

대형 튜브시트 단강품의 자유단조

김동권* · 김재철* · 김영득* · 김동영* · 김정태*

Open Die Forging of Steel Forgings for the Large Tubesheet

D. K. Kim, J. C. Kim, Y. D. Kim, D. Y. Kim and J. T. Kim

Abstract

Steam Generator is one of the most important structural part of nuclear power plant. It is manufactured by various steel forgings such as shell, head, torus and tubesheet. These steel forgings have been made by open die forging process. After steel melting and ingot making, open die forging has been carried out to get a good quality which means high soundness and homogeneity of the steel forgings by using high capacity hydraulic press. This paper introduced the open die forging process and manufacturing experience of large tubesheet forgings which will be used for the steam generator of 1,400MW nuclear power plant.

Key Words : Open Die Forging (자유단조), Tubesheet(튜브시트), Steel Forgings(단강품), Steam Generator(증기발생기), Nuclear Power Plant(원자력발전소)

1. 서론

원자력 발전소는 원자로내의 원자핵이 분열할 때 발생하는 열에너지를 이용하여 증기발생기에서 생산된 증기의 힘으로 터빈을 회전시킴으로써 발전기를 통해 전기를 얻게 된다.

이러한 기능을 하는 증기발생기는 고온 고압의 가혹한 조건에서도 견딜 수 있도록 두꺼운 강으로 제조한다. Fig. 1 은 1,400MW 원자력 발전소용 증기발생기의 개략적인 형상을 보여준다. 증기발생기는 원통 또는 CONE 의 형태를 가진 SHELL 과 TORUS, 반구형상을 가진 HEAD 와 원판 형태를 가진 TUBESHEET 등의 4 가지 주요 단강품으로 구성된다. 이러한 SHELL, HEAD, TORUS 와 TUBESHEET 는 고온 고압의 조건에서도 견딜 수 있도록 자유단조 방법에 의하여 충분한 강도와 인성을 가진 단강품으로 제조하게 된다.

특히, TUBESHEET 는 증기발생기 내부의 아래쪽에 위치하고 있는 대형 SHEET 형상의 단강품으로 해외 단조업체에서도 여러가지의 제조사례를 보고하고 있다[1,2]. TUBESHEET 단강품은 다른 단강품들과 마찬가지로 1,000MW 에서 1,400MW 로 원자력발전소의 용량이 격상되면서 직경이 약 4,500mm 에서 5,500mm 로 증가되었다. 당사에서는 본 TUBESHEET 를 제조하는데 필수적인 설비인 직경 4,500mm 인 하부 Turning Die 를 보유하고 있기 때문에 본 설비를 최대한 활용하면서 형상과 품질을 확보하기 위하여 공정개발을 추진하였다.

본 논문에서는 이러한 대형 TUBESHEET 단강품을 자유단조로 제조하는 방법에 대하여 개괄적으로 설명하고, 또한 주요한 단조작업 공정을 설계하여 실제 제품에 적용한 사례에 대하여 구체적으로 기술하였다.

* 두산중공업 기술연구원

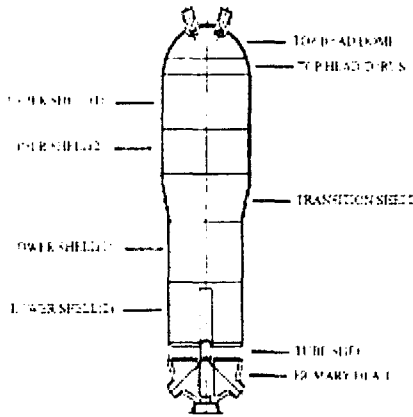


Fig. 1 Steam Generator of 1,400MW Nuclear Power Plant

2. TUBESHEET의 전체 단조과정

Fig. 2는 TUBESHEET의 전체적인 단조작업 공정의 흐름을 보여주고 있다. TUBESHEET의 단조작업 공정은 총 8차의 단조로 구성되어 있으며, 각각의 단조공정마다 가열과 단조작업을 반복 수행하여 최종적인 형상을 제조하게 된다.

전체적인 공정의 흐름을 살펴보면 다음과 같다. 우선 2차단조인 1st Upsetting 후에 3차단조인 2nd Cogging & Cutting 작업을 한 후 다시 4차단조인 2nd Upsetting 작업을 실시하게 된다. 4차단조인 2nd Upsetting 작업을 하게 되면 Upsetting 시의 배불림 현상 때문에 원판의 끝단부가 직선으로 나오지 않고 곡선의 형태로 나오기 때문에 이를 직선의 형태로 유도하기 위하여 상부에만 Flat Die를 이용하여 단조 작업을 하게 된다. 이렇게 작업을 하면 상부다이 쪽의 마찰이 작기 때문에 원판의 상부만 반경방향으로 늘어나게 되어서 둥근 형태의 단부를 직선의 형태로 만들 수가 있다. 5차단조인 1st Flattening 작업에서 한 면을 맞춘 후에 제품을 Turn-Over한 후에 6차단조인 2nd Flattening 작업을 수행하여 반대면도 동일하게 직선의 형태로 늘려서 가운데 부분의 배불림 현상이 조금 완화된 형태를 만들게 된다. 이후에 최종적으로 원하는 직경을 가진 SHEET 형상을 얻기 위하여 바깥쪽을 먼저 성형한 후 안쪽을 성형하는 방법을 적용하여 최종형상을 얻게 된다.

(1) 1st Cogging & Cutting	(2) 1st Upsetting
(3) 2nd Cogging & Cutting	(4) 2nd Upsetting
(5) 1st Flattening	(6) 2nd Flattening
(7) 3rd Flattening	(8) 4th Flattening

Fig. 2 Typical Forging Process of Tubesheet for 1,400MW Nuclear Power Plant

다음 절에서는 각각의 단조공정 단계별로 공정의 설계를 위한 검토 내용과 단조작업상 극복해야 할 과제에 대하여 좀더 자세히 부연 설명하였다.

3. TUBESHEET의 세부 단조과정

대형 단강품의 제조를 위해서는 우선 전기로에서 여러가지의 쇳조각을 넣은 후 고온의 열을 가하여 쇳물을 만드는 제강 작업을 한 후, 이 쇳물을 일정한 형태를 가진 주형에 주입해서 일정 시간을 경과시킨 후 인발작업을 실시하여 딱딱한 형태를 가진 잉곳을 만들게 된다.

이렇게 하여 만들어진 잉곳은 주조조직 상태이기 때문에 조직이 치밀하지 못하고 또한 응고하면서 잉곳의 내부에 편석이나 공극(Shrinkage)과 기공이 혼재하여 있는 불건전한 상태가 된다. 이렇게 불완전한 상태의 잉곳을 충분히 가열한 후 대형의 용량을 가진 프레스로 단조작업을 수차례 실시함으로써 치밀한 조직을 가지게 되고 또한 내부의 결함도 없는 건전한 단조품이 만들어진다. 단조작업이 끝난 후 요구하는 물성치를 만족시키기 위하여 열처리 작업을 거치게 되면 최종적으로 완전한 단강품이 된다[3].

3.1 1 차단조(1st Cogging & Cutting)

1차단조에서는 앞의 제강과 조괴 공정에서 만들어진 잉곳을 인수하여 제품의 형상을 만들어가는 가장 첫 단계의 공정이 된다. Photo 1은 1차단조를 위해서 1차가열 직후에 가열로에서 취출중인 잉곳의 모습을 보여주고 있다.

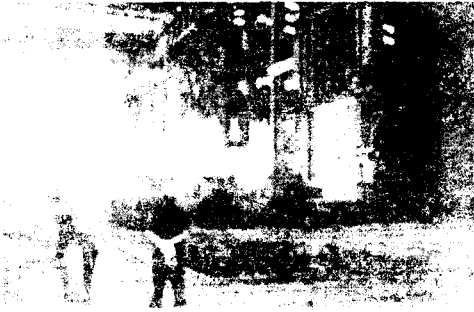


Photo 1 Ingot after 1st Heating for the 1st Forging

우선 만들어진 잉곳을 Handling을 쉽게 하기 위하여 잉곳 상부의 비건부인 Hot Top부를 이용하여 프레스의 매니플레이터(Manipulator)로 강괴를 잡을 수 있을 정도의 크기로 Holder부를 만든다. 또한, 잉곳 몸통부는 다음 공정인 Upsetting 작업을 위하여 긴 원통형으로 만들게 되는데, 이때 주의해야 할 점은 잉곳의 최외곽 표면은 볼드에서 응고시 가장 급냉된 Chill층으로써 연신율이 상당히 떨어지는 취약한 부위이기 때문에 초기에는 압하량을 적게 주면서 최대한 잉곳 표면 Crack의 발생을 억제한 후에 서서히 압하량을 늘려가면서 원하는 형상까지 단조작업을 해야 한다.

3.2 2 차단조(1st Upsetting)

2차단조에서는 단조품의 내부에 단조효과를 부여하기 위하여 Upsetting 작업을 실시하게 된다. 일반적으로 원통의 축형상의 제품을 만들면서 소재내부에 단조효과를 주기위한 작업은 크게 Cogging 작업과 Upsetting 작업으로 나누어진다. 여기서, Cogging 작업은 단조품의 직경을 줄이면서 길이를 늘이는 작업을 말하고, 반대로 Upsetting 작업은 직경을 늘이면서 길이를 줄이는 작업을 말한다. 이러한 Upsetting 작업은 Cogging 작업만으로는 단조품의 내부에 충분한 단조효과를 부여할 수 없을 경우에 실시하게 된다. Upsetting 작업을 실시하게 되면 강괴의 내부

조직이 치밀해지고 내부 기공과 공극이 압착되어 건전한 상태를 얻게 된다. 그러나, Upsetting시 상부와 하부의 금형과 닿게 되는 부분은 변형이 거의 없는 Dead Metal Zone이 형성되게 되므로 이를 유의하여 Upsetting Die의 형상과 압하량 등을 설정하여야 한다. Photo 2는 Upsetting 작업을 진행중인 단조품의 모습을 보여주고 있다.

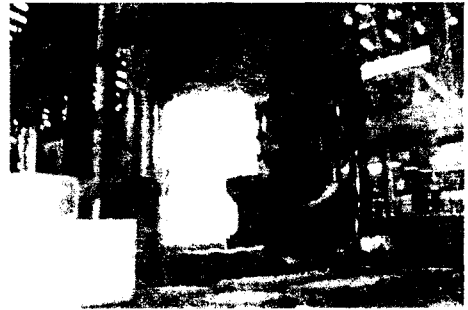


Photo 2 1st Upsetting Process

3.3 3 차단조(2nd Cogging & Cutting)

3차단조에서는 2차단조에서 Upsetting된 제품을 다시 한번 Upsetting 작업을 실시하기 위한 전단계로서 Upsetting을 위한 Upsetting Ratio를 확보하기 위하여 다시 한번 Cogging 작업을 실시하는 단계이다. 일반적으로 1회의 Upsetting 작업으로 내부 품질을 충분히 확보하기 어려운 경우에는 이와 같이 2회의 Upsetting 작업을 실시하게 된다. 2회째의 Upsetting 작업후에는 상하부의 Handling을 위한 Holder부가 필요없기 때문에 상하의 Holder를 Cogging 작업후에 즉시 절단하여 제거하게 된다.

자유단조공정을 설계함에 있어서 고려해야 하는 다른 한가지 중요한 점은 제품의 내부에 존재하는 기공이나 공극을 압착시키기 위하여 단조용 다이의 선정과 압하량 등에 세심한 주의를 기울여야 한다는 점이다. 일반적으로 소재 내부에 존재하는 기공의 압착에 영향을 주는 인자로는 기공 주위의 유효변형률과 정수압응력의 시간적분값이 크게 관련되어 있다고 알려져 있다. 유효변형률은 매 계산시간마다 누적되는 값이지만 정수압응력은 누적되지 않기 때문에 유효변형률과 같이 누적되는 값이 필요하기 때문에 정수압응력의 시간적분값(IGm)은 다음과 같이 정의된다[4].

$$IGm = \int_0^t (\sigma_m / \bar{\sigma}) dt \quad (1)$$

여기서, σ_m : mean stress
 $\bar{\sigma}$: equivalent stress

3.4 4 차단조(2nd Upsetting)

4차단조에서는 앞에서 설명한 바와 같이 제품 내부에 충분한 단조효과를 부여하기 위하여 2회째의 Upsetting 작업을 실시하는 단계이다. Upsetting 작업을 실시하기 전에 충분한 단조효과를 부여하기 위한 Upsetting Ratio, Upsetting 전후의 제품형상, Upsetting시 제품의 온도유지를 위한 방열커튼의 설치여부, Upsetting 하중 등에 대하여 충분한 검토를 거친후 작업을 실시하여야 한다.

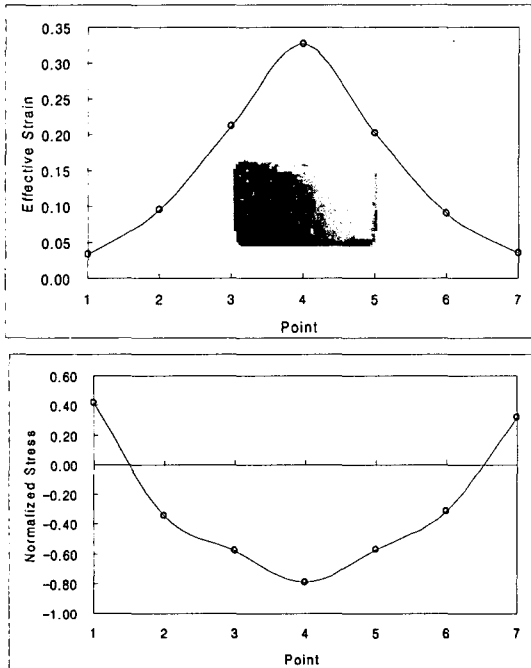


Fig. 3 Effective Strain and Integrated Hydrostatic Stress Distribution after 1400 Flat Die Forging

3.5 5 차단조(1st Flattening)

5차단조에서는 앞에서 Upsetting된 제품의 직경을 더욱 늘리면서 높이를 줄이기 위해서 Flattening 작업을 하는 단계이다. 일반적으로 Upsetting 작업을 하게 되면 제품과 상하부 금형의 마찰로 인하여 제품의 가운데 부분이 볼록하게 되는 배불림 현상이 생기게 된다. 따라서, Flattening 작업에서는 상하부의 직경이 작은 부

분만 주로 늘려서 끝단부가 직선이 되게끔 단조 작업을 실시하게 된다. 즉, 5차단조에서 하부에 회전을 할 수 있게 제작되어 있는 Turning Die 위에 Upsetting된 제품을 놓고 상부 Die로 압하량을 조절하면서 작업을 하게 되면 위쪽만 직경 방향으로 소재를 늘리기 때문에 위쪽과 중심부위는 어느 정도 직선의 형태를 갖출 수 있게 된다.

Fig. 3은 5차단조시에 1,400mm의 폭을 가진 상부다이로 중심부를 압하할 때의 중심라인을 따라서 받게 되는 유효변형률과 정수압응력의 시간적분값을 보여주고 있다.

3.6 6 차단조(2nd Flattening)

6차단조에서는 5차단조에서 Flattening된 제품이 상부만 직선형태가 나오기 때문에 하부를 똑같이 직선형태를 만들기 위하여 5차단조에서 나온 제품을 뒤집은 후에 같은 방식으로 작업을 하게 된다.

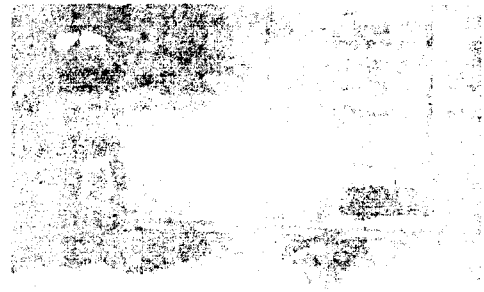


Photo 3 Tubesheet before Turn-over

실제 작업은 5차단조와 동일하지만 이를 뒤집은 작업이 상당히 위험하기 때문에 철저한 준비 과정을 통해 안전하게 작업을 하여야 한다. Photo 3은 Turn-over 작업전의 모습을 보여주고 있다.

3.7 7 차단조(3rd Flattening)

7차단조에서는 6차단조에서 만들어진 제품의 직경이 최종 목표직경인 5,500mm에는 미치지 못하기 때문에 직경을 더욱 늘리기 위해서 작업하는 공정이다. 현재 당사에서는 Flattening 작업을 위한 하부 Turning Die의 작업 가능한 최대직경이 4,500mm이기 때문에 6차단조후의 제품의 직경은 약 4,500mm 정도가 된다. 따라서, 7차와 8차단조에서는 4,500mm 정도인 직경을 5,500mm로 늘이는 방법에 대한 고안이 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 1,400MW 원자력 증기발생기에 들어가는 대형 TUBESHEET 단강품을 자유단조로 제조하는 방법에 대하여 개괄적으로 기술하였다.

TUBESHEET 단강품은 대형의 원판 형태를 가지고 있는 단강품으로써, 이러한 대형의 제품을 품질이 우수하고 원하는 형상을 만족하는 제품을 만들기 위하여 세부적인 단조작업 공정을 개발하고, 이를 실제 작업을 통하여 적용한 예에 대하여 소개하였다.

본 TUBESHEET 단강품의 단조공정 개발을 통하여 1,400MW 원자력 증기발생기용 TUBESHEET 단강품을 안정적으로 공급할 수 있는 기반 기술을 확보할 수 있는 계기가 되었다.

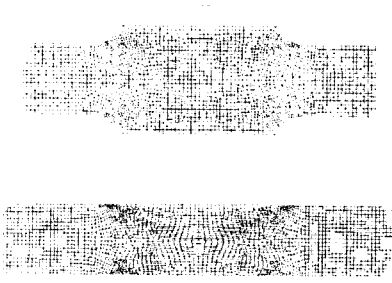


Fig. 4 Forging Simulation of Tubesheet

Fig. 4에는 이러한 방법에 대한 고안을 위하여 단조공정 Simulation을 통하여 여러가지 방법에 대한 성형성과 하중 등을 평가하여 실제공정을 설정하는 과정을 보여주고 있다.

3.8 8 차단조(4th Flattening)



Photo 4 Tubesheet after 8th Forging

8차단조에서는 7차단조에서 바깥쪽을 우선적으로 늘였기 때문에 가운데 부분을 누르기 위한 마지막 작업으로서 7차와 8차단조를 위해서는 단조작업이 가능한 적절한 경계부의 직경을 설정하는 것이 매우 중요하다. Fig. 7은 최종단조인 8차단조 후에 UT검사를 실시하는 모습을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

- (1) I. Poitault et al., 1994, "Improved metallurgical and mechanical properties through simulation of forging process", Proceeding of the 12th Int'l Forgemasters Meeting, Sep. 11~17, Chicaco, Il., USA.
- (2) C. Benhamou et al., 1997, "Improving knowledge of the metallurgical features of large forgings by optimizing the experimental test program", Proceeding of the 13th Int'l Forgemasters Meeting, pp. 83~96, Oct. 12~16, Pusan, Korea.
- (3) 조종래, 김동권, 이정호, 이부윤, 이명열, 1995, "수치해석 기법을 이용한 발전용 단조 로타의 제조공정 분석 및 공정설계", 단조기술의 진보, 이동녕, 박종진 편, pp. 25~34.
- (4) Tanaka, M. et al, 1986, "Factors contributing to crushing of voids during forging", J. of the JSTP, Vol. 27, No. 306, pp.852~859.