

유한요소해석 및 다구찌법을 이용한 접합실 내 접합압력 향상을 위한 포트홀 압출 금형 설계

이성윤^{1,2} · 이인규¹ · 정명식¹ · 고대철² · 이상곤[#]

Design of Porthole Extrusion Die for Improving the Welding Pressure in Welding Chamber by using the FE Analysis and Taguchi Method

S. Y. Lee, I. K. Lee, M. S. Jeong, D. C. Ko, S. K. Lee

(Received September 3, 2019 / Revised November 12, 2019 / Accepted November 18, 2019)

Abstract

The porthole extrusion process is a classic metal forming process to produce complex cross-section shaped aluminum profile. It is very difficult to design porthole die and extrusion process because of the complex shape of extrusion die and internal metal flow. The main variables in this process are ram speed, initial billet and tool temperature, and die shape. In general, the metal flow of porthole extrusion process can be divided into two steps. During the first step, the billet is divided into several parts in the porthole die bridge. During the second step, the divided billets are welded in the welding chamber. In the welding chamber, the level of welding pressure is very important for the quality of the final product. The purpose of this study is to increase the welding pressure in the welding chamber by using a two stage welding chamber. The porthole extrusion die was designed by using the Taguchi method with orthogonal array. The effectiveness of the optimized porthole die was verified by using the finite element analysis.

Key Words : Porthole Extrusion, Welding Pressure, Metal Flow, Die Design, FE Analysis, Taguchi Method

1. 서 론

포트홀 압출(porthole extrusion) 공정은 경량 소재인 알루미늄 합금을 이용하여 차량용 부품, 공압실린더, 열교환기 등과 같은 단면형상이 복잡하고 길이방향으로 긴 제품을 생산하는 대표적인 소성가공 공정이다[1~3]. 포트홀 압출은 열간 직접 압출 공정으로 연속압출이 가능하며 일반 압출 공정에 비해 생산성이 뛰어나다[4]. 하지만 일반 압출 금형에 비해 구조 및 내부 소재유동이 복잡하여 금형 및 공정설계에 어려움이 있다. Fig. 1 은 포트홀 압출 금형의 구조 및 내부 소재유동을 나타낸 것이다. 포트홀 압출

금형은 컨테이너(container), 포트홀(porthole), 그리고 접합실(welding chamber)로 복잡한 금형 구조를 가진다. 금형 내에서 초기 가열된 소재는 압출기의 램(ram)이 전진함에 따라 여러 개의 포트홀로 나누어진다. 포트홀에서 나누어진 소재는 접합실에서 다시 만나 고온·고압의 상태에서 접합이 이루어지며, 금형 출구부를 빠져나오며 최종형상으로 성형된다. 포트홀에서 나누어진 소재가 접합실에서 만나 접합이 이루어질 때 접합면(welding plan)이 형성된다. 접합면에서 충분한 접합압력(welding pressure)이 발생하지 않으면 접합 불량으로 인한 결함발생의 원인이 된다[5~6]. 따라서 접합실 내부의 접합압력은 최종 압출품의 품질에 영향을 미치며, 접합면의 접합압력이 높을수록 우수한 품질의 제품 생산이 가능하다.

1. 한국생산기술연구원 극한가공기술그룹
2. 부산대학교 대학원 융합학부 그린수송시스템설계전공
Corresponding Author : Extreme Fabrication Technology Group, Korea Institute of Industrial Technology, E-mail: sklee@kitech.re.kr, ORCID ID: 0000-0003-4901-8132

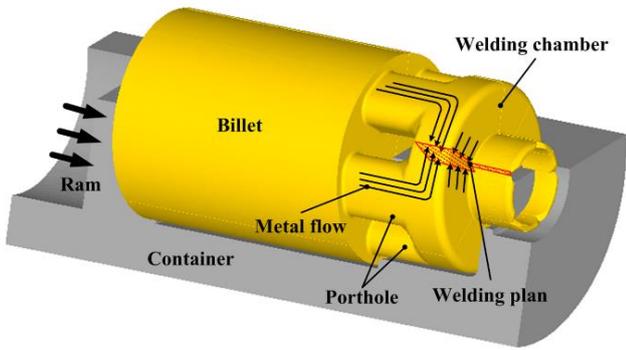


Fig. 1 Metal flow and welding plane in conventional porthole extrusion die

최근 Bai 등은 포트홀 압출 시 접합실 내부의 접합 거동에 대한 새로운 평가 방법을 제시 하였고 압출속도, 압출온도에 따른 접합품질에 관한 연구를 수행하였다[7]. Yu 등은 비대칭형 중공 프로파일의 접합품질 향상을 위해 미세조직 구조 및 기계적 특성에 대해 연구하였다[8]. 이와 같이 접합면에 관한 연구는 공정해석을 통한 접합면의 특성에 대한 평가 또는 미세조직 구조 및 기계적 물성에 대한 연구에 국한되어 있어 실질적으로 접합력 향상에 관한 연구가 부족한 실정이다. 이를 보완하기 위해 Lee 등은 포트홀 압출공정의 접합력 향상을 위한 새로운 형태의 금형인 2 단 접합 금형을 제시 하였고, 유한요소 해석을 이용하여 제시된 형상의 타당성을 검증하였다[9]. 그러나, 새로운 접합 금형인 2 단 접합 금형에 대한 타당성 검증에 대해 국한적으로 논의 되어 있어 효과적인 접합강도 향상을 위해 체계적인 접합 금형 설계가 필요하다.

본 연구에서는 접합 금형 내부의 접합강도 향상을 위해 직교배열표(orthogonal array)를 이용한 다구찌법(Taguchi method)과 유한요소해석을 통해 주요 설계변수인 2 단 접합실의 길이, 도입부 폭, 그리고 첫 번째 랜드부 폭을 고려한 최적 금형 설계를 수행하였다. 또한, 설계된 금형의 유효성 평가를 위해 금형강도해석 및 내부 접합압력을 평가하였다.

2. 유한요소해석

2.1 2단 접합 금형 구조 및 설계변수

Fig. 2는 일반적인 포트홀 압출 금형과 2단 접합 구조의 포트홀 압출 금형의 단면 형상 및 내부 속

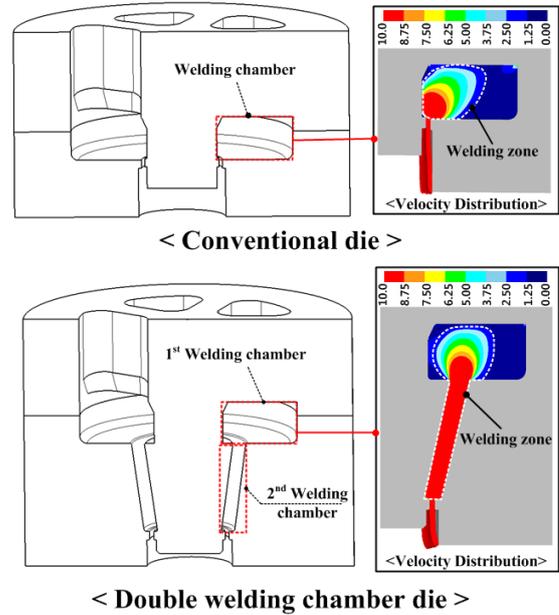


Fig. 2 Comparison of distribution of metal flow

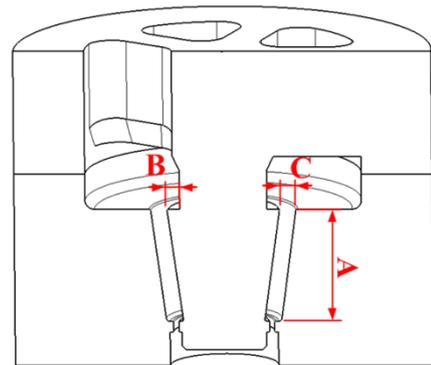


Fig. 3 Design variables of 2nd welding chamber

도분포를 나타낸 것이다. 기존 압출 금형의 접합영역은 접합실 내부의 다이 출구부 인근 영역에서부터 최종형상으로 성형하는 랜드부까지로 접합영역 [10]이 상대적으로 협소한 반면, 2 단 접합 금형의 경우 기존 금형과 동일한 접합실(1st welding chamber)에 추가로 2 단 접합실(2nd Welding chamber)이 있어 기존의 접합 금형에 비해 넓은 접합영역을 가진다. 또한 Fig. 2의 접합실 내부 소재 속도분포에서 보듯이 소재유동이 없는 데드 메탈 (dead metal)영역을 제외한 실제 접합이 발생하는 영역이 넓고 접합압력이 발생하는 시간이 상대적으로 긴 장점이 있다.

Fig. 3은 2 단 접합 금형의 설계변수를 나타낸 것이다. 설계변수는 2 단 접합 금형의 형상을 결정하

Table 1 Design variables of double welding chamber

Variables	Level 1	Level 2	Level 3
A (mm)	10	30	50
B (mm)	2	6	10
C (mm)	4	7	10

Table 2 Design of $L_9(3^3)$ orthogonal array

No.	A (mm)	B (mm)	C (mm)
1	10	2	4
2	10	6	7
3	10	10	10
4	30	2	7
5	30	6	10
6	30	10	4
7	50	2	10
8	50	6	4
9	50	10	7

Table 3 Conditions for FE-analysis

Condition	Value
Billet material	Al6063
Die material	STD 61
Initial billet temperature	480 °C
Initial die temperature	450 °C
Billet diameter	76.2
Friction factor(m)	0.6
Ram speed	1mm/s
Heat transfer coefficient between billet and die	11.0 N/s/mm/°C

는 2 단 접합실의 높이(A), 1st 랜드부 폭(B), 도입부 폭(C)으로 선정하였다. 선정된 설계변수는 현장에 적용되는 금형형상 및 압출기 사양 등을 고려하여 설정하였으며, 설계변수를 Table 1 에 나타내었다. 선정된 변수를 이용하여 다구찌법을 활용하기 위해 Table 1 의 설계변수로 직교배열표를 작성하였다. 작성된 직교배열표는 $L_9(3^3)$ 로 Table 2 에 나타내었으며, 작성된 직교배열표의 조합에 따라 2 단 접합 금형의 압출 성형해석을 수행하였다.

2.2 유한요소 해석 조건

본 연구에서는 접합면에 최대 접합압력이 발생하

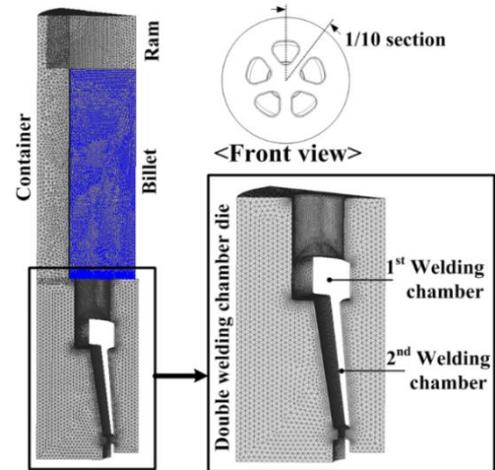


Fig. 4 FE-analysis model

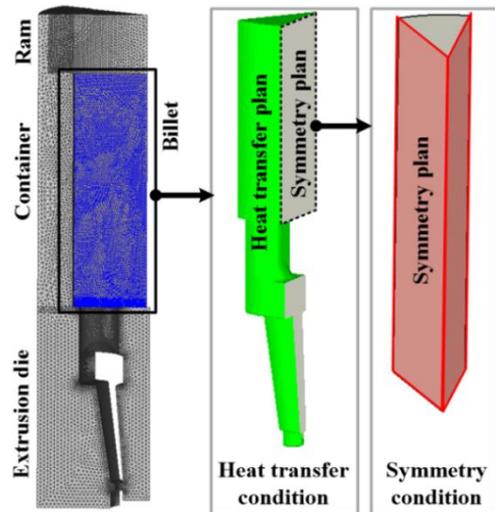


Fig. 5 Boundary condition of FE-analysis

는 2 단 접합 금형 설계를 위해 유한요소해석을 수행하였다. 설계에 적용된 제품은 외경 30.5mm 두께 2mm 의 원형 중공 실린더이다. 해석은 상용 S/W 인 DEFORM 3D 를 이용하여 수행하였다. 유한요소해석은 Fig. 4 에서 보듯이 대칭성을 고려한 1/10 형상으로 수행되었으며, 해석에 적용된 경계조건을 Fig. 5 에 나타내었다. 해석에 적용된 소재는 Al6063 으로 고온 동적물성평가 장비인 Gleeble system 을 이용하여 고온 압축시험을 통해 온도 및 변형을 변화에 따른 유효응력-유효변형 곡선을 확보 하였으며, Fig. 6 에 유효응력 곡선을 나타내었다. 적용된 성형해석 해석조건은 금형 형상을 제외한 공정조건을 동일하게 설정하였으며 해석에 적용된 조건을 Table 3 에 나타내었다.

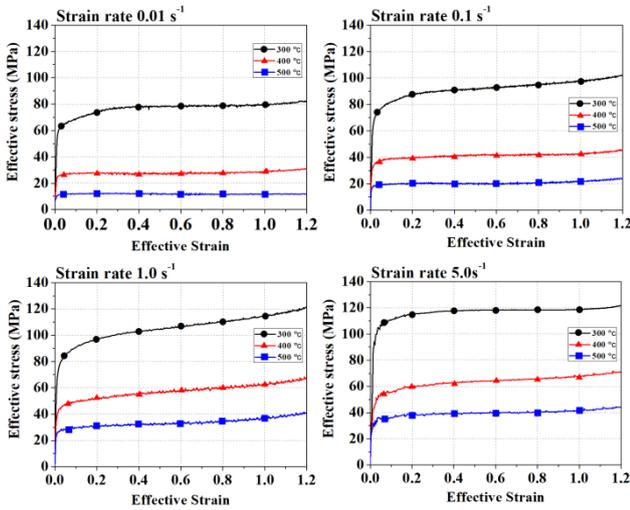


Fig. 6 Effective Stress-effective strain of Al6061

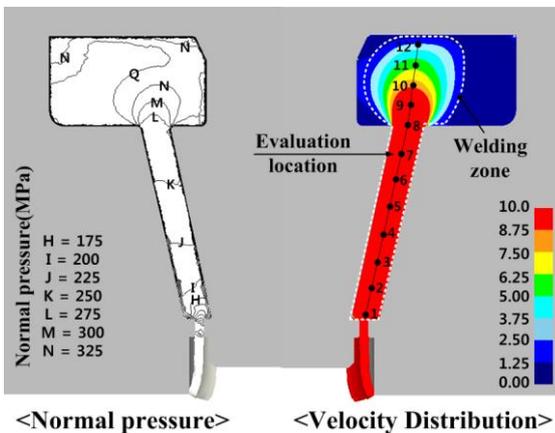


Fig. 7 Locations for evaluating welding pressure

Fig. 7은 2단 접합 금형의 평균 접합압력 평가를 위한 평가위치를 나타낸 것이다. 그림과 같이 1단접합실과 2단 접합실의 12곳에서 확보된 데이터의 평균을 평가기준으로 선정하였다. 2단 접합실의 데이터는 형상변화를 고려하여 균일 등분을 통한 데이터를 평가하였다.

2.3 유한요소해석 및 다구찌법 결과

Table 4에 수준별 유한요소해석 결과를 나타내었다. 평가위치의 접합압력을 유동응력으로 나눈 무차원값의 평균으로 나타내었으며[11], 다구찌법의 목적함수로 설정하였다. 목적함수인 접합압력/유동응력 비가 높을수록 접합면의 품질이 우수함으로 식(1)의 망대특성을 이용하여 SN비(signal to noise ratio)를 비교

Table 4 Result of normal press/flow stress ratio

No.	A (mm)	B (mm)	C (mm)	Welding press/ Flow stress
1	10	2	4	4.1980
2	10	6	7	4.4741
3	10	10	10	5.1405
4	30	2	7	5.8299
5	30	6	10	5.7896
6	30	10	4	6.5433
7	50	2	10	7.1028
8	50	6	4	7.9600
9	50	10	7	7.4058

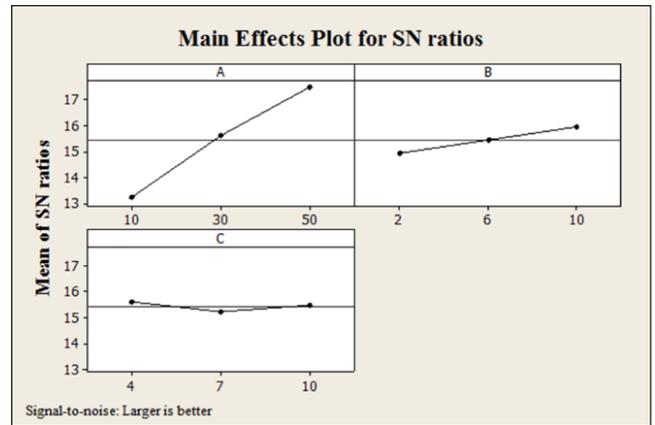


Fig. 8 SN ratio for welding pressure

$$SN = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \right) \quad (1)$$

하여 최적수준의 접합압력을 예측하였다. 여기서 n은 해석횟수, y는 접합 금형의 접합압력/유동응력 평균값을 의미한다. Fig. 8은 다구찌법을 이용한 접합압력/유동응력 비에 대한 수준별 요인 효과 결과를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 접합압력/유동응력 비는 2단 접합실의 길이(A)의 영향력이 가장 크며, 1st 랜드부 폭(B)의 경우 도입부 폭(C)에 비해 다소 크거나 유사함을 알 수 있다. 접합압력에 대한 SN비가 최대인 형상은 2단 접합실의 높이(A)=50mm, 1st 랜드부 폭(B)=10mm, 도입부 폭(C)=4mm였다. 다구찌법의 SN비를 통해 도출된 조건에 대해 성형해석을 수행하였으며 접합압력/유동응력 비가 8.051로 상당히 높음을 알 수 있었다.

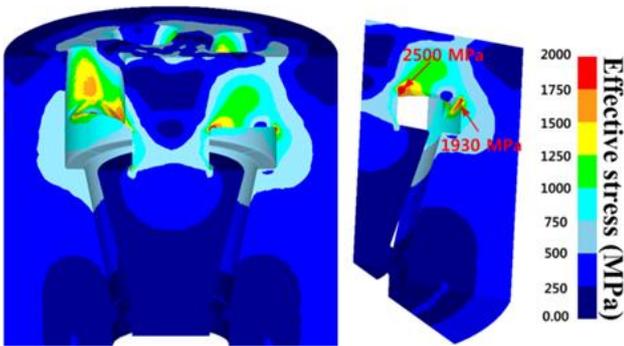


Fig. 9 Result of stress analysis (A=50, B=10, C=4)

3. 금형 강도 해석

다구찌법으로 예측된 2단 접합 금형의 유효성을 검증하기 위해 금형 강도해석을 수행하였다. Fig. 9는 SN비가 최대인 2단 접합실 높이(A)=50mm, 1st 랜드부 폭(B)=10mm, 도입부 폭(C)=4mm의 금형 강도해석 결과이다. 초기 빌렛이 나누어지는 포트홀 금형의 브릿지 하단부에서 약 2500MPa의 과도한 유효응력이 발생하였다. 이는 압출 금형 소재인 STD61의 항복강도 2000MPa를 초과하는 수치로 설계된 조건으로 2단 접합 금형 제작 시 금형 파손이 발생할 것으로 판단된다. 따라서 STD61의 항복강도를 고려한 2단 접합 금형의 형상 설계가 필요하다.

3.1 금형강도를 고려한 금형 설계

금형 강도를 고려한 2 단 접합 금형을 설계하기 위해 기존의 직교배열표 $L_9(3^3)$ 에 목적함수를 금형 취약부의 유효응력으로 설정하였다. 2 단 접합 금형 변수와 수준에 따른 영향을 평가하기 위해 수준별 금형 강도해석을 수행하였다.

Table 5 에 각 수준별 금형 강도해석 결과를 나타내었다. 금형의 취약부에 발생하는 유효응력이 낮을수록 좋으므로 식 (2)의 망소특성을 이용한 SN 비 비교를 통해 금형 설계를 수행하였다.

Fig. 10 은 금형강도 해석결과 브릿지 하단부 유효응력에 대한 수준별 SN 비를 나타낸 것이다. 포트홀 금형의 취약부인 브릿지 하단부에 발생하는 응력에 대한 영향도는 도입부 폭(C), 1st 랜드부 폭(B), 2 단 접합실 높이(A) 순으로 나타났다. 포트홀 금형 브릿지 하단부 발생하는 유효응력이 최소가 되는 조건은 2 단 접합실 높이(A)=10mm, 1st 랜드부 폭 (B)=2mm,

Table 5 Analyzed die stress

No.	A (mm)	B (mm)	C (mm)	Effective stress
1	10	2	4	1800
2	10	6	7	1900
3	10	10	10	2100
4	30	2	7	1930
5	30	6	10	2000
6	30	10	4	2800
7	50	2	10	1700
8	50	6	4	2700
9	50	10	7	1710

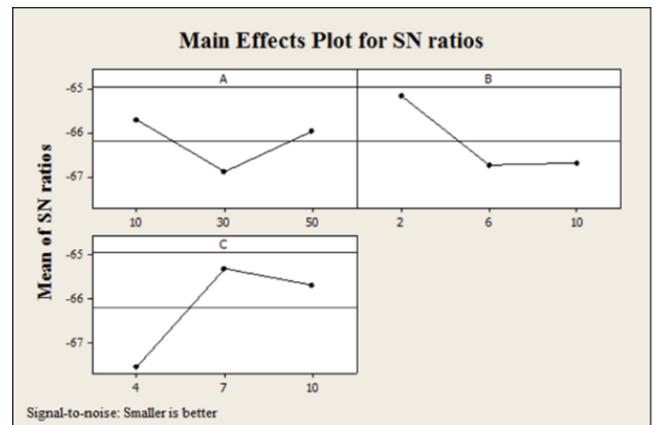


Fig. 10 SN ratio for die stress

$$SN = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

도입부 폭 (C)=7mm 로 설정하였다

3.2 성형 해석 결과

접합압력과 금형 강도에 대한 수준별 효과를 살펴보면 접합압력을 향상시키는 요인은 2단 접합 금형의 높이이며, 브릿지 하단부에 발생하는 유효응력에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 도입부 폭으로 나타났다. 또한 브릿지 하단부에 발생하는 유효응력은 1st 랜드부 폭이 6mm 이상 및 도입부 폭이 4mm에서 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 최대 접합압력과 금형 강도를 동시에 만족 시키는 2단 접합 금형 형상은 2단 접합실 높이 (A)=50mm, 1st 랜드부 폭(B)=2mm, 도입부 폭

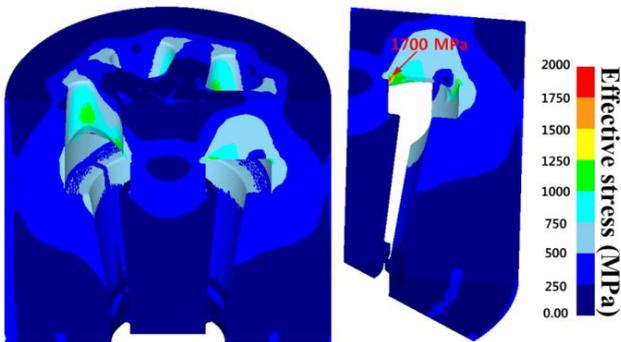


Fig. 11 Result of die stress analysis (A=50, B=2, C=10)

(C)=10mm로 판단된다. 이중 도입부 폭(C)의 경우 브릿지 하단부 유효응력을 증가시키는 4mm를 제외할 경우 유사한 영향력을 미침으로 접합강도 향상을 위해 도입부 폭(C)을 10mm로 선정하였다.

Fig. 11은 2단 접합 금형 높이(A)=50mm, 1st 랜드부 폭(B)=2mm, 도입부 폭 (C)=10mm의 금형 강도해석 결과를 나타낸 것이다. 브릿지 하단부에 발생하는 유효응력이 1600MPa로 STD61의 항복강도 2000MPa보다 낮음을 알 수 있으며, 접합면의 접합압력/유효응력 비 또한 7.292로 높음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 포트홀 압출품 품질향상을 위해 실험계획법과 유한요소해석을 이용하여 2단 접합 금형의 설계변수 영향도를 평가 하였고 이를 바탕으로 접합 금형에 최대 접합 압력이 발생하는 형상을 설계하였다. 이를 통해 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 다구찌법을 이용한 SN 비 평가 결과 접합압력에 대한 영향도는 2단 접합실의 높이, 1st 랜드부 폭, 도입부 폭 순이며, 1st 랜드부 폭과 도입부 폭은 2단 접합 금형의 높이에 비해 영향도가 미비한 것으로 나타났다.

(2) 2단 접합 금형의 최대 접합압력비가 발생하는 조건은 2단 접합 금형의 높이(A)=50mm, 도입부 폭 (C)=10mm, 1st 랜드부 폭(B)=4mm 였으나, 금형 강도 해석 시 포트홀 금형의 브릿지 하단부에서 2500MP의 과도한 응력이 발생하였다. 이는 적용된 금형 소재인 STD 61의 압축항복 강도(2000MPa)를 초과하는 값으로 항복강도를 고려한 추가적인 금형설계가 필

요함을 알 수 있었다.

(3) 열간 금형강인 STD 61의 항복강도를 고려한 2단 접합 금형 설계를 위해 다구찌법을 이용하여 설계변수에 따른 영향도를 평가하였다. 브릿지 하단부 발생 응력에 대한 영향도는 도입부폭(C), 1st 랜드부 폭(B), 2단 접합 금형 높이(A) 순으로 높음을 알 수 있었다.

(4) 접합면의 접합압력에 영향을 미치는 인자는 2단 접합 금형의 높이이며, 금형 브릿지 하단부 유효응력에 영향력을 미치는 인자는 도입부 폭, 1st 랜드부 폭으로 접합압력과 취약부 유효응력에 미치는 인자는 서로 다름을 알 수 있었다. 2단 접합 금형 높이(A)=50mm, 1st 랜드부 폭(B)=2mm, 도입부 폭=10mm일 때 금형 발생응력과 접합강도/유효응력 비를 고려한 가장 최적의 형상이라고 판단하였으며, 유한요소해석을 통해 유효성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원의 지원으로 수행 되었음.

REFERENCES

- [1] M. S. Jenong, S. Y. Lee, I. K. Lee, S. K. Lee, D. H. Kim, 2014, Green Alternative Aluminum Extrusion Process through Process Convergence, Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 15, No. 6, pp. 1173~1177.
- [2] I. K. Lee, S. Y. Lee, S. K. Lee, M. S. Jeong, D. H. Kim, J. W. Lee, Y. J. Cho, 2015, Porthole Extrusion Process Design for Magnesium Alloy Bumper Back Beam, Int. J. Precis. Manuf., Vol. 16, No.7, pp. 1423~1429.
- [3] Y. T. Kim, K. Ikeda, T. Murakami, 2002, Metal flow in porthole die extrusion of aluminium, J. Mater. Process. Technol., Vol. 121, pp. 107~115
- [4] G. Liu, J. Zhou, J. Duszczuk, 2008, FE analysis of metal flow and weld seam formation in a porthole die during the extrusion of a magnesium alloy into a square tube and the effect of ram speed on weld strength, J. Mater. Process. Technol., Vol. 200, pp. 185~198.
- [5] D. Tang, Q. Zhang, D. Li, Y. Peng, 2014, A Physical

- Simulation of Longitudinal Seam Welding in Micro Channel Tube Extrusion, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 214, No. 11, pp. 2777~2783.
- [6] F. Gagliardi, T. Citrea, G. Ambrogio, L. Filice, W. Z. Misiolek, Relationship between process conditions and seam weld width in extruded shapes through a porthole die with customized geometry, *Mater. Today: Proc.*, Vol.2 pp.4874~4881.
- [7] S. W. Bai, G. Fang, J. Zhou, 2019, Integrated physical and numerical simulations of weld seam formation during extrusion of magnesium alloy, *J. Mater. Proess. Tech.*, Vol. 226, pp. 82~95.
- [8] J. Yu, G. Zhao, W. Cui, L. Chen, X. Chen, 2019, Evaluating the welding quality of longitudinal welds in a hollow profile manufactured by porthole die extrusion: Experiments and simulation, *J. Manuf. Process.*, Vol 38, pp. 502~515.
- [9] S. Y. Lee, I. K. Lee, M. S. Jeong, D. C. Ko, B. M. Kim, S. K. lee, 2017, Development of Porthole Extrusion Die for Improving Welding Pressure in Welding Chamber by Using Numerical Analysis, *Trans. Mater. Process.*, Vol.26, No.2, pp. 115~120.
- [10] H. H. Jo, S. K. Lee, C. S. Jung, B. M. Kim, 2006, A Non-steady State FE Analysis of Al Tubes Hot Extrusion by Porthole Die, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 173, No. 2, pp. 223~231.
- [11] H. H. Jo, S. G. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2001, Prediction of Pressure in the Non Steady State Porthole Die Extrusion of Al7003 Tube, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 18, No. 7, pp. 179~185.