ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 25(3), 79-82 (2015) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.3.079

Study on Design Parameters that Affect the Forming Force of the Magnetic Pulse Forming Device

Man Gi Lee, Hwa Cho Yi, and Jin Ho Kim*
School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsangbukdo 712-749, Korea

(Received 23 February 2015, Received in final form 16 April 2015, Accepted 16 May 2015)

The design parameter study about the magnetic pulse forming is performed using finite element analysis with MAXWELL. The first case of design parameters is about the initial charging voltage and the capacitance and the second case of design parameters are about the winding turns and the spacing of electromagnetic coil. The 3D finite element model of electromagnetic forming system is created and the magnetic force is calculated. The effects of design parameters on the magnetic forming force are investigated.
Keywords : Lorentz's force, high speed forming, forming force, magnetic pulse forming, design parameter

자기 펄스 성형장치의 성형력에 영향을 미치는 설계 파라미터에 관한 연구

이만기 · 이화조 · 김진호*
영남대학교 기계공학부, 경북 경산시 대동 214-1, 712-749

(2015년 2월 23일 받음, 2015년 4월 16일 최종수정본 받음, 2015년 5월 16일 게재확정)

자기 펄스 성형장치란, 고강도 자기장을 이용하는 소성가공법이다. 자기 펄스 설형장치는 기존의 프레스 공정에 비해 가공 후 성형품의 표면 품질이 좋고 공정이 단순하며 가공속도가 높아 가공시간이 매우 짧은 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 자기 펄스 성형장치의 각각 변수들이 성형력에 미치는 영향력을 분석하기 위해 파라미터 연구를 수행하였다. 자기 펄스 성형장치의 각각 변수들은 인가전압, 캐패시터 용량, 코일의 턴 수로 나누어 지며, 각각의 변수들이 성형압력에 미치는 영향력을 분석하는데 상용전자기 해석 프로그램인 MAXWELL을 이용하였다.
주제어 : 로렌츠 힘, 고속가공, 성형력, 자기 펄스 성형, 설계변수

I. 서 론

자기 펄스 성형(Magnetic pulse Forming)은 전자기 성형기술로서 고 에너지 고속가공 중 하나이며 15~300 m/s의 속도로 가공한다. 전자기 성형은 다양한 산업분야에서 성형공정과 접합공정에 이용되고 있다. 고강도의 자기장을 이용하여 고속으로 성형가공을 하는 가공 방법이다. 자계에 작용하는 에너지를 금속 성형가공에 사용한다. 고 에너지 고속가공은 고 에너지 방전, 압축공기 등의 고 에너지를 이용한 고속 금속가공법으로 소형 기계로도 큰 성형력을 얻을 수 있고, 고속으로 변형하면 저속가공으로는 할 수 없는 형상의 제품가공이 가능하며, 생산능률도 높아서 소성가공분야의 관심을 모으고 있는 개발 기술 가운데 하나이다[1].

기존의 프레스가공에 비해 스프링백과 알루미늄 합금 등 낮은 성형성 문제를 개선할 수 있는 방안으로 전자기 성형 기술이 야기되면서 이에 관한 연구가 활발히 진행 되고 있다.

전자기 성형기의 성형장치 부분의 구성은 성형력을 내는 코일, 재료의 형상을 정해주는 다이, 코일의 변형을 막고 코일을 고정시켜주는 코일 케이스로 구성되며, 전기 회로부분은 충전회로와 방전회로이며 구성은 커패시터, 충전스위치, 방전스위치, 코일로 구성 된다[2].

본 논문에서는 자기 펄스 성형 시스템의 핵심 설계 변수가 성형력에 어떤 영향을 미치는지 파악하고자 한다. 두 가지 경우의 파라미터 스터디가 수행되었다[3]. 첫 번째 케이스로 전기회로의 핵심 설계 변수인 전압 및 축전기의 크기 그리고 두 번째 케이스는 전자기 코일 형상을 설계변수로 설정하였다. 각 설계 변수들이 성형력에 어떤 영향을 미치는 지 분석

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-53-810-2441,
Fax: +82-53-810-4627, e-mail: jinho@ynu.ac.kr

하기 위해 전자기 유한요소 상용 소프트웨어인 ANSYS MAXWELL을 사용하여 각각의 유한요소모델을 생성하고 시뮬레이션을 수행하였고 해석결과를 바탕으로 각 설계변수에 따라 성형력에 미치는 경향성을 분석 하였으며, 인가전압 및 캐패시터는 성형압력의 최대 값을 결정하고 성형코일의 턴 수는 성형압력의 분포를 결정하는 것을 확인할 수 있었다.

II. 전자성형장치의 구조 및 원리

1. 전자성형장치의 구조

전자성형법의 구조는 크게 전기 회로부분과 성형장치 부분으로 이루어져 있다.

Fig. 1은 전기회로의 구조를 보여준다. 축전지는 필요한 용량에 따라 같은 크기의 축전지들을 병렬로 연결하여 사용하며, 방전스위치와 충전스위치는 제어회로에 속하고 제어회로를 이용해 한 번에 조작이 가능하도록 제작하여 안전사고를 방지하여야 한다.

Fig. 2는 성형장치의 구조를 보여준다. 성형력을 생성하는 코일과 성형이 되는 판재, 성형형상을 결정하는 다이로 이루어져 있으며, 배치 순서는 Fig. 2와 같이 코일과 다이 사이에 판재가 위치한다.

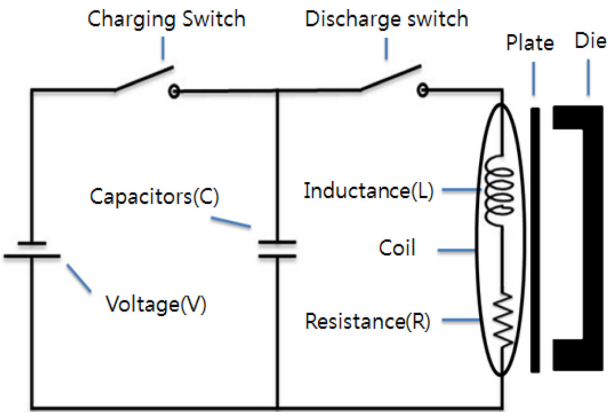

Fig. 1. (Color online) Structure of the electrical circuit.

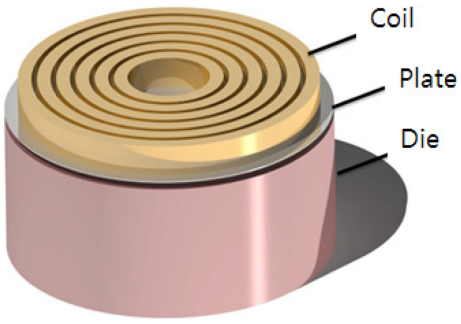

Fig. 2. (Color online) Structure of the forming device.

2. 전자기 성형법의 원리

(1) Lorentz's force

전류가 흐르는 도체 주위에 자기장이 생기고 자기장과 전류에 의해 Lorentz's force가 생겨나게 된다. Lorentz's force의 방정식은 식(1)과 같이 표현된다[4].

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{I} \times \boldsymbol{dl} \times \boldsymbol{B} \tag{1}$$

여기서, $\boldsymbol{I}$는 도체에 흐르는 전류, $\boldsymbol{dl}$은 도체의 길이 방향 벡터 $\boldsymbol{B}$는 자속의 밀도를 나타내는 벡터량이고 $\boldsymbol{F}$는 힘으로서 $\boldsymbol{dl}$과 $\boldsymbol{B}$가 작용하는 면의 수직 방향으로 작용한다. 전자기 성형에서는 식(1)의 $\boldsymbol{F}$가 성형력이 된다.

(2) Faraday's law

임의의 폐회로에서 발생하는 유도기전력의 크기는 폐회로를 통과하는 자기선속의 변화율과 같고 방향은 회로와 반대 방향이다.

식(2)와 같이 표현할 수 있다[5].

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt} \tag{2}$$

여기서, ε는 유도기전력, ϕ는 자속이고 t는 시간이다.

전자기 성형에서 코일에 갑자기 전류가 인가되어서 자속이 생기고 자속의 변화에 따라 주위의 알루미늄 판재에 기전력이 흐르게 되고 이 전류가 식(1)에서 전류 I이다.

(3) 전자기 성형력

전자기 성형은 자계에 의해서 발생하는 에너지를 이용하여 고속으로 성형을 하는 고 에너지 고속가공 기술이다. 금속 판재를 가공할 수 있는 충분한 성형력을 얻기 위해서 강력한 자계가 필요하며 순간적으로 코일에 전류가 방출되면서 Faraday's law에 의해서 판재에 유도기전력이 생성되고 코일의 주변에는 자기장이 형성된다. 코일 주변의 자기장과 판재

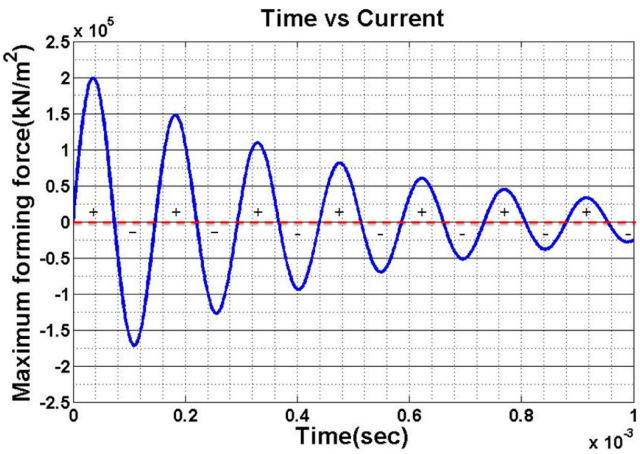

Fig. 3. (Color online) Current changes according to time.

의 유도전류에 의해서 Lorentz's force가 생성되며 여기서 생성된 Lorentz's force가 성형력이 된다.

여기서 코일에 교류 형태의 전류가 인가되면 유도전류가 발생하고 유도전류에 의해 발생되는 자기장의 방향은 외부자기장의 변화를 상쇄하는 방향으로 작용한다. 여기서 교류전류는 시간에 따라 주기적으로 크기와 방향이 변하는 전류를 말하며, RLC회로에서는 코일과 전체회로의 인덕턴스가 전류에 영향을 주고 시간이 지남에 따라 Fig. 3과 같이 감쇠하는 교류전류가 된다. 이 교류전류를 이용하여 알루미늄판재에 유도전류를 생성시키고 유도전류와 자기장에 의해서 로렌츠 포스가 코일에서 다이방향으로 작용하면 알루미늄판재가 고속으로 이동하여 다이의 형상과 같은 형상으로 소성변형이 된다.

III. 설계 파라미터에 따른 성형력 분석

1. 인가전압 및 캐패시터 용량

인가전압과 캐패시터의 용량이 성형력에 미치는 영향을 보기 위해서 다섯 가지의 CASE로 나눠서 시뮬레이션을 진행하였다.

커패시터에 저장되는 전기에너지는 식(3)과 같이 표현되며, 이 에너지가 전자기 코일에 입력된다. 캐패시터와 인가전압이 어떻게 성형력에 영향을 미치는 지 조사하기 위하여 캐패시터에 저장되는 에너지가 같은 조건으로 캐패시터와 인가전압을 Table I과 같이 다섯 가지 CASE를 고려하였다[6].

$$\frac{1}{2}CV^2 = E \tag{3}$$

Table I. Voltage, capacitor value of CASE.

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
C (uF)	500	367	281	222	180
V (kV)	15	17.5	20	22.5	25
E (kJ)			56.250		

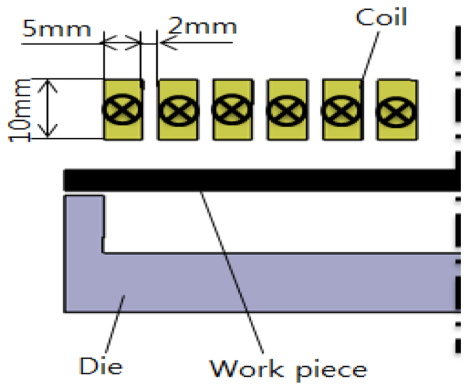

Fig. 4. (Color online) Cross-sectional view of the forming device.

Table II. Electromagnetic coil specifications.

Turns	Resistance (R)	Inductance (L)
6 turn	0.483 mΩ	2.449 uF

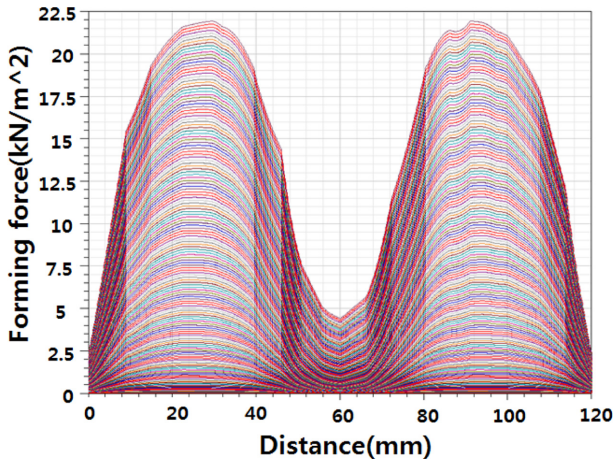

Fig. 5. (Color online) Forming force according to the graph position.

또한, 코일 형상은 Fig. 4와 같고 1점쇄선을 중심으로 원통형 모델이고, 코일의 턴수, 저항, 인덕턴스는 Table II와 같다.

ANSYS Maxwell을 사용하여 총 1 ms 동안 100 step의 조건으로 Transient 해석을 수행하였으며, Fig. 5는 CASE 3의 결과로 그래프의 60 mm 지점은 전자기 코일의 중앙이며, 본 해석결과로 성형력의 분포를 알 수 있다[7].

CASE에 따라 성형력의 분포는 차이가 없으며, 다만, Fig. 6에서 보여주듯이 인가전압이 증가할수록 최대 성형력도 증가함을 알 수 있다.

2. 코일의 형상

코일의 형상이 성형력에 미치는 영향을 경향성을 조사하기 위하여 Table III과 같이 코일의 형상에 따른 다섯 가지의 CASE로 나눠서 시뮬레이션을 진행하였고, 코일의 형상은

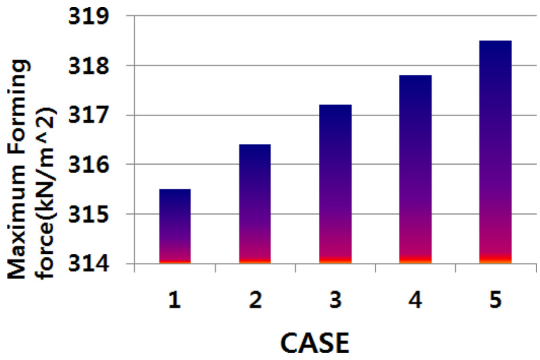

Fig. 6. (Color online) Maximum forming force each the applied voltage and the capacitor.

Table III. Coil form each CASE.

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
Number of turns	4	5	6	7	8
Coil length	0.921	1.138	1.357	1.574	1.795
Inductance	1.1	1.707	2.449	3.322	4.335
Coil spacing (S)	3.34	2.5	2	1.66	1.43
Coil size (W)	10	7.5	6	5	4.28
Coil area (A)	0.0075	0.006	0.005	0.00428	0.0375
Resistance	2.18E-04	3.37E-04	4.83E-04	6.54E-06	8.52E-04

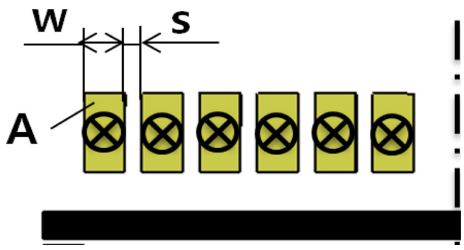

Fig. 7. (Color online) Coil form.

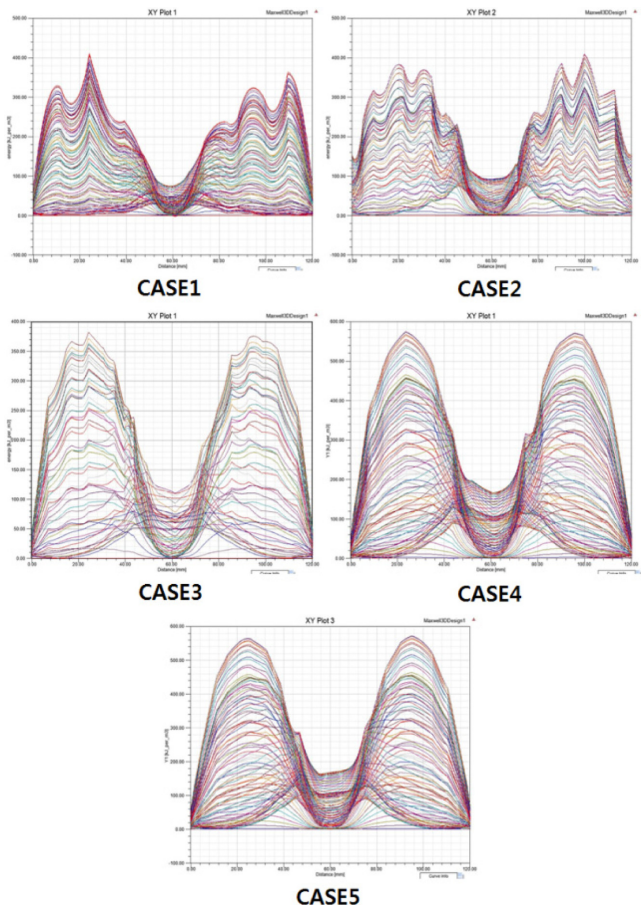

Fig. 8. (Color online) Forming force according to the graph position.

Fig. 7과 같은 형태이다.

281 uF의 캐패시터에 20 kV의 전압을 인가하여 다섯 가지 코일형상에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 8은 CASE별 성형력 분포도를 보여준다.

턴 수가 낮아질수록 성형력의 피크 값은 크고 성형력 분포는 일정하지 않으며, 반대로 턴 수가 높아질수록 성형력의 피크 값은 비교적 작고 성형력 분포가 비교적 일정하다.

IV. 시뮬레이션결과 및 고찰

본 논문에서는 자기 펄스 성형 시스템의 핵심 설계 변수가 성형력에 어떤 영향을 미치는지 파악하기 위하여 전자기 해석프로그램인 ANASYS MAXWELL을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 성형 코일에 인가되는 전압이 증가하면 성형력의 최대값이 증가함을 확인할 수 있고, 또한 코일 턴 수가 증가할수록 성형력의 최대값은 감소하나 성형력 분포는 고르게 분포된 것을 확인할 수 있었다. 향후 연구로는 최적화 연구를 진행하여 각각 변수들의 최적화 된 값을 찾고 전자기성형장비를 구축하여 실험도 해볼 계획이다.

References

[1] J. Kim, H. G. Noh, S. J. Ko, and T. J. Kim, Transactions of Materials Processing **21**, 7 (2012).
[2] D. Kim, J. H. Kim, and Y. S. Lee, Korea Manufacturing Systems Proceedings of Congress **13**, 1 (2011).
[3] K.-K. Han, Korea Manufacturing Systems Proceedings of Congress **94**, 7 (1997).
[4] J. S. Lee, Mechanical Science **28**, 476 (1988).
[5] H. G. Noh, H. G. Park, W. J. Song, B. S. Kang, and J. Kim, KSPE **30**, 733 (2013).
[6] H. M. Lee, Transactions of Materials Processing **19**, 6 (2010).
[7] L. Man, D. Pitica, and M. Zolog, Electrical/mechanical/thermal design integration, Design and Technology of Electronics Packages (SIITME) 15th International Symposium for IEEE (2009).