

5. 유한요소법을 이용한 열간 형단조 Nimonic 80A의 미세조직 변화 예측

기계공학과 정 호 승
지도교수 조 종 래

선박용 디젤엔진은 2행정 저속(70-200rpm)과 4행정 중속(200-800rpm)으로 구분된다. 특히, 대형 저속 디젤엔진 배기밸브는 400-600℃의 고온, 고압 환경에서 작용하며 배기가스에 의한 부식에 노출되어 있다. 또한 배기밸브는 열적, 기계적 반복하중을 수반하고 있으며 요구되는 운전수명은 18,000-24,000 시간 범위 내에서 관리가 된다. 이런 가혹한 고온, 고압과 산화성 분위기에서 사용되기 때문에 운전 조건 및 수명을 만족하기 위해 대형 저속 배기밸브의 소재로 Nimonic 80A를 사용하고 있다. 니켈을 기초로 한 초내열합금 Nimonic 80A는 고온에서 우수한 기계적 특성과 내식성, 내산화 특성을 지니고 있고 항공, 조선, 핵발전소 등의 부품으로 널리 사용되고 있으며 초합금 Inconel 718에 비해 고온에서 기계적 특성과 내산화성이 우수하다.

대형 저속 배기밸브는 단조와 주조에 의해 제품을 만들 수 있지만 주조품은 조직내부의 불순물과 기공 때문에 단조품에 비해서 기계적 특성이 저하된다. 따라서 기계적 특성을 고려하여 열간 단조방법으로 제품을 만들고 있다. 열간 가공 동안 소재의 미세조직은 동적 회복(dynamic recovery), 동적 재결정(dynamic recrystallization)에 의한 동적 연화(dynamic softening) 현상과 가공 후 정적 재결정과 입자 성장(grain growth)에 의해 변화가 발생한다. 이러한 미세조직 변화는 열간 가공에 있어서 공정변수인 온도(temperature), 변형률 속도(strain rate), 변형률(strain) 등이 적절히 사용되지 못하면 금속조직이 불균일하게 되어 균일한 입자를 얻을 수 없다. 따라서 이러한 공정 변수들의 최적 제어가 가능하다면 균일하고 미세한 미세조직을 얻을 수 있고 기계적 특성을 향상시킬 수 있다. 즉, 열간 단조공정에서 공정변수를 제어하여 균일하고 미세한 조직을 만들어 기계적 특성을 향상시키려는 연구가 많이 진행되고 있는 실정이다.

Nimonic 80A는 국내에서 생산이 되질 않아 전량 수입에 의존하며 가격이 고가이며 난삭재이므로 제품 가공에 있어서 시간과 소재의 손실을 최대한 줄일 필요가 있다. 또한 고온에서 일반 탄소강보다 유동응력이 크고, 단조 온도구간이 좁으므로 일반 탄소강보다 제조하기가 어렵다. 따라서 열간 변형 동안 공정변수들을 제어하여 제품의 전 영역에 걸쳐 균일하고 미세한 조직을 얻을 수 있고 최대한 제품 형상에 가까운 정형(net shape)으로 성형할 수 있으면 제품 제작에 있어서 시간과 소재의 손실을 최대한 줄일 수 있으므로 경제적으로나 시간적으로도 많은 이익을 얻을 수 있고 품질이 우수한 제품을 만들 수 있다.

일반적으로 최적의 공정변수 값들을 찾기 위해서는 수치해석적인 방법이 가장 효율적이며 기계적 성질 및 미세조직 변화를 예측하는 방법으로 열점소성 유한요소법을 적용할 수 있다. 따라서 열간 가공 공정변수들과 미세조직과의 상관관계를 파악하기 위해 재료의 변형과 열 전달을 기본변수로 하는 열점소성 유한요소법의 활용이 요구되고 있다. 또한 대변형 문제를 해석할 때 변형이 증가함에 따라 격자가 심한 변형 모양을 나타내고 금형 경계형상을 유한요소 격자로 표시하기가 어려워지며 격자의 변형에 의해 부정확한 해를 얻게 되거나 수렴성이 나빠지게 되므로 새로운 격자 구성이 필요하다. 그러므로 많은 변형에 의해 새로운 격자가 생성되면 이전 격자의 동적 재결정 입자 크기와 재결정 분율, 평균 입자 크기를 새로운 격자의 변수값으로 이전해야 새로운 정보를 가지고 다음 단계의 계산으로 이어 갈 수 있다. 그래서 사상방법을 제시하고 본 방법에 의한 수치해석 결과를 비교해 본 결과 잘 일치함을 알 수 있었다.

Nimonic 80A 소재를 사용하여 열간 형단조 방법에 의해 대형 배기밸브를 균일하고 미세한 조직을 갖는 제품을 만들기 위해 미세조직 거동을 고려한 열점소성 유한요소법을 이용하여 미세조직 변화를 예측하고 또한 최적의 공정조건을 찾고자 한다. 그런데 Nimonic 80A 소재를 열간 소성가공에 있어서 공정변수인 온도, 변형률, 변형률 속도에 따른 미세조직 변화에 관한 연구와 수학적 모델식이 제안된 문헌이 없으며 Nimonic 80A 소재에 대해 미세조직을 예측하는 시뮬레이션을 한 예도 없다. 또한 배기밸브 성형공정을 해석함에 있어서 미세조직 변화 과정을 도시화하여 공정변수와의 관련을 규명하고 성형 공정변수들의 최적화 조건을 제시한 예가 없는 실정이다.

대형 배기밸브 제작에 있어서 균일하고 미세한 조직을 얻기 위해선 공정변수에 따른 미세조직 변화에 대한 이해가 필요하다. 미세조직 변화를 예측하기 위해선 수학적 모델식이 필요하며 이를 연구하기 위해선 소재의 일반적인 특성과 기초 실험이 필요하다. 초내열 합금 Nimonic 80A는 일반 탄소강과는 달리 γ' (gamma prime)이 미세하게 석출되어 기지를 고온에서 강화시키고, 탄화물이 결정입계에 석출하여 입계를 강화시키는 석출 경화형 합금이며 열처리하는 용체화 처리(solution treatment)와 시효 처리(ageing treatment)를 실시한다. 그런데 열간 소성가공 공정에서도 석출경화 현상이 발생할 수 있으나 본 연구에서는 석출경화의 영향을 배제하고자 한다.

이러한 열처리 조건을 감안하여 동적 재결정과 입자 성장의 온도 범위를 고려하였으며 실험 범위는 다음과 같다. 동적 재결정 입자 크기, 입계 변형률, 동적 재결정 분율, 고온 유동 응력과의 관계를 얻기 위하여 열간 공정변수인 변형률 속도 0.05-5.0/sec, 온도 950-1250℃, 압하율 20-50%의 범위에서 실험하였고 온도와 유지시간이 입자 성장 속도에 미치는 영향을 분석하기 위해 여러 변형률 속도, 변형률, 온도 범위에서 압축변형 후 5-600sec의 등온 유지 시간을 정하였다.

Nimonic 80A의 기초 실험을 수행하여 고온 유동응력곡선, 입계 변형률, 동적 재결정 입자 크기, 동적 재결정 분율, 입자 성장에 대해 미세조직 변화 현상을 고찰하여 수학적 모델을

제시하였다. 또한 Nimonic 80A에 대해 제시된 수학적 모델링을 열점소성 유한요소법에 연계하여 미세조직 변화를 예측하는 수치 해석적 기법을 제시하였고, 대형 저속 디젤엔진 배기 밸브의 실제품 실험을 통해 실제품의 미세조직과 시뮬레이션 결과를 비교하여 시뮬레이션의 타당성을 검증하였다. 그리고 공정 변수에 따른 미세조직 변화 현상을 고찰하여 공정 변수와 미세조직 변화의 상관관계를 규명하여 최적의 열간 형단조 공정조건을 제시하였다.

초내열합금 Nimonic 80A의 열간 변형동안 미세조직 변화를 연구하기 위해 기초 실험을 실시하여 동적 재결정, 입자 성장을 관찰하였고, 미세조직 거동의 수학적 모델링에 열점소성 유한요소법을 적용하여 시뮬레이션 한 결과를 실험에서 얻은 값과 비교하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공정 변수인 변형률, 온도, 변형률 속도를 고려하여 Nimonic 80A에 대한 고온 압축 실험을 수행하였고 고온 유동곡선과 동적 재결정, 동적 재결정 분율, 입자 성장의 미세조직 변화 현상을 관찰하였고 수학적 모델링을 하였다.
- (2) 고온 변형에서 동적 재결정 입자 크기와 입자 성장에 의한 입자 크기는 Zener-Hollomon 파라미터가 작을수록, 즉 온도가 높고 변형률 속도가 낮을수록 증가하였고, 변형률이 많고 온도가 높을수록 재결정 분율은 증가하였다.
- (3) 수치해석적인 방법으로 미세조직 예측을 위해 Nimonic 80A의 미세조직변화 현상에 대한 수학적 모델을 열점소성 유한요소법에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 실제 품 실험 결과와 잘 일치하였다.
- (4) 단조 공정 시뮬레이션에 의해 미세조직 변화를 고찰하여 최적의 단조 조건을 구할 수 있었다. Nimonic 80A의 열간 변형동안 미세한 조직(ASTM No. 4 이상)을 얻기 위해선 공정변수인 온도, 변형률, 변형률 속도의 적절한 조절이 필요하다. 성형 온도 범위는 1080-1120℃, 변형률은 1.5-2.0, 변형률 속도는 1/sec가 가장 적합함을 알 수 있었다.
- (5) 밸브 내·외부의 변형률을 증가시키기 위해서 예비 형상 직경이 밸브 최대 직경의 0.5배 이하가 되어야 하며, 예비 형상 직경에 비해 성형되는 높이가 3배 이하가 되어야 한다. 또한 단조 과정에서 변형이 많은 중심부위에서는 변형열에 의해 내부 온도가 증가하고, 대형밸브의 경우에는 잘 냉각되지 않기 때문에 입자가 성장한다. 따라서 입자 성장을 방지하기 위해 급냉이 요구된다.