

절삭가공에서의 불량가공비용을 고려한 기계선택에 관한 연구

박찬웅
가천대학교 산업경영공학과

A Study on the Machine Selection Problem Considering the Cost of Defective Products in the Machining Process

Chan-Woong Park

Dept. of Industrial Management and Engineering System, Gachon Univ

요 약 생산시스템에서의 공정계획 의사결정에 있어서 가장 중요한 의사결정은 공정을 수행할 기계를 선정하는 문제이다. 일반적으로 기계선택의 결정 기준으로는 가공에 소요되는 비용을 최소화하는 기준을 사용하고 있다. 공정을 수행할 수 있는 기계들은 각각의 고유한 가공능력에 따라 다양한 불량률을 나타내게 된다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 고려하는 가공비용 뿐만 아니라 불량발생 비용을 고려하여 기계를 선정하고자 한다. 본 연구에서는 기계의 가공능력에 따른 불량발생에 관한 통계학적 모델을 사용하여 가공 총비용을 최소화하는 기계선택 절차를 제시하고자 한다.

주제어 : 공정계획, 기계선택, 가공비용, 가공불량률, 불량발생비용

Abstract The most important decision of process planning for the manufacturing system is the machine selection problem to minimize machining costs. Each machine has its own different machining performance indicating a different fraction of scrap, making the cost of scrap generated by machining is different for each machine. Therefore, when we decide on machine selection, we must consider the machining cost and the cost of scrap generated. This paper describes the statistical model for the fraction of scrap generated by machining and the machine selection algorithm considering the total cost including the machining cost and the cost of scrap generated.

Key Words : Process planning, Machine selection, Machining cost, Fraction of scrap, Cost of scrap

1. 서론

생산시스템에서의 가장 중요한 의사결정중의 하나는 공정계획 및 생산일정계획의 수립이라 할 수 있다. 공정계획에서의 의사결정은 원자재의 결정, 가공공정의 결정,

가공순서의 결정, 가공기계의 결정, 가공 공구의 결정, 가공시간의 결정 및 가공 검사장비의 결정 등 이다. 공정계획 각 의사결정은 일반적으로 가공시간의 최소화 또는 가공비용의 최소화를 목적으로 하고 있다. 주어진 목적 하에 공정계획이 수립되면 공정계획 결과에 따라 생산일

Received 25 June 2014, Revised 28 July 2014

Accepted 20 August 2014

Corresponding Author: Chan-woong Park(Gachon Univ.)

Email : cwpark@gachon.ac.kr

© The Society of Digital Policy & Management. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ISSN: 1738-1916

정계획이 수립되며 이를 통해 생산 및 제조 실행이 이루어진다.

기업들은 가능한 많은 주문을 접수하려 할 것이다. 그렇게 하기 위해서는 주어진 생산계획기간내에서 기계의 가공속도를 증가시켜 가공시간을 단축하여야 한다. 그러나 가공속도의 증가는 기계절삭비용을 증가시키는 원인이 되며, 불량 발생율을 높이는 원인이 되기도 한다. 그러므로 공정계획의 일반적인 목적인 가공시간의 최소화와 가공비용의 최소화는 상충관계에 있다고 할 수 있다. 또한 공정계획에서 가장 중요한 의사결정은 특정 공정을 수행할 기계의 선정일 것이다. 기계의 선정은 특정 공정을 수행할 수 있는 기계가 다수일 경우 어떤 기계를 선정하는 것이 가장 효율적일 것인가를 고려하는 문제이다. 절삭 가공을 수행하는 기계들은 각 기계마다 특유의 성능을 지니고 있다. 기계의 성능은 가공 정밀도, 가공속도의 범위 및 가공 비용 등으로 특징지을 수 있다. 기계의 정밀도는 가공 불량률과 밀접한 관련이 있으며, 기계 가공에 관련한 정밀도 측정에 대해서는 연구가 진행되어있다.[1,2]가공비용에 대해서는 일반적으로 기계 절삭 가공시에 발생하는 비용요소를 절삭 작업비, 절삭공구 탈착비, 절삭 공구비, 공작물 탈착비로 구분하여 고려하고 있다.[3]기계들의 경제적 절삭가공 문제에 대해서는 다양한 연구가 진행되어왔다.[4,5] 그러나 이러한 일반적인 절삭가공비용 요소에는 불량 발생 비용을 고려하고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 공정계획 수립시에 각 기계의 특성을 고려한 불량발생 비용을 고려하기 위해, 가공부품의 공차와 각 가공기계의 정밀도에 관련된 불량 발생률을 통계학적 기법으로 예측하여 공정계획에서 가공 비용 결정시 불량 발생비용을 고려하는 모델을 제시하고자 한다.

불량 발생률 모델을 제시하기에 앞서 2장에서는 절삭가공에 관련된 절삭가공모델과 비용모델을 소개하고, 3장에서는 불량 발생률 예측 모델과 간단한 수치예제를 이용하여 모델을 평가하고 4장에서는 결론 및 추후 연구과제에 대해 언급하고자 한다.

2. 절삭가공 및 비용모델

2.1 절삭가공 모델

일반적으로 공작기계의 절삭조건은 주축(공구)의 회

전수와 작업대의 이송량으로 구성된다. 절삭공정에서 결정되어야 할 파라미터들은 가공될 부품들의 규격, 공정의 종류 및 사용되는 공구 등을 기초로 가공속도, 이송속도 등이 있다.

작업장에 도착하는 제품들에 대한 최적의 가공속도 및 파라미터들은 생산성 및 여러 가지 비용요소를 고려하여 결정하게 된다.[6] 가공속도를 증가시키게 되면, 가공시간이 감소하므로 생산성을 높일 수 있으나 공구의 마모로 인하여 공구비용이 증가하게 되고, 가공속도를 감소시키면, 가공시간이 증가하여 생산성이 감소하고 공구비용이 적게 소요된다. 또한 가공속도의 증가는 정밀도를 떨어뜨리게 되어 제품의 불량을 발생시키는 원인을 제공하기도 한다.

절삭가공에 있어서 가공속도 계산 및 가공속도 결정에 필요한 기호는 다음과 같다.

v_i : 제품 i의 가공속도

$t(v_i)$: 제품 i의 속도 v_i 에서의 가공시간

s : 기계 가공 준비시간

m : 제품 특성에 따른 기계상수

절삭공정에서의 제품의 가공작업 수행에 필요한 가공시간은 일반적으로 다음과 같이 표현된다[3].

$$t(v_i) = s + \frac{m}{v_i}$$

여기서 기계상수 m은 다음과 같이 계산된다.

$$m = \frac{\pi dL}{1000r}$$

d는 작업물의 가공직경이고, L은 가공길이이며, r은 회전당 이송속도(mm/rev)를 의미한다. 따라서 기계의 가공시간이 주어질 경우 이에 해당하는 가공속도를 결정할 수 있다.

$$v_i = \frac{t(v_i) + s}{m}$$

기계가공시 발생하는 불량율에 대한 모형의 연구는 미미한 실정이다. 불량 발생율은 기계의 가공성능 및 속도와 원자재의 재질과 제품의 정밀도 규격 등에 의해 결정된다.

2.2 절삭비용 모델

부품의 가공에 필요한 절삭 가공 비용요소는 크게 절삭작업비, 절삭공구 탈착비, 절삭 공구비, 공작물 탈착비의 4가지로 구분되며, 총비용은 (eq.1)과 같다.[1]

$$T = XT_p + XT_d \frac{T_p}{T} + Y \frac{T_p}{T} + XT_w \quad (eq.1)$$

X : 노무비, 경상비, 기계보수비, 감가상각비, 동력비 등의 간접 비용

T_p : 제품 1개당 가공시간

T_d : 공구의 탈착시간

T : 공구수명 시간

Y : 공구의 가격

T_w : 공작물의 탈착, 준비에 소요되는 시간

절삭속도 V 와 공구수명 T 는 테일러 관계식에 의해 (eq.2)로 표현된다.

$$VT^n = C \quad (eq.2)$$

여기서 n 과 C 는 공구재료, 공구형상 및 공작물의 재질에 따른 상수이다. 또 제품 1개당 가공시간 T_p 는 제품의 길이를 L , 직경을 D , 이송율을 f 라 하면, 식eq.3과 같은 수식이 성립된다.

$$T_c = \frac{\pi DL}{Vf} \quad (eq.3)$$

따라서 (eq.2)와 (eq.3)을 (eq.1)에 대입하고 절삭속도 V 에 대해 미분하면 최소비용의 경제적 절삭속도 VE 를 얻을 수 있다

$$VE = \left(\frac{X}{XT_d + Y} \cdot \frac{n}{1-n} \right)^n C \quad (eq.4)$$

최대 생산성 절삭속도 VP 는 (eq.5)와 같다.

$$VP = \frac{C}{\left[T_d \left(\frac{1-n}{n} \right) \right]^n} \quad (eq.5)$$

(eq.4), (eq.5)에 따르면, 절삭속도는 비용 X , Y 및 공

구탈착시간, 상수 n , C 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 절삭속도가 결정되면, 각 부품에 대한 명세에 따라 필요한 가공시간을 (eq.3)에 의해 산출할 수 있다.

위에 소개한 비용모델에서는 절삭가공시에 발생하는 불량비용을 포함하고 있지 않다. 공정계획에서 공정을 수행 할 기계를 선정할 경우, 위에 소개한 비용요소외에 불량 발생비용을 고려하여 공정계획을 수립하여야 할 것이다. 본 연구에서는 최소비용의 경제적 절삭속도로 절삭가공을 수행하였을 경우에 발생할 수 있는 불량 발생비용을 고려하기로 한다.

따라서 기계 선정시 절삭가공비와 불량발생을 고려한 총비용은 다음과 같다.

$$TC = mM + mT - sF$$

m : 가공 부품 수

M : 원재료 비용

s : 불량품의 수

F : 불량품 처리 비용

다음 장에서는 불량 발생 비용을 평가하기 위한 불량률 예측 모델을 소개한다.

3. 불량률 예측 모델

공정계획에서 공정을 수행할 기계를 선정하기 위해서는 제품의 납기를 제고하기 위한 가공시간과 더불어 비용을 고려해야 한다. 일반적으로 기존 연구들에서는 기계선정시 비용요소를 고려할 때 기계가공비용만을 고려하고 있다. 어떤 기계를 선정하느냐에 따라 불량 발생률이 달라지므로 불량 발생비용도 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 각 기계에서의 불량률을 예측하므로써 불량발생비용을 고려할 수 있는 모형을 제시하고자 한다.

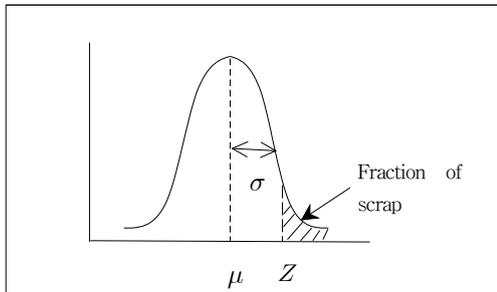
특정 공정을 수행할 수 있는 다수의 기계가 존재할 경우 가장 효율적인 기계를 선정해야 할 것이다. 납기 단축을 위해서는 최대생산성을 지닌 기계를 선정해야 할 것이고, 비용 최소화를 위해서는 기계가공시 발생하는 각종 비용요소를 고려해서 선정해야 한다. 기계가공시에 발생하는 비용은 2장에서 소개하였으나, 이에는 불량 발

생비용이 포함되어 있지 않다. 기계 절삭공정중 발생하는 불량발생 비용은 불량률에 비례하므로 불량률을 예측 평가하여 기계선택시 반영해야 한다.

모든 기계들은 성능에 따라 가공의 정밀도 다양하게 나타난다. 가공할 부품의 정밀도에 대한 허용공차에 따라 가공불량의 여부가 결정된다. 그러므로 본 연구에서는 가공할 부품의 허용공차와 대상 기계들의 정밀도 수준을 통계학적 기법으로 분석하여 불량률을 예측하는 방법을 제시하여 기계선택 의사결정에 불량 발생비용을 고려할 수 있도록 하고자 한다.

3.1 불량률 예측 모형

정밀도에 대한 공작기계의 절삭 가공의 통계학적 분포는 정규분포(normal distribution)를 따른다. 특정 기계의 절삭가공의 평균가공을 μ 라고 하고 절삭가공의 표준편차를 σ 라 하면, 기계의 절삭가공 분포는 [Fig. 1] 과 같은 정규분포 $N(\mu, \sigma)$ 를 따른다.



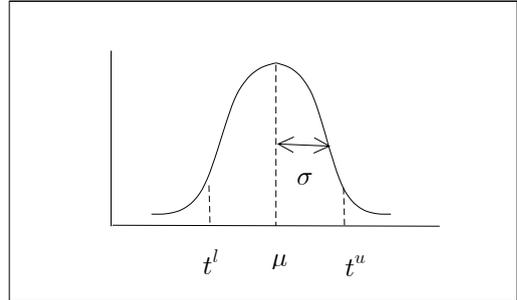
[Fig. 1] The normal distribution of cutting process

즉 기계의 정밀도가 우수할수록 표준편차 σ 는 작은 값으로 나타나게 된다. 절삭가공에 대한 허용 공차의 상한을 t^u 하한을 t^l 이라 하면 상한치와 하한치를 벗어나는 절삭가공은 불량으로 결정되게 된다. 이러한 절삭가공의 불량 특성은 기계의 정밀도에 대한 표준편차에 따라 상이하게 나타난다.

특정기계의 가공 정밀도에 따른 분포를 $N(\mu, \sigma)$ 라 하고, 허용 공차의 상한을 t^u 하한을 t^l 이라 하면, 표준정규분포의 통계량 Z^u, Z^l 은 다음 식으로 계산할 수 있다. 표준 정규분포에서 통계량 Z 는 한계치를 벗어날 확률을 계산하는 통계량이다. 정규분포는 평균을 중심으로

양쪽 대칭의 특성을 지니고 있다.

$$Z^u = \frac{(t^u - \mu)}{\sigma} \quad Z^l = \frac{(t^l - \mu)}{\sigma}$$



[Fig. 2] The defect rate of cutting process

따라서 허용공차를 벗어난 절삭가공의 불량률은 [Fig. 2]와 같이 통계량 Z 를 벗어날 확률과 같게 되므로 특정 기계의 절삭가공에 대한 불량률을 구할 수 있다.

3.2 불량발생 비용을 고려한 기계 선정 알고리즘

본 절에서는 불량 발생 비용을 고려한 기계선택 문제의 알고리즘을 소개한다.

단계1) 기계의 가공 정밀도에 대한 표준편차 σ 를 계산한다.

단계2) 표준정규분포의 통계량 Z^u, Z^l 을 계산한다.

$$Z^u = \frac{(t^u - \mu)}{\sigma}$$

$$Z^l = \frac{(t^l - \mu)}{\sigma}$$

단계3) 통계량 Z^u, Z^l 에 대한 확률을 계산한다.

Z^u, Z^l 에 대한 확률 $P(Z^u), P(Z^l)$ 은 표준정규분포표를 사용하여 구한다.

$$\text{불량률 } P = P(Z^u) + P(Z^l)$$

단계4) 불량률에 따른 불량품의 수를 계산한다.

$$m : \text{가공부품 수}$$

q : 가공부품 주문개수(양품 수)

s : 불량품 수

$$m = \frac{q}{1-P}$$

$$s = m \cdot P$$

단계5) 원재료비 및 불량발생 비용을 포함한 절삭가공의 총비용 TC 를 계산한다.

$$T = XT_p + XT_d \frac{T_p}{T} + Y \frac{T_p}{T} + XT_w$$

$$TC = m.M + m.T - s.F$$

단계 6) 모든 후보 기계에 대해 위 단계들을 수행한다.

단계 7) 후보 기계들 중 총비용 TC 가 가장 적은 기계를 선정한다.

3.3 수치예제

본 절에서는 불량발생 비용을 고려한 기계선정 문제에 대해 본 연구에서 제시한 방법의 절차를 수치예제를 통해 소개하고자 한다. 본 예제에는 샤프트 절삭가공을 수행할 수 있는 기계를 3종류로 하며, 샤프트는 평균 1 inch 절삭가공으로 허용 공차는 ± 0.003 inch 이다. 샤프트의 주문 수량은 총 500개이며, 불량발생처리비용(이득)은 2\$, 샤프트 가공 원재료 비용을 개당 10\$로 가정한다. 주문수량은 전수검사를 거쳐 양품만 공급한다. 각종 수치예제에 필요한 데이터는 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Data for the numerical example

	X	Y	T_p	T_d	T	T_w	σ
Machine1	5	100	3	0.5	100	1	0.005
Machine2	6	100	3	0.5	100	1	0.003
Machine3	10	100	3	0.5	100	1	0.001

본 연구에서 제시한 알고리즘의 절차를 수행했을 경우 기계들의 불량관련 데이터는 <Table 2>와 같으며, 비용 데이터는 <Table 3>과 같다.

<Table 2> Data related to the deflection

	Fraction of scrap	Number of processed part	Number of scrap
Machine1	0.4902	981	481
Machine2	0.2758	691	291
Machine3	0.0020	502	2

<Table 3> Data related to the cost (Unit:\$)

	Raw material cost	Machining cost	Cost of scrap generated	Total cost
Machine1	9810	226,365.75	962	235,213.75
Machine2	6910	207,921.90	582	214,249.90
Machine3	5020	216,613.00	4	221,629.00

알고리즘의 수행 결과인 <Table 3>에 따르면 불량발생비용을 포함한 총비용이 가장 적은 기계 2가 절삭가공 수행 기계로 선정된다.

4. 결론

본 연구는 공정계획의 의사결정에 있어서, 가장 중요한 의사결정인 기계선정에 관한 연구이다. 기존 연구에서는 기계 가공시 발생하는 불량발생 비용을 고려하지 않고 있다. 본 연구에서는 절삭 가공 수행시 발생하는 불량률을 기계 고유의 성능에 따라 통계학적으로 예측하고, 불량 가공에 따른 불량 발생비용을 포함하는 총비용 모델을 제시하였으며, 총비용에 따른 절삭 가공 수행에 필요한 기계 선정 절차를 제시하였다. 또한 제시한 모델의 기계선정 절차에 수치예제를 적용하여 모델에 대한 평가를 수행하였다.

추후 연구과제로는 절삭가공의 속도 증감에 따른 불량률 예측모델의 연구가 필요할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] K.H. Kim, J.T. Park, S.K. Park, J.W. Youn, Study on Correlation between the Test Workpiece and Machine Tool Accuracy, Proceedings of KSMTE Autumn Conference, pp.1-5, 2013.

- [2] D.S. Son, A.H. Lee, J.K. Lee, W.Y. Lee, A Study on Accuracy Evaluation Method of High Speed Machining, Proceedings of KMTE Spring Conference, pp.335-340, 2004.
- [3] D.H. Kim, The Method of Machine Tools, Chungmoonkag, Korea, 1994.
- [4] Koulamas, C., and Iakovou, E., Machining economics with interference considerations, Int. J. of Prod. Res., Vol 33, No. 1, pp71-78, 1995.
- [5] Hitomi, P. E., Analysis of optimal machining speeds for automatic manufacturing, Int. J. Prod. Res. Vol 27, No, 12,, pp1685-1691, 1989.
- [6] Okusima, K. and P. E. Hitomi, A study of economic machining : An analysis of the maximum-profit cutting speed, Int. J. Prod. Res., Vol.3, pp73-78, 1964.

박 찬 응(Park, Chan woong)



- 1988년 2월 :한양대학교 산업공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 한양대학교 산업공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 산업경영공학과 교수
- 관심분야 : CIM
- E-Mail : cwpark@gachon.ac.kr