

재료이용률 향상을 위한 차세대 압출공정

최호준, 임성주, 최석우 한국생산기술연구원

[요약문]

녹색기술 및 친환경 공정의 필요성이 급증함에 따라 재료이용률 향상을 지향하는 차세대 압출공정의 대두가 필요하게 됨에 따라 유압 CNC(Servo) 제어를 이용한 가변단면 압출기술을 개발하게 되었다. 이러한 가변단면 압출(Variied section extrusion, VSE)기술은 공정 중에 압출구를 빠져 나가는 소재의 단면 형상을 변화시켜 재료이용률을 향상을 도모하였으며, 후가공 공정의 생략도 가능하여 국내 압출업체의 생산원가 절감 및 글로벌 기술경쟁력 확보에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다. 아직은 소수의 선진국에서 시도한바 있으나 양산품 적용에는 생산원가 및 생산속도, 상품성 등에 문제가 있어 자동차 부품 적용에 한계를 보이고 있는 기술이다. 따라서 본 연구팀이 가변단면 압출용 금형을 포함한 최적의 압출공정 및 양산성 문제의 해결점을 거의 확보하고 있는 단계로 세계를 선도하는 리딩기술(Leading technology)을 보유하게 됨으로써 국가의 기술경쟁력 향상에 중요한 역할을 수행할 수 있을 것이다.

본 연구의 내용을 요약하여 정리해 보면 첫째로는 CNC 제어 가변단면 압출공정에 대하여 자세하게 소개하고 특징 및 장·단점을 설명하였으며, 자동차 부품군 예로의 적용에 많은 이점들을 갖고 있음을 설명하였다. 두 번째로는 가변단면 압출을 위한 이동 금형(Moving die)부품을 갖는 구조의 압출금형에 관하여 기존의 압출금형과 비교하여 설명하였으며, 가변단면 압출용 금형의 구조 및 메커니즘의 최적화를 이루고자 하였다.

세 번째로는 가변단면 압출공정을 실현하기 위한 CNC 제어 압출시스템에 대하여 간략히 중요부분과 기존 알루미늄 압출기와 차이가 발생하는 부분을 중점적으로 부각시켜 설명하였다. 네 번째로는 자동차 부품 적용을 위한 정밀 압출공정으로써 가변단면 압출공정에 대하여 유한요소해석을 통하여 가변단면 압출공정 변수 및 금형 변수 등에 대한 엄격한 검토를 선행적으로 수행하여 양산성 확보를 위한 정보들을 분석·정리하였다. 끝으로는 세 가지 단면형태를 갖는 가변단면 압출제 시제품에 대하여 CNC 제어 가변 단면 압출공정의 상용화 가능성을 확인·적용성 검토를 완료하였다. CNC 제어 가변단면 압출기술은 압출공정에 있어서 많은 경험과 기술적 검토가 선행되어야 하는 고부가가치 성형공정으로써 재료이용률을 획기적으로 향상시킬 수 있는 압출공법으로 향후 자동차 부품 뿐 만아니라 다양한 알루미늄 제품군에 적용이 가능하다고 판단된다.

1. 친환경 제조 공정과 소재 효율성 향상

온실가스 저감을 위한 범지구적 노력이 절실한 상황에서 기후변화 등으로 인한 국제 환경규제는 각국의 기업 생존은 물론 국가 경쟁력 문제로 직결되고 있다. 따라서 세계 주요국들이 강력한 환경규제와 더불어 녹색기술 확보에

근거한 녹색시장 창출을 통해 시장주도권을 장악하려 하고 있다^[1].

온실 효과에 따른 기후 온난화와 해수면 상승 등은 이미 전 세계적 문제로 자리잡은 지 오래다. 이는 급격한 산업화와 에너지 소비의 폭발적 증가에 따른 결과라는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 자원을 소모하며 성장하는 경제성장은 한계에 이르렀다는 인식이 널리 확산되고 있다. 이러한 경제적 인식 변화는 일상생활뿐만 아니라 산업 전반에 걸친 변화를 불러오고 있다. 에너지효율 등급 기준이 강화되는 등 관련 규제의 벽은 점차 높아지고 있으며 기후변화 협약, 교토의정서 등 각종 규제가 사실상 새로운 무역방벽으로 작용하고 있다. 2012년 교토의정서가 만료되면 더 강력한 규제가 도입될 것이라는 예측이 나오고 있어 발 빠른 움직임이 요구되고 있다^[2].

특히 최근에는 기술, 고객의 요구 및 세계화 등의 급속한 환경 변화 속에서 제조분야는 지속적으로 변화하여 진화하고 있다. 화석연료 가격의 심한 변동과 한정된 자원에 대한 세계적인 경각심으로 인해 지속적으로 제품을 생산하고 사용할 수 있는 방식에 대한 요구가 제기되고 있다. 또한 친환경 제조 방식의 개념에 대한 제시는 20여 년 이상 되었지만, 기후 변화에 대한 관심이 높아지면서 사고방식이 변화하고 있으며 결국 적극적인 행동이 시작되려고 하는 것이 최근의 경향이다.

멜린크(Meinyk)와 스미쓰(Smith)에 의하면 친환경 제조(Green manufacturing)란 환경 폐기물 감소를 목표로 이에 대한 확인, 정량화, 평가, 관리를 통해 궁극적으로 환경에 대한 충격을 최소화하는 동시에 자원의 효율성을 최대화 하려는 제품과 공정 설계 문제의 핵심 사항을 제조, 계획, 제어분야의 핵심 사항에 통합적으로 적용시키는 것이다. 또한 친환경 제조는 다음과 같은 명칭으로도 알려져 있는데 클린 제조, 환경을 고려한 제조, 환경에 관대한 제조, 환경에 대한 책임을 지는 제조, 지속 가능한 제조 등으로 불리기도 한다.

친환경 제조의 기본은 매우 간단하며 제품의 생산으로 인한 자원의 사용 및 환경에 대한 영향을 최소화 하는 것과 관련되어 있으며, 이러한 철학은 제품의 설계에서 수명이 다할 때까지 제품의 라이프 사이클의 모든 구성요소에 확장·적용된다. [그림 1]에서는 제조공정의 변화에 따른 친환경 제조의 태동을 설명하고 있다.

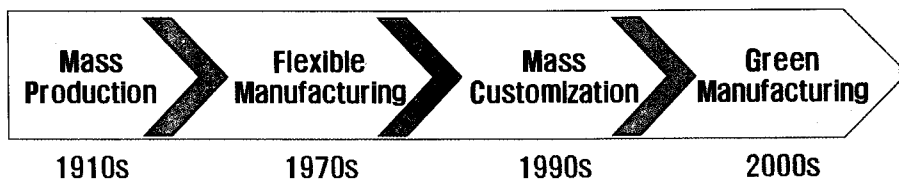


그림 1. 제조공정의 변화

가까운 미래에 친환경 제조로의 변화는 하루아침에 이뤄질 수 있는 것이 아니라 시간을 두고 일어나게 될 것이다. 그러나 우리는 지속적인 개선의 수준을 넘어서면 친환경 제조를 급속히 채택하게 되는 이러한 균형의 변화를 깨뜨리는 극적인 변화의 시작점을 예상하고 있다. 따라서 제품에 대한 기업의 설계, 조달, 제조, 유통, 폐기 및 재생 등의 과정에서 근본적인 변화에 따라 친환경 제조로의 도약이 이루어질 것이다^[3].

제품 성능이나 효율 면에서는 앞서 나가지만 친환경 고효율 제품을 내놓기 위해 많은 에너지를 소비하고 온실가스를 발생시키는 기존의 관행을 답습한다면 친환경이라는 말은 무위에 그칠 것이다. 원재료 가공에서 생산과 운송, 폐기에 이르기까지 전 과정에서 탄소발생을 최소화할 때 진정한 친환경 제품은 완성된다.

이러한 관점에서 제조과정의 시작인 설계과정(Design process)에서의 친환경 개념 적용은 매우 중요하다고 하겠다. 이를 일컬어 에코디자인(Eco-Design)이라 부르며 제품을 개발하거나 개선할 때 설계 단계에서부터 비용, 품질 등과 동시에 제품의 전 과정(원료 채취 및 제조, 수송, 소비, 폐기 등)에 걸친 환경 측면을 고려하여 환경 부하를 최소화하도록 하는 환경 친화적 설계를 의미한다.

또한 현재는 전 세계적으로 환경 지속성(Environmental Sustainability)과 함께 경제성장을 지원하는 기술트렌드로써 녹색기술을 강조하고 있으며, 녹색기술의 개념(GT; Green Technology)은 재생에너지, 청정에너지 등의 환경

친화적인 자원을 활용하는 기술이며, 최근에는 정보기술(IT), 생명공학기술(BT), 나노기술(NT) 등 기술간 융합을 지향하는 융합녹색기술로 개념으로 확대되어 사용하고 있다. 국내에서도 녹색기술에 대한 관심이 집중되면서 NTIS 표준정보항목으로 녹색기술분야를 추가하여 제정하고 있다. 과학기술정책연구원(STEPI)에서 발행한 녹색기술산업 분류체계에 따르면 27대 중점육성기술 중 고효율화 기술(대분류)-친환경 제조 공정 및 소재 효율성 향상(중분류)-제조 공정 및 소재 효율성 향상(소분류) 항목으로 “환경부하 및 에너지 소비 예측을 고려한 Green Process 기술”이 포함되어 있으며, 이는 원료·소재·생산·수송·사용·재활용·폐기 등 산업활동 전 과정에 있어서 환경부하를 최소화하고 에너지 효율을 향상 시키는 소재, 공정, 제품 및 재활용과 관련된 기술을 의미한다고 설명하고 있다.

이러한 국내의 흐름과 부합하여 선진국은 정부뿐만 아니라 민간주도 방식의 Green Process 적용이 활발히 수행되고 있다. 반면 우리나라는 일부 대기업을 중심으로 오염물질 배출 방지 등 한정된 부분의 기술개발만 진행되고 있어 Green Process 통합 설계 및 이에 필요한 요소기술 개발이 시급한 실정이다⁴⁾.

특히 미국에서는 환경보호청(EPA)이 에너지국(DOE)과 협력해 에너지 효율 개선을 통한 에너지 문제 해결과 온실가스 배출량 감축을 목표로 자발적 프로그램인 ‘올해의 에너지 스타(Energy star) 파트너’를 만들고 이를 미국의 대표적 에너지 효율성 마크로 대내적으로 표방·홍보하고 있다. 국내에서는 해상 오염을 줄이자는 국제해사기구(IMO)의 결정을 받아들여 친환경 선박제조를 위한 의무화 법령을 준비 중이며, 2013년부터 인도하는 신규 선박부터 탄소배출량 허용기준에 따라 설계·건조·운항해야 한다. 또한 2025년 이후에는 현재보다 30% 이상 탄소배출을 줄여야한다. 이러한 방침은 외교부와 조선소, 선사, 기자재업체, 선박설계업체 등에 통보했으며 미국, 일본, 중국, 일본 등도 유사한 조치를 준비 중이다.

이렇듯 국내·외 제조환경의 지속적 변화에 따른 녹색기술 및 에코 디자인의 대두에 따라 환경부하 최소화와 에너지 효율을 향상시키는 관점에서 소재의 효율성 증, 소재이용률 또는 재료이용률을 향상시키는 것이 탄소배출을 줄이는 대표적 방법으로 제시되고 있는 것이 최근의 실정이다.

2. 재료이용률 향상 적용을 위한 차세대 압출공정

2.1 재료이용률의 정의

소재의 효과적 이용을 강조하는 소재 효율성의 의미는 소재이용률을 향상시키는 것이 가장 큰 핵심이라고 여겨진다. 소재이용률과 재료이용률은 거의 같은 의미로 사용하는데, 소재이용률은 전문적인 분야에서의 설명 보다는 일반적으로 탄소 배출량을 줄이기 위한 수단으로써 모든 소재에 대한 부품 또는 제품 제조에 따른 효율성 또는 이용률 향상을 의미한다. 한편 재료이용률 향상은 전문가적 입장에서 제조의 전체 공정 중 각각의 공정에서 발생하는 소재이용률 향상을 기술할 때 주로 사용하고 있다. 물론 소재이용률과 재료이용률을 같은 의미에서 사용하여도 큰 뜻의 차이는 없다고 말할 수 있다.

재료이용률 향상은 주로 초기에는 판재 제품의 블랭킹(Blanking)이나 피어싱(Piercing) 공정에서 이용했던 개념으로 재료를 어느 정도 효과적으로 이용할 수 있는가를 판단하기 위해 사용하였으며, 제품의 면적과 소용되는 재료의 면적에 대한 비율을 말하고 있다. 한편으로는 재료 중량을 소재나 빌렛(Billet)의 중량으로 나눈 비율을 말하기도 하며 다음과 같이 정의하여 사용한다⁵⁾.

$$\begin{aligned}
 \text{재료이용률} &= \frac{\text{제품중량}}{\text{재료중량}} \times 100\% \\
 &= \frac{\text{제품 면적} \times \text{제품의 열수량}}{\text{재료 폭} \times \text{재료 이송피치}} \times 100\% \text{ (복열적용)} \\
 &= \frac{\text{제품 면적}}{\text{재료 폭} \times \text{재료 이송피치}} \times 100\% \text{ (단열적용)} \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

위와 같은 재료이용률의 정의는 모든 소재에 적용가능하고 특정 공정으로 적용을 확대시킴으로써 최근에는 모든 부품 또는 제품 제조에 있어서 사용하고 있다. 또한 재료이용률의 정의 중 재료 및 제품의 중량으로써 나타낸 첫 번째 항목이 다른 항목들에 비하여 범용적인 공정에 주로 적용하고 있는 개념이라고 하겠다.

2.2 차세대 압출공정을 이용한 재료이용률 향상

일반적으로 소성가공에서의 압출공정은 둥근 빌렛(Billet)을 컨테이너(Container) 안에 넣고 램(Ram)으로 밀어서 압력을 가하여 둥근형상이나 그 이외의 각종형상의 구멍을 갖는 금형(Die) 사이로 소재를 통과시켜 일정한 단면형상을 얻는 공법이며, 재료로는 주로 알루미늄, 구리, 마그네슘 등을 이용한다.

그러나 1장에서 설명처럼 녹색기술 및 친환경 공정의 필요성이 급증함에 따라 재료이용률 향상을 지향하는 차세대 압출공정의 대두가 필요하게 되었다. 이에 발맞추어 압출공정에서의 최대 특징인 공정 중에서의 일정단면형상에 변화를 가하는 방법을 시도하게 되었으며 이를 가변단면 압출(Varied section extrusion, VSE)공정이라 부르게 되었다. 아직은 선진국 중에서도 일본 정도가 시도하여 초기 양산화 공정 적용을 서두르고 있으며, 국내 연구진들의 개발도 함께 이루어지고 있는 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 차세대 압출공정으로 재료이용률 향상을 위해 제안되고 있는 직접압출(Direct extrusion) 종류인 신복합 압출공정인 가변단면 압출에 대하여 상세히 알아보려고 한다.

2.3 가변단면 압출(Varied Section Extrusion, VSE)공정의 개요

국가 산업 기술수준의 척도로서 국가 경쟁력의 상징적 지표가 된 자동차 산업은 기술집약적 산업특성과 대·중소기업 상생 협력적 산업특성으로 산업적 비중이 더욱 증대되어, 국가의 중요 기간산업으로서의 인식이 더욱 심화되고 있다. 따라서 브랜드(Brand)가치 고도화를 통한 시장지배를 위하여 기술적으로 극심한 무한 경쟁 시대를 맞이하고 있다. 세계 메이저 자동차들(GM, Toyota)의 비교평가에서 판단할 수 있듯이, 기술의 고도화와 원가의 합리화가 글로벌 경쟁에서 매우 중요한 요소가 되고 있다. 국내 자동차 산업의 질 좋은 성장을 위하여 노력을 경주함에 있어서 이 부분이 시사하는 바가 크다고 하겠으며, 글로벌 환경에서 브랜드 가치가 제일 중요함을 재론의 여지가 없으며 이는 고도의 경영기술 및 생산 기술에서 창출됨은 주지의 사실이다^[6-10].

기술고도화의 중심에는 신 엔진개발, 신 파워트레인, IT결합, 신소재 응용 등이 있으나, 단기적으로 가장 효과적이고 확실한 투자는 IT결합과 신소재 응용기술의 개발이라는 것이 정설이라고 할 수 있다. 또한 자동차의 무게를 감소시키는 경량화 기술은 배기가스의 규제, 연비 향상 등을 경제적이고 효과적으로 달성할 수 있기 때문에 상대적으로 파위가 부족한 신엔진 및 대체 연료 자동차와 같은 차세대자동차의 실용화를 앞당기는 핵심기반 기술이다^[6].

알루미늄(Aluminum)을 중심으로 한 경량소재는 상대적으로 비용이 비싸고(AI 소재원가는 철계 대비 4-5배), 제조 기술에 대한 노하우(Know-how)가 부족하여 소재부터 제조, 조립에 이르는 제조공정 전반에 대한 획기적인 기술도약(Quantum Jump)이 필요하다.

이와 같은 기술 극복을 위한 한 가지 대안으로서 압출제의 단면을 압출과 동시에 변화시키는 가변단면 압출기술이 개발되고 있다. 기존의 공정에서는 자동차 프레임 제품을 생산함에 있어서, 프레임 압출 후에 단면의 형상을 변화시키는 공정을 이용하였으나, 신 가변단면 압출기술은 압출기 내에서 압출과 동시에 단면을 변화시키는 공정 기술을 개발함으로써, 경량소재의 약점 중에 하나인 높은 생산원가를 낮추려는 의도이다. [그림 2]은 시대요청에 따른 CNC(Servo) 제어 가변단면 압출기술의 필요성을 요약하여 설명하고 있다.

신복합 압출공정으로써 CNC 제어 가변단면 압출기술은 기존의 알루미늄 등 경량합금 압출로는 불가능했던 자동차 부품의 압출성형체 제조를 가능하게 하였으며, 알루미늄 주조제나 압출제들의 연결이나 결합에 의해서만 제조되었던 자동차 차체 부품들의 성형을 용이하게 하여 국가의 부품제조 및 성형기술의 경쟁력 확보에 한축을 담당할 수 있을 것이다. 또한 CNC 제어 가변단면 압출을 적용함으로써 공정의 복합화라는 기존 성형공정의 결합과는 다른 개념의 기술분야를 개척하게 되었으며 이를 바탕으로 세계를 선도하는 리딩 기술을 국내 연구진이 주체적으로 앞당겨 실현할 수 있게 되었다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 최초로 본 연구팀이 개발한 CNC 제어 가변단면 압출기술을

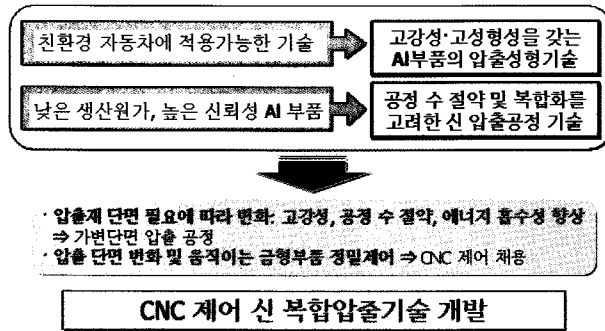


그림 2. 가변단면 압출기술의 필요성

소개하고자 하였으며, 가변단면 압출을 실현하기 위한 CNC(Servo) 제어, 압출금형 및 성형시스템에 초점을 맞추어 기술하고자 한다.

2.4 가변단면 압출공정

2.4.1 가변단면 압출공정의 특징

가변단면 압출은 봉이나 튜브를 압출하는 일반적 압출공정 중에 압출방향과 수직된 방향으로 움직이는 금형을 이용하여 압출재의 단면을 변화시키는 신 공정으로 [그림 3]에 가변단면 압출의 원리를 위한 개념도를 나타내었다. 압출공정 중에 단면을 변화시키기 때문에 적절히 사용할 경우 후속 공정(하이드로 포밍, 절곡 등)을 삭감하여 알루미늄 등과 같이 소재비가 철계에 비하여 상대적으로 높은 신소재의 상용화 및 원가 절감에 효과적인 공정이라고 할 수 있다.

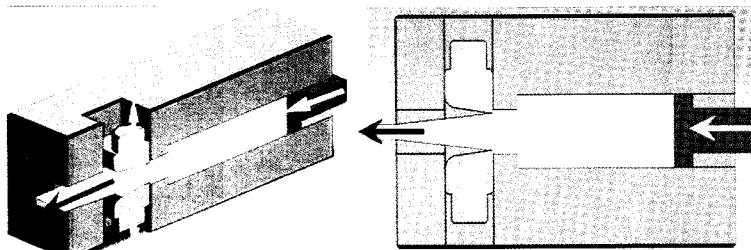


그림 3. 가변단면 압출공정의 개념도

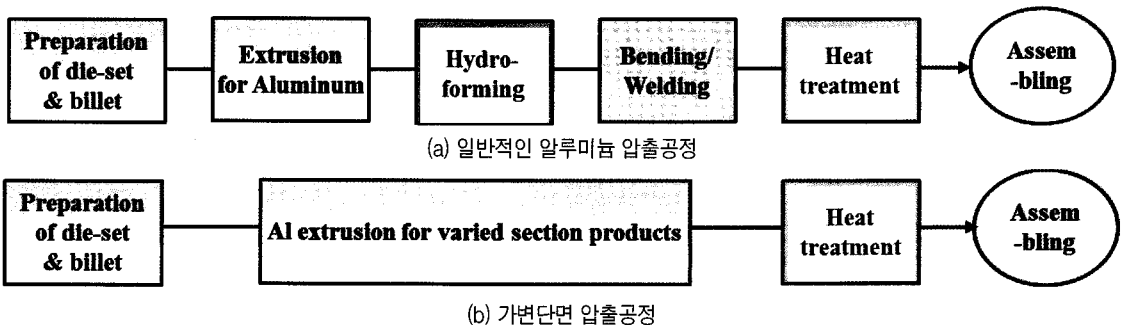


그림 4. 자동차 서브 프레임 제조공정 비교⁶⁾



[그림 4]에서는 가변단면 압출공정이 기존 서브프레임(Sub-frame) 제작 공정에 비하여 상당히 단순화되어 있어 원가절감에 유리하는 것을 알 수 있다. 낮은 생산원가와 신뢰성 높은 알루미늄 부품을 생산하기 위한 공정 수 절약과 신공정 복합화를 토대로 가변단면 압출공정은 적용되고 있고 앞으로 응용제품들의 개발이 좀 더 시급히 이루어져야 할 것이다.

2.4.2 대상제품군

본 연구에서 대상으로 하고 있는 알루미늄 압출체는 자동차 프레임용으로서, 현재 각 자동차 메이커는 자동차 경량화를 위하여 프레임 등에 알루미늄 압출재를 [그림 5]에 예시된 것처럼 상당부분 채택하고 있다. 이와 같이 압출 공정을 통하여 제조되는 자동차 프레임류 중에서 가변단면 압출을 적용할 경우, 효과를 볼 수 있는 제품은 상당한 많은 종류가 있는 것으로 파악되고 있다. [표 1]은 본 연구에서 조사하여 그 타당성을 검증한 알루미늄 압출체 중 가변단면 압출공정 적용이 가능한 자동차 부품들의 종류를 그룹별로 나누어서 보여주고 있다.

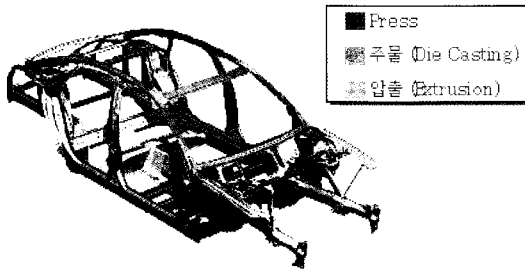


그림 5. 알루미늄 압출재 적용 예 (Alcoa社 개발)

표 1. 가변단면 압출공정의 적용이 가능한 자동차 부품

Group	Parts name for automobiles
1	Seat Rail, Bus Seat Frame, Seat Frame, Bumper Back Beam
2	Space Frame, Engine Frame, In Pannel, Front End Carrier
3	Front Side Member, Under Frame, Sub Frame, Space Frame
4	knuckle, Lower Arm, Upper Arm, Shock Absorber, Outer Tube, Cross Member

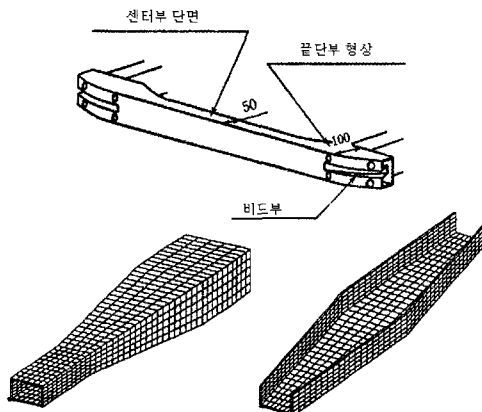


그림 6. 가변단면 압출공정을 응용한 제품들⁽¹¹⁾

또한 [그림 6]에서는 CNC 제어 가변단면 압출공정을 응용한 제품들의 구체적 예를 제시하였으며, 압출금형의 구조를 개선하면 가변단면의 형상이 폐곡선 형태의 중실 제품 뿐만 아니라 중공형태를 갖는 튜브제의 압출 성형체 제조도 가능하다고 판단된다.

2.5 CNC 제어 가변단면 압출용 금형

2.5.1 CNC 제어 가변단면 압출 메커니즘과 금형 구조

일반적인 알루미늄 압출금형 구조는 [그림 7]의 (a)에 표시하였다. 가열장치를 이용하여 원소재(Billet)를 일정한 온도 가열한 뒤 컨테이너(Container)에 집어넣은 후 메인 램(Main ram)을 동작시켜 원소재를 금형(Die)의 압출구(Exit)를 통하여 요구하는 단면형상을 갖는 압출성형체로 제조하는 구조이다. 또한 메인 램의 전진속도에 따른 작용 하중은 볼스터(Bolster)와 플래튼(Platen)에 장착된 압력 링(Pressure ring)이 분산시켜 압출기나 금형의 손상을 방지하는 역할을 수행한다.

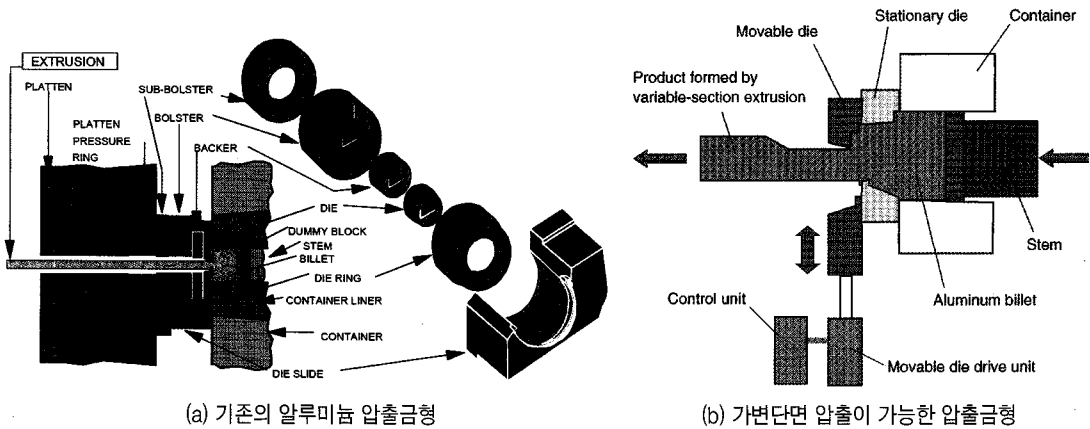


그림 7. 압출금형 구조의 비교^[12]

가변단면 압출금형(Die-set for varied or variable-section extrusion)은 기존의 압출금형(Typical extrusion die-set)과는 상이한 구조로 [그림 7]의 (b)에 그 메커니즘과 구조를 함께 나타내었다. 가변단면 압출금형에는 압출단면의 변화에 기여하는 이동금형(Moving die)과 고정적인 형상단면의 압출구를 갖는 고정금형(Stationary die)이라는 두개의 주요 금형으로 나뉘고 이동금형을 움직이게 하는 동력원으로써 유압 CNC(Servo)제어가 가능하도록 구동 및 제어모듈이 연결되어 있다. 물론 원소재와 메인 램 구동은 기존 압출금형과 동일하며, 가변단면 형상을 갖는 알루미늄 압출 성형체를 제조하기 위한 이동금형의 CNC 제어와 이에 따른 단면형상의 정밀제어를 용이하게 하기 위한 메인 램 부분의 속도제어는 서보시스템으로 피드백 되도록 하여 전체 유압시스템을 유기적으로 작동·구현시켰다.

2.5.2 CNC 제어 가변단면 압출금형

본 연구팀에서 개발한 CNC 제어 가변단면 압출용 금형의 개념도를 [그림 8]에서 표현하고 있다. 메인 램의 이송은 서보펌프 적용에 따라서 최고 25mm/sec를 갖는 속도로 제어가 가능하고 이송금형의 구동은 서보벨트를 사용하여 속도 및 변위변수를 이용하여 제어하는 방법을 사용하였다. 기존의 알루미늄용 압출시스템의 상당 부분을 CNC(Servo) 제어가 용이하도록 개선시켰다. 일반 압출공정에서 제품의 정밀도에 영향을 미치는 주요 변수는 소재의 특성, 소재의 온도, 금형의 온도, 압출 속도, 금형의 형상, 운환 조건 등이다. 따라서 정밀 제품을 생산하기 위하여서는 적절한 금형 및 공정설계가 필수적이다. 여기에 가변단면 압출은 1개 또는 2개 이상의 금형부품을 상대적으로 이동

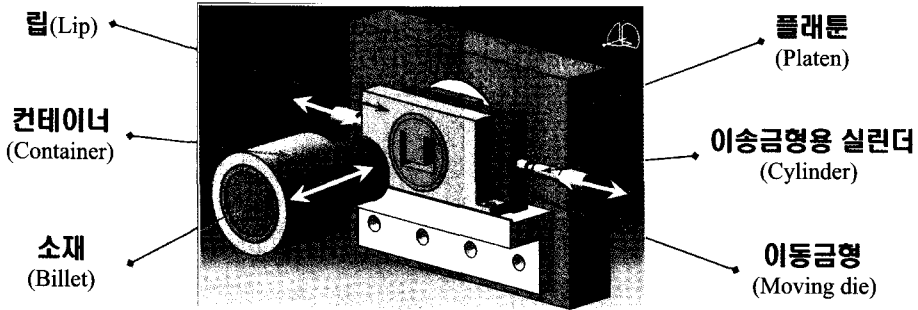


그림 8. CNC 제어 가변단면 압출공정의 금형설계 개념도

시커야 하기 때문에 추가적인 고려를 해야 하고 금형은 가능한 견고한 구조를 갖도록 설계하고 제작되어야 한다. 또한 추가적으로 금형간 이동에 따른 승동부 설계나 온도편차에 따른 열팽창 등도 가변단면용 압출금형 설계시 참고해야 하며, 상대 부품들과의 간섭 및 변형정도 등도 함께 고려해야 할 주요 설계인자이다.

[그림 8]에 나타낸 가변단면용 압출금형은 컨테이너(Container)로부터 접촉되는 부품을 순서대로 나열하면 립(Lip), 전방 이동 금형(Front moving die), 후방 이동 금형(Rear moving die), 볼스터(Bolster) 이며 압출기의 플래튼(Platen)에 상·하 금형 슬라이드(Upper·lower die slide)가 장착되며 립(Lip)은 상/하 금형 슬라이드에 조립되는 형태로 금형의 안정성 및 조립의 용이성을 확보하게 된다. 성형하중은 립에서 집중적으로 컨테이너에 의해 받게 되며, 일부하중은 상/하 금형 슬라이드로 분산되고, 또 다른 하중은 전방 이동 금형을 거쳐 후방 이동 금형에 전달되어지고 궁극적으로 볼스터를 거쳐 플래튼이 전달받게 된다. 아래는 최적화된 CNC 제어 가변단면 압출금형을 설계/제작하기 위해 필수적으로 고려되어야 하는 항목들을 정리하여 제시해 보았다.

- 립(Lip)이 받는 압출하중의 분산을 고려한 금형구조의 설계
 - 상/하 금형 슬라이드 구조 및 형상을 고려
 - 립에 직접 닿는 또 다른 부품인 전방 이동 금형 구조 고려
- 전방 & 후방 이동 금형의 이동 경로, 공차 및 편이성 확보
 - 열간 압출시에 발생 가능한 열팽창을 고려한 설계
 - 미끄럼 부위 즉, 립(Lip)과 볼스터 사이에서의 전방 이동 금형, 전방 이동 금형과 볼스터 사이에서의 후방 이동 금형에 대한 공차 설계
 - 금형부품들의 미끄럼이나 압출 부위에 대한 열처리나 코팅 등의 유무 및 그에 따른 선택과 특징별 적용가능성에 대한 고려
- 압출 금형 세트 조립 및 유지 보수 용이
 - 일체형 설계의 가능성 및 구조 확보
 - 전방/후방 이동 금형 교체의 용이성 확보
- 가변되는 압출성형체의 굽힘이나 휨 및 형상단면을 최종 결정하는 베어링 길이(Bearing or land length) 설계
 - 압출전문가의 권고에 따른 설계
 - 유한요소 해석 및 분석도구를 통한 수정 및 보완

2.6 CNC 제어를 위한 가변단면 압출시스템

2.6.1 CNC 제어 가변단면 압출시스템 용량

가변단면 압출기의 적정 용량을 결정하기 위하여 본 연구 대상으로 검토하고 있는 제품군에 대하여 압출하중을

참고문헌의 실험식을 통해 예측하였다. 초기 원소재(Billet)의 직경을 실험이 가능한 적정한 크기로 선정한 경우, 최대 압출성형하중이 460톤 정도로 계산되었다. 따라서 본 연구팀은 압출기 용량을 대략 600톤 급으로 선정하여 설계 및 제작을 진행하였다. 또한 압출계의 단면형상의 가변이 가능토록 금형의 움직임에 책임지는 유압실린더의 장착이 매우 필요한 요소이므로 이를 위한 측면이송용 하중의 용량도 계산하여 제시하였다. [그림 9]에 나타난 바와 같이 봉재의 단면을 가변시켜 가변단면 압출을 표현하고 이를 유한요소해석을 이용한 모의실험(Simulation)으로 진행하여 본 결과, 측면의 이송금형을 움직이기 위한 측면 실린더의 하중은 메인 램 성형하중의 약 1/9배로 계산되었다. 따라서 600톤의 가변단면 압출기 최대용량에서 금형이동이 가능하도록 가변용량을 100톤으로 선정하여 금형이동을 위한 실린더를 포함한 장치를 설계 및 제작하였다.

[그림 9]에서 이동 금형(Rear/front moving die)이 계속해서 좁아지는 방향으로 움직임이 일어나는 압출공정을 제시하면서 가변단면 압출 성형체의 하중선도를 분석한 것이다. 메인 램 및 이동 금형은 일정한 속도로 움직이면서 메인 램이 10.0 mm 정도를 움직였을 때는 이동 금형에 작용하는 성형하중이 메인 램보다 1/9 정도 적게 나타나고 있으며, 압출비가 38 정도를 지날 때 메인 램의 성형하중은 약 9배 정도로 분석되고 있다.

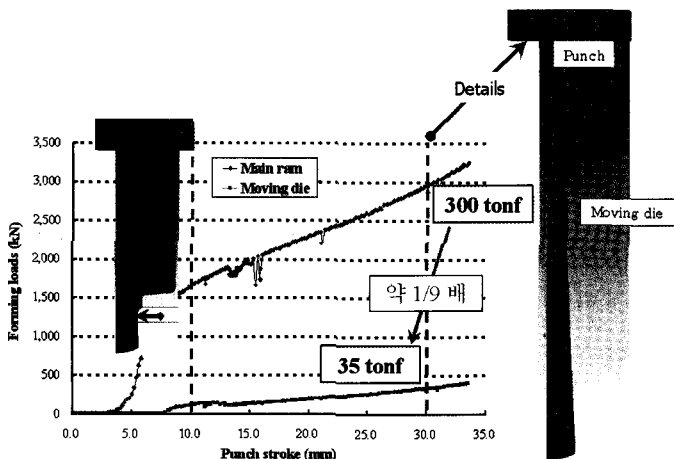


그림 9. 2-D 유한요소 해석에 따른 성형하중의 분석

가변단면 압출공정은 일반 압출과 달리 압출 중에 소재의 단면형상이 변화되며, 이러한 변화 공정 중에 압출 속도와 압출방향에 수직인 금형 이동속도가 일정한 범위 내에서 적절하게 조절되고 동조되어야 한다. 특히 본 연구에서 제작하는 새로운 압출시스템은 가변단면 압출 공정의 상용화 및 양산화를 위한 공정/장치의 주요 변수 파악과 적용에 사용되어야 하므로, 다양한 속도와 여러 하중 조건에서 실험이 가능하도록 설계 및 제작되어야 한다. 따라서 메인 스템(Main stem)은 서보 펌프(Servo pump)로 제어하고, 금형이동은 서보밸브(Servo valve)를 사용하여 제어하는 형태로 구성되었다.

2.6.2 CNC 제어 가변단면 압출시스템

CNC 제어가 가능한 가변단면 압출시스템의 설계 Layout은 [그림 10]에 나타내었다. 금형 이송부, CNC 제어시스템 적용부 및 주요 조립부를 보여주고 있으며, 기존 알루미늄 압출기를 변형·발전시켜 가변단면이 용이토록 금형 이송부, 압출 및 금형 이동속도 제어를 위한 CNC 제어시스템 및 금형 장·탈착이 가능하도록 필요 장치가 조립 가능하도록 설계 및 제작을 완성하였다.

[표 2]는 CNC 제어 가변단면 압출시스템의 주요 사양을 나타내고 있다. [그림 10]에 제시된 설계 Layout에 따라 설계 및 제작된 압출기의 주요 제원에 따르면 용량은 최대 600 tonf를 갖고 압출시스템의 전체 크기는 길이는 약

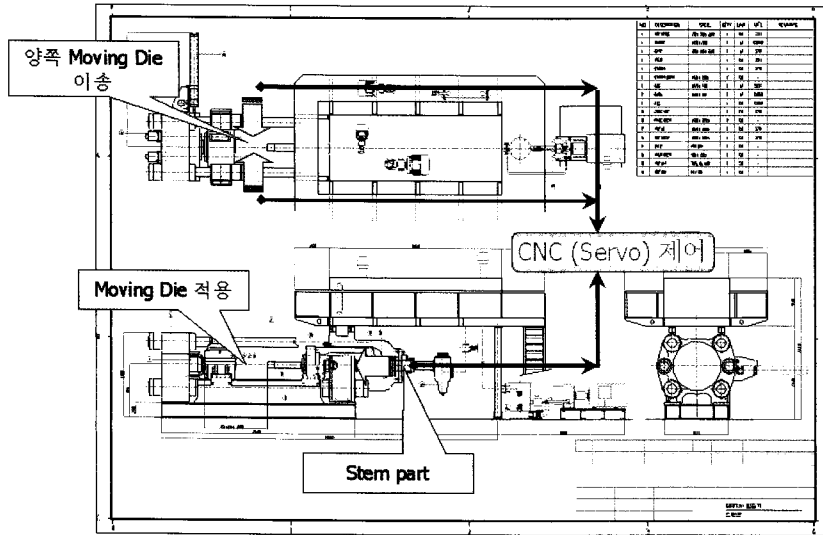


그림 10. 가변단면 압출이 가능한 CNC 제어 압출성형 시스템 레이아웃(lay-out)

표 2. CNC 제어 가변단면 압출시스템의 주요 사양

Item	Description
Capacity	Max. 600 Tonf
M/C size (L × W × H)	7,700 mm × 2,500 mm × 3,100 mm
Container size (L × W × H)	465 mm × 595 mm × 487.5 mm
Moving die-set (L × W × H)	500 mm × 500 mm × 250 mm

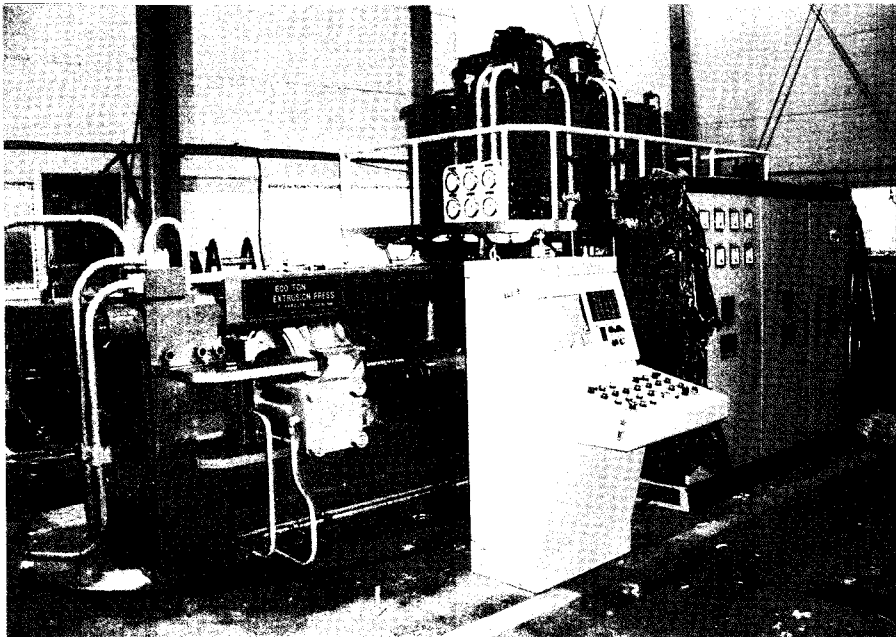


그림 11. 개발된 CNC 제어 가변단면 압출시스템

7.7m이고 높이는 3.1m 이며 폭은 대략 2.5m로 일반 압출기보다 이동 금형의 장착을 위한 양방향 금형 브래킷 (Bracket)이 추가됨에 따라 폭은 다소 커져 전문적으로 가변단면 압출용으로 사용이 가능하도록 추가 설계 및 제작 되었다. [그림 11]은 위와 같은 제원을 갖는 설계 및 제작을 통하여 본 연구팀이 개발한 국산 1호 CNC 제어 가변단면 압출시스템의 외관을 보여주고 있다.

2.6.3 CNC 제어와 유압시스템

CNC 제어 가변단면 압출기술 개발을 용이하게 하기 위해서는 가변단면용 압출시스템의 주요 부분인 메인 스템 (Main stem)과 가변단면 압출금형에서 전방/후방 이동 금형(Front /rear moving die)을 위치를 제어하는 CNC (Servo) 시스템 및 두 위치를 서로 동조시키는 회로시스템의 구현에 있다. [그림 12]에서는 가변단면 압출기술 개발을 위해 CNC(Servo) 제어를 필요로 하는 위치요소들을 열거하여 나타내었다. 메인 스템을 움직이는 메인실린더 (Main cylinder) 및 전방/후방 이동 금형의 움직임을 담당하는 이동용 실린더 (Moving cylinder) #1, 2가 CNC 제어를 필요로 하는 부분으로 서보 펌프(Servo pump)나 서보 밸브(Servo valve)를 채용해야 하며, 메인 스템과 이동용 실린더 #1, 2를 동조시키는 피드백 유압회로 시스템을 완성시키면 가변단면 압출시스템을 위한 적절한 제어시스템을 완성시킬 수 있게 된다.

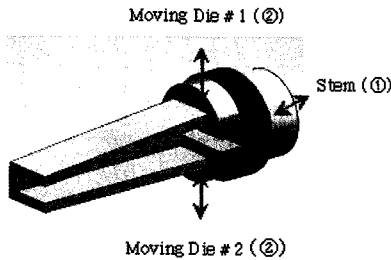


그림 12. 가변단면 압출 공정 구현을 위한 CNC (Servo) 제어 주요부

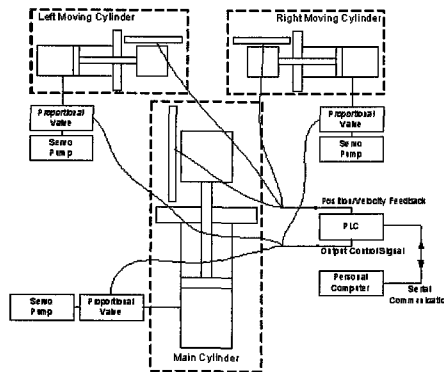


그림 13. CNC (Servo) 제어를 위한 회로도

메인 스템(Main stem or ram)을 움직이는 실린더의 동작은 유압펌프로 동력원을 사용하게 되며, 실린더의 미세 이동을 위한 서보 제어를 위해서는 서보 펌프를 이용하거나 펌프와 실린더 중간에 서보 밸브를 삽입시켜 제어하는 방법이 있다. 또한 전방/후방 이동 금형을 움직이는 두개의 이동용 실린더는 유압실린더로서 서보밸브를 채용하여 서보 제어를 구현하는 것이 일반적인 방법으로 전문가들로부터 추천되어진다. 그러나 두 개의 이동용 실린더에 공급 되는 유압을 하나의 펌프로 선정하느냐 두개의 펌프를 사용하여 각각의 이동용 실린더에 유압을 공급하느냐 하는

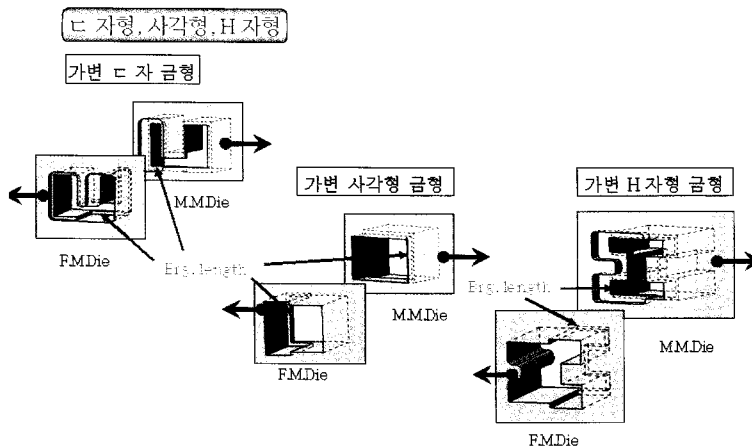
것도 서보 제어의 응답속도나 두개의 이동용 실린더 동조 시 서로의 속도차이가 발생할 수 있어 경험 있는 유압전문가 및 현장데이터를 수집하여 결정 내려야 한다. [그림 13]은 폐회로(Closed-loop) 구현에 기반한 제어 회로도를 위의 제어시스템 설명과 일치시켜 알기 쉽게 나타내고 있다. 가변단면을 위한 압출금형세트에서의 이동금형부품들(Front/rear moving die-F.M.Die/R.M.Die)을 좌/우 이동용 실린더(Right/left moving cylinder)가 담당하고 메인 램의 속도제어는 서보펌프를 채용하여 제어하며, 이들 시스템에 대한 제어변수들을 폐회로(Closed-loop)로 구현하여 가변단면 압출용 제어시스템을 구현하였다.

2.7 가변단면 압출공정의 유한요소해석

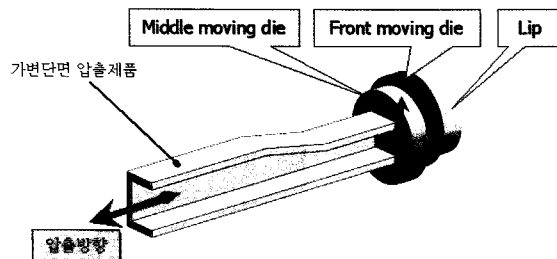
2.7.1 가변단면 압출용 금형 모델링

가변단면 압출공정의 3차원 유한요소해석을 위하여 Deform-3D를 사용하였으며 빌렛을 포함한 모든 부품들은 솔리드 모델링을 사용하였고 소재는 알루미늄 AA6061을 적용하였다. 재료의 모델링은 강소성(Rigid-plastic) 방법을 사용하였으며 나머지 금형부품들은 강체(Rigid body)로 가정하여 초기 마찰조건을 부여하였다.

후방 이동 금형(Rear moving die/R.M.Die or middle moving die/M.M.Die)이 이동함에 따라 ‘ㄷ’자 단면형상의 압출재의 변화를 해석/분석하게 된다. 해석 대상으로써 제품 단면 형상은 ‘ㄷ’자와 ‘H’자이며, 그에 따른 금형설계형상들을 [그림 14] 및 [그림 15]에 나타내었다. [그림 14]에서는 M.M.die라는 금형 부품이 이동하여 압출재의 단면을 가변시키는 역할을 수행하며 ‘ㄷ’자의 한쪽 폭을 가변시킨 압출재는 (b)에 나타내었다. 사각형에서 한쪽의 폭을 증가시켜 넓은 직사각 형태를 갖는 가변단면 금형과 두께가 일정하면서 한쪽 폭을 변화시키는 ‘H’ 가변단면용 금형의 모델링을 [그림 14]의 (a)에 함께 도시하여 나타내었다.



(a) 가변단면 형상 분류에 따른 금형 형상 모델링



(b) 두께가 동일하고 한쪽 폭이 넓어지는 渡冊자 가변단면형상 압출제

그림 14. 3차원 가변용 ‘ㄷ’자, 사각형 및 ‘H’자 금형 형상과 압출제

[그림 15]에서는 두께가 가변되는 압출제 및 금형 모델링을 함께 표현하고 있다. 'c' 자에서 한쪽만의 두께를 가변시켜 유용한 자동차 부품으로 사용하려고 하는 시도이며 'H' 형상에서 중간두께의 가변형상은 일정 부위에서 요구강도를 높게 필요로 하는 경우에 유용하게 사용할 수 있는 가변단면 형상의 금형과 압출성형체이다.

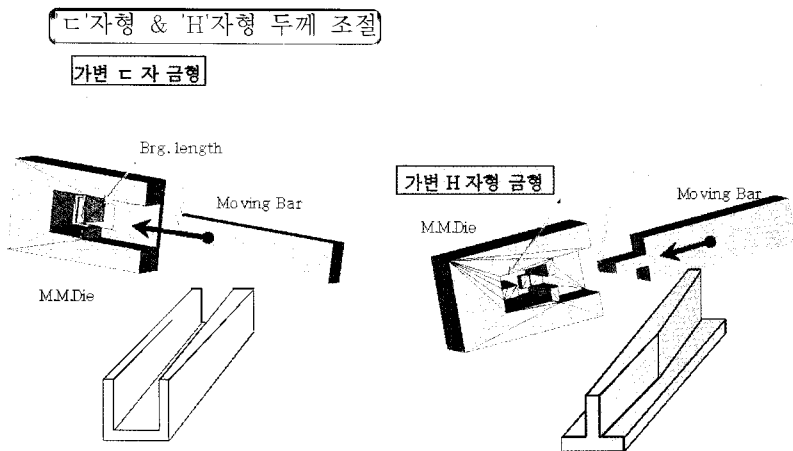


그림 15. 3차원 가변용 'c' 자 및 'H' 자 두께 조절 금형 형상

2.7.2 가변단면 압출공정 변수에 따른 유한요소해석

[그림 16]은 'c' 자형태의 가변단면이 이루어지는 압출과정에서 압출계의 온도분포를 분석해 보았으며, 결과론적으로 압출과정의 중간에 형상 단면적을 강제적으로 바꾸게 되면 압출제의 꼬임현상이 발생할 수 있음을 예견하고 있다. 압출과정에서의 성형체의 온도분포는 우선 원소재(Billet)의 가열온도에 좌우된다고 하겠다. 보통 알루미늄은 450-480℃ 정도로 예열되어 컨테이너에 삽입시키게 되며 메인 램을 이송시켜 압출공정을 진행하게 되는데 이에 따라 소재는 립(Lip)과 이동금형(Front/middle moving die)을 거쳐 압출구(Extrusion exit)를 빠져나가게 되며 립을 거치는 동안 소재의 냉각이 많이 이루어지게 됨을 해석을 통해 분석가능하다.

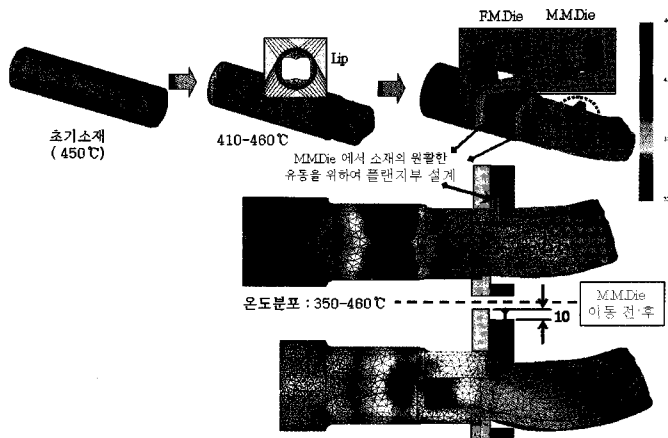


그림 16. 유한요소해석에 따른 온도 분포 결과

[그림 16]에서 플랜지부라고 명명된 형상은 M.M.die에 가공된 부분으로 소재의 압출유동성을 확보하여 가변단면

압출이 용이하도록 도와주는 역할을 부여하기 위해 형성시킨 것이다. 본 해석에 있어서 주의점은 가변단면 형상의 압출과정을 진행함에 있어서 이동금형 특히 M.M.Die는 한쪽 방향으로만 이동시켜 분석결과들을 정리하였다.

[그림 17]에서는 플랜지의 유·무에 따라 가변단면 압출체에 나타나는 꼬임 또는 휨 현상의 측면에서 플랜지부의 유·무와 플랜지부의 두께 크기 변화에 따른 유한요소해석의 결과들을 분석하여 정리·제시하였다.

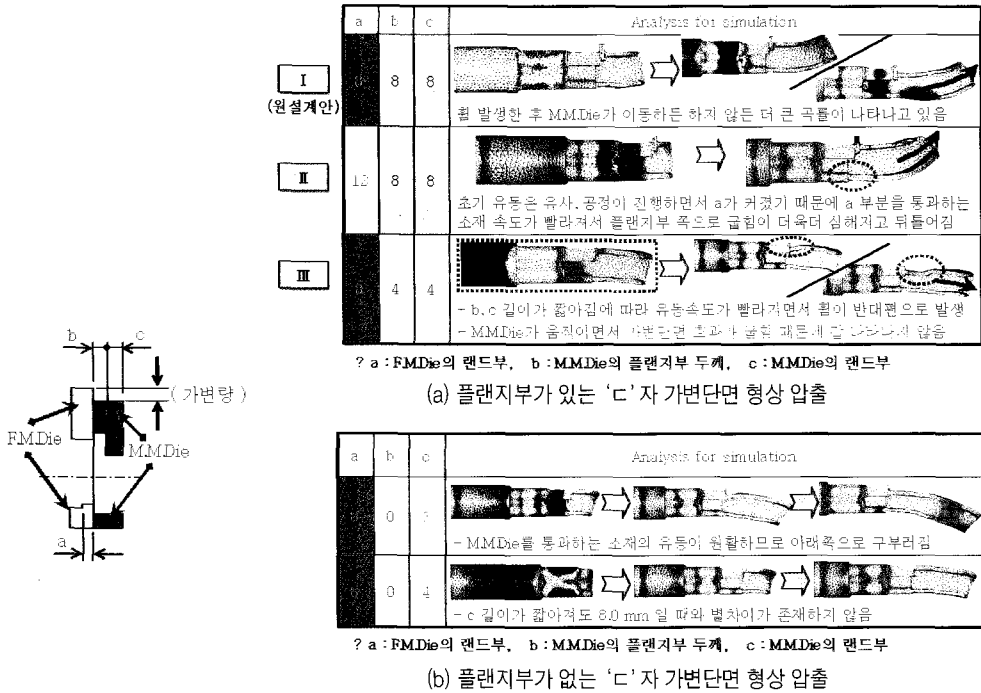


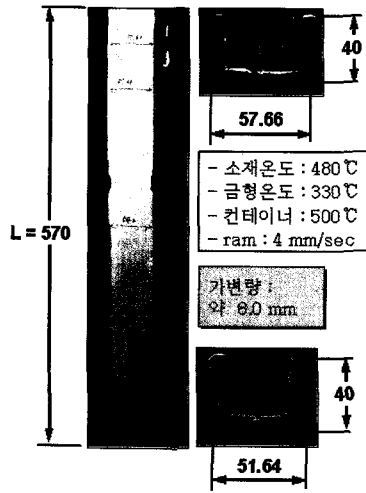
그림 17. 플랜지부 유·무에 따른 유한요소해석 결과

2.8 가변단면 압출성형체 분석

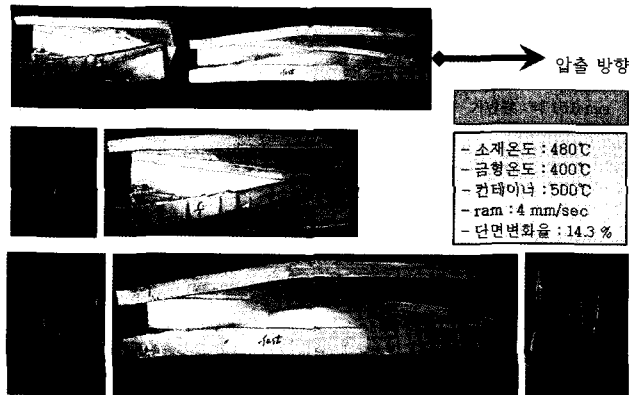
2.8.1 'c' 자 가변단면 압출체

[그림 18]에서는 'c' 자 가변단면 형상에서 두께가 일정한 상태에서 한쪽 폭을 변화시켜 가변단면 압출을 시도하는 압출성형체를 나타내고 있다. 소재로는 알루미늄 6063을 사용하였고 압출공정조건들은 기존 압출업체들의 양산 조건을 따랐다. (a)에서는 가변량이 비교적 작은 6mm 정도를 변화시켜 제품과 압출금형 및 압출시스템에 대한 적용성 및 문제점들을 파악하였고 (b)에서는 가변량을 약 15mm 정도로 증가시켜 압출금형을 포함하여 가변단면 압출시스템에 대한 전체적인 점검항목들을 열거하여 그것을 토대로 분석하였다.

가변량이 적은 (a)에서는 압출성형체의 꼬임 정도가 그리 심하지 않았지만, 가변량이 큰 (b)의 압출성형체에서는 심한 꼬임 현상이 발생하였다. 물론 실제 압출업체에서는 압출기 후면에 추가적 설비를 장착하여 압출성형체의 꼬임 현상에 인장력을 가하는 장치를 설치한다. 즉, 압출금형의 압출구를 통하여 제품이 나오게 되면 특정 부분을 집게 같은 지그를 통해 잡은 다음 인장력을 가하여 꼬임이나 휨 등을 방지하는 설비를 갖추고 있다. 본 연구에서는 양산용 후면 설비를 갖추고 있지는 않지만 CNC 제어 가변단면 압출에 있어서 취약점은 이동금형의 움직임에 따라 랜드부가 이동한다는 것이다. 이것은 알루미늄 압출에 있어서 취약한 공정조건을 초래한다고 판단할 수 있으며 랜드부 이동에 따라 압출성형체 단면형상의 도심변화가 꼬임현상을 증폭시킨다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 가혹한 공정조건을 개선시키기 위한 가변단면용 압출금형의 구조개선이나 이동금형에 생성되어 있는 랜드부의 길이조정 메카니즘 등 여러 가지 다양한 방법들을 연구하여 그 정당성을 증명해 나아가야 할 것이다.



(a) 가변폭의 변화를 긴 구간에서 진행시킨 압출 성형체(가변량 5mm)



(b) 가변폭의 변화를 짧은 구간에서 진행시킨 압출 성형체(가변량 15mm)

그림 18. 'C'자 가변단면 폭 변화 압출 성형체 분석

[그림 19]는 두께의 변화를 수반하는 'C'자 가변단면 압출에 대한 성형실험의 결과물들을 보여주고 있다. 'C'자형태의 단면 형상에서 한쪽 두께를 두껍게 하거나 얇게 성형하여 필요한 부분의 설계 요구조건을 만족시키는 압출성형체에 대한 실험의 결과들로서 [그림 18]에서 행하여진 두께가 일정한 상태에서의 폭변화에 따른 가변단면 압출과는 상당히 다른 압출성형체의 단면형상을 제공하고 있다. 물론 [그림 18]에서 사용한 가변단면 압출용 금형 구조에 두께부분을 책임지는 랜드부의 구조를 변형시킨 결과 [그림 19]와 같은 형태의 압출성형체를 얻을 수 있었다. [그림 18]과 [그림 19]에 나타난 압출성형체들의 가변

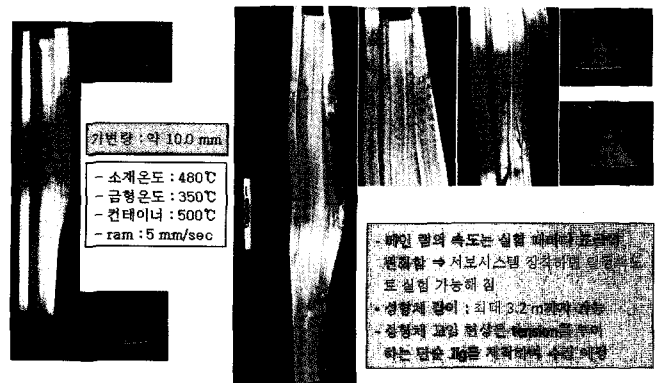


그림 19. 'C'자 가변단면 공정의 한쪽 두께 변화 압출 성형체 분석

량에 따른 단면형상의 변화는 메인 램의 속도와 가변을 위해 채용된 이송용 실린더의 속도가 적절한 동조를 갖추고 있어야 함은 주지의 사실이며 단면형상의 변화를 책임지는 가변구조 및 가변메커니즘은 많은 연구와 실험에 따라 최적의 상태를 찾아가야 하는 어려운 작업이다.

2.8.2 'H' 자 가변단면 압출제

가변되는 단면형상에 따라 압출성형체의 이름을 명명하고 있다. [그림 20]에서는 'H' 자 가변단면형상의 압출성형체 실험 결과물들을 보여주고 있다. 'H' 자 형상에서 중앙의 두께를 단계적으로 두껍게 가변시킨 실험결과이다. 중앙의 두께를 변화시킨 경우 필요부분의 강도를 강화시킨 경우가므로 산업체 여러 부분에서 많은 사용이 예측되고 있으며, 한편으로는 얇은 두께를 요구하는 설계 조건에는 기계가공량을 줄이는 역할을 수행하기도 한다. [그림 18-20]의 실험결과들은 가변단면 압출로 제조할 수 있는 극히 일부의 예들을 선택하여 실험한 결과물들이며 필요에 따라서 단면형상을 사각형 및 속이 빈 형태의 형상들도 함께 본 CNC 제어 가변단면 압출공정을 통하여 성형될 수 있을 것이다.

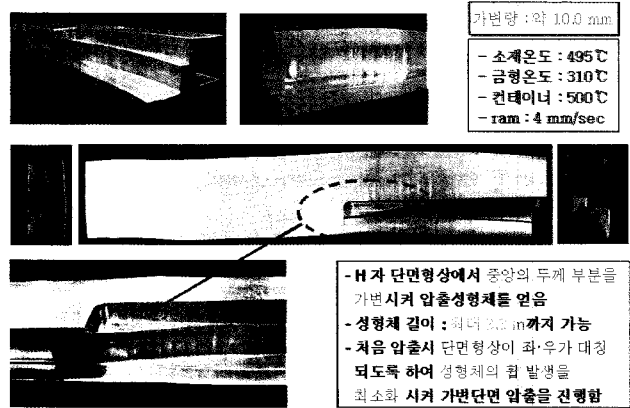


그림 20. 'H' 자 가변단면 공정의 중앙 두께 변화 압출성형체 분석

2.8.3 가변단면 압출 성형실험 요약

[그림 21]에서는 'ㄷ', 'H' 및 '□' 자 모양의 실험결과를 모두 정리하여 나타내었다. 특히 '□' 자 모양의 가변단면 압출제의 경우는 최종 부분의 기계가공량을 줄인다거나 일정한 부분의 두께 감소나 증가를 통해 조립부에 필요한 부피를 확보한다는 측면에서 매우 유용한 부품 설계방안을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

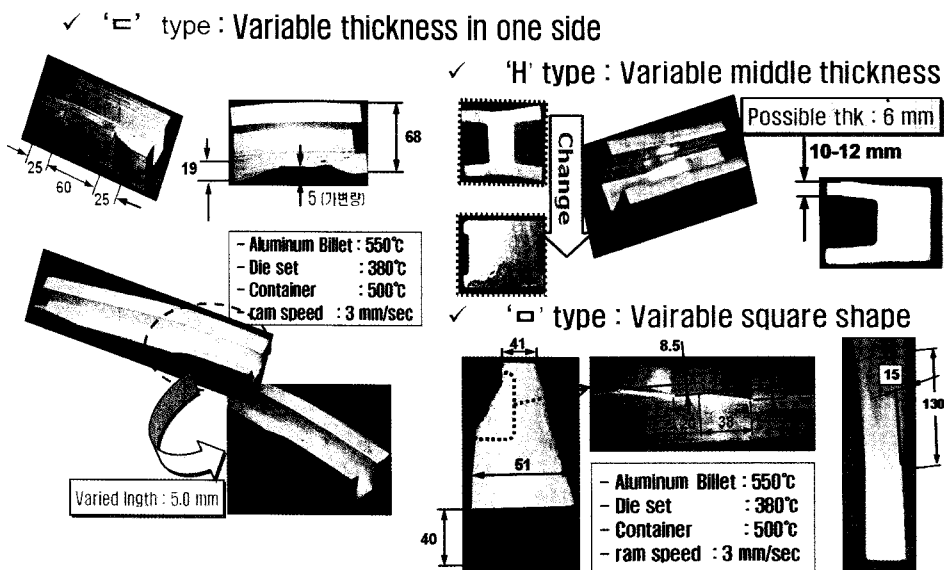


그림 21. 가변단면 공정의 성형실험 분석 정리

3. 맺음말 및 향후 전망

CNC 제어 가변단면 압출기술은 소수의 선진국에서 시도한바 있으나 양산품 적용에는 생산원가 및 생산속도, 상품성 등에서 문제가 생겨 자동차 부품 적용에 한계를 보이고 있는 기술이다. 따라서 본 연구팀이 가변단면 압출용 금형을 포함한 최적의 압출공정 및 양산성 문제의 해결점을 거의 확보하고 있는 단계로 세계를 선도하는 리딩기술을 보유하게 됨으로써 국가의 기술경쟁력 향상에 중요한 역할을 수행할 수 있게 될 것이다.

본 연구의 내용을 요약하여 정리해 보면 첫째로는 CNC 제어 가변단면 압출공정에 대하여 자세하게 소개하고 특징 및 장·단점을 설명하였으며, 자동차 부품군에로의 적용에 많은 이점들을 갖고 있음을 설명하였다. 두 번째로는 가변단면 압출을 위한 이동 금형(Moving die)부품을 갖는 구조의 압출금형에 관하여 기존의 압출금형과 비교하여 설명하였으며, 현재 본 연구팀이 개발한 CNC 제어 가변단면 압출용 금형의 구조와 메커니즘에 관하여 설계 및 제작 방안에 대하여 상세히 설명하고자 하였다.

세 번째로는 가변단면 압출공정을 실현하기 위한 CNC 제어 압출시스템에 대하여 간략히 중요부분과 기존 알루미늄 압출기와 차이가 발생하는 부분을 중점적으로 부각시켜 설명하였다. 네 번째로는 자동차 부품 적용을 위한 정밀 압출공정으로써 가변단면 압출공정에 대하여 유한요소해석을 통하여 가변단면 압출공정 변수 및 금형 변수 등에 대한 엄격한 검토를 선행적으로 수행하여 양산성 확보에 필요로 하는 정보들을 분석·정리하였다. 마지막으로는 압출 성형체의 세 가지 단면형태에 대하여 CNC 제어 가변 단면 압출공정의 가능성을 확인하고 양산에로의 적용성 검토를 완료하였다. CNC 제어 가변단면 압출기술은 압출공정에 있어서 많은 경험과 기술적 검토가 선행되어야 하는 고부가가치 성형공정으로써 재료이용률을 획기적으로 향상시킬 수 있는 압출공법으로 향후 자동차 부품 뿐 아니라 다양한 알루미늄 제품군에 적용가능하다고 판단된다.

❁ 참고 문헌

- [1] <http://www.hellodd.com>, 2011.
- [2] <http://www.etnews.co.kr>, 2011.
- [3] <http://www.computertimes.co.kr>, 2009.
- [4] 장진규 외 5인, 녹색기술산업 분류체계 정립 및 녹색 투자의 산업파급 효과 분석, 과학기술정책 연구원, pp. 59~77, 2009.
- [5] 기전연구소, 프레스 가공 데이터북, p. 54, 2001.
- [6] 최호준, 임성주, 신희택, 최석우, “가변단면 압출기 개발 및 응용연구,” 한국소성가공학회지, Vol. 17, pp. 130~134, 2008.
- [7] 정영훈, “자동차용 알루미늄 합금소재,” KSAE, Vol. 18, No. 5, pp. 38~52, 1996.
- [8] T. Makiyama, M. Murata, “A technical note on the development of prototype CNC variable vertical section extrusion machine,” JMTP, Vol. 159, pp. 139~144, 2005.
- [9] M. Hoshino, “可變断面および變曲押し加工技術,” JSTP, Vol. 41, No. 472, pp. 453~455, 2000.
- [10] S. Murakami, “新たな技術が用いられた押し加工製品,” JSTP, Vol. 41, No. 472, pp. 460~465, 2000.
- [11] 산업자원부, “차세대 차량용 고안전 경량 차체 부품,” 연구기획사업 최종보고서, 2005.
- [12] K. Karita, Y. Kohiyama, T. Kobiki, K. Ooshima, M. Hashimoto, 2003, “Development of Aluminum Frame for Heavy-Duty Trucks,” Technical Review, No. 15, pp. 81~84.



최 호 준

- 한국생산기술연구원 정밀성형기술센터
- 관심분야 : 소성가공(단조, 압출 등), 유한요소해석, 프레스 자동화
- E-mail : hjoon@kitech.re.kr



임 성 주

- 한국생산기술연구원 정밀성형기술센터장
- 관심분야 : 소성가공관련 시스템 설계, 단조, 점진성형공정
- E-mail : lim@kitech.re.kr



최 석 우

- 한국생산기술연구원 엔지니어링플랜트기술센터장
- 관심분야 : 소성가공, 마이크로성형기술, 생산공정혁신, 생산공정IT화
- E-mail : schoi@kitech.re.kr