

◆ 특집 ◆ 공작기계의 소비 에너지 저감기술

크리깅 메타모델을 이용한 MQL 밀링공정의 소비전력 예측 연구

Prediction of Consumed Electric Power on a MQL Milling Process using a Kriging Meta-Model

장덕용¹, 정지현¹, 석종원^{1,✉}

Duk-yong Jang¹, Jeehyun Jung¹, and Jongwon Seok^{1,✉}

¹ 중앙대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University)

✉ Corresponding author: seokj@cau.ac.kr, Tel: +82-2-3280-9982

Manuscript received: 2015.2.16. / Revised: 2015.3.17. / Accepted: 2015.3.18.

Energy consumption reduction has become an important key word in manufacturing that can be achieved through the efficient and optimal use of raw materials and natural resources, and minimization of the harmful effects on nature or human society. The successful implementation of this concept can only be possible by considering a product's entire life cycle and even its disposal from the early design stage. To accomplish this idea with milling, minimum quantity lubrication (MQL) strategies and cutting conditions are analyzed through process modeling and experiments. In this study, a model to predict the cutting energy in the milling process is used to find the cutting conditions, which minimize the cutting energy through a Kriging meta-modeling process. The MQL scheme is developed first to reduce the amount of cutting oil and costs used in the cutting process, which is then employed for the entire modeling and experiments.

KEYWORDS: Environmentally conscious manufacturing (환경 친화 가공), Kriging metamodel (크리깅 메타모델), Minimum quantity lubrication (최소량 윤활가공), Cutting energy (절삭 에너지)

기호설명

$\hat{y}(x)$ = Kriging model

$Z(x)$ = local deviation

R = Correlation matrix

θ = Correlation parameter

F_c = Cutting force

E_M = Mechanical energy

E_o = Overall energy

1. 서론

산업사회의 급속한 발전으로 인해 세계적으로 환경문제가 발생하고 있으며, 이를 해결하기 위해 환경규제가 추진되고 있다. 제조업에서도 환경규제가 활발히 추진되고 있으며, 이에 따라 에너지 저감에 대한 관심도 크게 증가하고 있다. 지난 몇 년간, 제조업에서는 정부규제와 국제협약에 의해 환경 친화적인 생산기술이 의무화되고 있다.

따라서, 에너지 저감은 현대 제조 산업의 주요 쟁점으로 떠오르고 있다.¹ 예를 들어, 미국, 일본, 유럽 등 주요국들은 기업의 에너지 절약관리 표준을 정하는 국제 표준화 기구를 도입하기로 합의했다. 이 국제 표준화 기구는 플랜트나 산업시설, 건물 등 에너지를 많이 사용하는 분야에서 에너지 효율을 높일 수 있는 시스템을 정하고 관리하도록 하기 위한 것으로 에너지에 대한 사용 계획, 관리 방법, 에너지 절약 목표 설정, 날짜 분석 등을 표준으로 제시할 전망이다.

에너지 저감과 제조 산업의 환경 규제에 대한 관심이 증가함에 따라, 산업 분야에서 폭넓게 쓰이고 있는 공작 기계에 대한 관심이 증가되고 있다.

본 논문에서는 엔드 밀 공구를 이용한 가공에서 소비되는 에너지 측정하고 이를 예측하는 연구를 수행하였다. 절삭 가공 시 윤활은 공정 비용과 가공물의 표면조도를 고려하였을 때 가장 우수하다고 알려진 MQL기법을 사용하였으며,^{2,3} 측정 변수로는 공구회전속도, 절삭 깊이, 이송속도, MQL유량을 사용하였다.^{4,7} MQL은 압력조절을 통하여 분사되는 유량을 조절하였다. 예비실험을 통하여 안정적인 절삭이 가능한 절삭조건의 범위를 선택하였다. 이때, 비선형성이 강한 모델이나 설계 인자가 많은 문제에서도 비교적 정확한 크리깅 모델을 적용하여 절삭조건의 변화에 따른 소비 에너지를 예측하였다.

2. 크리깅 메타모델

크리깅은 관심 있는 지점에서 특정치를 알기 위해 이미 값을 알고 있는 주위의 값들의 가중 선형조합으로 그 값을 예측하는 통계적 기법이다.⁸ 1989년 Sacks등⁹은 크리깅 모델을 전산실험계획법에 적합하도록 새로운 형태의 크리깅 메타모델을 제시하였다. 크리깅 메타모델은 표본점에서의 응답값을 지나는 대표적인 보간모델로 최우량추정에 의해서 상관변수를 논리적이고 자동적으로 추정하기 때문에 비선형성이 강하고 동일한 입력에 대해 동일한 결과가 계산되므로 최적설계분야에 널리 사용되고 있다.¹⁰

크리깅 메타 모델은 실측데이터의 회귀모델을 구하고, 회귀모델과 실측 데이터 값의 차이를 통계적으로 보정해주는 방식을 사용한다.¹¹ 따라서 모델링할 실제 함수는 식 (1)과 같이 평균에 해당하는 전역모델과 편차항에 해당하는 국부모델의

합으로 표현할 수 있다.¹²

$$y(x) = f(x)^T \beta + Z(x) \tag{1}$$

여기서 $f(x)$ 는 다항함수 벡터이고, β 는 추정해야 할 계수 벡터이다. $Z(x)$ 는 전역적 모형으로부터 생성된 local deviation을 나타내며, 평균이 0이고, 공분산이 식 (2)와 같이 정의되는 확률과정을 통해 구할 수 있다.¹³

$$Cov[Z(x^j), Z(x^k)] = \sigma_z^2 R \tag{2}$$

식 (2)는 실제함수 $y(x)$ 를 평균과 편차로 표현하여 임의의 분포로 가정하는데 σ_z^2 는 임의의 분포로 가정한 실제함수의 분산이며, 일반적으로 정규분포로 가정한다. R 은 n_s 개의 샘플링 된 데이터 x^j 와 x^k 사이에서의 상관관계를 나타내는 상관행렬로 다음과 같이 정의한다.¹⁴

$$R(x^j, x^k) = Exp[-\sum_{i=1}^n \theta_i |x_i^j - x_i^k|^2] \tag{3}$$

$(j = 1, \dots, n_s), (k = 1, \dots, n_s)$

여기서 n 은 설계변수 개수이고, 미지수 θ_i 는 표본점들 간의 상관도를 결정하는 상관변수이다.

크리깅 메타모델에 의한 추정값을 $\hat{y}(x)$ 로 두고 실제응답 $y(x)$ 와 크리깅 메타모델에 의한 추정값 $\hat{y}(x)$ 의 평균제곱오차가 최소가 되도록 하는 $\hat{y}(x)$ 은 다음과 같이 구해진다.¹⁵

$$\hat{y}(x) = f(x)^T \hat{\beta} + r^T(x)R^{-1}(Y - F\hat{\beta}) \tag{4}$$

여기서 $\hat{\beta} = (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} Y$ 이고, F 는 각 원소가 1의 값을 가지는 열벡터이고, $r(x)$ 는 예측점과 표본점들 간의 상관관계를 나타내는 상관벡터이다.

크리깅 메타모델은 식 (4)에서 정의된 모수 y, θ, β 와 편차의 분산 σ_z^2 을 구해야만 구현이 가능하다. 편차의 분산은 일반최소제곱법을 이용하여 n 개의 데이터들로부터 추정된 분산으로 대체할 수 있다.

$$\hat{\sigma}_z^2 = \frac{(Y - F\hat{\beta})R^{-1}(Y - F\hat{\beta})}{n} \tag{5}$$

크리깅 메타모델의 모수는 최우량추정법(MLE: Maximum likelihood function)을 이용하여 구한다.¹⁶ 우도함수(likelihood function)는 다음과 같이 정의된다.¹⁷

$$L = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} \sqrt{|\hat{\sigma}_z^2 R|}} \exp\left(-\frac{(Y - F\hat{\beta})R^{-1}(Y - F\hat{\beta})}{2\hat{\sigma}_z^2}\right) \quad (6)$$

그리고 미지의 모수 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 은 다음 식으로부터 구해진다.

$$\text{maximize } -\frac{[n_s \cdot \ln(\hat{\sigma}_z^2) + \ln|R|]}{2} \quad (7)$$

여기서 $\theta_i (i=1, 2, \dots, n) > 0$ 이다.

3. 윤활 전략 및 절삭 조건

3.1 실험 장치

가공조건에 따라 변하는 소비에너지를 알아보기 위한 실험가공은 밀링 RF-31에서 수행되었다. 절삭 시 발생하는 절삭력은 Piezoelectric type 공구동력계 PCB Piezotronics 241A02를 이용하여 3축 방향의 절삭력을 측정하였으며, 측정된 절삭저항 신호는 charge amplifier를 통해 증폭시키고 A/D converter를 이용하여 2kHz로 추출하여 저장하였다. 또한, 전력계 PPA500을 이용하여 소비 전력을 측정하였다.

본 연구에서 사용한 가공재료는 구조용강으로 많이 사용되는 SM45C를 사용하였으며 직경 12mm의 2날 초경 Flat-end mill로 가공하였다. 엔드 밀을 이용한 절삭 가공에서는 절삭경로 및 가공방법에 따라 여러 종류의 절삭형태가 있다. 본 실험에서는 절삭에너지의 계산을 용이하게 하기 위해 가공 재료를 정면으로 절삭하는 Slot 가공을 선택하였다.

절삭가공에서는 일반적으로 공구회전속도의 증가는 절삭 속도의 증가를 가져와 절삭 시 발생하는 열을 증가시켜 공구수명을 단축시키게 되고, 이송 속도와 절삭 깊이를 증가시키면 가공능률은 증대하지만 공구마모, 파손 등 공구수명의 단축을 가져올 수 있다. 따라서 가공조건의 선택은 가공정밀도, 생산성, 비용 등을 복합적으로 고려하여 선정할 필요가 있다. 공구회전속력, 이송속도, 절삭 깊이 등의 절삭 조건은 공구 제작자의 추천 절삭조건을 참고하고 예비실험을 통하여 안정적인 절삭이 가능한 절삭조건을 실험 목적에 부합되게 선택하였다. 다음은 실험 장치 및 절삭조건을 보여주고 있다.

3.2 절삭력 및 소비전력 측정

절삭력은 공구동력계(PCB Piezotronics 241A02)를 사용하여 측정하였다. 총 절삭력의 크기는 다음과 같이 계산된다.

$$F_C = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (8)$$

여기서 $F_i (i = x, y \text{ and } z)$ 는 i 방향의 절삭력 성분을 나타낸다.

단위 공정 역학적 에너지는 다음과 같다.

$$E_M = \frac{F_C \times D \times \omega \times \pi}{60} \times t_C \quad (9)$$

여기서 E_M 은 역학적 에너지(J)를 나타내며, D 는 공구직경(m), ω 는 공구회전속력(RPM), t_C 는 절삭 시간(s)을 나타낸다.

그리고, overall 에너지는 다음과 같다.

$$E_o = \int_c w dt \quad (10)$$

여기서 E_o 은 overall 에너지(J), w 은 유효전력(W)를 나타낸다.

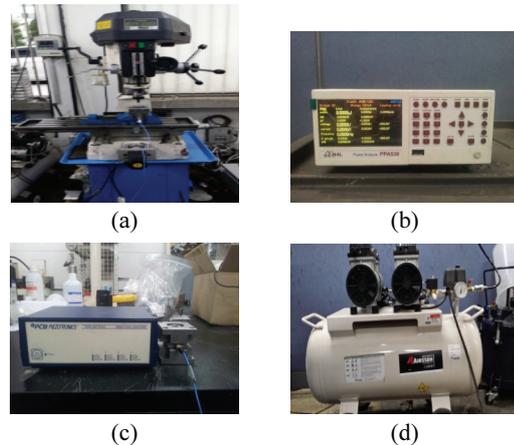


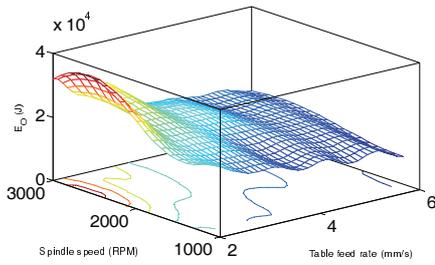
Fig. 1 Experimental equipment (a) Milling machine (b) Wattmeter (c) Force sensor and charge amplifier (d) Compressor

Table 1 Experimental machining conditions

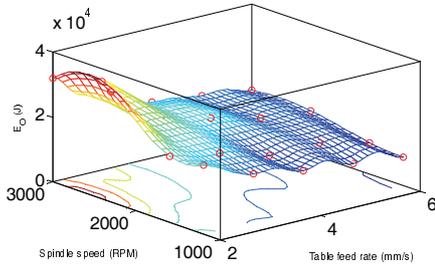
Parameter	Condition
Spindle (RPM)	1200, 1600, 2300, 3000
Depth of cut (mm)	1, 1.5, 2, 2.5
Table feed (mm/s)	2,3,4
Flow rate (mL/min)	2, 12, 30

4. 실험 결과

Fig. 2은 크리깅 메타모델을 통한 소비에너지 예측 결과를 나타낸다. 모델을 검증하기 위해 동일 조건에서 증명실험을 한 결과 오차범위 1% 내외로 크리깅 메타모델의 유의성을 확인하였다.

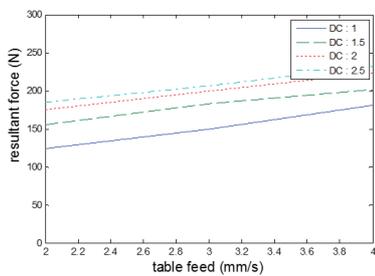


(a) Kriging metamodel

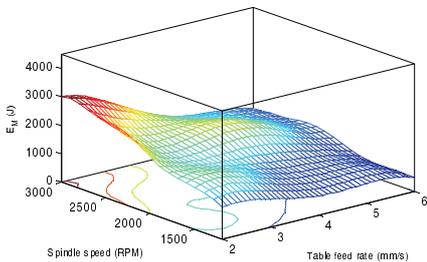


(b) Experimental results

Fig. 2 Prediction of energy consumption



(a)

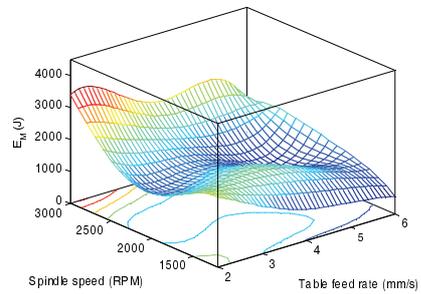


(b)

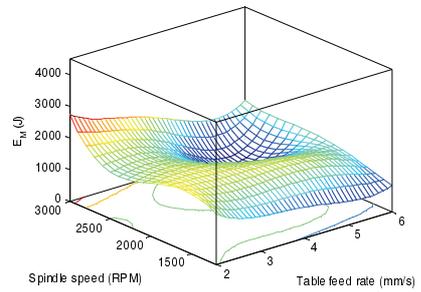
Fig. 3 (a) Cutting force (b) Mechanical energy

Fig. 3은 가공 조건에 따른 절삭력과 역학적 에너지를 나타낸다. 이송 속도가 빠를수록, 절삭 깊이가 깊을수록 절삭력의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 전반적으로 이송 속도가 증가 할수록 역학적 에너지는 감소하는 경향을 보이는데 이는 절삭력 증가량에 비해 절삭하는 부피의 증가량이 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

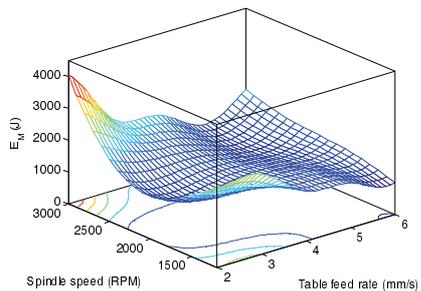
Fig. 4은 절삭 깊이가 1mm 일 때, MQL 유량에 따라 절삭에 참여하는 역학적 에너지의 크기를 보여주고 있다. 공구 회전 속력이 증가함에 따라 MQL 유량에 의한 역학적 에너지의 차이는 미미하다. 따라서 전체적으로 MQL 유량이 역학적 에너지에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.



(a) Flow rate: 2 mL/min



(b) Flow rate: 12 mL/min



(c) Flow rate: 30 mL/min

Fig. 4 Mechanical energy according to the machining process

모든 경우 이송 속도가 4-5 mm/s이고 공구 회전 속력이 2300RPM일 때 단위 공정 역학적 에너지의 크기가 감소하는데, 이는 이 때의 절삭력의 크기가 가장 작아지기 때문이다. 이러한 경향은 다수의 절삭력 측정 실험을 통해 수 차례 확인을 하였는데 이는 피삭재 성질에 따른 고유특성으로 보여진다.

MQL 절삭 공정에서 소비되는 에너지의 크기는 압축기 동력을 포함시켜야 정확한 비교가 가능하다. 압축기의 동력은 10분간 윤활유 공급 시 사용되는 압축기의 소비 전력량을 전력계를 이용하여 측정하고, 이를 실제 절삭 시간 동안 소비되는 전력량으로 환산하여 반영하였다.

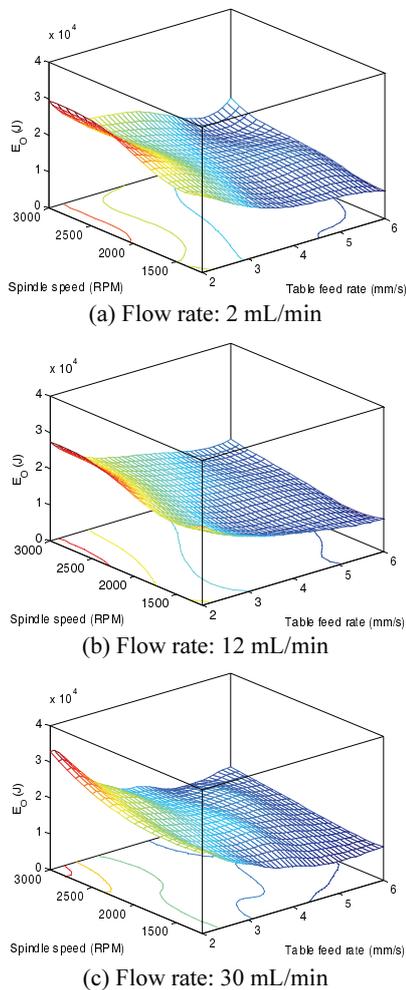


Fig. 5 Overall energy according to the machining process

Fig. 5는 압축기의 동력이 포함된 Overall energy를 나타낸다. 압축기 동력을 포함시킨 Overall energy의 크기는 이송 속도가 낮을수록, 공구 회전 속력이 높을수록 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 동일 공구 회전 속력인 경우에는 이송 속도를 빠르게 해주면 에너지 소비를 줄일 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 엔드 밀 공구를 이용한 가공에서 소비되는 에너지 측정하고 크리깅 메타모델을 이용하여 소비에너지를 예측하는 연구를 수행하였다. 공구회전속력, 절삭 깊이, 이송속도, MQL 유량의 변화에 따른 소비에너지를 측정하였고 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 크리깅 메타모델을 통해 소비에너지를 예측한 결과 공구 회전 속력이 증가함에 따라 MQL 유량에 의한 역학적 에너지의 차이는 줄어들었다. 따라서 전체적으로 MQL 유량이 역학적 에너지에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

(2) 이송 속도가 증가 할수록 역학적 에너지는 감소하는 경향을 보이는데 이는 에너지 증가량에 비해 절삭하는 부피의 증가량이 더 크기 때문이다. 압축기 동력을 포함시킨 Overall energy의 크기는 이송 속도가 낮을수록, 공구 회전 속력이 높을수록 증가하는 것을 알 수 있다. 역학적 에너지와 비교했을 때 그 차이는 더욱 두드러지는 것을 알 수 있다. 이는 절삭시간의 단축으로 인해 압축기에 소비되는 에너지가 감소했기 때문으로 판단된다. 따라서 동일 공구 회전 속력인 경우에는 이송 속도를 빠르게 해주면 에너지 소비를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상 자원부 및 한국산업기술평가 관리원의 산업융합원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [10042651, 에너지 소비량 10% 이상 저감된 5축 머시닝센터 기발 복합가공기 개발]

REFERENCES

1. Kuram, E., Ozcelik, B., Bayramoglu, M., Demirbas, E., and Simsek, B. T., "Optimization of Cutting Fluids and Cutting Parameters during End Milling by

- using D-Optimal Design of Experiments,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 42, pp. 159-166, 2013.
2. Gaitonde, V., Karnik, S., and Davim, J. P., “Selection of Optimal MQL and Cutting Conditions for Enhancing Machinability in Turning of Brass,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 204, No. 1, pp. 459-464, 2008.
 3. Iqbal, A., Ning, H., Khan, I., Liang, L., and Dar, N. U., “Modeling the Effects of Cutting Parameters in Mql-Employed Finish Hard-Milling Process using D-Optimal Method,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199, No. 1, pp. 379-390, 2008.
 4. Reddy, N. S. K. and Rao, P. V., “Experimental Investigation to Study the Effect of Solid Lubricants on Cutting Forces and Surface Quality in End Milling,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 2, pp. 189-198, 2006.
 5. Deshpande, A., Snyder, J., and Scherrer, D., “Feature Level Energy Assessments for Discrete Part Manufacturing,” *Proc. of the NAMRI/SME*, Vol. 39, 2011.
 6. Vijayaraghavan, A. and Dornfeld, D., “Automated Energy Monitoring of Machine Tools,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 21-24, 2010.
 7. Hanafi, I., Khamlichi, A., Cabrera, F. M., Almansa, E., and Jabbouri, A., “Optimization of Cutting Conditions for Sustainable Machining of PEEK-CF30 using TiN Tools,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 33, pp. 1-9, 2012.
 8. Simpson, T. W., Mauery, T. M., Korte, J. J., and Mistree, F., “Kriging Models for Global Approximation in Simulation-Based Multidisciplinary Design Optimization,” *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 12, pp. 2233-2241, 2001.
 9. Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J., and Wynn, H. P., “Design and Analysis of Computer Experiments,” *Statistical Science*, Vol. 4, No. 4, pp. 409-423, 1989.
 10. Koehler, J. and Owen, A., “Computer Experiments,” *Handbook of Statistics*, Vol. 13, pp. 261-308, 1996.
 11. Li, M., Li, G., and Azarm, S., “A Kriging Metamodel Assisted Multi-Objective Genetic Algorithm for Design Optimization,” *Journal of Mechanical Design*, Vol. 130, No. 3, Paper No. 031401, 2008.
 12. Cho, T.-M., Ju, B.-H., Jung, D.-H., and Lee, B.-C., “Reliability Estimation using Two-Staged Kriging Metamodel and Genetic Algorithm,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 30, No. 9, pp. 1116-1123, 2006.
 13. Mitchell, T. J. and Morris, M. D., “The Spatial Correlation Function Approach to Response Surface Estimation,” *Proc. of the 24th Conference on Winter Simulation*, pp. 565-571, 1992.
 14. Cox, D. D., Park, J. J., and Singer, C. E., “A Statistical Method for Turning a Computer Code to a Data Base,” *Computational Statistics & Data Analysis*, Vol. 37, No. 1, pp. 77-92, 2001.
 15. Lee, T., Lee, C., and Lee, K., “Shape Optimization of a CRT based on Response Surface and Kriging Metamodels,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 27, No. 3, pp. 381-386, 2003.
 16. Lee, T. H. and Jung, J. J., “Generalized Kriging Model for Interpolation and Regression,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 29, No. 2, pp. 277-283, 2005.