

# 원자로용 대형 헤드 단강품의 개발동향

김동권\*, 김동영, 김영득 (두산중공업)

## Development Trend of the Large Head Forgings for Reactor Vessel

D.K.Kim \*, D.Y.Kim, Y.D.Kim (Doosan Heavy Industry, Inc.)

### Abstract

Reactor Vessel is one of the most important structural part of nuclear power plant. It is manufactured by various steel forgings such as shell, head and transition ring. Head forgings has 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 development trend of the open die forging process and manufacturing experience of large head forgings which can be used for the reactor vessel of nuclear power plant.

**Key Words** : Open Die Forging(자유단조), Head(헤드), Steel Forgings(단강품), Reactor Vessel(원자로), Nuclear Power Plant(원자력발전소)

### 1. 서 론

원자력 발전소는 원자로내의 원자핵이 분열할 때 발생하는 열에너지를 이용하여 증기발증기에서 생산된 증기의 힘으로 터빈을 회전시킴으로써 발전기를 통해 전기를 얻게 된다. 이러한 기능을 하는 원자로는 고온 고압의 가혹한 조건에서도 견딜 수 있도록 두꺼운 강으로 제조한다.

원자력 발전소용 원자로의 개략적인 형상을 Fig. 1에서 보여 주고 있다. 원자로는 설계자 및 제작자의 적용 방법에 따라 달라지지만 일반적으로 원통 형태를 가진 SHELL과 반구 형태를 가진 HEAD 및 굽어진 원통 형태를 가진 TRANSITION RING의 3가지 주요 단강품으로 구성된다. 이러한 SHELL과 HEAD 및 TRANSITION RING은 고온 고압의 조건에서도 견딜 수 있도록 자유단조 방법에 의하여 충분한 강도와 인성을 가진 단강품으로 제조하게 된다. 특히, HEAD는 원자로의 위쪽과 아래쪽에 위치하고 있는 대형 반구 형상의 단강품으로서 해외 단조 업체에서도 여러 가지의 제조 사례를 보고하고 있다[1].

본 논문에서는 이러한 원자로용 대형 단강품 중에서 HEAD 단강품에 대한 국내외 기술개발

동향에 대하여 소개하고자 하였다. 이를 위하여 우선 대형 HEAD 단강품을 자유단조로 제조하는 방법에 대하여 개괄적으로 설명하였다. 또한, 원자로의 안전성을 높이기 위하여 해외에서 개발을 추진하여 실제 제품에 적용한 사례와 이를 참고로 국내에서 추진해야 할 기술개발의 방향에 대하여 기술하였다.

## 2. HEAD 단강품의 제조 공정

일반적으로 대형 단강품을 제조하는 공정을 Fig. 2에서 보여 주고 있다. 우선 전기로에서 여러 종류의 쇳조각을 넣은 후에 고온의 열을 가하여 쇳물을 만드는 제강 작업을 하고, 이 쇳물을 일정한 형태를 가진 주형에 주입해서 일정 시간을 경과시킨 후에 인발하여 딱딱한 형태를 가진 잉곳이 만들게 된다. 이렇게 하여 만들어진 잉곳은 주조 조직 상태이기 때문에 조직이 치밀하지 못하고 또한 응고하면서 잉곳의 내부에 편석이나 공극(Shrinkage)과 기공이 혼재하여 있는 불건전한 상태이다. 이러한 불건전한 상태의 잉곳을 충분히 가열하여 편석을 어느 정도 해소시킨 후에 대형의 용량을 가진 프레스로 단조 작업을 수차례 실시한다. 이러한 단조 작업을 통하여 제품은 치밀한 조직을 가지게 되고 또한 내부에 결함도 없는 건전한 단조품이 만들어 진다. 단조 작업이 끝난 후에 요구되는 물성치를 만족시키기 위하여 열처리 작업을 거치게 되면 최종적으로 완전한 단강품이 제조되게 된다[2].

여러 종류의 단강품 중에서 특히 원자력 발전소용 HEAD 단강품의 일반적인 단조 공정을 Fig. 3 에서 개략적으로 보여 주고 있다. 우선 건전한 강괴를 제조한 후에 1 차 단조에서는 Upsetting Ratio 를 확보하기 위하여 Cogging 작업을 실시한다. Upsetting 작업인 2 차 단조 작업은 강괴의 내부에 충분한 단조 효과를 부여하기 위해서 수행된다. 3 차 단조는 Head Forming 작업을 위하여 둥근 원판 형태를 만드는 Disc Forging 작업이다. 이 작업은 Upsetting 이후에 발생된 중심 부근의 배불림(Barelling) 현상을 만회하기 위해서는 소재의 상부와 하부쪽 유동을 많이 유도해야 하기 때문에 일반적으로 Narrow Die 를 이용하여 작업을 수행하게 된다. 이 Narrow Die 는 폭이 좁고 길이가 긴 평다이의 형태를 취하게 된다. 4 차 단조는 Head Forming 작업이 이루어 진다. 이 Head Forming 작업에서는 3 차 단조에서 만들어진 원판을 둥근 형태를 가진 Supporting Ring 의 위에 올린 이후에 둥근 반구형의 상부 펀치를 이용하여 Head Forming 작업을 행하게 된다. 여기서 Forming 작업이라 함은 단조 효과를 부여하는 Forging 작업보다는 형상을 만드는 Forming 작업이라는 의미가 강하기 때문이다. 이러한 Head Forming 작업을 수행하게 되면, 최종적으로 원하는 형상을 가진 HEAD 단강품을 얻을 수 있게 된다.

## 3. 해외 기술개발 동향

대형 단강품을 제조하고 있는 해외 전문업체는 여러 업체가 있지만, 특히 Head 나 Shell 과 같은 대형의 Sheet 형태 단강품의 제작에 대한 경쟁력이 최고 수준인 일본의 JSW(Japan Steel

Works)의 제조 방법을 중심으로 아래에 기술하였다.

### 3.1 초대형 HEAD 의 제조

#### 3.1.1 개발 목적

하나의 원자로에는 상부의 UPPER HEAD 와 하부의 LOWER HEAD 와 같이 2 종류의 HEAD 가 들어가게 된다. 원전의 운영사들은 원자로의 안전성을 최대한 확보하기 위하여 Fig. 4 와 같이 가능한 용접부의 숫자를 줄여서 제작하기를 원한다. 이렇게 되면 HEAD 의 제작 요구 Size 가 대형화 된다. 이 때 만약 HEAD 의 Size 가 너무 대형이 되게 되면 Head Forming 작업 전단계에 제작해야 하는 원판의 Plate 상태에서부터 Press 의 Column 치수를 벗어나게 되어 제품의 제조가 어려워지게 된다. 이를 극복하기 위해서는 기존에 제조하는 방법과는 차별화된 공정을 개발하여 적용해야 한다.

#### 3.1.2 개발 동향

요구되는 Head 의 Size 가 너무 크게 되면 원판의 Plate 상태에서부터 Press 의 Column 을 벗어나는 Size 부터는 Press 의 Column 밖에서 단조 작업을 하여 Plate 를 만드는 공정이 필요하다. 이 때 Press 의 Column 내에서 하중을 받아서 Press 의 Column 밖으로 전달하는 Mechanism 을 구성하는 것이 필요하다.

원판의 Plate 를 제조한 후에 Head Forming 작업 시에도 기존의 Head Forming 과는 차별화된 공정이 요구된다. Fig. 5 처럼 원판의 직경을 줄이기 위하여 어느 정도까지는 Press 의 Column 밖에서 압하한 후에 Press 의 Column 내에서 작업할 수 있는 Size 가 되면 다시 Press 의 Column 안쪽으로 이동하여 최종적으로 Head Forming 작업을 하는 방법이 가능하다.

이 제조사에서는 이상과 같은 기술을 이용하여 초대형의 원판을 제조하고 최종적으로 Head Forming 작업을 통하여 초대형 HEAD 의 완제품을 제조하여 여러 Project 에 거의 독점적으로 공급하고 있다.

### 3.2 일체형 HEAD 의 제조

#### 3.2.1 개발 목적

원전 운영사들은 무엇보다도 원자로의 안전성을 최우선적으로 고려하기 때문에 용접부의 갯수를 줄여 가면서 일체형으로 제품을 제조하기를 원하게 된다. 이러한 배경 하에서 제조사들은 가능하면 원전 운영사들의 입장을 반영하여 우수한 품질의 제품을 공급하기 위하여 제조 설비를 증설하고 공정을 개발하여 적용하게 된다.

일반적으로 원자로의 상부쪽에 있는 UPPER HEAD 와 바로 아래쪽의 UPPER HEAD FLANGE 는 각각 별도로 제작한 후에 용접을 하여 사용하는 분리형의 방법으로 제조하고 있다. 이렇게 조립된 HEAD 에는 수십개의 CEDM NOZZLE 이 꼽힌 후에 그 사이는 용접이 되고 있다. 최근에는 미국에서 이 용접부에 결함이 발생하여 누수 현상으로 인하여 모재에 부식 현상이

발견되어 이 HEAD 를 교체하는 작업이 진행되고 있다. 이 교체 공사에서는 UPPER HEAD 와 UPPER HEAD FLANGE 의 용접부를 없애는 대신에 전체를 1 SET 로 만드는 FLANGE 일체형 HEAD 를 채택하고 있는 추세이다.

### 3.2.2 개발 동향

Fig. 6 은 FLANGE 일체형 HEAD 를 제조하는 단계 중에서 가장 핵심적인 공정인 형상 단조 작업을 하고 있는 모습을 보여주고 있다. 이 제조사에서는 일정한 형상을 가진 형틀에 소재를 삽입한 이후에 상부측에 폭이 좁은 반구형 Punch 를 회전시켜 가면서 성형하는 방법을 사용하고 있다.

이러한 방법을 사용하는 이유는 기존의 반구형 Punch 를 사용하여 형틀에서 소재를 성형하게 되면 단조 하중이 Press Power 를 초과하기 때문에 폭을 좁게 하여 단조 하중을 줄이며, 점진적으로 성형하면서 축대칭의 형상을 만들기 위하여 상부 Punch 를 회전시키면서 단조 작업을 진행하게 된다.

이 경우에 반구형 Punch 의 폭이 너무 작으면 작업 시간도 많이 소비되고 압하시에 소재의 Folding 현상이 많이 발생되기 때문에, 단조 하중과 작업 시간 및 작업성 등을 종합적으로 고려하여 최적의 폭을 결정할 필요가 있다.

이러한 방법으로 제품을 제조하게 되면 일반적으로 최종 제품의 형상과 비교하여 덧살이 상당히 많이 붙어 있는 상태로 성형되기 때문에 성형이 완료된 이후에도 추가적인 가공 작업시에 상당한 애로를 겪게 되는 단점이 있다.

## 4. 국내 기술개발 동향

국내의 기술개발 동향에 관해서는 현재 국내에서 원자로에 들어가는 대형 HEAD 제품은 당사에서 공급하고 있기 때문에 당사의 기술개발 추진 방향을 중심으로 기술하고자 한다.

### 4.1 초대형 HEAD 의 제조

#### 4.1.1 개발 추진 목적

초대형 HEAD 의 제조 기술은 당사에서 초대형 HEAD 단강품의 제조 사업을 지속적으로 추진하기 위해서는 반드시 확보하여야 할 핵심 기술이다.

원전 운영사의 입장에서는 원전의 안전성의 확보가 최우선 임무이기 때문에 최대한 용접부의 숫자를 감소하려고 하며 이렇게 되면 필연적으로 HEAD 의 제품 SIZE 가 커질 수밖에 없다. 따라서, 당사에서도 제품의 경쟁력을 확보하기 위해서는 초대형 HEAD 의 제조 기술을 시급히 확보할 필요가 있다.

#### 4.1.2 개발 추진 방향

초대형 HEAD 제조 기술의 확보를 위해서는 2 단계의 절차를 거쳐야 한다. 1 단계는 초대형 HEAD의 제조에 필요한 요소 기술의 확보를 추진해야 하고, 2 단계는 실제 제품의 제조를 통하여 궁극적으로 기술 확보를 추진해야 한다.

1 단계의 연구를 통해서 전체적인 시스템의 구성을 고안하고 이에 대한 축소 Size의 장치를 제작하여 축소모델실험을 통하여 제품의 제작 가능성을 검토하여야 한다. 이를 통하여 실제 제품 제작을 위한 전체적인 구성도와 각각의 구성 부품에 대한 도면을 확보하게 된다.

2 단계의 연구를 통해서 1 단계에 확보된 기술을 바탕으로 실물 Scale의 시스템을 제작하고 이를 통하여 최종적인 기술에 대한 검증 작업을 거치게 된다. 이를 통하여 궁극적으로 초대형 HEAD의 제조 기술을 확보할 수 있게 된다.

## 4.2 일체형 HEAD의 제조

### 4.2.1 개발 추진 목적

FLANGE 일체형 HEAD는 외국의 일부 제조사에서는 이미 공정 개발을 완료하여 제품을 납품하여 원자력 발전소에 공급하고 있다.

일체형 HEAD 또한 용접부가 있는 분리형 HEAD의 공급으로는 수주를 위한 경쟁력이 떨어지기 때문에, 이러한 FLANGE 일체형 HEAD의 공정 개발은 당사에서도 시급한 문제로 대두되고 있다. 따라서, 당사에서도 이러한 목적에서 FLANGE 일체형 HEAD의 공정을 개발하고자 연구를 진행하고 있는 상태이다.

### 4.2.2 개발 추진 방향

일체형 HEAD 또한 위와 같이 2 단계의 연구 개발 추진이 필요하다.

1 단계에서는 당사의 일체형 HEAD 제조 가능성을 검토하고 시제품 제작의 전단계로서 실험실 차원의 Preliminary Data 확보를 위하여 당사에서 일체형 HEAD 제작 시에 적용 가능한 공정을 검토하는 것이다.

2 단계에서는 실 Scale의 시제품 제조를 통하여 요구되는 기술적 사양의 만족 여부에 대한 검증을 통하여 궁극적인 기술의 확보를 추진하는 것이다.

아래에는 현재 수행하고 있는 1 단계 연구 내용의 일부에 대하여 기술하였다.

#### (1) Computer Simulation

FLANGE 일체형 HEAD의 공정을 검토하기 위하여 우선 Computer Simulation을 수행하여 보았다.

강점소성 유한요소해석을 위한 변분 범함수는 다음과 같다[5].

$$\Phi = \int E(\dot{\epsilon})dV - \int F_i v_i dS + K \int \frac{1}{2} (\dot{\epsilon}_v)^2 dV = 0 \quad (1)$$

본 FLANGE 일체형 HEAD 의 제조를 위하여 가장 핵심적인 공정은 HEAD FORMING 전의 Preform 의 치수를 설정하는 것이다. 따라서, 여러가지 Preform 의 형상에 따른 변형 양상에 대한 Data 를 확보하는 것이 가장 급선무이다.

Fig. 7 은 이를 위하여 DEFORM 에서 해석을 수행하고 있는 모습을 보여 주고 있다. 변형 양상으로 볼 때 Preform 의 바닥 높이가 너무 낮으면 변형 후에 HEAD 의 두께도 많이 줄고 FLANGE 부도 안쪽으로 많이 빨려 들어오게 된다. 반대로 바닥 높이가 너무 높으면 성형후에 치수가 만족되지 않을 우려가 있다. 따라서, 적절한 바닥 높이를 설정하는 것이 무엇보다도 중요하다.

## (2) 축소모델실험

Fig. 8 은 해석 결과를 검증하기 위하여 순납을 이용하여 축소모델실험을 수행하고 있는 것을 장면을 보여 주고 있다.

우선 위와 같은 Computer Simulation 을 활용하여 Preform 의 형상 변화에 따른 유동 양상을 검토한 후에 이를 축소모델로 제작하여 유동 현상을 검증하는 단계이다. Fig. 8(a)에는 축소모델 금형과 시편을 제작한 후에 성형 실험을 진행하고 있는 장면을 보여주고, Fig. 8(b)는 이러한 실험으로부터 성형된 축소모델 제품의 형상을 보여 주고 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 원자로에 들어가는 HEAD 단강품의 제조와 관련하여 국내외의 기술개발 동향에 대하여 소개하였다.

우선 일반적으로 HEAD 단강품을 제조하는 절차와 개략적인 단조 작업 공정에 대하여 소개하였다.

또한, 원자력 발전소의 안전성을 높이는 차원에서 용접부를 줄인 초대형 HEAD 와 FLANGE 일체형 HEAD 에 대하여 외국의 제조 사례를 알아 보았으며, 당사에서 현재 추진하고자 하는 추진 방향에 대하여 설명하였다.

특히, FLANGE 일체형 HEAD 에 대해서는 1 단계 연구로서 수행중인 내용과 관련하여 Computer Simulation 과 축소모델실험을 이용하여 본 제품의 제작 가능성을 확인한 사례를 소개하였다.

## 참고문헌

[1] 조종래, 김동권, 이정호, 이부윤, 이명열, 1995, “수치해석 기법을 이용한 발전용 단조 로타의 제조공정 분석 및 공정설계”, 단조기술의 진보, 이동녕, 박종진 편, pp.25~34.

[2] Hiroshige Wanaka et al., 1980, Manufacture of forgings for nuclear pressure vessel, Kawasaki steel

technical report, vol.12, no.1.

[3] Tomoharu Sasaki et al., 2003, Manufacturing and properties of closure head forging integrated with flange for PWR reactor pressure vessel, 15<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting, pp.440~447, Kobe, Japan.

[4] H.Tsukada et al., 1995, Recent progress of large and integrated forgings for nuclear power plant, Proceeding of the 3<sup>rd</sup> JSME/ASME Joint Con'f on Nuclear Engineering, pp.439~444, April 23~27, Kyoto, Japan.

[5] Shiro Kobayashi et al., 1989, Metal forming and the finite element method, Oxford University Press, pp.83~88.

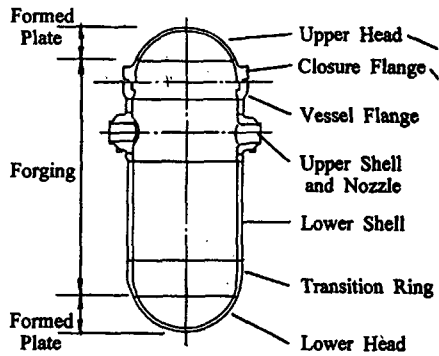


Fig. 1 Reactor vessel of nuclear power plant

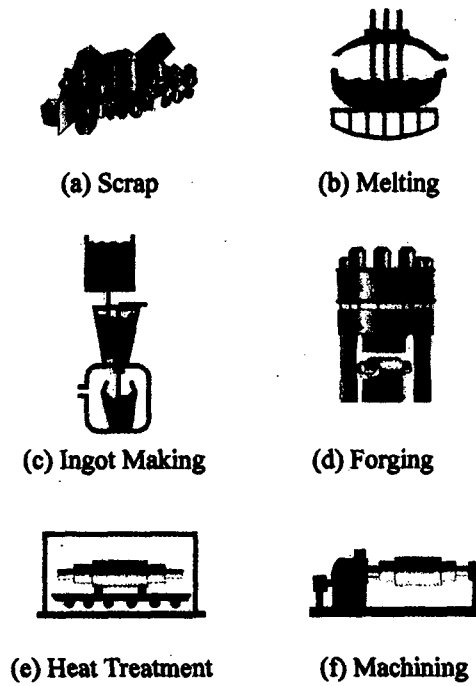


Fig. 2 Manufacturing Sequence of Steel Forgings

1. Ingot Making	2. Cogging & Cutting	3. Upsetting	4. Disk Forging
5. Disk Setting	6. Disk Forming	7. Finish Machining	8. Welding

Fig. 3 Typical manufacturing process of head for 1,000MW nuclear power plant



Fig. 4 Shape Variation of Head

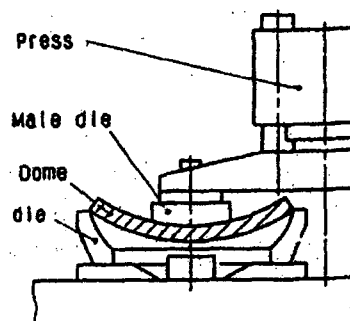
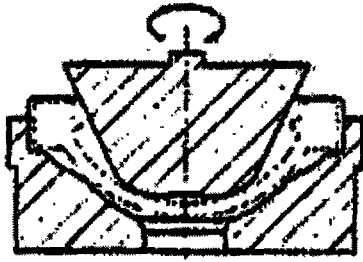
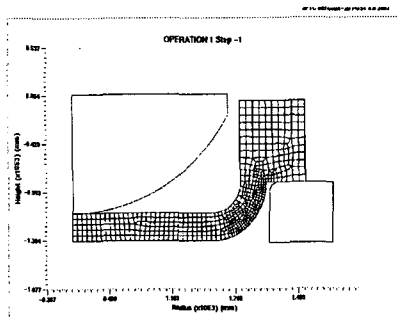


Fig. 5 Outside head forming apparatus<sup>(3)</sup>

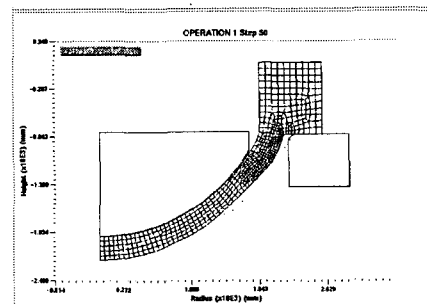




**Fig. 6 Forging concept of JSW<sup>(4)</sup>**

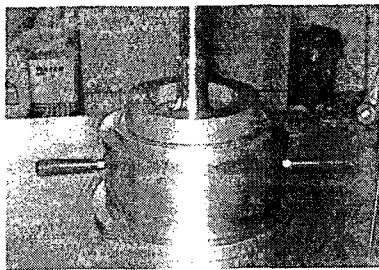


**(a) undeformed state**



**(b) deformed state**

**Fig. 7 Computer simulation of head forming**



**(a) during head forming**



**(b) deformed specimen**

**Fig. 8 Model experiment of head forming**