

강 연

반용융가공재의 특성과 그 응용

이 호인*

용탕단조법·아큐라드법·연속주조법등 근년에 개발 시킨 새로운 가공기술들은 용융상태 또는 반용융상태의 금속에 압력을 가하여 응고시키는 가공법으로 소개될 수 있다.

이들 가공법의 주체는 용탕금속재료에 근거를 두고 압출·압연·단조등의 소성가공 공정을 거치게 된다.

본 강좌에서는 가공의 주대상을 고체와 액체가 공존하는 반용융 상태의 재료에 두고 이때의 소성특성을 소개하고자 한다. 특히 반용융압출 및 단조를 중심으로 하여 이들의 특성과 응용을 소개하고자 한다.

일반으로 반용융가공법은 재료내부에 고상성분과 액상성분이 공존하는 상태의 금속재료에 외력을 가해서 변형·유동·교반·혼합·접합등으로 인하여 원하는 형상·치수 및 성능의 특성을 가지는 제품을 얻는 것을 목적으로 하고 있으며 종래의 주조 가공과 열간소성가공의 경계영역에 위치하는 새로운 가공법이라고 할 수 있다. 이 가공법은 단조·압출·압연등 종래의 가공공정을 반용융금속재료에 응용시키는 생산공정으로서, 장점으로는 가공력이 현저히 낮으므로 가공기계·설비의 소형화, 고가공율의 달성으로 가공공정의 단축, 난가공재의 가공가능, 특히 용탕 또는 반용융상태로 부터 직접 가공공정을 가능케 하므로써 종래의 가공기술을 훨씬 초월하는 많은 가능성을 포함하고 있다.

1. 반용융금속재료의 특성

금속재료의 반용융상태는 열적평형상태를 가지는 고상성분과 액상성분이 공존되어 있는 경우를 의미한다.

용탕단조·연속주조의 과정에서 문제가되는 표면응고층과 내부의 용탕과의 반용융상태는 아큐라드법·레오캐스트법 등에서 초정(primary solid particles & dendrites)과 용탕이 재료 내부에 공존하는 반용융상태와 엄밀히 다르게 이론전개차 되어야 하겠지만 여

기서는 논의대상에서 생략하도록 한다.

일반으로 다결정의 합금재료를 고상선온도를 넘어가 열하면 금속내부의 결정입계가 용해를 시작한다. 이로 인하여 반용융상태의 재료는 다결정체의 입계에서 액상성분이 개재하고 이의 결합력과 구속력이 현저히 떨어져지게 된다. 그 결과 결정입간의 상대스리프, 결정립의 회전, 결정립자체의 변형 등이 용이하게 일어나는 상태가 된다. (그림 1) 다결정체의 거시적 변형은 결

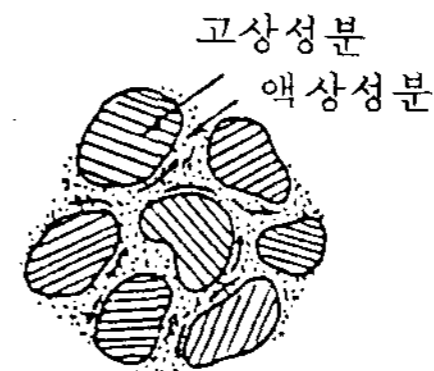


그림 1. 반용융상태의 금속재료

정립간의 스리프·회전 및 결정립의 변형이 합성된 소성변형으로서 반용융상태에서 재료의 소성변형은 대단히 용이하게 일어나며 이 변형저항이 현저히 낮게 된다.

실제로 각종의 알루미늄합금·동합금에 관해서 열간영역으로부터 반용융온도 영역으로 변화될때 압축변형을

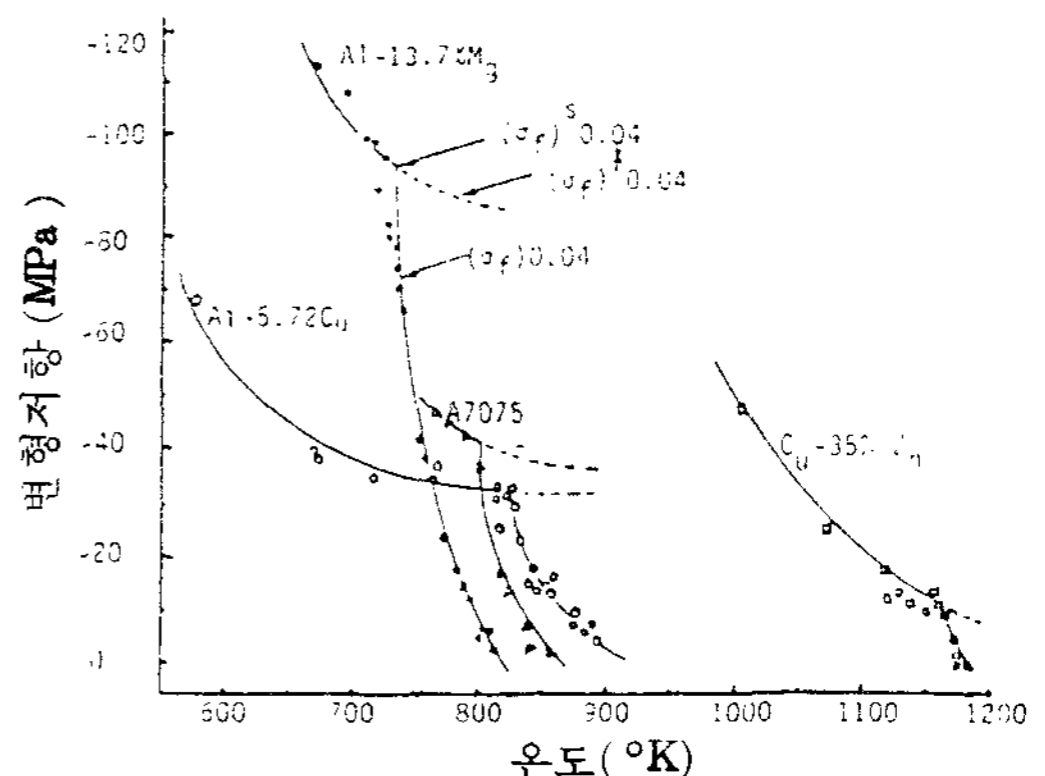


그림 2. 열간·반용융영역에서 변형저항과 온도의 관계

※ 1983年度 秋季 學術發表大會에서 講演한 內容임.

* 한국과학기술원 재료공학부 工博

측정하여 본 결과 그림 2와 같다. 횡축은 온도이고 종축은 4% 압축시의 평균저항(δ_f) 0.04를 표시한다.

각재료들의 곡선에서 절곡점들이 고상선온도에 대응하고 그림에서 보는바와 같이 고상선온도를 넘어 반응용 상태에 들어가면 변형저항은 급격히 감소한다. 그림중 열간영역을 지나 반응용온도에서 곡선을 파선으로 계속연장하면 재료내의 고상성분만 존재하는 변형저항인 $(\delta_f)^s 0.04$ 을 온도에 따른 파선이라고 생각할 수 있다. 이 파선의 변형저항 $(\delta_f)^s 0.04$ 와 실제측정변형저항 $(\delta_f) 0.04$ 와의 차이가 액상성분 존재에 의한 재료의 연화(softening) 정도라고 할 수 있다.

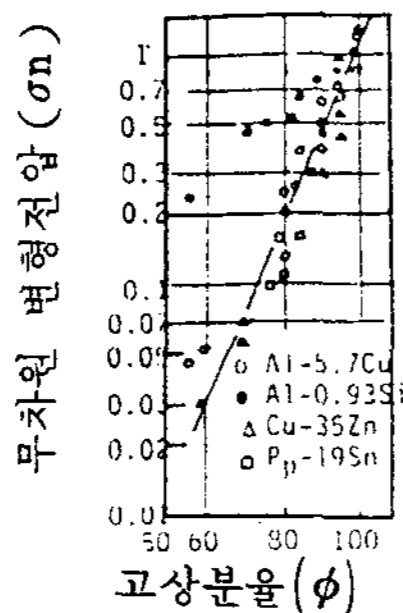


그림 3. 반응용 금속재료의 무차원 변형저항과 고상분율과의 관계

그림 3은 고상분율 ϕ (고상성분의 질량백분율)에 따른 변형저항을 표시한다. 종축은 무차원 변형저항 δ_n $Al = (\delta_f)0.04 / (\delta_f)^s 0.04$ 로 표시한다. ϕ 증가에 따라 δ_n 의 변화는 대개 직선으로 증가한다. 예외로 결정립이 큰 -0.93% Si 합금은 δ_n 값이 ϕ 증가에 직전적으로 비례하지 않는다. 반응용 상태에 있는 재료의 변형저항은 액상성분의 양이나 결정립의 크기에 큰 영향을 받는다.

일반으로 반응용 재료의 변형저항은 변형속도 (strain rate) 결정입도 (grain size) 및 재료의 형상 (Aspect ratio) 등의 영향을 고려의 대상으로 한다.

즉 이들 인자들은 결정입계에서 나타나는 액상성분의 유동과 큰 관계를 가지고 변형저항에 영향을 미친다고 예상할 수 있다. 예로서 변형속도의 증대는 액상성분의 점성유동 저항을 증대시키고 조대한 결정립은 고상분율이 같은 경우 결정립들의 회전이나 스리프를 일으키기 힘들다. 재료 또는 금형의 형상에 따라서 재료의 변형자유도가 적게되고 이로 인하여 액상성분이 특정 입계으로 이동되면서 유동을 저해하는 결과를 초래할

수도 있다.

따라서 일반적으로는 변형속도, 결정입도, 아스펙트비 등의 조건에 따라 변형저항의 변화곡선을 그림 4와 같

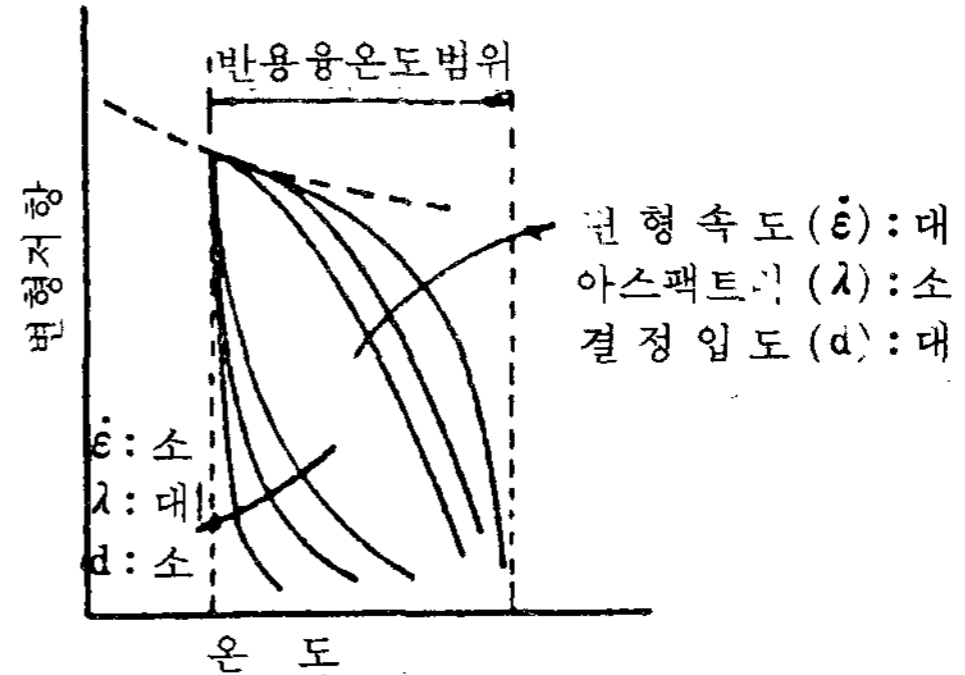


그림 4. 반응용온도영역에서 변형저항과 온도의 일반적 관계

이 정성적으로 표현할 수 있다. 이 부문에 대한 실험적·이론적 연구결과들은 매우 희박하며 앞으로 반응용 상태의 재료들의 소성변형에 대한 기초연구가 필요하다.

1. 반응용 압출가공재의 특성과 그 응용

반응용 금속재료는 낮은 변형저항 때문에 유동성이 좋은 특성을 가지며 여러가지 소성가공공정에 이용 가능하다. 그러나 반응용 상태는 결정입계가 용해되고 인장응력으로 인해 간단히 입계가 분리를 일으키기 때문에 신율변형능은 전혀 없는 단점도 가진다. 그러므로 가장 가능성이 높고 용이한 것은 압출 가공에의 적용이며 인장응력이 가해지는 가공에서는 적절치 못하다.

즉 압출가공에서는 콘테이너와 금형내부에서 재료는 보통 정수압의 작용하에서 소성유동을 일으키기 때문에 안정한 가공이 가능하다.

반응용 압출가공시 가장 기본적인 문제는 비릿트의 가열조건과 제품의 냉각조건에 관한 것이다. (i) 비릿트의 가열조건 : 압출가공시 비릿트의 고상분율 ϕ 의 적정치는 경우에 따라 다르다. ϕ 가 저하하면 압출 가압력이 저하하여 가공이 용이하지만 ϕ 가 60% 이하가 되면 자중에 의해서 비릿트의 붕괴가 시작하고 비릿트의 직접적인 핸들링은 사실상 불가능하다. 그러므로 실제 생산의 경우 비릿트의 현장취급문제는 이 가공법의 성공여부에 중요한 의미를 가진다. 재료의 변형저항은 ϕ 가 100%에서 70%까지 사이에서 대폭적으로

로 저하해서 1/5-1/10이 되고 그 후에는 비교적 완만하게 저하한다.

한편 $\psi = 80\%$ 전후에서는 대부분의 경우 비렛트의 외관은 통상의 열간영역과 비슷한 강도를 유지하므로 비렛트의 현장취급문제에 불편이 없다. 이와같은 점을 고려할때 비렛트의 고상분율을 $\psi = 70-80\%$ 범위로 유지되도록 가열조건을 맞추는 것이 필요하다.

(ii) 냉각조건: 압출금형출구에서의 제품고상분율에 대한 적정조건은 가열조건과 같이 중요한 인자이다. ψ 가 적은 제품이 금형출구에서 나오면 자중에 의해서 균열·변형등의 문제를 일으키고 안정한 작업이 곤란하다. 반대로 냉각이 진행해서 금형내부에서 $\psi = 100\%$ 가 도달하여 과잉응고가 되면 본 가공법의 최대이점인 압출가압력의 저감과 고가공율의 달성이 충분히 이루어질 수 없다. 이점에 대해서도 아직 충분한 검토가 없으며 일반적으로 제품내부에서 잔류허용하는 액상성분의 양은 질량비로서 5-10%정도라고 알려지고 있다. 앞으로 압력을 가할때 금형 및 비렛트 크기에 따른 냉각속도의 진행과정과 응고현상에 대한 이론적·실험적 연구가 필요하다. 기계적 특성으로 볼때 반용융 상태의 비렛트로부터 압출시킨 봉·선·관재의 기계적특성은 주조재·열간가공재와 비교해서 다소 차이가 있다.

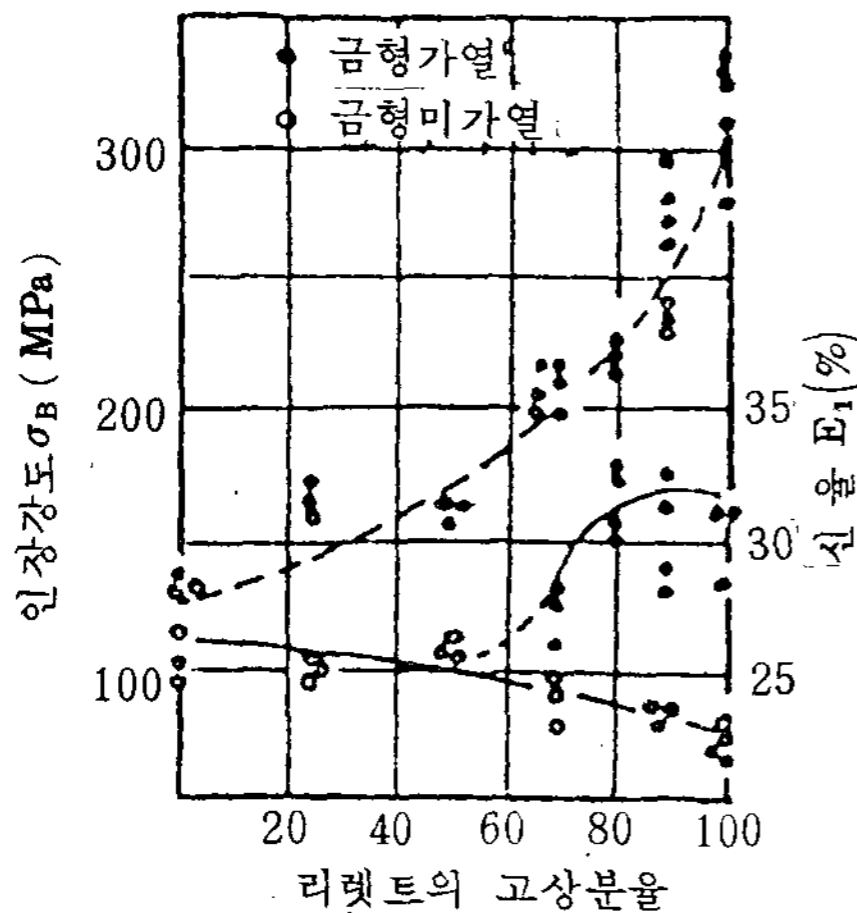


그림 5. 비렛트의 고상분율과 제품의 인장강도와 신율의 관계

그림 5는 40mm ϕ 의 비렛트로부터 압출시킨 10mm ϕ 의 봉재의 인장강도와 신율에 대한 비렛트의 고상분율의 영향을 표시한다.

ψ 저하에 따라 인장강도가 급속히 저하되고 있다.

또한 금형예열의 경우와 예열치 않은 경우에 신율의 큰 차이를 보이고 있다. 금형예열이 없는 경우 금형내에서 재료가 급냉되어 신율의 저하경향을 나타낸다. 반용융가공재의 인장강도 및 신율에 대한 연화특성은 아직 명확히 밝혀지지 않고 있다.

응용면에서 볼때 반용융압출재를 다시 적당히 냉각가공시키면 강도는 급속히 회복되고 통상의 열간가공 냉간가공을 받은 제품의 강도에 상당하는 값을 가지게 된다.

따라서 제품의 강도나 표면정도를 요하는 경우 반용융가공에 의한 고농율의 가공과 냉간가공에 의한 정밀도를 조합함으로써 소기의 목적이 달성될 수 있는 공정으로 발전시키는 것이 바람직하다. 예를들면 냉간가공에서는 가공공구의 강도나 수명을 확보하는 것이 기술적 문제로 되고 있다. 따라서 만약 가공시에는 연하고 가공종료시에는 충분한 강도를 얻는 소재를 얻을 수 있다면 그 의의는 극히 크다.

결론적으로 반용융 가공과 열처리를 조합해서 냉간가공재로서 우수한 특성을 가지는 소재를 공급할 수 있다면 이 분야에 대해서 큰 성과가 기대된다. 본 과기원에서는 이 분야에 대한 기초 및 개발 연구를 추진중에 있다.

3. 용탕단조재의 특성과 그 응용

용탕단조법도 반용융압출법의 기본적인 특성인 연화현상을 이용하여 주조결함을 개선하고 단조설비 용량의 간소화를 이룩하려는 장점들은 근본적으로 같다고 이야기할 수 있다. 용탕단조법 (liquid metal forging)은 고압주조법 (squeeze casting)이라고도 소개되어지고 있으며 금형내의 용탕을 기계적인 압력을 가해서 용탕상태로부터 완전응고까지 그 압력하에서 성형응고시키는 동시에 부분적인 반용융상태에서 소성유동을 동반하는 가공법이다. 가압에 의해서 여러가지 기계적 성질이 개선되는 것은 응고조직의 치밀화가 이루어지기 때문인 것으로 알려지고 있다. 가압응고의 금속조직은 가압에 의해서 주상정조직이 등축정 조직으로 변태되어 응고조직의 미세화를 가져오고 수지상까지 간격이 수배이상 적어지는 것이 실험적 연구를 통하여 확인되어 졌고 이에 대한 해외보고도 최근 자주논의되고 있다. 그러나 가압으로 인한 금속조직의 미세화 현상은 아직 분명하게 밝혀지지 않았다. 일반적으로 가압에 의해서 금형과 용탕의 접촉상태가 좋아져서 응고속도가 상당히 빨라지기 때문인 것으로 알려지고 있으며(그

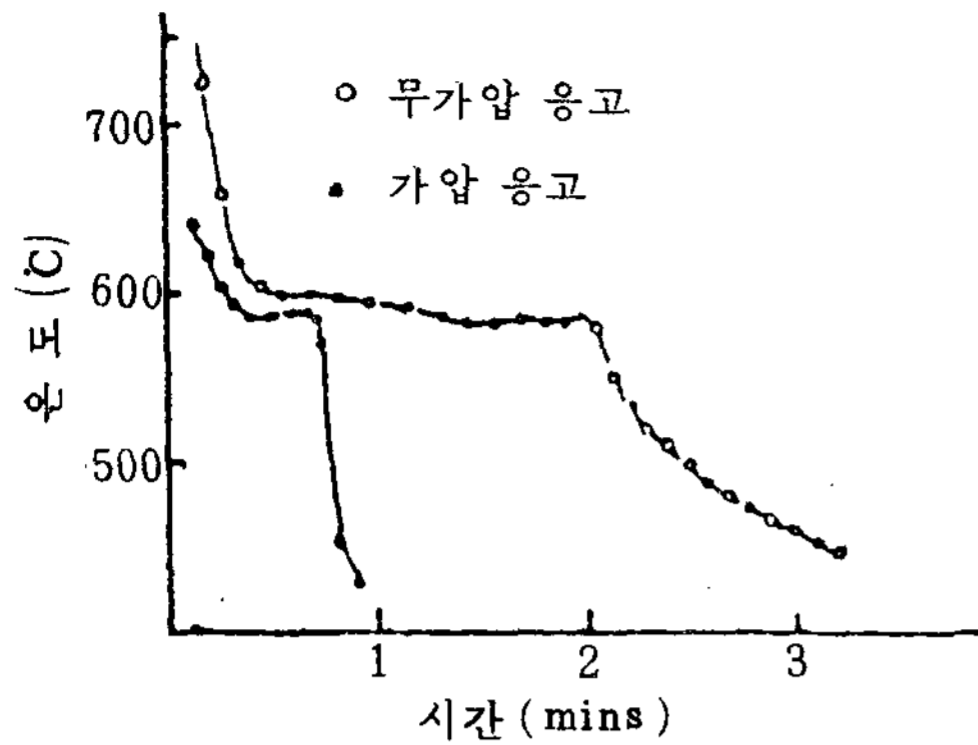


그림 6. 가압이 알루미늄합금의 냉각곡선에 미치는 영향

림 6), 또한 Clausius Clapeyron's equation ($dT/dp = TE\Delta V/\Delta H$) 에서 도출될 수 있는 바와 같이 압력하에서 용탕의 용점증가에 의한 과냉효과에 기인하는 것으로 알려져있다. 예로서 알루미늄의 경우 가압력이 1500, 5000, 18000 kg/cm^2 일 때 용점상승온도는 11°C, 71°C, 110°C로 상승될 것으로 Plyaskii 는 보고하고 있으며 OYa et al 의 일부 실험보고가 있다. 본 과기원에서 압력하에서 응고조직변화에 대한 이론적·실험적 해석을 검토하였다. 그러나 본 장에서는 이에 대한 설명은 생략하고 슬라이드 사진을 통하여 현상론적 관찰결과만을 소개한다.

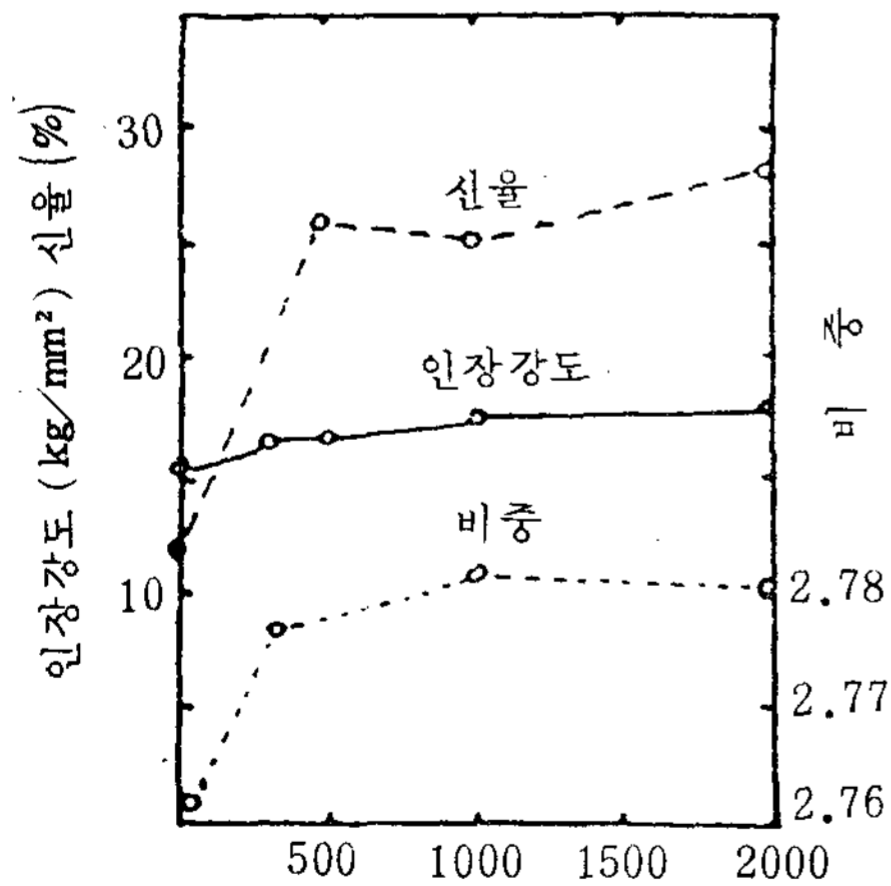


그림 7. 가압압력에 따른 기계적 성질의 변화

그림 7은 Al-4% Cu의 경우 가압력에 따른 기계적 성질의 변화를 보여주고 있다. 압력증가에 따라 인장강도의 증가를 보여주고 있으며 특히 신율의 증가는 크게 향상된다.

가압효과를 기대하기 위해서는 적어도 500 kg/cm^2 이상의 압력이 주어져야 한다. 그러나 제품의 현상·

가압조건·금형온도 등에 따라 최적 가압력은 변화된다. 일반적으로 조직의 미세화와 주조결함을 치유하기 위해서 1500 kg/cm^2 이상으로 가압이 필요된다고 보

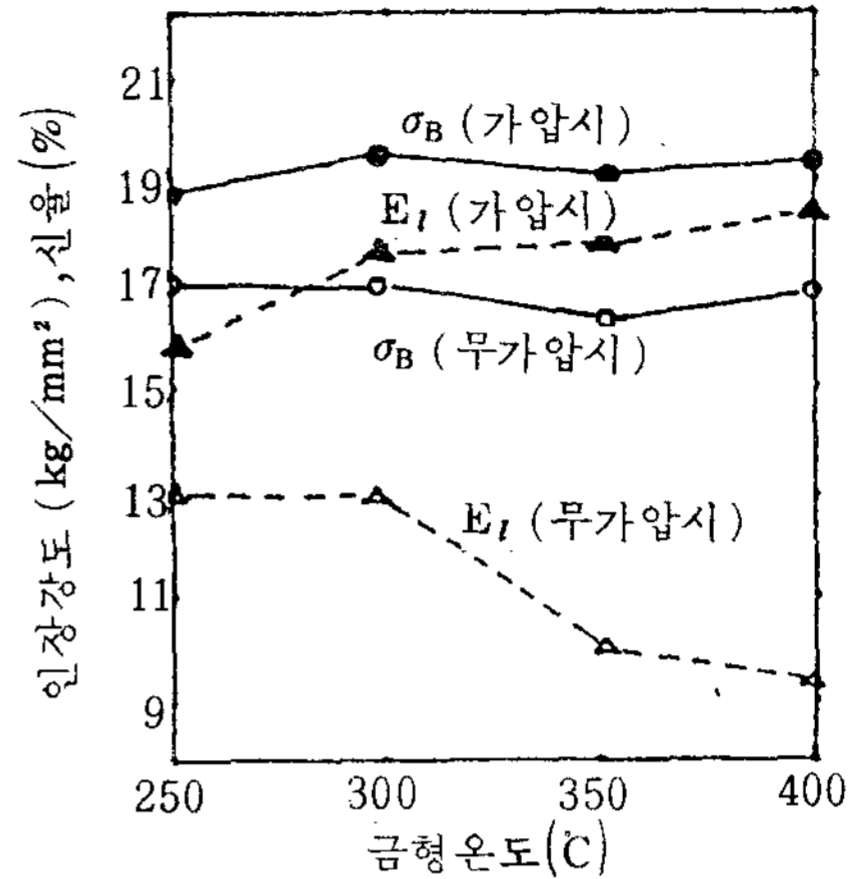


그림 8. 금형온도 및 가압력에 따른 인장강도 (σ_B)와 신율 (E_t)의 변화

고되고 있다. 그림 8은 금형온도에 따른 가압 및 무가압시의 기계적 성질 변화를 보여주고 있다. 특히 흥미있는 점은 금형온도에 따른 신율의 변화이다. 즉 무가압시는 금형온도증가에 따라 신율은 저하하지만 가압시는 금형온도 증가에 따라 신율의 증가를 가져오는 점이다. 이의 원인은 수축기포의 생성과 소멸에 대해서 가압과 금형온도의 상관관계로 설명할 수 있겠으나 아직 뚜렷한 해석이 없다. 가압개시 시간 및 가압유지시간 등 가압조건에 따른 응고조직 및 기계적 성질 변화도 아직 체계화되지 않고 있는 상황이다.

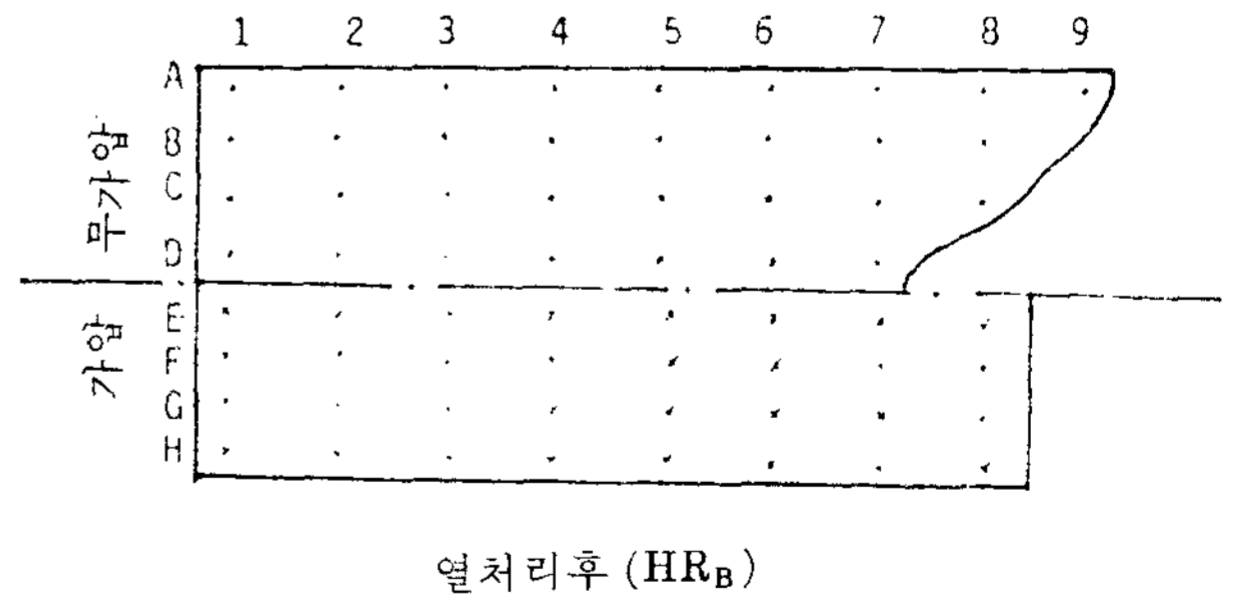


그림 9. 가압 및 무가압시 응고시킨 인코트의 경도분포

그림 9는 Al-4% Cu 합금을 가압응고시킨 인코트와 가압없이 응고시킨 인코트를 열처리하여 그들에 대한 경도분포를 보여주고 있다. 가압치 않은 인코트는 표면과 중심부의 경도차이가 크게 나타나고 가압응고시킨 인코트는 비교적 균일한 경도분포를 보여주고있

열처리 후 (HR_B)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	63.5	63.5	62	63	64	53	58	50	59
B	62.5	53.5	54	55	45	52	54	57	50
C	60	40	29	54	32	34	48	41	40
D	46.5	33.5	42	7	29	25	43	-	28
E	67	70	45	40	69	49	57	60	59
F	66.5	69.5	60	73	72	64	61	60	59
G	67	66	65	71	71	66	46	65	65
H	63.5	52	64	69	71	71	68	66	64

다. 용탕단조법의 실제응용면에서 해외동향을 보면 알루미늄합금·동합금 및 스텐레스강 재료의 주단조제품에 적용이 주목을 끌고 있다. 본 과기원에서 실제 응용면에서 디젤엔진용 피스톤 및 마스터 실린더 부품의 시제를 시도하여 보았다. 실제 양산체제를 위한

실용화 개발의 성공여부는 반응용상태에서 금속의 소성유동을 효율적으로 성취할 수 있는 열해석이 중요한 관건이 된다. 또 한편 최근 용탕단조의 특징을 복합재료에 응용하려는 시도가 행하여지고 있다.

(그림 10) 예로서 금형내에 미리 성형된 강화입

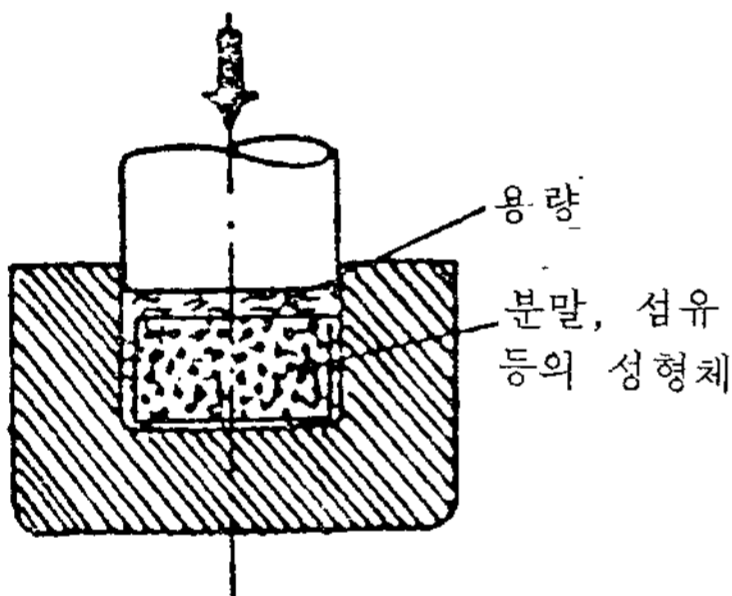


그림 10. 용탕단조법에 의한 복합재의 제조

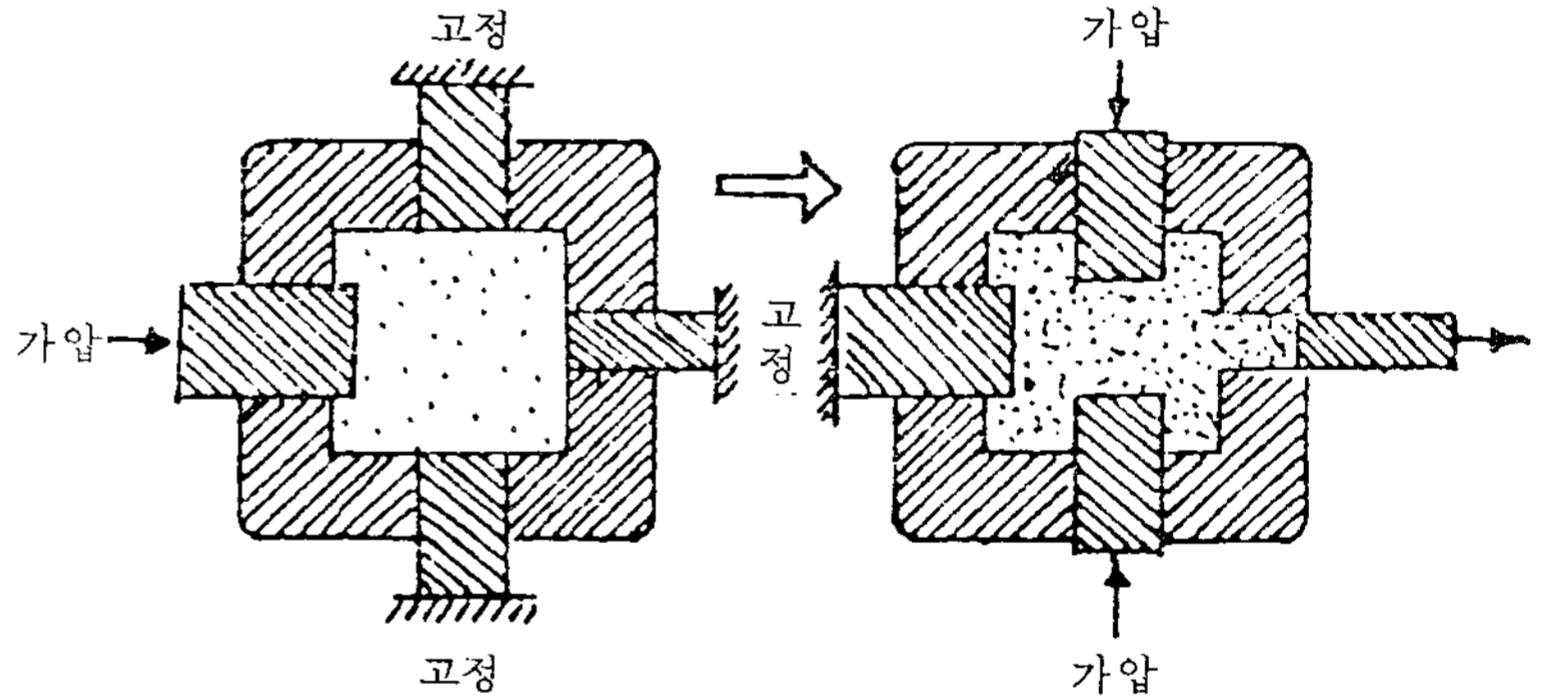


그림 11. 용탕단조 및 반응용 또는 열간단조의 복합화

자(단섬유 등)를 삽입시키고 용탕을 주입시키고 편치로 가압시켜 용탕을 강화입자 사이로 강제 침투시킨 후 이 상태에서 완전 응고하여 복합화를 실현하는 방법이다.

결론적으로 용탕단조법은 주조 가공과 열간소성가공과의 복합프로세스로의 발전 가능성이 높다. 즉 반응용 상태에서 성형응고를 수행하고 반응용온도 또는 열간가

공온도 영역중에서 소성가공을 성취하는 복합방법을 고려할 수 있다. (그림 11) 이와같은 복합프로세스에 의해서 부분적 가압효과의 고도화 및 최소의 가공력으로 최적의 단조효과의 달성등이 가능하다. 더 나아가 복합재료를 함유한 난가공재에 고도의 가공을 실현시켜 종래에 없는 특성을 가지는 제품을 얻는 새로운 복합재의 가공법으로 전개되어질 것으로도 기대된다.