

# 대형 크랭크스로우의 예비성형체 양끝단부 재료특성과 단조공정에 관한 연구

김영득\*, 김동영, 김동권, 김재철 (두산중공업 기술연구원)

## A Study on the Material Properties of Both End Sides of Preform and Forging Process in Large Crank Throw

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

### ABSTRACT

A crank throw, which is one of the crankshaft part for a large diesel engine is manufactured by closed die forging or open die forging. For the purpose of improvement of productivity the open die forging is usually adopted these days. However it has disadvantage of low yield ratio compare to closed die forging. To overcome this problem, the material properties for hot top and bottom zones of ingot are investigated to utilize them to the product and a modified forging process to reduce the material loss of ingot body through forging analysis according to forging factors( $\alpha$ ,  $R$ ,  $\phi_B$ ,  $\phi_D$ ) is suggested.

**Key Words** : Crank throw(크랭크스로우), Hot top and bottom zones of ingot(강괴 상하부), Yield ratio(회수율), Upsetting(업세팅), Forging factors(영향인자)

### 1. 서론

대형 선박용으로 사용되는 크랭크샤프트는 제품 크기의 대형화로 인하여 일체형으로 제조하기가 매우 곤란하므로 Fig.1 과 같이 핀부와 웹부로 구성되는 크랭크스로우와 저널, 플랜지를 각기 따로 제작하여 열박음 조립작업을 통해 크랭크샤프트 완제품을 완성한다. 크랭크스로우를 제조하는 방법에는 형단조와 자유단조가 있는데, 이 중 자유단조법은 형단조에 비해 생산성이 우수하여 최근 들어 많이 적용되고 있지만, 회수율이 떨어지는 단점이 있다. 회수율은 제품의 생산 원가에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소로서 가격 경쟁력 제고를 목적으로 회수율 향상을 위한 꾸준한 단조기술의 개선과 공정 개선이 요구되고 있다.

열간 자유 단조에 사용되는 대형 강괴품의 구성은 크게 Hot Top 부(이하 HT 부)와 Bottom 부(이하 BT 부), 그리고 Body 부(이하 BD 부)로 이루어져 있는데, 이 중 HT, BT 부는 제강 공정상 BD 부에 비해 비교적 건전하지 못한 특성을 띄고 있다. 그러

나, Fig.2 와 같은 실제 단조 공정을 면밀히 검토해보면 강괴 제작 후 업세팅, 코킹 작업시 HT 부는 제품 핸들링을 위한 홀더부로 사용되고 BT 부는 상당량이 절단되어 폐기되는데, 이 때 폐기되는 HT, BT 부 내에 코킹 작업 도중 건전한 BD 부의 소재가 일부 밀려 들어가 결국 이 부분까지 손실되어 실제품 활용도가 떨어지는 현상을 볼 수 있다. 따라서, 원가절감을 통한 제품 경쟁력 강화를 위하여 상기 현상에 대한 활용도의 증진 방안이 요구되고 있다.

본 연구에서는 대형 크랭크스로우의 자유단조

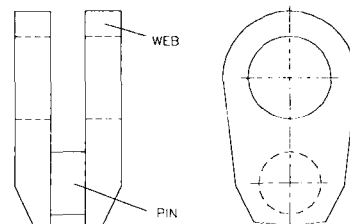


Fig.1 Schematic drawing of crank throw

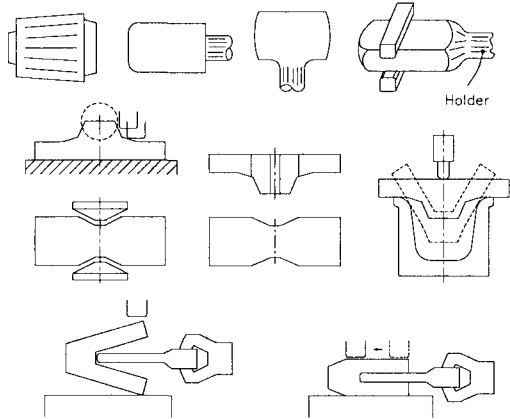


Fig. 2 Forging process for manufacture of crank throw

시 회수율을 높이기 위하여 현재 제품에 사용되지 않고 손실되는 강괴의 HT 부와 BT 부에 대하여 재료 특성을 조사하여 이 부분의 제품 활용 가능성을 제안하였으며, 아울러 단조 공정 중 일부 작업 방법의 변경을 통해 회수율 향상 방안을 제시하였다.

## 2. HT 부와 BT 부의 재료 특성 조사

크랭크스로우의 제작공정을 살펴보면 강괴에서 예비성형체 단조작업 후 최종적으로 굽힘단조작업을 수행한다. 이 때 예비성형체 단조 후 HT, BT 부는 Fig.3의 (a)에서 보듯이 양 끝단에 위치하게 되는데 이 부분은 화염절단을 통해 폐기되며 이렇게 버려지는 양은 제품에 따라 다르지만 약 200mm ~ 400mm 정도로서 두께와 폭을 고려하면 상당한 양의 소재 손실이 발생된다.

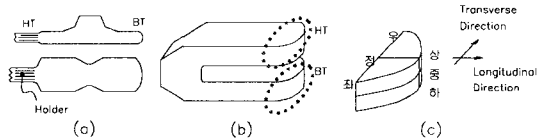


Fig.3 Preform, bend forging and raw specimen of crank throw (a) Preform (b) Bend forging (c) Raw specimen

예비성형체 단조 후 HT 부인 홀더는 절단되고, 예비성형체를 다시 굽힘 단조한 후 단조된 소재를 가공 형상에 따라 화염절단 하는데, 재료물성시험을 위한 모재시편은 HT, BT의 절단되는 바깥 부위에서 채취하였으며(Fig.3 (c)) 모재시편에서 다시 길이방향과 수직방향, 상·중·하 및 좌·정·우측면으로 전체 위치에 걸쳐 시편을 채취하고 ASTM 규격에 의해 시편 가공한 후 정규 시험기 및 장비에서 최

소 2~3 번의 시험을 통해 얻은 결과를 확보하였다.

시험은 크게 UT 시험을 비롯해 인장, 항복, 연신율, 단면감소율, 충격, 경도시험 등의 기계적 특성시험과 조직시험, Grain size, 기기분석(성분분석) 등의 화학적 특성시험으로 총 10개 항목에 걸쳐 수행하였다.

제품 합격 기준에서 가장 중요시 되는 항목으로는 인장강도와 충격치를 들 수 있는데, Spec. 대비 HT, BT 부의 인장강도 및 충격치를 비교해 보면 다음과 같다. 통상적으로 크랭크스로우의 Type 별 재질에 따라 요구되는 Spec. 값이 각기 다르나, 본 연구에서 요구되는 Spec. 기준값은 인장강도가 610 ~ 750 N/mm<sup>2</sup>에 충격치는 ≥20J 이상의 수준을 요구하고 있다.

Fig.4는 크랭크스로우 HT, BT 부의 인장강도 시험 결과이다. BT 부의 경우는 모재시편 (Raw specimen)의 전 위치별 영역에 걸쳐 모두 Spec.에 만족하고 있어 강도학적 측면에서 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나 HT 부의 경우 No.28, 29, 30은 표면 상부 우측 모서리부의 Trans. 방향에 해당되는 것을 제외하고는 모두 Spec. 대비 미달되는 결과를 보이는데, 이는 단조효과의 미비보다는 제강 조업 특성상 비계재물 내포 가능성 등으로 인해 HT 부가 건전치 못함을 의미한다.

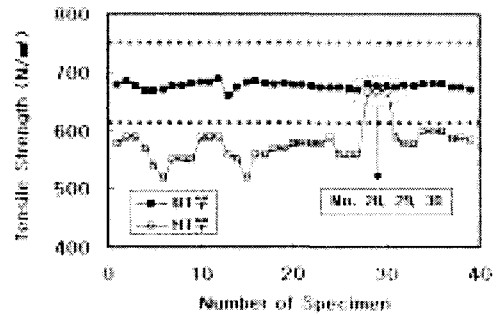


Fig.4 Comparison of tensile strength between HT zone and BT zone

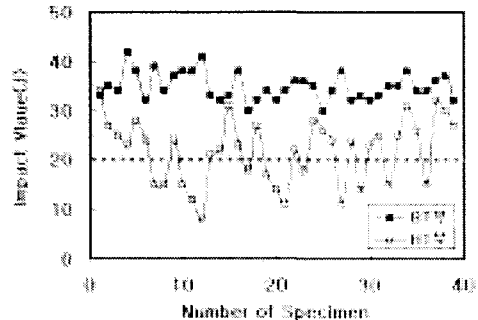


Fig.5 Comparison of impact value between HT zone and BT zone

Fig.5 는 HT, BT 부의 충격치(Impact Value) 값을 표현한 그림인데, 역시 BT 부의 경우는 전 영역에 걸쳐 요구하는 Spec. 20J 이상에 모두 만족되며 그 수준도 매우 양호한 값을 보이고 있다. 반면 HT 부의 경우 Spec. 기준 대비 일부는 만족되거나 미달되는 현상을 보이는데, 이것은 HT 부에 소재 건전부와 비 건전부가 함께 존재한다는 것을 의미하며 제품으로의 사용은 제강에서 단조까지 좀 더 면밀한 분석을 통한 후 고려되어야 할 것으로 판단된다.

Table 1. Results of test for material properties of HT zone and BT zone

시험항목	기준 Spec.	강괴 A		강괴 B	
		HT부	BT부	HT부	BT부
UT 시험	-	합격	합격	합격	합격
인장강도(N/ mm <sup>2</sup> )	610-750	578	677	600	658
항복강도(N/ mm <sup>2</sup> )	≥ 350	335	409	330	393
연신율(%)	≥ 18	31	27	29	28
단면감소율(%)	≥ 40	58	54	56	56
경도값(HB)	180-220	173	192	186	189
충격치(J)	≥ 20	8-34	35	7-43	32
Grain size	6.2-9.0	5.8	8.5	6.5	8.2
화학성분	-	탄소편석	이상무	이상무	이상무

Table 1 은 두개의 강괴 A, B에 대해 HT, BT 부에 대한 시험 결과를 요약 정리한 것인데, BT 부는 전체 항목에 걸쳐 모두 기준 Spec.을 만족하는 것으로 조사되었으나 HT 부는 일부 시험항목에서 기준에 미달되는 것으로 조사되었다. 따라서, HT, BT 부에 대한 좀 더 면밀한 분석을 위해 각 부분에 대한 조직시험을 수행하였는데 Fig.6 은 Macro 시험결과를 사진으로 보여주고 있다.

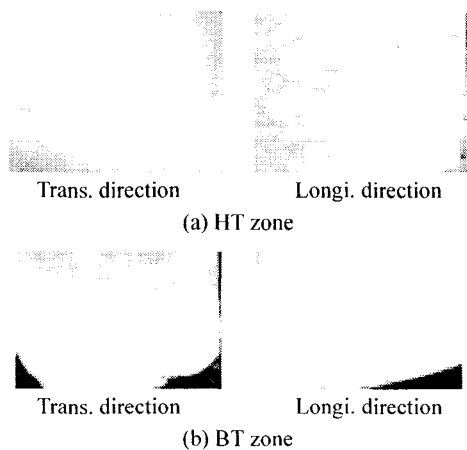


Fig.6 Results of Macro test for the zone of BT and HT

크랭크스로우 HT, BT 의 각 부위에서 단조 방향인 Longi. Direction 과 직교방향인 Trans. Direction 에 대한 Macro 시험을 실시한 결과, BT 부는 Trans. 및 Longi. 모두 단조방향성을 띄는 Metal Flow 가 보이지 않는 것으로 보아 양방향 단조는 매우 양호하다고 할 수 있다. 또한 Macro 적으로 제강 중 탄소편석대가 발생되는데, 여기서는 발견되지 않고 있어 제강 중 용강의 유동이 안정적으로 흐름에 따라 건전한 BT 상태가 이루어 졌다고 볼 수 있다. 이러한 이유는 본 강괴 제조법인 하주조괴법에 의한 장점 때문인 것으로 판단된다.

HT 부의 경우는 하주조괴법에 의해 BT 부에서 용강이 올라오는 방식으로 용강과 함께 모래와 같은 불순물을 포함하여 이동해 오게 된다. 이러한 모래성분은 단조과정 중 고온에서 백점에 가까운 형태를 띄며 강괴의 품질에 악영향을 줄 수 있다. 상기 Fig.6 (a)의 HT 부에서 보면 이러한 모래성분(스나키즈) 등을 없애기 위한 스카핑 작업을 깊게 함에 따라 Macro 상에 그대로 자국이 나타나고 있다. 이러한 현상들은 제품 전체에 좋지 않은 영향을 줄 수 있는데, Table 1 에서 보듯이 BT 부가 모든 Spec. 항목에 만족되는 값을 나타내는 반면에 HT 부는 비교적 미달되는 수준이 많아 제품으로의 사용은 곤란한 것으로 판단된다.

### 3. 업세팅 단조공정 개선

크랭크스로우의 제조공정에서 강괴 내부의 조직과 성질 개선을 위해 업세팅 및 코깅 작업이 요구되는데, 제품 핸들링을 위한 홀더 제작 후 업세팅 시 강괴 건전부가 홀더부로 유동하여 결국 상당한 소재 손실(Material loss)을 초래하고 있다.

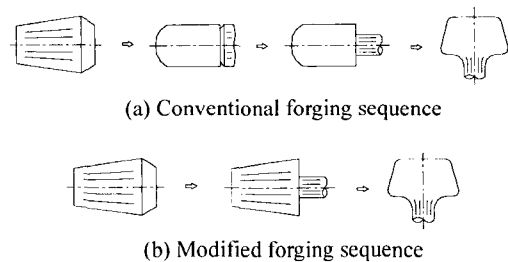


Fig.7 Forging process from ingot to upsetting for crank throw manufacture

Fig.7 의 (a)는 현장 여건(100MN Press)을 고려하여 통상적으로 적용되고 있는 작업공정이며 (b)는 본 연구에서 재료 손실을 감소하기 위해 공정 개선

을 수행한 방법으로서 일명 직접 업세팅(Direct Upsetting)이라고 명하기로 한다.

본 연구에서는 재료의 유동과 형상거동 등을 예측하기 위해 1차적으로 축대칭 유한요소해석을 실시하고 납을 이용한 모델실험을 통해 가시적인 타당성을 간단히 검토하였다. 유한요소해석은 상용 S/W 인 DEFORM-2D 를 이용하였고, 업세팅 시 영향을 줄 수 있는 영향 인자로 금형각도( $\alpha$ ), 곡률반경(R), 소재 및 금형의 직경조합( $\phi_B, \phi_D$ )을 선정하여 그 영향을 해석하였으며, 최종적으로 설비 및 작업 조건 등을 고려하여 현장에서 재료손실을 절감할 수 있는 방안을 제안하였다.

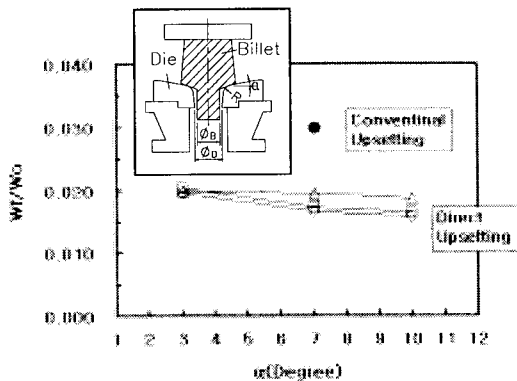


Fig. 8 Comparisons of extruded weight ratio for conventional upsetting and direct upsetting

Fig.8 은 직접 업세팅 시 영향 인자들에 따른 홀더부로의 소재 유출 중량비의 거동선도를 기존 방법( $\alpha=7^\circ, R=250, \phi_B=1100, \phi_D=1200$ )과 개선된 단조 공정 방법을 비교해 보았다. 개선된 작업 방법은 설비와 작업조건 등을 고려하여  $\alpha=10^\circ, R=250, \phi_B=900, \phi_D=950$  으로 선정하였으며, 이처럼 개선된 방법을 적용한 경우 기존 방법에 비해 중량비로 약 50%의 소재 절감이 가능함을 제시하고 있다.

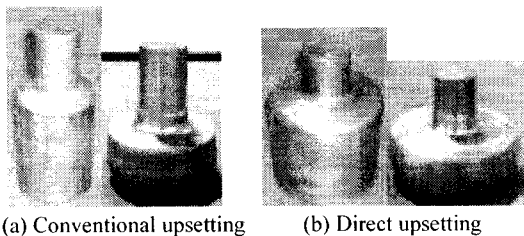


Fig.9 Results of model experiments for conventional upsetting and direct upsetting

Fig.9 는 실제 제품 대비 1/16 축소 모델 실험을 위해 납 시편과 금형을 가공 제작하여 업세팅 실험

한 결과이다. 두가지 방법에 따른 실험 결과를 볼 때 직접 업세팅법이 기존에 비해 홀더부로의 소재 손실을 막을 수 있다는 것을 가시적으로 확인할 수 있다. 아울러 현장 여건 등을 고려할 때 향후 좀 더 다양한 변수들에 대한 조사가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

대형 크랭크로우의 재료 손실 절감을 위하여 예비성형체 양끝단부(HT 부, BT 부)에 대한 재료특 성분분석과 업세팅 공정 시 홀더부로의 소재유동 등에 영향을 주는 영향인자(Forging factor)에 대하여 단조공정해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. HT 부는 BT 부에 비해 재료의 건전성이 떨어지며, Spec. 대비 인장강도는 약 92%, 충격치는 약 36%가 미달된다.
2. BT 부의 재료 건전성(UT, 기계적, 화학적) 특성을 확인하고 제품으로의 사용을 제안하였다.
3. 설비 및 작업 조건을 고려하여 소재 손실 절감 방안을 위한 최적 업세팅 단조 공정 일자는 금형각( $\alpha$ )= $10^\circ$ , 금형곡률반경( $R$ )= $100\text{mm}$ , 홀더( $\phi_B$ )= $900\text{mm}$  및 금형직경( $\phi_D$ )= $950\text{mm}$  임을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. 越谷哲郎, "Application of forging effect in the open die forging". 鑄鍛造と熱處理, pp.33-41, Nov. 1989
2. Jilek, J., Dvorak, B., Molinek, B., "Production of the Large Crankshafts", 12<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting, Chicago, II, Sept., 11-16, 1994
3. 박종진, "Prediction of deformation occurring in bending a crank throw at elevated temperatures", 대한기계학회춘계학술대회, April, pp.653-658, 1996