

원자로용 대형 헤드 단강품의 자유단조

김동권[#] · 김동영¹ · 김영득¹

Open Die Forging of the Large Head Forgings for Reactor Vessel

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

(Received May 12, 2005)

Abstract

Reactor Vessel is one of the most important structural parts of nuclear power plant. It is manufactured by various steel forgings such as shell, head and transition ring. Head 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 head forgings which can be used for the reactor vessel of 1,000MW nuclear power plant.

Key Words : Open Die Forging, Head, Steel Forgings, Reactor Vessel, Nuclear Power Plant

1. 서론

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 강재로 두껍게 제조한다. Fig. 1 은 1,000MW 원자력 발전소용 원자로의 개략적인 형상을 보여준다. 원자로는 원통 형태를 가진 셸(Shell)과 반구 형상을 가진 헤드(Head)의 2 가지 주요 단강품으로 구성된다. 이러한 셸과 헤드는 고온 고압의 조건에서도 견딜 수 있도록 자유단조 방법에 의하여 충분한 강도와 인성을 가진 단강품으로 제조하게 된다.

특히, 헤드는 원자로의 아래쪽과 위쪽에 위치하고 있는 대형 반구 형상의 단강품으로서 해외 단조 업체에서도 여러 가지의 제조 사례를 보고하

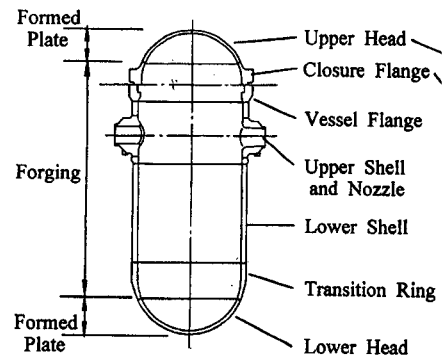


Fig. 1 Reactor vessel of 1,000MW nuclear power plant

고 있다[1~2].

본 논문에서는 이러한 대형 헤드 단강품을 자유단조로 제조하는 방법에 대하여 개괄적으로 설

1. 두산중공업 기술연구원

교신저자 : 두산중공업 기술연구원,

E-mail : ddkkim@doosanheavy.com

명하고, 주요한 단조 작업 공정을 설계하여 실제 품에 적용한 사례에 대하여 구체적으로 기술하였다. 또한, 향후에 원자로의 안정성을 높이기 위하여 개발되어야 할 기술과 추진 현황을 소개하고자 하였다.

2. 일반적인 HEAD의 단조 공정

Fig. 2에는 1,000MW 원자력 발전소용 헤드 단강품의 일반적인 제조 공정을 보여 주고 있다.

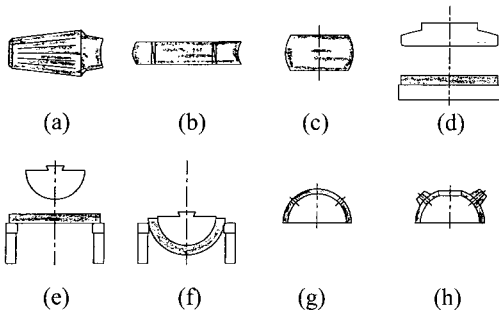


Fig. 2 Typical manufacturing process of head for 1,000MW nuclear power plant
 (a) Ingot Making (b) Cogging & Cutting
 (c) Upsetting (d) Disk Forging
 (e) Disk Setting (f) Disk Forming
 (g) Finish Machining (h) Welding

우선 건전한 강괴를 제조한 후 1 차 단조에서는 업셋팅비(Upsetting Ratio)를 확보하기 위하여 코깅(Cogging) 작업을 실시한다. 업셋팅 작업인 2 차 단조 작업은 강괴의 내부에 충분한 단조 효과를 부여하기 위해서 수행된다.

3 차 단조는 Head Forming 작업을 위하여 둥근 원판 형태를 만드는 Disk Forging 작업이다. 이 작업은 업셋팅 이후에 발생된 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 단조에서는 Head Forming 작업이 이루어진다. 이 Head Forming 작업에서는 3 차 단조에서 만들어진 원판을 둥근 형태를 가진 지지 링(Supporting Ring)의 위에 올린 이후에 둥근 반구형

의 상부 편치를 이용하여 Head Forming 작업을 행하게 된다. 여기서 성형(Forming) 작업이라 함은 단조 효과를 부여하는 단조(Forging) 작업보다는 형상을 만드는 성형 작업이라는 의미가 강하기 때문이다.

이러한 Head Forming 작업을 수행하게 되면, 최종적으로 원하는 형상을 가진 헤드 단강품을 얻을 수 있게 된다. 이 때 만약 헤드의 크기가 너무 대형이 되게 되면 원판의 Plate 상태에서부터 프레스의 기둥(Column) 치수를 벗어날 수 있기 때문에 프레스의 기둥 밖에서 작업을 할 수 있는 시스템을 고려할 필요가 있다.

Fig. 3 은 타사에서 이러한 방법을 응용하고 있는 예를 보여 주고 있다. 이 방법을 이용하게 되면 프레스의 기둥 밖에서 원판을 어느 정도까지는 압하함으로써 전체적인 직경을 줄일 수 있기 때문에, 다시 프레스의 기둥 내로 이동하여 최종적인 형상을 제조할 수 있게 된다.

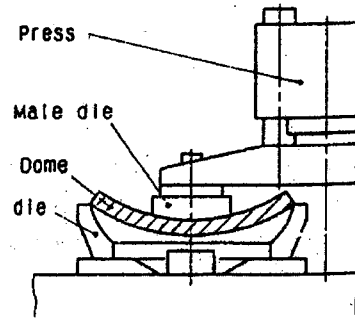


Fig. 3 Outside head forming apparatus[3]

위의 모든 단조 작업을 수행한 후에 열처리 작업을 거치게 되면 요구되는 수준의 품질을 만족시키는 헤드 단강품이 만들어지게 된다.

3. 플랜지 일체형 HEAD의 단조 공정

3.1 목적 및 필요성

일반적으로 원자로의 상부쪽에 있는 상부헤드(Upper Head)와 바로 아래쪽의 Closure Flange 는 각각 별도로 제작한 후에 용접을 하여 사용하고 있다. 이렇게 조립된 헤드에는 Fig.4 와 같이 수십 개의 CEDM Nozzle 이 꼽힌 후에 그 사이는 용접이 되고 있다.

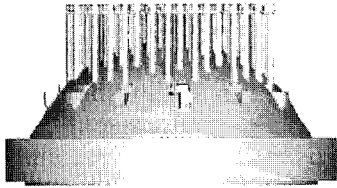


Fig. 4 The shape of integrated head and CEDM Nozzle

이러한 상태로 원자로를 장기적으로 운전하게 되면 헤드와 CEDM Nozzle의 용접부가 부식 현상 등에 의하여 손상을 받게 되어 누수 현상이 발생할 수 있기 때문에 큰 위험 요소가 된다. 최근에는 미국에서 이러한 사례가 발견되어 헤드와 Closure Flange의 용접부를 제거하여 전체를 한 세트르 만드는 플랜지(Flange) 일체형 헤드를 채택하고 있는 추세이다.

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

3.2 제조 가능성의 검토

위의 플랜지 일체형 헤드는 외국의 일부 제조사에서는 이미 공정 개발을 완료하여 제품을 납품하여 원자력 발전소에 공급하고 있다.

안전성을 최우선적으로 고려하는 원전 운영사들의 입장으로 볼 때에는 용접부가 있는 분리형 헤드의 공급으로는 경쟁력이 떨어지기 때문에 이러한 플랜지 일체형 헤드의 공정 개발은 시급한 문제로 대두되고 있다.

따라서, 당사에서도 이러한 목적에서 플랜지 일체형 헤드의 공정을 개발하고자 연구를 진행하고 있는 상태이다.

3.2.1 단조 공정의 개념

Fig. 5는 외국의 한 제조사에서 플랜지 일체형 헤드를 제조하고 있는 모습을 보여주고 있다. 이 제조사에서는 일정한 형상을 가진 형틀에 소재를 삽입한 이후에 상부의 펀치(Punch)를 회전시켜 가

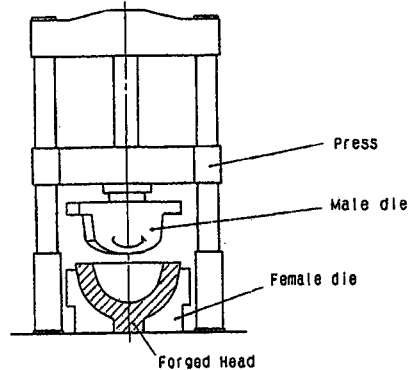


Fig. 5 Forging concept of JSW[3]

면서 성형하는 방법을 사용하고 있다.

이러한 방법으로 제품을 제조하게 되면 일반적으로 최종 제품의 형상과 비교하여 덧살이 상당히 많이 붙어 있는 상태로 성형되기 때문에 성형이 완료된 이후에도 추가적인 가공 작업 시에 상당한 애로를 겪게 된다.

3.2.2 Computer Simulation

플랜지 일체형 헤드의 공정을 검토하기 위하여 우선 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 보았다.

강점소성 유한요소해석을 위한 변분 범함수는 다음과 같다[4].

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

본 플랜지 일체형 헤드의 제조를 위하여 가장 핵심적인 공정은 Head Forming 전의 예비성형체(Preform)의 치수를 설정하는 것이다. 따라서, 여러 가지 예비성형체의 형상에 따른 변형 양상에 대한 데이터를 확보하는 것이 가장 급선무이다.

즉, Fig. 6과 같이 우선 플랜지 일체형 헤드의 Head Forming 후의 변형 양상에 영향을 크게 미치는 인자는 헤드의 바닥 높이(H), 바닥 코너부 반경(R) 및 바닥 두께(t1)라고 볼 수 있다.

플랜지 일체형 헤드의 변형 후에 형상적으로 우려되는 부분은 크게 아래의 2 가지로 나눌 수 있다. 일반적으로 회수율을 높이기 위해서 헤드의 바닥 높이(H)를 작게 하면 Fig. 6의 아래 쪽 그림과 같이 변형후의 웰부의 두께(t2)가 과도하게 작아지거나 플랜지부가 안쪽으로 과도하게 변형하

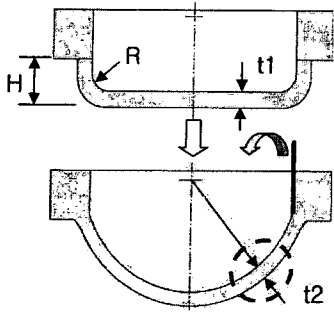
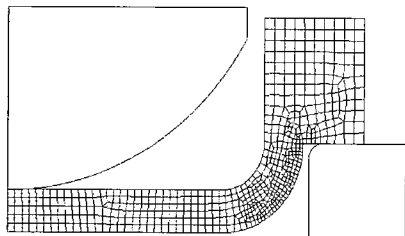
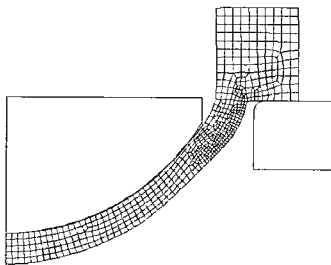


Fig. 6 Process parameter for head forming and discussion points after head forming



(a) undeformed state



(b) deformed state

Fig. 7 Computer simulation of head forming

여 단조후 치수가 만족되지 못할 우려가 있다.

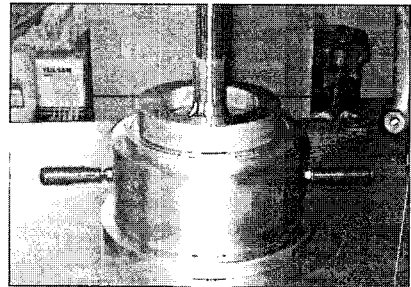
따라서, 회수율을 최대한 높이면서 단조 후 치수를 만족시키기 위해서는 상기의 공정 변수에 대한 적절한 조절이 필요하다.

Fig. 7 은 이를 위하여 DEFORM 에서 해석을 수행하고 있는 모습을 보여 주고 있다. 변형 양상으로 볼 때 예비성형체의 바닥 높이가 너무 낮으면 변형 후에 헤드의 두께도 많이 줄고 플랜지부도 안쪽으로 많이 빨려 들어오게 된다. 반대로 바닥

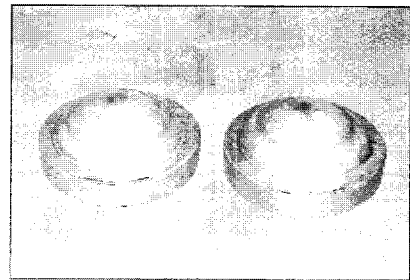
높이가 너무 높으면 성형 후에 치수가 만족되지 않을 우려가 있다. 따라서, 적절한 바닥 높이를 설정하는 것이 무엇보다도 중요하다.

3.2.3 축소모델 실험

Fig. 8 은 해석 결과를 검증하기 위하여 순납을 이용한 축소모델 실험을 수행하고 있는 장면이다.



(a) during head forming



(b) deformed specimen

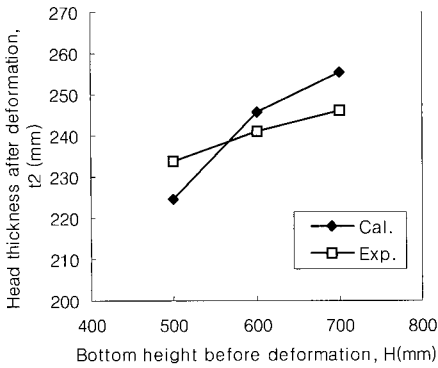
Fig. 8 Model experiment of head forming

Table 1 Initial dimensions for computer simulation and experiment

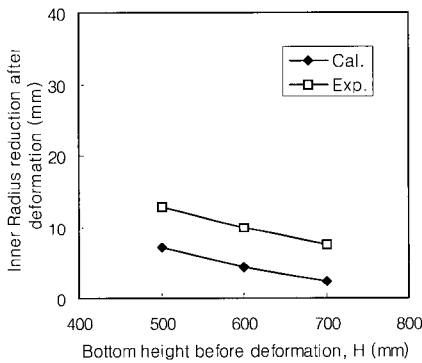
(Unit : mm)			
Method	H	R	t1
Computer simulation	500.0	200.0	300.0
	600.0	300.0	300.0
	700.0	400.0	300.0
Experiment	16.7	6.7	10.0
	20.0	10.0	10.0
	23.3	13.3	10.0

3.2.4 해석 및 실험결과

플랜지 일체형 헤드의 Head Forming 후의 변형 양상을 파악하기 위하여 앞에서 설명한 바와 같



(a) change of thickness



(b) change of inner radius

Fig. 9 Comparison between computer simulation and experiment for various parameters

이 해석과 실험을 수행하였다. 해석은 실제 제품의 치수를 기준으로 하고, 실험은 순납을 이용하여 1/30 Scale 로 축소하여 실시하였다. 해석과 실험시에 사용한 치수는 Table 1 과 같다.

위의 조건에 대한 해석 및 실험 결과를 Fig. 9 에서 보여주고 있다.

해석과 실험 결과로 볼 때, 변형후 바닥 두께는 변형전 바닥 높이가 증가할수록 점점 증가하게 되며, 변형후 내경의 편측 감소량은 바닥 높이가 증가할수록 점점 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 해석과 실험이 모두 동일한 경향을 보여주고

있다.

이를 통하여 회수율을 높이면서 요구되는 형상을 만족시키기 위해서는 변형전 바닥 높이를 적절히 선정해야 한다는 것을 알 수 있다. 본 해석 및 실험 대상 제품에 대해서는 변형후 바닥 두께와 내경의 편측 감소량을 감안해 볼 때, 변형전 바닥 높이는 약 600mm 정도가 적당한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 원자로에 들어가는 헤드 단강품을 제조하는 데 있어서의 일반적인 단조 작업 방법에 대하여 간략히 소개하였다.

또한, 원자력 발전소의 안전성을 높이는 차원에서 용접부를 줄인 플랜지 일체형 헤드에 대하여 외국의 제조 사례를 알아 보았으며, 당사에서 컴퓨터 시뮬레이션과 축소모델 실험을 이용하여 본 제품의 제작 가능성을 확인한 사례를 소개하였다.

참고 문헌

- [1] Hiroshige Wanaka et al., 1980, Manufacture of forgings for nuclear pressure vessel, Kawasaki steel technical report, vol.12, no.1.
- [2] Tomoharu Sasaki et al., 2003, Manufacturing and properties of closure head forging integrated with flange for PWR reactor pressure vessel, 15th International Forgemasters Meeting, pp. 440~447, Kobe, Japan.
- [3] H.Tsukada et al., 1995, Recent progress of large and integrated forgings for nuclear power plant, Proceeding of the 3rd JSME/ASME Joint Con'f on Nuclear Engineering, pp. 439~444, April 23~27, Kyoto, Japan.
- [4] Shiro Kobayashi et al., 1989, Metal forming and the finite element method, Oxford University Press, pp.83~88.