

SKD11 절단금형치구용 소재의 마모손상에 관한 연구

A study on wear damage of SKD11 steel material for a cutting mold jig

남기우* · 김철수** · 안석환****

Ki-Woo Nam*, Cheol-Su Kim** and Seok-Hwan Ahn****

(Received 05 February 2016, Revision received 22 September 2016, Accepted 26 September 2016)

Abstract: This study is on wear damage of the material for a molding machine that be used at finally cutting of metal beam made in roll forming process of vehicle bump beam process line. SKD11 steel was used with the material for cutting mold jig. In the cutting mold jig, Ti diffusion heat treatment after vacuum heat treatment was carried out for upgrade of surface hardness and anti-wear. Also, the heat treatments by various methods were performed to compare the wear damage degree against above the existing heat treatment. Wear loss and friction coefficient were obtained from wear test. And, micro Vickers hardness values were compared with damaged parts or not of cutting mold jig. Micro Vickers hardness value appeared higher at the undamaged part by Ti diffusion heat treatment. The micro Vickers hardness well followed a two-parameter Weibull probability distribution.

Key Words : Cutting mold jig, SKD11 steel, Wear, Vacuum Heat Treatment, Ti Diffusion Heat Treatment, Micro Vickers Hardness, Two-parameter Weibull Probability Distribution

1. 서 론

자동차 부품을 제작하는 공정은 여러 공정으로 이루어진다. 원자재가 들어오면 원규격에 맞는 폭으로 절단하는 슬리팅(slitting) 공정을 거쳐 slitter에 의해 재단된 원자재를 미리 정한 윤곽에 맞추어 절단하는 블랭킹(blanking) 공정이 끝나면, 다음으로 통상 지름이 동일한 12~20개 정도의 롤(roll)을 적당한 위치에 간극을 조절하여 놓고 그

사이로 판재를 통과시켜 굽힘가공을 하는 롤포밍(roll forming)공정을 수행한다. 이후 각 부품의 형상 및 목적에 따른 가공공정, 즉 상하 왕복운동을 하는 프레스 장비 사이에 자동차 차체 부품형상을 가진 금형을 장착시킨 후 소성변형을 시켜 제품을 제작하는 공정 등을 본격적으로 실시하여 부품을 제작 완성한다.^{1,15,16} 본 연구는 자동차 범퍼빔을 생산하기 위해 롤포밍 공정 후 사이즈에 맞게 절단하는 과정에 사용되는 금형의 마모에 관한 것이다.

**** 안석환(교신저자) : 중원대학교 메카트로닉스학과
E-mail : shahn@jwu.ac.kr, Tel : 043-830-8942
*남기우 : 부경대학교 재료공학과
**김철수 : 부경대학교 학연협동기계공학

**** Seok-Hwan Ahn(corresponding author) : Department of Mechatronics, Jungwon University.
E-mail : shahn@jwu.ac.kr, Tel : 043-830-8942
*Ki-Woo Nam : Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University.
**Cheol-Su Kim : UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

범퍼빔을 제작하기 위하여 롤포밍 공정을 행하고 이때 소성가공된 범퍼빔 강판이 연속적으로 외부로 밀려 나오면 미리 입력된 사이즈에 맞게 최종 절단된다. 이때 절단을 위해서는 절단용 금형치구를 장착하여 사용하며, 사용재질로 주로 SKD11강²⁾을 사용한다. SKD11강은 합금공구강재로서 냉간금형용 고합금공구강재이다. 저합금공구강에 비하여 C성분과 Cr성분이 많이 함유되어 있다. 따라서 금형다이, 성형롤러, 커터로 주로 많이 이용되고 있다. SKD재질은 내충격성이 좋아 충격이 가해지는 환경에서 공구가 파손될 가능성이 다소 줄어들고 우수한 기계가공성, 내마모성^{13,14,17)}, 열처리시에 치수변형이 적고 높은 압축강도를 유지할 수 있는 장점이 있어 절단치구금형용으로도 많이 이용되고 있다.³⁾ 그러나 반복되는 절단작업으로 인하여 강판과 접촉하는 절단용 치구에 마모¹²⁾에 의한 경년열화가 발생하여 수명이 저하하고 교체 주기가 빨라지는 문제가 발생하여 비용증가를 가져오게 된다.

이에 본 연구에서는 자동차 범퍼빔을 양산하기 위한 롤포밍 공정 후 연속하여 나오는 강판빔의 절단에 사용되는 절단금형치구용 SKD11강재의 마모 손상⁴⁾ 및 그에 따른 파손 분석⁵⁾을 실시한 결과를 나타내었다. 각종의 열처리 방법을 달리하여 마모시험을 행하고 그 결과를 상호 비교하였고, 마이크로 비커스경도 시험과 파단면 관찰을 통한 파손 분석을 함께 행하였다. 또한 2-parameter Weibull 분포^{6,7)}를 조사하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

Fig. 1은 자동차용 범퍼빔을 소성가공하는 롤포밍 공정 후 소성가공되어 나오는 강판빔을 규격에 맞게 절단하는 절단금형치구의 외관을 나타낸다. Fig. 2는 절단금형치구에 직접 사용되는 절단용 커터와 커터의 경년열화되어진 부분의 상세를 나타낸다. 커터는 강판빔에 압축전단응력을 가해 1일 3,000회 가량의 반복 절단작업을 행하고 15,000회 사용 후 재가공 처리를 실시한다.

Table 1에는 본 연구에 사용된 SKD11강의 화학 조성을 나타낸다.

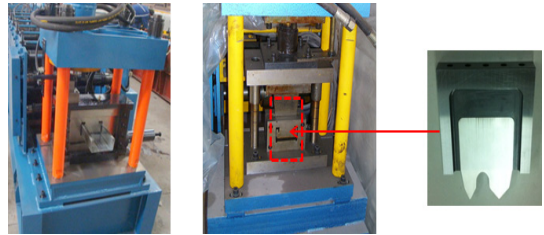


Fig. 1 Appearances of cutting mold and jig

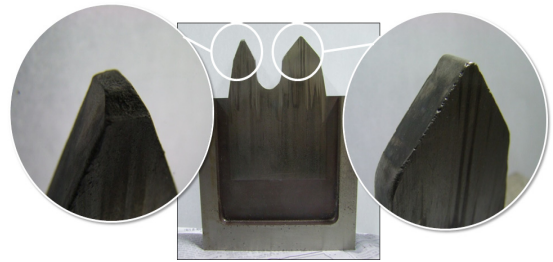


Fig. 2 Appearances of cutting jig and its aged degradation part

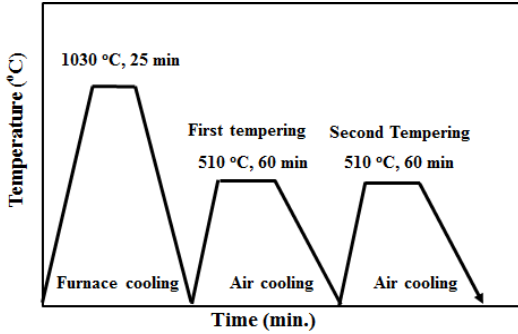
Table 1 Chemical compositions of SKD11 steel (wt%, JIS G 4105)²⁾

C	Si	Mn	P
1.40~1.60	< 0.40	< 0.50	≤0.003
S	Mo	Cr	V
≤0.003	0.82~1.2	11.0~13.0	0.20~0.50

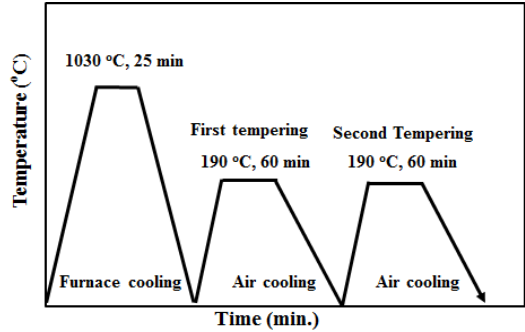
2.2 실험방법

2.2.1 열처리 조건

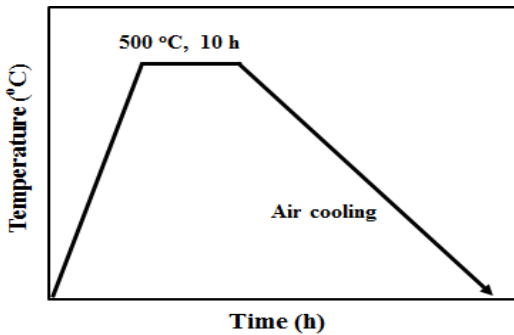
Fig. 3에는 본 연구에 사용된 절단금형치구용 SKD11강에 실시한 열처리 조건을 나타낸다. 고온에서의 진공열처리 후 Ti 확산열처리¹¹⁾를 행하였다. Fig. 3(a)는 고온진공열처리로서 1030℃에서 25분 동안 퀘칭한 후 로냉을 하고, 그런 다음 1차 템퍼링을 510℃에서 60분간 공냉처리 실시 후 2차 템퍼링을 동일한 조건 560℃에서 60분간 공랭으로 제차 실시하였다. 이후 Fig. 3(b)에 나타난 것처럼 Ti 확산열처리를 행하였다. 500℃에서 10시간 유지한 후 공랭시켰다. 이와 같이 진공열처리



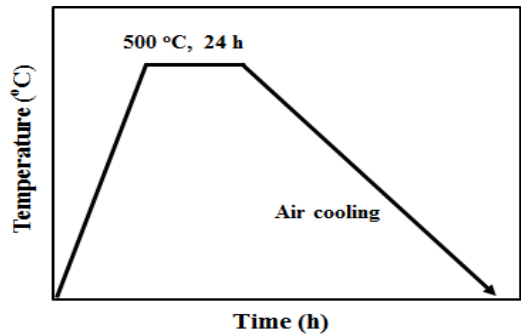
(a) Vacuum heat treatment in high temperature



(a) Vacuum heat treatment in low temperature



(b) Ti diffusion heat treatment



(b) Nitriding

Fig. 3 Heat treatment conditions carried out at SKD11 steel for cutting mold jig

Fig. 4 Various heat treatment conditions carried out at SKD11 steel for cutting mold jig in order to the comparison

후 Ti 확산열처리를 실시한 이유는 표면부 강도 상승 및 내마모성을 도모하기 위하여 경도증가와 함께 강인성을 유지하려는 데 있다.^{8,10)}

Fig. 4에는 현장에서 실제 적용되고 있는 열처리 조건으로 제작된 시료와 비교하기 위하여 행한 여러 가지 열처리 방법의 조건들을 나타내고 있다. 본 연구에 사용된 시료는 열처리를 하지 않은 시편(모재), 저온 진공열처리한 시편, 고온 진공열처리한 시편, 질화처리한 시편 및 고온 진공열처리 후 Ti 확산열처리한 다음 사용이력에 의해 Ti 층이 소실된 손상부(damaged part)의 6가지를 준비하여 상호 비교하였다.

2.2.2 마모시험

툴포밍 후 연속하여 나오는 강관빔을 규격에

맞게 절단하는 절단금형치구의 반복되는 절단과정에서 나타나는 마모손상을 알아보기 위하여 마모시험을 행하였다. 마모시험은 구름미끄럼마찰마모시험기(model: BRW140)를 사용하였다. 이때 상대재는 분말고속도공구강 HAP72를 사용하였다. 시험조건은 무윤활조건으로 레버비가 5:1로서 14.7N의 추를 이용하여 부하하중 73.5N, 마찰시간 90분으로 실시하였다. 이때 상대재의 회전수는 50rpm을 유지하였다. 상온, 건조상태에서 총 마모거리는 500m로 하였다. 데이터는 초당 10개를 얻는 것으로 하여 신뢰성을 높였다. 마모시험으로부터 마모손실 및 마찰계수를 측정하였다.

2.2.3 마이크로 비커스경도시험

마이크로 비커스경도(micro Vickers hardness) 시

험기를 이용하여 경도를 측정하였다. 압입하중 500g, 압입시간 10sec로 손상부의 표면과 내부 및 손상되지 않은 곳의 표면과 내부의 4곳에 대하여 각각 10회씩 측정하였다.

2.2.4 조직관찰

마모시험을 행하고 난 후 광학현미경에 의한 표면관찰과 SEM을 이용하여 파손부위의 미세조직을 관찰하였다. 조직관찰을 위하여 시험편을 경면연마한 후 5% FeCl₂+증류수 95%의 엡칭액을 사용하였다.

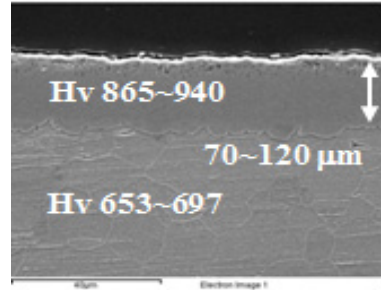


Fig. 5 Microphotograph of Ti diffusion layer

3. 결과 및 고찰

3.1 파면관찰

Fig. 5에는 고온 진공열처리 후 Ti 확산열처리한 시험편의 단면을 절단하여 Ti 확산 코팅층을 관찰한 사진을 나타낸다. Ti 확산열처리에 의해 경화된 코팅층의 두께는 대략 865~940Hv 정도를 나타내었다. 반면 Ti 확산열처리에 불구하고 그 효과가 다소 영향을 덜 미친 내부 영역에서의 경도는 대략 653~697Hv를 나타내어 Ti 확산열처리에 의해 표면부에 경도상승이 나타난 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 본 연구에 사용된 시료에서의 파손부위의 SEM 파면사진을 나타낸 것이다. 금형에 장착된 절단치구가 압축전단에 의한 절단작업을 하던 중에 표면 칼날부의 edge부에서 파손이 발생하였고 파손되어 떨어져 나간 부위를 촬영한 것이다. Fig. 6(a)의 원 내부는 파괴기점을 나타낸 것이다. 화살표방향으로 파괴흔이 열리며 방사선형태로 미소균열이 진전되고 있는 것을 볼 수 있다. (b)는 (a)를 확대한 사진으로서 파괴기점이 최표면부터 시작된 것이 아니라 최표면으로부터 내부쪽으로 조금 들어온 부분에서 시작되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 Ti 확산에 의하여 경화된 Ti 확산 경화층보다 다소 경도가 낮은 내부, 즉 경화층과의 경계가 되는 지점에서 균열의 기점이 시작된 것으로 판단된다. (a)의 원 안을 더욱 확대하여 나타낸 것이 (c)와 (d)인데 기점부위에 계재물이

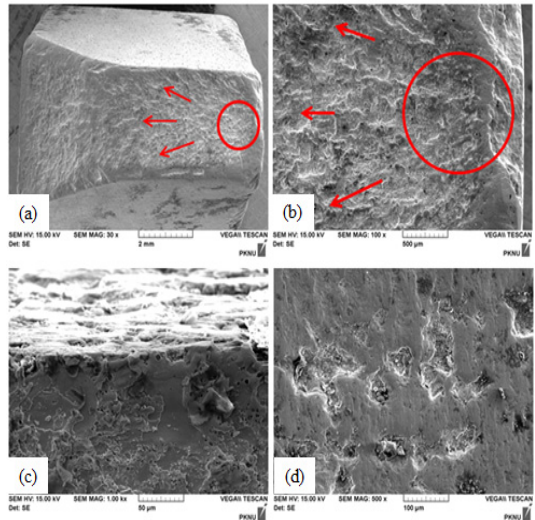


Fig. 6 SEM photograph observation of damaged surface part

존재되어 있는 것을 알 수 있다. 특히 (d)에서는 마모에 의해 다소 면이 무더져 뚜렷하게 나타나지는 않으나, 피로현상의 전형적인 스트라이에이션(striation)이 관찰되고 있어 반복되는 절단작업에 의한 마모와 피로가 중첩되어져 파손이 발생한 것으로 판단된다.

3.2 마모손실과 마찰계수

2.2.2의 조건으로 실시한 마모시험으로부터 마모손실량과 마찰계수를 구하였다. Fig. 7에는 그중 절화열처리된 시험편으로부터 구한 마모손실량과 마찰계수를 나타낸다.

Fig. 8에는 각 조건에 따른 시험편으로부터 구

한 마모손실량과 마찰계수를 평균치를 각각 나타낸다. (a) 열처리를 하지 않은 시편(모재), (b) 저온 진공열처리한 시편, (c) 고온 진공열처리한 시편, (d) 고온 진공열처리 후 Ti 확산열처리한 시편, (e) 질화처리한 시편, (f) 고온 진공열처리 후 Ti 확산열처리한 다음 사용이력에 의해 Ti층이 소실된 손상부(damaged part)의 6곳의 측정결과이다.

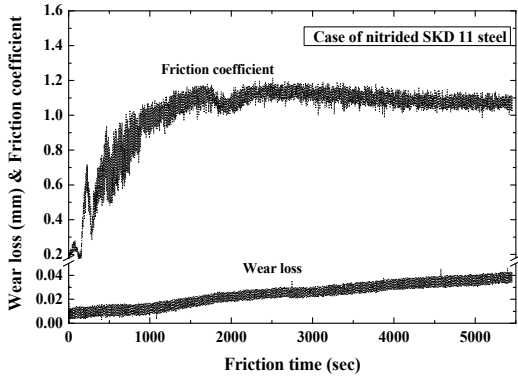


Fig. 7 Wear loss and friction coefficient according to friction time of nitrided specimen

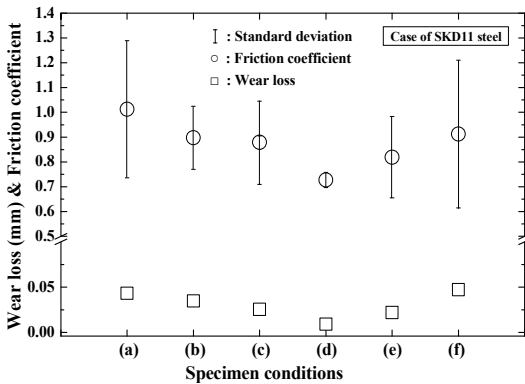


Fig. 8 Mean values of wear loss and friction coefficient according to the specimen condition; (a) as-received, (b) vacuum heat treatment in low temperature, (c) vacuum heat treatment in high temperature, (d) Ti diffusion heat treatment after vacuum heat treatment in high temperature, (e) nitriding, (f) damaged part (removal of Ti diffusion layer)

마찰계수와 마모손실의 평균(mean), 표준편차(standard deviation) 및 변동계수(coefficient of variation)를 Table 2와 3에 각각 정리하여 나타낸다. (a)~(f)는 상기에 나타난 것과 같다. 내마모성은 일반적으로 식 (1)과 같다. 따라서 고온에서 진공열처리 후 표면강도 및 내마모성 향상을 위하여 후열처리한 Ti 확산열처리의 효과로 인하여 (d)의 경우가 가장 마모성이 좋은 것을 알 수 있다. 반면 열처리를 행하지 않은 모재(Table 2, (a))가 가장 낮았고 반복적인 절단으로 인하여 마모가 발생하여 표면의 Ti 확산층이 소실된 (f)의 내마모성이 그 다음으로 낮게 나타났다. 따라서 Ti 확산열처리가 내마모성을 향상시켜 수명을 늘여주는 데 효과적이라는 것을 알 수 있다.

$$Anti - wear \propto \frac{1}{Friction\ coefficient} \quad (1)$$

Table 2 Mean, standard deviation and coefficient of variation of friction coefficient

	Mean	Standard deviation (SD)	Coefficient of variation (COV)
(a)	1.012	0.277	0.274
(b)	0.898	0.035	0.039
(c)	0.879	0.026	0.030
(d)	0.727	0.031	0.043
(e)	0.819	0.164	0.200
(f)	0.912	0.298	0.327

Table 3 Mean, standard deviation and coefficient of variation of wear loss

	Mean	Standard deviation (SD)	Coefficient of variation (COV)
(a)	0.043	0.016	0.372
(b)	0.035	0.006	0.170
(c)	0.026	0.015	0.577
(d)	0.009	0.004	0.444
(e)	0.022	0.005	0.227
(f)	0.047	0.011	0.234

Fig. 9는 마모시험 후의 마모손상면 관찰을 나타낸다. Fig. 2의 원안의 절단치구의 외관을 자세히 살펴보면, 엣지(edge)부분을 중심으로 표면이 매끈하지 않고 흠집이 나 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 지속적인 절단작업으로 인하여 강판뒀과 접촉하는 표면부에서 손상이 집중되어진다는 것을 말해준다. 이에 상기 (a)~(f)의 시험편에 대한 마모시험의 손상면을 관찰해 본 것이 Fig. 9이다. 마모에 의하여 마모손실이 가장 크게 나타났던 모재(Fig. 9(a))에서는 마모에 의해 오히려 표면이 심하게 고착(adhesive)되어 무더져 있는 현상을 확인할 수 있다. Ti 확산층이 소실된 (f)의 경우 열처리로 인하여 강도 및 경도가 상승되었던 표면부가 계속되는 접촉에 의하여 마모가 발생하고, 그로 인하여 Ti 확산층이 소실됨에 따라 다소 인성이 저하됨으로써 마모에 의해 표면 스크래치가 대량 발생하여 미소크랙으로 발전하는 양상을 나타낸다. 오히려 Ti 확산층이 소실된 부분이 파손에 더욱 취약한 것은 상기와 같은 이유로 마모손실도 커지고 이와 더불어 압축전단응력이 반복적으로 작용하여 결국에는 피로현상과 중첩되어 손상이 나타나 파손에 이르게 되는 것으로 사료된다. 따라서 압축전단응력을 가하는 형태의 절단치구에서는 반복적인 상하방향으로의 충격하중에 의해 표면으로부터 작은 입자들이 탈락하는 현상을 유발하고 닳아지는 마멸마모(abrasive wear)와 접촉응력피로(contact stress fatigue)가 주 원인인 것으로 사료된다.

3.3 마이크로 비커스경도 평가

3.2절의 마모시험에 대한 결과로부터 경도분포를 알아보기 위하여 (a)~(e) 시험편에 대한 마이크로 비커스경도를 측정하였다. 마이크로 비커스경도시험은 압입하중 500g, 유지시간 10sec로 하여 각 시험편에 대하여 각각 20회 측정하였다. 마이크로 비커스경도 측정 결과를 Fig. 10에 나타낸다. 내마모성 향상을 위하여 Ti 확산열처리한 (d)가 가장 높은 경도치를 나타내었다.

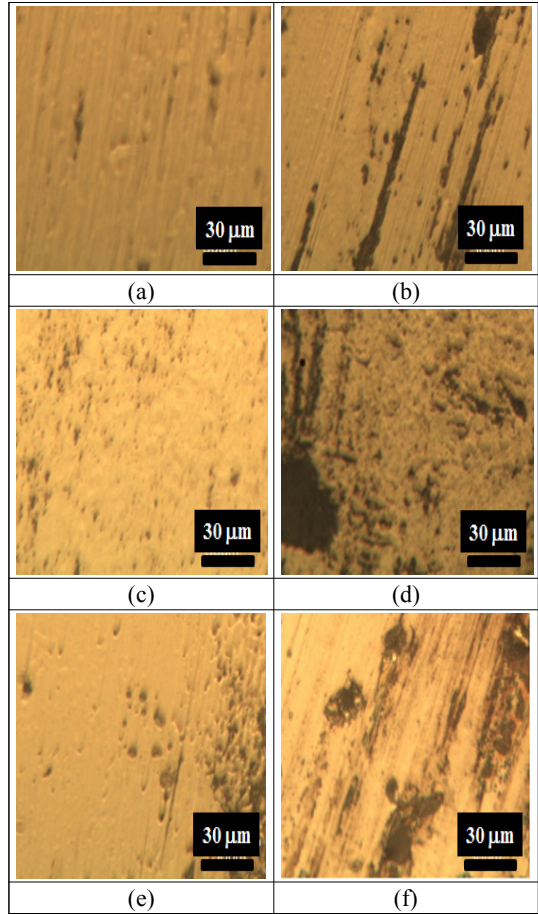


Fig. 9 Microstructure observation of damaged surface by wear

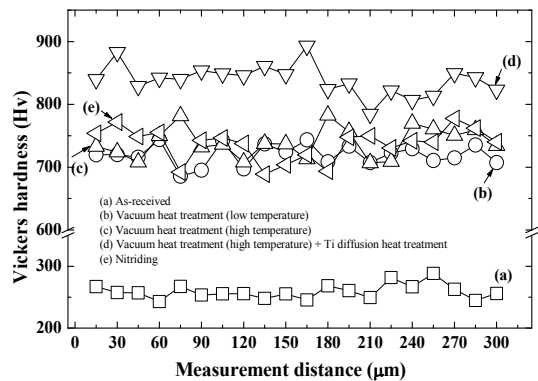


Fig. 10 Micro Vickers hardness values of each specimen

Table 4는 각 장소에서 측정된 마이크로 비커스 경도치의 평균(mean), 표준편차(standard deviation) 및 변동계수(coefficient of variation), 형상계수(shape parameter) 및 척도계수(scale parameter)을 각각 정리하여 나타낸 것이다. 각 시험편의 조건에 따른 경도치의 차이로부터 2-파라미터 와이블분포(2-parameter Weibull distribution)에 따른 통계적 분석을 실시하였다. 식 (2)는 2-파라미터 와이블분포를 나타낸다.^{6,7,9)}

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right], \quad x \geq 0 \quad (2)$$

여기서, α 는 확률변수의 변동성을 나타내는 형상계수(shape parameter)이고, β 는 63.2% 확률에서 특성수명을 나타내는 척도계수(scale parameter)이다.

식 (2)에 의하여 얻어진 와이블분포의 확률밀도 함수를 Fig. 11에 나타낸다. 경도치의 분포가 거의 와이블분포에 잘 따르고 있는 것을 알 수 있다.

아래에는 열처리 효과가 나타난 Ti 확산열처리를 행한 실제 부품으로부터 손상된 부분과 손상이 되지 않은 부분으로 나누어 마이크로 비커스 경도치를 측정하여 비교하여 보았다.

Table 4 Mean, standard deviation, coefficient of variation, shape parameter and scale parameter of micro Vickers hardness values

	①	②	③	④	⑤
(a)	28.61	263.88	259.2	11.77	0.045
(b)	50.82	727.17	719.6	16.79	0.023
(c)	38.26	749.71	739.5	24.07	0.033
(d)	41.44	849.83	839.1	24.58	0.029
(e)	34.49	748.45	737.2	25.51	0.035

Note: ① shape parameter, ② scale parameter, ③ mean, ④ standard deviation(SD), ⑤ coefficient of variation (COV); (a) as-received, (b) vacuum heat treatment in low temperature, (c) vacuum heat treatment in high temperature, (d) Ti diffusion heat treatment after vacuum heat treatment in high temperature, (e) nitriding

Fig. 12는 절단금형치구의 외관이며 그림 속의 숫자는 손상된 부분과 그렇지 않은 부분으로 선택한 측정 장소를 나타낸다. 측정 부위는 손상부 표면(①) 및 내측(③), 손상되지 않은 부분의 표면(②)과 내측(④)이다. 마이크로 비커스경도 시험의 조건은 상기와 동일하게 압입하중 500g, 유지시간 10sec로 하였고, 각 시험편에 대하여 각각 10회씩 측정하였다.

Table 5에는 상기 Fig. 12의 각 장소에서 측정된 마이크로 비커스경도치를 정리하여 나타낸다. 결과적으로 Ti 확산열처리에 의해 경도상승이 되고 직접적인 절단에 노출되지 않은 부분(②)에서의 마이크로 비커스경도치가 높게 나타나고 있고, 반면 계속적인 반복절단 작업으로 인하여 절단에 직접 노출된 부위(①)에서 Ti 확산층의 소실에 의하여 경도치가 다소 낮게 나타나 마모손상이 발생한 것으로 판단된다. ③, ④는 Ti 확산열처리를 행하였지만 표면보다는 Ti 확산이 다소 덜 미친 곳으로서 표면부보다는 경도치가 다소 작게 나타났고 절단작업에 직접적으로 노출되지 않은 내부라서 경도치가 ①과 비교하여 크게 떨어지지 않았다.

Table 6에는 Table 5에 나타난 측정된 마이크로 비커스경도치의 평균(mean), 표준편차(standard deviation) 및 변동계수(coefficient of variation), 형상계수(shape parameter) 및 척도계수(scale parameter)를 각각 정리하여 나타낸 것이다. 측정 부위에 따른

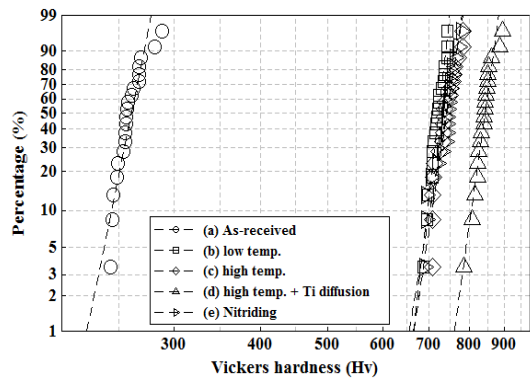


Fig. 11 2-parameter Weibull distribution of measured micro Vickers hardness values

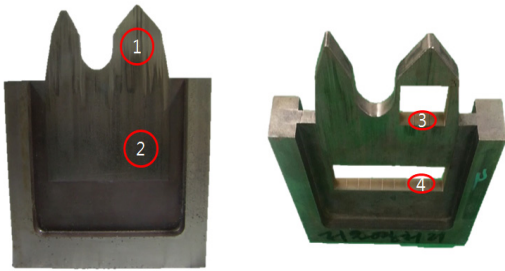


Fig. 12 Measure positions of micro Vickers hardness of cutting mold jig

Table 5 Micro Vickers hardness values measured from Fig. 12

	①	②	③	④
Vickers hardness (Hv)	800.4	834.5	744.3	742.3
	781.3	854.5	669.6	795.4
	781.8	821.6	725.6	764.7
	814.7	848.2	745.1	711.5
	792.3	831.4	705.4	722.6
	788.1	840.4	715.1	737.4
	771.2	860.7	797.6	734.6
	791.6	836.5	668.1	738.7
	785.1	838.2	770.0	695.2
789.8	822.9	742.2	724.0	
Mean (Hv)	789.6	838.9	728.3	736.6

Note: ① Damaged surface, ② Non-damaged surface, ③ Inside of damaged part, ④ Inside of non-damaged part

Table 6 Mean, standard deviation, coefficient of variation, shape parameter and scale parameter of micro Vickers hardness values according to measure positions

	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ	Ⓔ
①	80.80	794.68	789.6	11.78	0.015
②	77.51	844.44	838.9	12.66	0.015
③	20.38	746.17	728.3	40.89	0.056
④	31.96	748.32	736.6	27.86	0.038

Note: Ⓐ shape parameter, Ⓑ scale parameter, Ⓒ mean, Ⓓ standard deviation(SD), Ⓔ coefficient of variation (COV); ① Damaged surface, ② Non-damaged surface, ③ Inside of damaged part, ④ Inside of non-damaged part

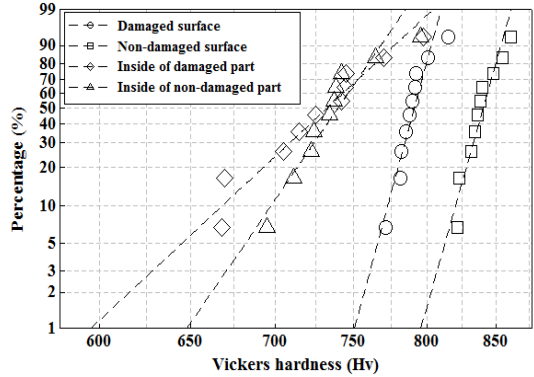


Fig. 13 2-parameter Weibull distribution of micro Vickers hardness values according to measure positions

경도치의 차이로부터 2-파라미터 와이블분포 (2-parameter Weibull distribution)에 따른 통계적 분석을 실시하였고, 상기 식 (2)로부터 2-파라미터 와이블분포를 구하여 Fig. 13에 나타내었다. 측정된 경도치는 와이블분포에 잘 따르고 있는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

고온 진공열처리 후 Ti 확산열처리한 시편의 경우에 있어서 마찰계수와 마모손실이 가장 낮게 나타났다. 이는 연속되는 절단작업에 따른 열화현상에 대응하기 위하여 실시한 Ti 확산열처리의 확산층이 경도상승을 가져와 마찰 및 마모에 잘 견뎠기 때문으로 판단된다.

또한 Ti 확산열처리에 의해 경도가 상승되고 직접적인 절단에 노출되지 않은 부분(② 손상되지 않은 부분의 표면)에서의 마이크로 비커스경도치가 높게 나타나고 있고, 반면 계속적인 반복절단작업으로 인하여 절단에 직접 노출된 부위(① 손상부 표면)에서 Ti 확산층의 소실에 의하여 마이크로 비커스경도치가 다소 낮게 나타나 마모손상이 더욱 발생한 것으로 판단된다. 또한 열처리를 달리한 시험편들에서 구한 마이크로 비커스경도치는 2-파라미터 와이블분포에 잘 따르고 있다.

References

1. <http://www.swhitech.com/main/>
2. JIS G 4105
3. W. I. Choi, 2013, Effect of Heat Treatment Conditions on the Stabilization and Wear Resistance in STD 11 Steel, A master's Thesis, Chosun University, Jeonnam, Korea.
4. J.C. Miranda and A. Ramalho, 2015, "Study of the Effects of Damage Accumulation on War", Wear, Vols. 330-331, pp. 79-84.
5. K. W. Nam and S. H. Ahn, 2012, Fatigue Fracture and Damage Cases of Surface Hardening Treatment Steel, GS Intervision, Seoul, Korea.
6. A. C. Cohen, 1965, "Maximum Likelihood Estimation in the Weibull Distribution Based on Complete and on Censored Samples", Technometrics, Vol. 7, pp. 579-588.
7. W. Weibull, 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", ASME J. Applied Mech., Vol. 18, pp. 293-297.
8. J. D. Kim and K. H. Park, 2014, "Effect of Vacuum Heat Treatment and Salt Bath Heat Treatment Conditions on Mechanical Properties of Hot Work Die Steel", Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 1235-1242.
9. K. W. Nam, S. J. Kim and D. S. Kim, 2015, "Weibull Statistical Analysis on Mechanical Properties in ZrO₂ with SiC Additive", Transactions of the KSME A, Vol. 39, No. 9, pp. 901-907.
10. G. Straffellini, P. C. Verma, I. Metinoz, R. Ciudin, G. Perricone, and S. Gialanella, 2016, "Wear Behavior of a Low Metallic Friction Material Dry Sliding against a Cast Iron Disc: Role of the Heat-Treatment of the Disc", Wear, Vols. 348-349, No. 15, pp. 10-16.
11. X. Huang, I. Etsion, and T. Shao, 2015, "Effects of Elastic Modulus Mismatch between Coating and Substrate on the Friction and Wear Properties of TiN and TiAlN Coating Systems", Wear, Vols. 338-339, No. 15, pp. 54-61.
12. H. Puls, F. Klocke and D. Lung, 2014, "Experimental Investigation on Friction under Metal Cutting Conditions", Wear, Vol. 310, Issues 1-2, 15, pp. 63-71.
13. K. T. Kim and Y. S. Kim, 2007, "Effects of Counterpart Materials on Wear Behavior of Thermally Sprayed Ni-based Self-flux Alloy Coatings", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 92-97.
14. H. J. Kim, J. D. Kim, S. W. Koh and Y. S. Kim, 2009, "Impact and Wear Behavior of Side Plate of FRP Ship", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 123-128.
15. J. Hol, M.V. Cid Alfaro, M. B. de Rooij and T. Meindersd, 2012, "Advanced Friction Modeling for Sheet Metal Forming", Wear, Vols. 286-287, pp. 66-78.
16. D. K. Kim, K. R. Cho, S. E. Park, K. H. Lee, Y. H. Moon and M. Y. Lee, 2010, "The Study of Manufacturing Technology for Front Bumper Beam with Roll Forming Process", Proceeding of The Korean Society for Technology of Plasticity Conference 2010, pp. 282-285.
17. L. H. Chiu, C. H. Wu and H. Chang, 2002, "Wear Behavior of Nitrocarburized JIS SKD61 Tool Steel", Wear, Vol. 253, Issues 7-8, pp. 778-786.