

DMT™기술을 이용한 손상 소재금형의 재생

Application of DMT Technology for Restoring the Damaged Tools

(주)인스텍 서정훈, 우성식, 김대중
현대자동차(주) 서만석, 황지선, 김억조

I. 서 론

DMT™(Direct Metal Tooling)기술은 제품이 요구하는 기능성 소재(금속, 합금, 세라믹 등)를 사용하여 컴퓨터에 저장되어 있는 3차원 형상의 기하학적 자료(digital data of 3D subjects¹⁾)로부터 직접 3차원 형상의 제품 또는 제품생산에 필요한 툴(tools²⁾)을 매우 빠른 시간 내에 제작할 수 있는 신개념의 패속 직접금속성형기술(laser-aided direct metal fabrication)로써, 손상된 금속파트나 혹은 금형의 재생(restoration), 리 모델링(remodeling) 및 보수(repairing)에도 효과적으로 활용할 수 있다.

금형이 마모나 파손 등의 이유로 인하여 손상되었을 경우 손상 정도에 따라 금형을 새로 제작하거나 혹은 육성용접 등의 방법을 사용하여 보수하는 것이 일반적이다. 그런데 금형을 새로 제작할 경우 금형 제작비용과 시간이 부가적으로 소요되고 장기간의 생산지연으로 발생하는 경제적 손실이 크다는 단점이 있고, 육성용접방법을 이용하여 금형의 보수할 경우에는 예열과 용접과정에서 발생하는 열로 인해 금형의 변형과 균열 등의 결함이 쉽게 발생되며, 모재와 용접부위간의 경도편차와 열충격의 발생, 그리고 기계적 재료성능의 저하와 같은 문제점이 발생된다.

DMT기술을 적용할 경우 육성용접방법에서 발생하는 문제점이 수반되지 않고, 금형과 동일한 합금을 사용하여 손상 부위의 CAD 데이터로부터 직접 손상 금형을 새 것처럼 재생할 수 있다. 본 연구에서는 DMT 기술을 적용하여 손상된 소재 금형을 회복 또는 재생하고 이를 다시 생산에 재 투입하기 위한 기술적용의 타당성과 회복된 소재금형의 물성평가 연구를 수행하였다. 본 연구를 위해 2종의 소재금형을 선정하였는데, 하나는 다이캐스팅 금형인 T/M Case Insert(그림 1)이고 다른 하나는 열간 단조금형인 D-1.5/2.0 DSN Engine Connecting-rod Trim Punch(그림 2)였다.

DMT is the trade mark of InssTek, Inc.

1) 3D CAD data, CT and MRI scan data, digital data created from 3D object digitizing system, etc.

2) Die, Mold, etc.



그림 1. T/M Case Insert의 CAD 모델

그림 2. Con.-Rod Trim Punch의 CAD 모델

II. 실험방법

1. 선정금형의 개요

(1) 다이캐스팅 금형

품 명	F5A51 T/M Case Insert	제작공정	황삭-QT-정삭-방전-사상-질화처리
재 질	SKD 61 공구강	경 도	HRC 44 ~ 46
열처리	QT	질화공정	540℃, 4h
열처리 공 정	600℃, 1h + 850℃, 1h + 1030℃, 2h + 50℃, 2h + 3차 템퍼링(560℃, 3h + 600℃, 3h + 580℃, 3h)		
주요손상	heat-check, 알루미늄소착, 균열등	대처방법	신규 제작
비 고	알루미늄 소착을 방지하기 위하여 질화 처리를 함.		

(2) 열간 단조금형

품 명	D-1.5/2.0 DSL Engine Con-Rod Trim Punch	재 질	S45C 또는 SKD 61
열처리	Q.T	경 도	S45C; HB201 ~ 269 SKD 61; HRC 44 ~ 46
열처리 공 정	600℃, 1h + 850℃, 1h + 1030℃, 2h + 50℃, 2h + 3차 템퍼링(560℃, 3h + 600℃, 3h + 580℃, 3h)		
주요손상	Trimming edges의 마모 및 파손	대처방법	신규 제작 또는 육성용접

2. 재 료

손상된 T/M Cast Insert의 재질은 SKD 61종 공구강이고, Con.-Rod Trim Punch는 S45C였다. 그리고 DMT 공정에서 사용된 클래딩 소재는 구형입자를 갖는 SKD 61 공구강이었다.

III. 결과 및 고찰

1. 손상 금형의 분석

(1) T/M Case Insert

가. 경도

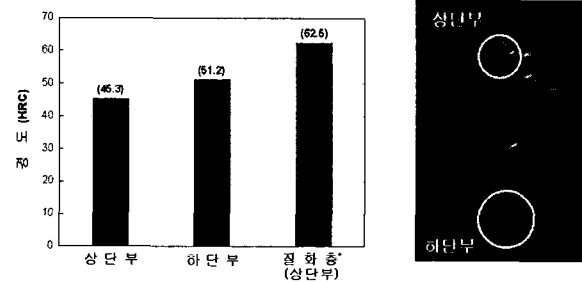


그림 3. 손상 T/M Case Insert의 부위별 경도

나. 미세조직

손상된 T/M Case Insert 금형은 탄화물이 석출 분산되어 있는 전형적인 템퍼드 마르텐사이트(tempered martensite) 조직을 갖는다(그림 4과 5). 마르텐사이트는 형태상 세지상 마르텐사이트(lath martensite)에 속하며(그림 5), BCC 결정구조를 갖고 있고 X-선 회절분석 방법으로는 잔류 오스테나이트(retained austenite)의 존재를 확인할 수 없었다.

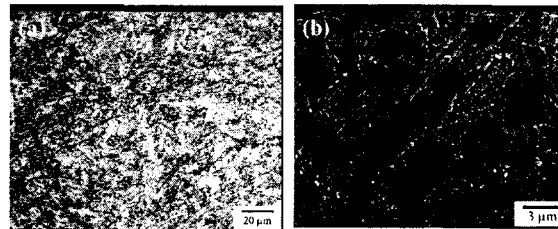


그림 4. 손상 T/M Case Insert의 미세조직. (a) 광학현미경과 (b)주사전자현미경 조직

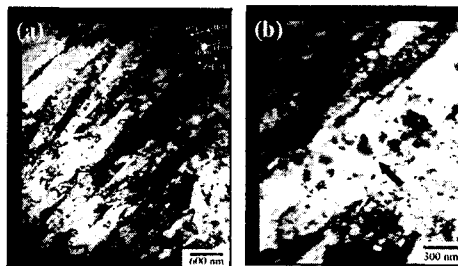


그림 5. 손상된 T/M Case Insert 금형의 투과전자현미경 조직.
(a) 세지상 마르텐사이트와 (b) 마르텐사이트 내부에 석출된 탄화물

시편에서 관찰되는 탄화물은 크게 2가지로 분류할 수 있다. 하나는 QT처리과정에서 오스테나이트상과 공존하던 것으로 미세조직에서 비교적 큰 입자크기를 갖고 있고, 다른 하나는 3차 템퍼링(tempering)과정에서 마르텐사이트 내부에 석출된 미세한 탄화물이다. 탄화물이 매우 미세하여 EDAX 결과를 정량적으로 평가하기 어렵지만, 정성적으로 탄화물이 기지상보다 V, Cr, Mo 성분의 조성이 높게 측정되었다.

다. 질화층 및 알루미늄 소착

T/M Case Insert는 다이캐스팅 과정에서 알루미늄의 소착을 억제하기 위하여 금형에 질화처리를 하여 사용하고 있고, 실제로 손상된 T/M Case Insert 금형에서도 200 μm 깊이의 질화층(질소원소의 확산층)이 관찰되었다. 그러나 그림 6의 (a)에서 보여주는 바와 같이, 손상 T/M Case Insert의 상단 부분에 있는 표면에서 알루미늄 소착이 관찰되었고, 소착된 알루미늄과 금형표면 사이에 대략 3 μm 두께의 화합물 층이 관찰되었다.

그림 7은 금형 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 미세조직과 EDAX 분석결과를 정리요약한 것이다. 금형표면에 소착된 합금층에서는 Al보다 Si원소가 더 많이 함유된 것으로 분석되지만, 이는 시편 표면에 형성된 알루미늄 산화물에 기인한 것으로 소착된 합금은 알루미늄 합금으로 판단된다. 알루미늄 합금과 금형 사이에 형성된 화합물 층은 Ti이 96wt% 이상이고 미량의 Al, Si 등이 함유된 것으로 분석되었고, 분석과정에서 N원소의 피크가 관찰되었던 점으로 미루어 화합물 층이 Ti 질화물인 것으로 판단된다. 그리고 Ti 질화 층은 다이캐스팅 과정에서 액상의 알루미늄 합금에 고용되어 있는 Ti 원소와 금형 표면의 질화층에 존재하는 질소 원자가 서로 반응하여 열역학적으로 매우 안정한 Ti 질화물 층이 금형 표면에 형성된 것으로 생각된다. 실제로 금형 표면에 소착된 알루미늄 합금의 EDAX 분석결과를 보면, Ti 질화물 층으로부터 멀리 떨어져 있는 부분에서는 Ti원소가 대략 1.1 wt% 정도 함유하고 있으나, Ti 질화물 층에 인접한 알루미늄 합금에서는 Ti 원소가 검출되지 않음을 볼 수 있다. 이는 알루미늄의 소착을 억제하기 위하여 수행된 질화처리가 오히려 소착을 증진시킬 가능성이 있음을 보여주는 것이다.

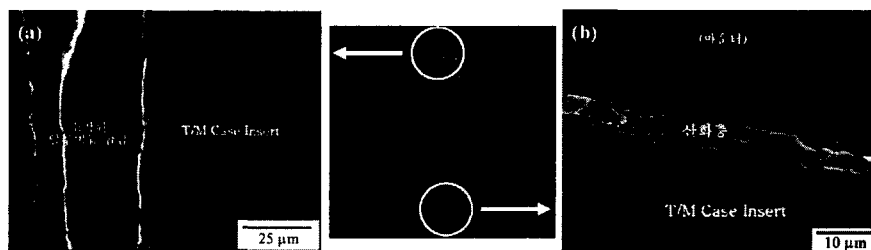


그림 6. 손상 T/M Case Insert에 대한 주사전자현미경사진. (a) 상단부 및 (b) 하단부

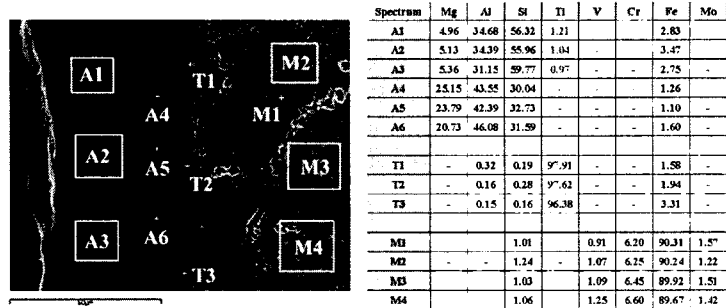


그림 7. 알루미늄 합금이 소착된 T/M Case Insert 금형 표면의 주사전자현미경 조직과 EDAX 분석결과(wt%).

(2) Connecting-Rod Trim Punch

가. 손상 부위

Con.-Rod Trim Punch 금형은 트리밍 날(trimming edges)이 모두 심하게 파손되어있고, 손상부위에서 존재하던 트리밍 날이 마치 brittle하게 부러져 나간 것과 같은 양상을 띄었다. DMT기술을 적용하여 손상된 금형을 보수하기 위하여 금형의 형상부를 밀링하였고, 이때 기계가공 표면에 얼룩 무늬가 관찰되었다. 특히 트리밍 날과 형상 봉위가 다른 곳에 비해 밝은 금속 광택을 보였는데 이는 트리밍 날과(또는) 형상부를 육성용접을 통해 보수한 것을 의미하며, 열간 단조 작업시에 육성용접으로 제작된 트리밍 날이 brittle하게 파손된 것으로 판단된다.

나. 미세조직

손상된 Con.-Rod Trim Punch 금형의 트리밍 날 부근을 절단하여 미세조직을 관찰하였고, 그림 8은 위치에 따라 서로 다른 광학현미경 조직을 갖고 있음을 보여준다. 그림 8의 (3)은 기지영역에서 관찰되는 전형적인 미세조직이며, 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite)가 공존하고 있다. 반면에 용접 부위에서는 그림 8의 (5)에서 보여주는 미세조직으로, 기지상과 전혀 다른 미세조직을 갖고 있다. EDAX 분석결과를 분석하면, AWS기준으로 E312-16에 해당하는 GRINOX-29(C 0.08%, Si 0.45%, Mn 1.30%, Cr 29.1%, Ni 8.5%, Fe bal.) 또는 이와 상응하는 용접봉(MG600 또는 KST-312 등)을 이용하여 육성용접을 하여 트리밍 날을 제작했던 것으로 판단된다.

기지상의 경우에도 용접부와 인접한 곳에서는 용접과정에서 발생된 열영향으로 인해 내부(그림9)에 비해 비교적 조대한 미세조직(그림10)이 관찰된다.

다. 경도

손상된 Con.-Rod Trim Punch 금형에서 용접부와 기지의 경도값은 대략 30HRC

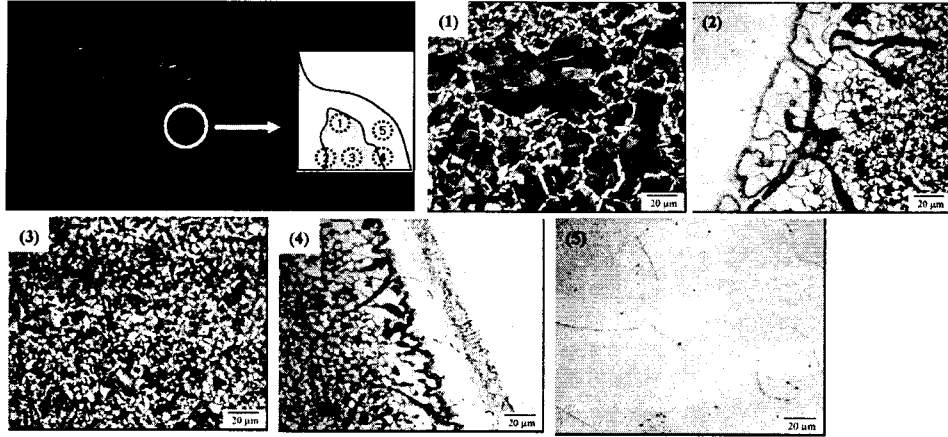


그림 8. 손상된 Con.-Rod Trim Punch의 트리밍 날 부근에서 관찰되는 미세조직 사진.

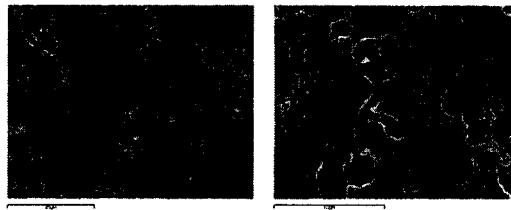


그림 9. 손상 Con.-Rod Trim Punch 금형의 기지 영역을 주사전자현미경으로 관찰한 미세조직.

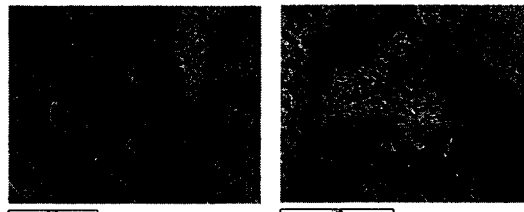


그림 10. 손상 Con.-Rod Trim Punch 금형에서 용접부와 인접한 경계영역 부근에서 비교적 조대하게 관찰되는 주사전자현미경 조직.

로 거의 비슷한 값을 갖고 있다(그림 11 참조).

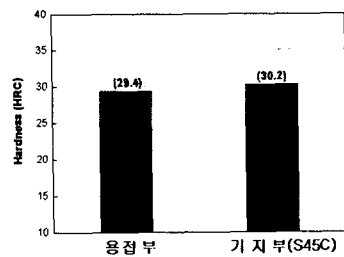


그림 11. 손상된 Con.-Rod Trim Punch의 용접부 및 기지부의 경도

2. DMT 시편

(1) As-deposited DMT 시편

가. 미세조직

그림 12는 as-deposited 상태의 DMT 시편(이하 As-deposited 시편)을 저배율의 광학현미경으로 관찰한 미세조직 사진으로, 반복적으로 적층 되어있는 클래딩 층을 뚜렷하게 볼 수 있고, 클래딩 방향에 따라 비드 형상에 상이하게 관찰됨을 알 수 있다. 이 조직을 그림 13과 14에서 보여주는 바와 같이 고 배율에서 관찰하면, 전형적인 클래딩 조직에서 관찰되는 미세한 수지상 조직(cellular dendrite structure)이 관찰된다. 그리고 수지상 내부는 세지상 마르텐사이트 조직을 갖고 있다(그림15).

그림 13과 14에서 보여 주는 바와 같이, As-deposited 시편의 최외곽(마지막) 클래딩 층과 내부 클래딩 층에서 관찰되는 수지상 조직이 크게 다를 수 있다. 최외곽층에서 관찰되는 수지상 조직은 탄화물로 판단되는 석출물이 연속적으로 연결되어 있는 네트워크 구조를 갖고 있다. 실제로 EDAX을 이용한 성분분석에 의하면, 탄화물로 판단되는 석출물이 셀 내부에 비해 더 많은 Cr, Mo, V 원소를 함유한 것으로 측정되었다. 그리고 주사전자현미경으로 관찰한 셀 내부에서는 미세한 탄화물이 관찰되지 않았다. 반면에 시편 내부의 수지상 조직(그림 13)에서는 탄화물이 셀 경계에서 불연속적으로 분포되어 있고, 또한 셀 내부에서도 극히 미세한 탄화물들이 분산 석출되어 있었다. 이와 같이 최외곽과 내부 클래딩 층에서 다른 형태의 수지상 조직이 관찰되는 이유는 DMT기술의 자체 템퍼링 효과(self-tempering effect)가 있기 때문이다. DMT 기술은 레이저 클래딩을 반복적으로 수행하여 3차원 형상을 구현하는 기술(그림 16)로써, 첫 번째 클래딩 층을 만들 때 대부분의 열은 모재(또는 금형 등의 보수 대상물)를 통해 빠져나간다. 그리고 2번째 클래딩 층부터는 열이 내부(또는 하위) 클래딩 층을 통해 전달되며, 이 열로 인해 내부 클래딩 층은 마치 템퍼링처리를 한 것과 유사한 미세조직을 갖게 된다. 따라서 As-deposited 시편은 셀 경계 부위에 탄화물이 석출되어 있고 셀 내부에 극히 미세한 탄화물이 분산되어 있는 템퍼드 마르텐사이트 조직을 갖는다.

마르텐사이트 상은 BCC 결정구조를 갖고 있으며, X-선 회절분석방법으로는 잔

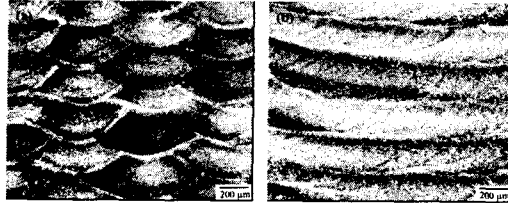


그림 12. As-deposited DMT 시편의 광학현미경 조직사진.
(a) 클래딩 방향과 수직, (b) 평행한 방향에서 관찰된 미세조직.

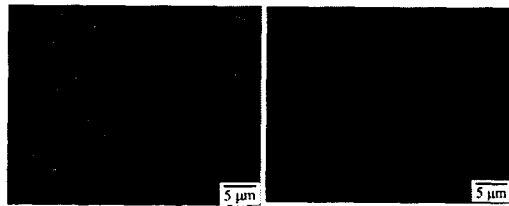


그림 13. As-deposited DMT시편의 최 외곽(마지막) 클래딩 층에서 관찰되는 수지상 조직(SEM).

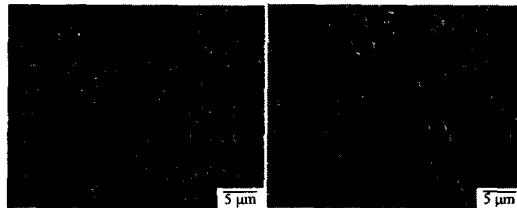


그림 14. As-deposited DMT시편의 내부에서 관찰되는 수지상 조직(SEM).

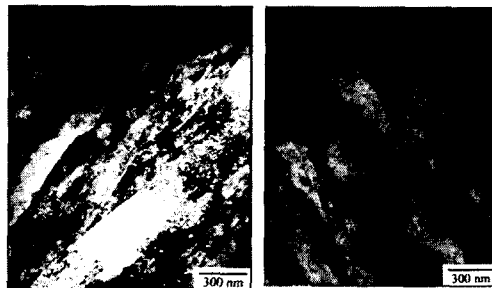


그림 15. As-deposited 시편에서 관찰되는 세지상 마르텐사이트(TEM).

류 오스테나이트 상의 존재를 확인할 수 없었다.

나. 경도

경도 값은 대략 57HRC이며 클래딩 방향에 무관하게 일정함을 알 수 있다.

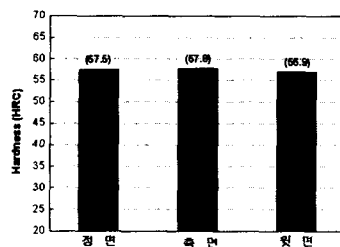


그림 16. As-deposited 시편에서 클래딩 방향에 따른 경도 변화.

(2) DMT 시편의 열처리

그림 17은 템퍼링 온도에 따른 As-deposited DMT 시편과 SKD61 시편의 경도 변화를 보여주는 그래프이다. 여기서 열처리 시간은 3시간이었고, SKD 61종 합금은 현대자동차의 T/M Case Insert를 제작할 때와 동일하게 열처리를 한 다음에 템퍼링 처리를 하였다.

DMT 시편이 표준 SKD 61 합금에 비해 경도가 높고, 비교적 높은 온도까지 경도가 유지되었다. SKD 61 합금은 약 575℃ 부근에서 경도값이 급격하게 감소되는 반면에 DMT 시편은 대략 600℃ 부근까지 약 56HRC 정도의 높은 경도가 유지되었다. 그리고 두 시편 모두 2차 경화현상이 관찰되었는데, SKD 61종은 525℃에서, DMT시편은 550℃ 부근에서 경도가 다소 증가하는 것을 볼 수 있었다.

그림 18은 템퍼링 조건에 따른 As-deposited DMT 시편과 표준 SKD 시편의 경도변화를 나타낸 그래프이다. 여기서 3차 템퍼링은 현대자동차 열처리 조건에서 템퍼링을 수행한 시편의 경도이고, 1차 템퍼링은 첫 번째 템퍼링(560℃, 3h)만을 한 시편의 경도 값을 나타낸 것이다. DMT 시편은 3차 템퍼링으로 경도 값이 2.4가 감소한 55.1HRC로 여전히 높은 경도를 유지하였고, 1차 템퍼링 만을 수행한 경우에는 오히려 As-deposited 시편에 비해 경도가 약간 증가함을 볼 수 있다. 표준 SKD 61시편은 3차 템퍼링으로 경도 값이 6.5가 감소한 49.9HRC로 측정되었다. 그리고 DMT와 SKD 61 시편 모두 손상된 T/M Case Insert에 비해 높은 경도 값을 갖고 있음을 볼 수 있다.

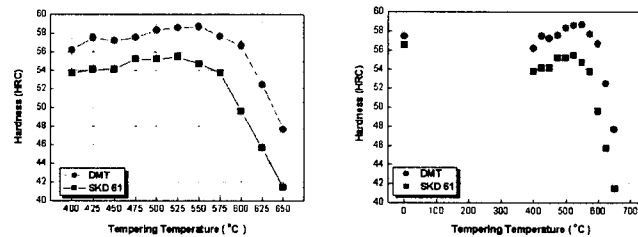


그림 17. 템퍼링 온도에 따른 DMT와 SKD 61 합금의 경도변화.

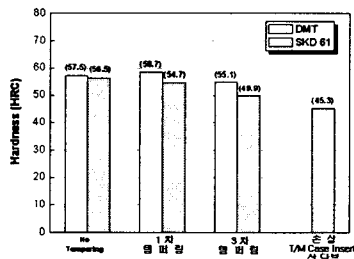


그림 18. 템퍼링 조건에 따른 DMT 및 SKD 61 시편의 경도 변화

3. DMT 기술을 이용한 손상 소재금형의 재생

(1) T/M Case Insert

DMT 기술을 이용하여 손상 금형을 보수한 다음 3차 템퍼링을 수행하였다. DMT 공정처리시 템퍼링 열처리가 반드시 요구되는 것은 아니며 열처리 조건에 따라 최대 57HRC까지의 높은 경도값을 얻을 수 있다. 그리고 최종 기계가공 후 질화처리를 수행하였다.

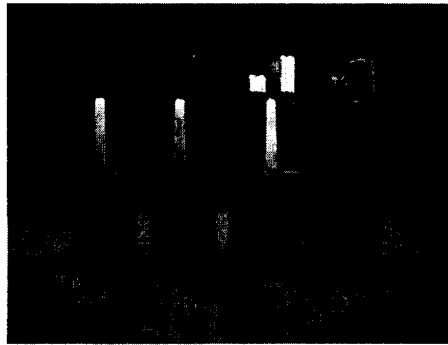


그림 19. DMT 기술로 재생된 T/M Case Insert.

(a) 손상부위의 기계가공, (b) DMT기술을 이용한 재생, (c) 최종 기계가공, (d) 질화처리

(2) Connecting-Rod Trim Punch

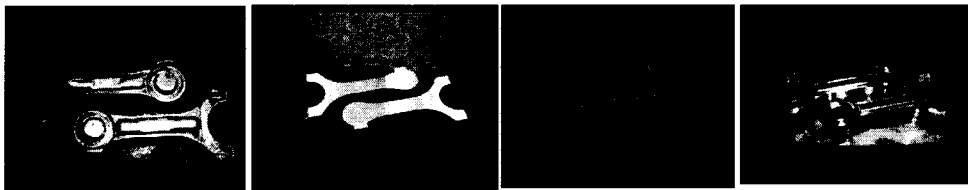


그림 20. DMT 기술로 재생된 Con.-Rod Trim Punch

(a) 손상된 금형, (b) 손상 부위제거, (c) DMT 기술을 적용한 금형의 재생, (d) 최종기계가공

IV. 결 론

본 연구에서는 DMT 기술을 적용하여 손상된 소재 금형을 재생하고 이를 다시 생산에 재 투입하기 위한 기술적용의 타당성과 회복된 소재금형의 물성평가연구를 수행하였다. DMT기술을 이용한 손상금형의 재생은 욕성용접방법에서 발생하는 치명적인 문제점들이 수반되지 않고, 금형과 동일한 합금을 사용하여 손상 부위의 CAD 데이터로부터 직접 손상 금형을 새 것처럼 재생할 수 있다.