

고청정 Alloy718 잉고트 Cogging

Cogging of premium-quality Alloy 718

박 노 광*
Nho-Kwang Park

염 증 택*
Jong-Taek Yoem

임 정 숙*
Jung-Sook Lim

최 상 욱*
Xiang-Xu Cui

ABSTRACT

Microstructures and mechanical properties of VIM/VAR/VAR-processed Ni-based Alloy718 ingot were investigated. Vacuum arc remelting(VAR) results in chill grain zone, columnar grain zone, and equi-axed grain zone in the ingot due to the difference in local solidification processes. Different grain structures of the remelting ingot result in the different hot workability for the given cogging conditions. Experimental results on microstructural inhomogeneity and material flow behavior under billet cogging conditions were presented, and their potential effects on the billet cogging process are discussed.

주요기술용어 : VIM/VAR/VAR(Vacuum induction melting/Vacuum arc remelting/Vacuum arc remelting), Alloy718, Ingot structure(잉고트 조직), Cogging(코깅), Processing map(공정지도)

1. 머리말

니켈기지 초내열합금 Alloy718은 Ni-Cr-Fe 기지합금으로 고온기계적 성질이 우수하고, 용접성과 열간성형성도 여타 니켈기지 초내열합금에 비하여 우수하여, 항공기 및 육상용 엔진 추진체의 구동품에 사용되어 초내열합금 총사용량의 35% 수준을 점유하고 있을 정도로 보편적으로 이용되고 있는 소재이다. Alloy718 합금은 합금성분이 15개 정도에 이르기 때문에 복잡한 조성관리가 필요하며, Al, Ti 등 대기중에서 공기

와 반응하여 산화물을 생성하기 쉬운 성분을 함유하기 때문에 통상적으로 진공용해에 의해서 잉고트가 제조된다. 특히 합금원소 중에서 약 4~5 wt.%가 함유된 Nb은 Alloy718의 고온기계적 성질을 향상시키는 ν [Ni₃Nb] 상을 생성하는 주요한 성분이지만, 용해중에 편석이 심하여 주조상태 그대로는 이용하기 힘들고 진공아크재용해 등과 같이 주조조직에서 편석 및 주조공동을 줄이기 위한 방법으로 재용해하여 사용하고 고 있으며, 500mm 직경수준의 대형 잉고트가 제조되어 활용되고 있다^[1].

대형 잉고트 제조시 국부적인 합금원소의 조성편석과 응고조직 변화는 후공정인 cogging 공정에서 조직

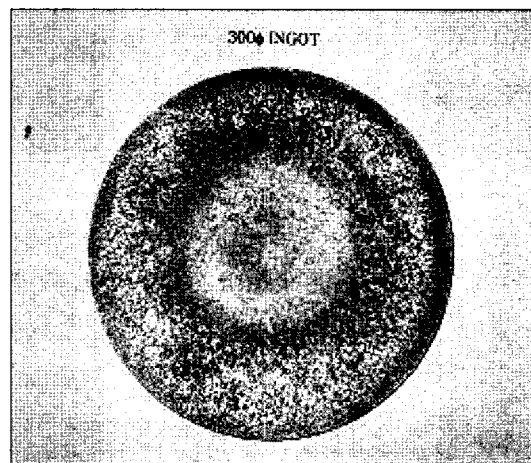
* 한국기계연구원 재료기술연구소 공정연구부

의 변화를 유도할 수 있으며, 이는 결국 최종 빌렛의 기계적 성질을 결정하는 주요한 요인이 되고 있다. 본 연구는 FE simulation을 이용하여 잉고트 cogging시 최적의 빌렛을 제조하고자 수행하였으며, VIM/VAR/VAR Alloy718 잉고트에서 부위별 조직변화가 후열 간소성가공 공정에 미치는 영향을 분석하였다.

2. VIM/VAR/VAR 잉고트의 조직

대형의 VIM/VAR 혹은 VIM/VAR/VAR 잉고트를 이용하여 추진체의 디스크 등 고품위의 구동부품을 제작하기 위해서는 까다로운조직 및 기계적 특성에 대한 요구조건을 만족하여야 한다. 특히 대형 빌렛의 경우 균일한 특성이 보장되어야 하는 데, 본 연구의 목적은 표 1에 나타난 조성을 가지며 결정립크기가 제어된 Alloy718소재의 잉고트 및 빌렛제조를 위한 공정기술개발에 두고 있다.

표 1의 조성을 가진 Alloy718소재를 이용하여 VIM/VAR 혹은 VIM/VAR/VAR 채용해에 의해서 잉고트를 제조하면 그림 1과 같이 외곽의 chill zone, 중간영역인 columnar zone, 내부의 equalized grain



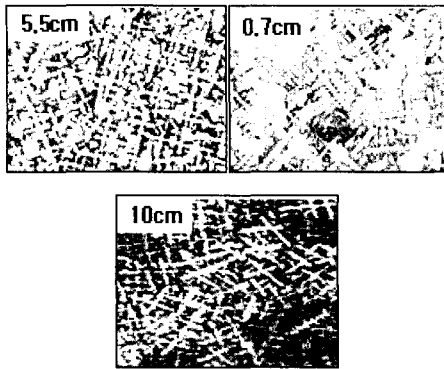
[그림 1] VIM/VAR/VAR Alloy718 마크로조직

zone 등이 형성되며, 이에 따라 일반 진공정밀주조 보다는 그 정도가 약하지만 일부 조성의 편석도 예상된다. 조성편석과 조직형상에 대한 것은 여타 논문에서 소개하기로 하고 본 논문에서는 이들 조직변화가 잉고트 cogging시 발생할 수 있는 여러 가지 가능성에 대해서 검토하고자 하였다.

그림 2는 그림 1의 부위별 미세조직을 나타낸다. 사진에 표시한 길이는 잉고트 중심에서 반경방향으로의 길이를 나타내며, 잉고트 단면은 전반적으로 잘 발달된 dendrite 조직을 보여주고 dendrite arm spacing은 columnar zone 에서 상대적으로 크게 나타났다. 한편 종단면 조직을 관찰하면 columnar grain zone에는 shape aspect ratio가 큰 elongated grain이 외부로부터 성장하여 중심축을 따라 성장한 것으로 나타났다. 이들 columnar grain 들은 결정립 크기가 크고 국부적인 응고방향을 나타내며 응고하기 때문에 결정성장 방향이 특정방향을 유지하여 집합조직의 양상을 나타낸다. 이들 조직은 잉고트 cogging시 소성가공능이 부위별로 다르게 나타날 것을 암시하고 있다.

[표 1] Alloy718 원소재 조성

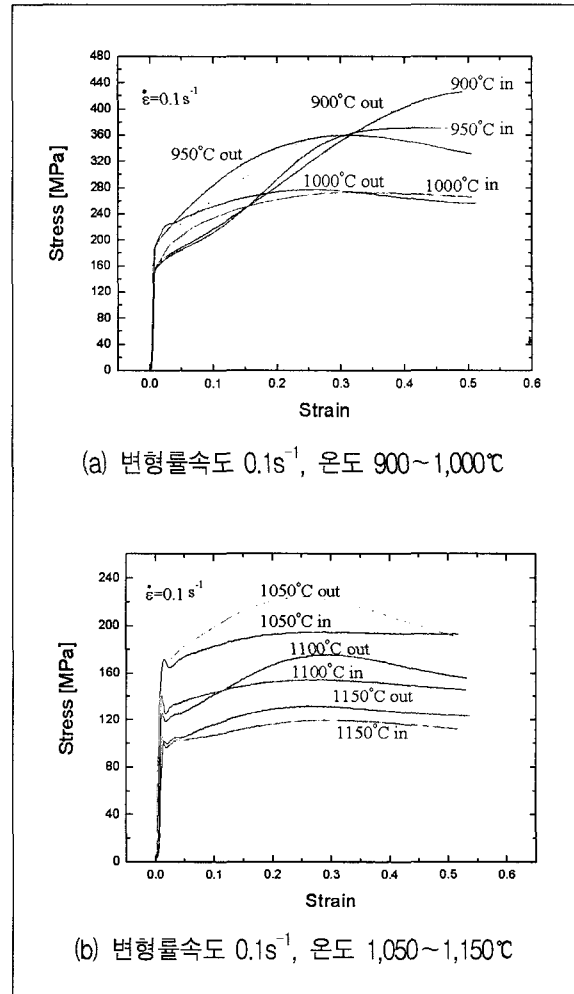
원소	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
조성	0.02 ~ 0.035	Max. 0.1	Max. 0.15	Max. 0.003	Max. 0.01	17~ 19	51~55
원소	Co	Mo	Ti	Al	B	Fe	Nb
조성	Max. 1.0	2.8~ 3.1	0.8~ 1.10	0.40~ 0.70	Max. 0.006	16~ 20	5.0~5.5 (Nb+ Ta)



[그림 2] VIM/VAR/VAR 마이크로 조직

3. VIM/VAR/VAR 잉고트 압축특성

열간성형성 검사를 위해서 잉고트 길이방향으로 압축 시험편을 채취하여 Thermecmaster를 이용하여 Ar 분위기에서 고온압축시험을 수행함으로써 열간소성가공 조건에서 잉고트 내외부의 변형거동을 조사하였다. 실험범위는 온도조건 900~1,150°C, 변형률속도 조건 0.001~10 s⁻¹으로 수행하였다. 그림 3에 변형률속도 0.1s⁻¹에서 구한 응력-변형을 유동곡선을 나타내었는데, 유사한 양상이 변형률속도 0.01s⁻¹에서도 나타났다. 시험편 채취부위에 상관없이 시험온도가 상승할수록, 변형률속도는 저하할수록 유동응력은 점차 낮아진다. 그러나 두 부분의 유동곡선을 상호비교하면 동일 압축조건에 대하여 각기 다르게 나타난다. 즉, 시험조건에 따라 다소 차이는 있지만, 외부의 columnar grain이 내부의 equiaxed grain에 비하여 상대적으로 유동응력이 높게 나타나고 있다. 여기에서 위치에 따른 유동응력곡선의 변화는 크게 보아서 마크로 조성 편석에 의한 국부적인 재료특성변화와 응고과정에서 발생된 조직변화에 따른 결과로 판단된다. 이들 유동응력곡선은 잉고트 cogging 하거나 형단조를 통해 형



(a) 변형률속도 0.1s⁻¹, 온도 900~1,000°C

(b) 변형률속도 0.1s⁻¹, 온도 1,050~1,150°C

[그림 3] 잉고트의 내부 및 외부의 진응력-변형률선도

상을 구현할 때, 각기 다른 소성변형거동을 나타낼 것이다.

그림 3에서 나타난 위치에 따른 유동응력곡선의 변화를 확인하기 위하여 조성분석을 수행한 결과 잉고트 내외부에서 다소 조성변화가 있었지만 크게 유동응력곡선에 영향을 줄 수 있는 정도의 차이는 없었고, 조직 자체는 위치에 따라 상당한 변화가 있는 것으로 확인되고 있다. 즉, 전체적으로 잉고트 성장방향으로 보면, 고상-액상 응고계면은 잉고트 길이방향으로 시

간에 따라 거의 균일하게 유지하며 성장하기 때문에 길이방향으로의 조성 및 조직의 변화는 크지 않은 것으로 확인되고 있다. 그러나 국부응고조건(local solidification condition)은 잉고트 반경방향으로의 거리에 따라 심한 차이를 나타내고 있어서, 이로 인해 조직 및 조성의 변화가 나타날 수 있다. 즉, columnar grain의 경우 외부의 copper crucible의 냉각효과로 인하여 잉고트 외부에서 내부로 들어지며 결정이 형성되고 결정립 크기도 상대적으로 크게 나타나는 것으로 확인되고 있다.

이러한 양상은 압축시험한 시험편에 대해서 변형양상을 나타낸 그림 4에서도 확인되고 있으며, X-ray 분석결과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 중앙부의 경우에는 방향성이 없는 다결정 결정립의 존재로 압축된 형상이 axi-symmetric 양상을 나타내지만, columnar grain이 형성된 외부에서는 압축 축으로부터 결정립 방위상 soft direction을 따라 90° 시험편이 기울어지며 압축된 것을 확인할 수 있다. 이는 columnar grain의 경우 제한된 방향성을 가진 결정립에서 우선적으로 변형이 일어나며 시험편이 압축된 것을 증명하고 있다. 잉고트 내외부에서의 각기 다른 변형거동은 잉고트를 cogging 할 경우에 조건 선정에 반영하여야 할 것으로 판단되며, 이에 따라 균일

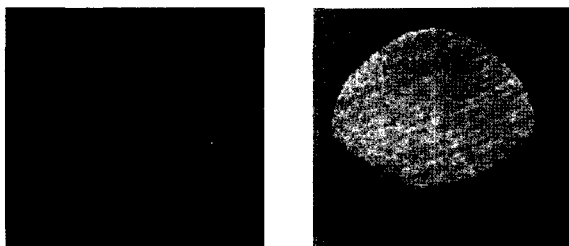
Alloy718의 동정변형거동에 부위별 조직변화를 감안한 소성변형 모델링이 필요할 것으로 판단된다^[2].

4. 잉고트 cogging 전산모사 및 빌렛 제조

Alloy718 잉고트 cogging시 프레스 공정변수에 따라 빌렛의 국부적인 온도와 변형률이 달라질 수 있으며, 이는 궁극적으로 cogging되는 빌렛의 조직과 빌렛의 형상, 최종 제품의 특성에도 영향을 미치게 된다. Alloy718을 소성가공할 수 있는 온도범위는 여타 초내열합금과 마찬가지로 매우 좁다. 즉, 조성편석에 의해서 수지상간 영역(interdendritic region)에 형성된 저융점상인 Laves phase가 다량 형성된 빌렛을 가열하게 되면 잉고트 내에서 국부용해가 일어나며 cogging시 빌렛의 파괴원인이 될 수 있다. 국부용해가 일어나지 않는 범위에서 cogging 하기 위해서는, 잉고트를 충분히 균질화처리해 주며 내부확산에 의해 Laves상을 제거하여야 한다. 잉고트를 cogging할 경우 온도 상한선은 Laves phase의 용해온도로 주어지고 하한온도는 미세조직을 구현하기 위해서 동적재결정된 결정립의 성장을 제한할 수 있는 온도로 규정할 수 있으며 Alloy718의 경우 δ 상이 결정립성장을 제어하는 역할을 담당한다.

결국 잉고트 cogging시 빌렛을 재가열하지 않을 수 있도록 충분히 고온에서 수행하되, 미세한 결정립을 얻기 위해서는 δ 상이 완전 용해되지 않는 온도에서 마무리공정을 수행하는 것이 바람직하다. 이처럼 균일 조직의 빌렛을 얻기 위해서는 좁은 소성가공온도 영역에서 낮은 변형률속도로 cogging을 수행하는 것이 바람직하다.

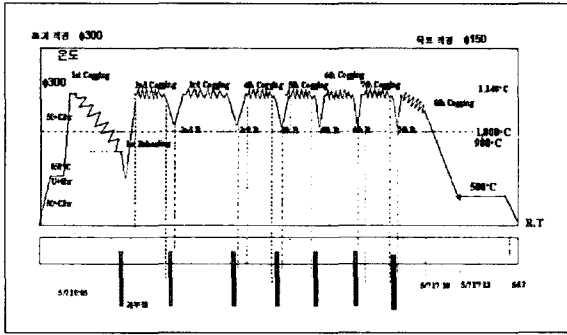
그림 5는 Alloy718의 process window 범위 내에



(a) Equiaxed grain (b) Columnar grain

[그림 4] 압축변형된 시험편의 양상

(a) 외부 (b) 내부



[그림 5] Alloy718잉고트 cogging 공정흐름도

서의 cogging 공정흐름도를 나타내었다. 여기에서 설비의 용량, 금형형상 및 바이트 크기 등에 1회 압축시 가할 수 있는 소성변형률을 제한을 받게 된다. 단조작업 시간만 고려하면 1회 바이트 및 소성변형률을 크게 하여 cogging을 수행하여야 하지만 cogging 초기에 주조조직이 완전히 깨어지지 않은 상태에서 과도한 변형을 가할 경우 잉고트의 표면 혹은 내부의 interdendritic region의 Laves상 부근에서 crack이 형성될 수 있다. 대부분 crack은 인장응력이 발생하는 부위에서 형성되기 때문에 표면에 형성될 가능성이 매우 크다. 본지에 실지는 않았으나 Deform 3D를 이용한 전산모사를 수행해 보면 원형빌렛을 side pressing 할 경우에 빌렛 좌우의 표면부에 인장응력이 형성되게 되는데, 이 부분에서 저융점상이 존재할 경우에 표면결함이 발생될 가능성이 매우 커지게 된다. 이상의 결과를 요약하면, 빌렛제조를 위한 잉고트의 cogging시 초기 단계에는 주조조직이 형성되어 있는 상태에 있기 때문에 단조기 용량이 충분하다 하더라도 소성변형률을 적절히 조절하며 cogging 단조를 수행하는 것이 바람직하다.

실제 잉고트 cogging시에는 빌렛의 가열온도, 가열로부터의 이송시간, 금형온도, 단조조건 등을 반영하여 전산모사의 조건으로 선정한다. 본 연구에서

는 Deform 3D를 이용하여 비등온조건에 대한 전산모사를 수행하였으며, 이때 사용된 세부조건은 표 2와 같다.

[표 2] 잉고트 cogging simulation 조건표

가열로에서 다이셋까지의 이송시간	60 [sec]
다이셋에서 가열로까지의 이송시간	60 [sec]
재가열 시간	1시간 (3600 sec)
다이와 소재의 접촉시간	0.5 [sec]
Bite 간의 이송거리	110mm
마찰계수	0.3
열전달 계수	20 [N/sec/mm/C]
빌렛크기	D290 × L800 mm
실제성형길이	650mm
빌렛온도	1,140°C
다이크기	L450×W220×H250 ×R20 mm
다이속도	40mm/sec
다이온도	400°C

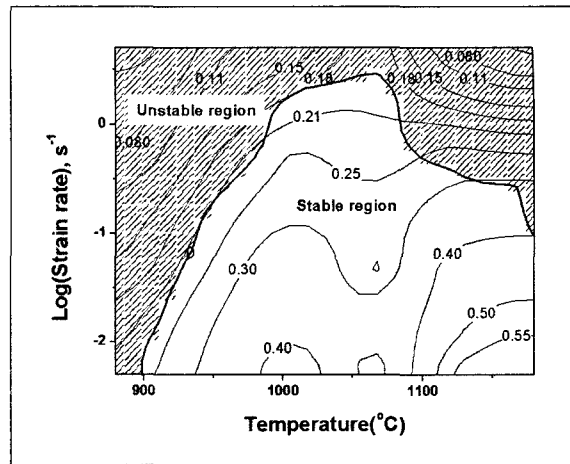
재료특성은 앞서 언급한 잉고트 내외부의 조직불균일성은 무시하고 균일조직을 가정하고 해석하였으며, 금형과 빌렛간의 계면조건은 통상적인 조건을 이용하였다. 여기에서 원소재는 잉고트에 대하여 1차 균질화 열처리를 수행한 것이기 때문에 1,140°C로 가열된 노에 장입하여 내부의 온도가 목표온도에 도달할 수 있는 충분한 시간동안 균일 가열한 후 공냉하는 방법을 선택하였다.

가열로부터 단조기까지 잉고트를 이송하는 데 요하는 시간 등은 잉고트의 온도변화를 예측하는 데 있어

서 매우 중요하다. 본 시뮬레이션 결과 가열로부터 프레스까지 이송하면서 약 60°C의 표면온도 강하가 예측되었다. Cogging시 잉고트 표면에서의 온도강하는 궁극적으로 빌렛제조 공정에서 표면결함 발생에 주요한 요인으로 작용한다. 잉고트 표면에서의 온도강하는 대기와의 온도차이 때문에 형성되기도 하지만, 실질적으로 cogging작업시 금형과의 접촉에 의한 온도강하가 매우 중요하게 작용한다. 결국, 표면균열발생을 최소화하기 위해서는 금형가열온도를 가능한 한 높여줄 필요가 있다.

표면단조결함의 발생 가능성은 기존의 여러가지 결함발생 예측모델을 통해서 확인할 수 있다. 단조작업시 표면결함이 발생하게 되면 후공정에서 점차로 균열이 성장하여 빌렛을 사용할 수 없기 때문에 대부분 현장에서는 용접기로 표면부의 균열발생부위를 제거해서 사용한다. 그러나 용접기를 이용하여 표면균열부위를 제거하게 될 경우, 여타부분은 지속적으로 냉각되는 가운데 빌렛의 표면을 국부가열 함으로 인해 최종 빌렛의 균일성에 영향을 미치게 된다. 결국 최적 cogging 조건에서는 가급적 이와 같은 불필요한 균열 제거 작업을 하지 않도록 단조조건을 적절히 선정하여야 한다. 이때 사용가능한 방법으로 소성변형지도를 이용할 수 있다.

그림 6은 Alloy718에 대하여 구한 것으로 소성변형시 안정소성변형 구간을 나타내는 Dynamic material model을 이용한 Processing map으로, 소성변형이 불균일할 경우 재료의 파단 혹은 불균일 조직이 형성될 가능성이 있게 되는 데, 이를 금속학적 공정변수(온도 및 변형률속도)를 매개로 하여 특정구역으로 나타낸 것이다. 그림 6은 Alloy718에 대하여 Dynamic Materials Model에 의한 소성변형효율과 Ziegler가 제안한 소성변형 안정성구역을 동시에 표현한 것으로



[그림 6] Alloy718에 대한 Processing Map

Alloy718과 같이 단조성이 좋지 않은 소재를 단조할 경우에 균일 소성변형조건을 잡는 지침으로 이용할 수 있다^[3,4]. 공정조건에 따라 빌렛의 변형조건이 달라지게 되고, 이에 따라 소성변형이 불균일해 지는 경향을 나타내며 재료의 파단 혹은 불균일 조직을 나타낼 수 있다. 그림에서 Alloy718의 경우 주어진 cogging 공정조건에서 낮은 변형률속도가 유리하며, 온도는 1,000°C~1,100°C 부근이 상대적으로 유리한 것으로 나타난다. 1,000°C 부근은 δ상이 존재하는 구간으로 미세결정립이 형성되는 구간이고 1,100°C 이상의 고온에서는 결정립조대화가 활발하게 일어나는 구간이다. 이처럼 실제 작업에서는 본 mechanism map을 공정 지침서로 삼고 작업현장의 여건을 감안한 공정조건을 설정하는 것이 필요하다. 즉, Alloy718 cogging시 온도구간은 1,140~950°C 수준으로 유지하여야 하지만, 그림 4에 나타난 바와 같이 단조온도가 낮아질수록 유동응력이 급격히 증가하게 되고 Alloy718에서 결정립 크기를 관리할 수 있는 δ 상이 990°C 이상에서 기지 v에 고용되기 때문에 결정립 성장속도가 빨라지기 때문에 단조기 용량과 조직변화를 감안해서 cogging

조건을 결정하여야 한다.

현재 cogging에 대한 전산모사는 그림 4에서 나타나는 부위별 다른 고온변형거동을 반영하지는 못하고 있지만, 전체적인 빌렛의 변형양상 및 온도변화 등을 확인할 수 있는 수준에 까지 도달하였다. 그러나 앞서 언급한 부위별 각기 다른 빌렛의 조직과 기계적 특성을 감안한 cogging 해석기법은 현재 개발되어야 할 과제로 남아있다^[5].

상기 안정소성변형구역에서의 조건을 선택하여 진공정밀용해 및 진공아크 재용해된 직경 300mm의 VIM/VAR/VAR Alloy718 소재를 이용하여 주조조직을 파괴하기 위한 cogging 공정을 수행한 결과, 형상적으로는 외부 균열을 야기하지 않으면서 cogging을 수행할 수 있었다. 현재 유압식 프레스를 이용하여 잉고트의 주조조직을 파괴하는 cogging 공정을 전산모사 하기 위해서, Deform 2D에 있는 Alloy718에 대한 고온소성변형 데이터를 이용하였으나, 앞서 잉고트에 대한 평가에서 보는 바와 같이 부위별로 조직이 다른 것을 반영하여 실제 cogging을 수행하여야 궁극적으로 균일한 빌렛을 제조하는 방안이 수립될 것이다.

5. 맺음말

VIM/VAR/VAR 용해된 초내열합금 Alloy718 잉고트를 이용하여 빌렛제조 하기위한 조건을 파악하기 위하여 빌렛에 대한 특성평가를 수행하였다.

재용해된 잉고트의 반경방향으로 위치에 따라 유동응력곡선 이력이 다르게 나타났으며, 이는 위치별로 조직이 다르게 형성되었기 때문이다. 즉, 외부의 chill 부위를 제외하고 그 내부에 형성되는 columnar grain zone의 경우 잉고트 내부로 columnar grain이 성장

하며 형성되지만, 잉고트에서 내부에 형성되는 최후 응고부위는 비교적 방향성이 없는 균일한 조직을 갖기 때문에 다결정체의 일반적인 변형거동과 유사한 거동을 나타낸다.

Deform 3D를 이용하여 VIM/VAR/VAR 용해된 잉고트를 cogging하는 공정을 전산모사 하였다. 작업 조건과 잉고트내의 조직을 감안한 공정조건을 설정하되 소성변형 안정구역에서 cogging 조건을 설정함으로써 표면균열을 방지할 수 있었다. 잉고트 내외부간 조직차이를 감안하고 cogging 공정을 적절히 유지하여 줌으로써 외부에 균열이 형성되지 않고 결정립크기가 비교적 균일한 빌렛을 제조할 수 있을 것이다. 현재 보다 정확한 cogging 해석을 위해서는 잉고트 내외부의 조직차이를 감안한 재료변형 모델링과 수치해석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 과제는 과학기술부의 민간겸용기술과제의 일환으로 추진된 것이며 관계자께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R.J. Siddall, Superalloys 718, 625 and Various Derivatives, ed. E.A. Loria, The Minerals, Metals & Mate. Soc. 29(1991).
- [2] 나영상, 염종택, 박노광, 대한금속재료학회지, 제 40권, 제 2호 155(2002).
- [3] Y.V.R.K. Prasad and S. Sasidhara, 'Hot Working Guide: A Compendium of Processing

- Maps", ASM, USA(1997).
- [4] H. Ziegler, Thermomechanics, 2nd Ed., North Holland, Amsterdam, 1983.
- [5] G. Sarma, B. Radhakrishnan and T. Zacharia, Proceed. on Microstructure Modeling and Prediction during Thermomechanical Processing, TMS, 37(2001).