

## USC 발전용 HIP Rotor 의 단조 공정 연구

김동영<sup>#</sup>, 김동권<sup>1</sup>, 김영득<sup>1</sup>, 강성태<sup>1</sup>

### Investigation on the forging process of HIP rotor for USC power plant

D. Y. Kim, D. K. Kim, Y. D. Kim, S. T. Kang

#### Abstract

To improve the efficiency of fossil power plant, the higher steam temperature and pressure are required. Ultra super critical(USC) system meets very well this requirement. The HIP rotor is one of the most important parts of turbine in USC system and its material is easy to crack during hot forging. In this study, the upsetting and cogging process for 12%Cr ESR ingot was analyzed and it is suggested a optimum process to avoid surface crack. The results were verified by test product with 4,200 tonnage press.

**Key Words** : USC, HIP Rotor, ESR, Ingot, Creep, Surface Crack, Upsetting, Cogging

#### 1. 서론

화력발전 효율의 증대를 위해서는 보다 더 높은 증기 온도와 압력 조건이 요구되며, 효율이 높아지면 에너지 절약과 아울러 운전비용과 자원 절약 및 이산화탄소 배출량을 감소시킬 수 있다. 국내외적으로 이러한 발전 효율을 높이기 위한 방안으로 증기의 온도와 압력을 초초임계상태(USC, Ultra Super Critical)로 높여 발전하는 시스템의 상용화 및 개발이 진행되고 있다. 통상적으로 온도가 566℃ 이상인 화력발전시스템을 초초임계압 발전시스템이라고 부른다. 이 경우 운전 조건이 가혹하게 됨에 따라 고온 고압하에 견딜 수 있는 재질과 설계, 제작 기술의 개발이 반드시 뒤따라야 한다.

한편, USC 발전시스템에 사용되는 핵심 부품 중의 하나인 고압, 중압(HIP) Rotor는 블레이드를

원심 운동시키는 대형 단강품으로서 고압 혹은 중압 재열 증기 조건에서 고속 회전(3,600rpm)하며 운전 중 높은 원심력을 받고 기동/정지 천이 동안 열응력을 받는다. 기존의 Rotor 소재인 12%Cr 계열 합금강의 성분을 개량한 소재가 이용되는데, 이 소재는 제품 건전성을 위하여 ESR(Electric Slag Remelting) 공정을 통해 Ingot이 생산되고 있다. 그러나, ESR Ingot도 주조품으로 Ingot의 내부는 Loose Structure가 존재하므로 큰 소성변형을 통한 단련 작업을 통해 소재의 성질을 향상시키고 조직의 미세화를 꾀하는 작업이 필수적으로 따라야 한다. 본 12Cr 계열 합금강은 인성이 낮고 변형 저항성이 높아 단조 시 표면 크랙(Surface Crack)의 발생 가능성이 매우 큰 소재이다.

따라서, USC Rotor 단조를 성공하기 위해서는 소재로 사용되는 개량 12%Cr강의 Ingot 단조시 표면 크랙을 예방하는 동시에 소재 내부에 압착 효

1. 두산중공업 기술연구원 소재개발팀  
# 교신저자: 두산중공업 기술연구원 소재개발팀  
E-mail: dykim@doosanheavy.com

과를 부가하여 충분한 단조 효과를 줄 수 있는 단조공법 개발이 반드시 선행되어야 한다.

## 2. USC 용 HIP Rotor 의 소재 특성

터빈 Rotor 는 가동 중 고속회전에 의한 원심력과 발전소 기동과 정지 시 온도차에 의한 열응력을 반복적으로 받고 있다. HIP Rotor 소재로서 요구되는 특성은 높은 Creep 강도, Creep 파단 연신율 및 노치 민감성이 없을 것, 저주기 피로강도, 파괴 인성 및 강도와 인성의 균형이다. Creep 강도는 블레이드 부착부 혹은 중심공에서 변형과 균열 생성에 견딜 정도로 높아야 하며, 이를 위해서 증기온도에서 10 만 시간 요구 Creep 파단 강도는 최저 100 MPa 이다. 기존 12%Cr 강은 증기온도 566℃ 이하에서는 10 만 시간 Creep 파단강도가 100MPa 이상으로 충분한 고온 특성을 가지지만 600℃로 증기온도가 상승하면 고온 Creep 파단강도가 급격하게 저하되기 때문에 초초임계압 상태의 증기 조건에서는 사용할 수가 없다.

따라서 초초임계압 증기터빈용 로터 강은 기존 12%Cr 강을 기본으로 하여 파괴인성은 크게 저하시키지 않고, 고온 크리프 파단강도를 증가시키는 특성을 지녀야 한다.

## 3. ESR Ingot 단조 공정 해석

### 3.1 해석 조건

HIP Rotor의 실제품 Ingot은 약 70톤으로서 단조 작업 조건을 설정하기 위하여 먼저 시제품 단조를 검토하였다. 시제품 형상은 실제품의 Barrel부와 Journal부의 단조 치수를 감안하여 Fig.1과 같이 설정하였다.

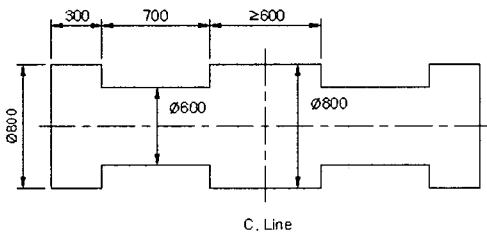


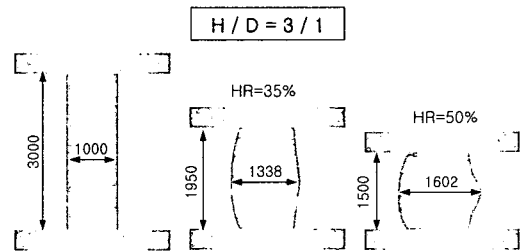
Fig.1 Schematic diagram of test product

설비 여건을 고려하여 시제품을 얻기 위한 적정 ESR Ingot 치수를 결정하기 위하여 초기 치수  $\varnothing 1,000 \times H3,000\text{mm}$ 와  $\varnothing 1,000 \times H2,500\text{mm}$ 의 두 경우에 대하여 업세팅 해석을 실시하였고, 선정된 치수는 업세팅과 코강공정을 연속 해석 하였다. 고온압축시험기로 700℃~1250℃ 온도구간에서 변형률 속도 0.001~1.0로 변화시켜 개량된 12%Cr강의 응력-변형률 관계 Data를 획득하였다.

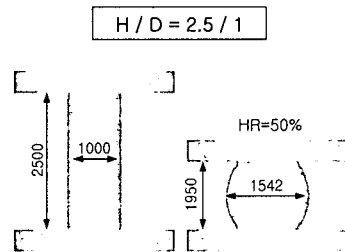
### 3.2 해석 결과 및 고찰

#### 3.2.1 업세팅 공정

초기 치수  $\varnothing 1,000 \times H3,000\text{mm}$ 와  $\varnothing 1,000 \times H2,500\text{mm}$ 의 원형 Billet을 50%까지 압하하여 높이에 따른 변형 형상을 조사하였다. Fig.2는 업세팅 해석 결과를 나타내고 있는데, 높이 3,000mm의 경우 약 HR=35% 지점에서 변형 불균형 변형 현상이 시작되어 HR=50%에서는 불균형 형상이 와 심화되는 양상을 보이고 있다. 반면, 높이 1,000mm인 소재는 HR=50%까지 원주방향으로 균일한 변형을 나타내고 있으므로 시제품 제작에 적합한 초기 소재 치수를  $\varnothing 1,000 \times H2,500\text{mm}$ 으로 선정하였다.



(a) Billet size :  $\varnothing 1,000 \times H3,000\text{mm}$



(b) Billet size :  $\varnothing 1,000 \times H2,500\text{mm}$

Fig.2 Upsetting analysis

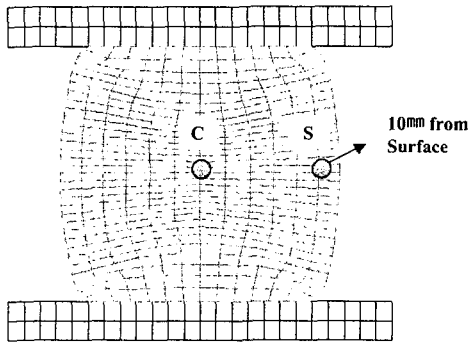


Fig.3 Stress calculation point

Table 1. Stress at the center and surface after upsetting

구분		Stress (MPa)	비고
C	$\sigma_m$	-14.84	
	$\sigma_z$	-33.64	
S	$\sigma_m$	-4.59	
	$\sigma_\theta$	16.36	인장
	$\sigma_z$	-28.79	

Fig.3과 Table 1은  $\varnothing 1,000 \times H 2,500\text{mm}$  소재의 업세팅 후 중심점과 표면부에서 10mm 내부의 위치에서 응력을 나타내고 있다. 12%Cr강 소재는 단조시 표면 크랙이 발생하기 쉬우므로 업세팅 시 발생하는 표면에서의 원주방향 인장응력에 유의를 해야 한다.

### 3.2.2 코깅 공정

업세팅에 이어지는 코깅 공정의 단조 조건을 설정하기 위하여 V-die와 Flat die 사용시 차이점을 비교하였다. 단조 순서는 Fig.4와 같이  $0^\circ$ 에서 300mm를 압하 한 뒤 소재를  $90^\circ$  회전하여 다시 300mm를 압하하였다.

Fig.5는 Flat die와 V-die로 300mm 압하가 진행되는 동안 소재 중심부의 압력 상태를 나타내고 있다.  $0^\circ$  위치의 초기 50mm Stroke에서 Flat die 경우 잠시 압축 응력이 나타나지만, 그 이후 100mm까지 모든 조건에서 중심부에 인장 응력이 증가하다가 150mm 이후부터는 압축응력이 작용하는 것으로 조사되었다.

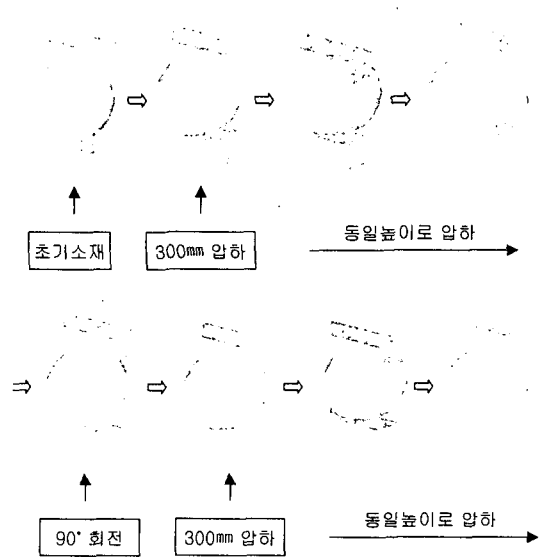


Fig.4 Cogging process of forging process

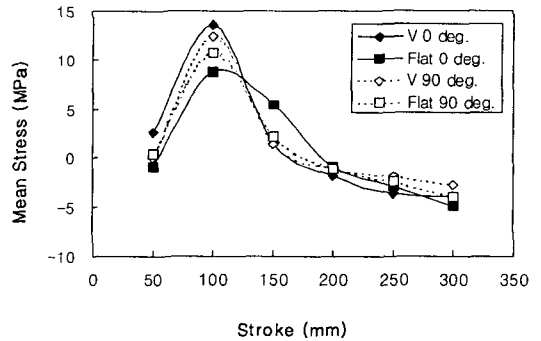


Fig.5 Mean stress curve of ingot center during cogging

Fig.6은 코깅 시 표면 크랙을 검토하기 위하여 압하량에 따른 소재 표면부의 축방향 응력 상태를 나타내고 있다. 표면부 위치는  $0^\circ$ 의 경우 Die와 접하는 면이 되며,  $90^\circ$  회전 시는 Die와 직각인 자유 표면 상태가 된다. 따라서,  $0^\circ$  위치에서는 압하시 V-die와 Flat die 모두 압축 응력이 계속 발생하여 크랙의 가능성은 거의 없다고 할 수 있다. 하지만,  $90^\circ$  회전 후 압하 시는  $0^\circ$  때의 Die 접촉면이 자유 표면 상태가 되므로 인장 응력의 가능성이 높아진다.  $90^\circ$  회전 후 축방향 응력 결과를 살펴보면 100mm Stroke까지는 압축 응력이 작용하

지만, 그 이후 120mm를 기점으로 150mm까지 응력이 계속 상승하여 인장 응력으로 변하는 것을 알 수 있으며 Flat die보다는 V-die의 상승폭이 훨씬 큰 것으로 조사되었다. 150mm 이상의 Stroke에서 소재 표면부에 작용하는 압축 응력값은 Die와 상관없이 대체로 유사한 값을 나타내고 있으므로 표면 크랙 측면에서는 150mm 이하의 압하량이 적정한 것으로 조사되었다. 따라서, 표면 크랙을 방지하기 위해서는 V-die보다는 Flat-die 작업이 더 유리하며 120~150mm 이하의 압하량을 유지하는 것이 바람직한 것으로 조사되었다.

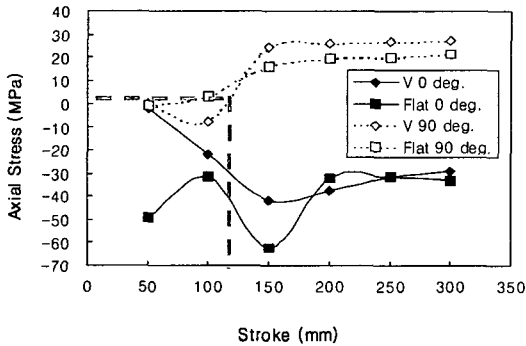


Fig.6 Axial stress curve of ingot surface during cogging

#### 4. 시제품 단조

해석 결과를 바탕으로  $\text{Ø}1,000 \times \text{H}2,500\text{mm}$  ESR Ingot 소재를 제작하여 4,200톤 유압프레스에서 시제품 단조를 실시하였다.

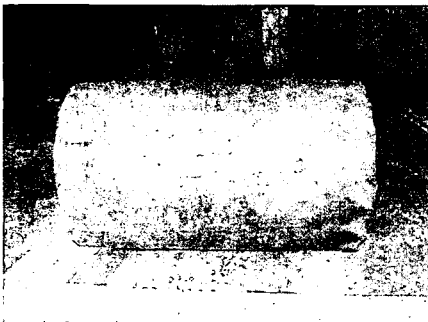


Fig.7 Test product after cogging

업세팅의 경우 초반에 정상 속도로 압하 하다가 그 이후에 속도를 점차 줄여 가는 방식을 취하였다. 코깅의 경우 초반 1회 압하시 120mm 미만의 압하를 실시한 후 중심부 단조 효과를 주기 위하여 압하량을 높였다. Fig.7은 시제품의 1차 코깅 후 단조 표면을 나타내고 있는데, 단조 결과 외부 단조 크랙이 없는 양호한 상태의 단조 시제품을 얻을 수 있었다.

#### 5. 결론

USC 발전용 HIP Rotor 단조를 위하여 업세팅과 코깅 공정의 최적 단조 조건을 해석하였다. Rotor 소재인 개량된 12%Cr강은 단조 중 크랙에 민감하므로 업세팅 시 소재 중심부 바깥면의 인장응력을 최소화 하도록 업세팅 속도를 조절해야 한다. 코깅 작업은 Flat die를 이용하여 초반에 120mm 미만의 압하를 실시하고, 이후에 내부 중심부의 단조 효과를 높이기 위하여 압하량을 높여 단조 작업을 진행하는 것이 바람직한 것으로 조사되었다. 해석 결과를 바탕으로 12%Cr강의 ESR ingot을 제작하여 시제품 단조를 실시하였으며 단조 시제품은 표면 크랙이 없는 양호한 상태의 제품을 얻을 수 있었다.

#### 참고 문헌

- [1] K-H Schonfeld, H. Wagner, 1998, Experience in manufacturing and mechanical properties of turbine rotor forgings and disc in improved 10% CrMoWVNbN steel, ARSPG, April, pp. 375~385
- [2] W. Meyer, G. Zeiler, R. Bauer, 1997, Influence of various melting processors on the properties of 10% Cr-steels for application at temperatures up to 600 °C, 13th IFM, pp.121~130
- [3] D. Y. Yang, C. Y. Park, J. R. Cho, 1997, Process design of defect-free cogging for large rotor forgings, 13th IFM, pp.93~102
- [4] Wang Zutang, Ren Meng, 1993, Investigation of the mechanism of void closing and optimization of forming procedure for large forgings, Proc. of the 4th international conference on technology of plasticity, pp. 1181~1186