

## 무금형 성형장치를 이용한 페루프 판재성형

양승훈\* · 박종우\*\* · 홍예선\*\*\* · 양현석\*\*\*\*

### Closed-loop Sheet Metal Forming Using Dieless Forming Apparatus

S. H. Yang, J. W. Park, Y. S Hong and H. S. Yang

#### Abstract

A dieless forming system, which consists of hydraulic punch elements and elastomer/fluid pads, was developed for sheet metal forming. 2-D curved surface forming was carried out using open-loop, closed-loop, and repeated forming method. Closed-loop exhibited higher precision than open-loop forming. Repeated forming also showed reduced spring back and possibility of high precision.

**Key Words :** Dieless Sheet Forming, Deformation Transfer Function, Open- and Closed-loop Forming.

#### 1. 서 론

다수의 금속봉을 이용하여 금형 없이 금속 판재의 3차원 곡면을 성형하는 dieless forming 기술은 미국, 일본, 중국 등이 이미 오래 전부터 연구하여, 현재 상용화 수준에 도달해 있다<sup>(1)</sup>. 그 중 미국과 중국은 금속봉을 양산 금형 대용으로 사용하고자 최종 곡면을 정밀하게 형성하는 기술을 개발하고 있고, 일본은 과거의 금형대용 방식에서 지금은 어떤 형상이든 신속하게 자유자재로 성형할 수 있는 능동형 dieless forming 기술을 개발하고 있다. 한편, 국내에서는 hydroforming의 원리를 dieless forming과 결합한 새로운 기술이 고안되었다<sup>(2)</sup>. Dieless forming의 정밀제어기술은 금속봉으로 곡면성형 후 성형품의 형상을 측정하여 그 오차가 원하는 범위내로 수렴할 때까지 수정하여 최적곡면을 만들어 가는 closed-loop(페루프) 방식<sup>(3,4)</sup>과 정방향과 역방향 성형을 반복하여 점차 탄성회복량을 줄임으로써 성형정밀도를

높이는 반복성형법 및 에너지 소모량이 가장 적은 성형 경로를 찾아 최적 성형 조건을 구하는 최소에너지 경로법 등<sup>(5)</sup>이 있다. 본 연구에서는, 성형 정밀도를 높이기 위해 제어 알고리즘이나 모델링으로 Ousterhout의 변형 전달함수<sup>(3)</sup>와 Valjavec<sup>(6)</sup>의 방식을 본 시스템에 맞게 변형, 적용하여, 개루프(1회 성형법)와 페루프 판재 성형특성을 비교하였고, 시스템을 단순 모델링하여 성형 시스템의 안정성을 판별하였다. 또한 반복성형법이 AI 판재의 spring back 감소에 미치는 효과도 조사하였다.

#### 2. 판재성형 시스템의 특성

##### 2.1 성형 시스템의 페루프 구조

안정한 선형 시불변 시스템의 전달함수  $G_p$ 는 시스템 입출력의 라플라스 변환비로 정의되고, 시스템의 정상상태 응답은  $G_p(s)$ 에  $s$ 를  $j\omega$ 로 치환하여 얻을 수 있다.

\* 한국과학기술연구원/연세대학교 기계공학부  
\*\* 한국과학기술연구원 재료연구부  
\*\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
\*\*\*\* 연세대학교 기계공학부

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{F(y(t))}{F(x(t))} \quad [1]$$

즉 시간영역 변수  $x(t)$ 와  $y(t)$ 의 Fourier 변환을 통해 계산된다.

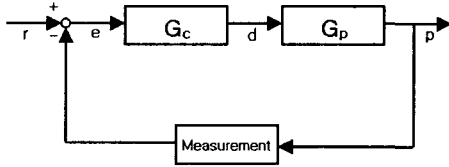


Fig. 1 Block diagram of the forming system

Fig. 1은 판재를 가지고 원하는 모양을 성형하는 시스템의 블록 선도이다. 기준입력( $r$ )과 성형된 판재( $p$ )의 모양을 비교하여 오차를 0으로 수렴하게 하는 것이 본 시스템의 목적이다. 이 성형 시스템의 주요 특징은  $p[n]$ ,  $d[n]$ ,  $e[n]$ ,  $r[n]$ 이 각 점으로 정의된다는 것이다. 따라서 die의 모양이나 성형된 판재의 모양은 공간상의 높이로 정의 될 수 있다.  $p$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $r$ 은 1차원 이산공간 영역에서 정의되어지므로 이들의 주파수영역에서의 대응하는 점들, 즉  $P[k]$ ,  $D[k]$ ,  $E[k]$ ,  $R[k]$ 는 이산 시간 Fourier 변환(DFT)을 통해 얻을 수 있다<sup>(3)</sup>.

## 2.2 전달함수의 추정치 계산

실제 시스템은 비선형 시변 시스템이다. 그러나 일정 구간 내에서 선형화가 가능하므로 본 성형 시스템을 선형화하기로 한다<sup>(6)</sup>. 또한 성형하고자 하는 판재의 특성은 상온에서 무시할 정도로 작은 변화를 일으키므로 시불변 시스템으로 간주하기로 한다. 이렇게 본 성형시스템은 시불변 선형 시스템으로 간주되기 때문에 재료의 소성구간의 stress-strain 비선형성을 피하기 위해 시스템의 플랜트 전달함수는 형상차에 관한 비로 나타내어야 한다<sup>(4)</sup>.

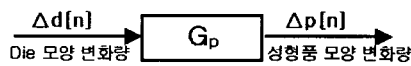


Fig. 2 Deformation Transfer Function of the system

이렇게 할 경우  $G_p$ 의 성형전달함수의 추정치  $\hat{G}_p$ 은

$$\hat{G}_p(e^{j\omega}) = \frac{\Delta P[k]}{\Delta D[k]} \quad (k=0, 1, \dots, N-1) \quad [2]$$

로 정의된다. 여기서 성형된 판재의 형상차와 die의 형상차는 각각

$$\Delta P[k] = P_i[k] - P_{i-1}[k] \quad [3]$$

$$\Delta D[k] = D_i[k] - D_{i-1}[k] \quad [4]$$

이 되고,  $D_i$ ,  $P_i$ 는 각각  $i$ 번째 die와 성형된 판재의 모양이다.

$$\hat{G}_p(e^{j\omega}) = \frac{DFT\{\Delta p[n]\}}{DFT\{\Delta d[n]\}} \quad [5]$$

위의 식으로부터  $\hat{G}_p$ 은 성형된 판재의 형상차에 대한 DFT를 die 모양의 형상차에 대한 DFT로 나누어줌으로 간단하게 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{G}_p(e^{j\omega}) &= \frac{\Delta P[k] \cdot \Delta D^*[k]}{\Delta D[k] \cdot \Delta D^*[k]} \\ &= \frac{DFT\{R_{xy}[n]\}}{DFT\{R_x[n]\}} = \frac{\hat{P}_{xy}[k]}{\hat{P}_x[k]} \quad [6] \end{aligned}$$

이렇게 함으로서 변형 전달함수의 추정치를 구할 수 있게 된다<sup>(7)</sup>. 여기서  $R_{xy}[n]$ 와  $R_x[n]$ 는 각각 상호상관함수, 자기상관함수를 의미하고,  $\hat{P}_{xy}[k]$ ,  $\hat{P}_x[k]$ 는 각각 상호스펙트럼밀도와 전력스펙트럼밀도를 의미한다.

$$G_p(e^{j\omega}) = \frac{P_{xy}[k]}{P_x[k]} \quad [7]$$

따라서  $\hat{G}_p$ 은 실제 플랜트의  $P_{xy}[e^{j\omega}]$ 와  $P_x[e^{j\omega}]$ 사이의 비로 근사 될 수 있다. 변형 전달함수(DTF)를 구하기 위해 2번의 calibration 성형을 하여야 하는데, 이에 관한 방법은 Central-difference Approach<sup>(6)</sup>를 적용하기로 한다. 또한 Valjavec은 단 한번의 계산으로 변형 전달함수를 구하는 방법이 노이즈에 대해 더 효과적이라는 것을 검증하였다<sup>(6)</sup>.

## 2.3 성형에 필요한 die 모양 결정

이렇게 해서 구해진 변형 전달함수를 가지고 다음 성형에 필요한 die의 모양을 결정할 수 있다. 식[1]은 식[8]과 같이 바뀌고 이것은 다시 식[9]로 변형시킬 수 있다.

$$\Delta D[k] = [\hat{G}_p(e^{j\omega})]^{-1} \cdot \Delta P[k] \quad [8]$$

$$D_{i+1}[k] - D_i[k]$$

$$= [\hat{G}_p(e^{j\omega})]^{-1} \cdot [P_{i+1}[k] - P_i[k]] \quad [9]$$

식[9]의  $P_{i+1}[k]$ 는 성형하고자 하는 모양  $R[k]$ 와 같으므로 성형오차  $E[k]$ 는

$$E[k] = R[k] - P[k] \quad [10]$$

가 된다. 그래서 식[9]는 식[11]이 되고

$$D_{i+1}[k] = D_i[k] + E[k] \cdot [\hat{G}_p(e^{j\omega})]^{-1} \quad [11]$$

결과적으로 다음 성형에 사용될 die의 모양은 식[11]에 의해 결정된다.

### 2.4 시스템의 안정성 판별

안정성에 관한 문제는 제어 시스템에 있어서 가장 중요하므로, 본 시스템의 성형과정이 안정한가 불안정한가를 알아보기 위해 성형 시스템을 모델링하여 안정성 여부를 판별하였다. 여기서 모델링한 시스템의 안정성 여부가 관심대상이므로, spring back에 관한 정확한 예측은 그다지 중요하지 않다. 따라서 본 성형 시스템의 모델은 die와 성형할 판재 사이에 작용하는 마찰은 없다고 가정한다. 성형하고자 하는 판재의 모양과 die의 모양은 같으므로, die의 모양과 성형된 판재의 모양 사이의 차를 오차로 볼 수 있다. 이 오차를 근거로 새로운 die의 모양을 식[12]를 이용하여 결정한다.

$$D_{i+1}[k] = D_i[k] + K_p \cdot [R[k] - P_i[k]] \cdot \hat{G}_p^{-1}[k] \quad [12]$$

여기서  $K_p$ 는 비례 게인이다.  $|\hat{G}_p^{-1}| = 1$ 로 가정하고 식[12]를 z-변환을 이용하여 바꾸주면

$$D[z] \cdot z = D[z] + K_p \cdot E[z] \quad [13]$$

가 되고, 식[13]을 다시 loop 전달함수  $H[z]$ 로 표현하면 식 [14]와 같이 된다.

$$H[z] = \frac{D[z]}{E[z]} = \frac{K_p}{z-1} \quad [14]$$

따라서 loop 전달함수를 이용한 성형 시스템은 z-평면상에서의 해석을 통해  $0 \leq K_p \leq 2$  범위 내에서 안정하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 식[14]에 대한 페루프 전달함수의 응답특성이다. 위에서 언급한 바와 같이 Fig. 3(a)을 통해  $0 \leq K_p \leq 2$  범위 내에서는 안정하다는 것을

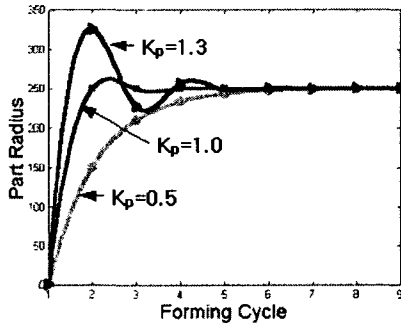


Fig. 3(a) Response of the system for different  $K_p$

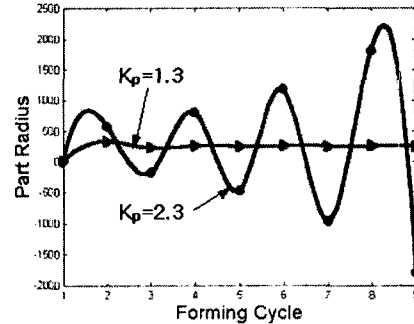


Fig. 3(b) Unstable response of the system

알 수 있으며 Fig. 3(b)를 통해 그 이상이 될 때 즉,  $K_p < 2$  범위에서는 발산한다는 것을 알 수 있다. 이것은  $K_p$ 가 2보다 커지게 될 경우 성형이 반복 될수록 성형오차는 점점 더 커지게 되고, 이때의 성형시스템은 불안정하다는 것을 의미한다.

성형시스템에서 측정잡음 또한 고려대상이 아닐 수 없다. 매 성형마다 성형된 판재를 측정하게 되는데, 이때 측정잡음으로 인해 성형된 판재의 형상이 다소 왜곡될 수 있기 때문이다. 이 경우에 대해서도 역시 안정성은 보장되어야 하므로 모델에 측정잡음을 추가하여 안정성 여부를 확인하였다. Fig. 4는 측정잡음이 추가된 경우와 그렇지 않은 경우의 비교로서, 측정잡음이 추가될 경우 성형과정은 늘어나지만 그래도 시스템이 안정하다는 것을 알 수 있다.

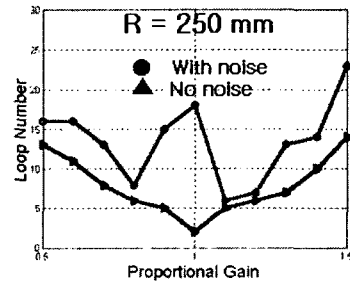


Fig. 4 Stability for system with and without noise

### 3. 판재성형 실험

본 논문에서는 성형율의 용이한 비교를 위해 개루프 실험만을 실시하였고, 페루프 실험에 관한 결과는 실험이 끝나지 않아 차후에 개재할 예정이다.

### 3.1 Concave형 판재성형

Fig. 6은 Al 1100 판재의 concave형 성형에 따른 성형율이고, Fig. 6(a)는 두께 1mm, Fig. 6(b)는 두께 2mm에 대한 결과이다. 성형하고자 하는 판재의 모양은 실험치와 이론치를 용이하게 비교하기 위해 반경이 250mm인 2차원 원의 일부로 정하였다. Fig. 6에서 가로축은 성형 깊이로서, 가장 중심에 있는 축의 깊이를 기준으로 정해진다. 또 세로축은 성형된 판재의 반경으로서, 이를 통해 spring back으로 인한 성형율을 알 수 있다.

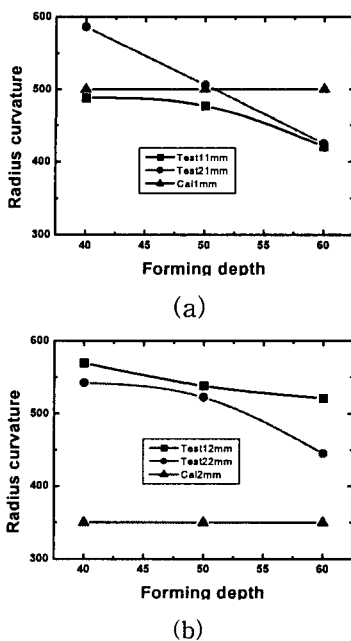


Fig. 6 Spring back, Al-1100,  
(a) 1t, (b)2t

### 3.2 반복성형

판재를 처음에는 목표보다 더 굽혔다가 다시 역방향으로 약간 변형시켜 펴는 것을 반복하여 점차 목표반경에 가까워지도록 성형하게 되면 spring back이 줄어들게 된다. 이와 같은 방법을 본 성형장치에 적용한 결과 성형율이 75%에 이르는 결과가 나왔다. 이는 한 번의 성형으로 얻어지는 성형율 50%에 비하면 높은 성형율이라 할 수 있을 것이다. 그러나 elastomer가 판재에 가하는 반력이 판재 전역에 고루 분포되지 않아 성형 깊이변화에 따른 성형율이 일관되지 않은 결과를 보였고, 성형 모양에 따라 elastomer의 배열구조 또한 변하므로 이에 관한 연구도 지속되어야 할 것이다.

## 4. 결론

Elastomer와 유압 붐을 금형 대용으로 사용한 본 성형 시스템은 주파수 영역에서의 해석을 이용하여 페루프 정밀 판재 성형이 가능하고, 성형된 판재의 기계적 결합이 작다. 실험을 통해 개루프 판재 성형의 성형율을 알아보았으며, 반복성형에 의해 50% 성형율 개선이라는 결과를 얻게 되었다.

## 참고 문헌

- (1) Li, M., Liu, Y. Su, S., Li, G., 1999, "Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 87, pp.277~280.
- (2) Park, J.W., Hong, Y.S. and Yang, S.H., 2002, "Multi-Point Dieless Sheet Forming Technology Combined with Fluid-Forming", 한국소성가공학회 2002년도 춘계학술대회
- (3) Ousterhout, K. B., "Design and Control of a Flexible Process for Three Dimensional Sheet Metal Forming", Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1991
- (4) Webb, R. D., "Spatial Frequency Based Closed-Loop Control in Sheet Metal Forming", Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1987
- (5) Cai, Z., Li, M., 2001, "Optimum path forming technique for sheet metal and its realization in multi-point forming", J. Mat. Proc. Tech. Vol. 110, pp.136~141
- (6) Valjavec, M., "A Closed-loop Shape Control Methodology for Flexible Stretch Forming Over a Reconfigurable Tool", Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1999
- (7) McClelan, J.H., Burrus C.S., Oppenheim A.V., Parks R.W., Schafer R.W., Schuessler H.W., "Computer-based Exercises for Signal Processing Using Matlab", Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey, 1994, pp.178~203.