

Slitting Knife의 손상에 미치는 마모의 영향

The effect of wear on the damage of slitting knife

남기우* · 김철수** · 안석환***†

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

(Received 24 January 2016, Revision received 20 July 2016, Accepted 20 July 2016)

Abstract: This study analyzed the damage to a slitting knife after cutting steel sheets. Damages to the structure were observed and wear tests were conducted. In addition, the degradation on the damaged and undamaged parts was compared with a micro Vickers hardness test. Weibull statistical analysis was carried out in order to evaluate the reliability of the micro Vickers hardness measured data. Spalling of the edge portion occurred by degradation during use over a long period. Rough parts in the specimens were caused by damage because the slitting knife was used for 1 year. The friction coefficient and wear loss at the damaged parts of the knife edge were slightly larger from shock due to repetitive cutting operation. The micro Vickers hardness followed a two-parameter Weibull probability distribution.

Key Words : Wear, Slitting Knife, SKD61, Degradation, Micro Vickers Hardness, Weibull Distribution

1. 서 론

기계 및 자동차 산업에서 부품의 사용 중에 발생하는 열화손상을 견디기 위한 내마모성 및 내마찰성 등에 대한 연구가 진행되어져 오고 있다.¹⁾ 일반적으로 자동차용 범퍼빔 부품은 몇 가지 공정으로 제작되고 있다. 원자재가 입고되면 제일 먼저 슬리팅 라인(slitting line)으로 들어간다. 들어온 원자재는 대치규격, 초기입고규격 사이즈를 유지하고 있고 이것을 원규격, 즉 사용목적에 맞는 규격의 폭으로 절단하는 과정이 슬리팅 (slitting) 공정이다.²⁾ 이때 일반적인 지관형 커터(circular Knife)는 날을 날카롭게 깎아 제품을 절단한다. 하

지만 이와 달리 슬리팅 나이프(slitting knife)는 일정한 부품 형상을 가지도록 절단하여야 하기 때문에 지관커터에 비하여 두께를 두껍게 유지하여야 하며 이로 인해 커터날로 절단하기에는 곤란하다. 이런 이유로 슬리팅 나이프는 두꺼운 원형 판의 형태로 가공되어진다. 절단가공¹⁴⁾에는 슬리팅 나이프의 외주부의 날카로운 부분, 즉 나이프(knife)의 엣지(edge)부분이 사용되어지므로 엣지부분을 매우 예리하게 연마가공하여 사용한다. 따라서 이와 같은 이유로 슬리팅 나이프는 외경공차 및 두께공차를 엄격히 제한하고 있으며 마이너스 공차를 허용하지 않을 만큼 정밀도를 유지해야 할 필요가 있다. 슬리팅 나이프의 작동원리는 말

***† 안석환(교신저자) : 중원대학교 메카트로닉스학과
E-mail : shahn@jwu.ac.kr, Tel : 043-830-8942

*남기우 : 부경대학교 재료공학과

**김철수 : 부경대학교 학연협동기계공과

***† 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-Soo Kim : UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

려져 들어온 원자재 강판 코일을 제품 성형의 크기에 맞게 절단하기 위하여 상하부의 금형에 강판을 통과시키면서 세로방향으로 절단을 하는데 가위의 양날과 같이 상부에 위치한 금형에 체결된 슬리팅 나이프가 하부에 고정된 홈이 파여진 단일 금형 위를 회전하면서 절단하는 원리이다. 단 슬리팅 나이프의 두께로 자르는 것이 아니라 하부의 금형 홈과 상부의 슬리팅 나이프 엣지(slitting knife edge) 부분과의 전단력에 의하여 절단작업이 이루어지는데 커터날이 치수정밀도가 높은 많은 양의 강판 절단에 이용되어지고, 비용 절감을 위한 반복적인 절단작업으로 인하여 슬리팅 나이프의 엣지부분의 취약한 부분에 먼저 마모손상이 발생해서 수명이 저하된다. 또한 절단작업에 의한 부품 정밀도에도 영향을 미치고 있다. 따라서 슬리팅 나이프용 소재로서는 내마모성 및 내열성에 우수하여 금형용 소재로서 많이 이용되어지고 있는 SKD61강^{3,4)}을 주로 사용한다. 특히 슬리팅 나이프의 내마모성과 충격에 견디는 인성을 유지하기 위하여 2단 템퍼링열처리를 실시하여 사용한다. 한⁵⁾ 등의 유한요소해석을 통한 슬리팅 가공에 관한 연구는 있으나 실제 현장에서의 실사용에 의한 마모손상 관련 연구는 거의 없는 실정^{6,13)}이다.

본 연구에서는 상기에 언급하였듯이 강판 절단용으로 사용되는 슬리팅 나이프에 대하여, 이미 경년사용으로 인하여 손상된 부품을 그대로 이용하여 파손 분석⁶⁾을 행하였다. 더불어 파손부의 조직을 관찰하여 원인 분석과 함께 마모시험을 통하여 손상에 미치는 마모의 영향^{12,15,16)}을 살펴보는 것을 목적으로 하였다. 또한 손상부위와 그렇지 않은 부위의 마이크로 비커스경도를 측정하여 열화정도를 비교하였다. 이들 마이크로 비커스경도값을 이용한 2-parameter Weibull 분포^{8,9)}를 조사한 결과를 보고한다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

Fig. 1은 본 연구에 사용된 슬리팅 나이프의 외

관을 나타낸다. 본 연구에는 슬리팅 나이프의 파손 분석이 목적이므로 부품제작 현장에서 1년간 실사용 후 경년열화에 의해 표면마리가 발생한 제품을 그대로 사용하였다. Fig. 2는 슬리팅 공정을 나타낸다. 상부 금형에 장착된 슬리팅 나이프가 하부 금형 위에서 회전하면서 강판을 규격에 맞게 절단하는 과정이다.

본 연구에 사용된 재료는 금형용 강 소재인 SKD61강으로서 그 일반적인 화학성분을 Table 1에 나타낸다. Fig. 3에는 본 연구에 사용된 SKD61강에 실시한 열처리 조건을 나타낸다.¹¹⁾

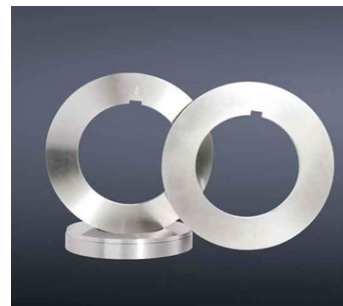


Fig. 1 Appearance of metal slitting knife

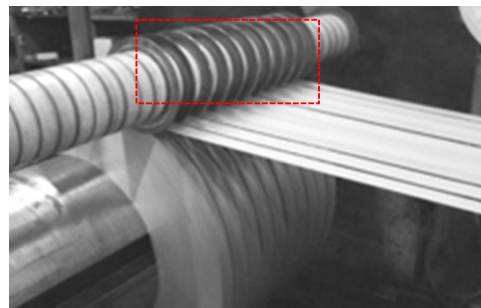


Fig. 2 Slitting line process

Table 1 Chemical compositions of SKD61 steel (wt%, JIS G 4105)³⁾

C	Si	Mn	P	S
0.32 ~0.42	0.8~1.2	≤0.5	≤0.003	≤0.003
Ni	Cr	Mo	V	-
≤0.25	4.5~5.5	1.0~1.5	0.8~1.2	

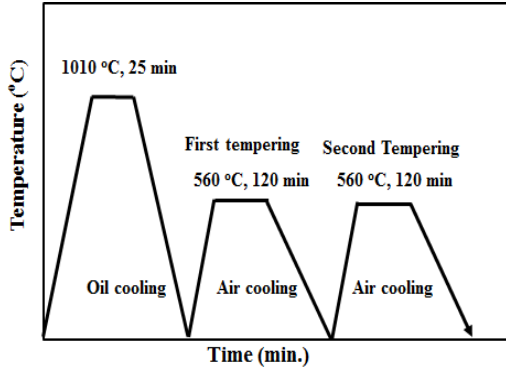


Fig. 3 Heat treatment conditions

1010°C에서 25분 동안 퀴칭한 후 유냉을 하고, 그런 다음 1차 템퍼링을 560°C에서 120분간 공냉 처리 실시 후 2차 템퍼링을 560°C에서 120분간 공랭으로 재차 실시하였다. 이는 퀴칭 후 인성이 부족해지므로 템퍼링을 통하여 인성 회복을 위해 2회의 고온템퍼링을 실시하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 파손부위 및 조직관찰

Slitting knife edge의 손상된 부위를 정밀히 관찰하기 위하여 70배 및 300배 배율로서 SEM 촬영을 하였다. 또한 조직관찰을 위하여 시험편을 경면연마한 후 5% FeCl₂+증류수 95%의 에칭액을 사용하여 금속현미경 관찰을 실시하였다.

2.2.2 마모시험

슬리팅 나이프의 마모손상을 알아보기 위하여 마모시험을 행하였다. 마모시험은 구름미끄럼마모시험기(BRW140)를 사용하였다. 이때 상대재는 분말고속도공구강 HAP72를 사용하였다. 시험조건은 무윤활조건으로 부하하중 1.5 kg, 마찰시간 1시간 30분으로 하여 내부, 표면, 표면 손상부(edge part)에서 각각 실시하였다.

2.2.3 경도시험

슬리팅 나이프의 여러 부위에 대하여 마이크로 비커스경도(micro Vickers hardness)를 측정하였다. 압입하중 500 g, 압입시간 10 sec로 내부, 손상부

내부, 표면, 손상부 측의 표면, 손상부의 5곳으로 나누어 각각 5회씩 측정하였다.

3. 파손 분석 및 조직 관찰

먼저, 부품제작공정 현장에서 1년간의 경년사용으로 인하여 손상된 슬리팅 나이프의 손상부위를 채취하여 조직을 관찰하였다.

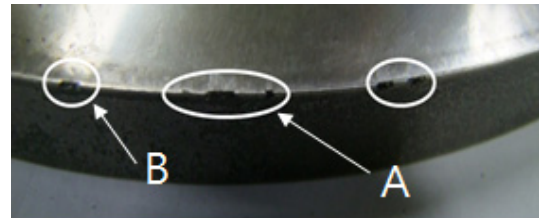


Fig. 4 Spalling failures of the slitting knife edge

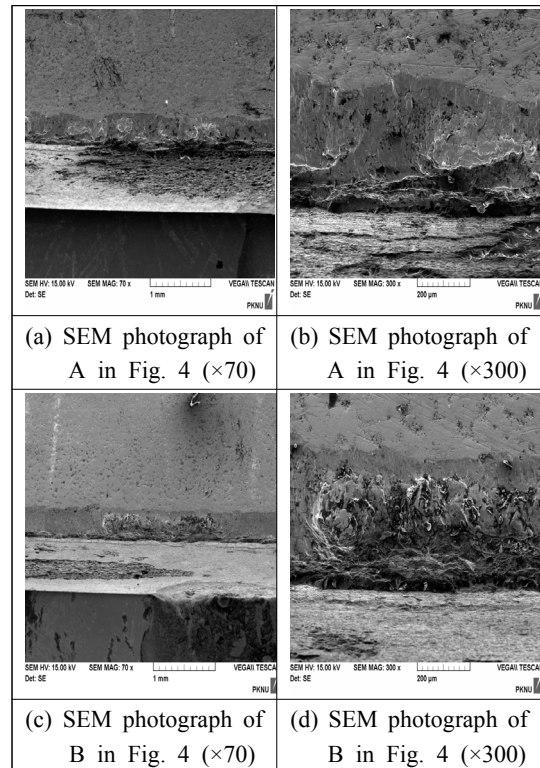


Fig. 5 SEM photograph observation of spalling failure parts

Fig. 4는 실제 슬리팅 나이프의 손상부위를 나타낸 것이다. 원으로 표시된 부분은 슬리팅 나이프의 엣지 부분이며 강관을 규격에 맞게 절단할 때 직접적으로 소재에 접촉하는 부위로서 손상흔을 보이고 있다. 파손부위를 관찰한 결과 마모에 의해 손상된 부분이 상하급형의 절단을 위한 접촉으로 인해 생기는 진동에 의하여 최종 박리(spalling)된 양상을 보이고 있다. 이는 계속되는 반복적인 절단작업에 의해 표면의 경화층이 닳아 열화된 상태에서 외부 충격에 의해 박리가 되는 것으로 파악된다.

Fig. 5는 Fig. 4에 나타난 박리현상을 고찰하고자 SEM분석한 결과이다. 마모가 발생하여 열화된 부분이 회전에 의한 충격으로 조직이 뜯겨져 나간 손상흔이 관찰되고 있다. 박리된 부위에는 많은 결합과 불순물이 내재되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 세로방향의 깊은 고랑과 같은 홈을 확인할 수 있는데 이는 전형적인 박리 손상의 특성을 나타내는 것이다.

슬리팅 나이프 엣지에서 마모에 의한 박리현상이 발생한 원인을 알아보기 위하여 손상부와 모재부에서의 미세조직을 관찰하였다. Fig. 6은 손상부위와 그렇지 않은 모재부위의 조직사진을 관찰한 것이다. 일반적으로 퀴칭 후 인성이 부족해지므로 템퍼링을 통하여 인성 회복을 하게 된다. 본 연구의 시료에서도 퀴칭 후 560℃에서 연속 2번의 고온템퍼링을 하여 강도와 인성이 우수한 템

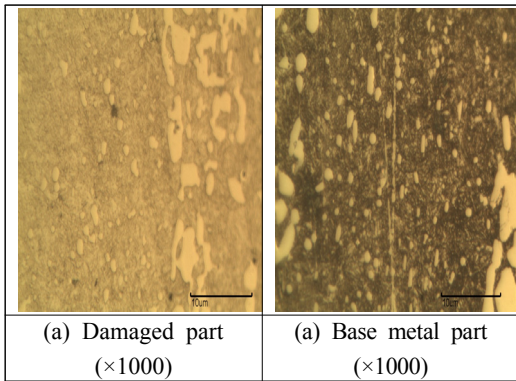


Fig. 6 Microstructure observation of spalling failure part and base metal part

퍼링 마르텐사이트조직이 형성된 것을 알 수 있다. 전반적으로 손상부의 조직이 모재부의 조직과 비교하여 구상화조직이 다소 조대화되어 있다. 그러나 오히려 구상화된 조직의 수가 다소 적은 것으로 보아 손상부 조직에서의 인성이 다소 저하하여 박리가 발생한 것으로 판단된다. 침상화된 마르텐사이트조직이 구상화되어짐으로써 강도가 다소 저하한 것으로 보이며 이 역시 외부충격에 의해 쉽게 박리가 일어나는 원인을 제공하였을 것으로 판단된다.

4. 결과 및 고찰

4.1 마모손실과 마찰계수

무윤활조건, 부하하중 1.5 kg, 마찰시간 1시간 30분으로 슬리팅 나이프의 내부(inside; 슬리팅 나이프의 안지름에 가까운 쪽), 표면(surface; 슬리팅 나이프의 바깥지름에 가까운 쪽), 손상부(knife edge)의 3곳으로 나누어 마모시험을 실시하였다.

Fig. 7에는 손상부에 대한 마모시험을 통하여 구한 마모손실과 마찰계수의 일례를 나타낸다.

Fig. 8에는 마모시험을 행한 3곳에서 얻은 마모손실과 마찰계수의 평균치를 나타낸다. 마모시험에 사용된 시료가 이미 1년간 경년열화된 상태의 부품에서 채취한 시료를 이용하였기 때문에 손상에 의해 거칠어진 부분이 발생하였고 따라서 마

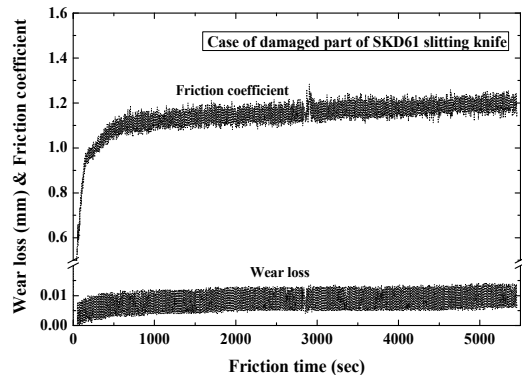


Fig. 7 Wear loss and friction coefficient according to friction time

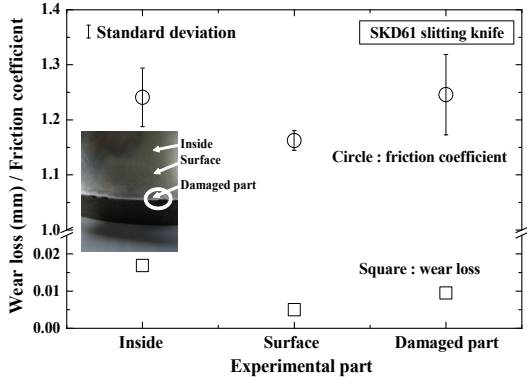


Fig. 8 Mean values of wear loss and friction coefficient

Table 2 Mean, standard deviation and coefficient of variation of wear loss

	Mean	Standard deviation (SD)	Coefficient of variation (COV)
Inside	0.0169	0.00085	0.050
Surface	0.0050	0.00071	0.141
Damaged part	0.0095	0.00310	0.326

Table 3 Mean, standard deviation and coefficient of variation of friction coefficient

	Mean	Standard deviation (SD)	Coefficient of variation (COV)
Inside	1.241	0.053	0.043
Surface	1.163	0.018	0.015
Damaged part	1.246	0.073	0.058

찰계수와 마모손실이 나이프 엿지부에서 다소 크게 나타났다. 표면부에서는 열처리효과에 의한 경도상승으로 인하여 마찰계수와 마모손실이 낮았고 반면 내부에서는 절단을 위해 정밀하게 연마된 edge부에 비해 연마상태가 상대적으로 거칠어서 크게 나타난 것으로 사료된다.

측정된 3곳에서의 마찰계수와 마모손실의 평균(mean), 표준편차(standard deviation) 및 변동계수(coefficient of variation)를 Table 2와 3에 각각 정

리하여 나타낸다.

4.2 마이크로 비커스경도

슬리팅 나이프의 5곳의 장소에서 마이크로 비커스경도를 측정하였다. 마이크로 비커스경도시험은 압입하중 500 g, 유지시간 10 sec로 하여 각 장소에서 각각 5회 측정하였다. 측정된 곳은 내부, 표면, 손상부, 손상부 내부, 손상부측의 표면이다. Fig. 9에는 각 위치에서 측정된 마이크로 비커스경도의 평균치를 나타낸다. 마이크로 비커스경도의 평균치는 내부에서 약 760 Hv, 열처리 표면은 687 Hv를 각각 나타내었다. 이에 반해 경년사용에 따른 장시간의 사용에 의한 손상층의 표면은 530 Hv, 반복적인 절단 작업으로 인하여 진동에 의한 충격이 가해져 박리가 발생한 손상부에서는 약 493 Hv로 가장 작은 값을 나타내었다. 이것으로부터 절단에 직접적으로 사용되는 슬리팅 나이프의 엿지 부분은 연속적인 작업에 의하여 표면 무딤 현상이 가속화되어지고 이것이 경도저하를 가져와 결국 박리와 같은 열화에 의한 파손이 발생한 것으로 사료된다.

Table 4는 각 장소에서 측정된 마이크로 비커스경도값의 평균(mean), 표준편차(standard deviation) 및 변동계수(coefficient of variation)와 더불어 형상계수(shape parameter) 및 척도계수(scale parameter)을 각각 정리하여 나타낸 것이다.

상기 Fig. 9에 나타내어진 측정된 각 장소에서의 마이크로 비커스경도의 분포에 차이가 발생하

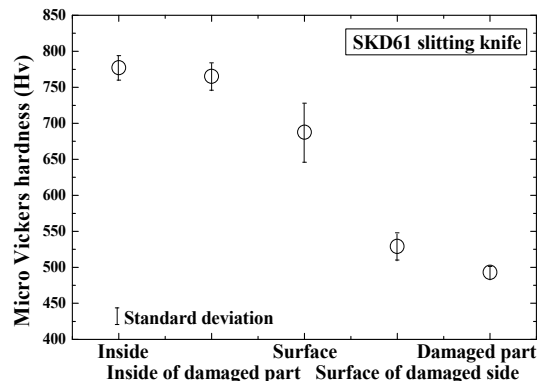


Fig. 9 Mean values of micro Vickers hardness

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

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
①	52.54	784.88	777.3	16.78	0.022
②	47.21	773.53	765.2	19.10	0.025
③	19.41	705.30	687.6	41.27	0.060
④	34.94	536.64	529.0	18.99	0.036
⑤	71.62	496.64	493.1	8.32	0.017

Note: (a)Shape parameter, (b)Scale parameter, (c) Mean, (d)Standard deviation(SD), (e)Coefficient of variation (COV), ①Inside, ②Inside of damaged part, ③Surface, ④Surface of damaged side, ⑤ Damaged part

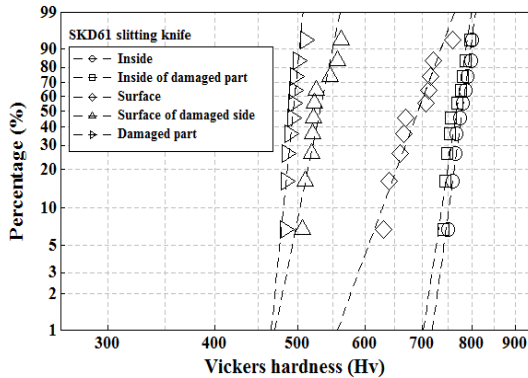


Fig. 10 2-parameter Weibull distribution of measured micro Vickers hardness values

고 있기 때문에 이와 같이 변동하는 마이크로 비커스경도값에 대하여 최약링크 가설을 적용하여 2-파라미터 와이블분포(2-parameter Weibull distribution)에 따른 통계적 분석을 실시하였다. 식 (1)은 2-파라미터 와이블분포를 나타낸다. 식 (1)에 의하여 얻어진 와이블분포의 확률분포함수를 Fig. 10에 나타낸다.⁸⁻¹⁰⁾

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

여기서, α 는 확률변수의 변동성을 나타내는 형상

계수(shape parameter)이고, β 는 63.2% 확률에서 특성수명을 나타내는 척도계수(scale parameter)이다.

Fig. 10으로부터 내부의 형상계수는 약 53과 47로서 비교적 높게 나타나 분산이 적은 편이었으나 열처리한 표면은 약 19 정도로서 가장 작은 값을 나타내었다. 손상측의 표면에서는 약 35 정도를 나타내었으나, 손상부는 약 72로서 측정 부위 중에서 가장 높은 값을 나타내었다. 측정된 값들은 와이블분포에 잘 따르고 있다.

5. 결 론

자동차 부품용 강판의 절단에 사용되는 slitting knife의 마모의 영향에 따른 파손 분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 장시간의 경년사용에 의한 열화현상으로 슬리팅 나이프의 옛지(edge) 부분에 박리(spalling) 손상이 발생하였다.
- 2) 마모시험으로부터 마찰계수와 마모손실량은 반복되는 연속 절단 작업으로 인한 박리현상에 의하여 손상부인 슬리팅 나이프 옛지(slitting knife edge)에서 다소 크게 나타났다.
- 3) 마이크로 비커스경도는 연속적인 작업으로 인하여 슬리팅 나이프 옛지에 경년열화가 발생하였고 이로 인해 박리가 발생한 손상부(damaged part)에서 가장 낮은 값을 나타내었다.
- 4) 슬리팅 나이프의 마이크로 비커스경도는 2-파라미터 와이블분포에 잘 따랐다.

References

1. 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.
2. <http://www.swhitech.com/main/>
3. JIS G 4105
4. W. S. Cho, 2009, Martensitic Transformation

- and Mechanical Property of Abrasive Resistance Alloys with Heat Treatment Conditions, A doctor's Thesis, Chosun University, Jeonnam, Korea.
5. K. T. Han and J. K. Seo, 2001, "A Study on the Slitting Working by Finite Element Analysis", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 56-63.
 6. 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.
 7. K. W. Nam and S. H. Ahn, 2012, Fatigue Fracture and Damage Cases of Surface Hardening Treatment Steel, GS Intersivon, Seoul, Korea.
 8. A. C. Cohen, 1965, "Maximum Likelihood Estimation in the Weibull Distribution Based on Complete and on Censored Samples", Technometrics, Vol. 7, pp. 579-588.
 9. W. Weibull, 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", ASME J. Applied Mech., Vol. 18, pp. 293-297.
 10. 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.
 11. G. Straffelinia, P. C. Vermaa, I. Metinozb, R. Ciudina, G. Perriconeb, and S. Gialanellaa, 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.
 12. J.C. Miranda and A. Ramalho, 2015, "Study of the Effects of Damage Accumulation on War", Wear, Vols. 330 - 331, pp. 79 - 84.
 13. P. Hedenqvist and M. Olsson, 1991, "Sliding Wear Testing of Coated Cutting Tool Materials", Tribol. Int., Vol. 24, pp. 143-150.
 14. M.E. Merchant, 1945, "Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and A Type 2 Chip", J. Appl. Phys., Vol. 16, pp. 267-275
 15. 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.
 16. İ. Uçun, K. Aslanta and F. Bedir, 2013, "An Experimental Investigation of the Effect of Coating Material on Tool Wear in Micro Milling of Inconel 718 Super Alloy", Wear, Vol. 300, Issues 1 - 2, pp. 8-19.