

대형 압력용기 단강품의 자유단조

김동권*, 김재철, 김영득, 김동영 (두산중공업 기술연구원)

Open Die Forging of Steel Forgings for the Large Pressure Vessel

D.K. Kim*, J.C. Kim, Y.D. Kim, D.Y. Kim (R&D Center, Doosanheavy Industries)

ABSTRACT

Steam Generator is one of the most important structural part of nuclear power plant. It is manufactured by welding process of various steel forgings such as shell, head, torus and tube sheet. 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 open die forging status and investigated forging method of the ultra large steel forgings which is used for the steam generator of 1000MW nuclear power plant. For the same thing, the type of steel forgings consisting steam generator is classified by shell, head, torus and tube sheet. And corresponding forging processes of the steel forgings have been investigated.

Key Words : open die forging(자유단조), steam generator(증기발생기), ultra-large forgings(초대형 단강품)

1. 서 론

원자력 발전소는 원자핵이 분열할 때 발생하는 열에너지를 이용하여 증기를 생산하고, 이렇게 생산된 증기의 힘으로 터빈을 회전시킴으로써 발전기를 통해 전기를 얻게 된다. 원자력 발전소용 원자로의 형태는 여러 가지가 상용화 되고 있는데, 특히 1000MW 한국표준형 원자력 발전소는 가압경수로의 형태를 채택하고 있다. 가압경수로는 원자력 계통을 약 150 기압으로 가압함으로써 원자로 내에서 물이 끓지 못하도록 하며, 고온으로 가열된 물은 증기발생기내에서 열교환을 통해 급수를 증기로 만들게 된다. 이렇게 증기발생기에서 얻어진 증기의 힘으로 전기를 생산하게 된다.

이러한 기능을 하는 증기발생기는 고온 고압에 견딜 수 있도록 두꺼운 강으로 제조한다. Fig. 1은 1000MW 원자력 발전소용 증기발생기의 개략적인 형상을 보여준다. 전체적으로 볼 때 직경이 5.7m 정도이고 높이가 19.3m 정도이고 두께가 150mm 정도인 원통형의 압력용기와 같은 형태를 하고 있는데, 크기가 상당히 대형이기 때문에 여러 개의 부분품을 별도로 제조한 후 각각의 연결부를 용접함으로써 최종 형상을 가지게 된다. 증기발생기는 원

통 또는 Cone 의 형태를 가진 SHELL 과 TORUS, 동근 컵 형태를 가진 HEAD 와 원판 형태를 가진 TUBE SHEET 의 4 가지 주요 단강품으로 구성된다.

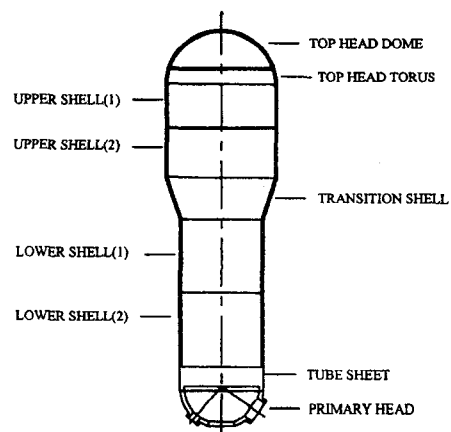


Fig. 1 Steam Generator of 1000MW Nuclear Power Plant

이러한 SHELL, HEAD, TORUS 와 TUBE SHEET 는 고온 고압의 조건에서도 견딜 수 있도록 자유단

조 방법에 의하여 충분한 강도와 인성을 가진 단강품으로 제조되게 된다. 본 논문에서는 이러한 여러가지의 초대형 단강품을 자유단조로 제조하는 방법에 대하여 개괄적으로 설명하고, 또한 주요한 단조작업 공정을 설계하는 방법에 대하여 기술하였다.

2. 단강품의 제조공정

Fig. 2는 대형 단강품의 일반적인 제조공정을 보여 준다. 먼저 전기로에서 여러가지의 쇳조각을 넣은 후 고온의 열을 가하여 쇳물을 만드는 제강작업을 한 후, 이 쇳물을 일정한 형태를 가진 주형에 주입해서 일정 시간을 경과시킨 후 인발작업을 실시하게 되면 딱딱한 형태를 가진 잉곳이 만들어진다. 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[1].

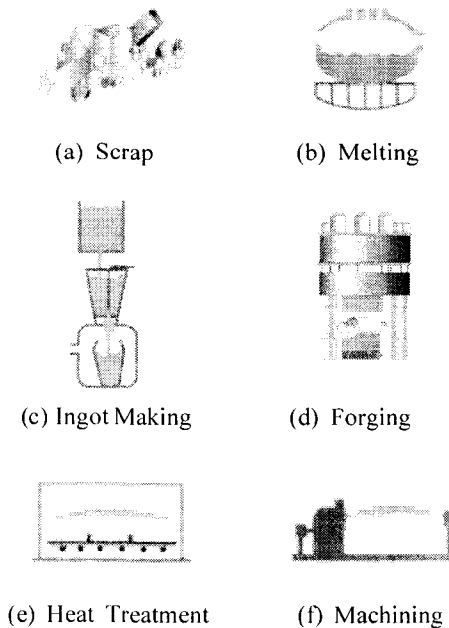


Fig. 2 Manufacturing Sequence of Steel Forgings.

3. SHELL의 자유단조

증기발생기에 들어가는 SHELL은 크게 2가지의 형태로 나누어진다. 하나는 원통의 형태를 가진 STRAIGHT SHELL이고 나머지 하나는 테이퍼진 형태를 가진 TRANSITION SHELL이다.

3.1 STRAIGHT SHELL

하나의 증기발생기에는 모두 4개의 원통 형태를 가진 STRAIGHT SHELL이 들어가게 된다. 그것은 증기발생기의 상부에 위치하고 있는 UPPER SHELL(1), (2)의 2개와 하부에 위치하고 있는 LOWER SHELL(1), (2)의 2개를 의미하는데, 아래에서는 4개의 STRAIGHT SHELL 중에서 가장 치수가 크고 중량물인 UPPER SHELL(1)에 대한 세부적인 단조작업 방법을 기술하고자 한다.

Fig. 3은 UPPER SHELL(1)의 일반적인 단조작업 공정을 보여 준다.

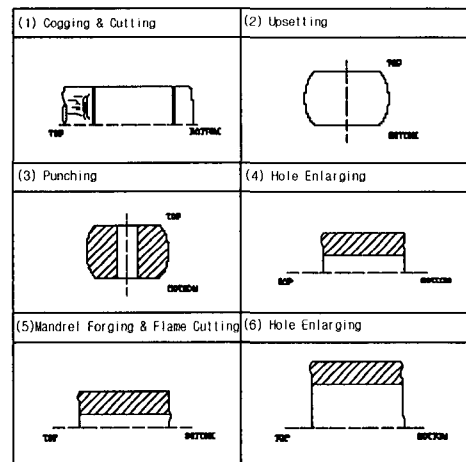


Fig. 3 Forging Process of UPPER SHELL(1)

UPPER SHELL(1)을 제조하기 위해서는 우선 주조로 강괴를 만든 후에 이를 충분한 단조작업이 가능하도록 적절한 단조온도까지 가열하여야 한다. 대형 강괴의 중심부까지 단조온도에 도달할 수 있도록 가열작업을 행한 후에 1차 Cogging 및 Cutting 작업을 행한다. 일반적으로 자유단조에서 소재내부에 충분한 단조효과를 주기 위한 작업[2]은 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. 일반적인 강괴에서는 강괴의 상부와 하부는 비건전부이기 때문에 1차 Cogging 작업

후에는 상부와 하부를 Discarding 하여 버리거나, 필요에 따라서는 Manipulator로 제품의 Handling 을 하기 위하여 Holder를 만들어 사용한 후 나중에 잘라서 버리기도 한다.

1차 Cogging 작업후에는 재가열 작업을 수행한 후에 Upsetting 작업을 실시한다. 일반적으로 Upsetting 작업은 Cogging 작업만으로는 단조품의 내부에 충분한 단조효과를 부여할 수 없을 경우에 실시하게 된다. 2차 Upsetting 작업 후에는 바로 단조품의 중심부에 구멍을 만들기 위하여 Punching 작업을 실시한다. 3차 Punching 작업 후에는 이후의 Mandrel Forging 작업을 할 수 있도록 중심부의 구멍을 Mandrel보다는 조금 크게 하는 Hole Enlarging 작업을 실시한다. 여기서, Mandrel 이라고 하는 것은 원통형의 Shell의 길이를 늘이기 위한 작업인 Mandrel Forging이나 직경을 늘이기 위한 작업인 Hole Enlarging 작업을 원활히 수행하기 위하여 Shell의 중심부에 설치하게 되는 원형의 Bar를 의미한다. 4차 Hole Enlarging 작업이 끝나면 단조품을 Mandrel에 끼운 후 길이를 늘이는 Mandrel Forging 작업을 실시한 후에 요구하는 길이에 맞게 양단에 Flame Cutting 작업을 실시한다. 5차 Mandrel Forging 작업을 실시한 후에 최종적으로 요구하는 단조치수를 내기 위하여 Hole Enlarging 작업을 다시 실시한다.

Hole Enlarging 작업에서는 원주의 전면에 걸쳐서 균일한 직경과 두께를 갖게끔 작업을 하여야 하기 때문에 사용하는 다이의 폭과 압하량 등이 매우 중요하게 된다[3]. Hole Enlarging 작업후에 양단부의 치수가 달라지게 되면 한쪽만 누르는 작업방법도 고려해야 한다. Hole Enlarging 작업을 통하여 최종적으로 원하는 단조치수를 얻게 되면 단조품의 요구물성치 확보를 위하여 열처리 작업을 거친 후 가공작업으로 최종 제품을 제조하게 된다.

3.2 TRANSITION SHELL

TRANSITION SHELL은 위쪽과 아래쪽의 직경이 다른 Cone 모양의 Shell 단조품을 말한다.

TRANSITION SHELL의 단조작업 공정은 전체적으로 볼 때 STRAIGHT SHELL과 유사하지만, 양쪽 직경이 다른 형태를 만들기 위하여 Hole Enlarging 작업을 수행한 후에 Mandrel Forging 작업을 수행할 때 Shell 양단부의 소재 두께가 차이나도록 작업하는 것이 중요하다. 이렇게 한 후 Hole Enlarging 작업을 실시하게 되면 Mandrel Forging 작업에서 미리 두껍게 만들어 놓은 쪽이 많이 늘어나기 때문에 직경이 커지게 된다. 물론, 최종적인 형상을 정확히 맞추기 위해서는 적절한 소재 두께의 설정이 중요하게 고려되어야 한다.

4. HEAD의 자유단조

하나의 증기발생기에는 둥근 컵 형태를 가진 HEAD가 2개 들어가게 되는데, 상부의 TOP HEAD DOME과 하부의 PRIMARY HEAD를 말한다. HEAD는 SHELL 튜와는 제품의 형태가 다르기 때문에 단조공정도 달라지게 된다. 아래에서는 2개의 HEAD 중에서 상대적으로 크기가 큰 TOP HEAD DOME의 단조공정에 대하여 설명하였다.

TOP HEAD DOME을 만들기 위해서는 우선에 얇은 원판 형태의 제품을 만든 후에 이를 굽히는 작업을 실시함으로써 원하는 원형의 컵 형태의 제품을 만들게 된다. 이를 세부적으로 살펴 보면 다음과 같다. 우선 얇은 원판 형태를 만들기 위하여 1차 Cogging 작업 후에 Upsetting 작업을 반복하면서 직경을 키우고 두께를 줄여 나간다. 일반적으로 Upsetting 시에는 직경이 클수록 단조하중이 증가하기 때문에 프레스의 용량이 가능한 한도까지 Upsetting 작업을 한 후에 용량이 초과할 때에는 상부에 폭이 얇고 길이가 긴 평다이를 사용하여 직경을 넓혀 나가는 작업을 수행하게 된다.

이러한 Flame Cutting 작업이 끝나면 다시 단조 온도까지 재가열한 후에 Dome Forming 용 하부 다이 위에 가열된 소재를 얹은 후에 반구형태의 Dome Forming 용 상부 다이로 Final 작업을 실시하는데, 이 때의 Final 작업은 원판을 굽히는 형태이기 때문에 Forming 이라는 용어를 사용하고 있다.

5. TORUS의 자유단조

TOP HEAD TORUS는 증기발생기의 상부에 위치하고 굽어진 TRANSITION SHELL 또는 도너츠의 형상을 가지고 있다. 일반적으로 이러한 형태의 TORUS는 TORUS의 상부에 위치하는 TOP HEAD DOME과 일체형으로 만들 수 없기 때문에 분리하여 제조하게 된다. 왜냐하면, 일체형의 TOP HEAD DOME을 만들기 위하여 원판을 만들 경우에 그 직경이 너무 크기 때문에 프레스의 Column 내에서 단조작업하는 것이 불가능하기 때문이다. 이러한 경우에는 특수한 장치를 사용하여 Colum 밖에서 단조작업이 가능하도록 별도의 구상이 필요하다.

전체적으로 볼 때 Hole Enlarging 작업까지는 일반적인 STRAIGHT SHELL의 단조공정과 유사하다. 그러나, 굽은 형태의 TORUS를 만들기 위해서는 Finish Forging에서 원하는 치수를 만족시킬 수 있도록 작업하는 것이 중요하며, 이러한 치수를 만족할 수 있도록 Hole Enlarging 시의 소재 형상을 결정하는 것도 중요하다.

6. TUBE SHEET 의 자유단조

앞에서 언급한 SHELL, HEAD 및 TORUS 는 증기발생기의 외벽을 형성하게 되는 단강품들이지만, TUBE SHEET 는 증기발생기의 안쪽에 설치되고 수많은 튜브들이 끝하게 되는 SHEET 의 형태를 하고 있는 단강품이다.

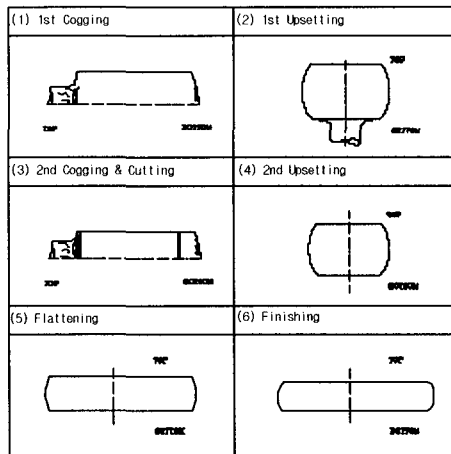


Fig. 4 Forging Process of TUBE SHEET

Fig. 4에서는 TUBE SHEET 의 단조작업 공정을 보여주고 있다. TUBE SHEET 의 단조작업 공정은 2차 Upsetting 후에 다시 3차 Cogging 작업을 한 후 다시 4차 Upsetting 작업을 실시하게 된다. 4차 Upsetting 작업을 하게 되면 Upsetting 시의 배불림 현상 때문에 원판의 끝단부가 직선으로 나오지 않고 곡선의 형태로 나오기 때문에 이를 직선의 형태로 유도하기 위하여 상부에 폭이 작고 길이가 긴 Narrow Die 를 사용하여 작업을 하게 된다. 이렇게 작업을 하면 상부다이의 폭이 작기 때문에 원판의 상부만 반경방향으로 늘어나게 되어서 둥근 형태의 단부를 직선의 형태로 만들 수가 있다. 5차 Flattening 작업에서 한 면을 맞춘 후에 제품을 Turn-Over 한 후에 6차 Flattening 작업을 수행하여 반대면도 동일하게 직선의 형태로 늘려서 최종적인 형상을 만들게 된다.

7. 결 론

본 논문에서는 1000MW 원자력 증기발생기에 들어가는 여러가지 초대형 단강품을 자유단조로 제조하는 방법에 대하여 개괄적으로 설명하였다. 이를 위하여 증기발생기를 구성하는 단강품의 종류를 크게 SHELL, HEAD, TORUS 및 TUBE SHEET 로 나누고 각각에 대한 세부적인 단조작업 공정과 중요

한 단조공정 설계 방법에 대하여 기술하였다.

참 고 문 헌

1. 조종래, 김동권, 이정호, 이부윤, 이명열, “수치해석 기법을 이용한 발전용 단조 로타의 제조공정 분석 및 공정설계”, 단조기술의 진보, 이동녕, 박종진 편, pp.25-34, 1995.
2. 조종래, 김동권, 이부윤, 양동열, “평다이를 사용하는 자유단조 공정의 최적 단조조건에 관한 연구”, 한국소성가공학회지 제 4 권 제 2 호, pp.141-150, 1995.
3. Takeshi MIYAZAWA and Hiromasa ISHIKAWA “Expansion Process of Ring Diameter in Enlarging Forging –Forming of Large Ring by Open-Die Forging I-”, Journal of the JSTP, Vol.34, no.394, pp.1252-1257, 1993.