

고품질 초내열합금 Alloy 718 빌렛 제조기술

염종택* · 박노광* · 이종수#

Manufacturing Technology of High-Quality Superalloy Alloy 718 Billet

Jong Taek Yeom, Nho Kwang Park and Chong Soo Lee

1. 서론

초내열합금인 Alloy 718 은 니켈기 초내열합금에서 상당량 포함되어 있는 Co 대신에 Fe (~18%)를 첨가하여 비용절감을 꾀하도록 설계된 합금으로, 650°C 까지의 기계적 특성이 우수하고 여타 초내열합금에 비해 가공성 및 성형성이 양호하기 때문에 가스터빈은 물론 증기터빈, 디젤엔진 등 내연기관과 산업용, 발전용 고온설비 등 전체 단련용 초내열합금의 35%를 점유할 정도로 광범위하게 사용되고 있다.⁽¹⁾ 이로 인해 국내에서 산업 및 발전용 고온소재 부품으로 사용되어 오던 내열강을 대체할 수 있는 합금으로 각광을 받고 있다. 일례로, 가스터빈의 효율은 터빈 입구온도에 의해 크게 좌우되는데 지난 수십 년간 재료기술개발 및 냉각효율개선으로 가스터빈의 터빈입구 온도는 매년 20°C 정도 상승되어 왔다. 이에 따라 기존 티타늄합금, 내열강 등으로 쓰였던 압축기 부품 등도 니켈기 초내열 합금으로 점차 바뀌는 추세에 있으며, 이러한 경향은 일반 산업 및 발전용 고온소재부품에서도 확대되고 있다. 그러나, 초내열합금은 엄격한 규격 및 기술적 어려움으로 인해 증가하는 국내수요에도 불구하고 국내 제조가 전무하여 전량 수입하고 있는 실정으로 이에 대한 기술축적과 함께 국산화 개발이 절실히 요구되고 있다.

초내열합금 Alloy 718 잉고트 및 빌렛제조기술에는 모합금 용해 기술, 고정정 재용해 기술, 응고 및 단조기술, 정밀 비파괴 검사 기술, 용해/응고

및 단조에 관한 컴퓨터 해석기술, 고신뢰성 및 고온 기계적 특성검사 기술 등 다양한 기술의 개발이 전제되며, 표 1에 초내열합금 빌렛제조시 확보되어야 할 주요 단위기술들과 세부내용을 나타내었다.

상술한 일련의 단위 기술들을 확보하고, 상호보완적으로 활용하여야 고품위 Alloy 718 빌렛제조가 가능하며, 특히 진공유도용해(Vacuum Induction Melting, VIM)와 진공아크재용해(Vacuum Arc Remelting, VAR) 등을 이용한 double 용해 혹은 VIM/VAR/VAR 및 전기슬래그 재용법(Electroslag Remelting, ESR)을 도입한 VIM/ESR/VAR 등의 triple 용해에 의하여 미량원소의 조절, 불순물 제거 및 조직관리 등을 수행하는 고정정 잉고트 제조기술과 주조조직 파괴와 균일 단조조직을 얻기 위한 코깅(Cogging)공정 및 소성가공기술 등이 가장 중요한 핵심기술이다. 본 기술해설에서는 Alloy 718 합금을 포함한 초내열합금의 국내의 개발동향을 살펴보고, 빌렛제조와 관련된 단위기술들의 간략한 설명과 함께 실제 국산화를 추진중인 고품위 Alloy 718 빌렛의 제작사례, 빌렛의 제조과정 등에 대해서 소개하고자 한다.

2. 국내·외 기술현황

최근 초내열합금 부품의 국내 수요 증가 등으로 인해 초내열합금의 국산화 개발 필요성이 증가하여 일부 연구기관 및 관련업체에서 제한된 범위의 초내열합금 빌렛 및 단조/주조 부품 제조기술에

* 한국기계연구원, 재료기술연구소

교신저자: 포항공과대학교 신소재공학과

Table 1 Classification of the manufacturing technology for Alloy 718 billet

기술구분	세부내용
모합금 용해기술	• 원소의 회수율, 미소성분 조절, 편석관리
고청정 재용해기술	• 불순물 편입방지, white spot, freckle, large grain 등 용해 결함 최소화 • 잉고트 내외부 조성편석 최소화
잉고트 Cogging 및 소성가공기술	• 구조조직 파괴, 미소균열발생 방지, 균일 결정립관리 및 제어
Cogging 공정설계 및 FE 해석기술	• 형상 및 조직예측/평가, 미세조직관리 및 정밀도 구현
열처리 및 특성평가 기술	• 조직제어 관리 및 파괴/비파괴 특성 평가

대한 연구개발이 진행된 바 있으나, 모합금(VIM 잉고트)제조의 경우 전량 수입에 하며, 특성 및 조직제어 등의 어려움으로 커다란 실효를 얻지 못하였다. 국외의 관련기술의 동향을 살펴보면, 초내열합금 소재 및 부품 개발은 독자적인 항공기 설계 및 생산기술을 보유하고 있는 미국, 러시아, 영국, 프랑스, 일본 등 선진국에서 주도적으로 진행되고 있으며, 대부분 정부 주도의 지원하에 관련업체가 참여하여 막대한 예산을 투자하는 전략적인 형태로 수행되고 있다. 초내열합금 소재의 최대 공급국은 미국, 프랑스 등으로서 Allegheny, Special Metals, Carpenter Technology(미국), Aubert-Duval(프랑스) 등에서 소재공급이 이루어지고 있으며, 초내열 합금 용해 및 빌렛 제조에 관한 기술은 완성단계에 이르고 있다. 최근 선진업체의 연구개발 동향은 잉고트의 청정도를 더욱 향상시키고 거시적 조성편석을 최소화하여 가능한 대형 잉고트를 제조하기 위해 EBCHR(Electron-Beam Cold-hearth refining), CMSF (Clean Metal Spray Forming) 등의 새로운 재료공정기술을 개발하기 위한 연구가 계속적으로 진행되고 있고, 코깅 후 빌렛의 결정립분포를 균일하게 유지하기 위한 연구와 이를 통해 빌렛의 크기(직경)를 증가시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

국내의 경우 초내열합금의 용해, 재용해 및 빌렛제조 기술은 국내에서 산발적인 시도가 있어 왔으며, 소형크기의 고품위 초내열합금 용해에 필요한 VIM, ESR, VAR 등의 주요 설비들이 국내에 도입되어 이들 장비의 활용을 위한 측면에서 연구개발이 시도된 바 있다. 한편, 빌렛제조를 위한 단조장비도 업체 및 일부 연구소에 구축되어 있으며 기술적으로도 단조공정설계, 소성가공에 따른 조직제어 등 구조조직 파괴를 위한 코깅(Cogging)공정설계에 필요한 연구개발이 여러 차례 시도된 바 있다. 그러나, 초내열합금 제조 및 부품제조 기술은 국내의 독자적인 가스터빈 설계 및 생산기술

부족으로 인하여 제조설비 및 기술기반이 취약하며, 대형 잉고트의 용해/재용해 설비가 부족하고 특히 빌렛제조를 위한 코깅설비는 상당히 열악한 실정이다. 또한 국내에서 제조된 원소재(잉고트)에 대한 해외 선진업체의 인증획득 경험이 없어 개발 완료 후 인증 획득을 위한 사전정지 작업이 요구되며, 이 외에 미량원소 및 불순물 혼입방지 기술, 비파괴 평가기술, 코깅기술 및 관련 FE 해석기술 등에서 설비 및 기술 보유 수준이 취약한 실정에 있다. 따라서, 열병합 발전 시스템과 같은 민수분야 뿐만 아니라 전투기, 전차, 함정과 같은 군수분야에서도 대외 기술 의존도를 줄이기 위해서는 이 분야의 국내 기술 개발이 필수적이며, 이에 따라 국내의 기술개발 육구는 더욱 증대될 것으로 판단된다.

3. Alloy 718 합금 빌렛 제조기술

3.1 주요관련기술의 검토

3.1.1 모합금 잉고트(ingot)제조기술

니켈계 초내열합금의 모합금 잉고트제조는 정련에 주로 사용되는 1차 용해법인 진공유도용해(Vacuum Induction Melting, VIM)이 주로 이용되고 있으며, 이 용해법은 진공에서 합금원소의 조절과 탈가스 및 불순물을 감소시켜서 용탕의 화학적 성분을 정확하게 조절할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, 세라믹 성분의 내화물 도가니에서 용해되기 때문에 고온에서 내화물이나 내화물 라이닝과 합금과 용탕사이의 반응으로 상당량의 산화물이 생성되고 이때 혼입되어 재료내에 비금속개재물의 양을 증가시킨다. 또한 불균질한 응고조직과 합금원소의 편석에 의해 금속재료의 열간가공성(Hot workability)이 우수하지 못하다는 단점을 가지고 있으며, 이로 인해 개재물의 양을 감소시키고 응고조건에 따른 응고조직의 개선을 위한 재용해기술이 요구된다. Fig. 1은 VIM에 의해 제조된 Alloy

718 잉고트의 매크로조직 및 수지상간에 존재하는 편석물의 SEM 분석결과를 나타낸 것으로, 전형적인 3가지 응고조직인 등축정(Equiaxed Structure), 주상정(Columnar Structure), 급냉조직(Chill Structure)이 뚜렷이 관찰되며, 냉각속도의 차이로 인해 잉고트의 중심으로부터 가장자리로 갈수록 수지상의 간격이 좁아지는 경향을 가진다. 또한 VIM 된 Alloy 718 잉고트의 수지상간의 석출물은 Laves 상과 MC 형 탄화물((Nb, Ti)C)인 것으로 확인되었으며 그 주위에 미세한 디스크형상의 γ (FCC-Ni₃Al, Ti)상이 석출되어 있으며, Alloy 718의 주 강화상인 γ'' 상(BCT-Ni₃Nb)이 내부에 존재한다.

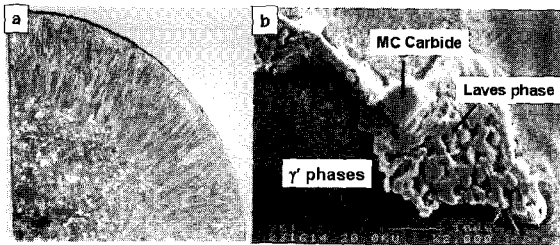


Fig. 1 Macrostructure(a) and SEM micrograph(b) of VIM processed ingot

3.1.2 고청정 재용해 및 균질화처리 기술

초내열합금 VIM 잉고트에서 나타낸 개재물과 편석 등을 최소화하기 위한 재용해법으로 전기 슬래그 재용해법(Electroslag Remelting, ESR)과 진공아크 재용해법(Vacuum Arc Remelting, VAR) 등이 주로 이용된다.⁽²⁾ 이러한 재용해법을 통해 불순물 원소나 비금속개재물, 그리고 가스성분 등의 제거로 인한 재료의 청정도(Cleanliness) 증가와 응고시 나타날 수 있는 결함이나 극심한 편석을 최소화한 치밀한 조직을 얻어 고온강도와 열간가공성이 향상된 우수한 잉고트를 얻을 수 있는 장점을 가지며, 특히 항공기 엔진부품의 디스크, 블레이드 등의 회전체의 경우 VIM/VAR/VAR 또는 VIM/ESR/VAR 등의 Triple 용해법에 의해 고청정 Alloy 718 잉고트를 제조하는 것을 규격화하고 있다. 그러나, 재용해 공정이 부적절할 경우 편석으로 인해 Freckle 및 Dirty white spot 등이 형성될 수 있으므로 주의를 기울여야 하며, 잉고트의 청정도 향상, 거시적 조성편석 제거, Carbide Chain 등을 관리할 필요가 있다. 한편, 재용해공정을 거친 Alloy 718 잉고트에도 여전히 수지상간에 조성적 편석부위가 형성되어 있으며, 이로 인해 코깅(Cogging) 등과

같은 잉고트 조직 파쇄공정시 심각한 균열과 함께 incipient melting 으로 인한 국부용해 등을 초래할 수 있다. 따라서, 코깅공정 전 고온에서 장시간 열처리를 통해 이들 편석부위를 균질화 하여야 하며, Alloy 718의 균질화 열처리의 경우 저용점상 형성 직하의 온도구간(1100°C~1150°C)에서 잉고트 직경 별로 수십 시간의 등온처리를 수행하게 된다.

3.1.3 코깅 및 소성가공기술

Alloy 718 잉고트의 코깅(Cogging)공정에 대한 주요 목적은 주조조직의 완전한 파괴 이외에 TCP (Topologically Close-Packed)상 및 8상 등 제어, 빌렛 표면과 내부간의 균일한 결정립 크기 유지(ASTM # deviation ≤ 2), 평균결정립 크기 제어(ASTM #5 이상), necklace grain structure 관리 등으로 이러한 코깅공정은 빌렛의 품질을 결정하는 중요한 공정이다. 코깅공정시 잉고트 가열온도, 다이와 소재의 접촉시간, 재가열 횟수, 그 밖의 공정변수(변형량, 변형속도)는 잉고트조직의 파쇄도와 최종 빌렛의 조직 및 특성에 상당한 영향을 미치게 되며, 이들 공정변수의 효과적인 제어를 통해 결정립 미세화와 균질화를 피하기 위해서는 Alloy 718 잉고트의 고온변형시 공정변수에 따른 고온변형거동의 이해, 고온 성형성평가, 미세조직예측 및 평가 등이 선행되어야 한다. 또한 코깅공정시 미세조직 제어를 효과적으로 수행하기 위해서는 결정립예측 모델과 함께 FEM 기술을 연계한 해석기술이 필수적이며, 이와 관련된 내용은 본 기술해설에서 좀 더 자세히 다루어질 것이다.

3.1.4 그 밖의 분석 및 평가기술

초내열합금의 경우 다량의 합금원소를 포함하고 있기 때문에 모합금 용해 및 재용해 공정시 마량 원소관리, 편석제어 등은 최종 빌렛의 품질에도 상당히 영향을 미치게 된다. 이에 따라 VIM 잉고트 및 VAR 재용해품에 대한 합금성분 및 편석정도를 정확히 측정할 수 있는 분석기술이 요구된다. 일반적인 합금성분의 분석은 X-선 형광분석기(X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF)를 이용한 측정기술이 활용되고 있으며, 잉고트 입계편석에 대해 ICP(Inductively Coupled Plasma Spectrometry)분석기 등을 이용한 매크로 편석분석과 X-Ray Mapping 분석을 통한 마이크로 성분분석이 사용된다. 한편, 최종 빌렛의 미세균열 등을 포함한 결함과 열처리 전후의 미세조직의 불균일 정도를 파악하기 위한

분석방법으로 초음파 탐상시험(UT)이 주로 활용되고 있으며, Noise Level을 통해 분석된다. Fig. 2는 지름 150mm의 Alloy 718 빌렛의 열처리 전후의 UT 검사결과를 나타낸 것으로, 열처리 후의 Noise Level이 낮아졌음을 확인할 수 있다.

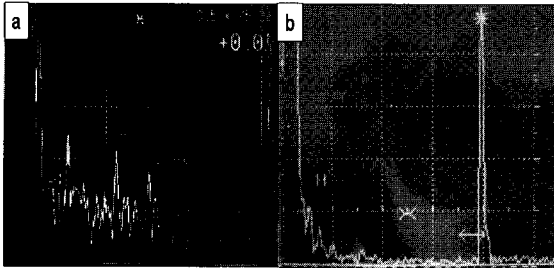


Fig. 2 The results of UT Test for dia. 150mm billet, (a) As-forged and (b) heat-treated

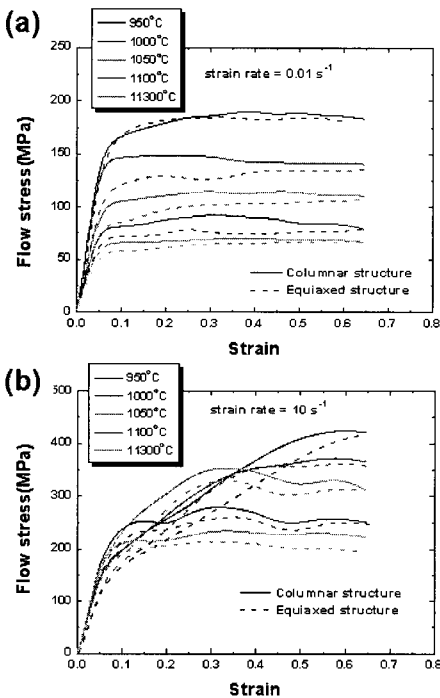


Fig. 3 Typical strain and strain curves of cast Alloy 718 at strain rates of (a) 0.01 s^{-1} and (b) 10 s^{-1} and different temperatures

3.2 Cast Alloy 718의 고온 성형성 및 미세조직 평가

3.2.1 Cast Alloy 718의 고온변형거동

앞서 언급된 바와 같이 코깅공정은 최종 빌렛의

품질을 결정하는 중요한 공정으로, 이러한 코깅공정을 최적화하기 위해서는 Alloy 718 잉코트의 고온변형시 공정변수에 따른 고온변형거동의 이해가 선행되어야 한다. 이 경우 성형공정변수(변형속도, 온도, 변형량 등)에 따른 재료의 유동응력 변화와 미세조직은 고온변형을 이해하는데 중요한 정보를 제공하며, 이들은 코깅공정 온도구간인 $900^{\circ}\text{C} \sim 1150^{\circ}\text{C}$ 와 여러 변형속도조건에서 압축시험 등을 통해 얻어질 수 있다. Fig. 3은 Cast Alloy 718의 내외부 조직인 주상정 및 등축정조직에서 얻어진 유동응력곡선을 나타낸 것으로, 등축정조직에 비해 다소 높은 유동응력을 보이나, 변형거동의 경우 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한 Cast Alloy 718의 주요 연화기구⁽³⁾는 거시적 전단밴드, 내부 또는 표면균열, 동적회복 및 재결정, 변형열 효과 등이 제안되었으며, 최근 연구⁽⁴⁻⁵⁾에서 비교적 변형속도가 빠른 구간에서는 flow localization에 기인한 표면균열 및 내부 기공형성과 함께 변형열에 기인한 것이며, 변형속도가 느린 구간에서는 대부분 동적재결정에 의한 것으로 설명하고 있다.

3.2.2 Cast Alloy 718의 성형성 평가

코깅공정시 온도하강과 마찰 등의 영향으로 표면균열, 내부 불균일 조직변화(전단밴드, 동적결정립 성장, 유동 불균일) 등 많은 성형결함이 발생할 수 있으며, 이러한 성형결함을 사전에 예측함과 동시에 성형에 적합한 조건에서 작업이 이루어지도록 하기 위한 방법 중 변형공정지도를 활용하는 방법이 니켈기 초내열합금에서 최근에 많은 관심을 받고 있다.⁽⁶⁻⁷⁾ 이 방법에서 주로 사용된 모델은 에너지분산효율의 개념을 도입한 동적재료모델(Dy-namic Materials Model)⁽⁸⁾과 Ziegler⁽⁹⁾에 의해서 제안된 성형불안기준을 연계하는 것으로, 철합금, 티타늄합금, 알루미늄합금, 니켈합금 등 많은 합금계에 활용하여 신뢰성을 입증한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ 동적재료모델은 가공성 또는 가공효율을 극대화하기 위해서는 가공중 외부에서 유입된 힘(Power)이 열적 방출보다는 변형되는 재료의 미세조직적 변화에 소모되는 것이 유리하게 되며, 이를 정량적으로 표현하기 위해서 에너지 분산효율(η)을 제시하였다.

$$\eta = \frac{2m}{m+1} \quad (1)$$

$$m = \left(\frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\epsilon}} \right)_T = \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_T \quad (2)$$

여기서, m 은 변형속도 민감도계수를 의미한다. 결국 에너지 분산효율(η)이 최대인 경우 재료의 동적 미세조직변화가 가장 활발함을 의미하게 된다.

한편, 금속유동의 안정성을 파악하기 위해 Ziegler⁽⁹⁾, Prasad⁽¹¹⁾ 등은 비가역적 과정에 대한 열역학적 이론에 근거한 다음과 같은 소성불안정기준을 제시하였다.

$$\xi(\epsilon) = \frac{\partial \ln(m/(m+1))}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (3)$$

여기서 ξ 이 음의 값을 나타내는 경우 유동불안정 구간으로 정의된다. Fig. 4는 VIM/VAR Alloy 718 잉고트의 주상정 및 등축정조직에 대한 변형 공정지도와 조직관찰결과를 함께 나타낸 것이다. 변형공정지도상에 표시된 값은 에너지분산효율치를 나타낸 것으로 최대 에너지 효율은 온도 1100°C 이상, 낮은 변형속도인 10⁻³s⁻¹ 이하임을 알 수 있다. 결국 이러한 조건이 가장 적합한 소성가공조건이다. 또한 변형공정지도에서 빗금친 부분은 소성불안정구간을 의미하는 것으로 그림에 나타낸 바와 같이 대부분의 구간에서 표면균열과 기공형성 등의 성형결함이 관찰되고 있다.

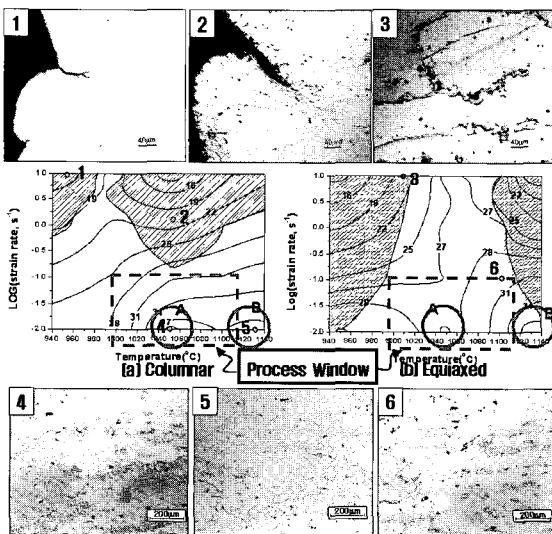


Fig. 4 Process maps for cast Alloy 718 with stable regions and unstable regions identified. (a) columnar and (b) equiaxed structures.

3.2.3 Cast Alloy 718의 조직예측 및 평가 앞서 유동응력의 연화거동에서 살펴 본 바와 같이 Cast Alloy 718의 고온변형시 주요 조직변화는 동적재결정에 의한 결정립 미세화이다. 일반적으로 재결정은 변형으로 인한 불안정한 상태의 내부 에너지가 새로운 결정립을 생성하면서 안정한 상태로 전이되는 현상으로 각 부위별로 소성변형중 발생하는 재결정양상은 변형률, 변형속도, 온도 등과 같은 소성변형조건 뿐만 아니라 모상내외 결정립계에 존재하는 석출상, 쌍정 등과 같은 금속학적 인자에 따라 결정되고 이러한 소성변형 조건을 예측하기 위한 방법으로 유한요소해석(Finite Element Method)과 재결정도모델식을 연계한 방법이 많이 이용되고 있다.⁽¹²⁻¹⁴⁾ 재결정과 관련된 관계식은 재결정 발생시점을 나타내는 임계변형량(Critical strain, ϵ_c), Avrami-type 과 유사한 속도식으로 표현되는 재결정분율, 재결정된 결정립크기 등으로 구성되며, Cast Alloy 718의 금속학적 모델식들은 다음과 같이 요약된다.

$$\text{if } T > T_m(\delta - \text{phase})(\approx 1038^\circ\text{C})$$

Critical strain(ϵ_c)

$$\epsilon_p = 3.422 \times 10^{-7} \times Z^{0.28} (\dot{\epsilon} > 0.01) \quad (4-a)$$

$$\epsilon_p = 1.139 \times 10^{-3} \times Z^{0.0982} (\dot{\epsilon} \leq 0.01) \quad (4-b)$$

$$\epsilon_c \approx 0.8 \times \epsilon_p \quad (4-c)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(508kJ / RT) \quad (4-d)$$

Fraction of recrystallization

$$\text{if } \epsilon > \epsilon_c$$

$$X_{DRX} = 1 - \exp\left(-\text{Ln}2 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}}\right)^2\right) \quad (5-a)$$

$$\epsilon_{0.5} = 0.1343 \times Z^{0.0515} \quad (5-b)$$

Recrystallized grain size(d_{DRX})

$$d_{DRX} = 1.0602 \times 10^5 \times Z^{-0.185} \quad (6)$$

재결정 관계식에 포함된 상수값은 압축시험 등에서 얻어진 유동응력곡선과 미세조직관찰 결과를 통해서 도출할 수 있다. Cast Alloy 718의 주요 석

출상인 δ 상은 주로 결정립계에 존재하여 재결정을 방해하거나 결정립성장을 억제하기 때문에 초기 코킹공정의 경우 δ 상 고용온도이상(1010°C~1038°C)에서 수행되는 것이 잉고트조직 파쇄와 동적재결정에 의한 결정립 미세화 측면에서 유리하며, 최종 코킹 공정단계에서는 δ 상 고용온도이하에서 수행하여 결정립성장을 최소화하는 것이 바람직한 코킹방법으로 판단된다.

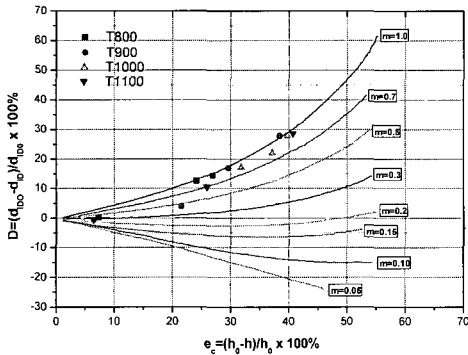


Fig. 5 Theoretical calibration curves for upsetting rings having indicated 6:3:2 ratio and experimental data points

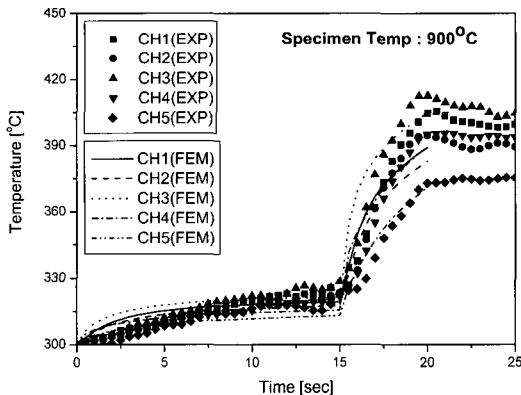


Fig. 6 Comparison of FE simulation and experimental results measured at initial die temperature of 300°C

3.3 코킹공정설계 및 FE 시뮬레이션

3.3.1 열간성형 공정변수의 DB화

일반적으로 열간성형시 소재와 다이사이의 온도 차이로 인해 소재의 Chilling이 발생하고, 소재의 표면과 중심의 유동응력이 상이하게 나타나 소재 유동 결함을 일으킬 수 있다. Chilling의 양과 범위는 계면열전달, 마찰, 변형속도, 초기 온도차이 등의 함수로 표현될 수 있으며, 특히 계면열전달과

마찰은 열간성형공정 설계시 상당히 중요한 변수로 작용한다. 일반적으로 마찰계수는 고온 링(ring)압축시험에 의해 얻어지며, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 윤활제를 사용하지 않은 경우 0.3~1.0 범위에서 m값이 변화하게 된다. 이때 변형이 진행됨에 따라 m은 1.0에 가까워지며 이것은 성형이 어려워짐을 의미하는 것으로 적절한 윤활을 통해 마찰을 최소화하는 것이 요구된다.

한편, 계면열전달계수의 경우 금형과 시편의 표면경도, 압력, 시간, 윤활조건 등에 따라 변화한다. 이러한 계면열전달계수의 측정은 소재 또는 다이에 열전대를 삽입하여 정적 및 동적인 상태에서 시간에 따른 온도변화를 측정 후 일차원 열전도식을 이용하여 얻어진 보정곡선(Calibration curve)과 비교하거나⁽¹⁵⁾, Inverse algorithm에 기초한 수학적 접근방법과 FEM해석을 연계하는 방법⁽¹⁶⁻¹⁷⁾ 등에 의해서 결정될 수 있다. Fig. 6은 Inverse algorithm에 의해서 얻어진 계면열전달계수를 FEM에 대입하여 해석된 각 부위별 시간에 따른 온도 변화와 실험결과를 비교한 하나의 예를 나타낸 것으로 높은 해석의 신뢰성을 잘 반영하고 있다.

3.3.2 코킹공정설계 및 평가

실제 Alloy 718잉고트의 코킹공정에 앞서 코킹공정변수에 따른 온도하강, 뒤틀림성, barreling 정도 등을 예측하기 위한 방법으로 유한요소해석(Finite Element Method)을 활용하고 있으며, 이러한 컴퓨터 해석기술을 사용할 경우 바이트 간격, 다이 크기, 압하량 등의 공정변수들을 변화시켜 반복 해석을 통해 최소한의 비용과 노력으로 최적의 공정조건을 도출하는 것이 가능하다. Fig. 7은 바이트 간격에 따른 코킹공정 해석결과를 나타낸 것으로, 소재의 한쪽 끝단을 고정시키고 bite 간격을 350mm로 성형할 경우 Fig. 7(a)와 같이 barreling 현상이 심하게 나타나는 것으로 해석되었고, bite 간격을 200mm로 최적화 한 경우 Fig. 7(b)와 같이 비교적 균일한 형상이 얻어짐을 관찰할 수 있다. 또한 이러한 해석을 통해 다이폭에 대해 1/2 정도의 바이트간격이 적절한 조건임을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 다이크기가 다른 경우에 대한 하중곡선을 나타낸 것으로, 다이폭이 50%감소함에 따라 최대성형하중은 약 44%정도 감소함을 관찰할 수 있으나 다이폭이 적정수준이하로 작아질 경우 코킹시간의 증가로 인한 온도하강을 초래하여 재가

열 회수를 증가시킬수 있으므로 이에 대한 신중한 검토가 요구된다. 한편, 소재 단면의 형상순서 등에 대한 해석결과는 소재 단면이 원→사각형→팔각형→사각형→팔각형→...의 순서일 때 가장 barreling 현상이 적은 균일한 단면을 얻을 수 있는 것으로 해석되었으며, 이러한 해석결과는 실제 코깅공정에서 직접적으로 활용될 수 있다.

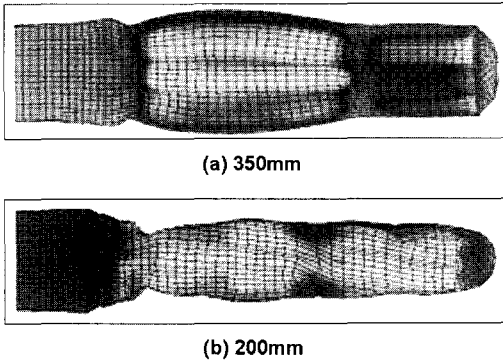


Fig. 7 FE Analysis results of the cogged Alloy 718 ingots with different bite distances

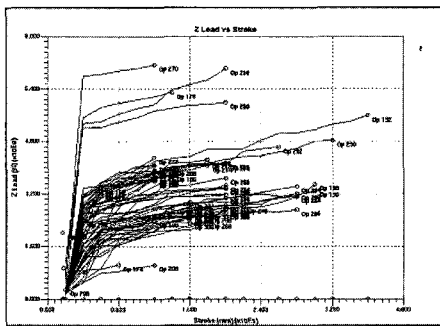
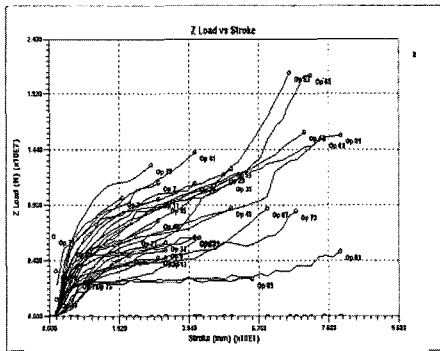


Fig. 8 Load and stroke curves simulated with different die sizes

3.3.3 코깅공정시 결함 및 조직예측/평가

Alloy 718 잉고트의 코깅공정시 표면부위에 균열이 종종 발견되고 있으며, 이러한 성형결함은 개재물의 영향, 금형과 소재간의 온도 불균일로 인한 잉고트 내외부 불균일성형, 코깅공정시 다수의 반복 가열과 냉각 등이 주요원인으로 판단된다. 이러한 성형결함을 예측하기 위한 방법으로 앞서 언급된 성형불안정기준(ξ)과 유한요소법(FEM)을 연계하는 방법이 활용될 수 있다. Fig. 9 는 실제 코깅공정에서 발생된 표면균열과 성형불안정기준에 의해 예측된 결과를 비교한 것으로 예측결과는 대부분 표면에 성형불안정성이 집중되는 것으로 평가되었고, 실제의 경우도 표면에 균열이 발생되고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 표면균열은 다이와 소재간의 온도차이에 기인한 내외부 소성변형 불균일이 원인인 것으로 이에 대한 대책이 코깅공정시 요구된다.

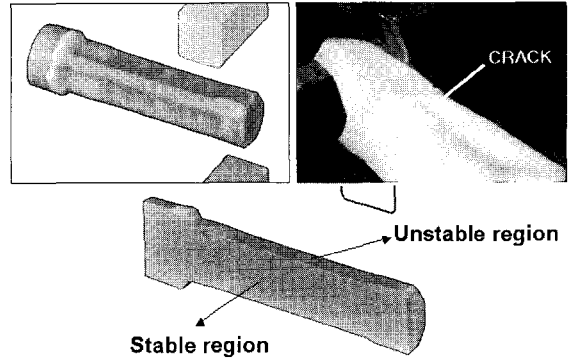


Fig. 9 Comparison of experiment and prediction of the surface crack for the cogged Alloy 718 ingot

그 밖에 고려되어야 할 성형결함예측방법으로 연성과파괴개념을 도입한 기공생성 및 성장모델을 들 수 있다. 이에 대한 모델들은 상당히 많은 연구가 진행되어 왔으며, 이러한 모델중 가장 일반적으로 사용하는 모델은 기공크기가 임계치에 도달하면 파괴가 발생한다는 기공성장이론을 기초로 한 수정 Cockcroft-Latham 모델⁽¹⁸⁾로서 다음과 같은 식에 의해 파괴기준을 정의하게 된다.

$$\int_0^{\epsilon_f} \left(\frac{\sigma^*}{\sigma} \right) d\bar{\epsilon} = C \quad (7)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형량, σ^* 는 최대인장응력, ϵ_f 는 파괴변형량을 의미하며, 상수 C는 파괴에 대한 임계값을 나타낸다.

한편, 앞서 언급된 재결정모델식은 FE code 와 연계하여 코킹공정에 대한 결정립 변화를 예측하는데 활용할 수 있으며, Fig. 10 은 코킹공정의 1 pass 후 부위별 조직변화를 예측한 것으로 표면에는 거의 재결정이 발생하지 않아 원소재 조직이 그대로 유지되나 중심부의 경우 재결정이 시작되고 있다. 결국, 이러한 결정립 예측모델은 코킹공정설계에서 상당히 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

4. Alloy 718 빌렛제조의 실례

최근 국내에서 개발하고자 하는 고품위 Alloy 718빌렛은 566°C이상의 증기온도에서 246kgf/cm² 증기압으로 운용되고 있는 초초임계압 화력발전소의 Stud bolt에 적용을 목표로 하고 있다. Stud bolt 설계시 선진 엔진제작사인 GE사에서 요구되는 기계적 특성치로서 경도, 상온 및 고온인장특성, 649°C에서의 응력파단특성 등에 대한 엄격한 요구규격을 제시하고 있으며, 초음파 탐상시험(UT)을 통한 미세 균열 등을 포함한 결함에 대하여 엄격히 규제하고 있는 실정이다. 빌렛의 최종 결정입도의 경우 ASTM No. 5이상의 결정립도를 요구하고 있으며, 부분적인 ASTM No. 3정도 크기의 Isolated grain이 있을 경우에는 주변 결정입도가

ASTM No. 5이상의 미세한 결정입도를 나타낼 때에만 그 존재를 허용하는 등 엄격한 품질관리가 요구된다. 이러한 요구특성을 얻기 위해서는 원소재 관리와 재용해 공정관리를 통한 합금성분 관리와 함께 코킹공정을 통한 결정립크기 및 분포관리가 상당히 중요하다. Fig. 11은 지금 현재 국산화를 추진하고 있는 고품위 Alloy 718 빌렛의 제조공정을 도식적으로 나타낸 것이다. 먼저, 용해 및 재용해공정에 앞서 Alloy 718에 대한 수입소재 및 GE사의 규정값을 검토하고 기계적특성에 영향을 미치는 각 원소의 역할을 감안한 목표성분을 선정하게 된다. 즉, 크리프 파단강도를 높이기 위해 고용강화에 효과적인 Mo 등을 첨가하고 Mn의 함량을

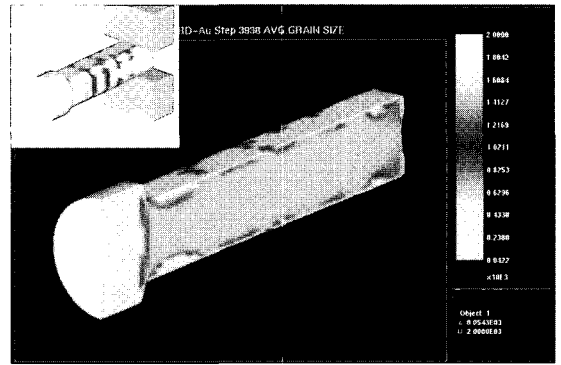


Fig. 10 Grain size prediction for actual cogging process of cast Alloy 718

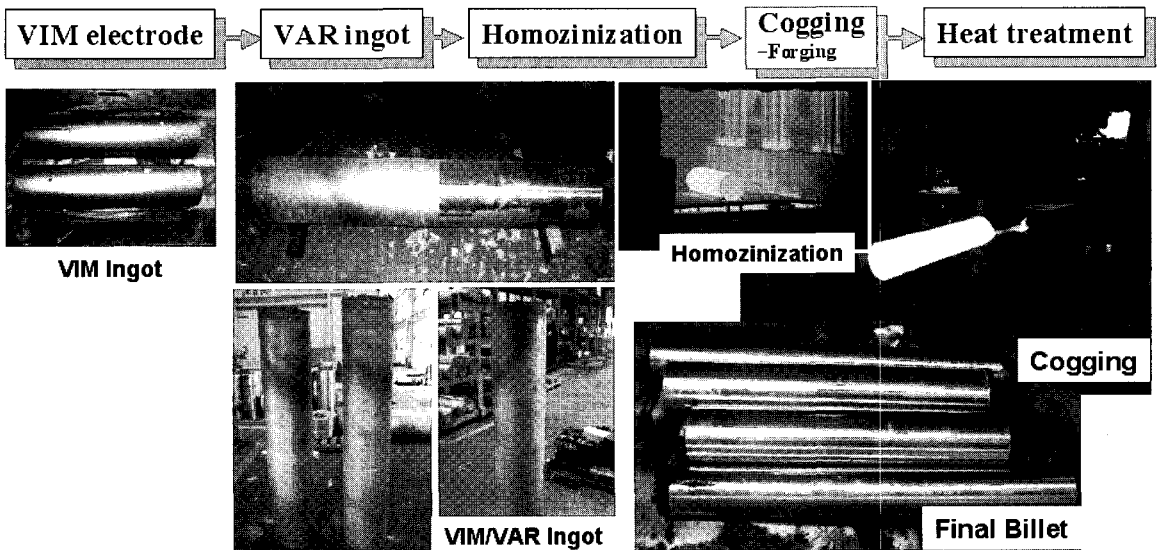


Fig. 11 Schematic illustration of the high-quality Alloy 718 billet making process

감소시켜며 석출경화효과를 내기 위해 V, Nb, Ti, Al, Ta, Co 등을 첨가한다. 응력이완특성의 향상을 위해서는 γ' 과 γ'' 등의 강화상등을 생성 시켜야 하며, 이러한 석출상의 생성에는 Ti, Al, Nb 등이 중요한 역할을 담당한다. 여기서, 고온특성과 재용해시 편석관리의 용이성을 감안하여 (Nb+Ta)의 합이 4.80~5.40 wt.% 범위로 조절하고, 1wt.% Ti 와 0.5wt.%Al 을 함유토록 하며, 미량원소인 Bi, Pb, Se, Ag, Sn 등을 총 100ppm 이하로 관리토록 하는 것이 잉고트의 청정도를 위해서 중요하다.

용해와 재용해공정은 개발규격에 합당하도록 합금성분관리와 함께 미세 조성편석을 최소화하도록 설계되어야 하며, VIM/ESR/VAR 및 VIM/VAR/VAR 공정을 거친 직경 300mm급 Stud Bolt용 Alloy 718 잉고트를 제조하였다. 고청정Alloy 718 잉고트는 코킹공정에 앞서 1100°C ~1150°C 온도구간에서 60시간의 균질화 처리를 거치게 되는데 이때 수지상간에 존재하는 조성편석들이 상당부분 해소되는 것으로 관찰되었다. 그 후 빌렛의 품질을 결정하는 코킹공정을 거치게 되며, 이 경우 재가열과 표면결함을 최소화하고, 균일한 조직을 얻기 위한 조건을 도출하기 위해 전산모사기술을 활용한다. 한편, 코킹공정에서 잉고트 가열시 Laves 상에 의한 Incipient 용융현상을 고려하여 1100°C~1150°C 사이의 온도구간에서 엄격한 온도관리가 이루어 져야 하며, 가열된 잉고트의 이송시간을 최소화하는 것이 중요한 문제이다. 지금 현재 개발된 Alloy 718 빌렛은 지름 150mm급으로, 많은 시행착오를 거쳐 ASTM no.7~8정도의 미세한 결정립을 얻는데 성공한 상태이며, 향후 균일한 결정립분포 및 특성향상을 위한 코킹 및 소성가공기술의 개발과 함께 열처리기술 등에서 꾸준히 연구되어야 할 것이다.

5. 결론 및 향후 전망

지금까지 초내열합금 Alloy 718 빌렛제조와 관련된 모합금 VIM 용해 및 VAR 재용해기술, 단조 등에 의한 잉고트 파쇄공정(코킹공정) 및 전산모사를 이용한 설계기술, 조직예측 및 평가기술, 비파괴 검사를 포함한 결함 및 특성평가기술 등 세부기술들을 검토하였다. 이러한 세부기술들은 현재 개발중인 화력발전용 Stud Bolt 에 국한되는 기술이 아니라 산업용 가스터빈 엔진, 선박용 디젤 엔진 및 민항기 엔진용 주요부품과 열교환기, 반

응용기, 원자력 분야 내식성소재, 고강도 체결 부품 및 단조용 금형 등 민수산업분야와 군수용 추진기관 부품에 사용되는 다양한 조성의 여타 니켈합금 빌렛제조에도 적용이 가능할 것으로 예상된다. 또한 일부기술은 고강도 주조용 초내열합금의 모합금 제조에도 활용이 가능하며, 단조 및 주조용 초내열합금 용해와 빌렛 제조기술, 결함분석 및 신뢰성 제고 기술 확립으로 에너지 및 항공 우주 산업을 지원할 수 있는 기술 경쟁력 확보가 가능할 것이다. 그밖에 현재 전량 수입에 의존하고 있는 추진기관용 초내열합금의 국산화로 전량 수입대체가 기대되며, 에너지 및 항공 우주 산업용 부품 제조에 활용할 수 있는 기반구축으로 국제 경쟁력 강화에 기여할 수 있을 것으로 전망된다.

후 기

본 연구개발기술에 대한 소개는 민군겸용기술사업과 함께 2003년 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행된 결과이며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) R. A. Sprague and S. J. Friesen, 1986, JOM, p. 24.
- (2) R. L. Kennedy, R. M. Forbes Jones and R.M. Davis, 1996, Vacuum, 47(6-8), p. 819.
- (3) M. J. Weis, M. C. Mataya, S. W. Thompson and D. K. Matlock, 1989, in Superalloy 718,(ed. E.A. Loria), TMS, p. 135.
- (4) 염종택, 최상욱, 박노광, 이종수, 2004, 대한금속재료학회 추계학술대회, p. 7.
- (5) C. A. Dandre, S. M. Roberts, R. W. Evans and R.C. Reed, 2000, Mater. Sci. Technol., 16, p. 14.
- (6) S.C. Medeiros, Y.V.R.K. Prasad, W.G. Frazier and R. Srinivasan, 2000, Mater. Sci. Eng., A293, p. 198.
- (7) 나영상, 염종택, 박노광, 2002, 대한금속재료학회지, 제 40권, 제 2호, p. 155.
- (8) Y. V. R. K. Prasad, H. L. Gegel, S. M. Doraiavelu, J. C. Malas, J. T. Morgan, K. A. Lark and D. R. Barker, 1984, Metall. Trans. A, Vol. 15A, October, p. 1883.
- (9) H. Ziegler, 1965, "Progress in Solid Mechanics", (ed. I. N. Sneddon and R. Hill), Vol. 4, New York, Wiley, p. 91.
- (10) Y. V. R. K. Prasad and S. Sasidhara, 1997, "Hot

- Working Guide-A Compendium of Processing Maps", ASM International.
- (11) Y.V.R.K. Prasad, 1990, *Indian J. Technol.*, 28, p. 435.
- (12) D. Huang, W. T. Wu, D. Lambert and S. L. Semiatin, 2001, in *Microstructure Modeling and Prediction during Thermomechanical Processing*, (ed. R. Srinivasan, S.L. Semiatin, A. Beaudoin, S. Fox and Z. Jin), TMS, p. 137.
- (13) Y. S. Na, J. T. Yeom and N. K. Park, 2003, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 141(3), p. 337.
- (14) Y. S. Na, J. T. Yeom, N. K. Park and J. Y. Lee, 2003, *Met. Mater. Int.*, 9(1), p. 15.
- (15) S. L. Semiatin, E. W. Collings, V. E. Wood and T. Altan, 1987, *J. Eng. Industry*, 109, p. 49.
- (16) Z. M. Hu, J. W. Brooks and T. A. Dean, 1998, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 212, Part C, p. 485.
- (17) 염종택, 임정숙, 박노광, 2003, *한국소성가공학회지*, 제 12 권, 제 4 호, p. 370.
- (18) S. I. Oh, C. C. Chen and S. Kobayashi, 1979, *Trans. ASME, J. Eng. Industry*, 101, p. 36.