

우수한 기계적 특성과 형상치수 확보를 위한 정밀 압출기술개발

The Precise Extrusion-Technical Development to Get Excellent Mechanical-property and Accurate Shape- Dimension

이현철*

이광식**

오개희**

박상우†

Lee, Hyun-Cheol · Lee, Kwang-Sik · Oh, Kae-Hee · Park, Sang-woo

ABSTRACT

Most advanced countries are researching to apply light weight materials for rolling stock because weight reduction for railway body derives cost-saving, energy-saving, and high-speed. Likewise, current Korea rolling stock field makes arduous efforts of weight-reduction, miniaturization, and high-efficiency to achieve a high-speed railway. Aluminum becomes suitable material for these projects because it is much lighter than steel or stainless. Manufacturing the railway car body by using the Aluminum is increasing because Aluminum is not bringing the corrosion by unique oxidation-passivate. Aluminum extrusion profile for railway body requires a high mechanical property, accurate shape dimension, and stable quality because the railway body is composed with many different kinds of extruded profiles. Therefore, it is necessary to research about Aluminum precision-extrusion technology to maintain exit temperature and die load. The goal of this project is applying the Aluminum extrusion profile to next-generation railway car body by developing the Aluminum extrusion profile according to precision-extrusion technology which may maintain isothermal exit temperature.

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

현재 국내 철도 차량은 고속화에 중점을 두어 차체 경량화와 기기의 소형화 및 고기능, 고효율화 등에 많은 기술적 노력을 기울이고 있다. 철도차량 경량화는 에너지 절감, 유지보수 비용 절감, 속도 고속화 및 건설비 절감 등 많은 경제적 효과를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있어 선진국을 중심으로 경량 소재 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 철도차량 차체의 재질로 사용되는 알루미늄 소재는 연강과 스테인리스강에 비해 비중이 낮아 경량화 측면에서 유리하며, 차체 강성과 접합특성을 고려한 중공형 단면 형상의 압출이 가능하여 소재 결합부분에서의 응력 집중을 최소화하고 차체 품질을 향상 할 수 있다. [1, 2]

또한 알루미늄은 소재 자체가 지닌 특유의 산화피막으로 부식이나 침식이 발생하지 않아 유지보수비용 측면에서도 유리한 장점이 있어 철도 차량 차체제작에 알루미늄 적용이 점차 증가하는 추세에 있다.

철도차량 차체에 적용되는 알루미늄 압출재의 경우에는 높은 기계적 특성을 요구할 뿐만 아니라, 여러 종류의 압출재 간 결합으로 이루어지기 때문에, 소재 품질의 안정성과 동시에 형상 치수의 정확성이 요구되며, 이를 만족하기 위해서는 정밀한 압출 공정 변수 제어와 출구온도 및 금형하중을 균일하게 유지하기 위한 알루미늄 정밀압출기술개발에 대한 연구가 필요하다.

† 책임저자 : 비회원, (주)동양강철, 기술연구소, 상무
E-mail : swpark@alusash.co.kr
TEL : (042)605-8331 FAX : (042)633-0637

* 정회원, (주)동양강철, 기술연구소, 연구원

** 비회원, (주)동양강철, 기술연구소

본 연구에서는 압출 공정에서 빌렛 및 금형의 온도 제어와 압출속도 제어 기술을 통해 출구온도를 등온으로 유지할 수 있는 정밀 압출 기술을 통한 최적의 압출재 개발함으로써 차세대 고속철도용 차체 소재로의 적용을 목표로 하였다.

2. 정밀압출 기술개발

2.1 알루미늄 압출 제조 공정

알루미늄 압출은(EXTRUSION) Al, Cu, Mg, Pb 등 및 그 합금의 각종 단면재, 관재를 얻을 때 소성이 큰 상태에서 빌렛(billet)을 틀(container, chamber)에 넣고 유압 또는 충격으로 램(ram)에 강력한 압력을 작용시켜 다이(die)를 통하여 밀어내는 가공을 압출 또는 압출가공이라 한다. 압출형재는 Solid type과 Hollow type이 있으며, 철도차량의 소재로 사용되는 type은 중공형의 Hollow type이다. Fig. 1은 압출형재의 type에 따른 압출기의 부품들을 나타낸 것이다.

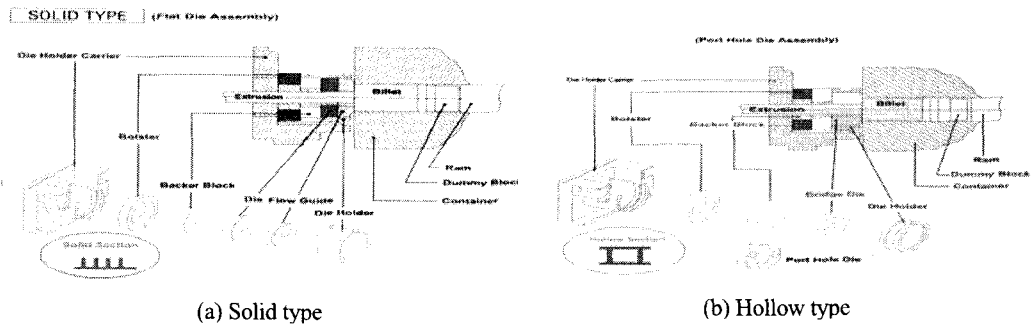


Fig. 1 압출형재 형상에 대한 압출기의 구성부품

압출되어진 알루미늄 압출형재는 기계적 성질을 높이기 위하여 합금원소(Mg, Si)를 알루미늄 조직내에 균일하게 분포시키는 용체화 처리 (SOLUTION HEAT TREATMENT), Al-Mg-Si 조직에서 합금원소의 석출 방식과 더 높은 강도를 얻기 위한 냉각 QUENCHING, 상온 (6000계의 경우 약 180°)에서 열처리를 통해 합금내부에 이차상(a second phase)을 형성시키는 시효 AGING (PRECIPITATION HARDENING)의 공정을 통하여 알루미늄 압출재의 기계적 성질을 높이고 있다. Fig. 2는 알루미늄 압출형재의 압출 공정을 나타낸 것이다.

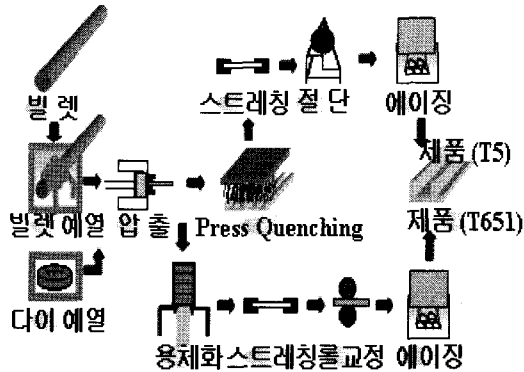


Fig. 2 알루미늄 압출형재의 압출 공정도

2.2 정밀압출 기술개발

고품질의 압출 제품을 생산하기 위한 압출공정은 복잡ess의 조합으로 압출속도 및 빌렛 온도에 대한 Operating

window를 정립 하여야 한다. 압출 Operating window는 압출 압력, 표면 품질, 기계적 특성에 대한 압출 공정 변수를 고려하여야 하며, Fig. 3은 압출속도 및 빌렛 온도에 대한 최적의 Operating window이다.

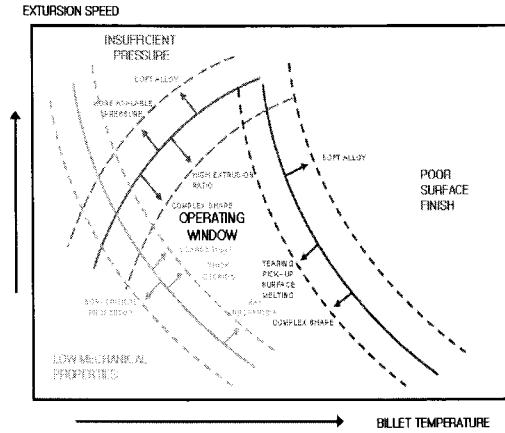


Fig. 3 압출속도 및 빌렛 온도에 대한 압출공정 변수 및 기계적 특성의 관계

알루미늄 압출형재의 Operating window를 정립하고 압출공정을 진행 할 때에는 최적의 온도와 압력을 유지하여 압출형재의 기계적성질 향상과 형상치수의 정확성을 위하여 등온 압출과 등압 압출을 동시에 제어할 필요가 있으며 이 압출공정을 정밀압출이라고 한다.

등온 압출을 위해서는 압출 공정 변수 중에서 빌렛, 컨테이너 및 금형의 예열 온도와 램 속도의 제어가 필요하다. 이는 압출공정 시 소성 변형구역에서 온도에 따른 미세구조 변화가 압출형재의 기계적 특성에 큰 영향을 주기 때문이다. 균일한 미세구조를 얻기 위해서는 위 4가지 공정변수를 제어하여 출구 온도를 일정하게 유지하는 것이 가장 중요하다. 여기서 출구 온도는 제품의 표면 온도이기도 하다.

등압 압출은 압출형재의 횡단면 형상의 편차는 열 확장과 표면에 의한 압력이 기인하여 금형의 편차에 의해 발생 된다. 균일한 형상치수를 얻기 위하여 금형에 받는 하중을 균일하게 유지하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 정밀압출기술 중에서 등온압출의 압출 공정변수를 제어하여 출구 온도를 일정하게 유지하도록 연구를 진행하였다. Fig. 4는 직접 압출 공정에서 빌렛과 금형, 컨테이너의 열 유동을 나타낸 것이며, 열 유동에 영향을 주는 요소는 다음과 같다. [3]

- Q1 : 변형 구역(Deformation zone)에서 빌렛 후방으로의 열전달, Q2 : 빌렛에서 더미 블록으로의 열전달
- Q3 : 컨테이너 벽 Shear zone 에서의 열 발생, Q4 : 빌렛에서 컨테이너로의 열전달

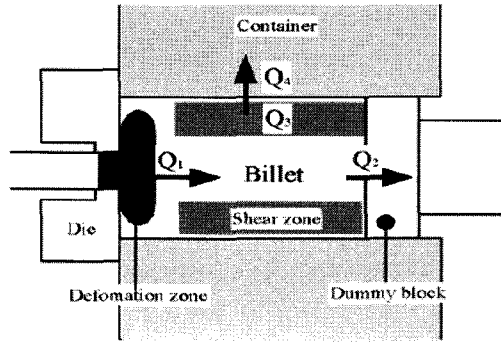


Fig. 4 직접압출시 열 유동

압출 시 출구 온도를 균일하게 유지하기 위해서는 빌렛에서 컨테이너의 열 전달과 컨테이너 벽의 Shear zone에서의 열 발생이 동일하면 출구 온도가 균일해 지지만, 한 금형에 여러 빌렛을 압출하는 경우 빌렛 온도와 Shear zone에서 열이 발생하여 압출재의 온도가 상승한다. 따라서 정밀압출 공정에서 컨테이너와 금형 온도 제어가 필요하다.

등온 컨테이너는 컨테이너 내부와 외곽의 응력편차가 크면 컨테이너 내부에 결함이 발생되어 성능과 수명에 영향을 주기 때문에 응력편차가 적은 3중 컨테이너의 사용과 컨테이너의 예열시간 단축과 열응력에 의한 크랙 발생을 최소화 하기 위해 내부 가열 시스템을 사용 [4], 마지막으로 압출 공정시 내부 컨테이너 앞부분(금형과 접한 부분)과 뒷부분(시스템과 접한 부분)의 온도차가 크게 나타나기 때문에 컨테이너의 높은 온도부분을 냉각시키고 다소 온도가 낮은 부분은 온도를 상승시키는 내부 가열, 냉각 시스템 등을 사용하여 컨테이너의 온도를 제어한다.

금형의 예열 온도는 430~450° C로 취약 부를 가지는 금형의 경우 20~30° C 높게 예열한다. 압출 공정에서 빌렛이 다이 베어링을 통과 할 때 통상적인 마찰로 인해 40~60° C정도 상승이 발생하며, 상승한 온도를 제어하기 위하여 금형 내부로 냉각제(질소, 아르곤 등 불활성 가스)를 투입하는 금형 냉각 기술로 금형 온도를 제어한다. 금형의 온도는 출구 온도에서 압출형재를 측정할 온도이다.

2.3 정밀압출 시스템

현재 정밀 압출 시스템은 크게 4종류 이며, Table 1에 종류 별 정밀 압출 시스템의 특징을 나타 낸 것이다.

Table 1 종류별 정밀 압출 시스템 특징

System	주요원리	특징	비고
A Type	Pyrometer를 이용한 압출 출구 온도 직접 측정. Feedback에 의한 Ram speed조절	생산성 : 10~20% 스크랩발생량 : 2~5% 표면특성 균일	출구 온도만 관리하기에 치수의 불 균일 초래
B Type	조기 빌렛 온도 정확히 측정, 압출 후 조건 계산, 계산식에 의한 최적 조건 확립	금형에 부과되는 압력 일정 합금 및 금형 디자인 계산 테이퍼 히팅 필요	빌렛 온도 신뢰성 확보위한 Thermocouple 주기적 관리,
C Type	각각 다른 장치들과 연계되어 계산 및 온도 측정 Feedback을 기초로 최적 조건 확립	생산성 : 5~10% 테이퍼 히팅 필요	정확한 테이퍼 히팅 필요
D Type	Pyrometer를 이용한 압출 출구 온도 및 빌렛 온도 측정, Feed-back하여 최적 조건 확립	생산성 : 12% 이상 금형 냉각과 연동	테이퍼 히팅 유무에 무관

A type 과 B type의 경우 출구 및 빌렛 온도 측정으로 단순 Ram speed 제어에 의한 방법으로 단순 등은

시스템이라 할 수 있고, C type의 경우 Taper heating 방식이 반드시 필요한 system이므로, 본 연구에서는 Taper heating 방식에 크게 영향을 받지 않는 D type을 동양강철에서 보유중인 압출기에 적용 하여 정밀 압출 시스템을 구축하였다. Fig. 5는 D type의 시스템 구성을 나타낸 것이다. [5, 6]

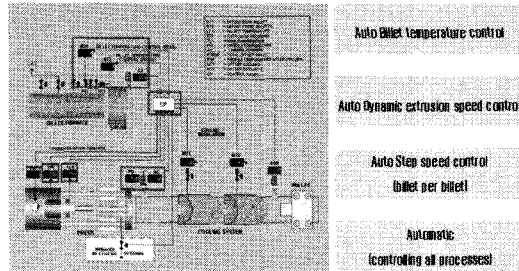


Fig. 5 D type의 정밀 압출 시스템 구성도

3. 철도차량 차체용 Operating window 정립

본 연구에서 철도차량 차체용 압출 Profile은 인천신공항 철도차량에서 언더프레임 부분의 Support profile(Hollow type)이며, 재질은 A6005으로 구성되어 있다. Fig. 6은 Support profile의 단면 설계 형상과 압출재 단면 형상이다. 압출기는 동양강철의 3600 US Tone Press로 압출시험을 하였다.

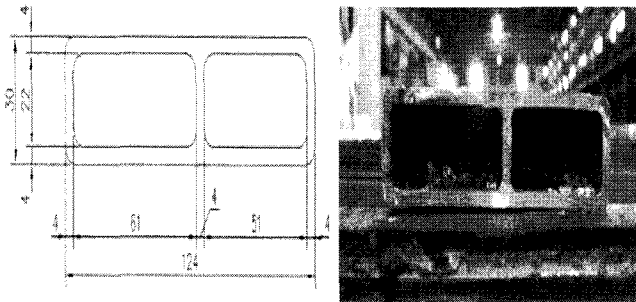


Fig. 6 Support Profile의 단면 설계 형상과 압출재 단면 형상

3.1 빌렛 예열온도 Data 정립

빌렛 예열 방식은 Induction Heating 방식이고 투입 빌렛은 일정 길이로 절단된 것을 사용하였다. 빌렛 예열 온도의 변화는 아래 Table 2와 같은 조건으로 시험을 하였으며, 이외의 조건은 모두 고정하여 압출을 진행하고 출구 온도의 변화를 기록하였다.

또한 압출 Profile을 압출 후 바로 수냉하고 이후에 시효처리를 실시한 후 기계적 특성 시험을 실시하였고, Table 3은 기계적 특성 시험의 결과와 압출재의 불량 여부를 나타낸 것이다.

압출의 실시 후 압출 출구온도가 낮을 수록 인장강도와 항복강도가 낮아지는 경향을 얻을 수 있었고, 인장강도가 낮아질수록 연신율은 대체적으로 증가하는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 빌렛 예열온도를 과도하게 상승시킬 경우에 표면 불량이 발생하는 빈도가 높게 나타났다.

Table 2 빌렛 예열온도에 따른 출구온도 변화

Table 3 빌렛 예열온도에 따른 기계적 특성 및 불량여부

구분	컨테이너 온도 (°C)	금형온도 (°C)	빌렛예열 온도 (°C)	압출속도 (mm/sec)	출구 온도 (°C)	비고	구분	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)	불량여부	비고
1차	440 (고정)	470 ~490 (고정)	500-480	3.0 (고정)	515 ~520		기준	260	240	8	-	
2차			480-460		505 ~515		1차	327	282	12.2	표면불량	
3차			460-450		510 ~520		2차	325	284	12.8	표면불량	
4차			440-420		510 ~520		3차	318	275	13	양호	
5차			400-380		500 ~505		4차	308	265	9.8	양호	
6차			380-360		490 ~500		5차	296	249	13.5	양호	
							6차	292	260	14.0	양호	

3.2 컨테이너 예열 온도 Data 정립

3600 US Tone Press에서는 440±10°C 범위에서 컨테이너 온도를 설정하는 것이 일반적이다. 이러한 컨테이너 예열 온도를 기준으로 하여 Table 4와 같이 실험을 실시하였고, 그에 따른 출구온도 변화를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 컨테이너 온도에 따른 압출 출구온도의 변화는 미약하다는 것을 알 수 있었다. 3차 4차에서 표면에 불량 발생 하였으며, 압출재 표면 품질면에서 가장 우수한 결과를 보인 것은 2차의 410° C 경우였다.

Table 5 컨테이너 예열 온도에 따른 압출조건 변화

구분	컨테이너 온도 (°C)	금형온도 (°C)	빌렛예열 온도 (°C)	압출속도 (mm/sec)	출구 온도 (°C)	비고
1차	440	470 ~480 (고정)	470-440 (앞 - 뒤) (고정)	3.0 (풀러 9.0m/min) (고정)	505 ~515	초압 330
2차	410				515 ~525	초압 295
3차	400				500 ~520	초압 320
4차	380				510 ~520	초압 325

3.3 금형 예열 온도 Data 정립

금형온도는 압출시 압출 Ram의 이동에 의한 압력과 연관이 깊은 조건이며, Table 6과 같이 금형 온도를 변화 시키며 출구온도와 압출 압력의 변화를 기록하였다. 금형온도가 480~490°C 범위 일때 압출시 받게 되는 압력이 195로 가장 낮은 결과를 보여주었다. 이는 압출시 압출기에 부하를 가장 적게 미치면서 압출속도나 출구온도 조절에도 유리한 조건임을 나타낸다.

Table 6 금형 예열 온도에 따른 압출조건 변화

구분	컨테이너 온도 (℃)	금형온도 (℃)	빌렛예열 온도 (℃)	압출속도 (mm/min)	출구온도 (℃)	비고
1차	410 (고정)	450~460	470-440 (앞 - 뒤)	3.0 (플러) 9.0mm/min)	490 ~495	압력 230
2차		460~470			495 ~510	압력 220
3차		470~480			515 ~525	압력 205
4차		480~490			530 ~540	압력 195

3.4 램속도에 따른 출구온도 Data 정립

철도차량 차체용 압출 Profile의 최적 압출 Operating Window를 설정하기 위하여 최적 컨테이너 온도, 압출 금형 온도, 빌렛 예열온도를 실험하여 설정하였다. 이러한 결과 Data를 바탕으로 압출 속도에 따른 출구온도 및 압출 Profile 표면 품질을 주요 인자로 하여 컨테이너 온도를 410℃, 금형온도를 460~470℃, 빌렛 예열온도 470-440℃로 하여 각각 3가지 압출인자를 설정한 후, 압출속도(램속도 기준)를 1.0~5.0mm/sec로 증가시키면서 Table 7의 압출실험을 진행하였다.

Table 7 램속도에 따른 출구온도 변화

구분	컨테이너 온도 (℃)	금형온도 (℃)	빌렛예열 온도 (℃)	압출속도 (mm/sec)	출구온도 (℃)	비고
1차	410	460~470	470-440 (앞 - 뒤)	1.0	490 ~500	
2차				2.0	500 ~510	
3차				3.0	515 ~525	양호
4차				4.0	530 ~530	표면 불량
5차				5.0	550 ~565	압출재 파단

압출속도가 3.0mm/sec 이하일 경우에는 표면 품질이 양호하게 나타났으나 4.0mm/sec 이상의 압출속도에서는 압출재 표면에 Dies Line과 색상차 등의 표면 결함이 발생하였고, 5.0mm/sec의 경우에는 압출재 파단 현상이 발생하였다.

3.5 철도차량 차체 Profile 압출 Operating Window 설정

압출실험을 통하여 설정된 컨테이너 온도, 금형온도, 빌렛 예열온도, 압출 속도에 의하여 철도차량 차체 Profile 압출용 Operating Window를 Table 8과 같이 설정하였고, 압출 조건을 Fig. 7에 나타내었다.

Table 8 압출 실험을 통한 압출 Operating Window

구분	컨테이너 온도 (°C)	금형온도 (°C)	빌렛예열 온도 (°C)	압출속도 (mm/sec)	출구온도 (°C)	비고
	410	460~470	470~440 (앞 - 뒤)	3.0±0.3 (플러 9.0m/min)	525 ~535	

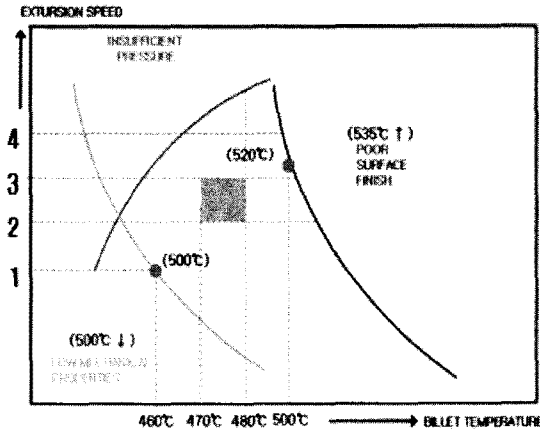


Fig. 7 철도차량 차체용 Operating Window

3.6 정밀 압출기술을 이용한 형상치수

3.1절부터 3.4절까지 정밀 압출기술의 등은 압출을 위하여 압출 공정변수의 값을 변화하여 압출시험을 수행하였고, 최적의 압출 조건 Data를 확보하였다. 확보한 정밀 압출기술을 이용하여 압출을 실시하였으며, Support profile의 형상치수를 측정하여 Table 9의 값이 측정 되었다. Fig. 8은 Support profile의 측정 위치를 나타낸 것이다.

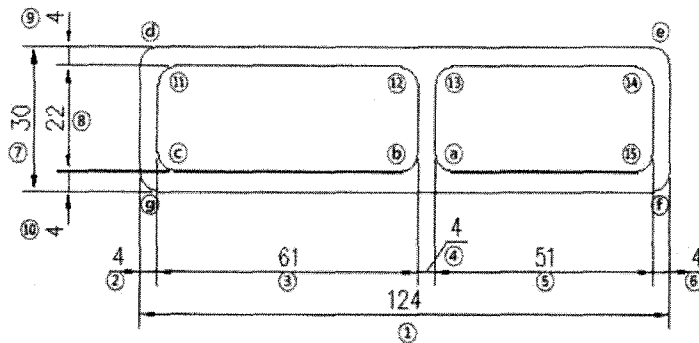


Fig. 8 Support profile의 형상치수 측정 부위

Table 9 압출 profile의 형상치수 측정결과(단위:mm)

위치	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Spec	124	4	61	4	51	4	30	22	4	4	4	4
측정값	124.203	3.897	61.163	4.216	50.996	3.918	30.145	22.23	4.125	3.768	3.768	4.036
공차	±0.85	±0.18	±0.61	±0.18	±0.61	±0.18	±0.3	±0.25	±0.18	±0.18	±0.18	±0.18
오차	0.203	-0.103	0.163	0.216	-0.004	-0.082	0.145	0.23	0.125	-0.232	-0.01	0.036
합격 여부	O	O	O	X	O	O	O	O	O	X	O	O
위치	13	14	15	a	b	c	d	e	f	g		
Spec	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
측정값	4.058	3.985	4.022	4.102	4.023	4.056	3.989	3.986	4.011	4.035		
공차	±0.18	±0.18	±0.18	±0.18	±0.18	±0.18	±0.18	±0.18	±0.18	±0.18		
오차	0.058	-0.015	0.022	0.102	0.023	0.056	-0.011	-0.014	0.011	0.035		
합격 여부	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O		

정밀 압출기술을 이용하여 압출 profile의 형상치수를 측정된 결과 측정대상 22곳에서 2곳(4번, 10번)만이 허용공차를 초과하였다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 운행 중인 인천신공항 철도차량의 부품인 Support profile(언더프레임)을 대상으로 정밀압출기술연구를 실시하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 알루미늄 압출 profile은 기계적 특성과 형상치수를 확보하기 위하여 압출공정시 출구 온도를 일정온도로 유지하여야 한다.

둘째, 빌렛, 컨테이너 및 금형의 예열 온도와 램 속도 등의 변수 조정을 통하여 압출 출구 온도를 제어해야 한다.

셋째, 본 연구에서 균일한 기계적 특성 및 형상 치수 정밀도를 확보하기 위한 정밀압출 공정조건은 빌렛 예열온도가 470~440° C, 컨테이너 예열온도가 410° C, 금형 예열온도가 460~470° C, 램속도가 3.0mm/sec으로 나타났다.

넷째, 정밀압출기술을 이용하여 철도차량용 압출 profile의 형상치수를 측정하였지만 총 22 측정위치 중에서 2곳이 허용공차를 초과하였으나 이는 금형 수정설계를 통해 해결할 수 있다.

향후 차세대 고속철도 차량의 압출 profile에 철도차량 차체용 Operating window와 본 연구에서의 정밀압출기술을 적용하여 최적의 압출형재를 개발 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)으로 수행된 연구결과로서 관계자들에 감사드립니다.

Reference

1. 철도차량구조용 알루미늄 압출형재 및 차체구조개발에 연구 (1998) , 산업자원부
2. 권태수, 이관섭 (1998), "알루미늄합금을 사용한 차량 구조체 제작기술" Rail Technology Information Portal, 철도 웹진 기술동향 1998-16호
3. Masaya Takahashi, Takeshi Yoneyanma (2004), "Isothermal Extrusion of Aluminum Alloys," Extrusion Technology for Aluminum Profiles Foundation
4. Dennis Van Dine, Nazmi Gilada, Paul Robbins, Dr. V.I. Johannes, Shigeyoshi Takagi (2004), "Thermal Control of the Extrusion Press Container," Extrusion Technology for Aluminum Profiles Foundation
5. Boris Shtarker, Eduard Hodos, Ofer Yoely (2004), "Real Temperature Parameters For Isothermal Extrusion," Extrusion Technology for Aluminum Profiles Foundation
6. M.Pandit, W.Deis, T.heger, H.Hengen, V.Rothweiler, C.Jonsson (2004), "Autonation System for Production Optimization in Aluminum Extruder Plants Based on Temperature Measurement and Control" Extrusion Technology for Aluminum Profiles Foundation