

# 원자력 발전소용 대형 튜브시트 단강품의 개발

김동권\* · 김영득\* · 김동영\*

## Development of the Large Tubesheet Forgings for Nuclear Power Plant

D. K. Kim, Y. D. Kim and D. Y. Kim

### Abstract

Large tubesheet forgings of the steam generator for the 1,400MW nuclear power plant has been developed. Steam Generator is one of the most important structural part for 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 forging process development 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.

이와 같이 원자력 발전소를 구성하는 핵심 설비 중의 하나인 증기발생기는 고온 고압의 가혹한 조건에서도 견딜 수 있도록 두꺼운 강으로 제조한다. Fig. 1은 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 공정 개발과 시제품의 제작 및 평가를 추진하여 제품 개발을 완료하였다.

본 논문에서는 이러한 대형 TUBESHEET 단강품

\* 두산중공업 기술연구원

을 개발하는 과정에서 자유단조로 제조하는 방법에 대하여 개괄적으로 설명하고, 또한 주요한 단조작업 공정을 설계하여 시제품을 제작한 사례에 대하여 구체적으로 기술하였다.

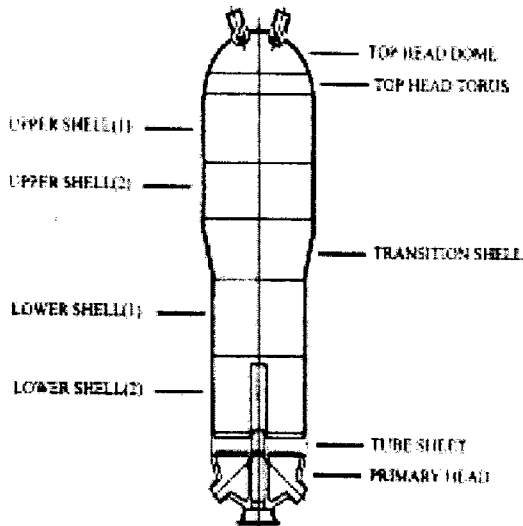


Fig. 1 Steam Generator of 1,400MW Nuclear Power Plant

## 2. 단강품의 제조공정

일반적인 대형 단강품의 제조 시에 사용되는 방법을 Fig. 2에서 보여 준다.

대형 단강품의 제조를 위해서는 염기성 전기로에서 염선된 고철을 넣어 산화 정련 작업을 한 후, 2차 정련로에서 환원 정련 및 합금 조성을 조정하고, 일정한 형태를 가진 주형에 주입해서 잉곳을 만들게 된다.

이렇게 하여 만들어진 잉곳은 구조조각 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 만들어 진다. 단조작업이 끝난 후 요구하는 물성치를 만족시키기 위하여 열처리 작업을 거치게 되면 최종적으로 완전한 단강품이 된다[3].

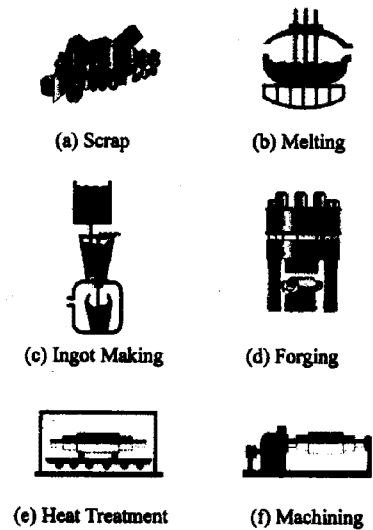
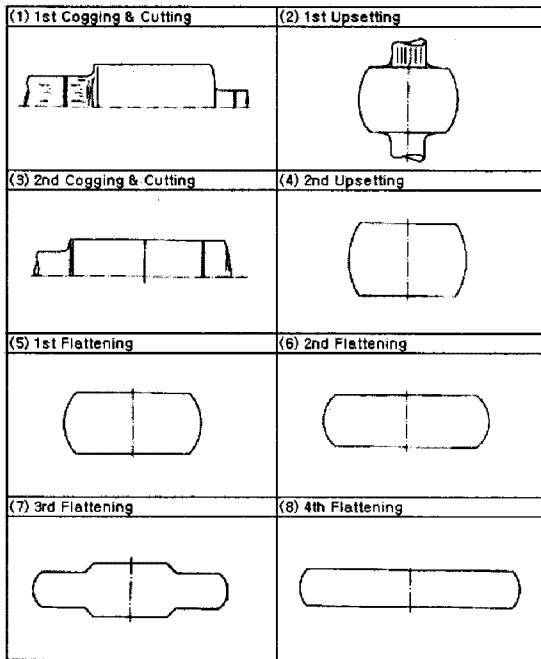


Fig. 2 General Manufacturing Sequence of Large Steel Forgings

## 3. TUBESHEET 단조공정의 개발

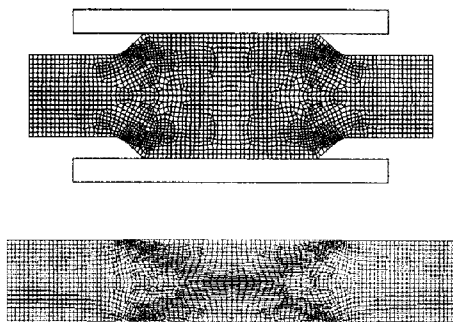
Fig. 3은 TUBESHEET의 전체적인 단조작업 공정의 흐름을 보여주고 있다. TUBESHEET의 단조작업 공정은 여러 차례의 단조로 구성되어 있으며, 각각의 단조공정마다 가열과 단조작업을 반복 수행하여 최종적인 형상을 제조하게 된다.

전체적인 공정의 흐름을 살펴보면 다음과 같다. 우선 2차단조인 1<sup>st</sup> Upsetting 후에 3차단조인 2<sup>nd</sup> Cogging & Cutting 작업을 한 후 다시 4차단조인 2<sup>nd</sup> Upsetting 작업을 실시하게 된다. 4차단조인 2<sup>nd</sup> Upsetting 작업을 하게 되면 Upsetting 시의 배블립 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 1<sup>st</sup> Flattening 작업에서 한 면을 맞춘 후에 제품을 Turn-Over한 후에 6차단조인 2<sup>nd</sup> Flattening 작업을 수행하여 반대면도 동일하게 직선의 형태로 늘려서 가운데 부분의 배블립 현상이 조금 완화된 형태를 만들게 된다. 이후에 최종적으로 원하는 크기를 가진 SHEET 형상을 얻기 위하여 바깥쪽을 먼저 성형한 후 안쪽을 성형하는 방법을 적용하여 최종형상을 얻게 된다.



**Fig. 3 Typical Forging Process of Tubesheet for 1,400MW Nuclear Power Plant**

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



**Fig. 4 Forging Simulation of Tubesheet**

## 4. TUBESHEET 시제품의 제조

### 4.1 시제품의 제조

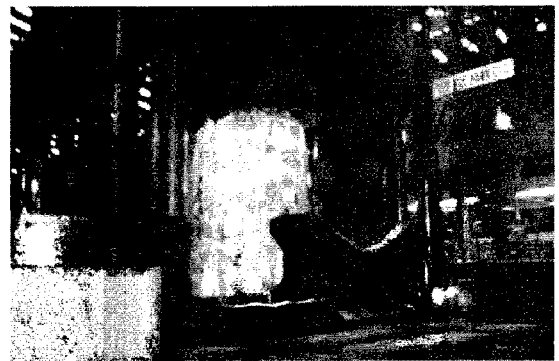
개발된 단조공정의 타당성을 검증하고, 요구물성치의 확보 여부를 확인하기 위하여 시제품의 제조를 추진하였다. 시제품의 제조 과정은 우선 전기로에서 쇳물을 끓인 다음에 대형 잉곳 몰드

에 주입하여 응고시킴으로써 대형 Tubesheet 의 제조용 잉곳을 제조하였다. 이렇게 하여 제조된 잉곳을 수차례의 가열과 단조 작업을 반복함으로써 최종적으로 원하는 형상을 가진 대형 Tubesheet 단강품을 제조하였다. 이후에 요구되는 물성치를 확보하기 위하여 열처리 작업을 수행하였다.

아래에서는 이러한 대표적인 공정인 제강, 조괴, 단조와 열처리 공정 중에서 핵심적으로 개발한 단조공정에 대하여 세부적으로 적용되는 과정을 기술하였다.

1차단조(1<sup>st</sup> Cogging & Cutting)에서는 앞의 제강과 조괴 공정에서 만들어진 잉곳을 인수하여 제품의 형상을 만들어가는 가장 첫 단계의 공정이 된다.

2차단조(1<sup>st</sup> Upsetting)에서는 단조품의 내부에 단조효과를 부여하기 위하여 Upsetting 작업을 실시하게 된다. 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. Photo 1은 Upsetting 작업을 진행중인 단조품의 모습을 보여주고 있다.



**Photo 1 1<sup>st</sup> Upsetting Process**

3차단조(2<sup>nd</sup> Cogging & Cutting)에서는 2차단조에서 Upsetting된 제품을 다시 한번 Upsetting 작업을 실시하기 위한 전단계로서 Upsetting을 위한 Upsetting Ratio를 확보하기 위하여 다시 한번 Cogging 작업을 실시하는 단계이다. 2회째의 Upsetting 작업후에는 상하부의 Handling을 위한 Holder부가 필요없기 때문에 상하의 Holder를 Cogging 작업후에 즉시 절단하여 제거하게 된다.

4차단조(2<sup>nd</sup> Upsetting)에서는 제품내부에 충분

한 단조효과를 부여하기 위하여 2회째의 Upsetting 작업을 실시하는 단계이다.

5차단조(1<sup>st</sup> Flattening)에서는 Upsetting된 제품의 직경을 더욱 늘리면서 높이를 줄이기 위해서 Flattening 작업을 하는 단계이다.

6차단조(2<sup>nd</sup> Flattening)에서는 5차단조에서 Flattening된 제품이 상부만 직선형태가 나오기 때문에 하부를 똑같이 직선형태를 만들기 위하여 5차단조에서 나온 제품을 뒤집은 후에 같은 방식으로 작업을 하게 된다.

7차단조(3<sup>rd</sup> Flattening)에서는 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 6차단조 후의 제품의 직경은 약 4,500mm 정도가 된다.

8차단조(4<sup>th</sup> Flattening)에서는 7차단조에서 바깥쪽을 우선적으로 늘였기 때문에 가운데 부분을 누르기 위한 마지막 작업으로서 7차와 8차단조를 위해서는 단조작업이 가능한 적절한 경계부의 직경을 설정하는 것이 매우 중요하다. Photo 2는 최종 단조공정인 8차단조후에 UT검사를 실시하는 모습을 보여주고 있다.



Photo 2 Tubesheet after 8<sup>th</sup> Forging

#### 4.2 시제품의 평가

최종 제품의 형상은 수차례의 단조작업을 거쳐서 완성되지만, 요구되는 물성치는 반드시 열처리 작업을 거침으로써 확보할 수 있다.

대형 Tubesheet 단강품의 주요 요구특성은 고온에서의 충분한 강도와 인성을 갖도록 요구하고 있다. 본 시제품의 제작 시에 Tubesheet 단강품의 한쪽에 물성시험용 시편이 부착되어 있으며, 이러한 시편의 채취 후에 인장시험, 충격시험 등을 통한 물성시험 결과 요구하는 물성치를 충분히 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 1,400MW 원자력 증기발생기에 들어가는 대형 TUBESHEET 단강품을 개발한 사례에 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 시제품 제작을 통하여 개발을 완료하였다.

본 TUBESHEET 단강품의 단조공정 개발 및 시제품 제작을 통하여 1,400MW 원자력 증기발생기용 TUBESHEET 단강품을 안정적으로 공급할 수 있는 기술을 확보할 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) I. Poitroult et al., 1994, "Improved metallurgical and mechanical properties through simulation of forging process", Proceeding of the 12<sup>th</sup> 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 13<sup>th</sup> 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.