

평금형 압출공정 설계 인자에 대한 해석적 고찰

이창희* · 양동열**

(2001년 9월 5일 접수)

The Analytical Consideration for Several Design Parameters of Flat-Die Extrusion Processes

C. H. Lee and D. Y. Yang

Abstract

In the present study, several design parameters of the flat-die extrusion process are investigated using the finite element method. The effects of the location of an extrusion profile, arrangement of multiple extrusion profiles, and the design of various die land have been investigated through the analysis. Several numerical examples of flat-die extrusion of such as C-section, multiple U-shape, and a window guide section, are analyzed. From the comparative study, the effect of design parameters is investigated. In each example, comparing the velocity distribution with that of the original design, it has been shown that the design modification affords more uniform distribution.

Key Words : Extrusion, Finite Element Method, Die Design Parameter

1. 서론

오늘날과 같은 다품종 소량 생산 시대에서, 설계자들은 알루미늄, 철, 구리 그리고 플라스틱 레진을 포함한 재료의 풍부함 뿐만 아니라, 압연, 스탬핑, 주조, 분말 성형, 사출 성형 그리고 고분자 재료 압출공정 등의 많은 공정의 풍부함을 지니고 있다. 각각의 공정과 재료는 독특한 성능 한계를 설계자들에게 제시하고 있다. 이러한 많은 적용에서, 알루미늄 압출 공정은 다른 많은 재료와 공정에 비해 월등한 성능 한계를 제공한다.

알루미늄 압출 공정은 일정한 단면 형상을 가지는 제

품에 대해 높은 생산성과 품질, 가격 경쟁력 등을 보장하기 때문에 자동차나 건설 구조물 등의 생산에 많이 사용되어지는 효과적인 공정이다. 또한 이는 제품의 우수한 성능 및 품질의 신뢰성에 의해 내구 소비재에서 운송 수단, 또는 전자제품에서 건설 및 건축에 이르는 매우 광범위한 시장의 다양성을 지닌다고 알려져 왔다. 여기서 압출공정에 대한 시간, 가격, 공정 반복도는 설계자에게 매우 중요한 인자이며, 이러한 특성은 알루미늄 압출에 다른 공정이나 재료에서 찾을 수 없는 많은 장점을 제공한다.

그러나, 압출공정은 공정 설계에 있어서 매우 복잡한

* KAIST 기계공학과 대학원

** KAIST 기계공학과

설계 인자들을 지니고 있으며, 지금까지는 이러한 인자의 판단을 숙련된 설계자의 경험에 의해 수행해왔던 것이 사실이다. 하지만, 이러한 설계 방식은 많은 시행착오와 그에 따른 비용 및 시간의 손실을 가져오게 된다. 따라서 이러한 불편함을 해결하고자, 근래의 연구에서는 압출공정의 설계에 유한요소법등의 수치 모사법을 사용하여 설계 인자를 결정하고자 하는 시도를 해 오고 있다 [1-46].

본 연구에서는 이러한 연구의 일부로써 평균형 압출 공정에서의 공정 설계 인자들을 유한요소법을 적용함으로써 판단해 보도록 하고, 이를 이용하여 설계 개선을 수행한 결과를 소개할 수 있도록 한다. 본 연구에서 고려한 평균형 압출 공정의 설계 인자는, (1) 단일 압출구를 지나는 압출 공정에서의 압출구 위치에 대한 고려, (2) 다수의 압출구를 지나는 압출 공정에서의 압출구 배치에 대한 고려, (3) 금형 랜드부의 설계가 압출 제품에 미치는 영향에 대해 고려하였다. 이를 위해, 실제 적용예제를 이용하여 해석을 수행하고, 그 결과를 고찰함으로써 설계 인자에 대해 검토 할 수 있도록 한다.

2. 압출공정의 유한요소해석

유한요소 해석은 고체의 변형 문제, 열전달 문제 등 자연계의 여러 가지 공학적인 문제를 수치적으로 모델링하고 이를 가상적으로 실현함으로써 실제적으로 유용한 정보를 제공해준다. 소성가공 공정의 유한요소 해석에 관해서도 그간 많은 연구가 이루어져 실제적인 문제를 해석하고 해석 결과를 공정의 설계 및 개선에 응용할 수 있는 수준에 이르렀다. 유한요소법에 의한 공정의 가상 실험을 통해 공정의 특성인 공정 중 재료의 변형형상, 내부에서의 변형률 및 응력 분포, 성형 하중, 소재와 금형의 온도분포 등을 미리 알 수 있게 된다. 그러므로, 이를 이용하면 공정의 문제점을 진단하고 개선할 수 있게 되어 보다 효율적인 공정 및 금형의 설계가 가능하게 된다.

압출공정을 해석하기 위해서는 공정 중 재료의 거동을 묘사할 수 있는 재료 모델을 설정해 주어야 한다. 압출 공정은 금속의 소성변형을 유발하는데, 이러한 소성가공 공정의 효과적인 해석을 위해서 강소성 유한요소 모델링을 사용하였다. 이를 이용하면 신속하고 정확한 공정의 수치모사가 가능하다. 강소성 유한요소 모델링을 사용할 경우, 평형 방정식에 기반을 둔 변형률 속도 기반 수식화를 진행하면 다음과 같은 형태의 변분 방정식을 얻어 낼 수 있다.

$$\delta \Pi = \int_{\Omega} \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} d\Omega + K^* \int_{\Omega} \dot{\epsilon}_V \delta \dot{\epsilon}_V d\Omega - \int_{\Gamma_f} f_i \delta u_i d\Gamma = 0 \quad (1)$$

여기서 K^* 는 비압축성 조건에 대한 벌칙상수이며, 경계 조건에 사용한 마찰 조건은 다음과 같은 일정 마찰 법칙을 적용하였다. 마찰식에서 m 은 마찰인자, k 는 국부 유동응력이며 u_0 는 $|V_s|$ 에 비해 매우 작은 상수이다. V_s 는 금형과 소재사이의 상대 속도이며, t 는 방향의 단위 벡터이다.

$$f = -\frac{2}{\pi} m k t \tan^{-1} \left(\frac{|V_s|}{u_0} \right) t \quad (2)$$

3. 평균형 압출의 설계 인자

평균형 압출은 압출 공정의 가장 기본적인 형태이다. 열간 평균형을 통한 압출 공정은 성형 및 금형 제작이 비교적 용이하여 경량화와 내부식성이 요구되는 각종의 자동차/항공기용 부품, 열교환기류, 건축용 사시 등 다양한 형상의 알루미늄과 동합금재로 된 단면형상체들이 이 가공법에 생산되고 있다. 그러나, 압출 시 비유동영역의 존재하고 금형 입구부에 급격한 소성유동이 발생하여 역학적 해석이 어려우므로, 경험 및 직관에 의존하거나 실험에 의한 시행 착오법으로 금형 설계를 하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 설계 인자의 제안을 위한 해석적인 검토를 수행하고자 한다. 적용하고자 하는 평균형 압출은 다음과 같은 형태의 변분 방정식을 얻어 낼 수 있다.

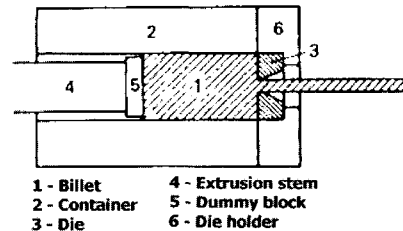


Fig. 1 Schematic diagram of flat-die extrusion⁽⁵⁾

이러한 압출 공정의 설계에 영향을 미치는 인자로는 (1) 단일 압출구를 지나는 압출에서의 압출구 위치 결정, (2) 다수의 압출구를 지나는 압출에서의 소재 중심에 대한 압출구의 배치 결정, 또한 (3) 제품의 균일한 변형을 유도할 수 있도록 하는 금형 랜드부의 가변적 설계와 같은 인자를 들 수 있다. 이와 같은 설계 인자에 의해 압출구를 따라 압출되는 속도가 매우 크게 영향을 받게 되고, 이러한 압출 속도의 불균일성은 압출품의 매우 큰 결함으로 나타날 수 있다. 이러한 설계 인자들은 다음과 같은 방법을 통해 고려된다.

- (1) 단일 압출구의 위치 결정 : 압출구의 무게중심을 고려하여 배치하는 것의 효과를 관찰할 수 있도록 한다.
- (2) 다수의 압출구 배치 결정 : 빌렛 중심, 즉, 컨테이너의 중심으로부터의 위치관계를 고려하여 배치하고, 그 효과를 관찰한다.

(3) 금형 랜드부 설계 : 복잡한 형상에 대해, 설계된 금형 랜드부를 적용한 경우와 일정한 금형 랜드부 적용하였을 경우에 대해 비교하여 그 효과를 관찰한다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 세 가지의 주요한 설계 인자들에 대해 고찰하고, 그 효과를 해석적으로 검증함으로써 설계에 유용한 정보를 제공할 수 있도록 한다.

3.1 단일 압출구를 지나는 압출에서의 압출구 위치 결정

우선 압출의 설계에서 가장 기본적인 설계 인자인 압출구의 배치에 대해 고찰해 보고자 한다. 한 개의 압출구를 지나는 압출의 경우 출구 배치에 의해 압출품의 비틀림 및 잔류응력등의 문제가 발생할 수 있으므로, 적합한 위치에 배치함으로써 압출구를 통한 출구속도 균일화를 기하는 것이 매우 중요하다.

압출구의 배치 효과를 관찰하기 위해 다음에서와 같은 C-형 압출에 대해 고찰하였으며, 초기엔 임의의 위치에 놓여진 경우와 개선안으로써 C-형 압출품 형상의 무게중심을 고려하여 배치함으로써 그 출구 속도의 변화를 관찰 할 수 있도록 한다.

압출구의 배치를 바꿔가며 해석을 해 본 경우에 있어서, 다음과 같은 속도 균일화 효과를 거둘 수 있었으며, 그 효과는 다음의 Fig. 3과 4를 통해 쉽게 확인할 수 있다. 해석은 육면체 격자를 사용하여 해석하였으며, Cray-C90을 이용하여 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 무게중심을 고려하여 압출구의 위치를 결정하는 것이 속도 균일화에 매우 유리한 효과를 지님을 확인할 수 있었다.

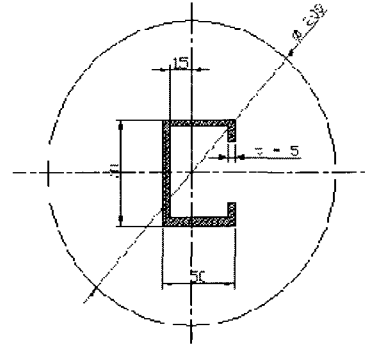


Fig. 2 Example of C-section extrusion

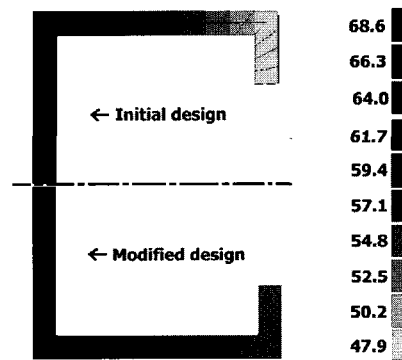


Fig. 3 Comparison of extrusion velocity at the orifice: Extrusion velocity with FE-analysis

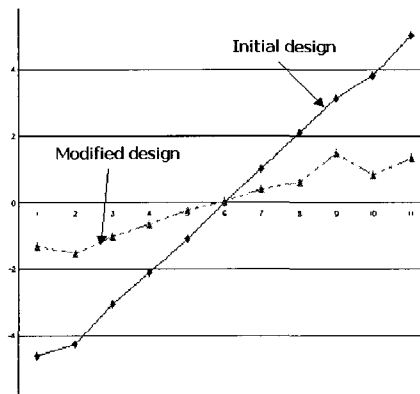


Fig. 4 Comparison of extrusion velocity at the orifice: Comparison along the upper side

3.2 다중 압출구를 지나는 경우 압출구 배치

이전 절의 예에서 하나의 압출구를 지나는 경우의 위치 결정에서 무게중심의 고려가 중요한 인자임을 확인하였다면, 이번절의 예제에서는 다수의 압출구를 지나는 경우의 압출구 배치에 대해 고려하도록 한다. 다수의 압출구의 배치에서 가장 중요하게 고려할 사항은 컨테이너와 빌렛사이 존재하는 마찰로 인해, 빌렛에 유발되는 속도 불균일성이다. 즉, 컨테이너 벽과의 마찰로 인해 빌렛의 중심부로 갈수록 빌렛의 압출 속도가 빨라지게 되고, 이에 따라 근원적으로, 빌렛의 중심부와 외경부의 압출 속도 차이가 존재한다. 이와 같은 차이를 고려하여 금형 설계를 진행하여야 한다.

이번의 고찰을 위해 선택한 예제는 Fig. 5에서와 같이 4개의 압출구를 지나는 U-자 형태의 압출에 대해 해석하도록 하며, 각 1/4분면의 무게중심에 배치된 압출구가 어떻게 위치하는 것이 속도 균일화 및 압출품의 품질에 좋은 영향을 미치는지 확인해 보도록 한다. 이번의 고찰에서는 다음의 두 가지 경우의 서로 다른 배치에 대한 해석을 통해 그 효과를 비교할 수 있도록 한다. 해석은 Cray-C90을 이용하였다.

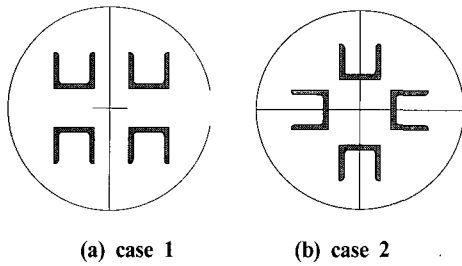


Fig. 5 U-shape extrusion with 4 holes for different arrangements

Fig. 6은 case 1에 대한 압출 속도를 나타낸 그림이며, Fig. 7은 case 2에 대해 압출 속도의 해석 결과를 나타낸 그림이다. 해석을 통해 case 1, 2의 결과를 비교해 본 결과, case 2와 같이 중심에 대해 방사형으로 배치한 결과가 매우 좋은 속도 균일화 효과를 얻고 있음을 확인할 수 있었다. 즉 case 1에서처럼 축에 대해 평행하게 배치한 경우는 중심부로부터 외부로 나가면서 유발 되는 압출속도의 불균일성이 바로 압출구를 통한 제품 압출에서 표현되게 되므로 매우 불리한 효과를 지니게 된다.

Fig. 8은 두 가지 경우의 해석 결과에 대한 고찰을 위해, 제품의 형상을 따라 특성 경로를 설정 한 후, 이 특

성 경로에 따른 압출 속도의 비교를 수행하였다. 특성 경로는 Fig. 8의 작은 그림에서와 같이 U-자형의 한쪽 끝단에서부터, 다른 쪽 끝단으로 이동하는 경로이다. Fig. 8의 속도 비교 그래프에 의하면, case 1의 경우는 중심에 가까운 영역에서 집중적으로 큰 압출 속도를 가지며, 그 이외의 부분에서와는 속도 편차가 매우 크게 나타남을 확인 할 수 있다. 그러나, case2의 경우에는 전 영역에 대해 매우 고른 압출 속도를 가짐을 확인할 수 있다.

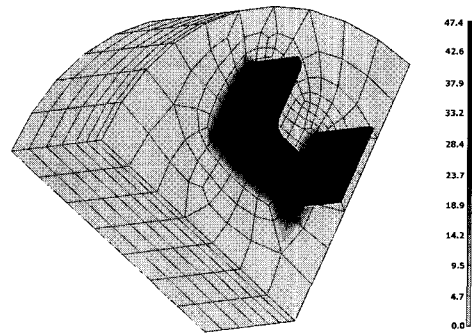


Fig. 6 Extrusion velocity of case 1

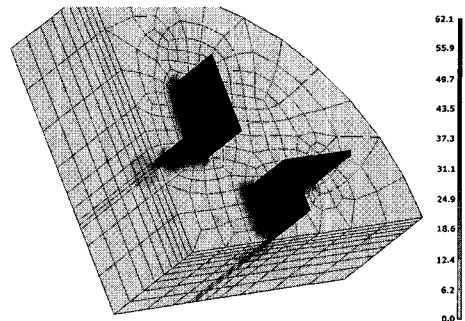


Fig. 7 Extrusion velocity of case 2

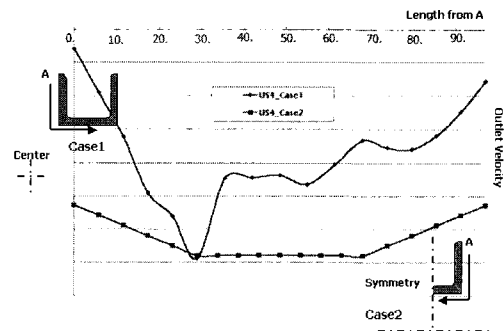


Fig. 8 Comparison of two different cases

두 경우에 대한 평균 속도를 비교해 본 결과, case 1에서는 28.5mm/sec이었고, case 2에서는 41.6mm/sec였다. (램 속도 : 3mm/sec) 해석 결과를 통해 볼 수 있는 바에서와 같이, case 2의 경우가 평균 속도로 볼 때의 전체적인 압출 속도도 항상 되었으며, 압출된 제품에서의 상당한 속도 균일화 효과도 확인할 수 있었다. 이상의 비교를 통해 다중의 압출구에서의 배치에 대한 설계 인자에 대해 고찰해 볼 수 있었다.

기존의 설계 관련 서적을 참고하였을 때 역시 마찬가지로, 위의 설계 방안에 대한 확인이 가능하였다. 아래의 Fig. 9에서 볼 때, 중심부와 외경부의 속도차이를 고려하여 배치하고, 형상의 특성을 고려할 수 있도록 제안하고 있음을 확인할 수 있었다.

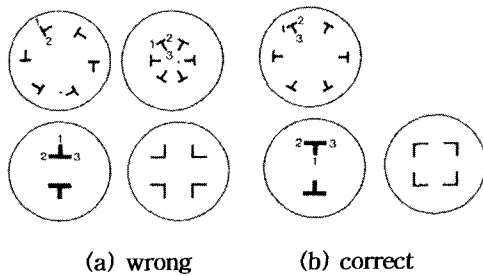


Fig. 9 Design recommendation for several extrusion processes with multi-hole⁽⁵⁾

3.3 금형 랜드부 길이 변화의 효과

이전의 예제를 통해서 는 주로 압출구의 배치에 의한 압출 속도의 개선에 대해 알아보았다. 그러나, 이러한 설계를 통해서 압출 속도 균일화가 모두 이루어질 수 있는 것은 아니므로, 평균형 압출에서는 이러한 압출속도 균일화 효과를 기하기 위해 또 한가지의 설계 인자에 대해 고려해 왔다.

평균형 압출에서 유동 조정에 주로 이용되는 것이 플로우 가이드와 금형 랜드부이다. 고강도 재료를 압출할 경우는 플로우 가이드를 설치하지 않고, 금형 랜드부의 길이 변화만으로 유동을 조정하고 있다. 금형의 랜드부를 컨테이너와 가까운, 마찰등의 여러가지 영향에 의해 압출 속도가 취약한 부분에서는 짧게 해주고, 상대적으로 압출 속도가 크게 예상되는 중앙부분에서는 크게 함으로써 압출 속도의 편차를 제어할 수 있게 된다. 기존의 연구에서는 L-형제의 압출에서 금형 랜드부를 조정함으로써, 압출 시 균일한 변형을 얻어낼 수 있었다. 이에 대한 결과는 다음의 Fig. 10에서와 같다. 여기서 도시

된 값은 유효변형률을 나타내며, 압출구 부근에서 균일한 변형률 값을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

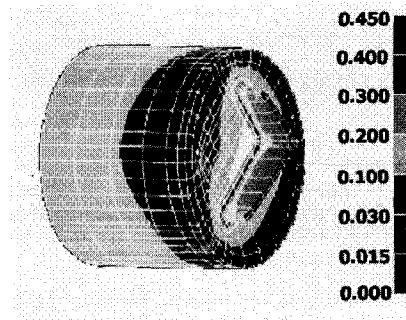


Fig. 10 Uniform deformation applying designed die-land⁽²⁾

본 연구에서 도입된 금형 랜드부 설계 시스템은, 압출 금형 자동 설계 시스템^[4]을 통해 제안된 설계 시스템을 사용하였으며, 이는 빌렛의 속도 구배와 현장 설계자의 경험을 이용한 설계 규칙을 적용하여 설계할 수 있도록 하는 시스템이다.

본 연구에서는 이러한 금형 랜드부의 효과를 알아 볼 수 있도록 하기 위해 좀 더 복잡한 예제에 대해 고찰하였으며, 선택한 예제는 Fig. 11에서와 같은 창틀 형상이다. 결과의 비교를 위해 기존의 설계에서는 모든 영역에 대해 일정한 랜드부 길이를 가지는 형태를 가정하였으며, 개선된 설계에서는 빌렛의 압출 속도 차이를 적용하여 형상의 위치에 따라 가변적으로 설계된 랜드부의 형상에 대해 비교하였다. Fig. 11에서 도시된 단면은 금형 랜드부 설계를 도입한, 개선된 설계이며, 그림에서 원안에 표시된 숫자는 제품의 위치에 따른 금형 랜드부 길이를 나타낸다.

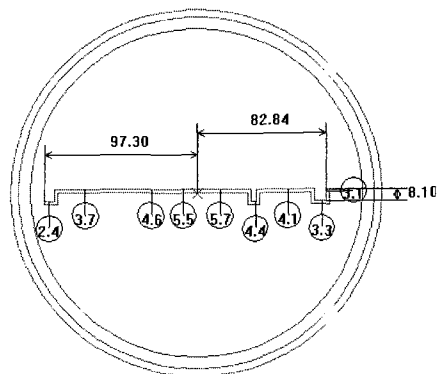


Fig. 11 Example of a window guide with variable die-land

해석 시스템에서 설계 데이터를 적용하는 방법은 다음의 Fig. 12의 알고리즘을 따라 경계조건을 조정함으로써 가능하다. 설계된 랜드부 정보를 해석 시스템에서 읽어 들이면, 이 정보는 하나의 다항식으로 구성된 일정 경로 정보로 재 생산된다. 이를 이용하여, 소재 격자의 절점에 대해 설계된 랜드부 값을 계산하고, 이를 이용하여 경계면을 생성하게 된다. 이렇게 생성된 경계면은 Fig. 12에 그 일부 형상이 도시되어있다.

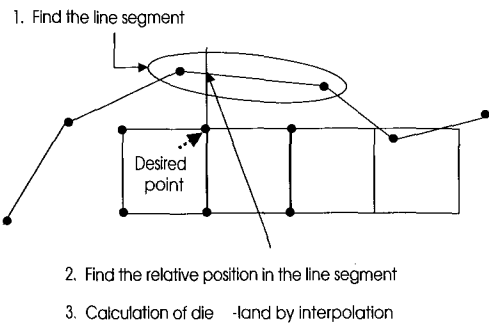


Fig. 12 Algorithm for applying designed die-land

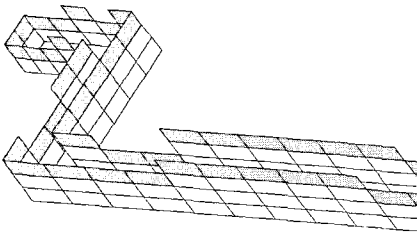


Fig. 13 Generated boundary surface using designed die-land (Partial view)

이상과 같은 알고리즘에 의해 설계 시스템으로부터 얻어진 데이터를 이용할 수 있으며, 이를 이용하여 해석을 수행하면 설계 정보의 효과를 검토할 수 있게 된다. 해석은 Cray-C90을 이용하여 진행되었으며, 해석 결과는 다음과 같다.

일정한 금형 랜드부를 적용한 경우, 형상의 불균일성에 의해 매우 극심한 변형 불균일성이 나타남을 확인할 수 있었다. 그러나, 빌렛의 속도 불균일성과 압출품 형상을 고려하여 설계된 금형 랜드부를 적용하면, 제품 형상에 따른 이러한 두 경우의 해석을 비교한 결과, 이와 같이 복잡한 형상에 대해서도 금형 랜드부를 조절하면 상당히 균일화 된 속도를 얻어낼 수 있었으며, 이는 문헌

조사를 통해, 실제 현장의 생산에 적용되는 금형과 매우 유사함을 확인할 수 있었다.

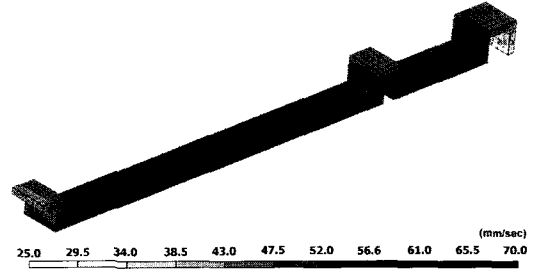


Fig. 14 Extrusion velocity with FEM analysis

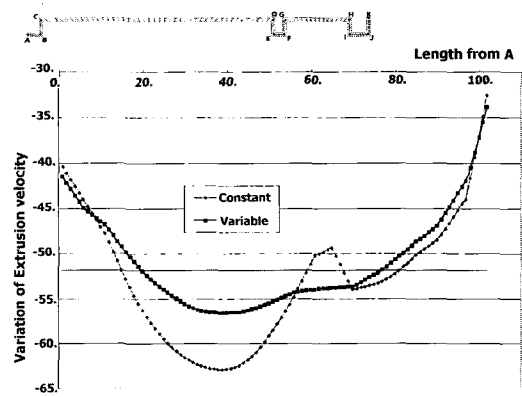


Fig. 15 Comparison of extrusion velocity: constant die-land vs. designed die-land

4. 고찰 및 결론

이상의 연구를 통해 다음의 세 가지 설계 인자의 영향에 대해 해석적으로 관찰해 보았다.

(1) 단일 압출구에 대한 무게중심의 고려
상대적으로 큰 제품의 성형에 주로 사용되는, 단일 압출구를 지닌 압출의 경우 압출품의 형상의 무게중심을 빌렛의 중심에 위치하도록 하는 것이 제품의 품질에 유리한 결과를 가져올 수 있음을 확인하였다.

(2) 다수의 압출구에 대한 중심으로부터의 방향성 고려
압출공정에서 컨테이너와 빌렛간에 근본적으로 존재하는 마찰은 압출시, 빌렛에 중심부와 외경부의 속도 구배를 제공한다. 생산성의 향상을 위해, 상대적으로 작은 제품의 생산시, 다수의 압출구를 가지는 금형을 사용할 경우, 이러한 속도 구배를 고려하여 설계하여야 한다. 본

연구를 통해서 이러한 속도 차이를 고려하여, 중심을 기준으로 하는 방사형 배치에서 더 나은 제품 성능을 확인할 수 있었다.

(3) 압출시 금형 랜드부 길이의 제어 효과 고려
제품의 균일한 변형을 얻기 위해서는, 배치나 위치의 결정 이외에도 좀 더 제어 가능한 인자를 도입하는 것이 필요한데, 이런 경우 사용될 수 있는 것이 금형 랜드부 설계이다. 랜드부와 압출품의 마찰을 도입하여, 이를 제어함으로써 제품의 변형을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 복잡한 제품의 경우에서도 랜드부의 제어를 통해 변형의 균일화를 이룰 수 있음을 확인할 수 있었다.

평균형 압출에서 금형 설계에 영향을 주는 중요한 인자에 대해 해석을 통해 확인한 결과, 압출 제품 형상의 무게중심을 고려하여 압출구를 배치하고, 다수의 압출구를 지닌 경우는 빌렛 중심으로부터 균일한 위치에 배치될 수 있는 방사형 배치가 유리함을 확인할 수 있었고, 금형 랜드부를 조절함으로써 압출 시 상당한 속도 균일화를 가져 올 수 있음을 실제로 확인할 수 있었다. 평균형 압출에서는 이상의 세가지 주요한 인자를 적절히 활용함으로써 압출 속도의 상당한 균일화 효과를 가져 올 수 있다.

향후의 연구에서는 이러한 연구결과를 포트홀 금형을 통한 증공형 압출과 같은, 좀더 복잡한 압출에 적용시킴으로써 그 효과를 검증하고, 실제 압출품의 품질개선에 기여할 수 있도록 하는 것이 필요하다.

후 기

본 연구는 산업기반기술과제 '압출금형의 자동설계 기술

개발(1999. 8 ~ 2000. 10)'의 일환으로 진행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Yang, D.Y., Lee, C.M. and Yoon, J.H., 1989, "Finite element analysis of steady-state three dimensional extrusion of sections through curved dies", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.31, pp. 145~156.
- (2) Kang, Y. S. and Yang, D. Y., 1995, "Rigid-viscoplastic finite element analysis of hot square die extrusion of complicated profiles with flow guides and lands by arbitrarily Lagrangian-Eulerian formulation", *Proc. 5th Int. Conf. Num. Meth. Indust. Forming Processes*, pp. 841~846.
- (3) Park, K., Yang, D.Y. and Kang, Y.S., 1999, "Three-dimensional finite element analysis for hollow section extrusion of a triply-connected section using mismatching refinement with domain decomposition", revised to *Engng. Computations*
- (4) "압출금형의 자동 설계 기술 개발"(연구보고서), 2000, 산업자원부, 생산기술연구원
- (5) Laue, K. and Stenger, H., *EXTRUSION: Processes, Machinery, Tooling*, 1981, AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Park, Ohio
- (6) 이춘만, 이승훈, 조종래, "평균형을 통한 증공형제 압출의 유한요소해석", 1998, 한국소성가공학회지, 제 7권, pp. 375~381.