

니켈기 초내열 합금의 단조기술



박 노 광

(재료기술부 내열재료그룹)

- '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

최 승 주

(재료기술부 내열재료그룹)



- '72-'76 서울공대(학사)
- '76-'78 한국과학원(석사)
- '78-'81 한국과학기술연구소(연구원)
- '81-'85 Rensselaer Polytechnic Institute(박사)
- '86-'87 Rensselaer Polytechnic Institute(연구원)
- '87-'93 미국 Textron Lycoming Company(연구원)
- '93-'현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 머릿말

니켈기지 초내열 합금은 고온에서 기계 화학적 특성이 우수하기 때문에 내열성을 요하는 부위에 주로 사용되고, 특히 제트엔진용 가스터빈에는 총중량의 60% 정도가 이용된다. 이러한 니켈기 초내열합금을 이용하여 부품제조할 경우 원자재 값이 비싸고(약 2만원/kg) 부품성형이 힘들기 때문에, 기계적 성질이 우수한 제품을 경제적으로 얻기 위해서 제조공정에 대한 세심한 검토를 필요로 한다.

니켈기 초내열합금은 단련용과 주조용으로 대별할 수 있으며, 동일 합금계에 대해 전자는 후자에 비해 우수한 특성을 나타낸다. 즉, 용탕/주형간 반응에 의한 개재물 혼입이 없고, 진공아크 채용해, 슬래그 채용해 등 방법으로 정련하기 때문에 원소재의 청정도가 상대적으로 높다. 소성가공에 의해 잉고트 결함을 파쇄, 분산시킴으로써 우수한 기계적 특성을 발현할 수 있다. 또한 균일한 미세결정립을 얻을 수 있으며, 결정흐름을 조절함으로써 고강도를 얻을 수 있고, 형상 및 치수의 제한은 비교적 적다. 이상의 장점 때문에 가스터빈 엔진의 압축기 및 터빈부위의 상당부분이 단조품으로 이용되고 있다.

니켈합금의 단조에는 일반단조, 고온 금형단조 및 등은 정형단조 기술이 모두 이용되고 있으며, 단조법의 선택은 주로 합금의 종류 및 업체 보유설비 등에 따라 결정된다. 가스터빈 엔진용 부품 제작업체의 일반적인 경향은 대부분 설비조건이 비교적 까다롭지 않은 일반단조가 이용되어 왔으나, 점차로 조직, 기계적 특성 관리면이나 경제적으로 유리한 고온 금형단조로 변하는 추세

이다. 특히 고온에서의 물성이 매우 중요시 되는 터빈디스크 등에는 분말 초내열합금을 이용한 등은 정형단조도 이용되고 있는데, 이 경우 공정중 많은 부분이 진공 혹은 분위기하에서 수행되고 있다.

단련용 니켈기 초내열합금의 성형에 대한 연구방향은 크게 보아서 공정개선에 의한 조직 및 기계적 특성 개선방안과 제조단가 저하방안 등 두가지에 대한 것이다. 전자는 주로 열간소성가공 및 열처리 공정에 의해 재료강화 방법을 택하고 있으며, 후자는 재료비 및 가공비 절감과 함께 공정관리에 의한 결함 발생률을 줄임으로써 이를 수 있다. 현재 국내에서는 항공기 및 발전기용 가스터빈사업의 확대와 더불어 초내열합금 원소재 및 부품에 대한 개발의지가 커지고 있고, 조만간 초내열합금을 이용한 가스터빈 부품이 국산화될 전망이다. 이러한 시점에 본지에는 초내열합금의 단조기술 및 국내현황에 대해 개괄적으로 소개하고자 한다.

2. 단련용 초내열합금

단련용 초내열합금은 오스테나이트 γ 기지에 γ' -Ni₃(Al, Ti), γ'' -Ni₃(Nb, Ti), 탄화물(MC, M₇C₃, M₂₃C₆, M₆C)등 석출물이 존재하여 600~700°C에서 고온 강도가 높은 합금이다. 단련용 초내열합금의 단조성을 여타 금속과 비교하여 표 1에 나타내었다.

표 1. Forgeability of Alloys

Alloys Rating	Alloys Rating	Alloys Rating	
Al Alloys	1	Ti Alloys	10
Mg Alloys	2	Fe Base Superalloys	11
Cu Alloys	3	Co Base Superalloys	12
Carbon and Alloy Steels	4	Nb Alloys	13
Martensitic Cres	5	Ta Alloys	14
Maraging Steels	6	Mo Alloys	15
Austenitic Steels	7	Ni Base Superalloys	16
Nickel Alloys	8	W Alloys	17
PH Cres	9	Be Alloys	18

합금원소량이 적은 니켈합금의 단조성은 오스테나이트계 합금강 수준을 유지하지만, 고온강도를 향상시킨 석출경화형 니켈기 초내열합금의 단조성은 거의 고용점 합금 수준으로 단조가 어렵다.

초내열합금은 비평형 응고도중에 용질원자의 편석이 일어날 수 있는데, 응고말기에 응고형성된 수지상정간 조직(Interdendritic Structure)은 초기에 형성된 수지상정 조직에 비해 석출상인 γ' 형성원소를 다량 함유하게 되고 상대적으로 용융점이 낮다[1]. 이처럼 비평형 응고된 소재를 균질화처리 하지 않고 단조온도까지 급속 가열하면 용질원자가 편석된 부분에서 국부용해(incipient melting) 양상을 나타낼 수 있다. 한편 고용 한계선 이하로 단조온도를 낮추면 제2상의 석출에 의해서 변형저항은 현저하게 증가하게 되어 금형의 마멸을 촉진시킨다. 소성가공에 의해 부품제조시 보통 이들 석출물이 용해되는 온도구간인 고상선과 고용한계선 사이의 온도에서 작업을 수행한다.

그림 1은 여러가지 니켈기 초내열합금의 인장시험시 단면감소율을 나타낸다. 단면감소율은 온도 상승에 따라 점차 증가하여 최대치에 이른 후 그 이상의 온도에서 급격히 저하한다. 이것은 온도 상승에 따라 재결정이 활발해지며 변형능이 증가하지만 어느 온도 이상에서는 소성발열 등으로 인해 합금의 온도가 국부용해 온도 이상으로 가열되기 때문에 나타나는 현상이다. 따라서 합금 종류에 따라 적절한 성형온도가 규정되어 있으며, 표 2에 각 합금별 단조온도의 예를 나타내었다. 석출강화 혹은 고용강화를 위하여 합금원소를 다량 함유한 합금일 수록 용질원소의 편석과 이에 따른 단조성 저하현상은 심해진다. 단조온도의 상한선은 단조발열에 의한 공정급속의 용융과 결정립계의 균열을 방지하기 위하여 각 합금의 고상선 이하 50~100°C 범위 온도에서 수행한다. 이때 해머단조와 같이 변형속도가 큰 경우에는 단열가열에 기인하여 조대결정립이 형성될 수 있으므로 유의하여야 한다.

니켈기 초내열합금의 특성은 결정립크기와 함께 제2석출상의 형태 및 체적비에 따라 크게 바뀌므로 미세조직과 공정과 그 특성변화간의 상관관계에

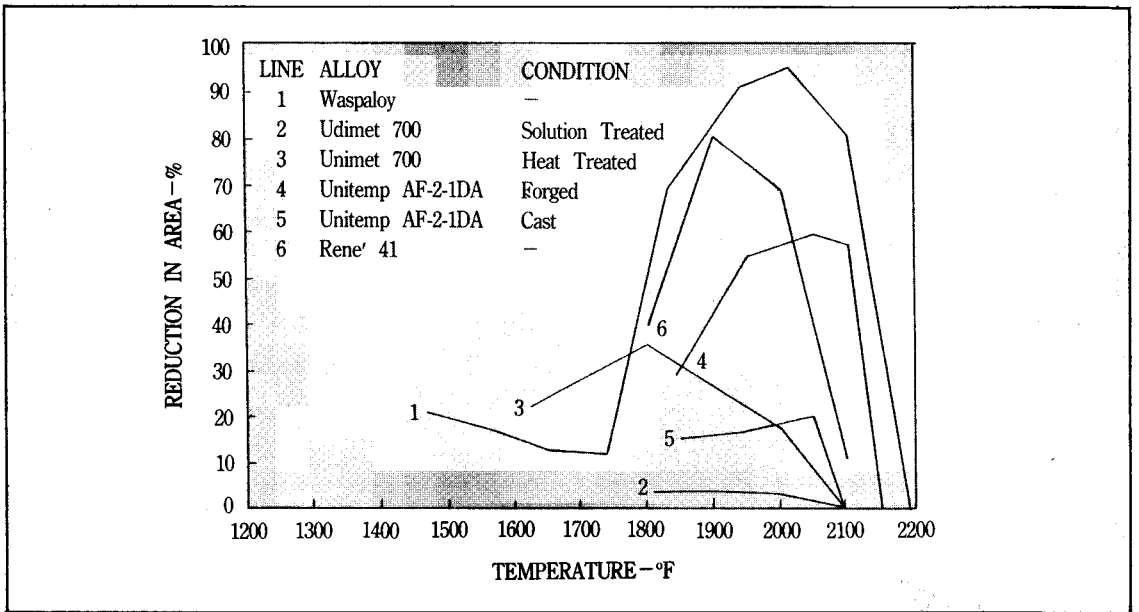


Fig. 1 Hot ductility of nickel base superalloys[18]

표 2. Critical Melting, Precipitation, and Forging Temperatures for Several Nickel-Base Superalloys[14]

Alloy	First melting temperature °C	Precipitation temperature °C	Maximum forging temperature °C	Minimum forging temperature °C
Hastelloy X	1260	760	1215	840
Inconel 718	1260	840	1150	900
Waspaloy	1230	980	1180	980
Incoloy 901	1200	980	1180	980
Inconel X-750	1290	950	1200	1010
M-252	1200	1010	1180	968
Hastelloy R-235	1260	1040	1200	1010
René 41	1230	1065	1190	1025
Udimet 500	1230	1100	1050	1200
Udimet 700	1230	1120	1163	1040
Astroloy	1230	1120	1190	1100
Hastelloy W	...	...	1200	1040
Nickel 200	...	...	1200	870
Inconel 600	...	...	1150	1040
Inconel 751	...	...	1200	1040
Hastelloy C	...	...	1230	1010
Nimonic 90	...	...	1150	1010
Nimonic 115	...	...	1180	1100
Unitemp 1753	...	...	1180	1010
Unitemp AF 2-1DA	...	...	1180	1065
Udimet 710	...	...	1180	1065
René 95	...	...	1120	1065
MAR-M-421	...	...	1150	1040

대하여 이해할 필요가 있다. 단련용 니켈기 초내열합금의 45%, 주조용 초내열합금의 25% 정도로 이용도가 넓은 Alloy 718[2]에서 Nb 편석이 심할 경우 저융점화합물인 Laves상이 형성되어 단조성은 크게 떨어진다. 또한 Alloy 718에서 형성되는 Ni₃(Nb, Ti)형 화합물인 δ상은 재결정조직의 결정립 크기를 결정하는 데 중요한 역할을 담당하고, 이 상은 기지 강화상인 γ 및 γ'의 석출을 결정하기 때문에 기계적 성질을 변하게 된다[3, 13]. 유사하게 Incoloy 901, Waspaloy 등은 Ni₃Ti형 화합물인 η상에 의해 결정립 및 기계적 성질이 크게 좌우된다. 따라서 이들 합금을 이용하여 부품을 제조할

경우에는 소성가공 및 후 열처리 공정중에 이들 상을 잘 관리할 필요가 있다.

각 합금별로 단조를 성공적으로 수행하기 위해서는 소성가공 중에 균열 혹은 불균일 소성변형이 일어나는 조건을 알아야 한다. 균일 소성변형이 일어나는 조건은 소성변형도로 표현될 수 있다. 이는 변형률속도 및 온도에 따라 불균일 소성변형이 일어나는 조건을 도해로 나타낸 것으로서, 그림 2에 그 예를 나타내었다[4]. 여기에서 변형양상 S는 전단변형(Shearing)을 나타낸 것으로 소성변형이 국부적으로 집중되면서 나타난 현상이다.

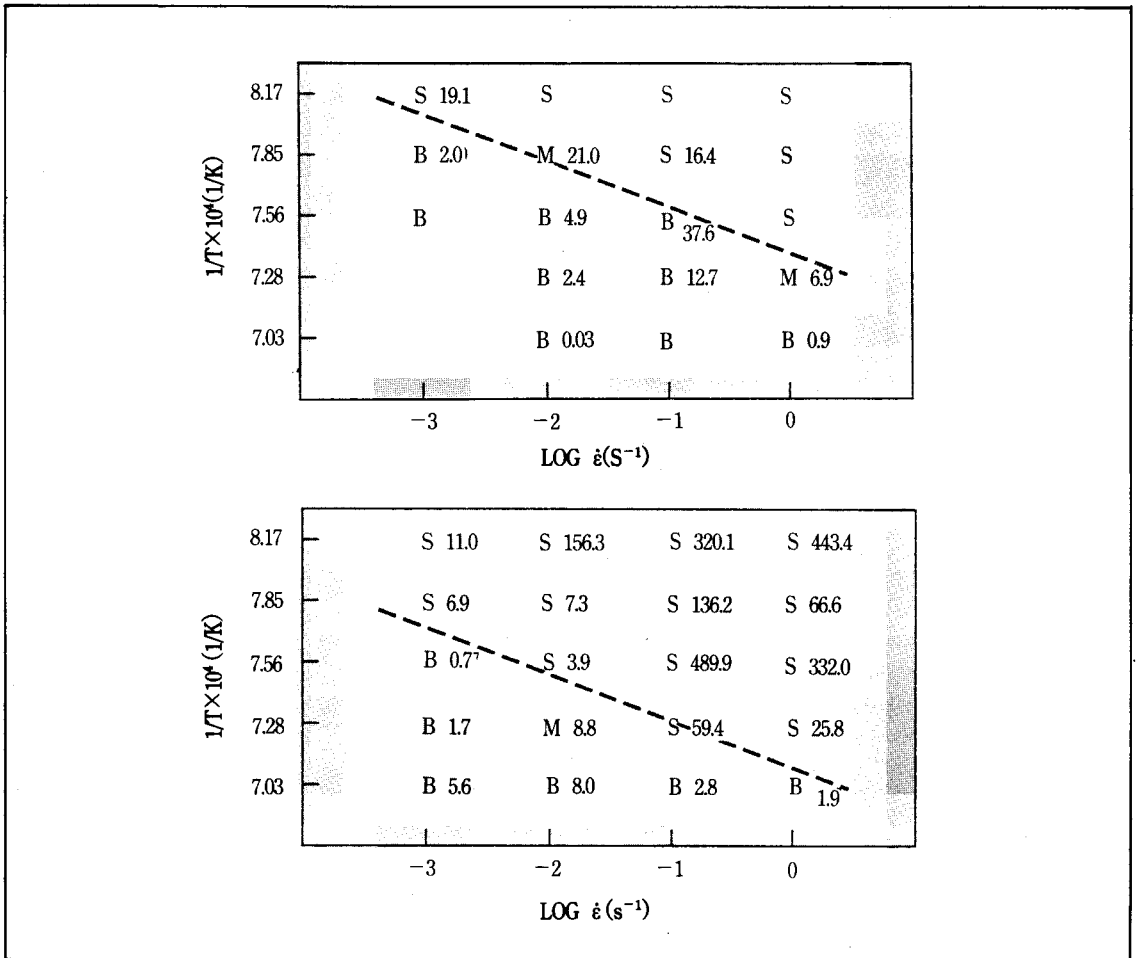


Fig. 2 Deformation Mode Map of HIP-consolidated René 95. Numbers in The Plot Representing Strain Localization Factor, α .

(a) Grain Size = 6 μm. (b) Grain Size = 15 μm.

항공기용 제트엔진의 디스크에는 합금원소를 다량 함유하고 균일성을 향상시킨 초내열 분말 합금이 이용되고 있는데, 열간정수압 성형, 열간 압출을 수행한 후에 최종적으로 등온단조에 의해 정형가공한다. 초내열 분말합금이 이용되는 이유는 단조용 혹은 주조용 합금에 비해 석출경화용 합금원소를 증가시킴으로써 고온강도를 향상시킬 수 있으며 상대적으로 성형성이 향상되기 때문에 정밀성형이 가능하기 때문이다. 그러나 초내열합금 분말은 주로 고온에서 다루어져야 하며 이에 따른 합금원소의 산화 및 분말핸들링에 어려움이 있다. 특히 분말입계에서 발생할 수 있는 prior particle boundary는 재료를 취화시키기 때문에 제조공정 중에 이들의 발생을 방지할 필요가 있는데, 열간 소성가공으로 이들의 효과를 줄일 수 있다.

니켈기 초내열합금은 동일 금형을 사용하여 단조하더라도 heat별로 결정립 크기가 변할 수 있다. 특정 부품을 단조할 경우에 재료의 heat별로 샘플링하여 단조하고 후열처리에 따른 결정립크기와 기계적 성질의 변화를 조사한 후에 최적 단조온도를 설정하여야 한다. 특히 Waspaloy, René 41, U-500, U-700, U-720 등과 같은 석출경화형 니켈기 초내열합금의 경우에는 특히 이점을 유의하여야 한다. 또한 이들 합금을 이용하여 단조품을 제조하기 위한 공정변수는 제품형상에 따라 달라질 수 있으므로 유의해야 한다.

3. 소성 변형 해석

초내열합금의 단조시 일어나는 소성변형을 분석하는 데에는 실행상 여러가지 제약이 따른다. 칫수정밀도 및 조직관리 등 필요에 의해 고온에서 정밀성형하는 경우 외에는 대부분 단조재와 금형간의 온도차는 매우 크다. 이 경우 단조초기에 단조재와 금형간의 온도차는 매우 크고 극심한 열전달이 접촉면을 통하여 있게 된다. 또한 급속한 급속 변형에 기인하여 단조재 내에는 온도상승 효과가 나타난다. 또한 단조재와 금형은 모두 전도, 대류, 방사에 의해 열전달이 되기 때문에 매우 복잡한 양상을 띤다. 따라서, 단조공정 전반에 걸친 정확한 시뮬레이션은 매우 어렵다.

70년대에 슬립선장법(slip line field theory), 슬랩해석법(slap method) 등을 이용하여 터빈블레이드와 같은 단조 부품의 성형에 대한 해석을 시도한 바가 있다[16, 17]. 그러나 이들 전통적인 해석법으로는 복잡한 금형내에서 일어나는 재료의 유동, 변형률분포, 하중 계산, 결함발생예측 등이 사실상 힘들다. 최근에 ABAQUS, ALPID 등과 같은 유한요소법을 이용하여 보다 실제적인 공정설계를 시도할 수 있게 되었으나, 대부분 2차원 해석에 유효하고 3차원적인 해석은 자유곡면에 대한 수치 모델링, 방대한 연산작업이 필요하여 기피하는 현상이다.

단조공정을 해석할 경우에 매우 큰 변형률이 수반되고, 금속의 조직 및 기계적 성질이 변형률, 변형률속도, 온도, 기타 변형이력 변수 등에 의해 변하므로 이들의 영향을 고려하여야 한다. 일반적으로 소성 변형 해석시 단조재는 강소성체(rigid-plastic) 혹은 강점소성체(rigid-viscoplastic)로 하고, 금형은 강성체(rigid)로 보고 수행한다[9]. 이때 사용되는 요소의 크기는 소성변형중 일어나는 정보를 얻을 수 있도록 충분히 작아야 하지만 이에 따라 전산에 요하는 시간이 상대적으로 길어지므로 적절한 크기를 선택하여야 한다. 그림 3에 ALPID를 이용하여 압축기용 디스크 단조시 일어나는 변형 양상을 해석한 일례를 나타내었다.

단조재에 소성변형이 진행되면 초기 설정된 격자형상은 점점 더 왜곡되는데, 특히 밀폐형 금형단조의 경우 플래쉬 근방에는 소성변형량이 매우 커지게 되어 격자왜곡 현상은 심해진다. 이 경우 금형간의 거리변화에 따른 금형경계 형태를 나타내기 어려워지고, 초기의 요소크기로는 변형모드의 변화를 상세하게 나타낼 수 없다. 이러한 문제점을 풀기 위해 일반적으로 소성변형도중에 격자를 재구성하는 작업을 한다[10].

컴퓨터를 이용한 공정설계에는 소성변형 공정을 분석하고 체계화하는 일련의 작업이 필요하다. 우선 공정조건에서의 소성변형에 관련된 데이터를 수집하고, 부품제작을 위한 2차원 혹은 3차원 공정 해석을 통하여 최적화된 전산 모델을 만든다. 성형조건에서 초내열합금의 소성변형에 관한 자료는 거의 없으므로 실험실적으로 압축시험을 통해

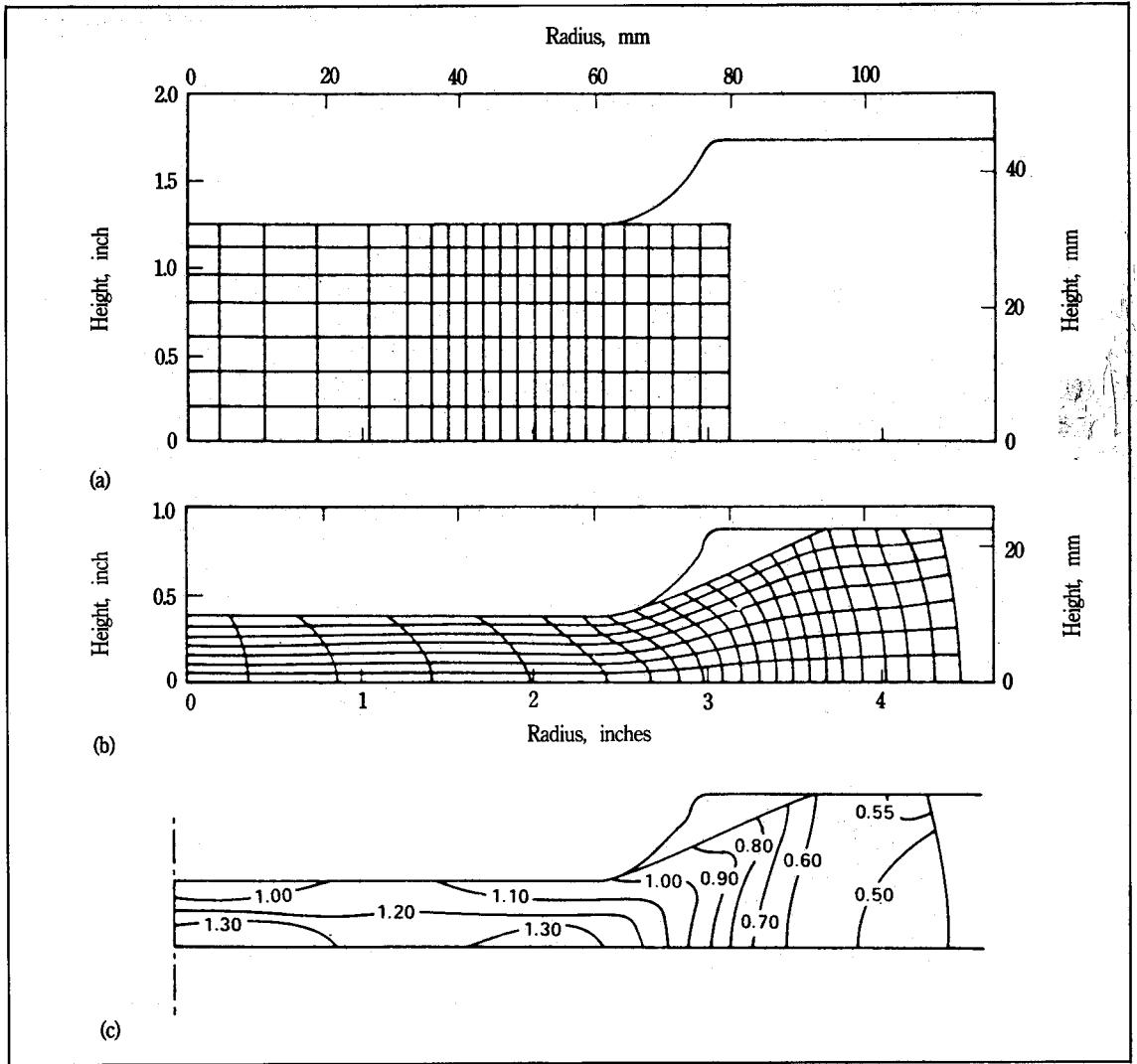


Fig. 3 Disk Forging Simulation Results[18].

(a) Undeformed Grid. (b) Grid Distortion at 70% Reduction. (c) Predicted Effective Strain Distribution at 70% Reduction.

데이터를 구해야 한다. 또한 소성가공재와 금형 간의 계면에서 일어나는 마찰현상 혹은 열전달에 대한 정량적인 데이터가 필요하다. 가공재와 금형재간의 마찰특성을 평가하기 위해서 일반적으로 링테스트를 수행한다[5, 6]. 계면에서의 열전달계수는 Jain과 Goetz 등의 방법을 사용해서 얻어질 수 있다[7].

소성변형중의 응력 및 변형률의 분포 등을 구할

수 있는 공정 해석 모델에는 유동응력에 대한 자료를 필요로 하며, 이때 유동응력은 변형률, 변형속도, 온도, 한가지 이상의 변형 이력 함수로 나타내어지는 구성방정식으로 표기된다. 이러한 구성방정식은 두가지 점에서 공정분석에 이용된다. 우선 소요역량을 결정하거나 작은 소성구역에서의 변형률, 변형속도, 온도이력을 예상하는 데 이용된다. 공정설계시에는 공정변수(온도, 램속도, 예

비성형체 형상 등)의 함수로 이들을 구하는 것이 필요하다. 변형률, 변형률 속도, 온도 이력은 최종제품내 각 요소의 미세조직과 성질을 결정한다. 둘째로 구성방정식은 유동응력의 변형속도 의존성과 같은 소성가공능력을 나타내기 위해 사용 되는 지수로 이용될 수 있다. 여기에서 변형속도 의존성은 변형속도 민감지수라 하는 $m(= \ln \sigma / \ln \dot{\epsilon})$ 으로 표기되며, 소성변형의 균일화 경향 즉 국부소성 변형에 대한 저항성을 나타내는 파라메타로 파단에 이르기까지의 임계 변형량을 예견하는 데 이용된다.

불균일 소성변형은 국부적으로 미세조직 및 기계적 성질을 변화시키고 재료파단을 조기 유발할 수 있기 때문에, 소성변형 과정을 모델링하여 그 경향을 예측해야 할 필요가 있다. 소성변형 모델링시 일정 온도에서의 재료특성, 단열변형에 의한 재료의 연화, 열전달에 의한 온도변화 등을 고려한다. 일반적으로 변형속도가 높을수록 온도는 낮을수록 소성변형은 불균일해지고, 상대적으로 변형속도의 효과가 온도의 효과에 비해 크다[4]. 온도의 효과는 저온으로 갈수록 단열가열량이 상대적으로 많아지기 때문에 나타나고, 변형속도의 영향은 빠른 속도로 갈수록 변형속도 민감지수는 감소하는 한편 균일온도 유지하기에 시간이 부족하기 때문에 나타난다. 온도 및 변형속도의 영향은 소성불균일 현상을 보이는 임계변형량으로 소성가공성 도해(workability map)로 나타낼 수 있다[8].

4. 단조금형 및 설계

초내열합금의 단조품 크기는 단조설비의 용량에 의해 결정되는데, 최대 단면적은 표면형상에 의해

변하지만 대략 $1m^2$ 이하이다. 전체 크기와 무게의 한계내에서 무게비 표면적은 단조의 난이도를 결정하는 중요한 요소로 되고 있다. 구형이나 볼록형의 경우 무게비 표면적이 작기 때문에 단조는 비교적 용이하고, 구멍이나 함몰된 부분이 있을 경우 혹은 리브나 돌출부가 많을 경우 등에는 무게비 표면적이 크고 이에 따라 단조는 어려워진다.

초내열합금용 단조금형 설계시 가공 여유분은 작게하면 할수록 후가공공정은 단순해질 수 있으나 정밀성형에 의해 현저하게 가공을 줄이기 전에는 가공여유 정도가 후가공공정에 심각한 영향을 주는 것은 아니고 금형의 마모 등을 감안한다면 가공여유는 오히려 많이 주는 것이 타당하다.

리브 혹은 웹 등은 단면적이 얇기 때문에 두께가 큰 다른 부위에 비해서 냉각효과가 크고 소성변형에 대한 저항성이 커지게 된다. 또한 수직 배열된 리브는 평행 배열된 웹에 비해서 상대적으로 단조가 어렵는데, 리브부의 금형은 단조시간 내내 좌우방향의 구속력을 받게 되는데 반하여 웹부위는 단조공정 말기에만 구속력을 받기 때문이다. 따라서 일반적으로 동일한 두께의 리브와 웹의 금형수명비는 1:2 정도 이상이 된다.

단조성이 나쁜 소재의 단조시 얻을 수 있는 웹 및 리브의 두께는 다음과 같다. 즉 웹의 경우 그 형상구속도에 따라 최소 두께가 결정되는데, 구속된 웹의 경우 주변의 리브에 의해 금속유동은 제약을 받게 되어 단조가 어려우나 불구속된 웹의 경우에는 금속의 유동이 적어도 한 방향으로만 자유롭기 때문에 단조가 용이하다. 이에반해 리브의 경우에는 최소두께는 단지 그 높이 및 합금원소에 의해 영향을 받는다. 표 3에 일반단조

표 3. Example of Ribs Design for Superalloy Forgings Made in Hammers and Presses[15]

Min. rib width(in)	Max. rib height-to-width ratio	Plan area (in ²)	Weight (lb)
0.06	6 to 1	4	11
0.06	5 to 1	7.8	0.56
0.50	1.5 to 1	23.9	6.5
0.75	1 to 1	835	422

시의 초내열합금의 리브높이/폭 비의 예를 나타내었다[11].

드래프트각도(Draft angle)는 일반적으로 단조면에 수직으로 배열되어 있는 모든 표면에 적용함으로써 금형으로부터 단조품을 쉽게 빼낼 수 있도록 한 것으로 합금종류, 단조방법, 위치, 리브의 높이 등에 따라 변한다. 니켈기 초내열합금은 일반 철합금과는 달리 단조중에 산화등이 거의 일어나지 않기 때문에 금형이 단조재를 잡는 양상을 나타낸다. 단조방법의 영향으로써 단조온도가 상승할수록 금속의 유동응력은 저하하고 상대적으로 금형의 마모를 줄일 수 있기 때문에 드래프트각을 상대적으로 줄일 수 있다. 단조품의 원활한 이형을 위해서는 리브의 높이가 커질수록 드래프트각은 상대적으로 커야 한다.

필렛반경(Fillet radius)과 코너반경(Corner radius)은 후가공 등을 고려할 경우에는 가급적이면 작게 설정하여야 하지만 상대적으로 금형가공이 어렵고 금형표면에 열균열이 발생하여 금형수명을 저하시킬 수 있다. 이들 반경은 가급적이면 크게 하여 lap이나 cold shut 등이 형성되는 것을 방지할 필요가 있다. 일반적으로 코너반경은 필렛반경에 비해 절반이하로 줄일 수 있다.

니켈기 초내열합금의 단조시 금형의 선택은 금형의 온도 및 단조방법에 따라 결정된다. 즉, 일반단조에는 슬래그 재용해(Electro-slag remelting) 등에 의해 정련된 열간단조용 공구강이 이용되고 있고, 단조온도가 높은 고온단조의 경우에는 사용온도에 따라 IN100과 같은 니켈기 초내열합금이 이용된다. 한편 등온단조의 경우에는 고온 크리프 강도가 우수한 TZM(Mo-0.5Ti-0.08Zr)과 같은 고융점 합금이 이용되고 있는데, 이 경우 산화방지를 위한 분위기 조절이 필수적이다.

일반단조용 공구강은 대별하면 고온소입후 550°C 부근의 온도에서 템퍼링하여 2차 경화시킨 SKD 계열과 2차 경화시키지 않은 SKT 계열이 있다. SKD 계열은 일반적으로 프레스금형, 압출공구금형으로, SKT계는 주로 해머금형에 사용된다. SKD 강종 중에서 KS 규격으로 SKD 61종(AISI H13종) 합금은 특히 적열경도와 열균열(Heat Che-

cking) 및 내마모성이 우수하다. 이 강종은 특히 공기담금질에 의해 경화되기 때문에 열처리에 의한 변형이 작고 0.4% 정도의 낮은 탄소함량 때문에 분위기 열처리과정에서 발생할 수 있는 탈탄 가능성은 비교적 작으나 열처리후에는 작업면을 연마해 주어야 한다. 필요하면 표면을 광택연마한 후 질화처리를 수행함으로써 질화깊이 0.1mm 정도를 얻는다.

일반적으로 열간공구강은 고온으로 올라갈수록 충격치는 증가하여 인성은 향상된다. 고온강도가 높은 고W, 고Co 함유 SKD5와 AISI H19 등은 무첨가강에 비해서 다소 충격치는 낮다. 즉 냉간 가공용 공구강으로 이용되고 있는 SKD11과 SKH9는 사용경도 범위에서 열간가공용 공구강에 비해서 충격치가 매우 낮은 수준을 유지한다. 열간금형의 경우 고온강도와 고온인성이 필요한데 인성이 부족한 경우 조기균열과 열균열 등이 유발된다. 즉 충격치의 온도의존성을 고려하여 필히 사용전에 열간금형을 예열한다. 예열시 서서히 온도를 증가시키고 국부가열을 피하며 전체에 걸쳐 균일가열하는 것이 필수적이다.

5. 단조공정

초내열합금을 소성가공에 의해 부품을 제조할 경우 자유단조, 밀폐형단조, 업세트단조, 압출단조, 롤단조, 링롤링 등의 방법이 주로 이용되는데, 주로 마무리 단조시에는 밀폐형단조 및 링롤링 방법이 이용되고 예비성형체 단조에는 여타 방법이 이용된다. 자유단조는 가스터빈용 디스크나 샤프트와 같은 10kg 이상의 대형부품의 예비성형체 단조에 이용되며, 이들 예비성형체는 궁극적으로 밀폐형 단조에 의해 처리된다. 일반적으로 초내열합금에는 밀폐형단조가 가장 많이 이용되고 있는데, 금형마모가 심하기 때문에 자유단조가 예비성형 작업시 많이 이용된다. 업세트 단조 역시 많이 이용되고 있는데, 업세트 단조시 길이/직경비는 약 2 이하로 유지한다. 한편 압출단조는 밀폐형단조 등을 위한 예비성형 작업시 이용되는데, 그 공정 선택은 주로 가공설비에 의해 결정된다. 때때로 롤단조가 이용되는데, 이 경우 원자재의 절감, 후속

형단조 수의 감소 등을 피할 수 있다. 링롤링은 튜브형의 빌렛으로부터 링형 제품을 제조하는데 이용되는데, 이 경우 단조성이 나쁘기 때문에 일반적으로 공정중 가열이 필요하다.

초내열합금의 단조법을 금형온도로 구분하면 일반단조, 고온단조, 등온단조 등으로 나눌 수 있다. 일반단조의 경우 금형온도는 대략 300°C 이하로 하는데, 소재냉각에 의해 성형성은 현저히 낮아 복잡한 형상을 단조하기에는 부적합하다. 일반단조의 경우 대부분 단단계 공정으로 이루어지며, 단조기로는 주로 해머, 스크류프레스, 유압프레스 등이 이용되고 있다. 고온단조의 경우 금형온도를 500~1000°C로 가열함으로써 단조재 표면냉각 현상을 완화시킨다. 이에 따라 단조기의 용량은 현저히 줄어들고 조직 관리가 용이하게 된다. 한편 등온단조의 경우 금형온도를 단조재 온도로 가열하는 방법으로, 여타 단조법에 비하여 성형시간이 길어지고 작업성은 떨어지지만 20~40% 낮은 수준으로 정밀성형이 가능하고 품질관리가 상대적으로 용이하다.

초내열합금 단조시 필요한 단조압력 및 소요역량은 단조방법, 단조재의 변형저항 및 제품형상에 따라 달라지는데 정확하게 산출하는 것은 곤란하다. 일반적으로 일반단조 조건에서는 재료의 유동응력은 온도 및 변형속도에 따라 거의 변하지 않는데, 이 경우 단조압력 혹은 소요역량 계산시 대략적인 방법으로 재료의 변형응력에 제품의 투영면적을 곱하고, 이 결과에 제품의 웹 두께와 같은 형상요인을 고려하면 거의 실제에 맞는 역량을 구할 수 있다. 니켈합금의 성형은 1000~1200°C 사이의 고온에서 수행되기 때문에 유동응력은 변형속도에 따라 심하게 변하게 되므로 각 합금에 대한 정확한 단조압력 및 소요역량을 계산할 경우에는 고온에서의 변형응력에 대한 기본 자료가 필요하다.

소성가공공정 특히 단조에 있어서 금속재와 금형소재간의 계면에서의 윤활제는 여러가지 중요한 역할을 하는데, 단조재와 금형 사이의 열전달을 조절하여 단조재 내의 온도구배를 조절할 수 있으며, 계면마찰계수에 영향을 미친다. 또한 윤활제는 부품표면의 재질, 금속유동, 결정조직,

기계적 성질, 칫수 일관성, 하중과 에너지 요구조건 등의 인자에 직접적으로 영향을 미친다. 또한 윤활제는 이형재로 작용하여 단조품의 분리를 용이하게 하고, 금속과 금형간에 열절연을 통해 금형수명을 연장시킨다.

빌렛의 온도는 윤활제를 통하여 일어나는 열전달과 대류에 의해 저해된다. 실험실에서 열절연 현상을 측정함으로써 윤활제와 계면층사이에서의 열전달을 측정할 수 있다. 이때 윤활막은 실제 단조금형을 모사하여 동일한 재료, 표면조도, 온도를 유지한 두 평평한 펀치 사이에서 압착하여 윤활막이 형성되도록 한다. 실험도중에 표면으로부터의 깊이방향으로 온도변화를 측정하면, 계면층에서의 압력 및 온도조건은 실제 단조조건에서와 유사하다. 압력, 계면층온도, 윤활제 두께와 함께 이들 데이터는 여러가지 조업조건에서의 열전달에 대한 정량화된 정보를 제공한다.

6. 맺음말

국내 업체환경을 돌아보면 단조 업체수는 100여 군데가 되지만, 대부분 자동차, 철도, 선박 등에 이용되는 철합금 부품제조가 주업종으로 되어 있다. 최근에 국내 생산된 철 및 비철합금 단조품의 합금별로 단조생산 능력 혹은 년도별 생산실적을 중량비로 비교하여 보면 약 25:1 정도로 대부분 철합금 단조에 치중되어 있다[12]. 비철합금의 경우에도 비교적 단조성이 좋은 알루미늄, 구리합금 등에 치중하여 있고 니켈합금 등 난성형재를 단조생산한 경험은 거의 없다. 철합금은 비교적 단조성이 좋기 때문에 상대적으로 기술집약이 어렵고 동종의 소재단조분야에서의 기업간 경쟁으로 인해 수익률이 저하하는 등의 경영상의 애로를 단조업체 모두 공통으로 느끼고 있는 실정이다. 따라서 기존 단조업체는 공장자동화 등에 의한 생산성향상 및 고품위 단조품에 대한 기술개발이 필요한 시점이다.

니켈기 초내열합금의 원소재 가격은 비교적 높고 국제시세가 상당히 변동적이지만, 모합금제조에 따르는 기술·경제적인 부담을 고려하면 당분간 니켈기 초내열합금을 이용한 부품개발에는

수입소재가 대부분 사용될 전망이다. 니켈기 초내열합금은 고온 기계적 강도 및 내환경성을 증대시키기 위하여 다량의 합금성분을 함유하고 있는데, 이때 S, Pb, Sn 등 미량의 불순물이 함유될 경우 고온 기계적 성질은 현저하게 저하하므로 원재료의 선택에 유의하여야 한다. 가스터빈 등에 이용되는 단단계 채용해 처리된 초내열합금 Master ingot는 대부분 미국, 프랑스 등지에서, 산업용의 경우 일본으로부터 조달될 수 있으며, 품목에 따라 일부 국산 잉고트도 제조공급되고 있다.

니켈기 초내열합금을 이용한 최종제품의 기계적 성질은 제조공정에 따라 심하게 변하기 때문에 세심하게 공정을 관리할 필요가 있으며, 정밀화 및 철저한 작업표준 관리가 요구되기 때문에 단조작업 관리에 세심한 주의를 요한다. 또한 초내열합금 부품은 혹심한 조건에서 사용되기 때문에, 사용범위에서의 신뢰성, 수명예측, 성능시험 등의 제반 평가기술이 요구된다. 그러나 부품별 목적에 합당한 실험설계, 데이터 수집 및 분석에 관하여 국내 기술 축적은 거의 없는 실정이다. 관련분야에 대한 연구로는 최근 선도 기술개발 과제로 초내열합금 단조에 대한 연구가 수행중이며, 가스터빈 시장의 활성화와 함께 관련분야에 대한 업체의 기술개발연구도 활발해질 전망이다.

당 연구원에서는 단련용 니켈기 초내열합금의 제조공정에 따른 특성개선에 관한 연구의 일환으로, Alloy 718 및 René 95 합금 등에 대하여 원소재 특성평가, 단조 및 열간정수압 성형시 일어나는 야금학적 측면에 대한 연구를 수행한 바 있다. 특히 Nimonic alloys, Alloy 718의 소성가공에 대한 전반적인 자료수집의 일환으로써, 고온변형 거동의 분석, 미세조직 및 기계적 특성 발현을 위한 공정변수출출 및 후처리에 관한 연구가 현재 진행중이다.

참 고 문 헌

- [1] F. Schbert, Superalloy Source Book, ASM, (1984), 71.
- [2] E. A. Loria, J. Metals, (June 1992), 33.
- [3] E. A. Loria, J. Metals, 7(1988), 36.
- [4] N. K. Park, B. H. Kim, S. L. Lee, Scripta Metall. et Mater., 29(1993), 117.
- [5] A. T. Male and M. G. Cockcroft, J. Inst. Met., Vol.93(1964), 38.
- [6] C. H. Lee and T. Altan, J. Eng. Ind., (1972), 775.
- [7] V. K. Jain and R. L. Goetz, ASME Paper No. 91-HT-34, presented at the National Conference on Heat Transfer, Minneapolis, MN, (July 28-31, 1991).
- [8] S. L. Semiatin and J. J. Jonas, Formability and workability of metals, ASM, Metals Park, OH 44073, (1984).
- [9] R. Srinivasan, V. Ramnarayan, U. Deshpande, V. Jain and I. Weiss, Metall. Trans., 24A (1993), 2061.
- [10] S. I. Oh, J. P. Tang and A. Badawy, Adv. Tech. Plasticity, 2(1984), 1051.
- [11] E. F. Bradley, Superalloys-A Technical Guide, ASM International, Metals Park, OH 44073, (1988).
- [12] 한국단조공업총람, 상공부 제철과, 한국단조공업 협동조합, 한국소성가공학회, (1993).
- [13] 최병학, 안형준, 신평우, 박노광, 대한금속학회지, 인쇄중.
- [14] T. Altan, F. W. Boulger, J. R. Becker, N. Akgerman and H. J. Henning, Forging Equipment, Materials, and Practices, MCIC-HB-03, Metals and Ceramics Information Center, Battelle's Columbus Lab., OH, (1973).
- [15] Forging Design Handbook, ASM, Metals Park, OH, (1972).
- [16] L. B. Aksenov, N. R. Chitkara and W. Johnson, Int. J. Mech. Sci., 17(1975), 681.
- [17] N. Akgerman and T. Altan, J. Eng. Power, Trans. ASME, (1976), 290.
- [18] T. G. Byrner, S. L. Semiatin and D. C. Vollmer, Forging Handbook, Forging Industry Assoc., (1985).