

Force Sensor를 이용한 구성인선의 In-Process 감시에 관한 기초 연구

Basic Study on In-Process Monitoring of B.U.E. using Force Sensor

원종식(창원 대학교 기계공학과 대학원), 오민석(창원 대학교 기계공학과 대학원),

정운교(창원 대학교 기계공학과)

Jong-Sik Won(Chang-Won Univ.), Min-Seok Oh(Chang-Won Univ.), Youn-Gyo Jung(Chang-Won Univ.)

ABSTRACT

Recently, in order to achieve high flexibility of manufacture, monitoring and control strategies of a new type have been developed. Since the generation of built-up edge on the cutting tool damages the surface finish of the workpiece, the monitoring system of built-up edge is an important process monitoring. In this study, the analyzing methods of cutting force signal to detect the built-up edge during cutting process are described. The cutting force signals are analyzed using the mean, standard deviation and mean to standard deviation of this cutting signals. We can obtain the guide to detect the built-up edge during turning process.

Key words : Cutting speed(절삭속도), Cutting force(절삭력), Built-up edge(구성인선), Standard deviation(STD : 표준편차), Mean to STD ratio(m/STD : 표준편차에 대한 평균의 비), Critical cutting speed(V_1 : 임계 절삭속도), Critical point(P_c : 임계점), Surface roughness(표면거칠기)

1. 서론

최근의 생산시스템은 자동화, 무인화, FMS를 지향하는 추세이며 이러한 시스템의 효율을 제고하기 위하여는 각종 센서에 의한 공정 감시로 항상 최적의 상태를 유지시킬 것이 요구되며 최근 이에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다¹⁻⁴⁾.

절삭공정의 감시 대상으로는 공구마모, 공구의 진동, 구성인선 등의 중요한 인자들이 있다. 이들 중 구성인선은 일반적으로 공작물의 표면거칠기와 정밀도에 나쁜 영향을 준다고 알려져 있다. 따라서 절삭가공상태를 감지하여 구성인선의 발생 여부를 판단할 수 있는 방법을 찾음으로써 공작물의 품질을 향상시킬 수 있을 것이다. 본 연구에서는 절삭시 Force sensor에 의해 감지된 절삭력과 절삭력의 변동량을 분석하고 그 상관관계를 고찰하여 구성인선을 In-process 감시할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 구성인선과 절삭저항과의 관계

구성인선이란 칩의 일부가 절삭날에 용착되는 것으로서 심하게 가공경화되어 높은 경도를 가지며 절삭시 실제의 절삭날 역할을 한다. 구성인선이 발생하면 Fig.1과 같이 공구의 상면 경사각은 α 에서 α_a 로 증가하는 효과가 생기고 이에 따라 절삭력은 구성인선이 발생하지 않는 경우에 비하여 적은 값으로 나타나게 된다.

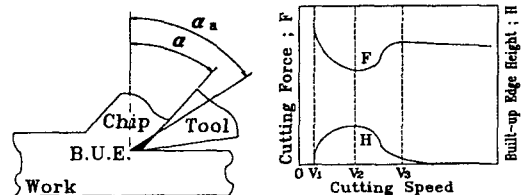


Fig.1 Form of built-up edge(left side).

Fig.2 Diagram of typical influence of built-up edge height on cutting force(right side).

Fig.2는 Zorev⁵⁾에 의해 표시된 절삭속도와 절삭력 및 구성인선의 높이와의 관계를 나타내는 것으로 구성인선의 높이(H)가 클수록 절삭력(F)이 적어짐을 볼 수 있다.

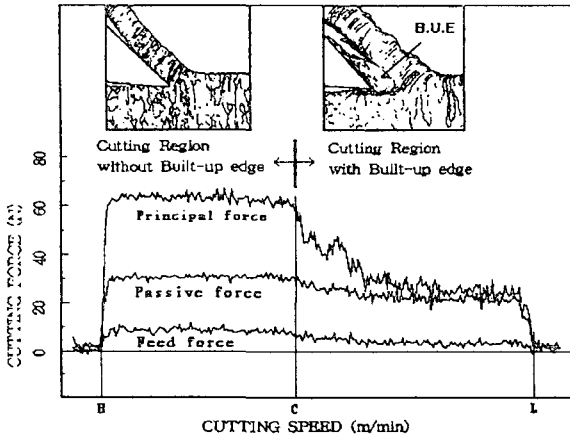


Fig.3 Relation of cutting speed and cutting forces

Fig.3은 본 연구의 기초 실험에서 얻은 절삭속도와 절삭력과의 관계를 도시하고 있다. 전술한 바와 같이, 구성인선이 발생하지 않는 H-C구간에서의 절삭력은 구성인선이 발생하는 C-L구간에서의 절삭력보다 큰 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 한편, 구성인선이 발생한 영역에서는 절삭력의 변동량이 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 절삭중에 구성인선의 형상과 치수가 계속적으로 변동하는 특성에 기인하는 것이다. 따라서, 절삭력 측정장치에 의해 감지된 절삭력의 크기와 변동량은 구성인선의 발생 여부를 감지하기에 적합한 인자며, 많은 연구자들⁵⁻⁷⁾도 그들의 보고서에서 절삭력이 구성인선 감지에 가장 좋은 도구라고 보고한 바 있다. Nakayama⁶⁾등은 구성인선상태에서의 절삭력 및 표면다듬질의 영향에 관하여 입증하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서는 주축모터의 소비동력이 7.5kw인 CNC선반을 사용하였다. 공작물은 SM45C와 SKD11의 두 종류를 사용하였으며, 절삭력은 압전소자형 공구동력계(Dynamometer)로 감지하여

Charge amplifier로 증폭하여 3분력을 측정하였다. 공구홀더는 대한중석의 WTENN2525M16을, Insert tip은 TNMG 160404 (N20)를 채택하였으며, 절삭유는 사용하지 않았다. 가공면의 표면거칠기는 비접촉 Laser표면거칠기로 측정하였고 초경 팁의 선단과 가공표면의 관찰은 실물 현미경을 사용하였다. 본 실험에 사용된 실험조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental conditions

Item	Specification
CNC Lathe	Hi-ECO 10 (Hwacheon Co.)
Workpiece	SM45C(O.D.=97.5mm, LD.=25mm) STD11(O.D.=95.9mm, LD.=32mm)
Dynamometer	Piezo Type 9250B (Kistler Co.)
Charge Amplifier	5019A (Kistler Co.)
Tool Holder	WTENN2525M16(KoreaTungsten Co.)
Insert Tip	TNMG160404-B25(NC20)(Korloy Inc.)
Coolant	Dry
Surface Roughness Tester	Nano-surface(Laser Type)
Object Microscope	KSZ-1A (Samwon Scientific Ind, Co.)

본 실험의 실험장치는 Fig.4와 같이 구성하였다. 주축회전수는 일정하게 유지시키고 절삭방향은 바이트를 외경에서 내경 방향으로 이송시키는 정면절삭방식을 채택하였다. 절삭조건은 절입깊이를 0.15, 0.2, 0.25, 0.3mm로, 이송속도를 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3mm/min으로 하였다.

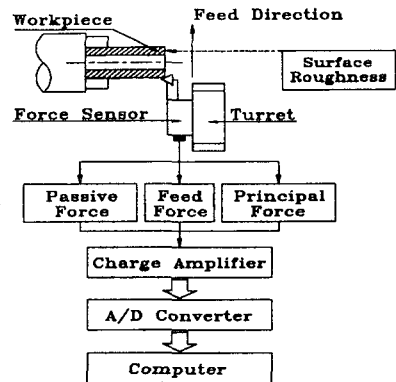


Fig.4 Experimental setup

4. 실험결과 및 고찰

(1) SM45C의 절삭인 경우

Fig.5는 외경 97.5mm, 내경 25mm인 SM45C를 절입깊이 0.15mm, 이송 0.1mm/rev, 회전수 588rpm의 절삭조건으로 실험한 결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 (A)는 가공면의 위치에 따른 표면거칠기의 변화를 나타낸다. 그림 (A)에서 보듯이, 가공이 시작된 점에서부터 8.67mm 떨어진 P점까지는 표면거칠기 R_{max} 값이 5.2 μ m 정도로 균일하였고, 이 지점에서부터 절삭 중점까지는 표면거칠기 R_{max} 값이 점점 증가하며 불균일한 양상을 보인다. 이러한 현상은 이 지점을 기준으로 하여 큰 직경부분(고절삭속도 영역)은 구성인선이 발생하지 않고 작은 직경부분(저절삭속도 영역)에는 구성인선이 발생했기 때문인 것으로 보인다. 따라서 이 지점은 구성인선이 발생, 미발생하는 임계점(Threshold Point: P)으로 볼 수 있다.

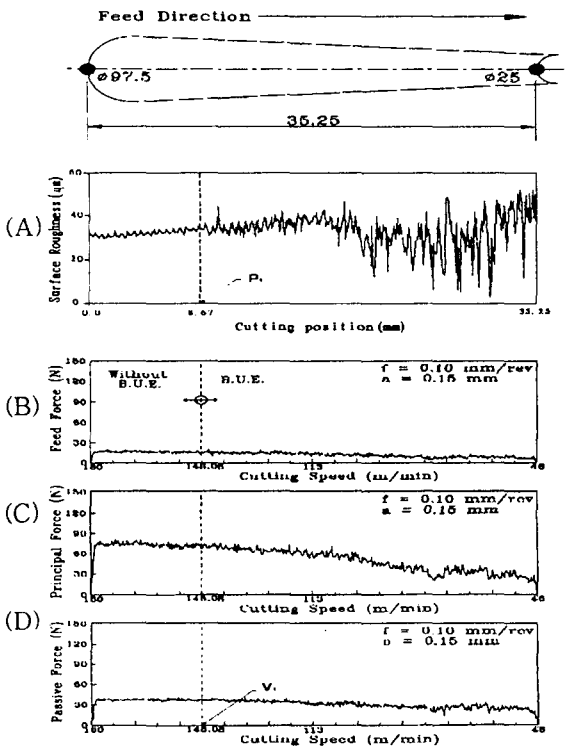
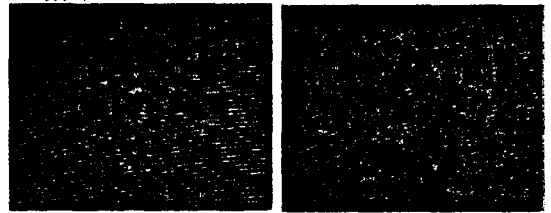


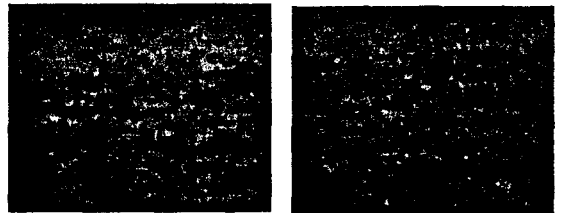
Fig.5 Cutting forces and surface profile during cutting with B.U.E. formation

그림(B),(C),(D)의 각 절삭력 성분들은 절삭속도 $V=180\sim 148.08$ m/min의 구간에서는 절삭력이 큰 반면 절삭력의 변동량은 작으며, $V=148.08\sim 46$ m/min의 구간에서는 절삭력이 작은 반면 절삭력 변동량은 큰 양상을 보이고 있다. 이와 같이 낮은 절삭속도영역에서 절삭력이 작은 값을 갖는 것은 구성인선으로 인해서 실제 경사각이 증대되기 때문이고, 절삭력의 변동량이 큰 값을 갖는 것은 구성인선의 생성, 성장, 최대성장, 분열, 탈락이 반복됨에 기인한 것으로 보인다. 따라서, Fig.5에서의 절삭조건하에서는 절삭속도 148.08m/min이 구성인선의 발생여부를 판단할 수 있는 임계절삭속도(Threshold of Cutting speed: v_t)라고 볼 수 있다.

Fig.5에 나타난 이러한 양상들이 구성인선에서 기인하는 것인지를 실제적으로 확인하기 위하여 실물 현미경으로 가공면과 공구인선을 관찰하여 보았다. Fig.6은 구성인선의 미발생과 발생 영역에서의 가공면 상태를 나타낸 사진으로서, 발생 영역(B)은 구성인선의 존재에 의해서 가공면이 거친 상태로 되어 있음을 확인할 수 있었으며, 같은 조건에서 사용한 공구인선 들을 관찰한 결과 (Fig.7), 구성인선이라고 판단되는 물질을 발견할 수 있었다. 이러한 결과들은 Fig.5에 나타난 양상들이 구성인선에서 기인한다는 사실을 뒷받침하고 있다.



(A) Without B.U.E. (B) B.U.E.
Fig.6 Photo of cut surface($\times 20$)



(A) Without B.U.E. (B) B.U.E.
Fig.7. Photo of tool edge($\times 10$)

이상 서술한 바와 같이 절삭력의 측정에 의해 구성인선의 발생 여부를 판단할 수 있는 임계 절삭속도를 결정할 수 있음을 알았다. Fig.8에서는 이러한 임계절삭속도가 각 절삭조건(이송 및 절입깊이)에 따라 어떠한 경향을 보이는 검토하였다. 그림에서는 절입깊이 $a=0.15, 0.20, 0.25, 0.30\text{mm}$ 로, 이송 $f=0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30\text{mm/rev}$ 로 변화시키면서 실험 분석하여 구한 각 조건들에서의 임계절삭속도를 도시하고 있다. 구성인선은 절삭속도뿐만 아니라 절입깊이와 이송에도 영향을 받으며 절입깊이와 이송의 증가에 따라 임계절삭속도를 낮아진다는 것을 알 수 있었다.

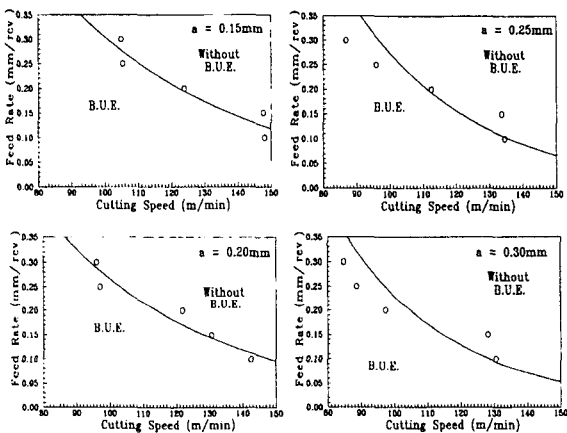


Fig.8 Critical cutting speed on various cutting conditions

(2) STD11의 절삭인 경우

본 절에서는 비교를 위하여 SM45C보다 일반적으로 경도가 크고 연성이 작은 STD11을 SM45C와 같은 절삭조건에서 절삭실험을 하여 구성인선의 발생 여부를 검토하였다.

Fig.9는 절입깊이 $a=0.15\text{mm}$ 로, 이송 $f=0.25\text{mm/rev}$ 로 하고 절삭속도범위를 150~50m/min으로 실험한 경우의 절삭속도와 절삭력의 관계를 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 STD11의 경우에는 SM45C와 같은 구성인선발생을 보여주는 절삭력 및 절삭력 변동량의 변화는 볼 수 없었으며 가공면에 상태를 관찰하여 보아도 동일절삭단면내의 고절삭속도영역인 외측과

저절삭속도영역인 내측의 가공면상태는 구성인선의 존재에 의한 가공면의 차이는 나타나지 않았다(Fig.10). 이 결과로 STD11은 재료의 특성상 구성인선이 잘 발생되지 않는 재료라고 생각되며, 발생하더라도 구성인선의 경도와 공작물의 경도차가 충분히 크지 않아서 구성인선이 절삭날로써의 역할을 할 수 없기 때문에 절삭력과 절삭력 변동량이 전체 가공구간에 걸쳐 일정한 것으로 사료된다.

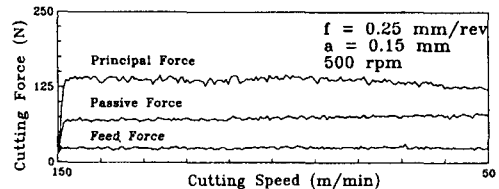
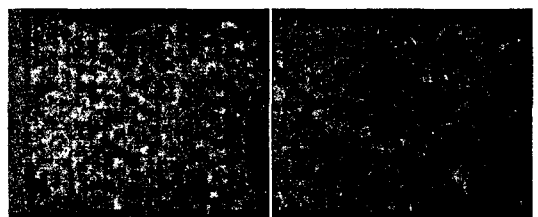


Fig.9 Cutting force of STD11



(A)Outer diameter side (B)Inner diameter side
⇒Fig.9의 (A)조건

Fig.10 Surface profile of STD11($\times 20$)

그러나, STD11은 공구마모가 크고 그로 인해 가공면이 거칠어지는 현상이 현저했다. Fig.11의 (A)는 STD11을 절입깊이 $a=0.2\text{mm}$, 이송 $f=0.1\text{mm/rev}$, 700rpm의 조건에서 외경 95.5mm ($V=210\text{m/min}$)에서 절삭을 시작하여 내경 32mm($V=70\text{m/min}$)까지 10회 정면절삭한 공구인 선을, (B)은 동일한 조건에서 SM45C를 절삭한 공구인 선을, (C)은 이때의 가공면을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 STD11을 절삭한 공구(A)의 선단마모는 약 0.37mm로, SM45C인 경우의 0.13mm보다 현저히 크며 가공면은 (C)에서와 같이 몹시 불균일하고 거칠었다. 따라서 STD11의 가공면 상태는 구성인선의 발생보다 오히려 공구의 마모가 중요한 인자라고 사료되며 이에 대한 검토가 요망된다.

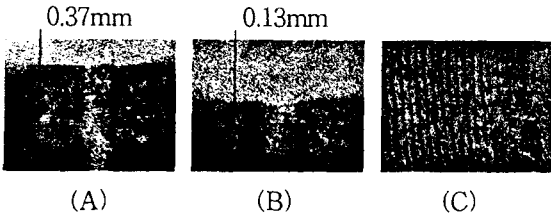


Fig.11 Wear of minor cutting edge and surface profile of STD11(×20)

(3) 구성인선 감지방법에 대한 고찰

전술(前述)한 내용과 같이 SM45C의 경우에 절삭력과 그 변동량은 임계절삭속도를 경계로 하여 현저히 다른 양상을 나타내고 있다. Fig.12는 측정된 표면거칠기로부터 결정한 임계절삭속도점에서 평균절삭력곡선과 표준편차곡선을 교차시켜 그린 그림이다. 평균절삭력곡선(F)은 각 절삭력성분별 6000개의 데이터중 20개씩 추출하여 구한 300개의 평균값을 다시 10개씩 추출하여 구한 평균값에 의한 곡선이고, 표준편차곡선(D)은 6000개의 데이터중 20개씩 추출하여 구한 표준편차(Standard Deviation : STD)를 다시 10개씩 추출하여 구한 평균값에 의한 곡선이다.

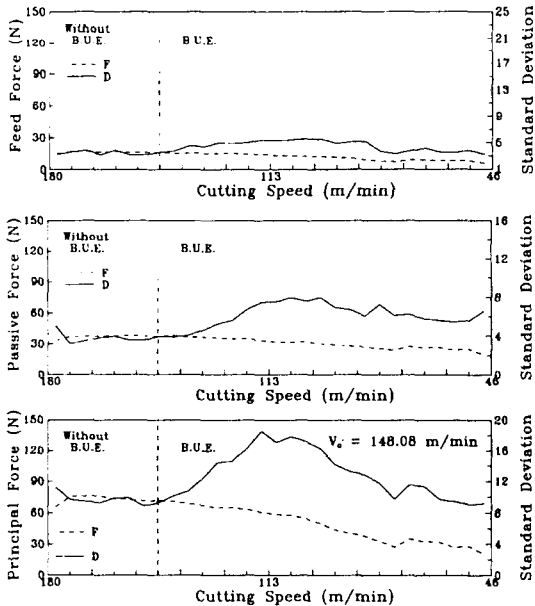


Fig.12 Means and standard deviation of cutting forces during with and without built-up edge.

그림에서 보는 바와 같이 임계절삭속도점을 경계로 하여 두곡선의 차이가 명확하게 나타나는 것으로 보아, 임계절삭속도점에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 주분력과 배분력에서 더욱 현저하게 나타남을 알 수 있고, 따라서, 구성인선의 발생영역과 미발생영역을 정량적으로 표현하기 위하여 각 영역에서의 표준편차에 대한 평균절삭력의 비(mean to STD ratio)의 값을 나타내었다

Fig.13은 이송 $f=0.2\text{mm/rev}$, 절삭깊이 $a=0.15, 0.20, 0.25, 0.30\text{mm}$ 조건하에서 실험한 데이터를 처리하여 각 절삭력별로 구성인선 미발생영역의 총 데이터에 대한 m/STD 값과, 구성인선 발생영역에서의 총 데이터에 대한 m/STD 값을 비교하여 나타낸 것이다. 주분력, 이송분력에 비하여 배분력의 경우는 구성인선의 발생, 미발생영역에서의 m/STD 의 값의 차이가 현저한 것으로 보아, 3분력중 배분력이 구성인선을 감지하기에 가장 적합한 인자라고 사료된다. 절입깊이변화에 대하여서는 현격한 차이를 발견할 수 없었다.

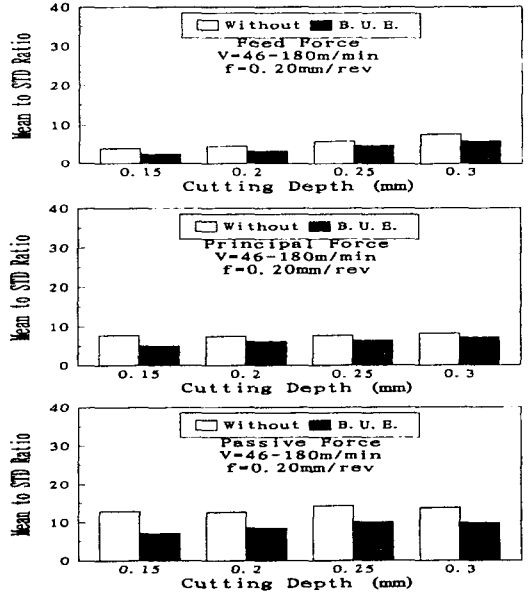


Fig.13 Differences of mean to standard deviation ratios of cutting forces during cutting with various cutting depths.

이상과 같이 구성인선을 In-process로 감지

하기 위하여 m/STD값과 배분력성분이 중요한 인자임을 알 수 있었다. Fig.14는 각종 절삭면적(이송×절입깊이)의 변화에 대한 임계m/STD(임계절삭속도 근방의 20개의 데이터에 대한 m/STD ratio값)의 변화를 도시한 그림이다. 어떠한 조건에서 절삭가공을 할 때, 절삭중의 m/STD의 값이 임계m/STD의 값보다 크면 구성인선이 미발생, 적으면 구성인선이 발생함을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 배분력성분의 절삭면적(X)에 대한 임계 m/STD(Y)의 값은 $Y = 93.04X + 7.81$ 로 표시되며 이 임계선에 평행한 두 점선 사이의 영역은 구성인선의 발생, 미발생이 불분명한 천이영역(transition area; A_t)이고 이 천이영역의 상부는 구성인선의 미발생지역이며, 그 하부는 구성인선 발생 영역이다. 따라서 구성인선이 발생하지 않는 절삭을 지속하려면 본 실험의 범위에서는 절삭중 감지된 m/STD가 천이영역이상의 큰 값을 유지해야 한다.

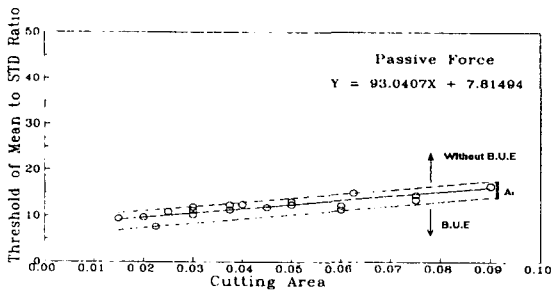


Fig.14 Relationship between cutting area and threshold of mean to STD ratio

5. 결론

본 연구에서는 선삭가공중 force sensor를 사용하여 감지한 절삭력과 그 변동량을 통계적 방법으로 분석하여 구성인선의 In-process감시방법을 찾고자 하였으며 다음과 같이 결론을 얻을 수 있었다.

1. 절삭력을 통계기법에 의해 분석한 결과, 명확한 임계절삭속도점을 발견할 수 있었다.
2. 배분력은 주분력과 이송분력에 비하여 구성인선 발생영역과 미발생영역에서의 표준편차값에

대한 평균절삭력값의 차이가 크므로 구성인선감지에 사용하기 적합한 인자임을 알 수 있었다.

3. STD11은 현저한 절삭력의 변동과 구성인선을 감시할 수 없었으나, 공구마모는 SM45C에 비하여 현저히 큼을 알 수 있었다. 따라서 STD11의 경우는 공구마모의 In-process감시를 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 배분력성분에서의 절삭면적(X)에 대한 임계 m/STD(Y)는 $Y = 93.04X + 7.81$ 로 표시되고 임계m/STD값에 의해 구성인선의 In-process감시의 가능성을 제시할 수 있었다.

참고 문헌

1. Jong-Jin Park and A. Galip Ulsoy, "On-Line Flank Wear Estimation Using an Adaptive Observer and Computer Vision, Part2 : Experiment", J.Eng. for Ind. Trans., ASME, Vol.115 PP. 37~43, 1993
2. J.Colgan, H.Chin, K.Dandi, S.R.Hayashi, "On-Line Tool Breakage Detection in Turning: A Multi-Sensor Method", J.Eng. for Ind. Trans., ASME, Vol.116 PP. 117~123, 1994
3. A.G. ULSOY, Y. KOREN and F. RASMUSSEN, 'Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools', Trans. ASME, J. Dyn. Sys., 1983, Vol.105, p.107~112
4. 노상현, 김진락, 김교형, "선삭가공에서 절삭력을 일정하게 유지하기 위한 적응제어" 대한기계학회논문집 제17권 제1호 PP. 67~77, 1993
5. N.N. ZOREV, 'Metal Cutting Mechanics', Pergamon Press, 1966
6. K. NAKAYAMA, M.C. SHAW and R.C. BREWER, 'Relationship Between Cutting Forces, Temperatures, Built-up Edge and Surface Finish', Annals of CIRP, 1966, Vol.14, p.211-223
7. M.C. SHAW, E. USUI and P.A. SMITH, 'Free Machining Steel III: Cutting Forces, Surface Finish and Chip Formation', Trans. ASME, J. ind., 1961, p.181-193