

분무성형조건에 따른 봉상성형체의 형상변화

申敦秀, 石鉉光*, 吳奎煥*, 羅亨用*, 李浩仁**

삼선공업(주) 기술연구소

*서울대학교 공과대학 재료공학부, 금속응고신소재 연구소

** 한국과학기술연구원, 금속응고신소재 연구소

A Study on the Shape Control of Billet in Spray Forming Method

Don Su Shin, Hyun Kwang Seok*, Kyu Hwan Oh*, Hyung Yong Ra* and Ho In Lee**

Sam-Sun Ind. Tech. Inst., Seoul, Korea

* School of materials and Engineering, Seoul National University, 151-742, Seoul, Korea and RASOM

** Div. of Metals, Korea Institute of Science and Technology, 136-130, Seoul Korea and RASOM

Abstract : The shape variation of billet was investigated by numerical method and spray forming work with variation of average substrate withdrawal velocity \bar{V} , withdrawal velocity change interval Δt and velocity deviation from average velocity V_{dev} . The shape and diameter with large \bar{V} , Δt , V_{dev} vary seriously. When \bar{V} , Δt , V_{dev} are smaller, the shape of billet is more similar to that of the billet with constant withdrawal velocity. The average diameter of billet is determined by only \bar{V} independent of Δt , V_{dev} . With $\bar{V} : 0.2$ mm/sec $\Delta t : 200$ sec and $V_{dev} : 0.2$ mm/sec billet of constant diameter 230 mm \times height 1000 mm were manufactured.

1. 서론

분무성형법은 금속의 주조법과 분말야금의 중간적인 특성을 갖기 때문에 기계적 성질과 생산단가적인 측면에서 선택의 폭이 넓은 장점을 지닌 우수한 재료를 제조할 수 있다. 또한 복합재와 같은 난가공성재료의 near-net shape 제조가 가능한 새로운 응고가공기술로 이러한 분무성형법을 이용한 재료개발과 공정 안정화에 관한 연구가 국내에서도 활발히 진행되어 왔다.[1,2,3] 그 결과 국내에서는 지름250mm 높이1200mm의 빌렛을 제조할 수 있는 분무성형 기술이 확보되어 양산화 단계에 접어들고 있다.[3] 분무성형법으로 제조된 봉상성형체는 다른 소재와 마찬가지로 압출, 단조등의 2차 가공이 필요한 경우가 많다. 이 중 2차가공이 압출인 경우 그림1과 같이 압출컨테이너의 크기에 맞게 기계가공한 후 압출과정을 거치는 전처리 작업이 필요하다. 따라서 예비성형체의 형상제어는 성형체의 기계 가공에 따른 시간 및 재료 손실을 줄이기 위한 중요한 기술이다. 조업이 시작되기 전에 설정한 조업조건이 적당하지 않을 경우 작업 중 조업조건을 수정하여야 하며 이 때 조업 조건에 따른 성형체의 형상변화를 예측할 수

있어야 원하는 크기 및 형상의 봉상성형체를 제조할 수 있다.



Fig 1. Extrusion of spray formed billet of A356 and 7075 Al alloys

본 연구는 조업중 제어 가능한 변수인 기판의 평균 하강속도, 하강속도 변속 시간, 변속 편차의 변화에 따른 봉상성형체의 형상변화를 고찰하므로써 성형체의 지름과 형상을 제어하기 위한 기술을 확립하고자 하였다. 이러한 목적으로 선행된 연구[1,2]에서 제안된 3차원 수치해석법을 이용하여 조업변수에 따른 봉상성형체의 형상을 고찰하고, A356, A390 및 7075 알루미늄 합금을 이용한 봉상성형체를 제조하여 수치해석법에 의한 결과와 비교 분석하였다.

2. 성장기구 해석

봉상성형체는 분무기로부터 분무된 액적이 방사상으로 비행하여 회전·하강하는 기판위에 성형되는 과정을 거치게 된다. 봉상성형체의 성장 과정을 모사하기 위해 성형체 표면 위의 임의의 점에 유입되는 액적량을 계산하고, 유입된 액적에 의해 성형체 표면 위의 임의의 점이 성장하는 과정을 추적하는 방법으로 성형체의 성장기구를 해석하였다.[2] 그림 2는 봉상성형체 성장기구의 3차원 해석에 사용된 조업변수들이다. 각속도 ω 로 시계방향으로 회전하면서 속도 V 로 하강하는 기판에 분무중심축이 z 축과 분무각 ϕ 만큼 기울어진 분무기로 액적을 분무하여 성형한다.

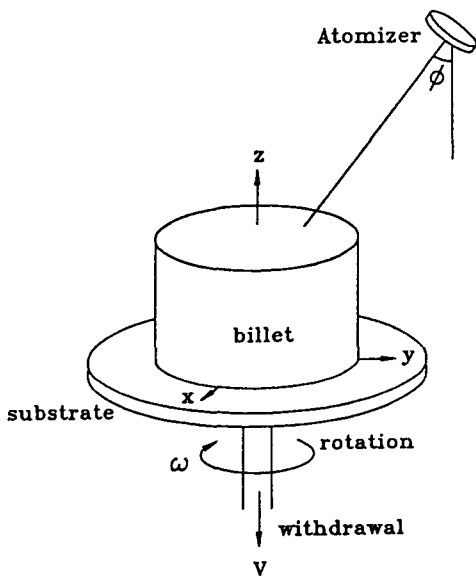


Fig 2. Schematic diagram of spray forming process of billet

분무기로부터 비행하는 액적의 분무밀도 분포 M 는 다음과 같다.[2,3]

$$M(r) = a \cdot \exp[-b \cdot r^2] \quad (1)$$

분무밀도 $M(\text{mm}^3/\text{mm}^2 \cdot \text{sec})$ 는 분무중심축으로부터 거리 r 의 위치에 있는 단위면적에 단위 시간당 유입되는 액적의 부피이다. $a(\text{mm}^3/\text{mm}^2 \cdot \text{sec})$ 는 용탕유출속도, $b(\text{mm}^{-2})$ 는 분무된 액적의 중앙집중도를 나타내는 분무밀도상수로서 분무거리에 따라 식(2)와 같이 변한다.[2]

$$\frac{a_s}{a} = \frac{b_s}{b} = \left(\frac{d}{d_s}\right)^2 \quad (2)$$

a_s 와 b_s 는 기준거리 d_s 에서의 분무밀도 상수이며, 이 연구에서 d_s 는 400mm이다. 계산에서 분무중심축과 수직방향이 이루는 분무각 ϕ 는 35° 이며, 기판의 회전각속도 ω 는 100 rpm 이다. 분무밀도상수 a_s 와 b_s 는 이 연구에서 사용된 분무기로 기준거리인 400mm 떨어진 정지된 기판에 A356 합금을 분무하여 성형된 성형체의 형상으로부터 측정하였고, 그 값은 각각 2 mm/sec 와 0.0008 mm^{-2} 이다. 조업 초기 분무중심축을 따라 분무기에서 기판에 이르는 분무거리 d_0 는 400mm 이다. 3차원 계산된 봉상성형체의 형상은 2차원으로 표시되도록 프로그래밍 되었다. 기판 하강속도는 Δt 간격으로 $\bar{V} + V_{dev}$ 와 $\bar{V} - V_{dev}$ 로 변속되는데, \bar{V} 는 기판의 평균하강속도, V_{dev} 는 기판 하강속도 변속 편차, Δt 는 기판 하강속도의 변속 시간 간격이다. 봉상성형체의 성장기구 수치해석에서 \bar{V} , V_{dev} , Δt 는 표1의 범위에서 계산되었다.

Table 1. Calculation and spray forming range of process parameters

\bar{V} mm/sec	V_{dev} mm/sec	Δt sec	Spray formed (alloy system)	
0.6	0	-	-	
0.4	0	-	● (7075)	
	0.2	200	● (A390)	
	0.4	200	200	● (A356)
		100	100	-
0.2	0	-	● (A390)	
	0.2	200	200	● (7075)
		100	100	-

3. 봉상성형체 제조 실험

200kw, 200kg 용량의 유도로에서 A356 합금, A390 합금 그리고 7075 알루미늄 합금을 각각 200kg 용해한 후 턴디쉬에 용탕을 주입하였다. 턴디쉬에 일정량의 용탕을 채워 용탕 온도를 일정하게 유지한 후 질소가스를 분무하여 성형체를 제조하였다. 턴디쉬에서의 용탕온도는 A356 합금은 $690 \pm 5^\circ\text{C}$, A390 합금은 $680 \pm 5^\circ\text{C}$, 7075 합금은 $705 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 유지되었으며, 분무가스압은 5기압이었다. 기관의 회전속도 100 rpm, 분무각도 35° 의 조건에서, 기관 평균 하강속도 \bar{V} , 하강속도 변속 시간 간격 Δt , 하강속도 변속 편차 V_{dev} 를 달리하여 성형체를 제조하였다. 제조된 성형체의 기관 평균하강속도 \bar{V} , 하강속도 변속 편차 V_{dev} , 하강속도 변속 시간 간격 Δt , 그리고 분무성형한 합금계는 표1에 주어졌다.

4. 결과 및 고찰

기관 하강속도에 비해 성형체의 지름이 상대적으로 크게 형성된 경우 시간이 경과하면 성형체는 정상상태의 지름으로 수렴한다.[2,3] 성형조업 초기 기관정지($V : 0\text{mm/sec}$, $\omega : 100\text{ rpm}$)시간이 길거나, 성형체에 유입되는 액적 온도가 높아서 성형체 표면부에 형성된 액상막이 바깥쪽으로 밀려나가 성형되는 경우, 그리고 초기 편심거리가 크게 설정된 경우 성형체 지름은 정상상태에서의 지름보다 크게 나타난다. 그림3은 하강속도가 0mm/sec 인 기관에 10초간 분무성형된 다음 기관 하강속도가 0.4mm/sec 로 유지될 때 분무성형된 7075 알루미늄 합금 봉상성형체다. 높이 100mm에서 지름은 170mm이지만 성형체가 성장하면서 지름은 계속 감소하여 높이 400mm에서는 150mm로 된다. 지름 150mm는 분무밀도상수 a 와 b 가 각각 2mm/sec , 0.0008mm^{-2} 이고 기관 하강속도가 0.4mm/sec 일 때 정상상태에서의 성형체 지름이다. 조업도중 기관의 하강속도가 변하면 성형체의 지름도 변한다.[3]

그림4는 0.25mm/sec 로 하강하는 기관이 400초 후 0.4mm/sec 로 변속될 때 계산된 성형체 형상이다. 기관하강속도 변속으로 지름이 180mm에서 150mm로 감소하며, 기관하강속도가 변속된 후 400초 후에 성형체 지름이

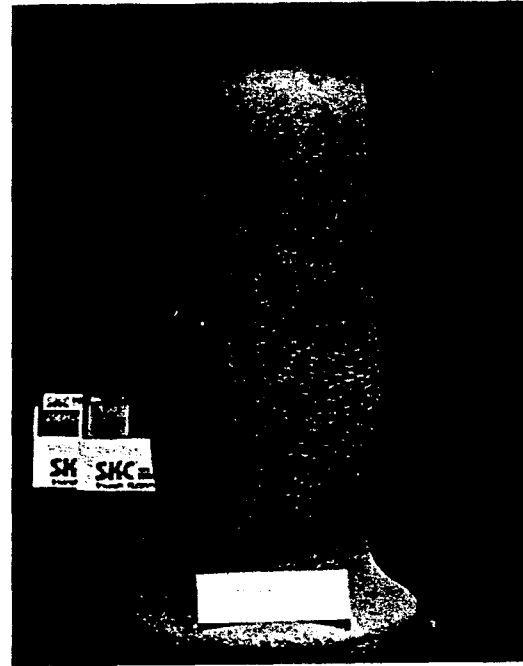


Fig 3. Spray formed billet of 7075 alloy ($V=0.4\text{mm/sec}$, $l_e=50\text{mm}$, $a=2\text{mm/sec}$, $b=0.0008\text{mm}^{-2}$ and $d_0=400\text{mm}$)

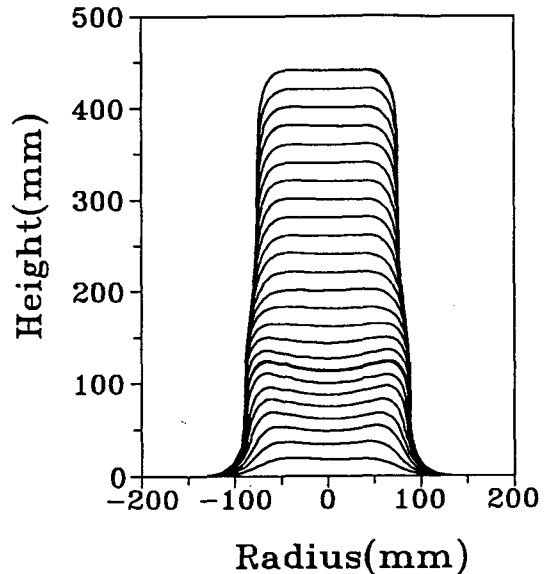
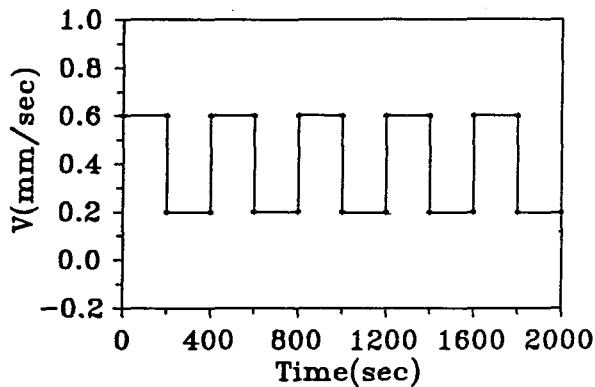


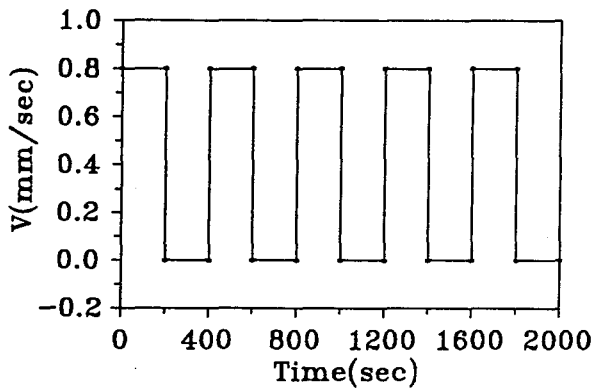
Fig 4. Calculated shape of billet ($V=0.4\text{mm/sec}$, $l_e=50\text{mm}$, $a=2\text{mm/sec}$, $b=0.0008\text{mm}^{-2}$ and $d_0=400\text{mm}$)

150mm로 일정해진다. 그림3과 그림4의 결과는 기관 하강속도에 의해 봉상성형체의 크기(지름)가 결정되며 기관 하강속도 변속에 의해 성형체의 형상과 지름은 시간 지연을 가지며 점차로 변화됨을 나타내고 있다. 그림 5-(a)는 기관 하강속도가 200초 간격으로

0.6mm/sec와 0.2mm/sec로 변속되어 평균속도 \bar{V} 가 0.4mm/sec, 기관 하강속도 변속 편차 V_{dev} 가 0.2mm/sec일 때 시간에 따른 기관 하강속도 변화를 나타낸 그림이며, 그림5-(b)는 기관 하강속도가 200초 간격으로 0.8mm/sec와 0mm/sec로 변속되어 평균속도 \bar{V} 가 0.4mm/sec, 하강속도 변속 편차 V_{dev} 가 0.4mm/sec일 때의 시간에 따른 기관 하강속도 변화를 나타낸 그림이다.



(a)



(b)

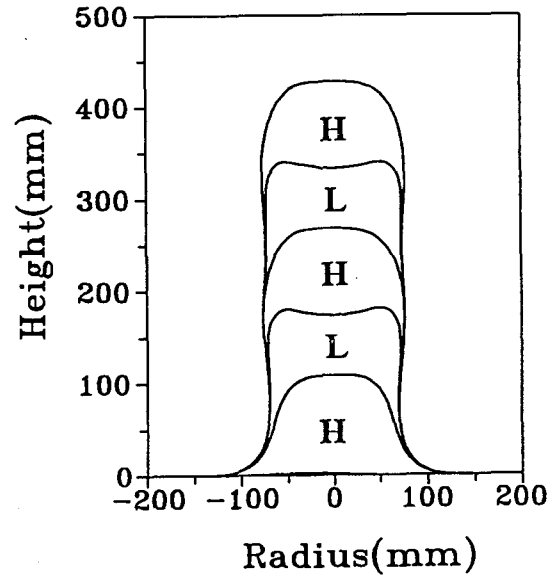
Fig 5. Substrate withdrawal velocity variation with time

(a) $\bar{V}=0.4\text{mm/sec}$, $V_{dev}=0.2\text{mm/sec}$,
 $\Delta t=200\text{ sec}$

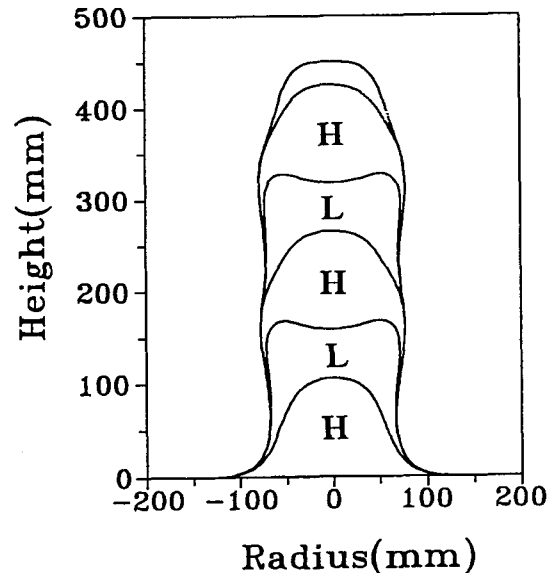
(b) $\bar{V}=0.4\text{mm/sec}$, $V_{dev}=0.4\text{mm/sec}$,
 $\Delta t=200\text{ sec}$

그림6은 각각의 경우에 계산된 성형체의 형상이다. 그림6에서 곡선은 기관 하강속도가 변한 순간의 성형체 표면 형상을 나타낸 것이며, 곡선과 곡선사이의 시간 간격은 200초

이다. H 구간은 기관 하강속도가 $\bar{V} + V_{dev}$, L 구간은 기관 하강속도가 $\bar{V} - V_{dev}$ 일 때 성형된 부분이다. 기관의 하강속도가 감소한 후 성형체 지름이 증가하기까지는 200초의 시간 지연이 있다. 기관의 하강속도가 클 때 성형된 H 부분은 반지름이 감소하고 높이 방향으로의 성장속도가 크다. 기관의 하강속도



(a)



(b)

Fig 6. Calculated shape of billet

($\bar{V}=0.4\text{mm/sec}$, $\Delta t=200\text{sec}$, $l_e=50\text{mm}$,
 $a=2\text{mm/sec}$, $b=0.0008\text{mm}^{-2}$, $d_0=400\text{mm}$)

(a) $V_{dev}=0.2\text{mm/sec}$

(b) $V_{dev}=0.4\text{mm/sec}$

가 작을 때 성형된 L 부분은 성형체의 높이 방향으로 성장속도는 작고 성형체 지름은 증가하고 있다. 평균하강속도 \bar{V} 가 0.4mm/sec, 하강속도 변속 편차 V_{dev} 가 0.4mm/sec일 때 성형된 성형체는 하강속도 편차 V_{dev} 가 0.2mm/sec일 때의 성형체보다 지름 변화가 크게 나타나고 있다.

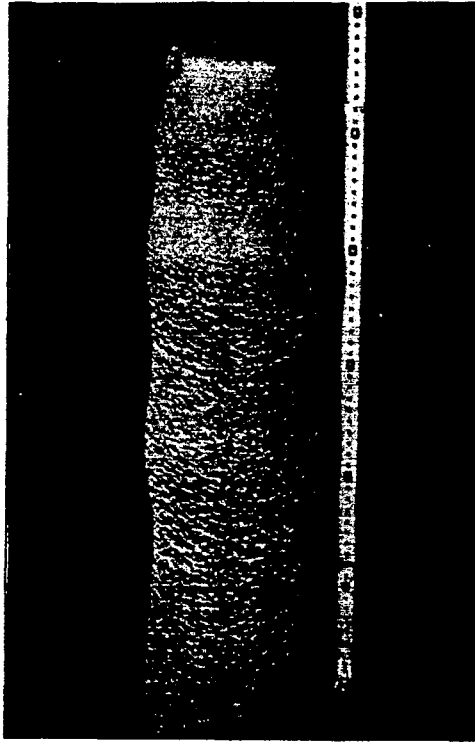
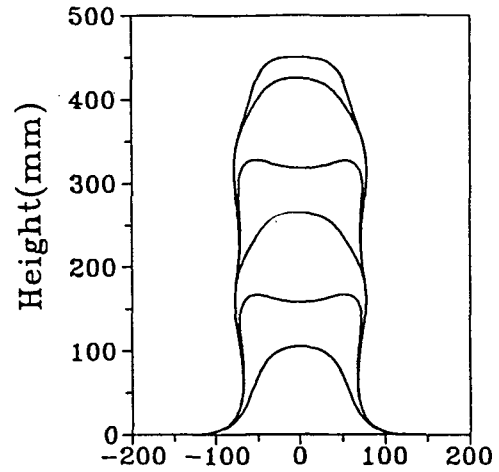


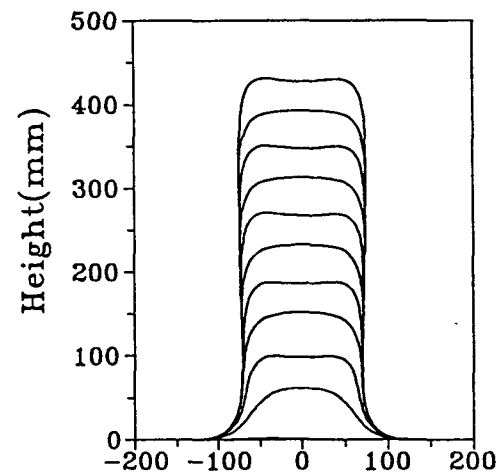
Fig 7. Spray formed billet of A356 alloy
 ($\bar{V}=0.4\text{mm/sec}$, $\Delta t=200\text{sec}$, $l_e=50\text{mm}$,
 $V_{dev}=0.4\text{mm/sec}$, $a=2\text{mm/sec}$,
 $b=0.0008\text{mm}^{-2}$, $d_0=400\text{mm}$)

그림7은 Δt 가 200초이고 \bar{V} 가 0.4mm/sec, V_{dev} 가 0.4mm/sec일 때 제조된 성형체이다. 그림6-(b)의 계산 결과에서 예측된 바와 같이 성형체는 200초 간격으로 최대 165mm 최소 135mm의 지름을 가지며 성장하고 있다.

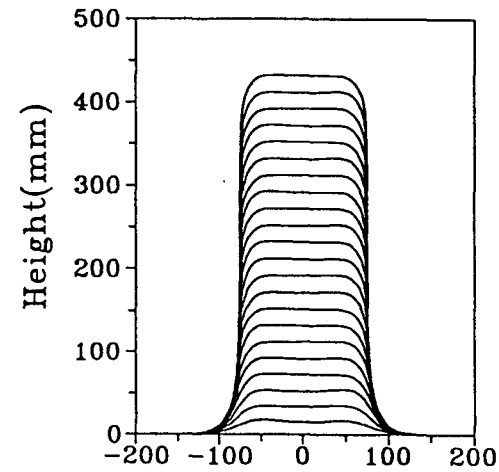
그림8은 기관평균하강속도 \bar{V} 가 0.4mm/sec 하강속도 변속 편차 V_{dev} 가 0.4mm/sec일 경우 속도 변속 시간간격 Δt 가 200sec, 100sec, 50sec로 감소할 때의 성형체 형상으로 변속 시간 간격이 작을수록 성형체의 형상변화와 지름 변화는 감소하고 있다. 또한 그림9-(b)는 기관이 200초 간격으로 0.4mm/sec와 0mm/sec로 하강하여 기관의 평균하강속도가



(a)



(b)



(c)

Fig 8. Calculated shape of billet with different Δt

($\bar{V}=0.4\text{mm/sec}$, $V_{dev}=0.4\text{mm/sec}$, $l_e=50\text{mm}$,
 $a=2\text{mm/sec}$, $b=0.0008\text{mm}^{-2}$, $d_0=400\text{mm}$)
 (a) $\Delta t=200\text{sec}$ (b) $\Delta t=100\text{sec}$ (c) $\Delta t=50\text{sec}$

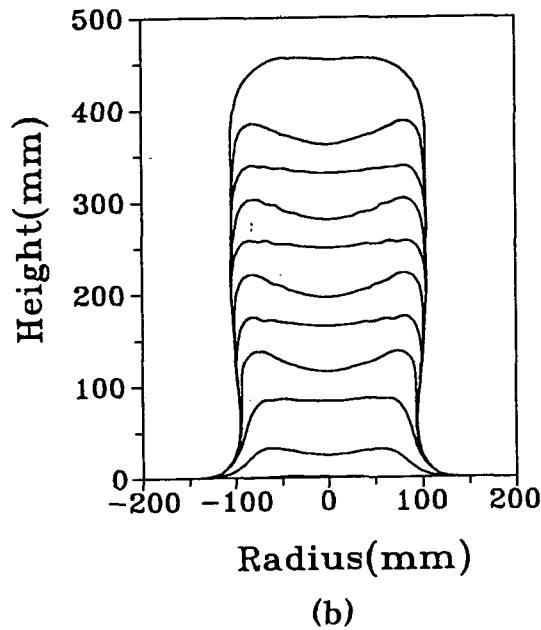
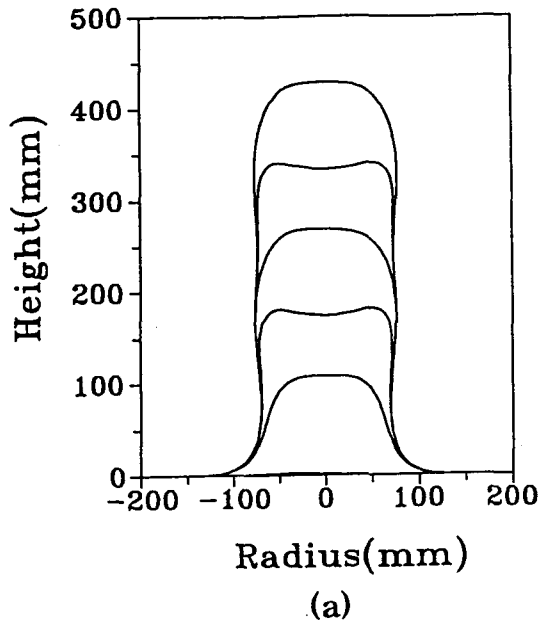


Fig 9. Calculated shape of billet with different \bar{V}
 ($V_{dev}=0.2\text{mm/sec}$, $\Delta t=200\text{sec}$, $l_e=50\text{mm}$,
 $a=2\text{mm/sec}$, $b=0.0008\text{mm}^{-2}$, $d_0=400\text{mm}$)
 (a) $\bar{V}=0.4\text{mm/sec}$ (b) $\bar{V}=0.2\text{ mm/sec}$

0.2mm/sec일 때의 성형체 형상이다. 평균하강속도 0.4mm/sec, 기관 하강속도 편차 0.2mm/sec, 기관 하강속도 변속 시간간격 200sec일 때의 성형체 형상인 그림 9-(a)보다 성형체의 형상 변화 및 지름 변화가 작다. 그

림10은 200초 간격으로 기관 하강속도를 0.4mm/sec와 0mm/sec로 제어하여 제조한 지름 230mm 높이 1000mm의 7075 알루미늄 봉상 성형체이다. 기관 하강속도 변화에 따른 성형체의 지름 변화는 관찰되지 않는다. 기관 평균 하강속도 \bar{V} 및 기관 하강속도의 변속 편차 V_{dev} 가 작거나 변속 시간간격 Δt 가 작을수록 기관 하강속도 변속에 따른 성형체의 표면 형상과 지름 변화가 줄어들고 있다.

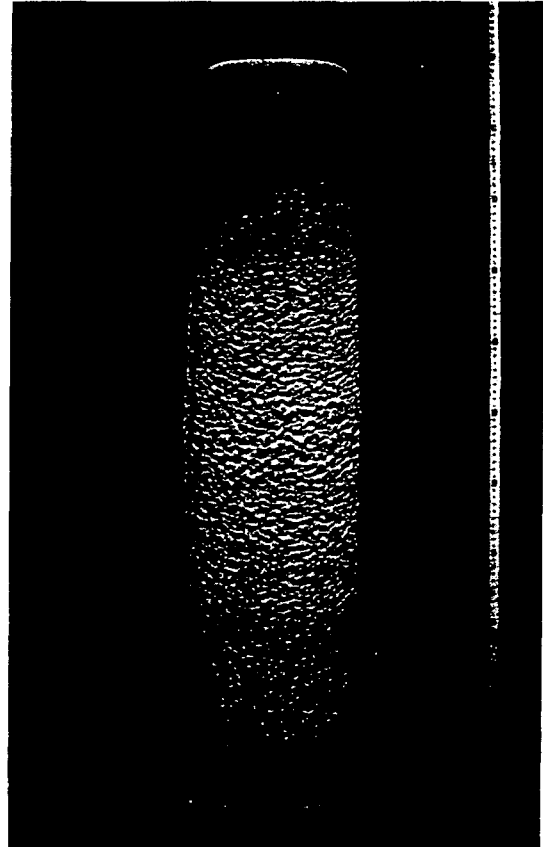


Fig 10. Spray formed 7075 alloy billet of $\phi 230\text{mm} \times h 1000\text{mm}$
 ($\bar{V}=0.2\text{mm/sec}$, $V_{dev}=0.2\text{mm/sec}$,
 $\Delta t=200\text{ sec}$, $a=2\text{mm/sec}$, $b=0.0008\text{mm}^{-2}$,
 $d_0=400\text{mm}$ and $l_e=50\text{mm}$)

조업중 기관 하강속도가 변할 때 성형체의 지름은 기관의 평균하강속도 \bar{V} 에 의해 결정된다. 그림11-(a)는 초기 분무거리 d_0 가 400mm이고 평균하강속도 \bar{V} 가 0.4mm/sec, 변속시간 간격 Δt 가 200초, 변속 편차 V_{dev} 가 0.2mm/sec인 조건에서 제조된 A390 알루미늄

미늄 합금 봉상성형체이다. 최대 지름 160mm 최소 지름 140mm으로 평균지름이 150mm이다. 평균하강속도 \bar{V} 가 0.4mm/sec, 변속시간 간격 200초, 변속 편차 0.4mm/sec 인 조건에서 제조된 그림6의 A356합금 봉상 성형체는 최대지름 165mm 최소 지름 135mm로서 역시 평균 지름은 150mm이다. 기판의 평균 하강속도(높이/조업시간)가 0.2 mm/sec인 조건에서 제조된 그림11-(b)의 봉상성형체의 지름과 평균하강속도 \bar{V} 가 0.2mm/sec, 변속시간 간격 200초, 변속 편차 0.2mm/sec의 조건에서 제조된 그림10의 7075 알루미늄 합금 봉상성형체의 평균 지름은 230mm로 동일하다. 그림12는 기판의 하강속도가 0.6mm/sec, 0.4mm/sec 그리고 0.2mm/sec로 일정할 때 계산된 성형체의 형상이다. 기판 하강속도가 작아질수록 성형체의 지름은 증가하고, 성형체 정상부는 성형체 안쪽으로 오목해진다. 기판 하강속도가 0.4mm/sec일 때 빌렛의 지름은 150mm 이며, 하강속도가 0.2mm/sec일 때 성형체의 지름은 230mm 이다. 이는 평균 하강속도가 0.4mm/sec와 0.2mm/sec일 때 제조된 성형체의 평균 지름과 일치한다.

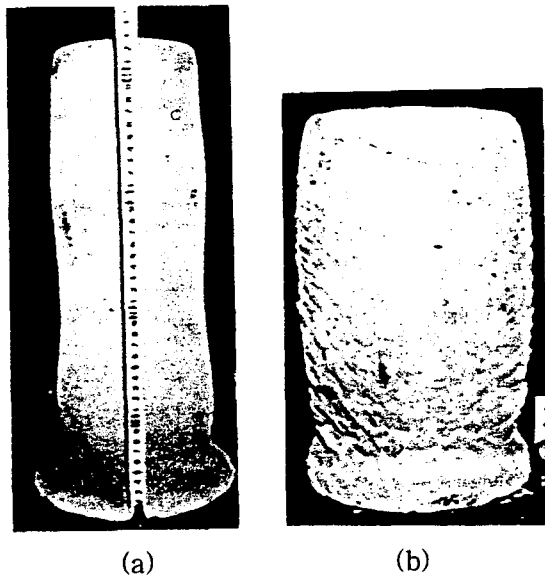


Fig 11. Spray formed billet of A390 alloy with variation of \bar{V}
 ($a=2\text{mm/sec}$, $b=0.0008\text{mm}^{-2}$,
 $d_0=400\text{mm}$ and $l_e=50\text{mm}$)
 (a) $\bar{V} = 0.4\text{mm/sec}$, dia.=150mm
 (b) $\bar{V} = 0.2\text{mm/sec}$, dia.=230mm

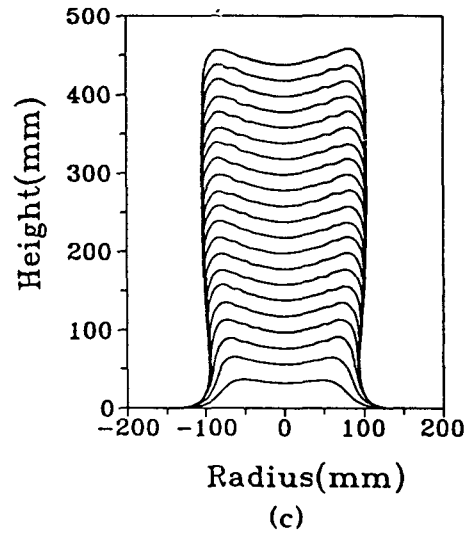
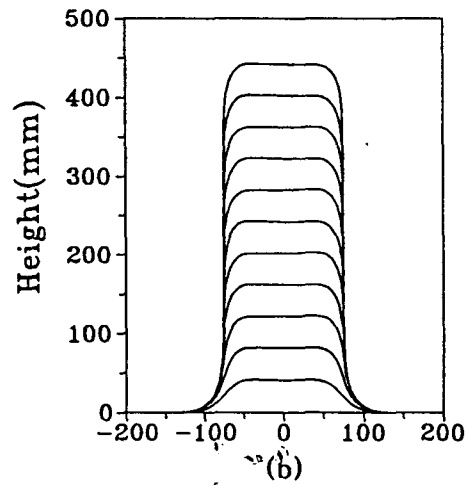
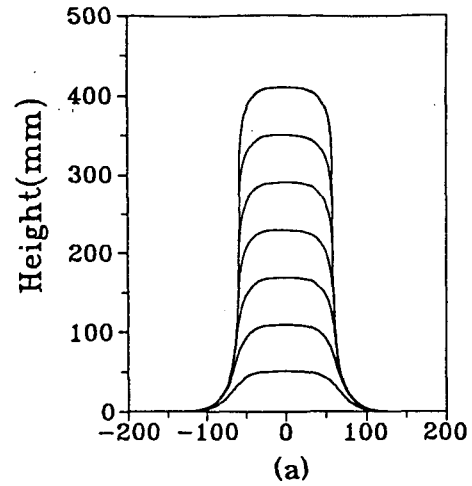


Fig 12. Calculated shape of billet with variation of withdrawal velocity V
 ($a=2\text{mm/sec}$, $b=0.0008\text{mm}^{-2}$,
 $d_0=400\text{mm}$ and $l_e=50\text{mm}$)
 (a) $v=0.6\text{mm/sec}$ (b) $v=0.4\text{mm/sec}$
 (c) $v=0.2\text{mm/sec}$

5. 결론

분무성형 조업중 기관의 평균 하강속도 \bar{V} , 기관하강속도 변속 시간 간격 Δt , 기관 하강속도 변속 편차 V_{dev} 에 따른 성형체의 형상 변화를 수치해석 및 실험을 통해 고찰하여 다음 결론을 얻었다.

1. 분무성형 조업중 기관의 하강속도가 변하면 성형체의 표면 형상과 성형체의 지름이 변한다. 이 때 기관의 하강속도 변화와 성형체의 형상 및 지름 변화 사이에는 시간 지연이 존재한다.

2. \bar{V} , Δt 그리고 V_{dev} 가 작을 수록 성형체의 표면형상과 지름의 변화는 감소한다.

3. \bar{V} 가 같으면 성형체의 평균 지름은 같다. 이 때 성형체의 평균 지름은 기관의 하강속도가 일정할 때 수치해석법으로 계산된 성형체 지름과 일치한다.

4. \bar{V} 가 0.2mm/sec, V_{dev} 가 0.2mm/sec 그리고 Δt 가 200초인 조건에서 지름 230mm 높이 1000mm의 A356 및 7075합금의 봉상성형체가 성형되었다.

6. 참고문헌

1. 석현광, 여동훈, 오규환, 이호인, 나형용 : 대한금속학회지 vol. 33 (1995), 406
2. 여동훈, 석현광, 오규환, 이호인, 나형용 : 대한금속학회지 (투고중)
3. 이희춘, 나형용, 오규환, 이호인, 김성균 : 대한금속학회지 vo. 30 (1992), 1063
4. 이희춘, 나형용, 오규환, 이호인, 나형용 : 대한금속학회지 vo. 30 (1992), 1071
5. IAN A. FRIGRAARD, The Dynamics of Spray Formed Billets, SIAM J. APPL. MATH. vol. 55, No. 55 (1995) pp 1161-1203
6. P.S.Grant, Progress in Materials Science, Vol.39, pp.497-545 (1995)
7. M. Muhamad, J.O.Medwell and D.T.Gethin, Powder Metallurgy, vol.38 (1995), 214