

가스터빈용 초내열합금 디스크의 단조



염종택

(KIMM 재료기술연구부)

- '90 - '94 홍익대 금속공학과 (학사)
- '94 - '96 홍익대학교 대학원 금속재료공학과 (석사)
- '96 - 현재 한국기계연구원 연구원



박노광

(KIMM 재료기술연구부)

- '73 - '77 연세대 금속공학과 (학사)
- '77 - '79 한국과학원 재료공학과 (석사)
- '83 - '87 호주 Monash University (박사)
- '89 - '90 미국 The University of Michigan(연구원)
- '79 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서론

가스터빈은 산업용, 발전용, 선박용, 항공기 제트엔진용 등 각종 산업분야의 동력원으로 중요한 역할을 담당하고 있으며, 최근 환경문제와 관련되어 환경대책비용이 상대적으로 높은 원자력발전 혹은 기존 화력발전의 대응으로서 그 중요성은 점차 확대되고 있고 국내에서도 가스터빈발전기의 보급이 점차 늘어나고 있는 실정이다. 특히 최근 세계적으로 항공기산업의 반등과 함께 관련부품산업은 호황을 누리고 있다. 가스터빈 부품중 회전체부품은 고온 고응력에 견뎌야 하기 때문에 니켈합금, 티타늄합금 등과 같은 내열금속재료로 이루어져 있고, 그 제조로는 터빈블레이드 등과 같은 초고온 소재를 빼고는 대부분 단조등 소성가공공정에 의해 제조되고 있다.^[1] 제조기술관련하여 국내 현황을 보면 아직 가스터빈 산업이 활성화되지 않아 회전체와 같은 핵심부품은 전량 수입에 의존하며, 단조업체수는 100여 군데가 넘지만 대부분 철합금단조를 주종으로 하고 있고 내열합금단조에 대한 국내 기술기반은 극히 미흡한 실정이다. 그러나 최근 정부주도의 KFP사업, 산업용 혹은 발전용 가스터빈개발, 중형항공기사업 등 대형사업이 추진되며 부품제조분야에 대한 업계의 관심이 증대되고 단조기술 수요는 증대될 예정이다.

가스터빈 디스크는 터빈블레이드가 부착되는 rim area와 bore area로 나누어지며, rim부의 경우 블레이드의 pull stress에 의해 radial stress를 받으나 그 크기는 크지않은 대신에 상대적으로 고온에 노출되어 고온크리프강도가 요구되며,

bore부는 상대적으로 큰 회전체 질량의 pull stress에 의한 높은 radial stress를 받는 대신에 비교적 저온에 노출된다. 또한 시동정지에 따른 transient temperature variation에 의해 생기는 열응력도 부위에 따라 각기 다르게 받게된다.^[2] 이처럼 디스크의 각부위별로 각기 다른 기계적 성질이 요구되고 있으며, 이를 제조공정에 반영하여 최적으로 특성을 발현하기 위해서는 체계적인 금형설계 및 단조공정설계가 필요하다. 선진국에서는 이미 CAD/CAM을 이용한 정밀단조 기술을 도입하여 부품단조 후, 후속의 기계가공이 거의 없는 Near-net-shape 제품을 생산하고 있으며, 미국의 ALCOA, Wyman-Gordon, 영국의 Doncaster 등 우수단조회사에서는 유한요소 프로그램을 이용한 단조시뮬레이션을 이용한 정밀단조기술을 상용하고 있다.^[3] 본 소고에서는 가스터빈용 초내열합금 디스크의 공정 및 금형설계 방법과 열간단조의 결정립분포예측시스템의 적용사례, 제품 제작과정 등에 대해서 소개하고자 한다.

2. 주요 관련기술의 검토

2.1 정밀 성형 기술

니켈계 초내열합금의 단조법으로는 크게보아 일반단조, 고온단조, 등온단조 등으로 구분지을 수 있는데, 이들 공정의 주요 차이점은 금형 온도와 소재/금형간의 접촉시간을 들 수 있다. 일반단조의 경우 금형온도는 대략 300°C이하에 머무는데, 소재냉각에 의해 성형성은 현저히 낮아 near-net-shape 단조하기에 적합하지 않고 공정 관리가 용이하지 않다. 일반단조의 경우 대부분 다단계 공정으로 이루어지며, 단조기로는 주로 해머 또는 기계식 프레스가 이용되고 있다. 고온단조의 경우 금형온도를 600-1000°C로 가열함으로써 단조재 표면냉각 현상을 완화시킨다. 이에따라 단조기의 용량은 현저히 줄어들며 조직

등의 관리가 용이하게 된다. 한편 등온단조의 경우 금형온도를 단조재 온도로 가열하는 방법으로 정밀성형이 가능한데 이 경우 일반단조에 비하여 20-40%의 낮은 하중으로 단조가 가능하며 주로 유압식프레스를 이용하고 있다.

2.2 단조시뮬레이션

70년대에 slip-line법, 초동해석법(slap method)등을 이용하여 복잡한 형상의 단조품에 대한 성형을 해석한 바가 있다. 그러나 이들 해석법으로는 복잡한 금형내에서 일어나는 소재유동, 변형을 분포, 하중변화, 결합발생 등에 대한 예측이 매우 어렵다. 최근에는 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 단조도중 일어나는 재료의 소성변형을 손쉽게 해석할 수 있게 되었다. ABAQUS, MARC등과 같은 상용코드에 의해 비선형 해석방법으로 보다 실제적인 공정 및 금형설계를 시도할 수 있게 되었고, 소성가공 전용 프로그램인 DEFORM-2D 혹은 3D등이 출현하여 고변형률의 소성해석을 손쉽게 할 수 있게 되었다. 상용의 유한요소코드를 이용하여 소성가공공정을 해석하기 위해서는 정확한 성형조건과 가공재의 소성변형거동에 관한 자료가 필요한데 이들 자료는 압축 및 비틀림시험 등을 통해 얻을 수 있다. 한편 정확한 시뮬레이션을 위해서는 가공재와 금형간의 계면에서의 마찰 혹은 열전달에 대한 정량적인 데이터가 필요하다.

3. 디스크의 열간단조 공정 및 금형설계

단조공정 설계란 원소재로부터 어떤 변형과정을 거치면서 최종단조품을 성형할 때, 경제적으로 특성, 치수정밀도 등에 대한 품질시방을 만족시키며 최종제품을 생산하는 일련의 공정을 설계하는 것을 의미한다. 터빈 디스크는 소성가공성이 나쁘고 원소재가격이 비싼 초내열합금을

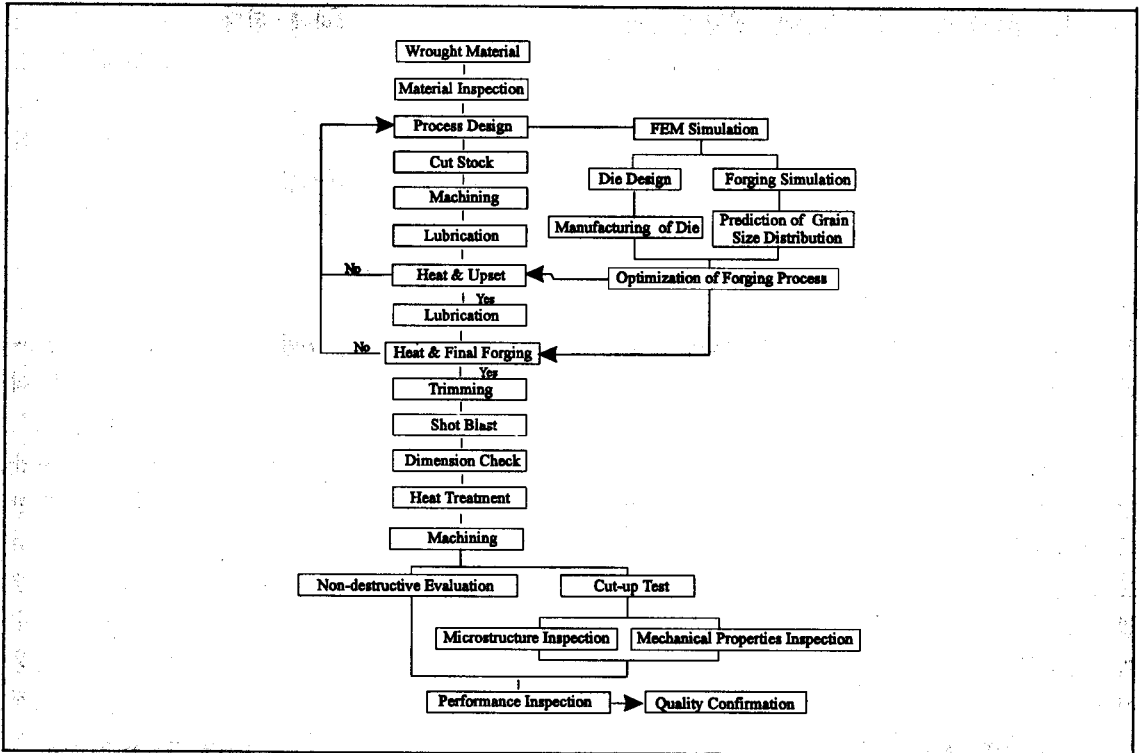


그림 1. 초내열합금 터빈디스크의 2단계 단조공정도

단조에 의해 비교적 복잡한 형상으로 제조하여야 하기 때문에 열간단조 또는 등온단조 등의 방법을 주로 이용한다. 열간단조시 금형마모 및 손실을 줄이기 위해서 몇 단계의 예비성형공정을 거치게 되면 제품단가는 올라가고 미세조직 및 기계적 성질을 조절하기가 상대적으로 어렵게 된다. 금형단가를 줄이고 최종제품의 특성을 조절하기 위해서는 소재의 손실과 기계가공의 비용이 증가하더라도 가공여유를 충분히 주어 단조를 수행한다. 일반적으로 단조품 가격은 50%이상을 소재단가에 의존하며 단조시 플래쉬 등으로 인해 25%이상의 소재가 손실된다.^[4-5] 최근 단조산업은 소재비 상승, 열악한 작업환경에 따른 숙련기술자의 부족 및 다품종 소량생산등의 문제를 극복하기 위하여, 생산성향상, 소재손실의 최소화, 예비성형횟수의 감소와 후처리 공정의 최소화를 통한 비용절감에 주력하고 있

며, 이를 위해서 체계적인 공정 및 금형설계가 필요하다.^[6] 그림 1.은 2단계 단조공정에 의한 초내열합금 터빈디스크 제조공정의 모식도를 나타낸 것으로 원소재의 미세조직 분석 후 이를 토대로 공정설계가 이루어 짐을 알수 있다.

3.1 단조공정 설계변수의 영향

열간 혹은 등온단조에 의해 니켈합금과 같은 내열합금 디스크를 제조할 경우 원소재의 특성과 유동응력, 단조장비, 단조기의 하중용량과 속도제어, 금형의 소재와 설계, 온도제어 등의 기술적, 경제적 요소들을 잘 고려하여야 한다. 특히 등온단조는 적절한 가열장치를 사용하여 소재와 금형의 온도를 거의 일정하게 유지하면서 성형하는 공정으로서, 생산성은 떨어지지만 단

조품의 조직 및 기계적 성질을 관리하는 데 있어서 열간단조공정보다 개선된 것이라 할 수 있다. 국내에서는 등온단조를 거의 행하고 있지는 않지만, 선진국에서는 니켈합금과 티타늄합금 등의 부품단조시 재래적인 밀폐형 단조공정 또는 기계가공에 비해 균질의 정형부품을 생산할 수 있기 때문에 가스터빈 부품과 같은 소량의 고가품을 생산하는 데 있어서 제품단가를 줄일 수 있는 공정으로 이용되고 있다^[7] 터빈 및 엔진디스크의 기하학적 형상은 축대칭으로 잘 정의되어 있으나, 이를 열간 또는 등온단조를 통하여 성형할 경우에 1회의 성형공정으로 단면적 감소율 80%이상을 달성해야 하기 때문에 소재 유동에 대한 예측이 쉽지 않고, cavity, folding 등과 같은 단조결함이 형성될 가능성이 높다.

3.2 유한요소해석에 의한 공정 및 금형설계

터빈디스크와 같은 고도의 정형성을 요구는 부품의 경우는 체계적인 공정 및 금형설계가 필수적이며, 이를 위한 방법으로 유한요소법에 의한 단조공정설계를 생각할 수 있다. 터빈 및 엔진 디스크의 열간 및 등온단조 공정설계에 유한요소법을 활용함으로써 시행착오를 줄여 공정개발 시간을 줄이며 제품품질도 향상시킬 수 있다.

3.2.1. 강소성 유한요소해석의 수식화

점·소성 및 강소성 유한요소법의 수식화는 이미 여러 문헌들을 통해서 잘 알려져 있다^[7-10] 체적이 V이고 표면력(traction) F_i 가 정의된 표면 S_F 와 속도 u가 정의된 나머지 표면 S_u 로 둘러싸인 물체의 지배방정식(governing equation)은 관성효과(inertial effect)와 체적력(body force)을 무시하면 다음과 같다.

(1) 평형방정식 (equilibrium equation)

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad [1]$$

(2) 변형률속도-속도 관계식 (compatibility equation)

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad [2]$$

(3) 구성방정식 (constitutive equation)

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad [3]$$

여기서,

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon'_{ij} \epsilon'_{ij}} \quad [4]$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \quad [5]$$

(4) 비압축성조건 (incompressibility condition)

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_3 = \dot{\epsilon}_{kk} = 0 \quad [6]$$

(5) 경계조건 (boundary condition)

$$u_i = \bar{u}_i \quad : S_u \text{ 상에서} \quad [7]$$

$$\sigma_{ij} n_j = F_i \quad : S_F \text{ 상에서} \quad [8]$$

강소성재료에 대한 범함수(functional) π 는 다음과 같다.

$$\pi = \int_V \bar{\sigma} \bar{\epsilon} dV - \int_{S_F} F_i u_i dS \quad [9]$$

적합성방정식, 비압축성조건 및 속도경계조건을 만족하는 가용속도장(admissible velocity field) v_i 는 범함수 π 의 일차변분 $\delta\pi$ 가 영이 된다는 성질로부터 구할 수 있다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV - \quad [10]$$

$$\int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0$$

비압축성조건을 만족 시키기 위하여 벌칙함수 또는 상수(penalty function or constant)를 도입하면 다음과 같은 변분식을 얻을 수 있다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} F_i \delta u_i dS = 0 \quad [11]$$

여기서 K 는 벌칙함수로서 매우 큰 양수이며, δu_i 는 임의의 변분량이고, $\delta \bar{\epsilon}$ 와 $\delta \dot{\epsilon}_v$ 는 δu_i 로부터 유도되는 변분량이다. 식[11]은 일반적인 유한요소 분할화 과정을 거치면, 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 Newton-Raphson법을 이용하여 해를 구하며, 초기속도장은 직접반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다. 또한 해석시 필수적으로 요구되는 유동응력식은 소재의 고온압축 및 비틀림 실험을 통해 얻어진 실험치를 이용하게 된다.

3.2.2. 디스크 초기 단조금형 설계

단조금형의 설계는 설계변수들을 고려하여 그림 2와 같은 과정을 거쳐서 이루어진다. 소재 및 부품의 체적계산은 그림 3과 같은 3차원 CAD프로그램을 사용하여 계산된다.

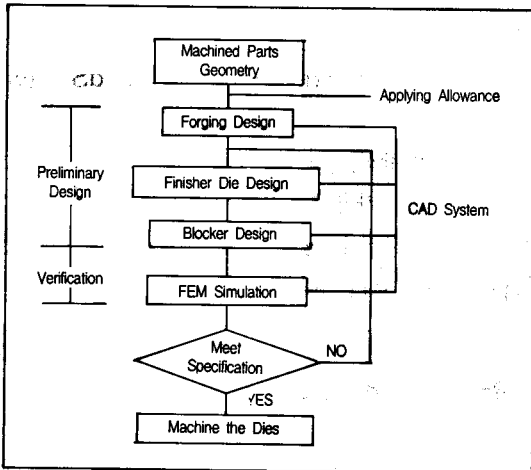


그림 2. 단조금형설계를 위한 CAD/CAM 공정도

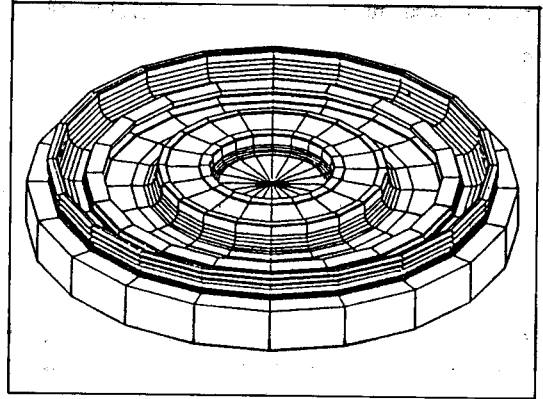


그림 3. 3차원 CAD프로그램을 이용하여 체적계산된 디스크의 형상

표 1. 니켈합금의 대표적인 설계변수값

Field	Value	Note
Machining allowance	1.0 mm	nickel alloy
Draft angle	7 deg	
Die wear allowance	0.004	nickel alloy
Mismatch allowance	0.787	section area 4247 mm ²

한 부품을 단조공정으로 생산하기 위한 첫번째 과정으로서 최종 기계가공후 부품도면으로부터 단조품 도면을 만드는 것이 필요하다. 기계가공 후의 최종제품은 일반적으로 구멍, 홈, 예리한 코너나 필렛 등을 갖고 있다. 따라서 최종 기계가공 후의 도면을 바탕으로 적절한 가공여유를 주어 단조품 도면을 작성한다. 이때 재료별로 금형마모, 금형두께, 드래프트 각도, 가공여유 등의 설계변수들을 결정하며, 표 1에 니켈합금의 설계변수값들을 나타내었다. 이러한 값들의 적용과정은 그림 4와 같으며 이를 통하여 나온 단면은 그림 5.(a)와 같다.

초기설계에서 구한 단면을 성형하기에는 언더컷과 같은 여러가지 성형상 어려움이 발생할 수 있으므로 수정해서 사용한다. 또한 원하는 형상과 특성의 원소재를 구입하기는 어려운 일이기

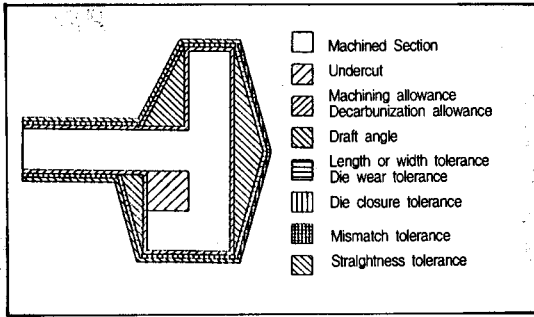


그림 4. 허용오차를 고려한 금형형상

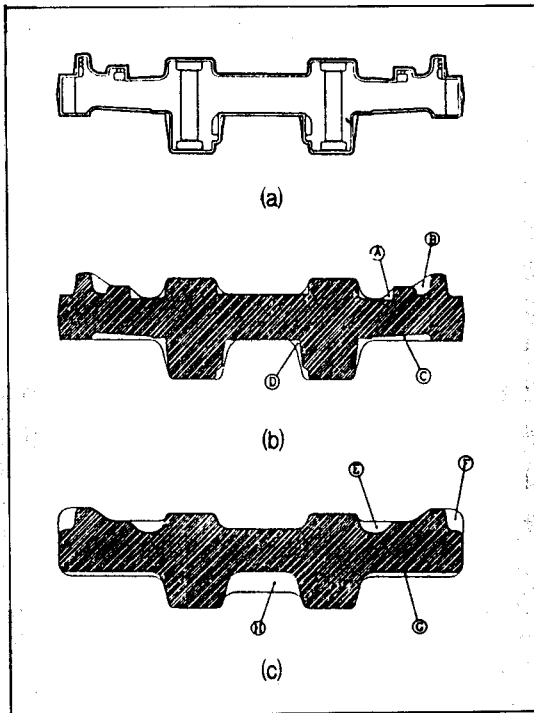


그림 5. 디스크 금형설계의 과정 (a) 초기 설계 금형 (b),(c) 여유체적의 계산과정

때문에 단면에서 계산된 체적과 빌렛의 체적차이를 효과적으로 배분함으로써 단조의 용이성과 변형률의 균일화를 피하여야 한다. 이러한 과정을 그림 5.(b), (c)에 나타내었다. 그림 5.(b)는 공차를 적용하여 나온 단면으로, B부분은 두개의 리브사이에서 미충진이 발생할 소지가 많으므로 단을 주어서 단순화 시켰고, C부분은 연속

적으로 형상이 변하여서 성형이 어려우므로 수평으로 하였으며, D부분은 계단식으로 되어있어 이부분도 성형을 용이하게 바꿨다. 두번째의 상태에서 약간의 여유체적이 있으므로 추가로 수정을 하였는데 계단식으로 되어있는 E부분을 평형으로 하였으며 단조품의 바깥끝부분에 있는 F형상도 성형이 어려우므로 단순화시켰다. 중심 부위에 웹이 얇으면 좋지 않으므로 H부분을 낮추었고, 조금 남은 부피는 G를 낮추는데 사용하였다.

3.2.3 초내열합금 디스크의 2단계 단조공정 및 금형설계

실제작업과 관련하여 기본단면상태를 얻기 위해서 성형을 위해 빌렛을 올려 놓았을 때 안정성이 결여되는 문제가 발생하게 되며, 이러한 경우 단조금형의 마모와 적용하중의 최소화를 위해서 최종금형단조 전에 평다이 업세팅을 행한다. 업세팅 단조시 발생될 수 있는 표면크랙을 방지하기 위해 단조시물레이션에 의해 소재의 응력 및 소재 및 금형의 손상정도를 계산하고, 단조기의 용량을 고려하여 소재의 손상이 발생되지 않은 범위에서 원주방향으로 많이 퍼지도록 예비성형공정을 설계하게 된다. 업세팅

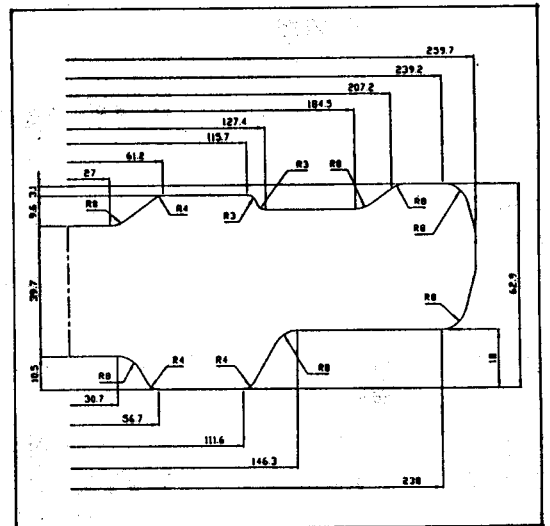


그림 6. 최적화된 디스크 단조금형 형상

공정설계가 완료되면 기본금형단면을 토대로 최종 단조디스크의 형상을 단조해석하게 되며, 이때 미충진등과 같은 문제점이 발생할 수 있기 때문에 금형캐비티의 각도를 여러번 변경시키고, 체적일정 조건을 만족시키기 위하여 체적계산도 여러차례 행함으로서 그림 6.와 같은 최적화된 금형이 설계된다.

유한요소법을 이용한 2단계 디스크 단조공정 과정을 그림 7.에 요약하여 나타내었다. 이러한 단조 공정 및 금형설계 과정에서 금속유동거동과 성형변형에 요구되는 하중 및 변형의 균일성 등이 동시에 예측할 수 있다.

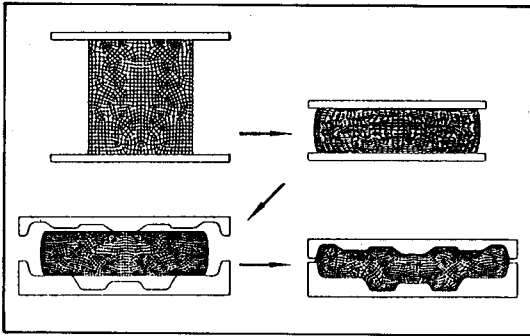


그림 7. 유한요소해석에 의한 디스크의 2단계 단조공정

4. 결정립 분석 기법

열간단조에 의해 디스크를 제조할 경우, 재결정 온도 이상의 고온에서 빠른 변형속도($\dot{\epsilon}$)로 진행되기 때문에 온간단조 혹은 냉간단조에 비하여 조직 변화가 심하게 발생된다. 조직관리를 통하여 단조품의 특성을 최적화하기 위해서는 고온변형시 소재의 조직변화를 예측하는 것이 선행되어야 한다. 고온변형시 조직변화, 특히 결정립 크기의 변화는 동적회복과 동적재결정에 의한 동적연화에 의해 주로 결정되며, 냉각시 혹은 짧은 시간의 유지시 발생하는 준동적재결정에 의해서도 영향을 받는다.^[8] 동적재결정은 변형으로 인한 불안정한 상태의 내부에너지가

새로운 결정립을 생성하면서 안정한 상태로 전이되는 현상으로 각 부위별로 소성변형중 발생하는 재결정양상은 변형률, 변형속도, 온도등과 같은 소성변형 조건에 따라 결정되며, 이러한 소성변형 조건을 예측하기 위한 방법으로 유한요소해석법(Finite Element Method)과 재결정모델식을 연계한 방법이 많이 이용되고 있다.^[9-10]

4.1 디스크의 결정립분포 해석을 위한 모델링

재결정 온도 이상의 온도에서 소성변형중에 변화하는 결정립 크기 분포를 예측하기 위해서는 국부적인 온도, 변형률, 변형속도등과 같은 외부요인 뿐아니라 모상내와 결정립계에 존재하는 석출상등과 같은 금속조직에 관한 고찰이 선행되어야 한다. 일반적으로 고온변형거동에서 관찰되는 가공연화 현상은 불균일 소성변형 혹은 압축과단 등과 같이 국부적으로 소성변형되거나 파단되는 경우를 제외하고는 대체로 동적재결정에 기인한다.^[11] 결국, 재결정과 관련된 임계변형률(ϵ_c), 재결정분율, 결정립성장 등에 대한 식들을 이용하여 열간단조시 소재의 결정립분포를 예측할 수 있다.

4.1.1 임계변형률의 결정

임계변형률의 결정은 주로 압축시험이나 비틀림시험에서 얻어진 유동곡선을 토대로 다른 온도와 변형속도에 따른 가공경화 지수($\theta = \partial\sigma/\partial\epsilon$)와 σ 의 관계를 그래프화하여 결정된다. 임계변형률은 소재에 따라 다소 차이는 있으나 보통 최대변형률과 비교시 $\epsilon_c \approx 0.8 \epsilon_{max}$ 의 관계를 가진다. 임계변형률은 변형속도와 온도의 함수로 정의되는 Zener-Holloman 인자 ($Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$)와 초기결정립크기, 석출상등과 같은 여러 변수에 따라 결정되며, 식[12]와 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon_C = A \times d_0^a \times Z^b \quad [12]$$

여기서 A는 상수이고 d_0 는 초기결정립크기, Z는 Zener-Holloman 인자이며 a, b의 지수값은 소재의 유동곡선에 따라 결정되는 상수이다.

4.1.2 초내열합금의 금속학적 모델링

동적재결정에 대한 금속학적 모델식은 합금종류에 따라 다양하게 제안되고 있다.^[12-14] 실제 열간단조시 발생하는 조직변화는 단조중에 발생

되는 동적재결정과 유지 및 냉각중에 발생하는 준동적재결정에 의해서 일어난다. 이러한 동적 및 정적 (혹은 준동적) 재결정의 분율은 Avrami-type^[15] 과 유사한 속도식에 의해서 수식화 할 수 있는 데, 초내열합금에 적용된 금속학적 모델식들을 표 2.에 요약하여 나타내었다.

표 2.에서 제시된 식들의 상수값은 실험적으로 얻어짐이 가능하며, 석출상의 고용온도에 따라 상수값이 달라지게 된다.

표 2 초내열합금의 단조공정에 적용된 금속학적 모델식

초내열합금의 금속학적 모델식	
동적재결정 모델	변수
$\epsilon_P = A \times d_0^a \times Z^b$	ϵ_P : 최대변형량
$\epsilon_C = A' \epsilon_P$	ϵ_C : 임계변형량
$d_{dyn} = BZ^{-n}$	d_0 : 초기결정립
$Z = \epsilon \exp(Q/RT)$	Z : Zener-Holloman 인자
$X_{dyn} = 1 - \exp(-0.693(\epsilon/\epsilon_{0.5})^m)$	d_{dyn} : 동적재결정된 결정립
$\epsilon_{0.5} = C \cdot d_0^c \cdot Z^d$	ϵ : 변형속도
정적 및 준동적 재결정 모델	Q : 변형 활성화에너지(동적재결정시)
$d_s = D \cdot d_0^e \cdot \epsilon^{-f} \cdot Z^{-g}$	X_{dyn} : 동적재결정률
$X_s = 1 - \exp(-0.693(t/t_{0.5})^n)$	$\epsilon_{0.5}$: 50% 재결정시점의 변형량
$t_{0.5} = E \cdot d_0^h \cdot \epsilon^{-i} \cdot \epsilon^{-j} \exp(Q_s/RT)$	d_s : 정적 및 준동적재결정된 결정립
결정립성장식	X_s : 정적 재결정률
$d^k = d_0^k + Ft \exp(-Q_g/RT)$	$t_{0.5}$: 50% 재결정시점의 시간
평균결정립 모델	Q_s : 변형 활성화에너지 (정적재결정시)
$D_{Av.} = D_{unrex} \cdot (1-V_f) + D_{rex} \cdot V_f$	Q_g : 변형 활성화에너지 (결정립성장시)
	$D_{AV.}$: 평균결정립크기
	D_{unrex} : 재결정되지 않은 결정립
	D_{rex} : 재결정된 결정립크기
	V_f : 재결정 분률

4.2 결정립 예측시스템 적용 사례

결정립예측 시스템을 통해 얻어지는 해석결과는 크게 두가지를 생각할 수 있다. 즉, 첫째는 디스크의 각부위별 미시구조적 변화 즉, 완전재결정, 부분재결정, 미재결정영역을 예측하는 것이며, 둘째는 단조품의 각 부위별 평균결정립크기를 예측하는 것이다. 그림 8은 열간단조시 소재의 결정립분포를 예측하기 위한 결정립 해석 시스템을 도식적으로 나타낸 도표이다. 압축시험에서 얻어진 유동곡선을 이용하여 구성방정식을 작성한 후 이 식에 의해 시뮬레이션을 수행한다. 단조해석은 열해석과 소성변형해석이 연계되며, 열해석의 경우 열전도 및 소성열을 고려하여 소재의 온도분포를 해석하게 된다. 변형해석의 경우 금형속도 및 소재의 변형에 의한 변형률과 변형속도분포를 얻고, 해석 결과와 압축시험에서 얻어진 재결정 모델링식을 기초로한

부프로그램을 이용하여 소재의 전체적인 결정립 분포를 예측하게 된다.

이러한 결정립해석 시스템을 단조공정에 이용하여 이 시스템의 적합성 여부를 판단하였다. 한국기계연구원 내열재료그룹팀에서 개발된 결정립예측시스템을 초내열합금 Alloy 718 디스크의 결정립해석에 적용한 결과를 그림 9-11에 나타내었다. 그림 9는 초내열합금 Alloy 718 디스크에 대하여 부위별 재결정분포 정도를 나타낸 것으로, 단조시의 변형률과 온도분포의 크기가 재결정정도에 상당한 영향을 미치고 있음을 잘보여주고 있다. 그림 10은 디스크의 각부위별 평균결정립크기를 단조시간에 따라 나타낸 것으로 재결정에 의해 결정립미세화가 발생하는 단조시간을 예측함이 가능하며, 최종단조품의 결정립분포를 예측할 수 있다. 또한 실제 디스크의 부위별 평균결정립크기와 해석결과가 잘 일치하고 있음을 그림 11에 제시하였다.

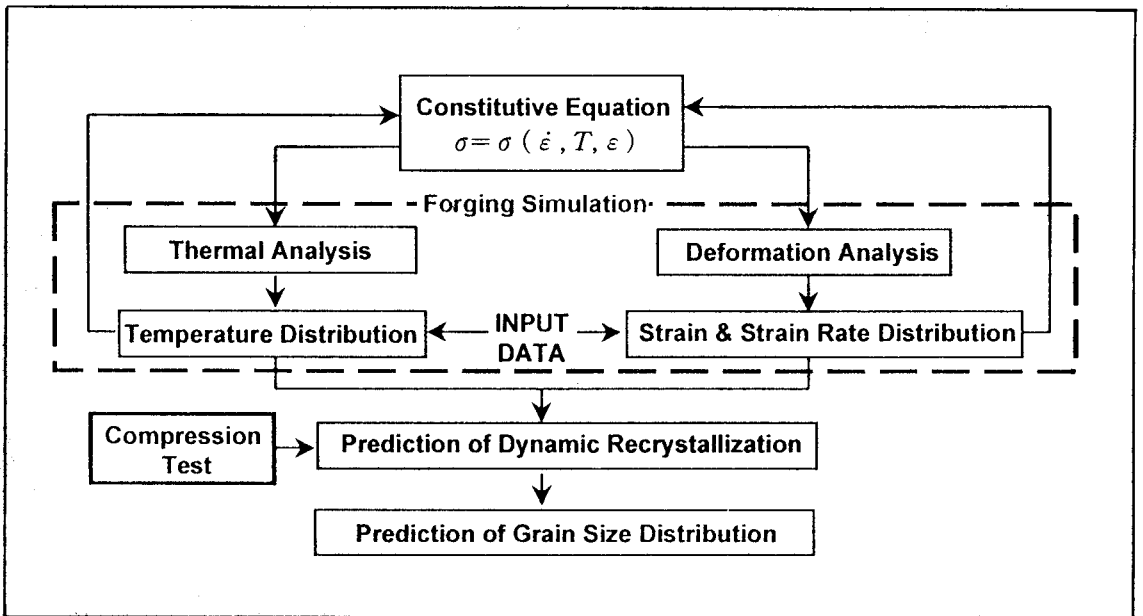


그림 8. 결정립예측 시스템의 모식도

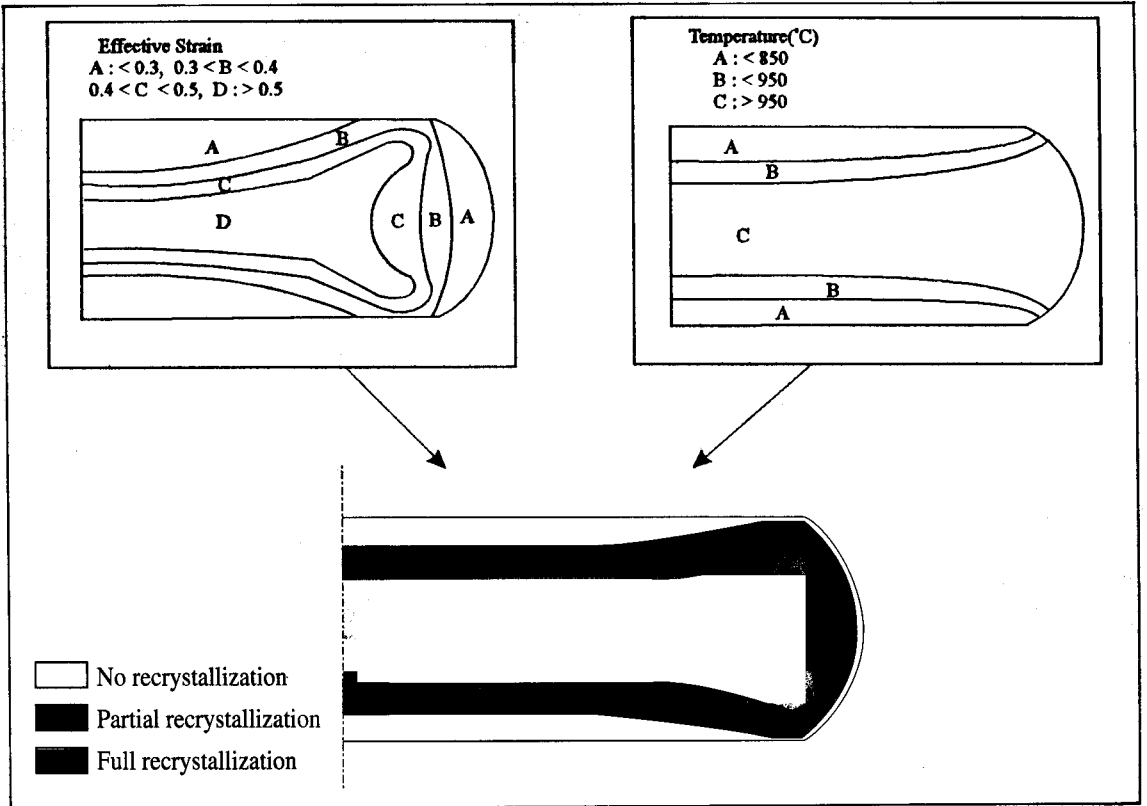


그림 9. 디스크의 부위별 온도, 변형률의 해석결과와 실제 단조된 디스크의 미세구조변화 비교

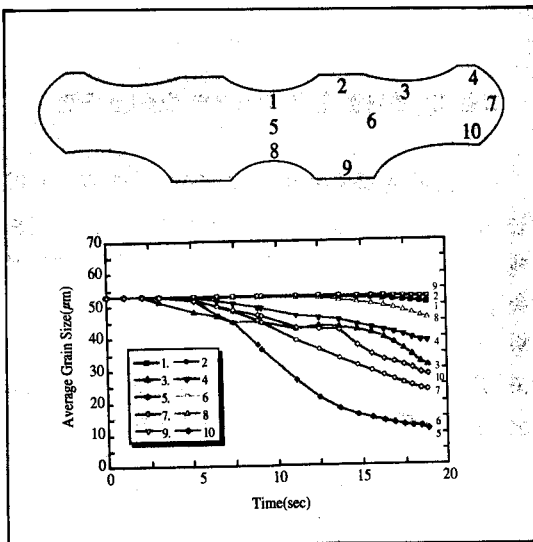


그림 10. 초내열합금 Alloy 718 디스크의 단조 공정시 각부위별 시간에 따른 평균결정립변화

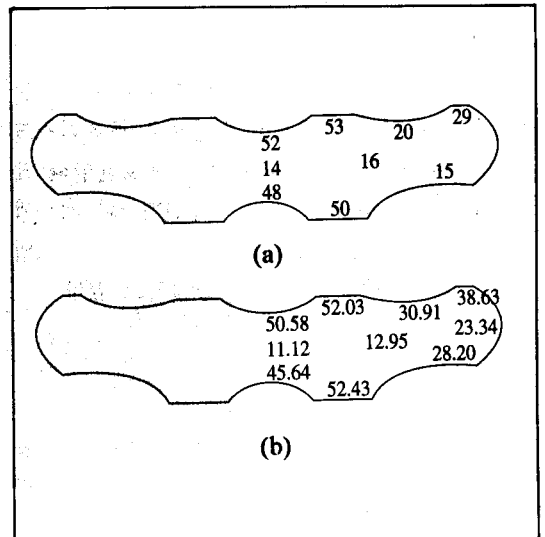


그림 11. 단조된 디스크의 각부위별 실제 평균 결정립크기와 해석모델결과와의 비교 (a) 실험결과 (b) 모델해석

5. 디스크의 평가기법

가스터빈 디스크와 같은 critical rotating component의 경우 안정성을 높이고 부품의 효과적인 수명관리를 위해서 단조품에 대한 파괴 및 비파괴 검사를 행한다. 파괴검사방법은 조직 검사, 성분분석, 기계적 특성시험등이고, 비파괴 검사방법은 형광침투검사(FPI), X-ray, eddy-current 및 초음파 탐상검사(Ultrasonic inspection, UT)를 들 수 있다.

5.1 비파괴 검사법

비파괴 검사법 중 가장 널리 사용되는 방법으로는 초음파 탐상법을 들 수 있으며, 내부결함 조사에 가장 많이 사용되고 있다. 초음파 탐상 검사의 POD(Probability of detection)를 높이기 위해서는 분해능과 소음이 적은 transducer의 개발과 couplant, scanning장비 등의 전자 장비를 개선하고, 작업자의 숙련도 제고가 필요하다. 현재 터빈 디스크 단조품의 초음파검사 기준은 #1FBH (1/64인치 flat bottom hole)의 25%까지 detect하는 것을 요구하고 있으며, 분말 가공 디스크의 일부 UT검사를 적용하고 있다. 그밖에 Eddy-current inspection은 표면부에 존재하는 결함을 조사하는데 유용한 방법으로 엔진디스크의 사용시 rim부위와 bore부위의 피로균열의 생성여부를 조사하는데 주로 사용된다. 이 검사법은 최근의 damage tolerant life analysis의 도입으로 인해 그 중요성이 점차 증대되고 있다.

5.2 파괴 검사법

단조품의 기계적 특성시험은 재료공정 개발 및 부품소재의 규격에 부합되는지 여부, 부품 수명예측 및 엔진 부품 상세 설계에 필요한 Database를 확보하기 위하여 행하여진다. 가스터빈 부품의 소재시험은 열팽창, 열전도도, 밀도 등과 같은 물리적 성질과 인장특성, 크리프 및 저/

고주기 피로시험등이 포함되며, 얻어진 데이터의 신뢰도에 따라 estimated, preliminary, released 및 part specific 데이터로 분류되어 터빈 부품의 설계, 수명예측, 제조공정 개선등의 여러 목적에 사용된다. 단조품의 기계적 특성시험은 각부위의 요구특성에 맞는 시험방법을 선택하여 시험하며, Cut-Up Diagram을 작성하여 위치별로 각기 다른 시험분석을 수행한다. 가스터빈용 디스크에 대한 Cut-Up Diagram의 예를 그림 12에 나타내었다.

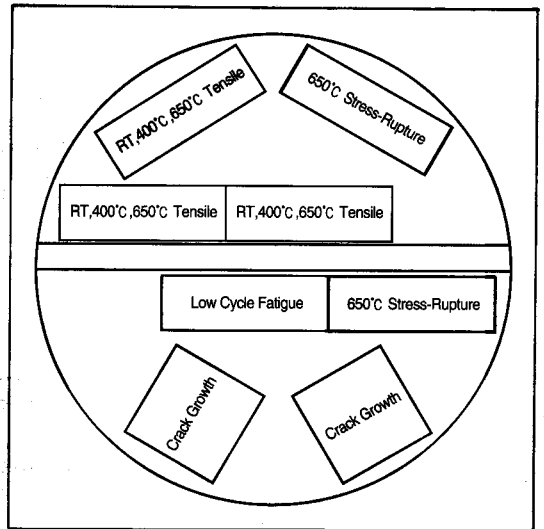


그림 12. 초내열 합금 디스크의 Cut-Up 도면

앞으로의 부품수명예측 및 수명 제한 부품관리 는 damage tolerance개념을 도입하고 있기 때문에 파괴역학 및 균열 전파속도를 이용한 수명예측등의 기법 개발이 중요하여 여러 가지 시험방법, 시험편 설계 및 데이터 해석방법등이 연구되고 있고, 특히 test automation 및 automatic data acquisition등에 많은 개선이 이루어지고 있다.

6. 가스터빈 디스크 제작의 실례

앞에서 언급된 단조공정 및 금형설계를 토대로 본란에서는 실제 소형가스터빈 디스크의 제

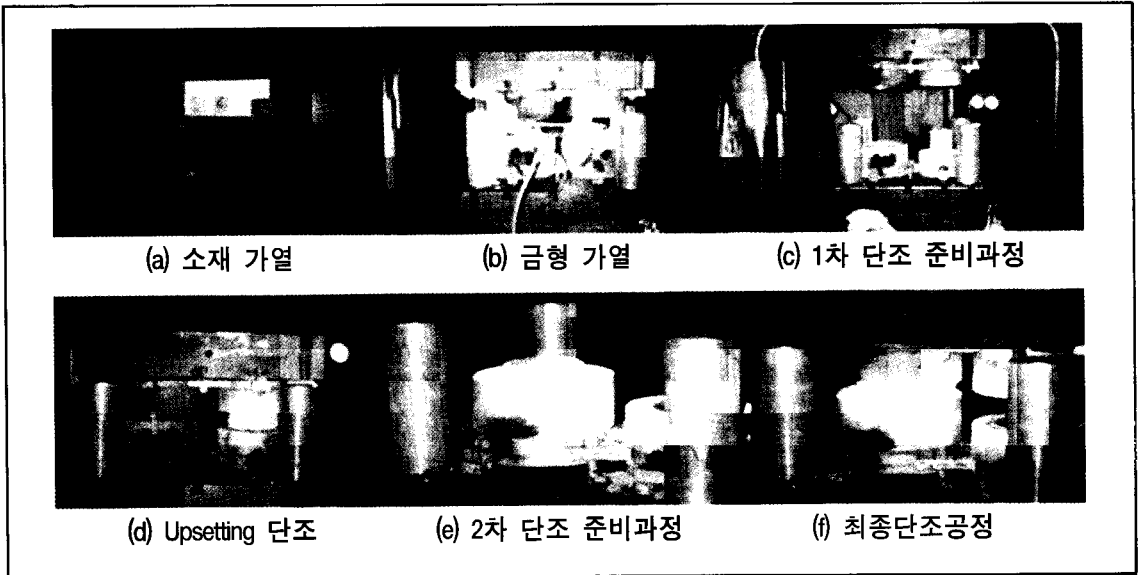


그림 13. 초내열합금 디스크의 실제 2단계 단조과정

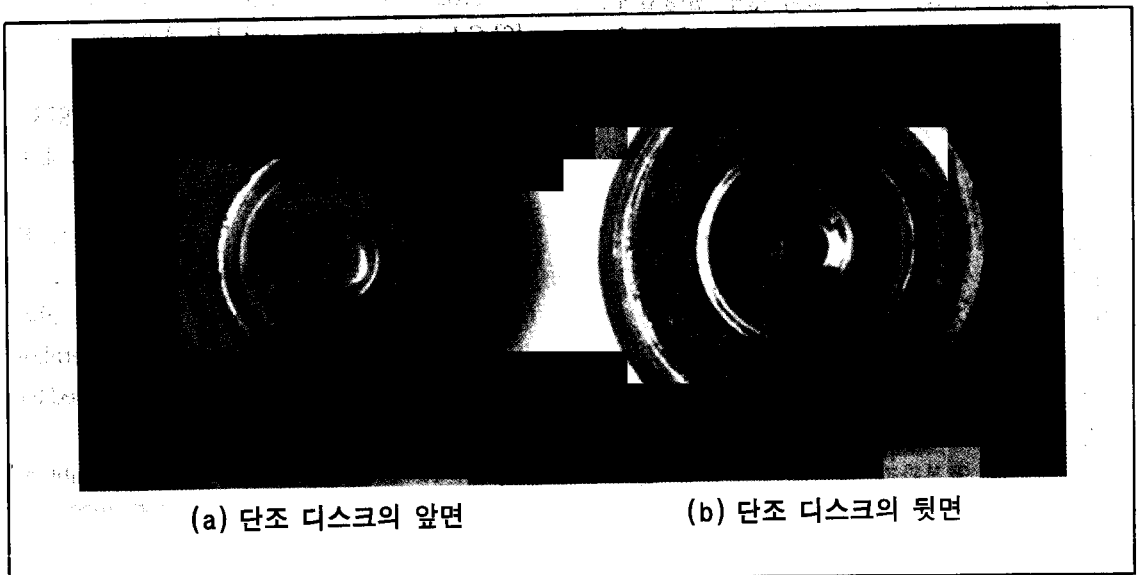


그림 14. 2단계 단조된 초내열합금 Alloy 718의 디스크 외관

작과정을 설명하기로 한다. 그림 13.은 초내열합금인 Alloy 718소재의 4000톤 스크류프레스 디스크단조공정을 나타낸 것으로 소재는 5.5in×높이 6in의 빌렛을 연마기를 이용하여 봉상시편의 모퉁이 부위에 taper를 만들어 단조시의 불

균일성형을 방지하였다. 이렇게 준비된 소재는 전기식 벅치형 가열로에 의해 1020℃의 온도에서 등온유지하여 소재의 균일한 온도분포를 유지하도록 하였고, 미리 준비된 단조금형위에 소재를 올려놓고 열간단조를 수행하였다. 업세팅

단조에 의하여 platform의 예비형상을 만듦으로써 preform공정에서 단조결합의 발생을 억제시키고 일정량의 소성변형량을 유지하도록 하였으며, 최종성형을 거쳐 디스크를 제조하는 2단계 과정으로 설계되었다. 이때 단조공정의 감소는 작업효율성을 향상시킬 수 있는 반면에 단위 공정별 소성변형량은 상대적으로 증가하여 금형마모를 촉진시킬 수 있는 여지가 많기 때문에 단조공정에 앞서 충분한 단조공정 및 금형설계가 필수적이다. 최종단조된 디스크의 외관은 그림 14에 나타내었다. 2단계로 제작된 디스크는 외관검사와 특성검사가 수행되며, 성능평가를 통해 터빈디스크 시제품이 제작된다.

7. 결 언

초내열합금 가스터빈 디스크의 경우 결정립미세화를 피하기 위하여 대부분 단조공정에 의해 제작되어 왔으며, 관련분야에 대한 연구가 활발하여 끊임없이 특성 및 공정개선을 이루어 왔다. 니켈계 초내열합금은 고온기계적 성질이 우수한 반면에 단조성은 상대적으로 나쁘고 최종제품의 기계적 성질은 제조공정에 따라 심하게 변하기 때문에 세심하게 공정변수를 관리할 필요가 있으며, 철저한 작업관리가 요구된다. 선진국의 경우 Wyman-Gordon, Snecma, Doncaster사 등 대규모 단조업체를 중심으로 연구개발하여 각 공정변수의 영향에 대한 조사연구에 바탕을 둔 철저한 공정관리 체계를 운영하고 있으며, 국내에서도 한국기계연구원을 주축으로 단련용 초내열합금의 고온 금형설계, 단조, 후처리 기술개발을 통한 최적의 단조조건을 수립하며, 열간금형단조에 의한 소형가스터빈용 디스크 제조, 부위별 특성평가 및 성능평가에 의한 재료특성 DB를 일부 구축하였다. 이러한 DB를 통해 유한요소해석과 재결정모델링 및 금속학적 이론을 도입한 재질예측시스템을 개발하여 현장의 단조공정시 단조품의 결정립분포 및 기계적 특성을

예측함으로써 최종제품의 특성제어에 크게 기여할 수 있을 것으로 여겨지며, 가스터빈디스크의 기계적 특성에 관한 규격제조 및 작업시방서를 작성하여 최적의 단조공정을 수립하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] T. Kham, P. Caron, Y. Nakagawa, JOM, July, 17, 1986
- [2] 한국기계연구원, 항공기 가스터빈 핵심 재료기술 개발(III) 과학기술처, 11, 1997
- [3] 한국기계연구원, 초내열합금 디스크 금형 단조기술 개발, 과학기술처, 30, 1997
- [4] S.K. Biswa and W.A. Knight, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 15, 179, 1975
- [5] E. Sleafckx and J.P. Kruth, J. of Materials Processing Technology, Vol. 15, 179, 1975
- [6] C.J. Van Tyne and B. Avitzur, ASM, Metals Park, Oh, 1983
- [7] K.M. Kulkarni, SME, Dearborn, 24, 1978
- [8] 염종택, 박노광, 한국소성가공학회지, Vol. 6, No. 3, 250, 1997
- [9] C. Devadas, I.V. Samarasekera, and E. B. Hawbolt, Metall. Trans. 22A, 335, 1991
- [10] J.P. Domblesky, L.A. Jackman, R. Shivpuri, and B.B. Hendrick, Superalloy 718,625,706 and Various derivatives edited by E.A. Loria, TMS, 273, 1994
- [11] W. Roberts, H. Bodén, and B. Ahlblom, Metal Sci. March-April, 6, 195, 1979
- [12] C.M. Sellar, Mater. Sci. Technol., Vol. 1, 352, 1985
- [13] H. Yada, Trans. ISIJ, 23, 100, 1983
- [14] G. Shen, S.L. Semiatin and R. Shivpuri, Metall. Trans. 26A, July, 1795, 1995
- [15] M. Avrami, J. Chem. Phys., Vol. 9, 177, 1941