

고속전철 내·외장재용 알루미늄 합금의 압출 금형 개발 및 압출 조건의 제어

김기주
동명대학교 메카트로닉스공학과

Extrusion Die Development of Interior & Exterior Parts for High Speed Train on Aluminum Alloys and Controls of Extrusion Conditions

Kee Joo Kim

Department of Mechatronics Engineering, Tongmyung University

요 약 압출기술에서 중요한 것은 금형의 설계 및 제작이며, 원하는 형태의 압출이 원활히 이루어지는 동시에 금형의 수명을 최대한 연장하고 효율성을 높이기 위한 금형의 설계가 필수적이다. 압출 온도, 압출 속도 등이 압출시의 주된 변수이며, 압출 비 및 재료의 물성, 압출 형태에 따라 각기 다른 조건이 부가되어야 한다. 본 연구에서는 고속전철 내외장재 부품용 알루미늄 6xxx 계열 주조 합금의 압출공정에 대해 연구하였다. 6063, 6061, 6N01, 6005, 5083 and 6060 알루미늄 합금의 압출 금형 단면을 설계하였으며 이에 대한 실험을 실시하였다. 또한, 빌렛온도, 압출온도 및 재료의 변화에 따른 압출 압력과 같은 압출 조건들을 분석하였다. 6063 알루미늄 합금이 가장 낮은 온도와 압력에서 압출이 가능한 반면 6061 합금은 가장 높은 온도와 압력에서 압출이 가능하였다. 이들 실험결과로부터 수립된 조건들을 이용하여 성공적인 압출제품을 제조할 수 있었다.

Abstract The important thing in extrusion technology is the design and production of molds. Appropriate design of the molds is essential for achieving the desired extrusion of molds at the same time to maximize the life of the molds and increase their efficiency. The extrusion temperature and extrusion speed are the main parameters at the time of extrusion. Different extrusion conditions should be added depending on the extrusion ratio, physical properties of the material, and type of extrusion. In this study, the extrusion process of various 6xxx series aluminum cast alloys for high speed train interior or exterior parts were investigated. The extruded die design was performed for the 6063, 6061, 6N01, 6005, 5083 and 6060 alloy profiles and an extrusion test was conducted. In addition, the extrusion conditions, such as extrusion pressure following as the billet temperature, extrusion temperature, and materials change, were analyzed. Although the 6063 aluminum alloy can be extruded at the lowest temperature and pressure, the 6061 alloy can be extruded at the highest temperature and pressure. From these results, the successful extruded products were manufactured from these established conditions.

Keywords : Aluminum Alloy, Die, Extrusion, Interior, Exterior Parts

1. 서론

고속전철의 내·외장재는 기존의 건축 및 차량 내장재 등과는 달리 고진동, 고하중의 외력을 받기 때문에 우수

한 강도를 필요로 한다[1]. 또한 고속 주행 시 기밀성의 파괴는 내·외압의 차이로 인하여 위험한 결과를 초래할 수 있는 까닭에 창틀 등의 경우에는 높은 강도와 함께 치수 정밀성이 요구된다. 이로 인하여 고강도 알루미늄

이 논문은 2018학년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(과제번호 2018 F039).

*Corresponding Author : Kee Joo Kim(Tongmyung Univ.)

Tel: +82-51-629-1545 email: kjkim@tu.ac.kr

Received April 25, 2018

Revised (1st May 28, 2018, 2nd June 7, 2018)

Accepted July 6, 2018

Published July 31, 2018

이 소재로 사용되며 이 경우에 기존의 증강도 및 저장도 알루미늄보다 압출이 쉽지 않다[1,2]. 그러나 내·외장재는 복잡한 형상을 갖는 경우가 대부분이기 때문에 적절한 압출 기술의 확보가 필수적이다. 압출 온도, 압출 속도 등이 압출시의 주된 변수이며, 압출비 및 재료의 물성, 압출 형태에 따라 각기 다른 조건이 부가되어야 한다. 특히 압출기술에서 중요한 것은 금형의 설계 및 제작이며, 원하는 형태의 압출이 원활히 이루어지는 동시에 금형의 수명을 최대한 연장하고 효율성을 높이기 위한 금형의 설계가 필수적이다[1]. 컴퓨터를 통한 CAD/CAM을 통하여 복잡한 형상의 압출이 가능하도록 금형을 설계하여야 하며, 최종 제품의 결함을 최소화 시키고 미세조직의 제어를 통한 강성의 유지가 되는 압출기술을 확립하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 일본 고속전철 신간선에 많이 적용되는 6xxx계열 및 5xxx 계열 알루미늄 합금에 대하여 고속철도가 운행되는 조건 하에서 방진, 방음 및 기밀성 등의 요구사항을 충족시킬 수 있는 복잡한 형상의 형체를 제조하기 위하여 형체의 압출조건을 수립하여 성공적인 압출을 실행하는 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 압출압력 계산식[1]

압출가공에 필요한 압출압력을 계산하기 위한 수식적 모델링은 지금까지 여러 연구자들에 의하여 연구되어 왔다. 기본적으로 압출에 필요한 일은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_i = W_{id} + W_f + W_s \quad (1)$$

여기서 W_{id} 는 이상일이다. 즉 순수하게 재료의 단면적 감소를 위한 변형에 쓰이는 일이다. 하지만 실제 압출상황은 그렇지 않다. 컨테이너와 다이 사이의 마찰에 의해 추가적인 일이 필요하게 되는데 이는 W_f 인 마찰일에 해당하게 된다. 또한 재료의 변형이 구속되게 되면 불균질한 변형이 발생하게 되는데 이에 의한 일은 W_s 인 과잉일에 해당한다. 각각의 일은 여러 가지 압출변수에 의하여 영향을 받게 된다.

이상적 압출 즉, 마찰이 없고 균질 변형인 경우는 압

출압력이 다음과 같이 표현된다.

$$P = \overline{\sigma}_0 \ln \frac{A_0}{A_f} = \overline{\sigma}_0 \ln R \quad (2)$$

여기서 σ_0 는 항복응력, A_0 는 빌렛의 단면적, A_f 는 압출품의 단면적, R 은 압출비이다. 이 식에서 마찰과 불균질 변형에 의한 일을 고려하게 되면 압출압력은 더욱 증가하게 된다.

2.2 빌렛의 제조

주조는 직접주조법(DC: Direct Casting)과 에어슬립 주조법(AS: Air Slip Casting)이 있다. DC주조법은 국내 알루미늄 주조 업체에서 가장 선호하는 방법이다. AS주조법은 DC주조법에 비하여 주형 접촉점으로부터 냉각수가 분사되는 유효 주형 높이가 낮아 주괴 표면이 상대적으로 평활하고 역편석층과 같은 이상층의 두께도 얇아진다. 본 연구에서는 DC 주조법과 AS 주조법을 이용하여 주조후 상호간의 주조품을 비교하였다[1,3,4,5].

본 실험에서는 압출 변수를 고려하여 압출기 용량에 맞는 최적의 압출조건을 확립하여 6xxx 및 5xxx 계열 합금을 이용한 시험 형체의 압출을 실시하였으며 압출용 빌렛은 반사로로 용해하여 Ar 가스로 탈가스시킨 후 세라믹 필터를 거쳐서 전기저항식 흑연 도가니로(용량 50kg, 21kw)를 이용하여 철재 수냉식 주형(direct casting mold)(8인치=길이500mm)을 이용하여 주조한 후 7인치로 기계 가공한 것을 사용하였다. 주조재의 화학성분은 앞서 발광분광분석기를 사용하여 분석하였으며 앞서 Table 1 및 Table 2에 본 실험에서 사용된 알루미늄 빌렛의 화학적 조성을 나타내었다.

Table 1. Chemical composition standard (wt. %)

Alloys	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti
6063	0.2-0.6	0.35 ↓	0.10 ↓	0.45-0.9	0.1 ↓	0.1 ↓	0.1 ↓
6061	0.4-0.8	0.7 ↓	0.15-0.4	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25 ↓	0.15 ↓
6N01	0.4-0.9	0.35 ↓	0.35 ↓	0.4-0.8	0.3 ↓	0.25 ↓	0.1 ↓

Table 2. Chemical composition (wt. %)

Alloys	Fe	Si	Mg	Cu	Cr	Ti	Zn
AS 6063	0.125	0.443	0.566	0.000	0.003	0.011	0.005
DC 6061	0.293	0.745	0.895	0.366	0.096	0.013	0.002
AS 6N01	0.141	0.744	0.530	0.000	0.007	0.012	0.000
AS 5083	0.15	0.22	4.74	0.03	0.15	0.01	0.01
AS 6060	0.11	0.40	0.52	0.00	0.00	0.01	0.00

2.3 금형의 설계

압출 후 재료의 시험단면은 Fig. 1과 같으며 이 형태의 치수로 압출되도록 압출금형을 CAD/CAM을 이용하여 제작하였다.

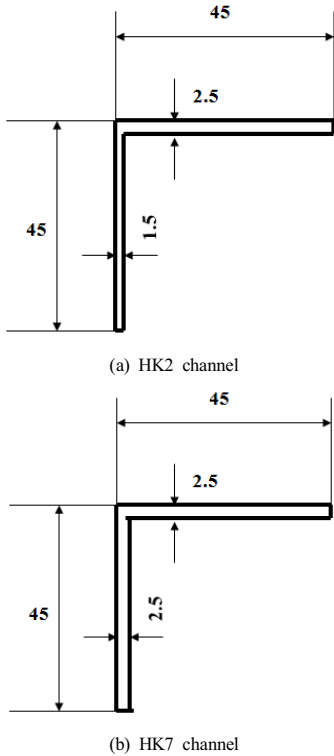


Fig. 1. Geometry and dimension of extrusion test profile. Unit [mm]

금형은 정밀한 가공이 중요하며 이를 위해 $\pm 0.1\text{mm}$ 오차로 가공이 가능한 방전가공기를 이용하였다. Fig. 2(a) 및 (b)에 본 방법들을 고려해 정밀하게 제작된 압출 금형 사진을 나타내었다. 사진에서 왼쪽 부분은 L. I. P.(lead in plate), 중간부분은 다이이고 오른쪽 부분이 지지 backer이다. 다이의 각도는 압출재의 형상 및 조직과 밀접한 관련이 있다[1]. 다이의 각도가 작을수록 압출 조직의 균일성은 증가한 생산성 및 경제성이 떨어지는 것으로 알려져 있으며, 이로 인하여 상용 알루미늄 압출재의 제조시 다이 각도를 90° 로 설정하는 것이 일반적이다[1]. 금형의 제작시 모든 공정은 컴퓨터를 이용한 수치 제어 방식으로 행하였고 이로부터 정밀성 및 재현성을 향상시켜 신뢰성 있는 소재의 공급이 가능하였다.



(a) HK2 channel



(b) HK7 channel

Fig. 2. Die of extrusion test profile

2.4 주조 및 압출 실험방법

주조시에는 특히 불순물 유입, 수소 가스의 함유 등으로 인한 결함의 발생을 억제해야 하며 이를 통해 우수한 물성을 가진 재료를 얻을 수 있다. 이를 위하여 주조시 플럭스 처리, 필터링 등을 행하여 불순물을 제거하고 수소함량을 제어하였다. 용해 작업은 반사식 용해로에서 행하였으며, 용해 중 탈가스 작업을 병행하였다. 이렇게 주조된 빌렛을 압출실험에 사용하였다[3-4].

열간 압출 실험에서는 1650M/ton급 수평 직접식 압출기(제조사:일본 UBE)를 사용하였고 압출 내경은 185mm였고, 압출 길이는 800mm용량의 압출기이다1). 빌렛 가열은 저주파 유도 가열로(3단 가열, 720kw)를 사용하였다. 통상 압출 온도는 외통 $450\sim 500^\circ\text{C}$,내통은 $430\pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지하였으며, 압출비는 HK1(찬널)이 94:1이고 HK2(앵글)는 152:1이었으며 베어링 각도는 90° 이었고 칸탈선에 의한 별도의 다이스 가열로를 사용하여 압출가공시 빌렛과의 온도차를 줄였다.

본 논문에서 다루고자 하는 연구 내용은 빌렛의 제조, 압출조건 확립을 위한 이론적 적립, 압출을 위한 금형 profile 설계 및 이를 통한 최적 압출조건 확립에 이르는 주조부터 압출제품 가공에 이르는 전 과정을 다루어 최적의 압출조건을 확립하는 데 있다. 또한 알루미늄 경량 합금제에 대하여 연구하여 기존 수송부품의 경량화 추세에 맞는 연구 내용을 다루었다.

3. 실험결과 및 고찰

압출에 영향을 미치는 인자로는 압출 온도, 압출 속도

등이 있다. 압출 온도는 압출재의 유동 및 최종 제품의 물성에 가장 큰 영향을 미치는 인자이다. 압출 온도는 재료의 원활한 유동이 가능하도록 충분히 높은 값으로 설정되어야 하나 미세조직의 안정성을 고려할 때 제한치를 넘지 않아야 한다. 압출 속도는 압출재의 결함 발생과 밀접한 관계가 있으므로 적정 값을 취하여야 한다. Table 3에 알루미늄 합금 재질에 따른 압출시험 결과를 나타내었다. 6063 합금이 가장 낮은 온도와 압력에서 압출이 가능한 반면 6061 합금은 가장 높은 온도와 압력에서 압출이 가능하였다. 특기할 점은 6061 합금의 압출온도와 압출압력이 타 합금에 비해 다소 높았다는 것이며 압출압력이 낮을수록 압출속도가 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 3. Extrusion test conditions.

Alloys		Billet Temp.(°C)	Pressure (kg/cm ²)	Ram Speed (mm/sec)	Product Speed (m/min)
6005	HK2	450	150	5	28
	HK7	450	145	5	15
6N01	HK2	450	150	5	30
	HK7	450	145	5	32
6061	HK2	470	170	4	24
	HK7	470	170	4	26
5083	HK2	470	200	1	4
	HK7	470	200	1	6
6060	HK2	450	130	6	36
	HK7	450	125	6	38
6063	HK2	440	130	7	40
	HK7	440	125	7	42

재질에 따른 압출압력의 변화를 보면 6xxx 및 5xxx 계열 합금의 압출조건에 따른 최고 압력의 변화는 Fig. 4와 같이 6061 합금과 5083 합금의 압력이 다른 재료에 비하여 큰 것을 알 수 있었다.

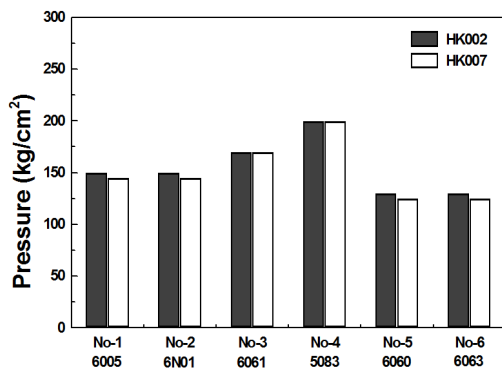
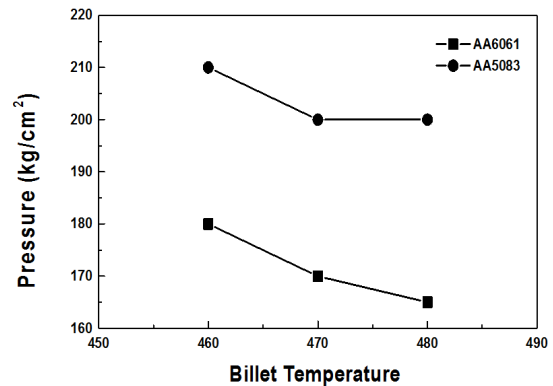


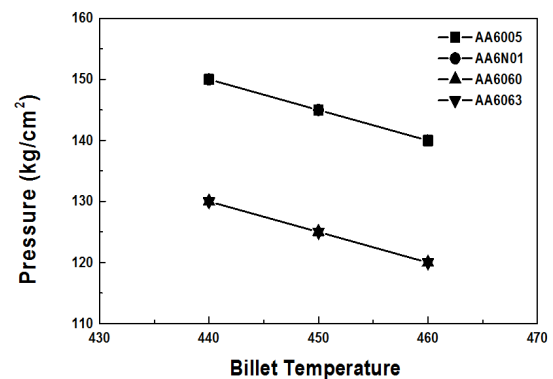
Fig. 4. Extrusion pressure variation following as alloys.

빌렛 가열온도에 따른 압출 압력의 변화평가 결과, 6061과 6N01합금의 빌렛 가열온도에 따른 최고 압력 변화는 Fig. 5(a) 및 (b)과 같이 온도가 증가함에 따라 압력이 감소함을 알 수 있었다. 또한 6063 알루미늄 합금이 가장 낮은 온도와 압력에서 압출이 가능한 반면 6061 합금은 가장 높은 온도와 압력에서 압출이 가능하였다.

Fig. 6에는 재질에 따른 압출속도를 나타낸 것으로 6063, 6060, 6N01, 6061, 6005, 5083 순서로 압출속도가 저하함을 알 수 있다. 압출 후 조직의 균일성 및 결정립의 크기 등 미세조직 및 기계적 특성을 관찰하였으며, 기계적 성질을 평가하였다[3-4]. 또한 인장 및 경도 시험을 통하여 압출재의 적합 여부를 판별하였으며, 본 결과의 분석을 통하여 압출 공정상의 문제점을 확인하고 압출 조건의 변화 등을 통하여 개선하였다[3-6].



(a) AA6061, AA5083



(b) AA6005, 6N01, 6060, 6063

Fig. 5. Extrusion pressure variation following as billet heating temperature.

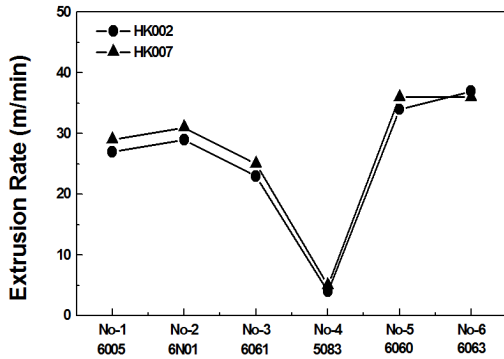


Fig. 6. Extrusion speed variation following as materials.

압출품의 최종 표면상태를 양호한 재료와 불량한 재료로 비교하여 나타낸 것이 Fig. 7과 Fig. 8이다. Fig. 7은 에어 슬립 방법으로 주조한 빌렛을 압출한 제품으로 양호한 표면압출 줄무늬를 볼 수 있으나, Fig. 8은 직접 주조법으로 제조한 빌렛을 압출한 제품으로 압출조건, 압출온도 등이 부적절하여 불량한 상태의 압출품이 생산된 것을 알 수 있다. 또한 표면에 균열 등이 관찰 되었으며 향후 이러한 불량품등에 대한 지속적인 연구 개발이 필요하다.

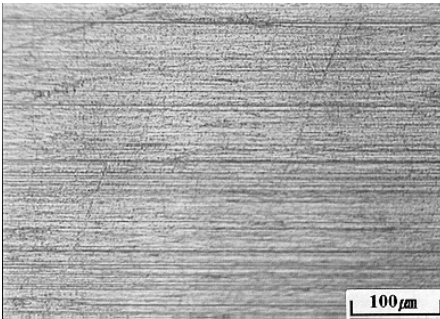


Fig. 7. Surface observation after successful extrusion (AA6063).

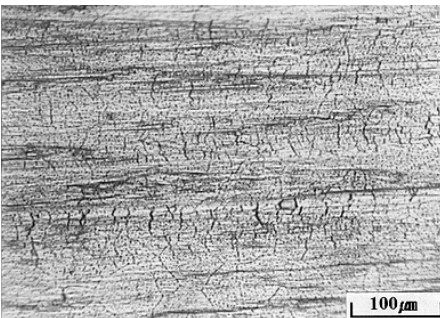


Fig. 8. Surface observation after failed extrusion (AA6061).

4. 결 론

- 1) 고속전철의 내·외장재에 사용될 경량 합금의 후보 합금으로 알루미늄 합금을 채택하여 제조하였으며 압출재의 특성이 외산재료에 비하여 뒤지지 않는 기계적 특성을 나타내었다.
- 2) 6xxx 계열 합금 중 6005, 6061, 6060, 6063 및 6N01과 5xxx 계열 합금 중 5083을 선정하여 AS 주조법으로 주조한 빌렛을 압출 후 각각의 합금에 대하여 열처리를 하였으며, 그 기계적 특성은 고속전철의 내·외장재료로서 부족함이 없음을 확인할 수 있었다.
- 3) 6063 알루미늄 합금이 가장 낮은 온도와 압력에서 압출이 가능한 반면 6061 합금은 가장 높은 온도와 압력에서 압출이 가능하였다. 이들 실험결과로부터 수립된 조건들을 이용하여 성공적인 압출제품을 제조할 수 있었다.

References

- [1] Kim, K. J., "Extrusion Process Development of Light-Weight Interior & Exterior Parts for High Speed Train on Aluminum Alloys", Transaction of KSMT, as submitted.
- [2] Sung, C. W. and Paik, Y. N., "Hydro-Forming Simulation of Automotive Rear Sub-frame Cross Members", KSMT, vol. 10, no. 2, pp. 1-5, 2008.
- [3] Kim, K. J. and Won, S. T., "Cast and Characterization of Light-Weight Interior & Exterior Parts for High Speed Train on Aluminum Alloy", Transaction of KSMT, vol. 20, no. 1, pp. 12-17, 2018.
- [4] Kim, K. J. and Won, S. T., "Characterization of Aluminum 6xxx Series Extruded Alloys for Interior & Exterior Parts of High Speed Train", Transaction of KSMT, as submitted.
- [5] Kim, K. J., "Characterization of Automotive Extruded Alloys for Interior & Exterior Parts of High Speed Train", Transaction of KSME, as submitted.
- [6] Kim, K. J., "Characterization of Automotive Cast Alloys for Interior & Exterior Parts of High Speed Train", Transaction of KSME, vol. 42, no. 7, pp. 12-17, 2018.

김 기 주(Kee Joo Kim)

[중신회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 일반대학원 재료공학부 (공학박사)
- 1993년 8월 ~ 2009년 2월 : 쌍용자동차 기술연구소 책임연구원
- 2009년 3월 ~ 2016년 2월 : 서정대학교 자동차과 교수
- 2016년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 메카트로닉스공학부 교수

<관심분야>

기계공학, 기계설계, CAE