

〈論 文〉

반용융 압연을 이용한 박판제조공정에 관한 연구(I)

— 반용융 재료의 압연실험 및 압연력계산 —

백남주* · 강충길** · 김영도***

(1990년 12월 31일 접수)

A Study on Strip Fabrication Processes Using Mushy State Rolling (I) — Rolling Experiments of Metals in Mushy State and Rolling Force Calculation —

N.J. Baek, C.G. Kang and Y.D. Kim

Key Words : Solid Fraction(고상률), Particle Reinforced Composite Materials(입자강화 복합 재료), Near Net Shape Manufacturing(정형가공), Mushy State Rolling(반용융 압연), Velocity Discontinuity(속도불연속)

Abstract

In the direct rolling processes for the mushy state alloy, a mushy state material which simultaneously contains liquid-solid phase is obtained from the exit port of stirring apparatus with a given solid fraction. This solid fraction is dependent on the temperature of within the solid-liquid range which shows to be controlled accurately by the experimental conditions for a given stirring apparatus. Rolling conditions for fabrication the fine surface strip were obtained from direct rolling experiment with mushy state alloys of Sn-75%Pb and aluminum alloy. Influence of solid fraction, rolling speed and initial roller gap on the state of strip surface and solidified structure was observed. We proposed theoretical model for prediction of rolling force, and we compared calculation result and experimental value measured with load cell.

기 호 설 명

A, B : Sn과 Pb의 조성비

C_p : 비열

dt : 시간증분에 따른 응고두께

f : 항복합수

F_i : 표면력

h : 롤중심에서 탕면까지의 거리

h_0 : 롤과 응고셀사이의 열전달계수

H_0 : 초기를 설정간격의 절반

H_i : 탕면폭의 절반

H_f : 잠열

J^* : 에너지율

k : 열전도율

m : 마찰계수

n : 점소성지수

P : 압하력

R_0 : 압연롤의 반경

S : 요소의 면적

S_f : 고상률

S_L : 액상률

t : 시간

t_i : 압연전의 박판두께

t_f : 압연후의 박판두께

* 정회원, 부산대학교 공과대학 생산기계공학과

** 정회원, 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과

*** 부산대학교 대학원

- T : 온도
 T_M : 순납(pure lead)의 용융온도
 T_E : 공정온도(eutectic temperature)
 T_P : 용탕주입온도
 T_r : 롤의 온도
 V : 체적
 V_i : 속도불연속량
 V_n^* : 동적가용속도장의 법선방향성분
 V_t^* : 동적가용속도장의 접선방향성분
 V_0 : 압연속도(mm/s)
 \dot{W} : 총변형에너지(= $\dot{W}_{internal} + \dot{W}_{porous} + \dot{W}_{solid}$)
 $\dot{W}_{internal}$: 내부 변형에너지율
 \dot{W}_{porous} : 반용융상태에서 재료의 변형에너지율
 \dot{W}_{solid} : 고체상태에서 재료의 변형에너지율
 α, φ, ϕ : 각도
 ΔV_i : 속도불연속량의 차
 $\dot{\epsilon}_{ave}$: 평균압축 변형률속도
 Γ : 속도불연속면
 $\dot{\epsilon}_{ij}$: 속도장을 만족하는 변형률속도장
 ρ_i : 반용융영역의 밀도
 ρ_f : 고상영역의 밀도
 ρ_m : 평균밀도비(= $(\rho_i + \rho_f) / 2$)
 ρ_r : 밀도비(= ρ_i / ρ_f)
 ρ' : 밀도
 σ_0 : 재료의 항복응력
 $\sigma_{0,p}$: 반용융역에서의 항복응력
 $\sigma_{0,s}$: 고상역에서의 항복응력
 σ_m : 정수압응력
 ω : 롤의 각속도

참 자

- n : 응고 계면과 법선방향의 단위벡터
 t : 응고 계면과 접선방향의 단위벡터
 L : 액상
 P : 반용융상태
 S : 고상

1. 서 론

반용융가공법은 고상성분과 액상성분이 동시에 공존하는 반용융금속을 기계적으로 교반을 하여 수지상정을 파괴시킨 다음 압력을 가해 변형, 유동, 결합 또는 분리시켜서 소모의 형상, 치수를 갖는 제품을 얻는 가공법으로써 가공력의 저하, 가공기

계 및 설비의 소형화, 신소재의 제조공정 및 正形加工(near net shape manufacturing), 난가공재의 복합가공 등의 잇점 때문에 최근 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁻³⁾.

이와 같은 잇점 외에 반용융가공법은 2차 가공을 하지 않고 최종 형상에 가까운 제품 제조가 가능하기 때문에, 모재(matrix)와 섬유(fiber)의 계면문제 및 2차가공이 어려운 금속복합재료의 부품제조공정에 널리 이용되고 있다^(4,5).

반용융상태의 금속을 이용한 금속가공법의 한 예로 용융상태의 금속이 완전히 응고하기 전에 가압하여서 내부결함을 제거하는 방법과⁽⁶⁾, 반용융상태의 특성을 이용한 금속의 레오로지(Rheology) 거동 등이 발표되었다⁽⁷⁻⁸⁾.

木内 學⁽⁹⁾ 등은 고액공존상태에 있어서 금속의 변형저항치와 고상물의 관계를 구했고, 고상물이 감소하면 유동응력도 감소함을 실험적으로 보였다. Shima⁽¹⁰⁾ 등은 반용융상태에 있어서의 소성이론을 압출가공에 적용하여 압출력을 구하였다.

직접압연에 의한 판재제조에서 나타나는 브레이크아웃(breakout), 표면결함, 과대압하력, 슬립현상, 리플마크(ripple mark) 및 두께변화와 같은 결함은 박판제조의 저해요인이 되며, 특히 브레이크아웃현상 이나 과대압하력의 작용은 박판제조시 가공공정의 정지를 야기시키게 되며, 단면에서 경도분포 및 응고조직에 큰 차이가 나타남을 알 수 있었다⁽¹¹⁾.

이상의 연구동향에 의하면 반용융재료를 이용한 연구의 대부분은 응고조직과 고상률과의 관계에 대한 내용이 대부분이고, 박판제조공정에 대한 연구는 거의 찾아볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 Sn-75%Pb와 Al합금으로 반용융재료의 직접압연실험을 행하여 양호한 판재를 제조할 수 있는 압연조건을 구하였으며, 박판제조시 실험변수인 고상률, 롤회전속도 및 롤초기설정간격 등이 박판의 표면상태와 응고조직에 미치는 영향을 밝혔다. 또한 박판의 기계적 성질에 영향을 미치는 압연역을 예측하는 이론적 모델을 제시하고, 계산결과를 실험치와 비교검토했다.

2. 실 험

2.1 실험장치

실험장치의 실제외형을 Fig. 1에 보이고 있으며,

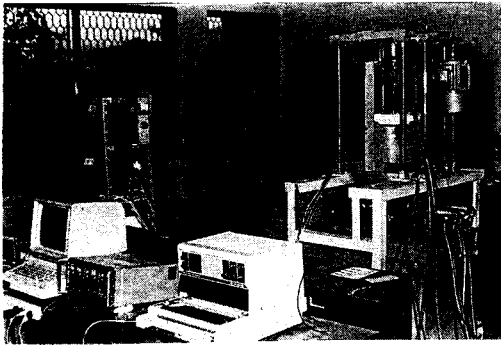


Fig. 1 Experiment apparatus of direct rolling process

Fig. 2는 실험장치의 도식적인 모양을 보이고 있다. 실험장치는 크게 교반부, 항온유지부, 온도 및 회전수제어부, 압연부, 냉각수공급부, 측정부로 나누어 진다. 교반부에서는 200~300rpm정도로 임펠러를 회전시켜 반응용상태의 합금을 교반하였다. 이때 용탕의 온도를 정확히 조절하기 위하여 2단으로 전기로를 구성하여 가열을 하였다. 용탕의 온도는 CA 열전대로 측정하여 전자식 온도조절제로 제어하였다. 반응용상태의 합금은 점도가 크기때문에 롤사이에 일정량으로 주입이 곤란하다. 그래서 전기로에서 설치된 교반축의 하부에 나선을 가공하여 반응용금속을 회전하는 롤사이에 주입할 때 축의 회전수를 조절하여 주입량을 조절하도록 하였다.

회전수는 엔코더로 측정하여 8비트 퍼스날 컴퓨터로 제어하였다. 압연롤은 중공롤로 설계하여 내부에 냉각수를 순환시켜 냉각효과를 높였으며, 강으로 제작한 후 표면에 크롬도금하여 표면조도의 정도 및 내열성을 향상시켰다. 또한 압연시 롤에

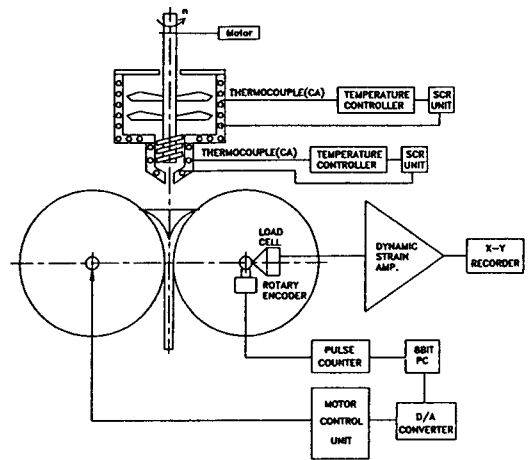


Fig. 2 Schematic representation of direct rolling equipment

작용하는 압연력은 롤의 양단 축지지부에 로드셀을 부착하여 측정하였다. 실험재료로는 반응용상태의 범위가 넓어 실험이 용이한 Sn-75%Pb로 실험을 하였고, 입자강화 복합재료의 기지재료로 이용되는 알루미늄합금인 Al 7075를 사용하여 실험을 행하였다.

Table 1에 실험장치의 사양을 나타내었다.

2.2 실험방법

실험변수인 롤의 회전수, 롤의 간격 및 고상물을 실험조건에 알맞게 유지시킨 후 용탕을 롤사이의 중앙부로 주입시키면 롤내부에 순환하는 냉각수의 냉각효과에 의해서 롤표면에 응고셀이 형성되고 이때 롤회전에 의한 압하력으로 응고셀이 결합되어

Table 1 Specification of experimental Equipment

Item	Symbol	Unit	Specification
Roll radius	R	mm	170
Roll thickness	ΔR	mm	5
Roll width	L	mm	200
Cooling type	Water Cooling at inner surface of roller		
Load cell		kgf	5000
Drive motor		RPM	50 (Max)
Mixing motor		RPM	500 (Max)
Rotary encoder		PPR	500
Microprocessor			APPLE II (CPU 6502) PC
Furnace		°C	1000 (Max)

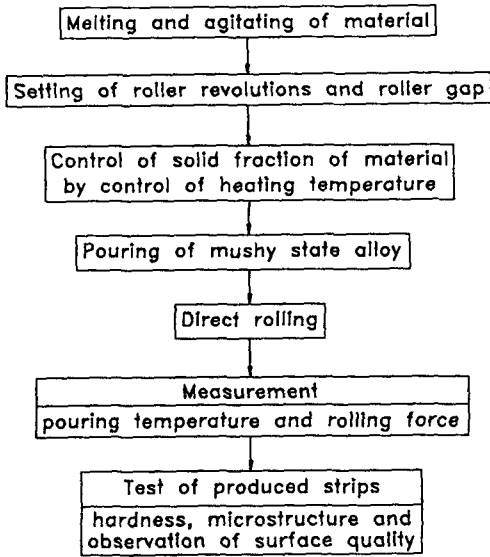


Fig. 3 Diagram of direct rolling experiment with mushy state alloy

박판이 제조된다. Fig. 3에 직접압연공정을 도식적으로 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)~(e)에 압연조건에 따른 판재의 표면 상태를 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 압연속도가 너무 크거나 롤간격이 너무 클 경우 응고셀이 완전하게 형성되지 못하여 반용용상태로 롤을 빠져나오는 브레이크아웃(breakout)현상의 생성기구이다. Fig. 4(b)는 반용용상태의 합금이 롤사이에서 응고가 너무 크게되어 압연되지 못하고 과대 압하력이 작용하는 현상을 도식적으로 보이고 있다. 그리고 Fig. 4(c)는 적절한 응고셀의 형성으로 양호한 판재를 제조할때의 압연상태를 보이고 있다. Fig. 4(d)는 응고완료점이 롤출구쪽에 위치하여 응고셀이 완전하게 결합되지 못하고 갈라지는 엘리게이터링(alligatoring)현상을 보이고 있다. 그리고 Fig. 4(e)는 냉각롤의 불충분한 냉각에 의해 롤을 빠져나온 후 표면에 크랙(crack)이 발생하는 표면크랙(surface crack)의 생성기구를 보이고 있다. 따라서 이 결과 직접압연에서는 응고완료점의 제어가 가장 중요한 공정변수임을 알 수 있다.

반용용상태에 있는 Sn-75%Pb와 Al합금의 고상률은 아래의 식을 이용하여 각각 구하였다.

Sn-75%Pb :

$$S_f = (T_o - T)(T_M - T_E) / (T_o - T_E)(T_M - T) \quad (1)$$

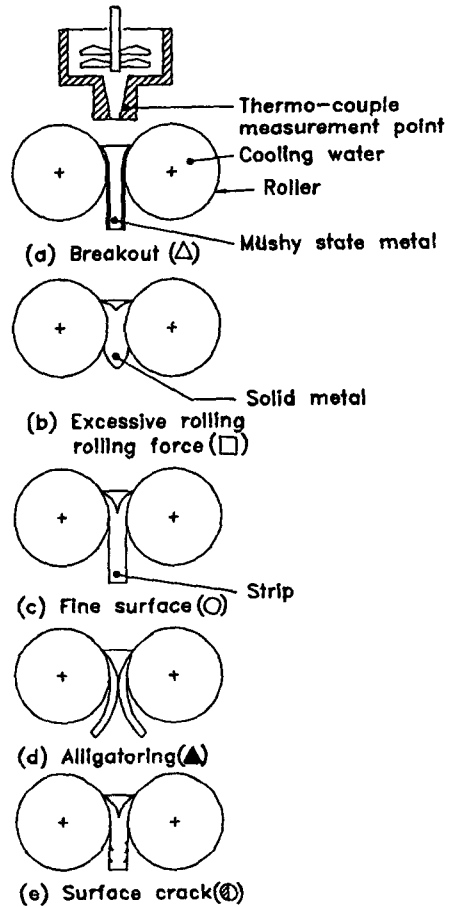


Fig. 4 The state of strip formation according to solidification phenomenon

$$T_o = (1 - A/B) T_M + (A/B) T_E$$

Al합금 : $S_f = (T_L - T) / (T_L - T_S) \quad (2)$

실험후 제조된 박판을 비커스경도기를 이용하여 각부의 경도를 측정하였고, 그리고 금속현미경을 이용하여 판재단면의 응고조직을 관찰하였다.

2.3 실험결과 및 고찰

(1) Sn-75%Pb의 반용용 압연

본 실험에서는 풀(pool)의 깊이와 주편의 폭이 일정한 상태에서 중요한 조작변수인 롤의 초기 설정간격, 회전속도 및 고상률을 변화시켜 실험을 하였다.

Table 2는 고상률 S_f 가 각각 0%, 10%, 30%인 경우 롤간격과 회전수를 변화시키면서 압연을 하였을 경우 판재의 제조상태를 나타낸 것이다.

Sn-75%Pb의 압연 가능한 범위는 초기 롤설정간격이 일정할 경우, 고상률이 증가할수록 롤의 회전수가 증가하는 방향으로 이동하였다. 고상률이 증가하게 되면 응고완료점이 롤출구로부터 상류쪽으로

이동하기 때문에 초기 롤설정간격이 작을 경우 압연롤이 커지므로 과대압하력이 걸려 압연이 불가능하게 된다. 롤회전수가 일정할 경우에는 고상률이 증가함에 따라 초기 롤 설정간격이 증가하는 방향

Table 2 Experiments data for Sn-75%Pb

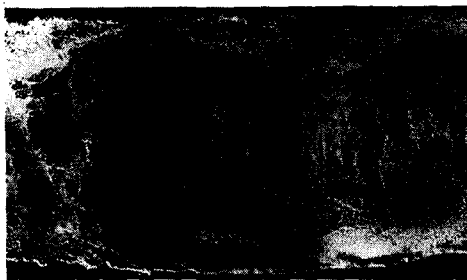
Rolling material	Solid fraction	Roller revolutions	Initial roller gap	Surface quality of strip
	$S_r(\%)$	$N(\text{rpm})$	$2H_o(\text{mm})$	
Sn-75%Pb	0	25	1.0	□
	0	30	1.0	○
	0	35	1.0	○
	0	40	1.0	○
	0	45	1.0	○
	0	25	1.5	○
	0	30	1.5	○
	0	35	1.5	○
	0	40	1.5	○
	0	45	1.5	●
	0	25	2.0	▲
	0	30	2.0	△
	10	30	1.0	□
	10	35	1.0	○
	10	40	1.0	○
	10	45	1.0	○
	10	25	1.0	□
	10	30	1.5	○
	10	35	1.5	○
	10	40	1.5	○
	10	45	1.5	●
	10	25	2.0	○
	10	30	2.0	○
	10	35	2.0	○
	10	40	2.0	△
	10	25	2.5	○
	10	30	2.5	△
	10	25	3.0	△
	30	45	1.0	□
	30	50	1.0	○
	30	40	1.5	□
	30	45	1.5	○
	30	50	1.5	○
30	40	2.0	△	
30	45	2.0	○	
30	50	2.0	△	
30	45	3.0	△	

○ Fine surface △ Breakout □ Excessive rolling force ● Surface crack ▲ Alligatoring

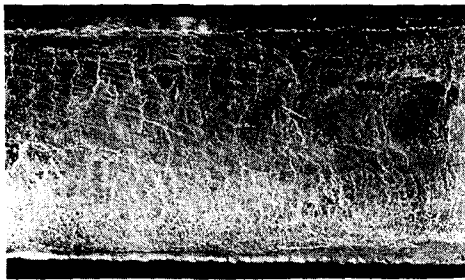
으로 이동하였다. 이는 응고완료점이 초기 물설정 간격이 증가함에 따라 물출구쪽으로 이동하기 때문이다.

이와같이 응고완료점은 재료의 고상률과 롤의 회전속도 및 초기 설정간격의 함수로 반용융압연시 가장 중요한 조건이 된다.

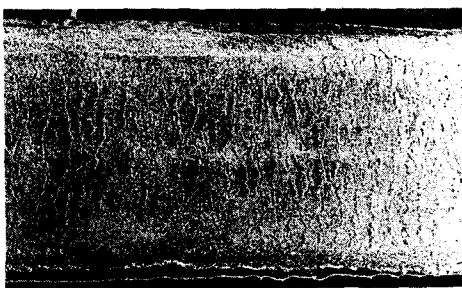
고상률 30%의 Sn-75%Pb를 주입하여 제조한 판재의 표면상태를 Fig. 5(a), (b), (c)에 보이고 있다. (a)를 보면 롤회전수가 30rpm일때 판재는 제조되었으나 표면을 보면 응고셀이 크게되어 압연된 자국이 표면에 나타난다. 판재의 표면에 리플마크(ripple mark)가 나타나는데 회전수를 증가시킬수록 리플마크의 간격이 좁아져서 좀더 매끄러운 표면을 갖는 판재가 제조됨을 알 수 있다. 그러나 대



(a) N=30 rpm



(b) N=45 rpm



(c) N=50 rpm

Fig. 5 Surface quality of strips fabricated at solid fraction 30% and $2H_0 = 1.5\text{mm}$

체적으로 균일하고 매끈한 표면을 갖는 박판의 제조는 어려웠다.

Fig. 6(a), (b)는 리플마크(ripple mark)의 생성기구를 보이고 있다. Fig. 6(a)는 용융상태의 금속을 압연할 때이고, (b)는 반용융상태의 금속을 압연할때 리플마크(ripple mark)의 생성기구를 나타낸다. 고상률이 높은 반용융금속을 롤사이에 주입하게 되면 점도가 크기때문에 탕면이 불규칙하게 형성되어 리플마크의 간격이 좁아지고, 또한 고상률이 높을 수록 응고셀이 더 두껍게 형성되므로 롤과의 마찰에 의한 굽힘이 적게되어 리플마크의 깊이가 작아진다고 생각할 수 있다.

Fig. 7은 판재 단면의 경도와 표면에서의 경도시험결과를 보이고 있다. 이때 판재표면부의 경도가 중심부보다 큰 경도치를 보인다. 이는 냉각률의 급냉효과에 의해서 표면부에서의 냉각속도가 크기 때문에 표면부의 조직이 미세화 되었다고 생각된다.

Fig. 8은 압연속도의 변화에 따른 제조된 판재 각부의 경도의 평균값을 보이고 있다. 압연속도가 작을 수록 압연되어진 판재의 경도치는 미소하지만 크게 측정되었다. 이 이유로는 압연속도가 낮을수록 응고완료점이 물출구로 부터 더 상류쪽으로 위치하므로 압연롤이 크게 되고, 압연롤이 커질수록 압연후 조직이 미세해지므로 더 큰 경도치가 측정되는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 9는 제조된 판재단면의 중앙부와 가장자리

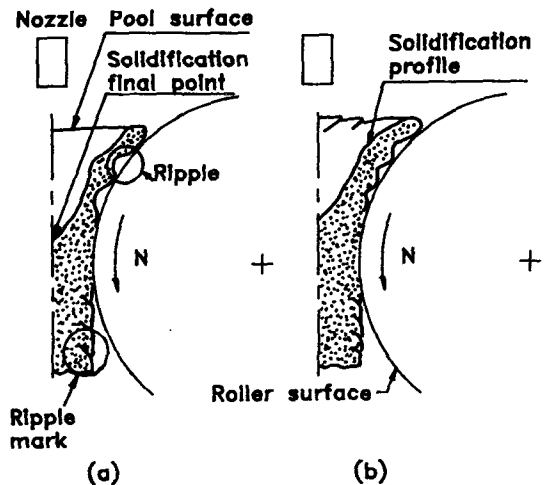


Fig. 6 Formation mechanism of ripple marks when rolling with (a) liquied alloy and (b) mushy state alloy

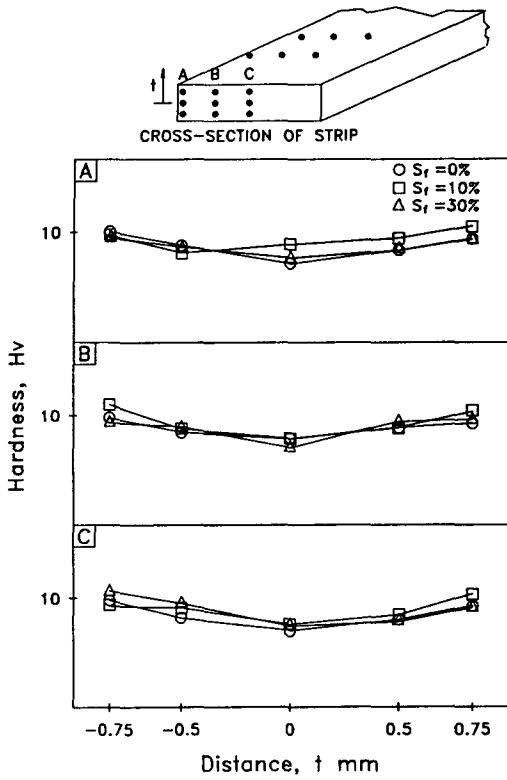


Fig. 7 Comparison of hardness distribution of strips fabricated at solid fraction $S_f = 0, 10$ and 30%

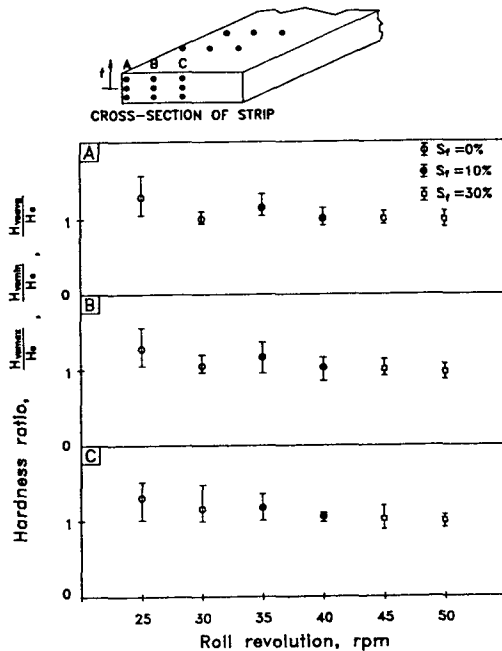


Fig. 8 Hardness values according to changing of roller revolutions

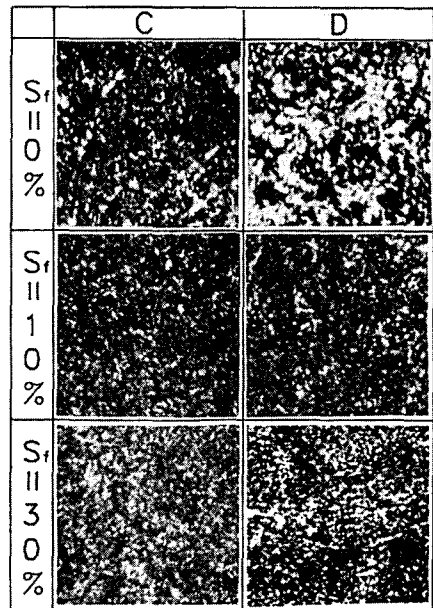
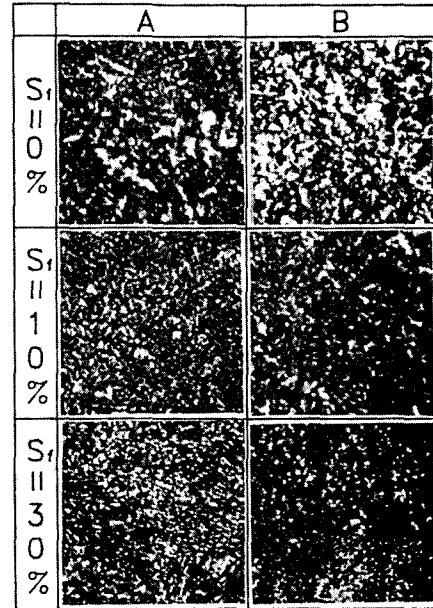
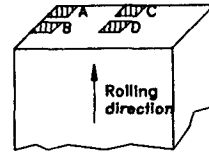


Fig. 9 Comparison of microstructures of strips fabricated in different solid fraction

Table 3 Experiments data for Al 7075

Rolling material	Solid fraction	Roller revolutions	Initial roller gap	Surface quality of strip
	$S_r(\%)$	$N(\text{rpm})$	$2H_0(\text{mm})$	
Al 7075	0	30	1.0	□
	0	35	1.0	□
	0	40	1.0	□
	0	45	1.0	□
	0	25	1.5	□
	0	30	1.5	○
	0	35	1.5	○
	0	40	1.5	○
	0	45	1.5	○
	0	25	2.0	○
	0	30	2.0	○
	0	35	2.0	○
	0	40	2.0	△
	0	25	2.5	○
	0	30	2.5	△
	0	25	3.0	△

○ Fine surface △ Breakout □ Excessive rolling force ● Surface crack ▲ Alligatoring

부분의 조직사진으로 주편의 표면부분에서는 Sn을 많이 포함하는 백색 입상조직의 입경이 작고, 두께 방향의 중앙부의 입경이 크게 나타났다. 즉, 백색 입상조직의 입경이 작은 롤표면부근에서의 경도값이 크게 나타났는데 이는 비커스경도측정치와 일치하고 있다. 그리고 고상률을 증가시킬수록 고상이 많이 존재하는데 이를 기계적으로 교반하므로써 수지상정이 파괴되고 균일한 반용용상태의 합금이 제조되므로 압연된 판재의 전반에 걸쳐 조직의 차이가 적고 미세한 조직을 보이고 있다.

(2) Al합금의 반용용 압연

실험의 모델재료로 Al7075를 사용하여 주편폭을 40mm로 설정하여 실험을 행하였다. 이때 롤간격은 1.0~3.0mm, 롤회전수는 10~50rpm 그리고 롤사이에 채워진 용탕의 높이는 롤중심부에서 탕면까지의 높이 30mm로 유지하였다.

Table 3은 회전수와 롤간격의 변화에 따른 판재 제조상태를 보이고 있다. 이때에도 롤회전수가 너무 크거나 롤간격이 너무 크면 응고가 완료되지 못하여 반용용상태로 물을 빠져나오거나 판재로 성형이 되어도 표면에 크랙이 발생하였다. 반대로 회전수가 너무 느리거나, 롤간격이 너무 좁으면 응고완료점이 롤출구로부터 너무 상류에 위치하므로 압연

롤이 커지게 되어 판재성형이 불가능하였다.

Fig. 10은 롤간격을 2.0mm, 롤회전수를 30rpm으로 하여 제조한 판재단면의 조직사진이다. 롤의 급냉효과에 의해서 롤과 접하는 판재의 표면쪽의 냉각속도가 크기 때문에 응고조직이 중심부의 조직보다 좀더 미세한 조직을 보이고 있다. 주편두께의 중심부 즉 표면으로부터 거리가 멀어질수록 무질서하고 무방향성의 미세조직이 보이고 있는데 이것은 중앙부쪽의 용탕이 응고가 늦기 때문에 유동력과 압하력의 조합에 의하여 덴드라이트(dendrite) 조직이 파괴되면서 미응고 잔류용탕이 불균일하게 응고하기 때문이라 생각된다. 모서리부의 조직중 표면쪽을 보면 표면으로부터 미소한 크랙이 발생한 것을 볼 수 있는데 이는 판재의 폭을 조절하고 반용용금속이 롤사이에 채워질 때 옆으로의 흐름을 막는 커버(side flow cover)와의 마찰에 의한 영향 및 압연력이 판재폭방향의 중심부보다 작게 작용하기 때문에 발생되어진 것으로 볼 수 있다.

알루미늄의 반용용 실험의 경우는 본 실험장치의 강도문제 때문에 고상률 S_r 가 0%인 경우만 실험이 가능하였다. 고상률의 증가에 따른 실험을 행하기 위해서는 실험장치의 보강이 필요하다고 생각되어 진다.

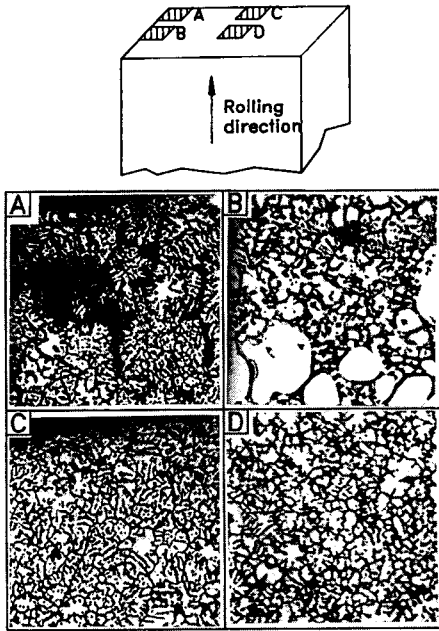


Fig. 10 Microstructures of strip fabricated with solid fraction $S_f=0\%$ of Al 7075, $2H_o=2\text{mm}$ and $N=30\text{rpm}$

3. 변형해석

3.1 상계이론 및 계산모델

일반적으로 압하력은 내부변형에너지와 속도불연속면에서의 전단에너지, 재료와 롤사이의 마찰에너지의 총합으로 구해진다.

일반적으로 변형영역내에서 속도불연속이 포함되는 에너지율의 상계는 다음과 같다^(12,13).

$$J^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \int_v \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\epsilon}_i \dot{\epsilon}_i} dV + \int_r F_i |\Delta V_i| d\Gamma + \int_s F_i V_i dS \quad (3)$$

Fig. 11은 반응용상태의 합금을 직접압연할 경우 응고완료점이 롤출구의 상부에 생성되어질 때 이론 해석 부분을 나타내고 있다. 직접압연에서는 반응용금속이 냉각물에 응고셀을 형성하여 응고완료점부터 압연이 되어 박판이 제조된다. 따라서 해석영역을 탕면에서 응고완료점까지와 응고완료점부터 롤출구까지 두 영역으로 크게 나눌 수 있다. 이때 응고완료점으로부터 탕면까지는 해석영역을 반응용상태로 가정을 하였으며, 응고완료점으로부터 롤출구까지는 고상률 $S_f=1$ 인 완전한 고상역으로 가정

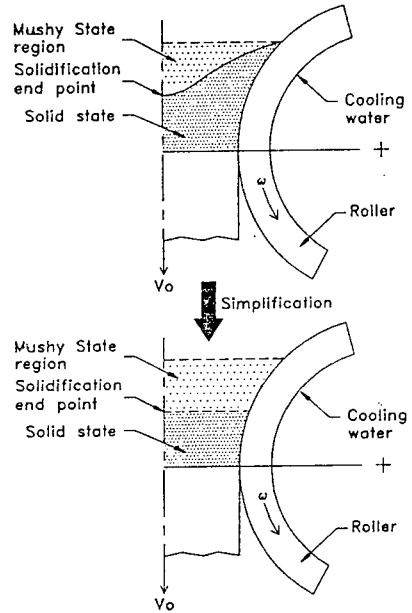


Fig. 11 Simplification of solid region and mushy state region for upper bound element analysis

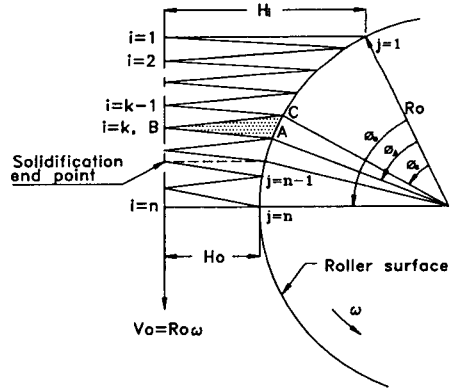


Fig. 12 A model for upper bound element analysis of direct rolling

하였다.

Fig. 12는 직접압연의 상계해석을 위한 해석모델을 나타낸다. 이때 압연전과 압연후의 두께가 각각 H_i, H_o 이고, 압연속도 V_o 가 $R_o\omega$ 인 경우 해석하고자 하는 영역을 삼각형요소로 분할하였다. 각 삼각형요소에 있어서 폭방향 중심의 절점은 $i=1 \sim n$ 이고, 롤표면의 절점은 $j=1 \sim n$ 이다.

재료 전체가 받는 내부변형에너지는 반응용상태에서의 변형에너지의 값과 고체상태에서의 변형에너지 값의 총계인데 반응용상태에서 받는 변형에너지의 값과 고체상태에서 받는 변형에너지 값의 합

으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{W}_{internal} = \frac{1}{\sqrt{3}} H_o V_o \left[\sigma_{o,s} \ln \frac{H(\phi_c)}{H_o} + \sigma_{o,p} \ln \frac{H_i}{H(\phi_c)} \right] \quad (4)$$

Fig. 13은 Fig. 12의 삼각형 요소 ABC에서 속도 불연속면을 각각 BC, AB 및 AC라 할 때, 체적불변의 원칙에 의하여 표시된 속도장을 나타낸 것이다. 여기서 밀도변화는 BC면에서만 발생한다고 가정하면 밀도변화로 인한 수직방향의 속도불연속량은 다음식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} V_{BC}^t &= \left\{ (S_f - 1) \frac{\sin \phi_k}{\sin(\phi_k + \varphi_k)} \right. \\ &\quad + (S_f - 1) \frac{\sin \phi_k \cos(\phi_k + \varphi_k)}{\sin(\phi_k + \varphi_k)} \\ &\quad \left. + S_f \sin \alpha_k \frac{\cos(\phi_k + \varphi_k)}{\sin(\phi_k + \varphi_k)} \right\} V_o \\ V_{BC}^n &= \left\{ S_f \sin \alpha_k \frac{\sin(\phi_k + \varphi_k)}{\sin(\phi_k + \alpha_k)} \right. \\ &\quad \left. - (S_f - 1) \sin \phi_k \right\} V_o \\ V_{AC} &= S_f \cdot V_o \cdot \frac{\sin \alpha_k}{\sin(\varphi_k + \alpha_k)} \\ V_{AB} &= S_f \cdot V_o \cdot \frac{\sin \varphi_k}{\sin(\varphi_k + \alpha_k)} \end{aligned} \quad (5)$$

고액공존 상태에서 속도불연속에 의한 표면력의 상계는 다음식으로 주어진다.

$$\int_r F_i | \Delta V_i | d\Gamma = \int \sigma_o \rho_r^2 \sqrt{(4/9 + f'^2) \Delta V_n^2 + 1/3 \Delta V_t^2} d\Gamma \quad (6)$$

식 (5)를 식 (6)에 대입하면 속도불연속면에서

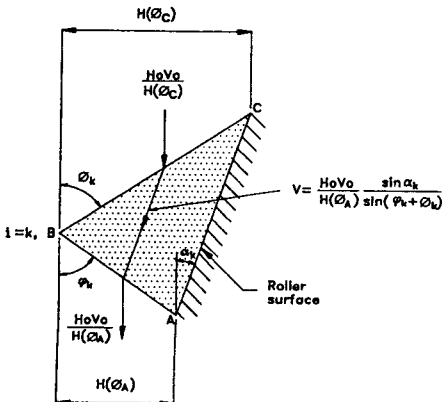


Fig. 13 Velocity field for upper bound element analysis of direct rolling

변형에너지를 \dot{W}_{CD} , \dot{W}_{AB} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_{BC} &= \sigma_o H(\phi_c) \rho_m^n V_o \left[(4/9 + f'^2) (1 - \rho_i / \rho_f)^2 \right. \\ &\quad + 1/3 \{ (S_f - 1) \{ \cos \alpha_k / \sin \alpha_k \\ &\quad - \sin(\varphi_k + \alpha_k) / (R \sin \alpha_k \sin \varphi_k) \} \\ &\quad - S_f \{ \cos(\varphi_k + \alpha_k) / \sin(\varphi_k + \alpha_k) \\ &\quad \left. - \cos \varphi_k / (R_o \sin \varphi_k) \}^2 \}^{1/2} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

여기서 $\rho_m = (\rho_i + \rho_f) / 2$ 이다.

$$\dot{W}_{AB} = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} H(\phi_c) \rho_f^n V_o S_f \frac{\sin \alpha_k}{R_o \sin(\varphi_k + \alpha_k) \sin \varphi_k} \quad (8)$$

재료와 롤표면사이에서의 마찰로 인한 변형에너지를 \dot{W}_{AC} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_{AC} &= \int_s f_2 \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} m | \Delta V | dS \\ &= \rho_f^n \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} m H(\phi_c) S_f V_o (1 - 1/R) \\ &\quad \times \frac{\sin \varphi_k}{\sin(\varphi_k + \alpha_k) \sin \alpha_k} \quad (9) \end{aligned}$$

여기서 $R = H(\phi_c) / H(\phi_a)$,

$$H(\phi_c) = H_o + R_o [1 - \cos(\phi_o - \phi_c)] \quad (10)$$

$$f_2 = \rho_f^n$$

식 (4)와 식 (6)~(9)을 식 (3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{P}{\sigma_o} &= \frac{2}{\sqrt{3}} H_o \left[\ln \frac{H(\phi_c)}{H_o} + \ln \frac{H_i}{H(\phi_c)} \right] \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\rho_m^n \{ 3(4/9 + f'^2) (1 - \rho_i / \rho_f) \}^2 \right. \\ &\quad + \{ (S_f - 1) \{ \cos \varphi_k / \sin \alpha_k \\ &\quad - \sin(\varphi_k + \alpha_k) / (R_o \sin \alpha_k \sin \varphi_k) \} \\ &\quad - S_f \{ \cos(\varphi_k + \alpha_k) / \sin(\varphi_k + \alpha_k) \\ &\quad \left. - \cos \varphi_k / (R \sin \varphi_k) \} \}^2 \}^{1/2} \right] \\ &\quad + \rho_f^n \{ S_f \sin \alpha_k / (R \sin(\varphi_k \\ &\quad + \alpha_k) \sin \varphi_k) \sin \varphi_k \} \\ &\quad + m S_f (1 - 1/R_o) \sin \varphi_k / (\sin(\varphi_k \\ &\quad + \alpha_k) \sin \alpha_k) \} \quad (11) \end{aligned}$$

여기서, 고상역과 반용융역에서 재료의 항복응력 σ_o 는 각각 $\sigma_{o,s}$, $\sigma_{o,p}$ 이고,

$$f' = \frac{1}{2\sqrt{1 - \rho_r}} \quad (12)$$

이다.

4.2 결과 및 고찰

Fig. 11에 보여준 바와 같이 응고완료점은 해석 영역을 반용융영역과 고상영역으로 나누는 기준이 되므로 압연력을 계산하기 위하여 응고완료점을 이론적으로 구하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 박

Table 4 The physical constants and properties of Sn-75%Pb

Item	Symbol	Value
Solidus temperature	T_s	186°C
Liquidus temperature	T_L	272°C
Thermal conductivity in solid	K_s	9.09 cal/sec·m·°C
Thermal conductivity in liquid	K_L	3.79 cal/sec·m·°C
Density	ρ	10.20 Mg/m ³

판의 표면과 몰표면사이에서의 열전달계수를 고려한 다음식을 사용하여 응고프로파일(profile)을 계산하였다⁽¹⁴⁾.

$$dt = \frac{k}{h_o} \left[\sqrt{1 + \frac{2h_o^2(T_p - T_r)}{\rho^2 H_{rak}}} t - 1 \right] \quad (9)$$

여기서,

$$a = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{C_r(T_p - T_r)}{3H_r}}$$

그 응고프로파일로부터 Fig. 11의 응고완료점을 구하여 고상영과 반응용역을 예측하였다.

Table 4는 계산에 사용된 Sn-75%Pb의 물성치이다.

고상물의 변화에 대하여 기계적 성질을 측정하는 방법이 시도되고 있으나^(15,16), 본 연구에서는 고상영과 반응용상태에서 재료의 항복응력 $\sigma_{o,s}$ 와 $\sigma_{o,p}$ 는 평균압축변형률속도 $\dot{\epsilon}_{ave}$ 가 $1.33 \times 10^{-2} \text{sec}^{-1}$ 인 경우 고상물 S_f 와 압축항복응력의 관계식⁽¹⁷⁾

$$\sigma_{o,s} = 13.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{o,p} = 13.1 S_f^{3.2} \text{ MPa}$$

을 이용하여 압하력을 계산하였다. 변형률속도와 평균온도는 항복응력에 관련이 있으므로 반응용영역에서의 항복응력 $\sigma_{o,p}$ 은 고상물 S_f 을 식 (2)의 온도의 함수로 표시하였다. 압연시 실제의 변형률속도는 본 연구에서 선택한 값보다 클것으로 예상되나 반응용상태에서의 압연조건과 일치하는 물성치를 구하는 것은 어려운 문제점으로 생각된다. 반응용영역과 고상영에 있어서 계산에 사용되어진 요소수는 30개이다. 압연시 롤내부의 냉각 때문에 몰표면과 접촉하는 부분은 완전히 고상이고, 또한 변형률속도등을 고려하여 본 연구에서는 고상영역과 반응용영역에서 마찰계수 $m=0.1$ 로 선택하였다⁽¹⁸⁾. 보다 정확한 m 의 선정은 몰표면과 접촉하는 박판의 표면온도 및 변형률속도 등과 관련지어 선택하여야 될 것으로 생각된다. 그리고 점소성지수 n 은 반응고 상태인 재료의 값 3.2을 사용하였다⁽¹⁷⁾.

Fig. 14은 Sn-75%Pb의 압연에 대하여 상계범으

로 계산한 압하력과 압연시 로드셀로서 측정된 압하력을 비교하여 나타내었다. 실험으로부터 얻은 압하력을 보면 고상률이 낮아질수록 압하력이 감소하고, 압연속도를 증가할수록 응고완료점이 몰출구 측으로 이동하므로 압연률이 작게 되어 압하력이 감소하는 것을 알 수 있다. 고상률이 낮을수록 압하력이 감소하는 데 이는 일반적으로 재료를 고상선온도 이상으로 가열했을 경우 재료의 내부에 액상성분이 증가되기 때문인 것으로 생각된다. 이 액상성분은 입계에 존재하여 변형을 받는 재료의 입계에서의 슬립을 용이하게 함과 동시에 각 결정립의 변형에 대한 결정립간의 구속을 완화시키는 효과를 갖고 있다. 액상성분이 더 증가하게 되면 결정립의 회전에 대한 구속력이 감소되기 때문에 변형저항이 저하되어 압하력이 감소된다.

응고완료점의 계산에 있어서 반응용상태의 유동현상을 고려한 2차원 응고해석에 의하여 고상영역과 반응용영역을 구분하여 삼각형요소내에서의 고상율을 보다 정확히 예측하여야 하며, 상계법의 최

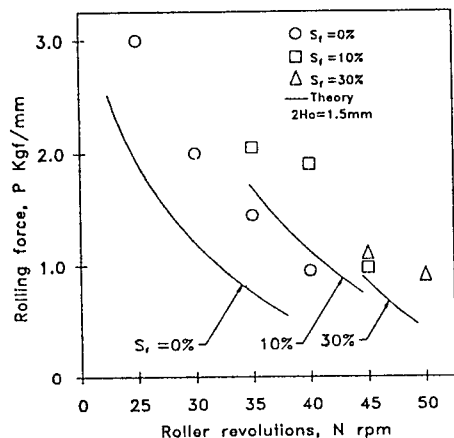


Fig. 14 Comparison of separated rolling forces obtained from upper bound element analysis and experiment for Sn-75%Pb

소화 과정을 압연공정 변수와 관련지어 압연력을 보다 정확히 예측하는 방법을 연구과제로 남겨둔다.

4. 결 론

용융상태와 반응용상태의 Sn-75%Pb와 Al7075의 직접압연실험을 행하고, 상계요소법을 이용한 직접압연법에 대한 해석으로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 반응용압연실험 결과 주편의 표면상태를 양호한 표면(fine surface), 브레이크아웃(breakout), 리플마크(ripple mark) 및 표면크랙(surface crack)등으로 분류할 수 있었다.

(2) 고상률에 미치는 롤회전수 및 초기롤간격등의 공정변수를 변화시키며 실험을 행하여 양호한 판재를 제조할 수 있는 범위를 얻었다.

(3) 주편의 냉각률을 크게 할수록, 압연률이 커질수록 제조된 판재의 경도가 커짐을 알 수 있었으며, 또한 고상률을 증가시킬수록 응고조직이 미세하며 균일하게 분포됨을 알 수 있었다.

(4) 상계요소법의 도입으로 고상역과 반응용영역이 동시에 공존하는 직접압연공정에서 압연력을 예측할 수 있는 모델을 제시하였다.

후 기

본 연구는 1987년도 문교부 학술조성비에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사의 뜻을 표하는 바입니다.

참 고 문 헌

- (1) Matsumiya, T., Flemings, M.C., 1981, "Modeling of Continous Strip Production by Rheocating", Metal. Trans. 12B, p.17.
- (2) Wakil, S.D.El, 1990, "A Model of Metal Forming in the Mashy State", The 3rd ICTP, Workshop on Mashy-state/Semi-solid Metal Forming Technology, July 2nd p. 43.
- (3) 豊島 史郎 外, 1989, "半溶融状態における加工の数値シミュレーション", 第40回 塑性加工連合講演集, pp. 635~638.
- (4) Kiuchi, M., Tagagi, S. and Sugiyama, S., 1989, "Al-Based Particle Reinforced Composite Sheets Made by Complex Mashy-state Processings and Their Formability", J. of the JSTP, Vol.30, No.345, p. 1427.
- (5) Watanabe, A., Ohori, K. and Takeuchi, Y., 1988, "Fabrication of Particle Dispersed Aluminum Alloy Composite by Compocasting Process and Their Properties", J. of Japan Inst. of Light Metals, Vol.38, No.10, p. 626.
- (6) Ramati, S.D.E., Abbaschian, G.T., Backman, D.G. and Mehrafian, R., 1978, "Forging of Liquid and Partially Solid Sn-15PctPb and Aluminum Alloys", Metal. Trans. B, Vol.9B, June, p. 279.
- (7) Halli, L.A., 1984, "A Model for Deformation and Segregation of Solid liquid Mixtures", Metall. Trans. A., Vol.16A, Aug. 1985, p. 1393.
- (8) Taha, M.A., El-Mahallawy, N.A. and Assar, A.M., 1988, "Control of Continous Rheocasting Process", J. of Materials Science, Vol.23, p. 1379.
- (9) 木内 學 外, 1976, "固液共存状態における金属(合金)の變形抵抗", 塑性と加工, Vol.17, No.186.
- (10) Shima, S., Tabata, T., Oyane, M. and Tawakami, T., 1976, "Upper Bound Theory for Deformation of Porous Materials", Mems Fac. Eng. Kyoto, Vol.38, p. 117.
- (11) Kim, Y.D., Baek, N.J. Kang, C.G., 1990, "Comparison of Molten Metal and Mashy State Pouring in Direct Rolling Process", Advanced Technology of Plasticity, Vol.2, p. 841.
- (12) Avitzur, B. 1968; Metal Forming: Processes and Analysis, McGraw-Hill, p. 52.
- (13) Zhu, Y.D., Avitzur, B., 1988, "Criteria for the Prevention of Split Ends", Trans. of the ASME, J. of Engineering for Industry, Vol.110, p. 162.
- (14) Geiger, G.H. and Poirier, D.R., 1980, Tranpfort Phenomena in Metallurgy, Addison-Wesley Pub. Comp. Inc., p. 328.
- (15) Shirota, T., Kojima, S., Dendo, T. and Kiuchi, M., 1989, "Effect of Plastic Deformation of Chemical Reactivity of Solid Copper with Molten Tin", J. of the JSTP, Vol. 30, No. 346, p. 1547.
- (16) Lehuy, H., 1988, "Mechanical Properties of Zinc-aluminum Alloys Extruded in the Liqueid-solid State", J. of Materials Science, Vol.23 p. 2943.
- (17) Charreyron, P.O., Flemings, M.C., 1985, "Rheology of Semi-solid Dendritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rate: Application to Forming Process", J. of Mech. Science, Vol.27, No. 11/12, p. 781.
- (18) Male, A.T., Cocrcroft, M.G., 1964, "A Method for the determination of the Coefficient of friction of Metals under conditions of Bulk Plastic Deformation", J. of the Inst. of Metals Vol.93, p. 38.