

냉간단조용 금형의 열영향층 형성과 그 영향 The effects of heat-affected zone on cold forging die life

이영선, 이정환, 정순철*
Y.S.Lee, J.H.Lee, S.C.Chung*

한국기계연구원 재료공정연구부

*. (주)센트랄 기술연구소

Korea Institute of Machinery and Materials, Dept. of Materials Processing

*. CENTRAL Corporation, Technical Research Center

Abstract(요약문)

Heat-affected zones degenerated in cold forging die have been investigated to improve the tool life. There are many cases of heat-affected zone which are degenerated in manufacturing die and using the cold forging process. In order to define the amounts of grinding in manufacturing the tool for cold forging, we have investigated the hardness and microstructure of surface layer after EDM. Considering the results of T.R.S. and compression test, it is likely that mechanical properties of tool have been decreased sharply if the heat-affected zones degenerated by EDM were not machined properly. Also analyzed the tool surface which is fractured during the cold forging. According to the microstructures and hardness distribution, surface of many tools have been degenerated in cold forging and fractured due to the heat-affected zone.

Keyword : heat-affected zone, EDM, T.R.S. Compression Test, Cold Forging

1. 서론

냉간단조용 금형의 수명 안정화를 위해서는 금형가공과 단조 작업시에 발생할 수 있는 파손 원인을 정밀 분석하여 그 개선방안을 수립해야 한다. 금형파손 원인 가운데 가장 큰 요인은 $10^3 \sim 10^4$ 회 작업에서의 금형표면에서 발생하는 균열 진전, 박리, 결함등에 의한 결함 진전에 있으며 파손된 금형을 조사하면 특히, 성형시 피가공재와 접촉하는 표면에서 여러 가지 원인에 의한 열 영향층이 관찰되고 있다. 따라서, 금형의 수명 안정화를 위해 냉간단조 금형의 조기 피로 파괴에 대한 원인 분석을 통하여 그 대책을 수립하고자 하였다. 이러한

열 영향층을 원인별로 분류하면 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 방전가공과 냉간단조작업 자체에 의한 것이 전체의 60% 이상을 차지하고 있다.⁽¹⁾ 따라서, 열 영향층에 의한 공구 표면의 취화 또는 미소 균열의 존재에 의한 금형의 조기 파손에 대한 분석이 필요하다.

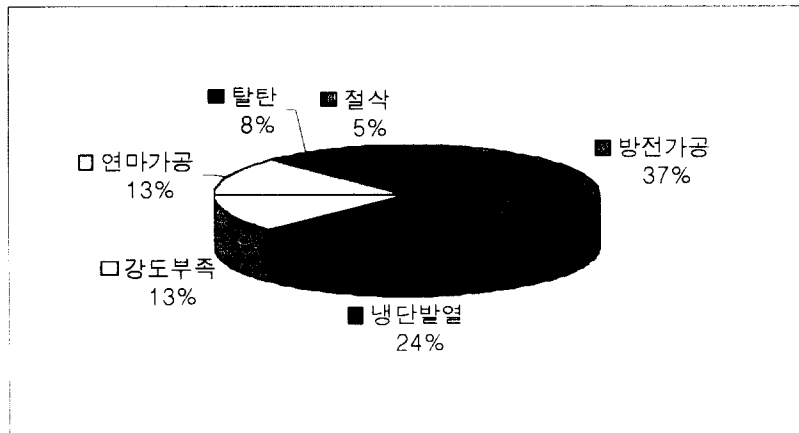


Fig. 1. Causes of formation of heat-affected zones in the die surface

본 연구에서는 방전가공 조건에 따른 방전이상층의 형성 형태 및 특징과 이에따른 기계적 성질의 영향을 조사하기 위해 조직, 경도, 압축파단강도, T.R.S.(Transverse Rupture Test) 등의 시험을 수행하였다. 사용된 소재는 냉간금형으로 널리 사용되고 있는 SKD11, SKH51 등의 재질을 이용하여 압연방향과 직각방향의 특성을 분석하였으며, 방전가공 조건에 따른 영향을 분석하기 위해 방전가공 속도를 1.0, 2.0, 3.5, 7.0mm/min. 등으로 변화시켜 방전이상층의 발생 정도 및 특징을 조사하였다. 이와 같은 결과는 방전가공을 통하여 가공되는 금형의 최종 마무리 연마 가공조건에 선정에 필요한 데이터로 사용될 수 있다.

또한, 냉간단조작업에 의한 열영향층의 발생에 대하여 조사하기 위해 작업에 사용되어 조기 파손된 금형과 10⁴ 회 이상 사용되어 파손된 금형(핀치류)들의 표면을 분석하였다.

2. 연구 내용

냉간단조 라인의 생산성 향상을 위해서는 무엇보다도 라인의 가동 중단을 감소시켜야 하며 이를 위해서는 금형의 마모 혹은 파손으로 인한 금형 교체의 회수를 가능한 감소시켜야 한다. 따라서, 금형수명의 안정화는 매우 중요한 요소이며, 금형의 수명 안정화를 위해 냉간금형의 조기 피로 파괴에 대한 원인 분석을 통하여 그 대책을 수립할 필요가 있다.

본 연구에서는 금형의 조기 파손에 영향을 미치는 원인 가운데 가장 대표적인 원인인 방전가공이상층의 발생형태와 그 특성에 대하여 조사하였으며, 또한 냉간가공 도중에 발생하는 열영향층의 발생에 대하여 그 사례를 중심으로 분석하였다.

2.1 방전가공 이상층

냉간 금형에서 이형단면을 갖는 펀치와 다이는 대부분이 방전가공으로 최종 가공이 되는데 표면에는 방전가공시 8,000 ~ 12,000℃ 까지 증가되는 발열 때문에 용융 응고층(Recast)이 형성되고 그 영향으로 재소입(Quenching)층, 재소려(Tempring)층이 차례로 형성된다. 그림 2는 냉간 금형강의 하나인 SKD11종 소재의 방전가공에 의한 변질층의 조직 형태를 나타내고 있다.

용융층에는 급냉에 의해 많은 미세균열이 있고 그 일부는 재소입층에 까지 도달하고 있는데 마무리 연마 가공시 이층을 완전하게 제거하지 못하면 성형시에 이런 취약층이 탈락되어 압힘, 찍힘, 또는 결함의 원인이 되는 것으로 알려져 있다.



Fig. 2. The microstructure of heat-affected zone degenerated in EDM. (SKD11)

방전가공을 한 금형의 수명에 대한 특징은 다음과 같다.

첫째, 금형 제작 공정중 방전가공을 열처리 전후 또는 열박음(Shrink Fitting) 전후의 어느 경우라도 수명에는 영향이 없으며, 둘째, 방전가공후 소려 온도보다 약 50℃ 낮은 온도에서 재 소려를 실시하면 재 소입층이 소려 효과를 얻게되어 미소 균열의 전파가 지연되기 때문에 수배의 수명연장이 얻어진다. 이를 위해서는 방전가공에 의한 강도저하를 예측하여 요구 경도보다 높게 열처리하고 방전가공 후의 재 소려 온도를 높게해서 요구경도를 얻는 방법도 제시할 수 있다. 셋째, 방전가공이상층 가운데 용융층은 사상(Lapping)에서 제거해도 균열의 진전을 막을 수는 없다. 또한, 날카로운 모서리부는 제거가 불가능하며 오히려 악영향을 끼칠 수 있다.

본 연구에서는 방전가공 조건에 따른 방전이상층의 형성 형태 및 특징과 이에따른 기계적 성질의 영향을 조사하기 위해 조직, 경도, 압축파단강도, T.R.S. 등의 시험을 수행하였다. 사용된 소재는 SKD11, SKH51 등의 재질을 이용하여 압연방향과 직각방향의 특성을 분석하

였으며, 방전가공 조건에 따른 변화는 방전가공 속도를 1.0, 2.0, 3.5, 7.0mm/min. 등으로 변화시켜 방전이상층의 발생 정도 및 특징을 조사하였다.

2.2 단조작업시 생성되는 금형 표면의 소성변형 및 기타 변질층

피가공재의 금속유동이 심한 부위에서는 금형 표면에서 소성변형이 발생되어 내부 보다도 표면의 경도 상승이 발생된다. 이런 금형에서는 조직 사진에서 격렬한 소성변형과 균열이 확인되며 경도 분포의 변화가 부위별로 심한 것을 알 수 있다. 이는 금형의 강도부족에 의한 것은 아니며 균열은 표면이 소성변형을 일으킨 후 발생되며 피가공재의 용착이 수반되어 금형의 파손이 급진전되기도 한다.

이외에 마무리 연마나 열처리 후의 마무리 절삭가공에 의해서도 금형에 변질층이 형성되기도 한다. 특히, 마무리 연마시에는 약 200 μ m에 달하는 깊은 열 영향층이 발생되며, 작은 코너 부위에서는 성형에 사용되기 이전에 균열과 결함이 확인되는 경우도 있다.

3. 연구 결과

3.1 방전가공 이상층의 영향

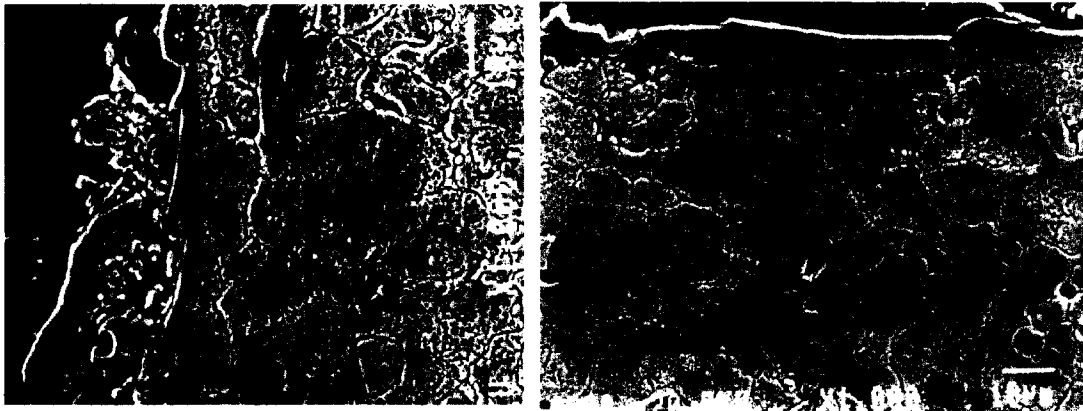
대부분의 이형 금형 제작시에 사용되는 방전가공시 필연적으로 발생하는 열 영향층이 금형 수명에 미치는 영향을 조사하기 위해 방전가공 후 이상층의 존재를 인위적으로 가공하여 기계적 성질을 비교 분석하였다. 이상층의 잔존 형태를 인위적으로 변화시키기 위해 각 가공조건(방전속도 : 1, 2, 3.5, 7 mm./min.)에 따른 방전이상층의 잔존량을 각각의 조건별로 분석하였다. 그림 4와 그림 5는 각각 SKD11과 SKH51 소재의 방전속도 1mm/min.와 7mm/min. 일때의 열 영향층을 보여주는 조직사진으로 방전속도가 증가될수록 용융층의 두께가 감소됨을 알 수 있다. 그림 6은 방전속도에 따른 용융층의 형성 두께를 나타내주는 그래프로 가공속도가 증가할수록 용융층 두께가 감소되며 SKD11 소재가 SKH51 소재 보다 열 영향이 큼을 알 수 있다.

용융층 다음에는 고열에 의한 재소입층과 재 소려층이 발생되는데 조직사진에서는 그 구분이 분명하지 않지만 그림 7에 나타나 있는 바와 같이 표면에서 깊이 약 1mm까지는 모재보다 낮은 경도를 갖는 부위가 존재함을 알 수 있다. 열 영향에 의해 경도가 저하되는 이층 또한 용융층과 마찬가지로 방전 속도가 증가될수록 두께가 감소할 것으로 생각되지만 경도 측정 결과에서는 방전속도의 영향을 구분하기가 곤란하다. 그 이유는 비커스(Vickers)경도 특성상 매우 미소한 부위를 측정하게 되므로 기지와 탄화물 경질부위를 구분하여 측정하기가 곤란하기 때문으로 생각된다.

방전가공 이상층의 잔존 여부에 따른 기계적특성을 분석하기 위해 압축파단강도와 T.R.S.

실험을 수행하였다. 시편은 이상층의 두께를 조사한 결과를 기준으로 각 소재와 각 가공조건에 따라 방전가공층이 그대로 존재하는 상태와 용융층만 제거한 상태 그리고 재 소려층까지 완전히 제거한 상태로 구분하여 제작하였다. 금형강의 기계적 강도 분석을 위해 일반적으로 사용되고 있는 T.R.S. 시험은 굽힘강도를 나타내는 물성치로 측정결과 그림 8에 나타나 있는 바와 같이 용융층만 제거한 상태가 가장 높은 강도를 나타내고 있으며 오히려 방전 이상층을 완전히 제거했을 경우가 더 낮게 나타나고 있는데, 그 이유는 그림 7에서와 같이 재 소려층내에 가장 높은 강도를 나타내는 부위가 존재하기 때문으로 생각되어진다. 그러나, 재 소려층은 강도가 낮은 변질층이기 때문에 그 제거가 필수적이다. 그 이유는 그림 9에 나타나 있는 바와 같이 압축파단강도 측정결과에서 뒷받침해주고 있다. SKD11, SKH51 중 모두 방전층을 완전히 제거했을 경우가 용융층만 제거했을 경우 보다 높은 압축파단강도를 나타내고 있으며 SKH51 소재가 SKD11 소재 보다 약 30Kg/mm^2 이상 높은 파단강도를 나타내고 있다. 압연방향에 따른 영향은 T.R.S.와 압축파단강도 모두 금속섬유조직이 힘이 작용되는 방향과 수직으로 위치할때가 더 우수한 특성을 지니고 있다.

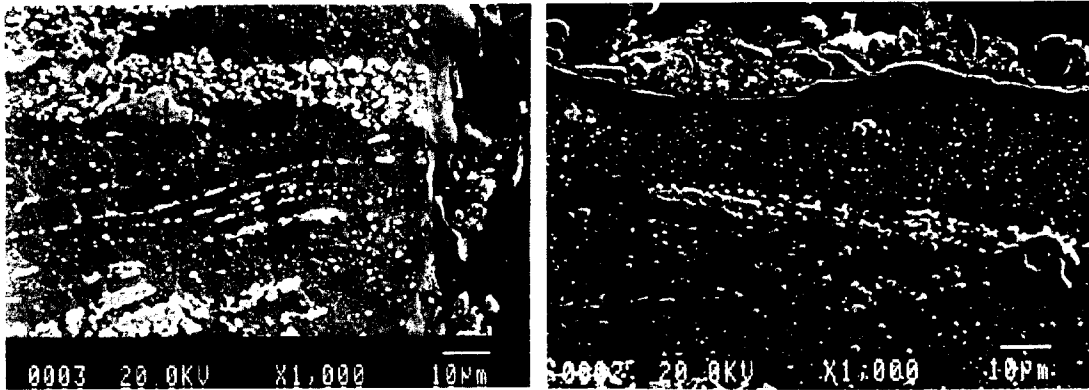
이상의 결과에서 알 수 있듯이 방전이상층은 가공속도에 따라 그 형성량이 변화되며 마무리 연마가공시 불완전하게 제거되면 기계적 성질에 악영향을 미치므로 연마 및 사상시 완전하게 제거되도록 정밀한 가공을 필요로 한다.



(EDM Speed : 2 mm/min.)

(EDM Speed : 7 mm/min.)

Fig. 4. The microstructure of heat-affected zone according to the EDM speed(SKD11)



(EDM Speed : 2 mm/min.)

(EDM Speed : 7 mm/min.)

Fig. 5. The microstructure of heat-affected zone according to the EDM speed(SKH51)

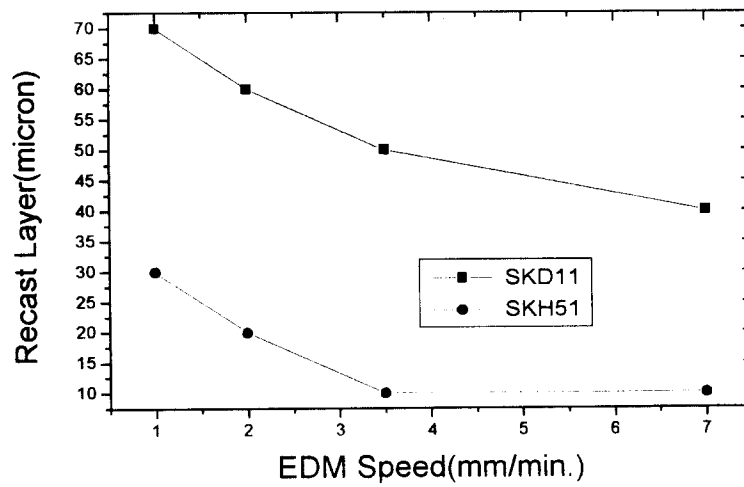
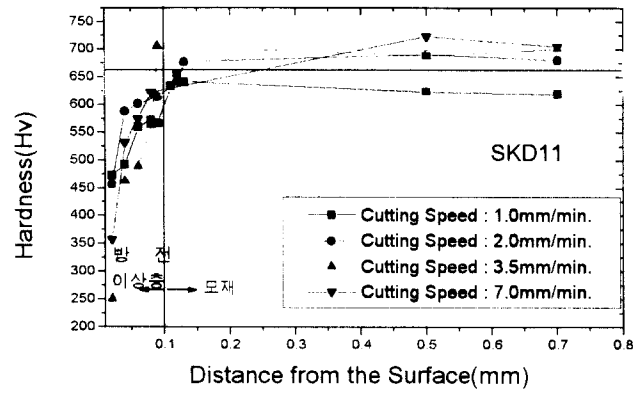
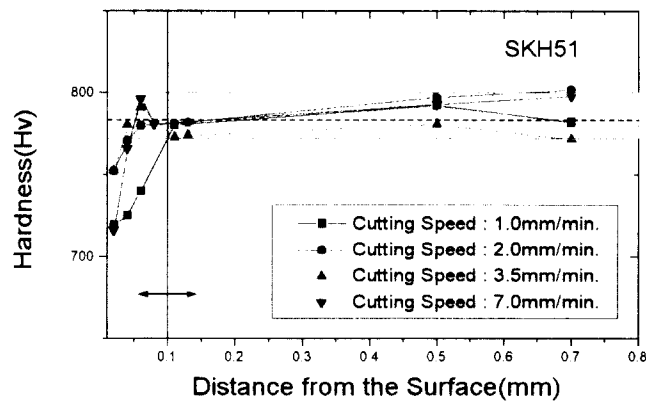


Fig. 6. The thickness of recast layer according to the EDM speed(SKD11)



(SKD11)



(SKH51)

Fig. 7. The hardness distribution of EDM heat-affected zone

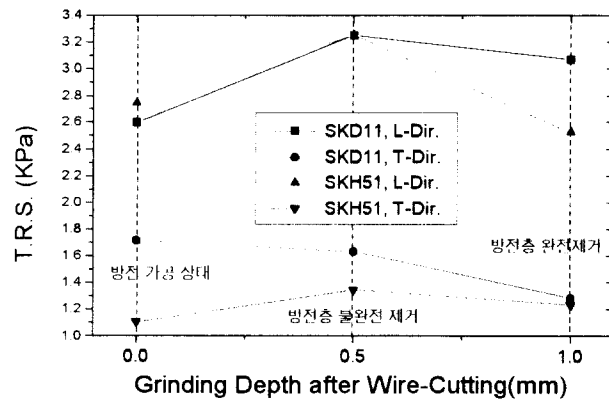


Fig. 8. The T.R.S. according to the grinding depth of heat-affected zone.

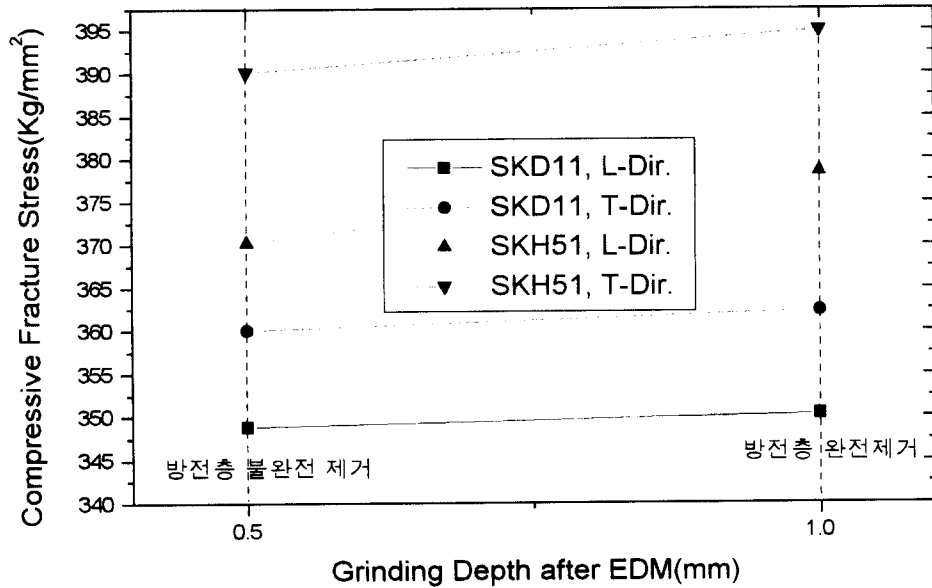
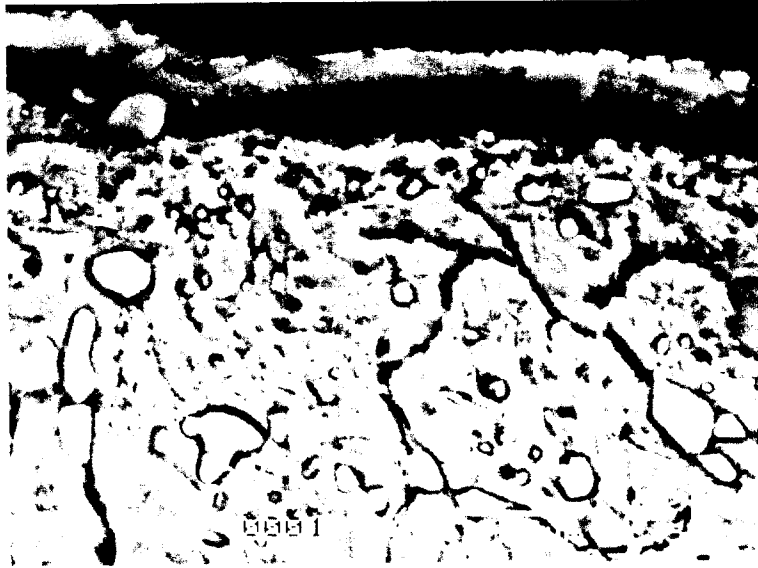


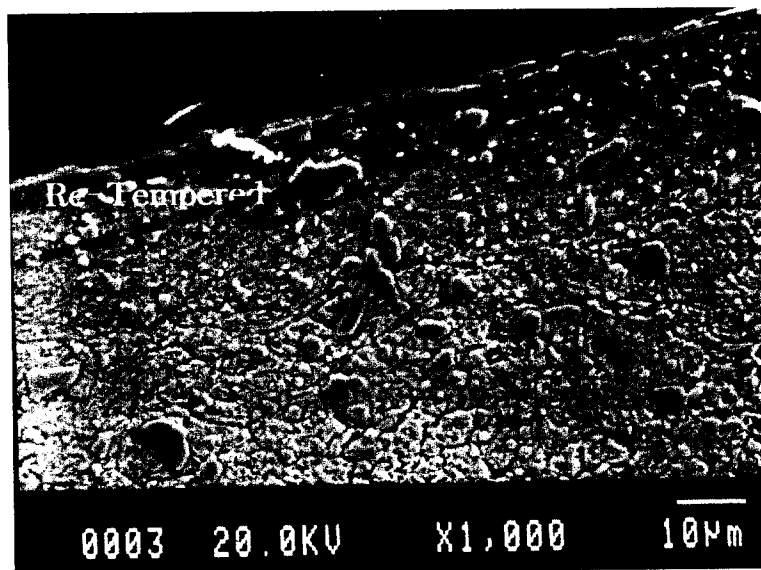
Fig. 9. The compressive fracture strength according to the grinding depth of heat-affected zone.

3.2 냉간단조에 의한 열 영향층 분석

냉간단조시 금형의 표면온도는 매우 높은 수준까지 상승되며 특히, 피가공재의 금속흐름이 극심한 부위에서는 금형 표면에 발생열에 따른 변질층이 형성되기도 하므로 균열 발생의 시발점으로 파손의 원인이 되기도 한다. 그림 10은 냉간단조용 펀치로 사용 도중 파손된 금형의 표면 부위 SEM사진으로 표면에 백층이 존재하며 표면에서 약 20 μ m 깊이까지 조직이 변질되었으며 균열 발생의 원인으로 작용될 수 있는 20 μ m 길이의 결함을 관찰할 수 있다. 이 변질층은 경도 측정결과 그림 11에서 같이 표면에서 약 80 μ m 깊이까지 재 소려층이 형성되었음을 알 수 있다. 금형 표층부에 존재하는 백층은 EPMA분석 결과 탈탄이 발생되어 있으며 이는 단조시 발생하는 열 발생에 의한 것으로 그 원인을 예측할 수 있다.



(a) White layer (x 5,000)



(b) Re-Tempered Layer (x 1,000)

Fig. 10. SEM microstructure of fractured punch.

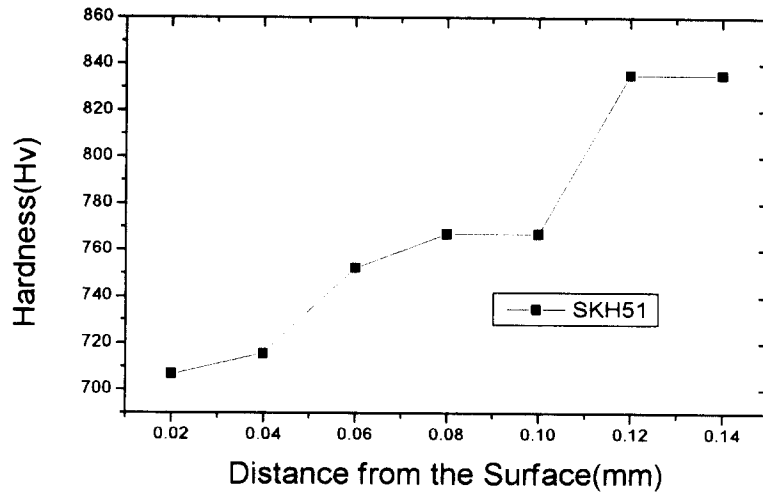


Fig. 11. The hardness distribution of fractured punch.

4. 결론

냉간단조의 생산성 향상 측면에서 매우 중요한 금형수명의 안정화를 위해 냉간금형의 조기 피로 파괴에 대한 원인 분석을 통하여 그 대책을 수립하고자 금형의 변질층 형성의 종류 및 그 특성에 대한 정량적 분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 방전가공시 표면에 발생하는 변질층은 용융 응고층과 함께 재소입층, 재 소려층이 형성되며 층 두께는 방전가공속도(1,2,3,5,7 mm/min.)와 소재(SKD11, SKH51)에 따라 거의 동일한 수준으로, 표면으로 부터 약 0.1mm 깊이 까지 존재함을 조직사진과 경도측정 결과로 알 수 있었다.
2. 방전이상층의 층 두께는 가공속도와 소재 종류에 따라 거의 변화가 없었으나, 표층부에 발생하는 용융 응고층은 가공속도가 빠를수록 감소되며, SKD11소재가 SKH51소재 보다 동일한 가공속도에서 더 많이 형성되었다.
3. 굽힘강도를 나타내는 물성치인 T.R.S. 측정결과 용융층만 제거된 상태가 가장 높은 강도를 나타내고 있으며 오히려 방전이상층을 완전히 제거했을 경우가 더 낮게 나타나고 있다. 그러나, 재소려 층의 인성은 매우 낮은 이상층이기 때문에 그 제거가 필수적이다.
4. 상온압축 시험결과, SKD11, SKH51종 모두 방전층을 완전히 제거했을 경우가 용융층만 제거했을 경우 보다 높은 압축파단강도를 나타내고 있으며 SKH51 소재가 SKD11 소재 보

다 약 30Kg/mm² 이상 높은 파단강도를 나타내고 있다.

5. 압연방향에 따른 영향은 T.R.S.와 압축파단강도 모두 금속섬유조직이 힘이 작용되는 방향과 수직으로 위치할때가 더 우수한 특성을 지니고 있다.

6. 냉간단조용 펀치로 사용 도중 파손된 금형의 표면 부위 SEM사진 분석결과, 표면에 백층이 존재하며 표면에서 약 20 μ m 깊이까지 재 소려에 의해 조직이 변질되었으며 균열 발생의 원인으로 작용될 수 있는 20 μ m 길이의 결함을 관찰할 수 있었다. 따라서, 냉간 단조시에도 금형의 표면에 열 영향층이 발생될 수 있으므로 금형수명 향상을 위해서는 내열성이 우수한 SKH55, YXR33, YXM60과 같은 고급재료를 사용하고 TD처리와 같은 표면처리를 이용하는 것이 바람직하다.

5. 참 고 문 헌

1. 塑性 と 加工, Vol.22, No.241, (1981-2), pp.94~99, 事例研究 からみた冷鍛技術の話題
2. “방전가공기술”, p43, 한국기계연구소
3. 김창호, 최재찬, “방전가공”, 기전연구소
4. “Tool and Manufacturing Engineers Handbook”, Vol. I, SME
5. “ASM Speciality Handbook”, -Tool Material-, ASM