기의 보정 지그를 이용하여야 하고, 이때의 보정 지그는 센서 지그부와 정확하게 같은 중심을 가질 수 있도록 사전에 제작되어야 한다.

시스템의 보정은 다음과 같이 수행한다. Fig. 5(c)와 Fig. 8에서와 같이 보정 지그에 있는 세 개의 봉을 센서 지

그에 있는 세 구멍에 삽입하게 되면 센서 지그와 보정 지그는 같은 중심좌표를 갖게 된다. 이 때, 와전류 센서에서 나오는 거리값이 2mm 이내가 되도록 와전류 센서의 위치를 조정하게 된다. 이 때의 측정 거리는 펜던트에 Display되어 진다. 이렇게 3개의 와전류 센서 위치를 조정하고, 그 때에 나오는 중심값의 위치는 x와 y가 각각 0.0이 되어야만 한다. 왜냐하면, 센서 지그와 보정 지그는 이미 그 중심위치가 같도록 제작되었기 때문이다. 따라서 펀치의 중심값이 (0, 0)이 되도록 와전류 센서의 위치를 계속 조정해 주어야 하는 것이다. 그 결과 계측된 펀치의 중심값이 (0, 0)이 되면 보정 지그를 빼내고, 측정을 할 수 있는 준비가 끝나는 것이다.

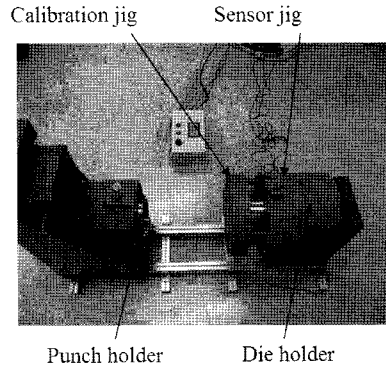


Fig. 8 System calibration

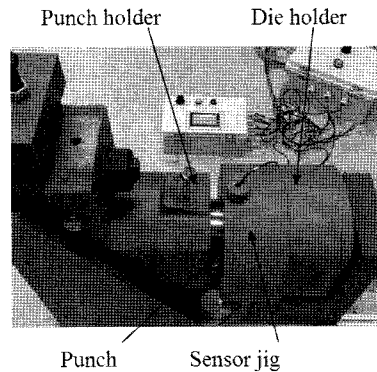


Fig. 9 Measurement of die alignment

5.2 측정 절차

실제 생산 현장에서 금형이 교환되어 장착되고 나면 펀치와 다이의 중심을 갖게 해 주어야 한다. 먼저, 측정기를 성형기 쪽으로 가져가서 센서 지그를 다이 홀더에 장착하게 된다. 센서 지그는 다이 홀더와 같은 중심을 갖게 장착될 수 있도록 사전에 설계/제작되었다. Fig. 9는 제작된 Test bed를 이용하여 측정하는 모습을 보여주는 사진이다.

보정이 끝나면 측정하고자 하는 펀치 홀더를 성형기에 Fig. 9와 같이 장착하고, 펀치를 다이쪽으로 밀어 넣는다. 그 후 계측 개시 스위치를 누르면 펀치의 중심좌표를 바로 계산하고 계측은 완료되는 것이다. 이 때의 계측 시간은 여러번 반복 측정을 하더라도 1분 이내에 완료되게 된다.

6. 측정결과 및 고찰

측정시스템의 정밀도는 시스템의 반복 정밀도와 측정 정

Table 2 Repeatability of the eddy current sensor

순번	센서 거리
1	1.173mm
2	1.158mm
3	1.180mm
4	1.145mm
5	1.188mm
절대 평균편차	0.014mm

Table 3 Repeatability of the proposed measurement system

순번	중심좌표 - X	중심좌표 - Y
1	+0.497	-0.094
2	+0.446	-0.089
3	+0.443	-0.071
4	+0.448	-0.083
5	+0.473	-0.061
절대 평균편차	0.019	0.011

밀도로 나눌 수 있다. 먼저 측정시스템의 반복 정밀도를 평가하기에 앞서 와전류 센서의 반복 정밀도를 평가하고자 한다. Table 2는 고정된 거리에서 와전류 센서의 거리 측정결과를 반복해서 실험한 결과이다. 전체 측정시스템의 반복 정밀도 또는 측정 정밀도는 와전류센서의 반복 정밀도에 의해 결정되기 때문에 본 실험은 매우 중요하다고 할 수 있다. 5번 측정 결과 와전류 센서의 평균 편차는 약 0.014mm로 나타남을 알 수 있었다. 이것은 본 센서의 분해능이 0.001mm인 점을 감안한다면 어느 정도 타당한 결과로 보여 진다. 그러나 이와 같은 센서 자체의 반복 정밀도는 계측 프로그램의 평균을 취하는 횟수를 10회로 하고 있기 때문에 평균화되어짐으로써 반복 정밀도를 높이는 효과가 있을 것으로 생각된다.

한편, 전체 측정시스템의 반복 정밀도는 Table 3과 같다. Table 3은 사전에 펀치 홀더를 다이 홀더에 대해 (0.5, 0.0) 만큼 편심시켜 놓고 여러번 측정한 결과이다. 표에서 볼 수 있듯이, 5번 측정한 측정값의 평균 편차는 X-방향으로는 0.019mm, Y-방향으로는 0.011mm로 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 앞에서의 결과로 알아본 와전류 센서 자체의 반복 정밀도가 가장 큰 영향을 준 결과라 생각되어지며, 이는 목표 정밀도인 0.05mm 이내에 드는 값으로서 충분한 목표 정밀도 이내에 든다고 할 수 있다.

Table 4 Final position accuracy of the measurement system

순번	기준 좌표	측정 좌표
1	(1.0, 0.0)	(0.991, -0.012)
2	(0.5, 0.5)	(0.511, 0.483)
3	(-0.5, 0.5)	(-0.513, 0.511)
4	(0.5, -0.5)	(0.507, -0.493)
5	(1.0, 1.0)	(1.021, 0.987)
평균 거리편차		0.017

한편, Table 4는 본 연구를 통해 개발된 측정시스템의 최종 위치 정밀도를 보여주고 있다. 본 측정은 사전에 알고 있는 양(기준 좌표)만큼 펀치를 편심시켜 놓고 측정시스템으로 측정한 결과를 보여주고 있다. 전체적인 오차는 반복정밀도와 유사하게 약 0.017mm 정도로 나타나고 있어 본 연구의 목표 정밀도인 0.05mm 이내의 정밀도로 측정하고 있다는 것을 알 수 있다. 한편, 측정시간은 센서의 장착을 포함하여 약 5분 이내에 측정이 가능함으로써 기존의 수동 계측과 시행착오 방식에 근거한 금형의 정렬에 비해 크게 생산성이 증대됨으로써 전체적인 연구의 목표를 달성할 수 있었다.

7. 결론

본 연구에서는 원통형 홀더를 갖는 단조금형의 정합성 문제를 해결하기 위하여 와전류 타입의 비접촉 센서를 이용한 측정시스템을 개발하였고, 다양한 금형의 조합에 대해 실험을 수행하면서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 원통형 홀더를 갖는 단조금형에서 금형의 정렬을 위해 다이 홀더에 대한 펀치 홀더의 편심량을 측정하는 새로운 방법을 제시하였으며, 이를 위한 측정 장치 및 측정 제어를 제작함으로써 현장에 적용 가능한 측정시스템을 구축하였다.
- (2) 세 개의 와전류 센서를 이용하여 새로운 개념의 금형 정밀위치 측정시스템을 개발하였고, 평균 약 0.02mm 이내의 정밀도를 갖는 측정이 가능해짐으로써, 기존의 수동계측 및 시행착오 방법을 대체할 수 있는 방법을 제시하였다.
- (3) 5단계의 다단계 단조성형을 수행하는 공정에서 약 8시간 정도 소요되던 금형교환 시간을 한 시간 이내로 줄임으로써 생산성 향상을 이룰 수 있었다. 이는 각 금형의

위치측정에서의 소요시간을 5분 이내로 줄임으로써 가능하였다.

본 연구를 통해 개발된 측정 장치는 현장 적용성 검토를 통해 문제점을 확인하였고, 현재 적용을 위한 보완 단계에 있다. 한편, 본 연구 결과는 향후 측정결과를 이용한 금형위치 자동 보정시스템 개발의 핵심 모듈로 활용할 예정이다.

후 기

본 논문은 2006학년도 대구대학교 학술연구비의 지원에 의한 논문임.

참 고 문 헌

- (1) Choi, B. K., Ko, K .H., and Kim, B. H., 2005, "Development of Intelligent Mold Shop," *Computer-Aided Design & Applications*, Vol. 2, No. 5, pp. 619~626.
- (2) Yin, J. J., Shin, Y. S., and Kim, H. Y., 2001, "Analysis on the Bending Deflection of the Blank Holder in Automotive Body Panel Draw Die," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 3, pp. 68~74.
- (3) Han, K. T., 1998, "A Study on the Assessment of Component Technology in Press-Die Making of Car Panel," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 7, No. 3, pp. 85~91.
- (4) Konnerth, U., 2001, "A Hydraulic High-Speed Tryout Press for the Simulation of Mechanical Forming Processes," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 111, pp. 159~163.
- (5) She, C. H., Chang, C. C., Kao, Y. C., and Cheng, H. Y., 2006, "A Study on the Computer-Aided Measuring Integration System for the Sheet Metal Stamping Die," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 177, pp. 138~141.
- (6) Kim, D. Y., Noh, S. D., Hahn, H. S., Joo, Y. K., and Park, J. S., 2000, "Development of a Reverse Engineering System for Stamping Die Manufacturing," *Proceedings of the Korean Society for precision Engineering*, Vol. 2, pp. 277~280.
- (7) Prugtechnik, 2001, "Taking the Squint out of Shaft Alignment Techniques," *World Pumps*, July, pp. 20~24.
- (8) Jiao, G. H., Li, Y. L., Zhang, D. B., Li, T. H., and Hu, B. W., 2006, "A Laser Shaft Alignment System with Dual PSDs," *Journal of Zhejiang University Science A*, Vol. 7, No. 10, pp. 1772~1776.