

수치해석을 이용한 열간 가변금형 성형특성 평가

이인규^{1,2} · 이성윤¹ · 정명식¹ · *김병민² · 이상곤[#]

Numerical Study on Forming Characteristics of Hot Multi-Point Forming Die

I. K. Lee, S. Y. Lee, M. S. Jeong, B. M. Kim, S. K. Lee

(Received April 17, 2018 / Revised July 10, 2018 / Accepted July 12, 2018)

Abstract

A multi-point forming die (MPFD), which has been used for producing curved plates, is capable of forming various curved plates with just one MPFD. However, in real industries, an MPFD is difficult to be adopted since the structural properties, punch strength, elastic recovery correction and dimensional accuracy become problems. In order to overcome these problems, the hot multi-point forming die (HMPFD) was proposed in this study. This HMPFD commonly provide more less spring-back and forming load than conventional MPFD. Nevertheless, this process is very difficult to form the curved plate, because the final curved shape of the plate depends on many process variables such as the punch/nozzle arrangement (height and distance), the radius of punch, contact conditions between plate and punch. In this study, the forming characteristics of HMPFD and conventional MPFD are compared with each other through the finite element analysis.

Key Words : Hot multi-point forming die, Finite element analysis, Cooling device, Al thick plate

1. 서 론

최근 자동차, 항공, 조선, 건축 등의 프레스 성형 기술을 이용하는 부품 제조산업 구조는 맞춤형 생산을 위한 다품종 소량 및 대량생산 체제로 점차 변화하고 있는 추세이다. 일반적으로 프레스 성형에 적용되는 단일금형은 하나의 제품 제조에만 적용이 가능하다. 또한 제작비용이 높으며, 제작 이후 형상 수정이 제한적이기 때문에 재활용이 어렵다. 이러한 이유로 단일금형을 적용한 프레스 성형기술은 다품종 소량 및 대량생산에서 경쟁력을 확보하기 어렵다. 가변금형(multi-point forming die, MPFD)은 이러한

문제점을 해결할 수 있는 성형기술으로써 현재까지 다양한 연구가 진행되고 있다[1~5]. 가변금형은 다수의 사각기둥 펀치들이 배열되어 성형면을 구성하고 있으며, 각 펀치들의 높이제어를 통해 성형면의 형상변환이 가능하다[6]. 따라서 가변금형은 다품종 소량 및 대량생산이 요구되는 부품 제조산업에 효과적으로 적용 가능한 성형기술이다. 하지만 가변금형은 구조적 특성에 따른 문제점이 존재하여 산업현장 적용에 일부 어려움이 있다.

가변금형을 구성하는 각 펀치는 독립적인 사각기둥이며, 반구형 형상의 펀치선단에서 소재와 점접촉이 발생된다. 따라서 가변금형의 성형면은 불연속적

1. 한국생산기술연구원 극한가공기술그룹

2. 부산대학교 기계공학부

Corresponding Author : Korea Institute of Industrial Technology,
E-mail : sklee@kitech.re.kr

* B.M.Kim is the co-corresponding author of this study.

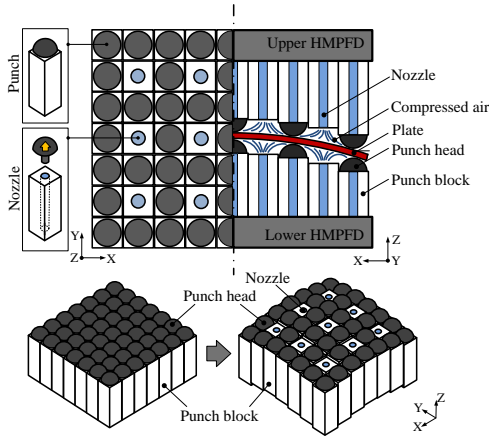


Fig. 1 Structure of the proposed HMPFD

인 점들에 의해 생성된다. 이러한 성형면은 펀치의 크기에 의해 형상정밀도가 결정되며, 제품의 치수정밀도에 영향을 미친다. 성형면의 형상정밀도는 펀치의 크기가 감소할수록 향상된다. 하지만 구조적으로 펀치강도는 약해진다.

가변금형을 이용한 프레스 성형에서는 탄성회복에 의한 치수오차를 보정하기 위해 펀치 높이를 제어하여 성형면 형상을 조정한다[7~9]. 하지만 펀치의 최대 높이가 존재하기 때문에 탄성회복이 증가할수록 치수오차 보정에 한계가 발생하게 된다. 펀치의 세장비가 증가할수록 펀치의 최대 높이는 증가하지만 구조적으로 강도는 취약해진다. 이러한 가변금형의 구조적 특성에 따른 문제점을 해결하기 위해 Tan, Liu 등은 가변금형의 성형면과 소재 사이에 탄성체 패드를 삽입하는 연구를 수행하였다[10~13]. 하지만 탄성체 패드를 적용한 가변성형기술은 탄성체 패드의 경도, 두께 및 가변금형의 성형면 형상과 위치에 따라 탄성체 패드의 압입 깊이가 달라지기 때문에 이를 고려한 성형면 형상 제어가 어렵다. 또한 탄성체 패드는 높은 하중이 발생하는 성형공정에서 소재를 변형시킬 수준의 강도를 갖기 어렵기 때문에 다품종 생산현장에 적용하기 어렵다. 가변금형의 구조적 특성에 따른 문제점을 해결하기 위해서는 치수정밀도를 확보함과 동시에 성형하중 및 탄성회복을 감소시킬 수 있는 가변금형기술이 요구된다.

본 연구는 열간 가변금형 성형기술개발의 기초연구로써 가변금형의 구조적 특성에 의해 발생하는 치수정밀도, 펀치강도, 탄성회복 보정 문제를 보완하기 위해 냉각장치가 결합된 열간 가변금형(hot multi-point forming die, HMPFD)을 제안하였다. 제안된

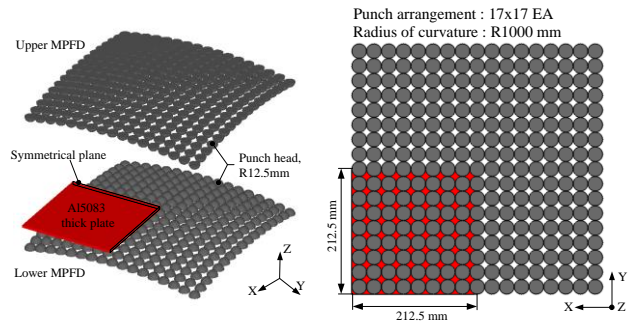


Fig. 2 FEA model of hot and conventional MPFD

Table 1 FEA conditions of hot and conventional MPFD

Conditions		Value
Material of Al plate		AI5083
Upper MPFD speed (mm/s)		30
Initial temp. of plate (°C)	HMPFD	430
	Conventional MPFD	20
Friction factor	HMPFD	0.6
	Conventional MPFD	0.4
Interface heat transfer coefficient (W/m ² °C)		4000
Convective heat transfer coefficient (W/m ² °C)		20

금형시스템에 대하여 유한요소해석을 이용하여 기존 가변금형(conventional MPFD)과 HMPFD의 성형특성을 비교 평가 하였으며, HMPFD의 펀치 및 노즐 배열조건에 따른 성형특성을 평가하였다. 마지막으로 유한요소해석 결과를 바탕으로 HMPFD의 타당성을 검토하였다.

2. 열간 가변금형 구조

Fig. 1은 열간 가변금형의 구조를 나타낸 것이다. 열간 가변금형은 기존 가변금형과는 달리 각 펀치 블록(punch block) 내에 가열된 소재를 냉각시키기 위한 노즐(nozzle)이 설치되어 있다. 노즐은 높이 방향으로 위치조절이 가능하며 상단에 반구 형상의 펀치 헤드(punch head)를 결합하여 성형면을 생성할 수 있다. 또한 소재와의 간격 조절이 가능하며 소재에 직접적으로 냉각을 수행할 수 있기 때문에 다양한 제품 형상에도 효율적인 냉각이 가능하다. 하지만 펀치 헤드가 결합될 경우 냉각 기능이 상실되기 때문에 형상오차, 압흔, 냉각효율을 충분히 고려하여 펀치와 노즐을 배열하여야 한다.

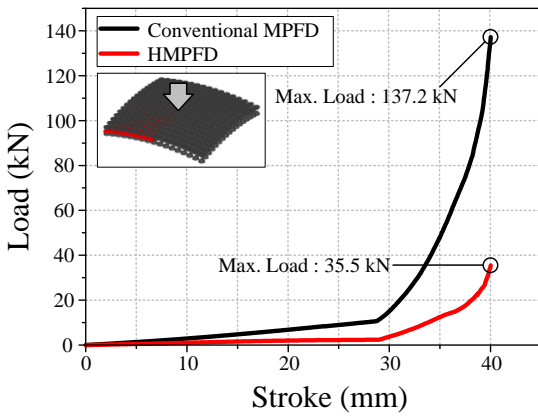


Fig. 3 Forming load of hot and conventional MPFD

3. 소재의 온도조건에 따른 성형특성

3.1 유한요소해석 모델 및 조건

본 연구에서 제시한 열간 가변금형과 기존 가변금형의 성형특성을 비교 평가하기 위해 소재의 온도 조건에 따른 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 상용해석 소프트웨어인 DEFORM-3D를 이용하여 성형(forming), 냉각(cooling), 스프링백(spring-back) 해석 순으로 수행되었다. 기존 가변금형 해석은 냉간 성형공정으로 상기의 절차에서 냉각해석을 제외하였다.

Fig. 2와 Table 1은 유한요소해석에 적용된 해석 모델 및 조건을 나타낸 것이다. 가변금형의 해석모델은 대칭성을 가지는 R1000 mm의 구면형상을 취하였다. 반구형 펀치 헤드 반경은 12.5 mm이며, 상형과 하형에 각 17×17 EA로 배열하였다. 각 펀치의 높이는 소재와 접촉축이 발생될 수 있도록 기하학적으로 산출하여 결정하였다[13].

해석에 적용된 소재는 비교적 높은 하중과 탄성회복이 발생하는 Al5083 후판이며, 크기는 가변금형의 외각크기와 동일한 425 mm×425 mm×6 mm로 설정하였다. 또한 대칭성을 고려하여 1/4단면을 취하였다. 유한요소해석을 위한 Al5083의 유동응력곡선과 탄성계수, 열팽창계수, 그리고 열전도도는 기존 연구결과를 참고하였다[14]. 소재가 후판이고, 구면 성형에 따른 변형량이 적기 때문에 이방성 영향은 고려하지 않았다[15].

열간 가변금형의 노즐은 기존 가변금형과 성형면 조건을 동일하게 설정하기 위해 제외하였다. 따라서, 열간 가변금형의 냉각해석은 자연대류에 의한 조건으로 대류열전달계수 (convective heat transfer coeff-

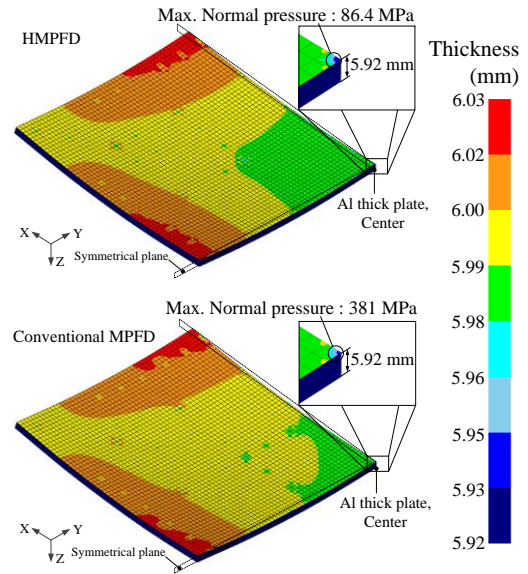


Fig. 4 Thickness distributions of Al thick plate

icient) 20 W/m²°C를 경계조건으로 적용하였다[16].

냉각해석은 열변형을 방지하기 위해 성형공정 이후 가변금형이 Al후판을 구속하고 있는 상태에서 소재 온도가 30 °C로 냉각될 때까지 수행되었다.

3.2 유한요소해석 결과

Fig. 3은 성형해석 결과로 성형하중을 나타낸 것이다. HMPFD의 성형하중은 기존 MPFD보다 약 74% 낮은 결과를 나타내었다. 또한, HMPFD 적용 시 발생하는 최대 접촉압력은 중심부에서 86.4 MPa로, 기존 MPFD의 최대 접촉압력 381 MPa에 비해 상당히 낮은 값을 나타내었다. 일반적으로 접촉압력은 성형하중에 비례하여 증가하게 되며, 접촉압력이 증가함에 따라 소재에 발생하는 압흔은 증가한다. 하지만 Fig. 4에 나타낸 최대 접촉압력 발생시의 Al후판 두께는 5.92 mm로 0.08 mm의 압흔이 발생하며 서로 동일한 결과를 보였다. 이는 HMPFD 적용 시 Al후판의 온도가 높아져 유동응력 및 탄성계수가 상대적으로 낮아지기 때문이다. 압흔 현상을 방지할 수 있는 탄성체 패드 삽입은 HMPFD에 적용하기 어렵기 때문에 소재와 펀치간의 접촉압력을 감소시킬 수 있는 펀치의 형상설계기술이 요구되며, 향후 연구에서 논의될 것이다.

Fig. 5는 성형해석의 Al후판 형상오차를 나타낸 것이다. 가변금형에서는 Fig. 5의 ㉠와 같이 펀치와 소재의 접촉 유무에 따라 성형구간(forming area)과

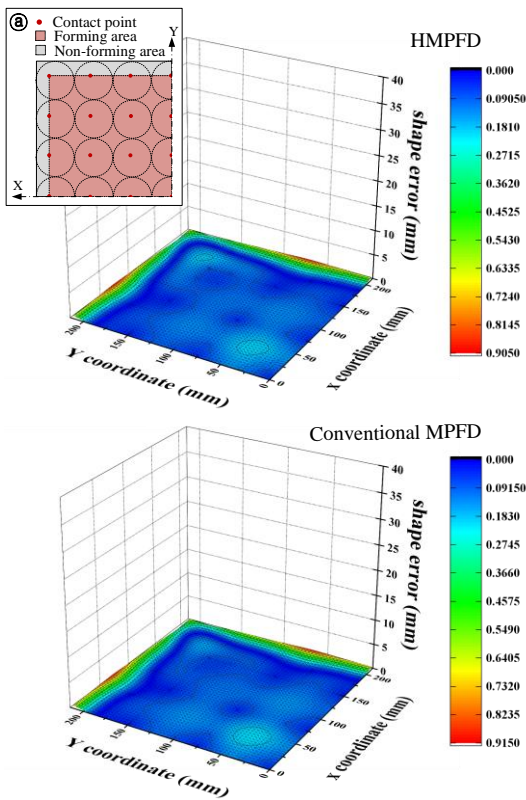


Fig. 5 Shape error distributions of Al thick plate after forming analysis

미성형구간(non-forming area)이 존재한다. 열간 및 기존 가변금형의 Al후판 형상오차는 성형구간에서 최대 0.2 mm, 미성형구간에서 최대 0.9 mm였으며, 전반적으로 서로 유사한 값을 나타내었다. 따라서 Al 후판의 온도조건은 성형단계에서 형상오차에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Al후판 형상오차는 상대적으로 미성형구간에 집중되었다. 가변금형에서 소재의 크기는 미성형구간이 최소화 될 수 있도록 소재와 펀치의 접촉을 고려하여 설계되어야 한다.

Fig. 6은 스프링백해석 결과로, Al후판 형상오차를 나타낸 것이다. 기존 가변금형은 열간 가변금형보다 약 7.7배 높은 탄성회복을 나타내었다. 기존 가변금형은 탄성회복을 보정하기 위해 펀치 높이를 열간 가변금형보다 약 7.7배 높게 설정하여야 하기 때문에 상대적으로 금형강도 설계에 불리하다.

결과적으로 열간 가변금형은 Al후판 형상오차에 영향을 미치지 않으며, 성형하중과 탄성회복을 감소시켰다. 따라서 HMPFD의 펀치는 기존 MPFD보다

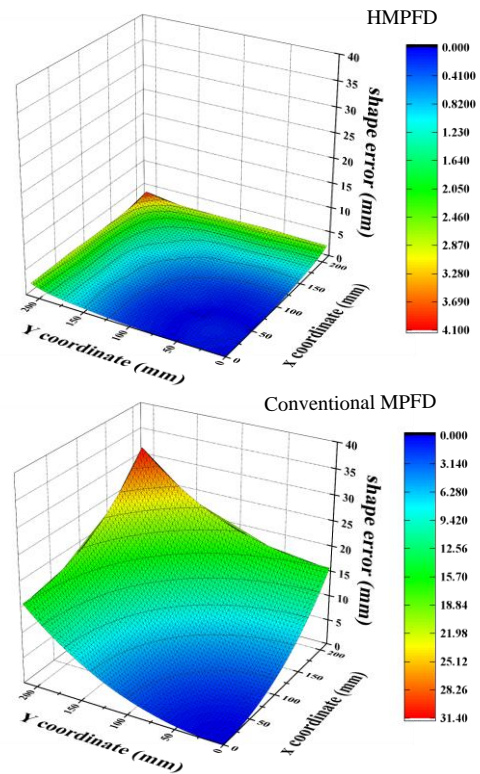


Fig. 6 Shape error distributions of Al thick plate after spring-back analysis

강도확보가 유리하기 때문에 펀치 사이즈를 축소하여 상대적으로 조밀하게 배열할 수 있다. 이를 통해 HMPFD의 성형단계에서의 형상오차는 더욱 감소하게 될 것으로 기대된다. 하지만 자연냉각에 의한 Al 후판의 냉각시간은 Fig. 12와 같이 976 sec로 나타났으며, 생산성에 병목점으로 작용한다. 따라서 펀치와 노즐의 효율적인 배열을 통해 형상오차, 압흔, 냉각시간을 감소시켜야 한다.

4. 펀치/노즐 배열조건에 따른 성형특성

4.1 유한요소해석 모델 및 조건

펀치와 노즐 배열조건에 따른 HMPFD의 성형특성을 평가하기 위해 Fig. 7의 모델을 유한요소해석에 적용하였다. HMPFD의 펀치는 Al후판 형상오차를 감소시키기 위해 중심부와 외각부에 전체적으로 배열하였으며, 노즐은 펀치를 기준으로 격자형식으로 배열하였다. 각 노즐의 배열조건은 (a) 1×1 EA, (b) 3×3 EA, (c) 7×7 EA이다. 해석 모델에서 노즐은 제외

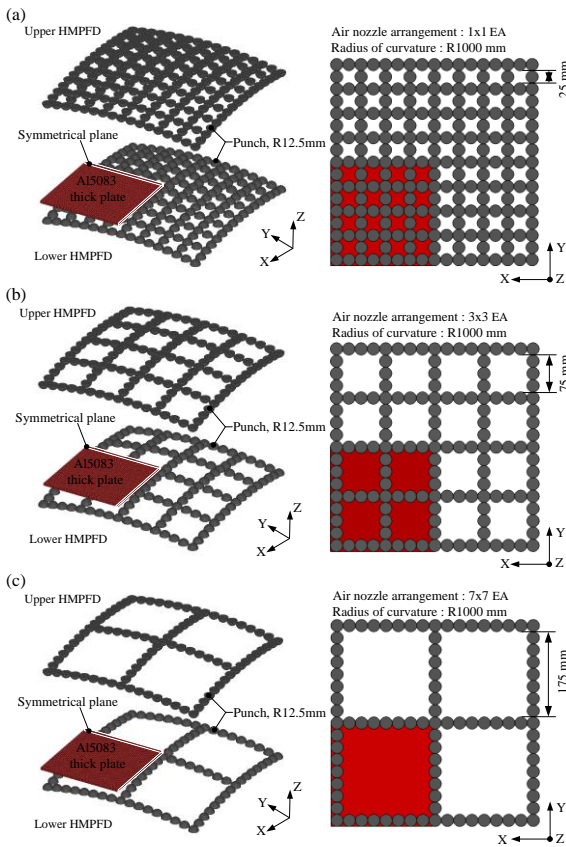


Fig. 7 FE-analysis model of HMPFD according to punch and nozzle arrangement conditions

하였다. 하지만 유속 50 m/s의 압축공기에 의한 냉각 효과를 고려하기 위해 대류열전달계수 $75 \text{ W/m}^2\text{C}$ 를 노즐의 위치에 경계조건으로 설정하였다[16]. 그 외의 해석조건은 Table 1과 동일하게 설정하였다.

4.2 유한요소해석 결과

펀치와 노즐 배열조건에 따른 성형하중은 Fig. 8과 같이 펀치 개수에 비례하여 증가하였다. 이는 펀치 개수가 증가함에 따라 Al후판의 변형량이 증가하기 때문이다.

Fig. 9는 펀치와 노즐 배열조건에 따른 Al후판의 두께 분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 성형하중이 감소할수록 접촉압력은 감소하기 때문에 압흔은 감소한다[17]. 하지만 해석결과에서 성형하중이 감소할수록 접촉압력 및 압흔은 증가하는 결과를 나타내었다. 성형하중이 가장 낮은 (c)조건에서 Al후판 접촉압력 및 두께는 104 MPa과 5.87 mm로 가장 높은 값을 나타내었다. 이는 펀치 개수가 감소할수록 성

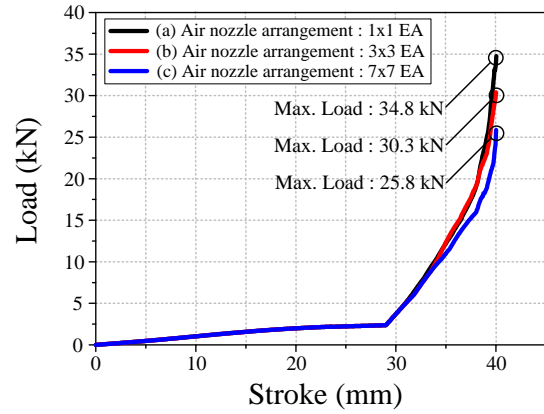


Fig. 8 Forming load of HMPFD according to punch and nozzle arrangement conditions

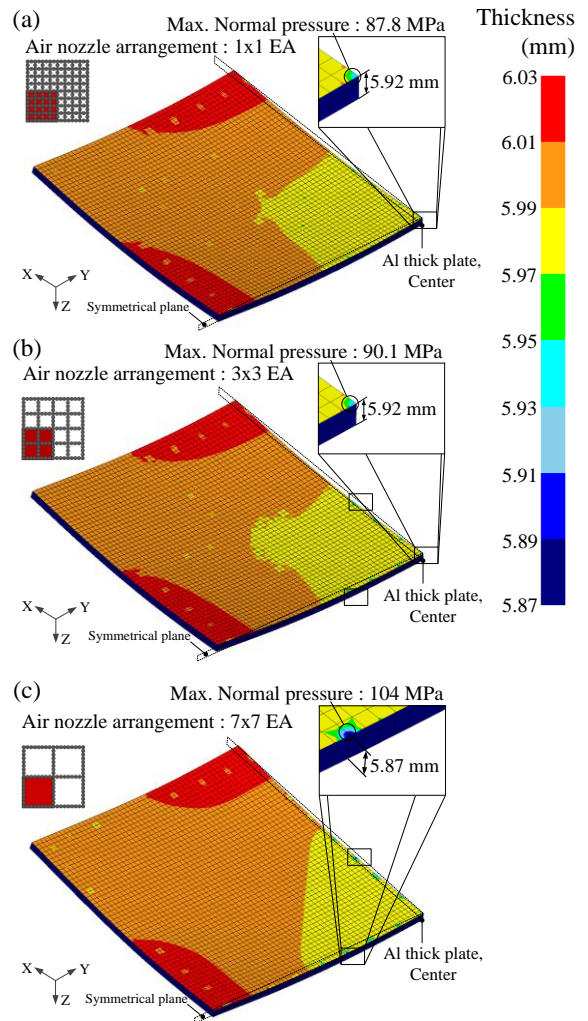


Fig. 9 Thickness distributions of Al thick plate according to punch and nozzle arrangement conditions

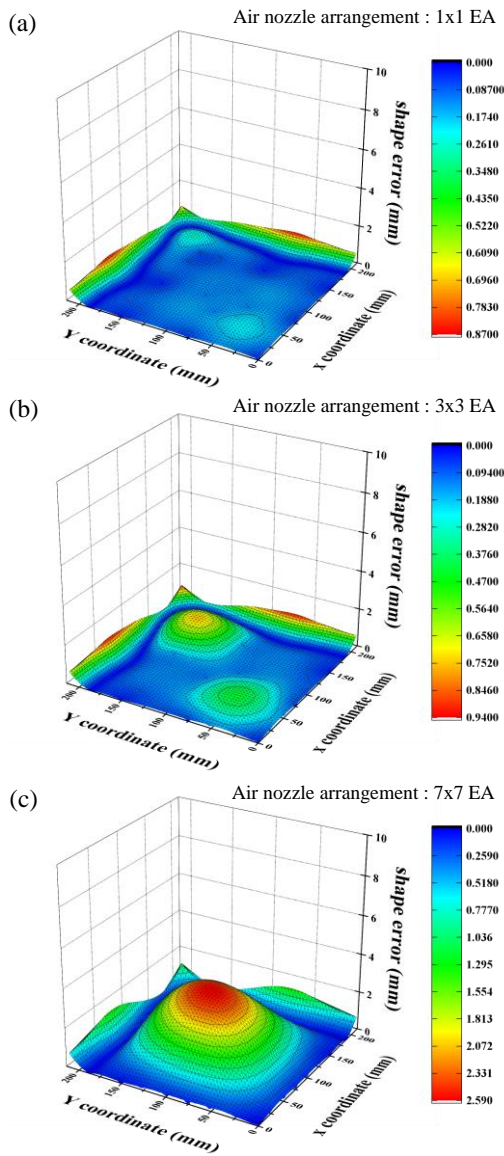


Fig. 10 Shape error distributions of Al thick plate according to punch and nozzle arrangement conditions after forming analysis

형하중을 분산시킬 수 있는 굽힘 작용점이 감소하여 Al후판에 발생하는 접촉압력이 증가하기 때문이다.

Fig. 10은 성형해석 결과로 Al후판 형상오차를 나타낸 것이다. Al후판의 미성형구간 형상오차는 서로 유사하게 나타났으며, 펀치와 노즐 배열조건에 큰 영향을 받지 않았다. Al후판의 성형구간 형상오차는 중심부와 모서리부를 잇는 대각선 위치에서 지배적으로 발생하였다. 펀치 개수가 감소할수록 형상오차는 증가하였으나 (a), (b)조건의 형상오차는 다소 유사한 결과를 나타내었다. 반면 대각선 위치에 펀

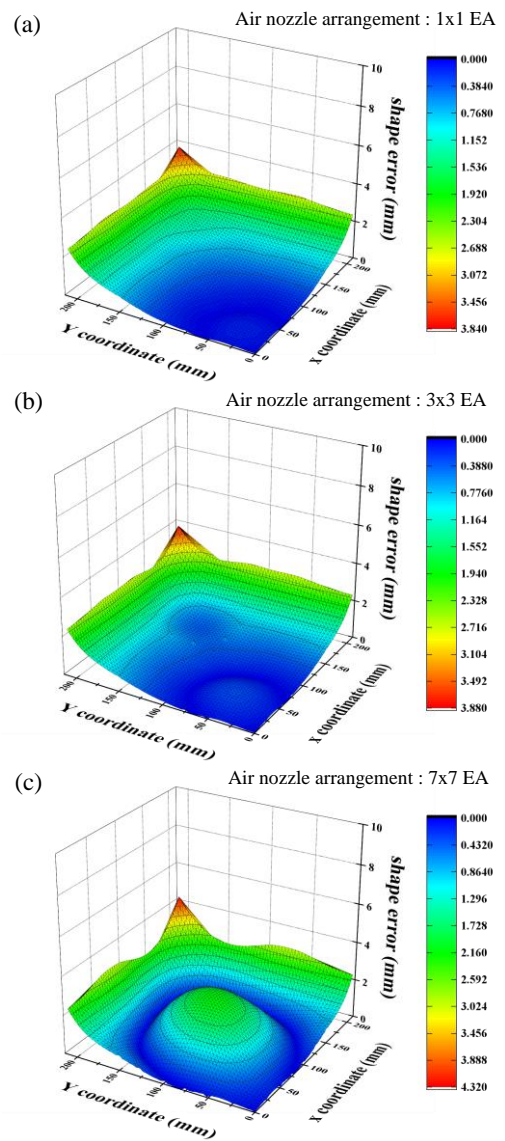


Fig. 11 Shape error distributions of Al thick plate according to punch and nozzle arrangement conditions after spring-back analysis

치 배열이 없는 (c)조건의 형상오차는 크게 증가하였다. Fig. 9와 Fig. 10의 결과를 통해 열간 가변금형의 구면성형에서는 (a), (b)조건과 같이 대각선 위치에 펀치를 우선적으로 배열하여야 함을 알 수 있다.

Fig. 11은 스프링백 해석결과로 Al 후판 형상오차를 나타낸 것이다. Al후판의 탄성회복에 따른 형상오차는 미성형구간에서 집중적으로 증가하였으며, (a), (b), (c)조건 모두 유사한 값을 나타냈다. 성형구간 형상오차는 Fig. 10의 결과와 유사한 값을 나타냈다. 따라서 펀치와 냉각 배열조건은 탄성회복에

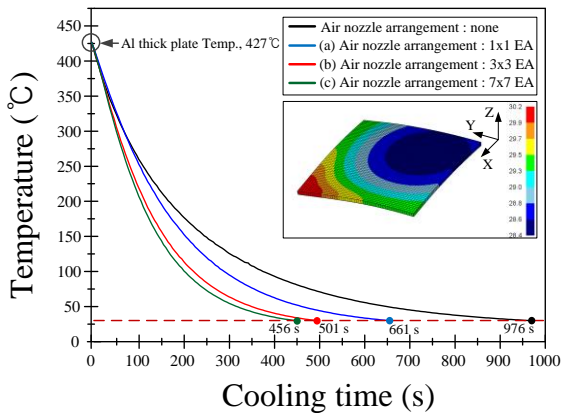


Fig. 12 Temperature distributions of Al thick plate

따른 형상오차에 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Al 후판이 30°C 까지 냉각되는 시간은 Fig. 12 와 같이 노즐이 가장 많이 배열된 (c)조건이 가장 짧았으며, (b)조건과 약 45 sec 차이가 발생하였다. 반면 (a)조건은 (c)조건과 약 205 sec의 차이를 보이며 상대적으로 냉각시간이 길어졌다.

결과적으로 HMPFD에서 펀치와 노즐의 배열을 통해 AI후판의 형상오차, 압흔, 냉각시간을 효율적으로 감소시키기 위해서는 형상오차 및 압흔에 가장 큰 영향을 미치는 대각선 위치에 펀치를 우선적으로 배열하여야 한다. 이후 상대적으로 영향이 적은 대각선외의 위치에 펀치를 최소한으로 배열하여 노즐의 개수를 최대한 증가시켜야 한다.

5. 결론

본 연구는 HMPFD 성형기술개발의 기초연구로써 기존 MPFD의 구조적 특성에 의해 발생하는 치수정밀도, 금형강도, 탄성회복 보정 한계의 문제점을 보완하기 위해 HMPFD를 제시하였다. 또한 유한요소 해석을 이용하여 기존 MPFD과 HMPFD의 성형특성을 비교 평가하며, HMPFD의 펀치와 노즐 배열조건에 따른 성형특성을 평가하였다. 마지막으로 유한요소 해석의 결과를 바탕으로 HMPFD의 타당성을 검토하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) HMPFD은 기존 MPFD과 유사한 형상오차 및 압흔 양상을 나타내었다. 또한 성형하중과 탄성회복은 상대적으로 감소하였으며, 펀치강도 확보 및 치수오차 보정에 유리함을 알 수 있었다. 따라서 HMPFD

은 기존 MPFD의 구조적 특성에 의한 결함을 보완할 수 있기 때문에 가변성형에 적합하다고 판단된다.

(2) HMPFD에서 펀치 개수가 증가할수록 AI후판의 성형하중, 냉각시간은 증가하지만 압흔, 형상오차는 감소한다.

(3) HMPFD에서 펀치와 노즐의 배열을 통해 AI후판의 형상오차, 압흔, 냉각시간을 효율적으로 감소시키기 위해서는 형상오차 및 압흔에 가장 큰 영향을 미치는 대각선 위치에 펀치를 우선적으로 배열하여야 한다. 이후 상대적으로 영향이 적은 대각선외의 위치에 펀치를 최소한으로 배열하여 노즐의 개수를 최대한 증가시켜야 한다.

REFERENCES

- [1] D. F. Walczyk, D. E. Hardt, 1998, Design and Analysis of Reconfigurable Discrete Dies for Sheet Metal Forming, *J. Manuf. Syst.*, Vol. 17, No. 6, pp. 436~454.
- [2] H. A. Ameen, H. A. Alsabti, 2016, Finite Element Analysis of the Dish Multi-Point Forming Process, *Int. J. Eng. Res. Technol.*, Vol. 5, Issue. 07, pp. 286~295.
- [3] Z. R. Wang, S. J. Yuan, 2006, New forming technologies used in manufacturing large vessels, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, pp. 1180~1187.
- [4] M. Li, Y. Liu, S. Su, G. Li, 1999, Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 87, pp. 277~288.
- [5] S. C. Heo, T. W. Ku, W. J. Song, J. Kim, B. S. Kang, 2010, Study of Flexible Forming Process Involving the Use of Sectional Flexible Die for Sheet Material, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 34, No. 3, pp. 299~305.
- [6] Y. H. Seo, S. C. Heo, T. W. Ku, J. Kim, B. S. Kang, 2011, Design of Flexible Die Punch and Control System for Three-dimensional Curved forming Surface, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 3, pp. 206~213.
- [7] J. S. Yoon, J. H. Lee, C. H. Ryu, S. H. Hwang, H. B. Lee, 2008, Application of IDA Method for Hull Plate Forming by Multi-Point Press Forming, *Kor. Soc. Ocean Eng.*, Vol. 22, No. 6, pp. 75~82.
- [8] S. Y. Hwang, J. H. Lee, Y. S. Yang, M. J. Yoo, 2010, Springback adjustment for multi-point forming of thick plates in shipbuilding, *Comput. Aided Design*, Vol. 42,

- pp. 1001~1012.
- [9] Q. F. Zhang, Z. Y. Cai, Y. Z. Zhang, M. Z. Li, 2013, Springback compensation method for doubly curved plate in multi-point forming, *Mater. Des.*, Vol. 47, pp. 377~385.
- [10] Q. Zhang, Z. R. Wang, T. A. Dean, 2008, The mechanics of multi-point sandwich forming, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 48, pp. 1495~1503.
- [11] Q. Liu, C. Lu, W. Fu, K. Tieu, M. Li, X. Gong, 2012, Optimization of cushion conditions in micro multi-point sheet forming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 212, pp. 672~677.
- [12] F. X. Tan, M. Z. Li, Z. Y. Cai, 2007, Research on the process of multi-point forming for the customized titanium alloy cranial prosthesis, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 187, pp. 453~457.
- [13] S. C. Heo, Y. H. Seo, H. G. Noh, T. W. Ku, B. S. Kang, 2010, Numerical Study on Effect of Using Elastic Pads in Flexible Forming Process. *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 34, No. 5, pp. 549~556.
- [14] Y. V. R. K. Prasad, S. Sasidhara, 1997, *Hot Working Guide*, 1st ed., The materials Information Society, USA, pp. 101~103.
- [15] D. H. Ko, S. K. Lee, Y. N. Kwon, S. W. Kim, H. S. Lee, E. S. Park, B. M. Kim, D. C. Ko, 2011, Roll Die Forming Process for Manufacturing Clutch Hub in Automotive Transmission, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 2, 154~159.
- [16] J. M. Lee, I. K. Lee, D. S. Kim, I. K. kwon, S. B. Lee, B. M. Kim, 2012, FE-Analysis of Hot Forming of Al Large Thick Plate for Spherical LNG Tank Considering Cooling Performance of Grid-Typed Die, *Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 29, No. 11, pp. 1190~1198.
- [17] J. Lee, J. Pan, 2016, Closed-form analytical solutions for calculation of loads and contact pressure for roller and ball bearings, *Tribol. Int.*, Vol. 103, pp. 187~196.