

프리포징용 플랫폼의 세미하이스강 적용을 통한 수명개선

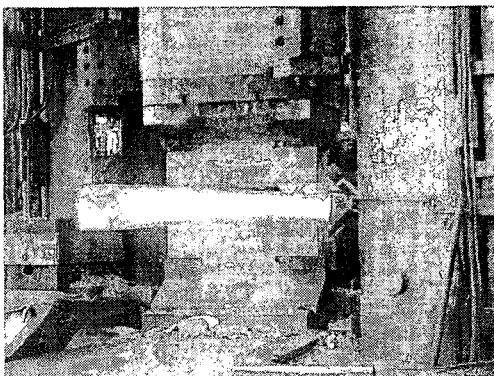
선임연구원 서영식 연구원 김병옥
수석연구원 최회진 연구소장 김병량
단조팀과장 이우 단조팀차장 이영국
* (주) 세 아 베 스틸(구 기아특수강)

1. 서론

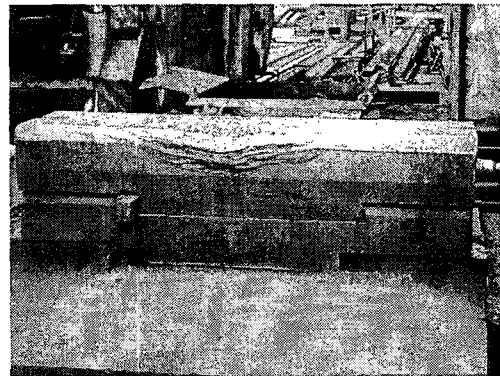
일반단조용 평엔빌(기존 사용소재 STF4)은 단조공정에서 각재제품을 생산하는 공구로서 3.3~11톤 중량의 약 1200℃로 가열된 잉곳트를 열간 상태에서 제품의 형상을 만들어 주는 매우 가혹한 공정 특성을 가지고 있다. 당사 엔빌은 상·하형 2조 1set로 구성되어 있으며 각각 1.5톤 중량으로 소재는 주로 대형용 열간 공구강인 STF4를 사용한다. 이는 열충격에 민감하지 않고 전연성이 상대적으로 양호하여 공구의 QT열처리 및 사용과정에서의 파손민감성이 높지 않으므로 엔빌 등에 주로 사용되는 전형적인 대형공구용 소재이다. 반면에 열간강도 및 연화저항성이 낮아 연속조업이 이루어질 경우 쉽게 열화되어 함몰 등의 문제가 발생되므로 수명 만족도는 높지 않은 편이며 특히 함몰로 인해 엔빌의 평탄도가 저하될 경우 생산되는 각재의 표면품질에 치명적인 영향을 주는 문제점을 가지고 있다. 이러한 조건에서 최근 각재의 조업량 증가, 단조 생산제품의 고합금화 등으로 엔빌 수명의 감소가 가속화되면서 그에 대한 개선이 더욱 요구되는 실정이었다. 그동안 엔빌 수명개선 연구의 일환으로 엔빌의 사용 중 수냉각을 적용하는 방법, 슈퍼알로이급 소재인 IN718의 대체시험 등이 수차례 시도 되었으나 엔빌의 변형발생 등의 문제로 그다지 효과적인 결과를 얻을 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 기존소재 대비 고온특성이 우수하며 탁월한 내열성을 갖는 개발강 KHW1급의 소재선택을 통해 이와 같은 문제점들을 개선하고자 하였다. 특히 개발강 KHW1급의 경우 STF4에 비해 상대적으로 고합금 성분으로 효과적인 조직변태, 변형 및 균열 최소화 등의 관점에서 QT열처리 최적화가 매우 중요하므로 이에 대한 연구(QT공정 및 설비의 개발)를 중점적으로 수행하고자 하였다. 또한 개발의 성공을 통해 엔빌의 수명개선과 동시에 개발된 QT열처리 공법을 적용하여 저합금 고속도 공구강 KHW1급의 중·대형공구로의 확대적용이 가능하도록 하였다.

2. STF4 엔빌의 수명개선의 필요성

평엔빌을 이용 일반단조용 각재를 조업하는 형상을 아래의 그림1의 a)에서 볼 수 있다. 이와 같은 STF4 엔빌은 낮은 연화저항성, 열간함몰 특성으로 평균적으로 제품 55톤의 작업을 하게 되면 필연적으로 재가공을 실시해야하는데, 특히 11톤급 대형 잉곳트를 조업할 경우 그림1의 b)와 같이 심한 함몰현상을 관찰할 수 있다. 이러한 현상이 발생될 경우 1Heat의 조업을 채우지 못하고 엔빌 교체를 해야 하며, 교체가 용이하지 못할 경우 각재의 품질이 떨어지는 현상이 발생된다. 교체된 엔빌은 재사용을 위해 평탄하게 밀



a) STF4엔빌의 조업형상



b) 작업후 엔빌의 함몰형상

그림1. STF4엔빌의 조업형상 및 함몰형상

링으로 연마하는 재가공을 외부에서 실시하게 되는데 이와 같이 낮은 수명만족도로 인해 과도한 재가공비용 및 금형소모 비용이 문제시 된다. 일반적으로 STF4 엔빌의 경우 200mm의 가공 덧살을 부여 1회 평균 9.3mm 가공 후 약20회 재사용 한다. 또한 가공횟수가 증가할수록 경도저하 및 엔빌의 사용 평균온도의 상승 등으로 수명이 점차적으로 감소한다. 최근에는 일반 단조품 각재 생산량의 증가로 월 평균 엔빌 교체 횟수가 60회에 이르며 수선가공비가 월1000만원 이상으로 급증 하였으며 연간 32개의 엔빌의 신규제작이 요구되는 실정이었다. 비용적인 요소 외에도 엔빌의 잦은 교체로 인해 연속 작업시 생산성 감소, 엔빌의 과도한 적재 공간 필요, 단조각재 품질의 저하 등의 문제가 발생되었으므로 수명향상을 통한 문제점 개선이 시급히 요구되는 실정이었다.

3. 이론적 배경

본 연구에서는 개발강인 열간 저합금 고속도공구강을 평엔빌에 적용 획기적인 수명향상을 이루고자 하였다. 열간 개발강 KHW1급의 경우 사내강종명으로 KH4와 KH4M이 있으며 개발 초기모델은 KH4로서 그림2의 개념도에 볼 수 있듯이 STF4에 비해 전연성 및 충격인성은 낮지만 우수한 열간 특성으로 QT 열처리 및 사용과정에서 파손민감성을 극복할 경우 획기적인 수명개선이 기대 되었었다. 일반적으로 고탍금 공구강인 SKH계열의 경우 높은 내마모성 및 열간 특성에도 불구하고 까다로운 열처리조건과 낮은 충격인성으로 중대형공구에는 적용되는 사례가 매우 드물며 단지 100kg 이하의 소형정밀 공구에 적용되는 실정이다. 금번 개발강 KHW1은 기존의 SKH계열에 비해서 대폭 개선된 인성특성을 갖는 조건으로 공구의 대형화 적용 가능성을 확대시키고자 하였으며 이러한 성분특성을 최적화된 QT열처리 조건과 접목시킬 경우 기존의 고탍금 고속도 공구강 적용개념에서 탈피 중대형 공구로의 적용확대가 가능하리라 판단된다.

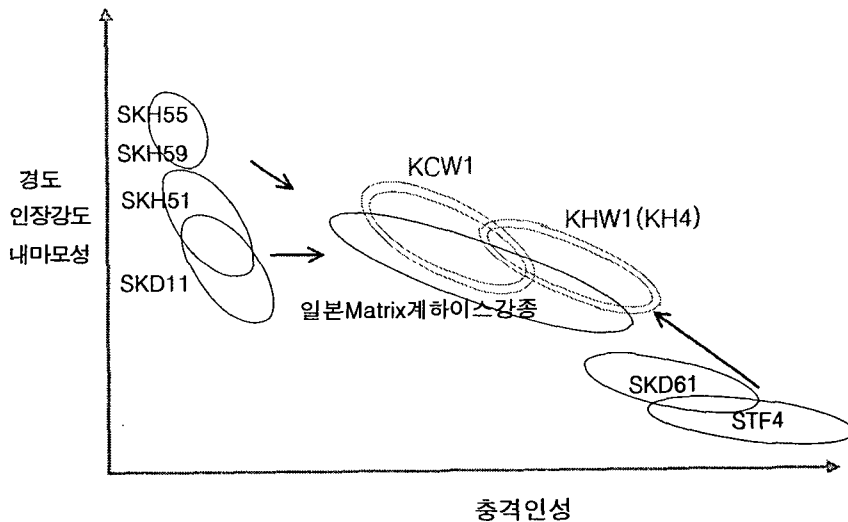


그림2. 1차 시험에 적용된 개발강 KH4의 공구강 개념도

1) 개발강의 연화저항특성

그림3은 개발강 KHW1급의 고온에서의 연화저항 특성을 나타내는 것으로 기존의 엔빌 소재인 STF4와 수입 열간 세미 하이강을 700℃ 고온에서 장시간 노출될 경우 초기경도 대비 기지의 경도가 감소하는 경향을 보여준다. 실험결과에서 알 수 있듯이 KH4M 소재는 다소 합금성분이 높은 KH4, YXR33소재에 비

해 경도의 감소 폭에 있어서 큰 차이를 보이지는 않았음을 알 수 있다. 반면 STF4의 경우 고온에서의 노출 시간이 지남에 따라 상대적으로 급격한 경도 저하현상을 볼 수 있으며 12시간 노출 후 HRC14 수준으로 열간 공구로서의 기능을 상실할 수 있는 조건임을 알 수 있다.

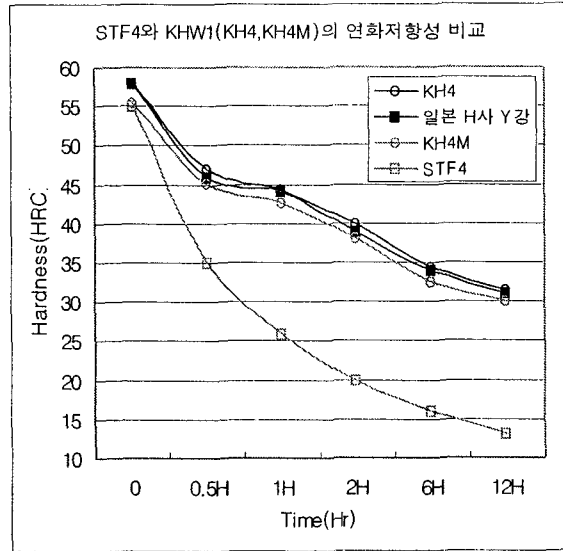


그림3. 개발강의 연화저항 특성 그래프

고온 연화저항 시험 후 미세조직 변화를 관찰해 보면 개발강의 연화기구가 기존 열간 공구강과 매우 다르다는 것을 알 수 있다. 그림4에서와 같이 기존 연발 소재인 H13급의 열간 공구강은 고온에서 장시간 노출될 경우 QT열처리 후 잔존된 탄화물이 핵생성 Site로 되어 탄화물의 응집 및 성장이 급속히 일어나고 입계 및 입내에서 새로운 탄화물이 석출하고 응집하는 속도가 매우 빠르다는 것을 알 수 있다. 개발강의 경우는 그 탄화물의 응집 속도가 매우 느리다는 것을 알 수 있으며, 12시간 이상 노출되었어도 탄화물이 완전히 구상을 이루지 않는다는 것에서 개발강의 합금설계는 고온 연화저항성 향상이라는 면에서 매우 효과적이다.

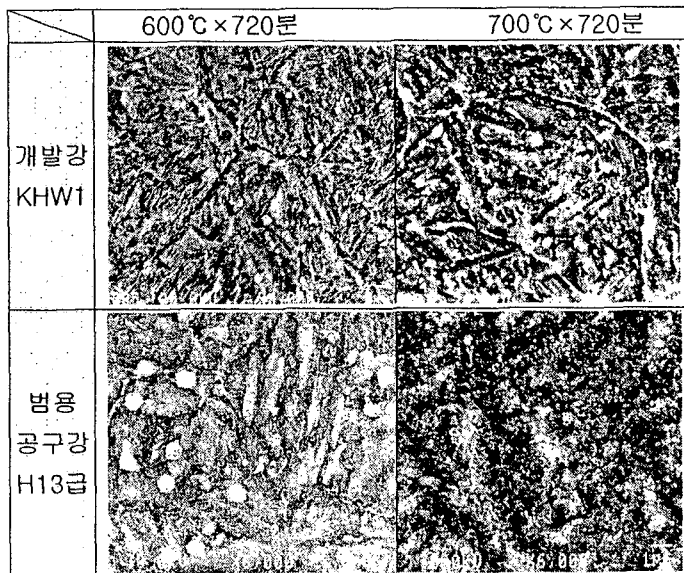


그림4. 연화저항시험 후 H13급과 KHW1급의 미세조직 비교

가 더욱 느린 4번 영역에서 더욱 심화되며 퀴칭과정에서 이미 석출된 탄화물로 인해 오스테나이트에 고용된 탄화물 석출원소의 고갈로 2차 경화 현상을 볼 수 없는 경도 저하현상 및 입계노치 효과에 의한 인성 저하⁶⁾가 유발된다. 또한 기지조직에 있어서 완전한 마르텐사이트 변태가 아닌 혼재상의 불완전변태는 사용과정에서 피로특성 및 내마모성 감소로 현저한 공구수명 감소를 유발한다.

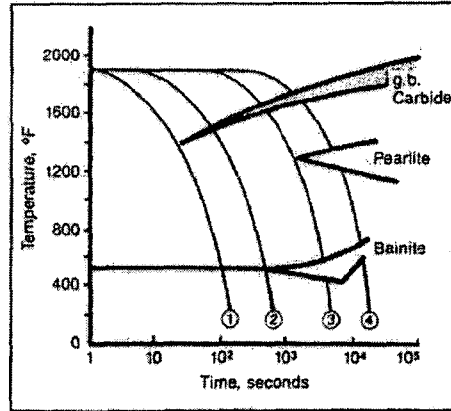


그림6. 퀴칭시 냉각속도에 따른 변태특성 개념도

이러한 측면에서 볼 때 Ms점 직상까지의 빠른 냉각을 이루다가 변태점 영역인 270°C 부근의 통과 이후에는 적절한 서냉각을 이루는 것이 공구의 우수한 조직변태 뿐 아니라 변형 및 균열 등의 문제점을 최소화시킬 수 있다. 제어냉각 개념으로 고속도공구강급의 열처리에는 염욕(salt bath) 열처리가 매우 이상적으로 사용되고 있으나 열처리재의 크기가 대형화 될 경우 기존의 염욕열처리 설비 및 공정조건에서는 냉각속도의 확보가 어렵고, 유조(oil bath) 냉각을 실시할 경우 냉각속도의 확보 매우 유리하나 열추출 과정에서의 내외부 온도 편차로 인해 변형과 균열 등이 발생할 가능성이 높아진다. 그러나 최근까지는 대형 중량의 열처리재에 있어서 염욕설비의 개발이 이루어지지 못하였으므로 차선으로 유냉각 후 인상공법을 통한 열처리를 실시되어왔다. 개발강의 경우 기존의 고탍금 고속도공구강 대비 성분 특성상 대형공구로의 사용가능성이 증가되었으므로 초대형 사이즈의 염욕퀴칭 설비의 개발은 충분한 가치가 있으며 성공적 적용이 이루어질 경우 대형공구의 적용에 매우 효과적 일 것으로 판단된다. 결국, 개발강의 기계적 특성 및 물리적 특성을 한층 배가시킬 수 있는 개발강 고유의 QT열처리 조건의 확보는 수요자에 만족할 만한 최적의 금형 수명을 제공에 있어서 매우 유용한 기술이라 생각된다.

4. STF4 연구의 진행도

그림7을 통해 본연구의 진행 공정도를 요약해 볼 수 있다. 우선적으로 STF4가 갖는 문제점들의 도출을

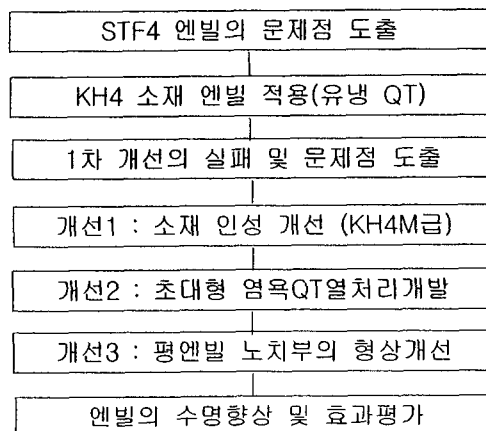


그림7. 엔빌 개선 연구의 진행도

통해 수명의 약점을 극복할 수 있는 소재의 선택을 이루고자 하였다. 우선적으로 선택시점에서 상업화 되었던 개발강 초기모델인 KH4급 소재를 1차 개선 시험 소재로 적용하고자 하였으며 QT 열처리 는 염욕 처리공법이 최적안으로 검토되었으나 국내 대용량 설비의 미비로 불가피하게 유냉 퀘칭을 통한 인상공법을 적용하였다. 그러나 이와 같은 조건의 1차 시험재는 다양한 노력에도 불구하고 QT열처리 및 사용과정에서 대부분 조기파손이 발생하였다. 1차 시험의 문제점분석을 토대로 3가지 개선점을 도출하여 최적의 공정조건을 설정 엔빌을 제작하였으며 약1년에 걸친 장기간의 시험을 통해 수명향상의 여부를 평가하였다.

5. 시험 결과 및 고찰

1) 1차 시험결과(KH4+유냉퀘칭)

1차 시험은 KH4 소재를 선택하여 유냉퀘칭 공법을 적용하였다. PIT로에서 1065℃로 80분간 충분한 가열 후 80℃로 유지된 유조에 급속히 침적을 시키게 되면 약15분간의 침적 후 엔빌 상면표면의 평균온도가 Ms점 직하인 200℃에 도달하게 되는데 이때 즉시 열처리물을 들어올리는 인상공법을 실시하게 된다. 이 경우 중심부에 존재하는 잠열이 외측으로 추출되면서 약 150℃정도의 복열(reheating) 현상이 발생하게 되는데 그림8의 점선영역과 같은 조건의 냉각속도를 구현하기 위해 온도를 강하시키는 1-2회 반복인상을 실시하게 된다. 이와 같이 대형공구에서는 질량효과에 의해 내외부의 온도편차가 발생되기 때문에 균열발생 확율은 급증하게 되어 열처리의 난이도가 급증하게 된다. 유냉퀘칭시 80℃의 수용성 U-con 오일에 침적할 경우 약 1.5℃/sec의 비교적 빠른 속도의 장점은 있지만 냉각속도를 제어할 수 있는 요소는 단지 인상시점의 조절만으로 가능하며 복열현상으로 표면부의 평균온도를 200℃ 까지 강하시켜야 하며 그 경우 코너부 또는 노치부 등 최표면 층의 요철부는 강냉각의 심화로 크랙발생 또는 잠재크랙 등의 발생가능성이 증가된다. 따라서 퀘칭시 가급적 내외부의 균일한 냉각을 급속히 이루면서 복열의 최소화로 변태점 부근에서는 완냉각을 이룰 수 있도록 냉각매질과 인상조건을 선택하였다. 그러나 대부분의 시험된 조건에서 엔빌 소재에서 사용도중 또는 열처리균열이 발생되어 기존의 STF4 소재에 비해 장수명화를 이루지 못하였다.

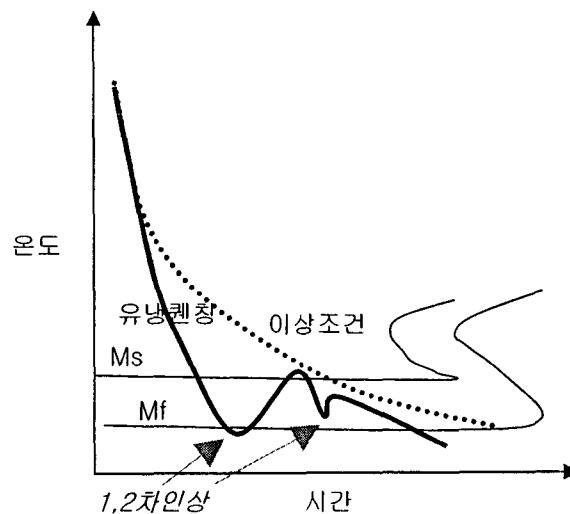
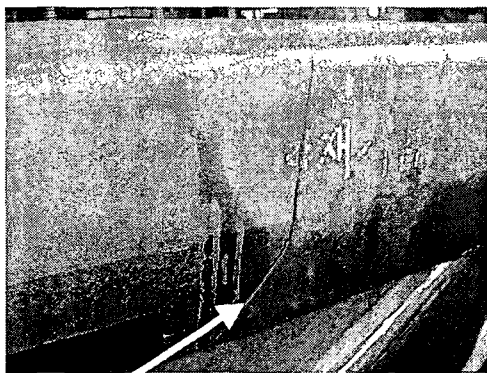


그림8. 유냉퀘칭의 개념도

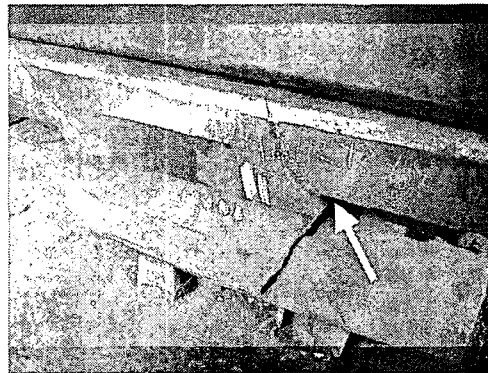
표1. KH4소재와 유냉켄칭이 적용된 시험결과

구분	엔빌 사용량	파손 원인	문제점
No.1	100톤	단조작업 후 냉각중 크랙	소재의 자경성 특성 및 전연성의 부족에 기인
No.2	90톤		
No.3	300톤	평면부, 고정키부의 크랙발생	소재물성 및 엔빌 설계 고정부의 형상적 문제
No.4	11톤	고정키 부 열처리크랙	수용성오일에 의한 과다냉각 및 복열에 의한 불완전 켄칭 및 잠재크랙 추정

표1에 1차개선 조건으로 수명평가된 결과를 나타내었으며 사용시 대부분 11-300톤 범위에서 조기파손이 발생되었으며 크게 면중심부 파손과 고정노치부부분의 파손으로 대별되었다. No.3의 KH4 엔빌은 그림9 a)와 같이 약 108톤 조업 후 화살표 위치에서 크랙이 발생되었다. 크랙부는 엔빌면 중심으로 급속도로 진전되어 엔빌의 완전한 파손이 발생되었다.



a) 엔빌 상단 중심부 파손기점



b) 엔빌 노치부 파손기점

그림9. 열간단조 엔빌의 크랙부위 확대형상

그림9 b) 또한 화살표인 노치부에서 엔빌의 균열이 발생되어 진전된 것으로 이는 열처리 과정에서 유냉켄칭의 급속냉각에 의한 파단근원부의 잠재크랙의 발생에 기인된 것으로 판단된다. 1차 개선시험을 통해 향후 엔빌소재는 KH4에 비해 공정 탄화물 절대량 및 크기를 다소 감소시켜 소재의 인성향상 및 전연성을 부여할 수 있는 성분의 개정이 필요하며 유냉 켄칭과 유사한 냉각속도의 구현이 가능하면서도 급격한 냉각에 의해 발생하는 균열 및 잠재크랙을 방지할 수 있는 제어냉각 개념의 켄칭 적용이 요구된다. 따라서 전술된 바와 같이 최적의 냉각속도가 구현 될 수 있는 영욕 QT설비를 대형화시켜 적용할 필요가 있다고 판단된다. 또한 열처리냉각 과정 및 사용과정에서 크랙발생을 최소화시킬 수 있도록 엔빌 취약부의 형상개선을 시킬 필요가 있다.

2) 2차 개선 시험결과

① 개선1 : 소재의 인성개선

2차 개선의 첫 번째 중요포인트로 소재가 갖는 고유성분을 조절하여 열간특성 및 내마모성은 크게 희생되지 않으면서도 충격인성이 개선될 수 있도록 설계된 KH4M급 소재를 적용하고자 하였다. 그림10을 통해

기존의 엔빌 소재인 STF4와 1차 적용된 KH4소재, 2차 개선시험 하고자 하는 KH4M 소재중심부에 대한 경도대역별 상대적 충격인성값을 비교해 볼 수 있다. KH4M은 기존 KH4소재에 비해 충격인성을 약 60% 이상 개선하여 엔빌의 사용경도 대역인 HRC40-45 범위에서 충분히 전연성 및 인성을 확보하고자 하였고 소재자체가 갖는 파손민감성을 감소시키고자 하였다. 이와 같은 STF4와 초기모델 KH4의 각각의 장점이 취해진 KH4M으로 엔빌을 적용할 경우 효과적인 결과를 얻을 수 있으리라 판단된다.

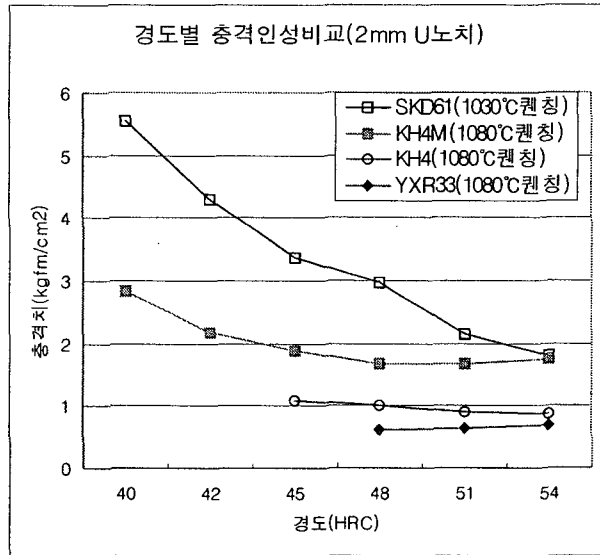


그림10. KH4M의 기존소재와 충격인성비교

② 개선2 : 대형 영욕 QT열처리 설비제작 및 최적조건 설정

열처리에 있어서 유냉 켈칭이 적용된 경우 부분적인 균열 및 변형으로 조기파손의 원인이 되므로 Ms점까지는 급속히 냉각이 이루어지되 Ms점 이후에는 서서히 변태될 수 있는 영욕 켈칭 공법을 적용해보고자 하였다. 영욕켈칭은 그림11에서와 같이 저온로, 중온로에서 1, 2차 예열을 실시하며 고온로에서 목표온도로 오스테나이트화 후에 다시 저온로에 급속히 침적하여 변태를 시킨다. 이러한 공법은 주로 온도조절이 가능한 액적에 의해 균일하게 가열, 냉각되는 장점과 유냉켈칭에 비해 냉각속도를 적절히 조절하여 변태조직 제어 및 급속한 변형을 방지하는 장점이 있다.

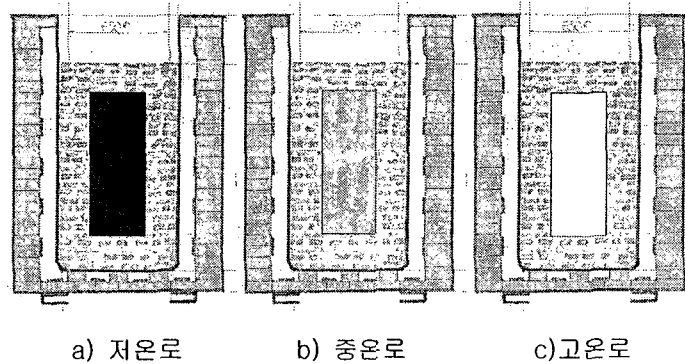


그림11. 대형 영욕열처리 설비의 형상 및 구성

고속도공구강의 경우 열처리 과정에서의 파손 예민성 저감을 위해 켈칭 유지온도를 약 500~550°C에서 주로 시행하며 소형 규격이므로 대부분 적절한 냉각속도를 확보할 수 있다. 그러나 엔빌의 경우 대형재이

므로 Ms 직상점 까지의 필요 냉각속도 확보를 위해 그림12와 같이 $\phi 700$, 깊이 1100mm의 대형화된 규모가 요구되었으며 저온염의 유지온도도 Ms점 이하인 180℃까지 제어가능하게 하여 충분한 냉각능을 확보하고자 하였다. 개발강 KH4M이 고합금 고속도 공구강에 비해 열처리 파손민감성이 낮으므로 설계된 온도범위의 냉각조건에서 균열 없이 충분히 목적하는 변태조직을 얻을 수 있으리라 판단된다.

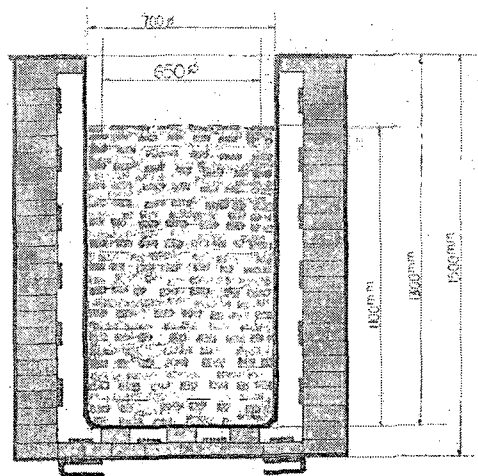


그림12. 대형 켈칭용 저온욕조

최적조건의 냉각이 구현될 수 있도록 염의 유지온도를 180-350℃로 변화를 주면서 침적시간과의 관계에 있어서 다양한 냉각속도를 측정하였다. 시험을 통해 200℃에서 23분간 유지 후 약 20분간 4번의 강풍냉각을 실시할 경우 그림 13과 같은 최적의 냉각 조건을 얻을 수 있었으며 80℃의 유조에서 15분간 침적 후 2회 반복인상이 이루어진 유냉 켈칭 조건과의 냉각조건을 비교해 볼 수 있다.

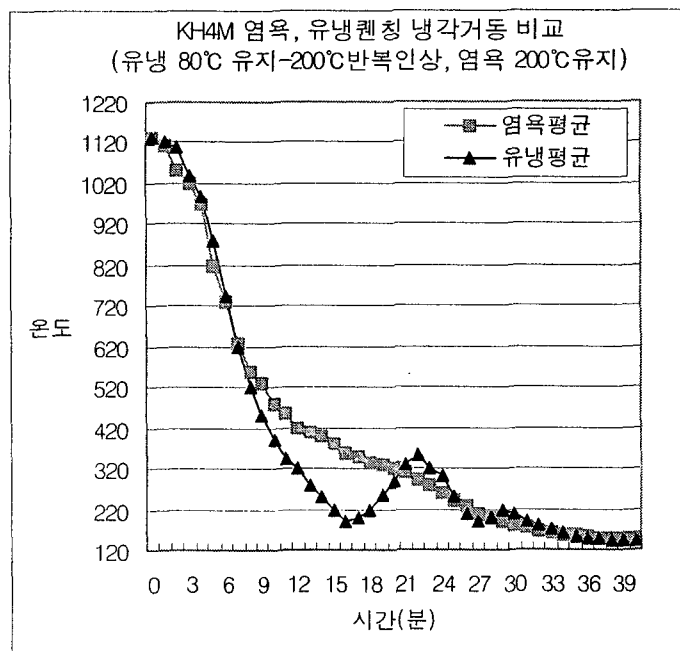


그림13. 염욕, 유냉 켈칭로의 엔빌 표면 중심부(상면)의 시간에 따른 냉각조건 비교

③ 개선3 : 형상개선

그림14의 점선부는 엔빌을 단조설비 본체에 고정시키는 고정키 부위로 1차 시험의 그림9 b)에서 볼 수 있는 바와 같이 열처리과정에서의 켄칭 크랙 또는 사용과정에서의 응력집중에 의한 균열 등이 우려될 수 있는 부분으로 초기설계도면에 약 3R의 날카로운 형상을 하고 있다. 파손민감성을 완화시키기 위해 형상을 우측부 그림b)와 같이 구배를 12R로 증가시켰으며 이는 동일한 열처리조건의 충격시험에서 시편의 V노치에 비해 U노치 형상에서 충격흡수에너지 값이 현저히 높게 나타나는 것과 유사한 원리라 할 수 있다.

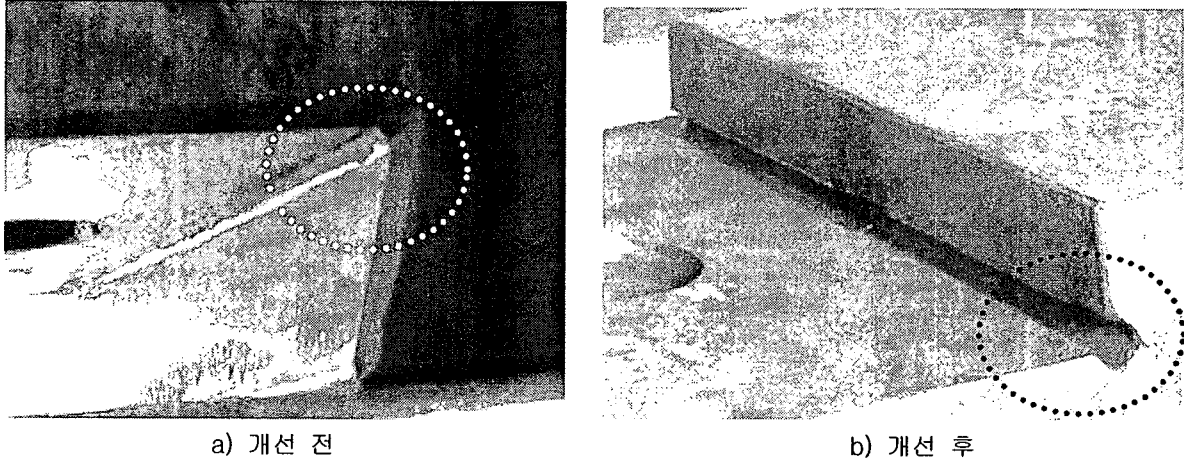


그림14. 평엔빌 하단 고정부의 노치형상

④ 2차 개선시험 결과

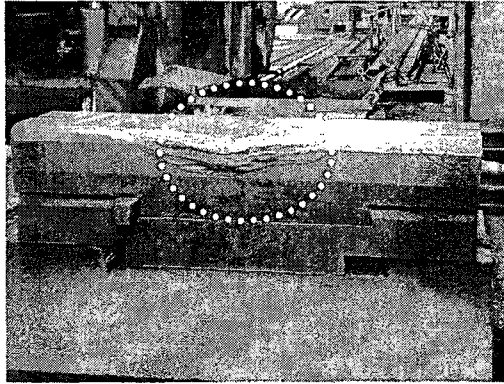
전술된 바와 같이 3가지 개선(KH4M+염욕QT+형상개선)이 적용된 2차 시험재의 평가조건과 수명결과를 표2에서 비교 하고자 하였다. 2차 시험 엔빌의 경우 기존의 STF4 엔빌에 비해 최대 10배까지의 수명향상

표2. 1, 2차 개선시험의 조건 및 수명결과 비교

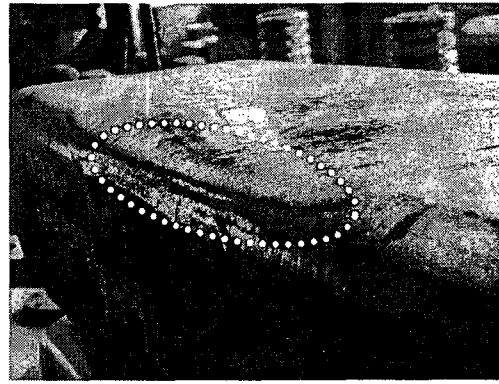
	강종	열처리	형상	시험갯수	평가기간	평균수명	재가공량
기존엔빌	STF4	유냉켄칭	-	-	-	55톤	9.6mm
1차시험	KH4	유냉켄칭	-	4개 2set	4개월	조기파손	-
2차시험	KH4M	개발된 염욕 켄칭공법	형상개선	10개 5set	1년	300톤 (최대500톤)	5.6mm

효과를 나타내었으며 1차 개선시험의 조기파손 현상이 전혀 발생되지 않았다. 또한 5set 엔빌을 20회 사용시 평균수명이 약 5배 이상 향상되는 효과를 얻을 수 있었다. 이는 소재자체의 인성이 약 60% 이상 개선되었고 특히 열처리에 있어서 켄칭시 염욕에 의한 액상점착의 균일냉각이 이루어졌으며 Ms점까지 급속히 냉각이 이루어지되 Ms점 통과 이후 서서히 변태가 이루어 질 수 있는 조건의 2차 개선 시험이 매우 유효했던 것으로 판단된다. 이와 같이 비록 고속도공구강급에 준하는 고합금의 대형공구임에도 불구하고 파손발생 가능성을 최소화시켜 사용할 경우 획기적인 수명개선이 가능하리라는 초기의 예상과 잘 일치하였다. STF4와 KH4M은 초기경도가 동일한 HRC43에서 사용을 시작하였으나 STF4가 11톤 잉곳트 55톤 사용 후 그림 15 a) 점선부와 같이 극심한 함몰현상을 보인 반면 KH4M의 경우 약 300톤 사용 후에도 상대적으로 함몰정도가 완화된 것을 볼 수 있다. 조업시 잉곳트와 접촉하며 엔빌의 최표면부의 순간온도는 700℃ 이상의 고열이 발생될 수 있으므로 이를 모사하여 700℃ 약 12시간 노출을 시켜 비교를 해 본 비교 시험

과도 잘 일치하며 이는 탄화물이 쉽게 분해되지 않고 마차 콘크리트의 골조와 같이 열간 상태에서의 압축 응력에 대한 버팀목의 역할을 효과적으로 수행 하였다고 생각된다.



a) STF4엔빌 55톤 사용후 형상



b) KH4M 엔빌 300톤 사용 후 형상

그림 15. KH4M 하형 엔빌의 형상비교

이와 같이 5배 이상 사용되었음에도 불구하고 함몰정도가 심하지 않으므로 평탄을 위한 재가공시 평균가공량은 STF4 평균 9.3mm에 비해 5.3mm로 약 40% 감소하였다. 결과적으로 엔빌의 고성능 소재선택 및 성공적인 열처리를 통해 재가공비의 감소, 재가공시 엔빌 손실 감소에 의해 11개월간의 시험을 통해 연간 약 1억 2천 9백만원의 비용절감 효과(84% 조업 투입율)를 볼 수 있었다. 향후 100% 개선된 엔빌 투입이 이루어질 경우 연간 최대 약 1억 5천만원의 비용절감효과를 기대할 수 있으며 또한 각재 조업시 엔빌의 평균 조도의 향상으로 제품의 품질향상, 5Heat 이상의 잉곳트 연속작업을 통한 생산성 향상효과를 기대할 수 있게 되었다.

5. 결 론

일반단조 평엔빌 수명개선 및 대형공구강 영욕 QT 개발 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) KH4 평엔빌의 유냉 퀴칭 적용된 1차 시험에서 적용된 4회 모두 전량조기 파손되는 문제가 발생되었다.
- 2) 성분이 개선된 KH4M으로 소재인성을 약60% 향상시켰으며, 개발된 영욕 QT열처리를 적용한 결과 파손 없이 약 5배 이상의 수명향상 및 엔빌 재가공로스의 약80%를 감소시킬 수 있었다.
- 3) 조업 중 평균조도의 향상효과로 각재제품의 품질향상 효과를 얻을 수 있었으며 5Heat 이상의 잉곳트를 연속 작업할 수 있게 되어 생산성 향상효과를 얻을 수 있었다.
- 4) 개선조건의 엔빌을 5set 제작하여 약 11개월간 조업에 84% 투입 적용한 결과 연간 약 1억 2천 9백만원의 비용을 절감효과를 얻을 수 있었으며 100%투입될 경우 연간 약1억 5천만원의 효과를 예상할 수 있었다.

* 참고문헌

- 1) 代木武博 : 電氣製鋼, 64, 3, 1992, 172
- 2) S, KARAGOZ : Metallurgical Transaction A, 20A 1989, 2695
- 3) Tamiki Yanagisawa, Koh-ichi SUDOH : 電氣製鋼, (1989) 60(4) 324
- 4) 上原紀興 : Testu to Hangane, (1979) S977, 463.
- 5) Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite, AIME,(1981) 613.
- 6) 산업과학기술원 : 열처리기술, (1990) 5 201.