

신경회로망에 의한 마찰상태의 식별

조연상(동아대원), 서영백(동아대 생산기술연구소), 박홍식, 전태옥(동아대)

Identification of Friction Condition with Neural Network

Y. S. Cho, Y. B. Seo, H. S. Park, T. O. Jun

Abstract - The morphologies of the wear debris are directly indicative of wear processes occurring in machinery and their severity. The neural network was applied to identify friction condition from the lubricated moving system. The four parameter(50% volumetric diameter, aspect, roundness and reflectivity) of wear debris are used as inputs to the network and learned the friction coefficient. It is shown that identification results depend on the ranges of these shape parameter learned. The three kinds of the wear debris had a different pattern characteristic and recognized the friction condition and materials very well by neural network. We discuss between the characteristic of wear debris and the friction coefficient and how the network determines difference in wear debris feature.

Key Words : Wear debris, Shape parameter, Friction coefficient, Neural network

1. 서 론

기계구동계의 고장을 지배하는 요인은 대부분의 경우 그 구동계의 윤활운동면을 구성하는 베어링, 슬라이더, 윤활안내면 및 각종 기어류 등에서 발생하는 마멸분에 기인되고 있다. 따라서 마찰·마멸상태의 변화에 따른 마멸분의 형태적 특징에 대한 해석이 가능해 지게 되면 직접적인 관찰 및 측정이 곤란한 구동계의 마찰·마멸상태 진단 및 손상상태 조기 감지에 큰 실마리를 제공해 줄 수 있다고 생각된다.⁽¹⁾

그러나 화상처리 기술과 컴퓨터의 이용에 의하여 마멸분의 형태나 크기의 정량적인 데이터를 용이하게 얻을 수 있는 지금에 있어서도 그 데이터를 사용하는 방법은 아직도 정성적이고 또한 산업계에서 마멸

입자에 대한 적용은 그다지 인식되지 않고 있다. 이의 주된 이유는 이들 방법들의 효과적인 이용을 위해서는 마멸분의 조사에 전문가의 지식이 요구되어지고, 또한 시간 및 비용에 있어 항상 효과적이지 못하였기 때문이다. 이를 위하여 작동중에 있는 윤활구동계의 condition monitoring을 목적으로 윤활유중에 포함되어 있는 마멸분 형태의 관찰과 해석이 종래부터 행하여져 왔다.^(2~3) 이것은 내과의 혈액검사와 같이 소량의 기름을 채취하여 조사하는 것으로 간편한 것이지만 직접 보는 것이 곤란한 트라이보 손상 상황을 알기 위하여 극히 유효한 수단이라 하겠다.

Roylance⁽⁴⁾는 마멸분 화상해석의 자동화와 그것에 기초한 작동상태 진단에 관한 연구를 진행하였지만 정상마멸, 중마멸(severe wear) 및 연삭마멸(abrasive wear)

) 등 다양한 마멸기구의 범주로서 마멸분의 형상 파라미터 값의 범위를 표시하는데 지나지 않고 있다. 이것은 혈액검사에 비하면 상세한 분석 데이터로 부터 단순히 그 사람의 건강이 어떠한가를 판정하는 것과 같다고 하겠다. 한편 응용기술로서 실용화하고 있는 ferrography⁽⁵⁾에 있어서도 분석결과로 부터 작동상태의 이상유무를 판정하기 위해서는 대상으로 하는 기계윤활 구동계를 숙지한 담당자의 풍부한 경험과 느낌이 더욱 절실히 요구되고 있다.

또한, 필자들은 기유에서 기계요소 재료들의 윤활실험을 통하여 발생된 마멸입자들을 화학처리하여 해석하고 화상해석으로 얻은 마멸분 데이터의 형태 파라미터를 이용하여 이를 작동조건 판정에 활용하려고 시도한 바 있다.⁽⁶⁻⁷⁾

이처럼 윤활구동계에서 발생하는 마멸분의 정량적인 형태정보와 이에 대한 해석을 그 구동계의 마찰상태 진단기술에 이용하기 위해서는 윤활구동계에서 발생하는 마멸분의 특징과 마찰과 관련되는 이들과의 인과관계를 고려한 마멸분 데이터정보에 대한 정리방법의 확립이 절실히 필요하다고 생각된다.

따라서, 본 연구에서는 기유를 사용한 윤활실험을 통하여 마멸분의 형태 파라미터와 마찰계수와의 관계를 정리하고, 신경 회로망을 이용하여 마멸분의 형태 파라미터로부터 마찰상태에 따른 마찰계수를 식별·추정하므로써 윤활구동계의 마찰·마멸상태의 진단에 활용하고자 함을 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2-1 윤활마찰실험

본 연구에 사용한 실험재료로서 pin 시험편은 직경 5.0mm의 베어링鋼球 STB2 (780Hv)를, disk 시험편으로 경도가 다른 3종류의 강 즉, 기계구조용 탄소강 SM45C (200Hv), 스테인레스강 STS304(190Hv) 및 금형용강 SKD11(780Hv)을 사용하였다. disk의 형상은 직경 50mm, 두께 10mm이고, emery paper #1200 으로 정밀 연마하여 그 표면 조도를 0.2 μmRmax 로 일정하게 하였으며, 또한 윤활유는 기유인 파라핀(paraffine)계 광유(8.2cSt @40°C)를 사용하였다.

실험장치는 pin-on-disk형 마찰·마멸시험기에 의하여 윤활마찰 실험하였으며, 이것은 회전하는 disk 시험편에 베어링 강구를 압착시켜 마찰하는 것으로 이의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

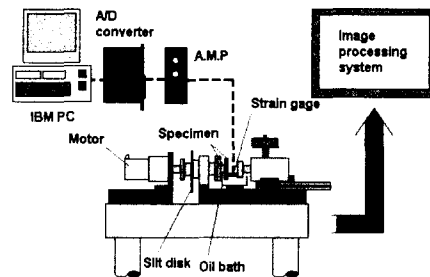


Fig.1 Schematic diagram of pin on disk type test

Table 1. Experimental condition

Disk	Load (kg)	Sliding distance (m)
SM45C	7, 10, 14	78, 156, 234
STS304	7, 10, 14	78, 156, 234
SKD11	7, 10, 14	78, 156, 234

마찰·마멸시험기의 모터는 무접점 속도

제어 모터로서 여기에 감속기어를 부착시켜 그 미끄럼속도를 7.23mm/sec로 일정하게 하였고, 접촉하중은 Table 1에서 보는 바와같이 7kg, 10kg 및 14kg의 3단계로 설정하였다. 또한 미끄럼거리는 3종류 시험편 모두 0~234m(실험시간 총 9시간)까지로 일정하게 하고, 이를 세분화하여 3시간씩 나눈 0~78m, 78~156m 및 156~234m를 미끄럼거리 초기, 중기 및 말기로 구분하여 이들의 마멸분을 채취하였다. 그리고 윤활장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로써 silicon tube를 통하여 시험편 접촉점에 滴下시켰으며, 마멸분은 oil bath 내의 윤활유를 각반 한 후 孔径 0.45 μ m의 membrane filter가 부착된 윤활유 채취기구를 통하여 마멸분을 채취하였다. 그리고 마찰상태에 따른 마찰계수는 편 시험편 홀더에 스트레인 게이지를 부착하여 이 때 발생하는 마찰력을 strain amplifier를 통하여 증폭시킨 후, 컴퓨터에 장착된 A/D converter를 사용하여 디지털로 변환하여 자체 개발한 마찰계수 측정 프로그램을 통하여 측정하였다. Fig.2 는 미끄럼거리(마

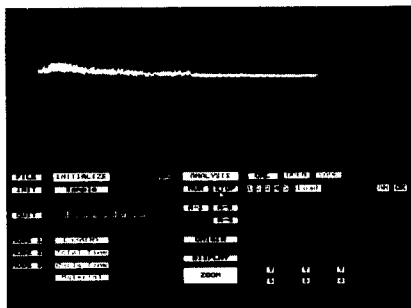


Fig. 2 Program of friction coefficient measurement

찰시간)에 따른 마찰계수의 변화과정을 나

타낸 것으로 이 화면을 통하여 본 연구에서 설정한 마찰조건, 데이터 획득시간 및 현재의 마찰시간(미끄럼거리)을 한 눈에 알 수 있으며, 이의 결과는 메모리에 저장된다.

2-2 형태 parameter의 화상해석

실험조건 별로 채취한 마멸분의 data 정보를 얻기 위하여 화상처리 시스템⁽⁶⁾을 사용하였다. 화상처리 시스템의 광학현미경은 투과조명 및 낙사조명의 2가지 할로겐 램프를 가지며 관측된 화상은 상부의 color CCD카메라에 의하여 PC의 frame grabber에 저장된다. 본 연구에 사용한 frame grabber는 화소수 640x480, 화소당 분해능은 RGB 각 8 bit(256 grey level)이고, 정방형 1 화소(pixel)의 길이는 0.426 μ m이다. 이것은 마멸분 채취부분의 filter 직경이 35mm인 것을 고려하면 모니터 1 화면의 면적은 filter의 17,302분의 1이 된다. 각 실험 조건은 모두 대물렌즈 40배, 대안 렌즈 10배로서 filter내의 랜덤한 위치 50 화면에 포함된 10화소(1.81 μ m)이상되는 마멸분에 대하여 이들의 parameter를 계산하였다. 그리고 frame grabber의 제어 및 데이터의 처리는 모두 C 프로그램(일부는 기계어)에 의하여 행하였다.

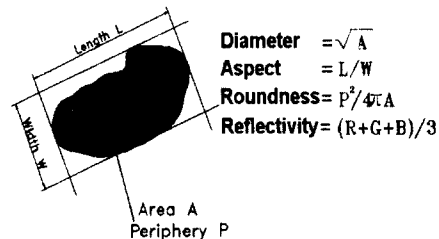


Fig. 3 Shape parameter of wear particle

또한, 신경회로망에 의한 마찰계수의 추

정을 위하여 화상처리한 데이터정보(입자 둘레, 크기, 면적, 입자수 및 색정보)로부터 마멸분 입자의 4 가지 형태 파라미터를 Fig.3과 같이 정의하였으며, 이것은 대표경, 장단도 복잡도, 및 광택도이다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 마찰조건에 따른 마찰계수

Fig.4은 기유에서 STS304의 작용하중 7kg에서의 실험완료 시간(미끄럼거리 0~234m)까지의 마찰계수 μ 의 진행과정을 나타내었다. 그림에서 마찰시간 약 4시간까지는 μ 의 변화가 심하게 보이지만 그 이후의 미끄럼거리 부터는 안정된 마찰이 진행되고 있는 것을 알 수 있다. 이는

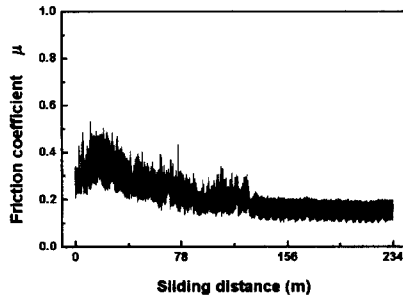


Fig. 4 Image of friction coefficient

마찰초기에는 실제 접촉점에서 직접접촉에 의한 응착 및 연삭마멸이 지배적으로 작용하여 마찰계수가 크게 상승하지만, 마찰반복회수의 증가와 함께 마찰면의 온도상승에 의한 산화 및 전단강도의 저하로 마찰계수는 서서히 감소하여 점차 안정된 마찰이 진행되어진다고 생각한다. 따라서, 본 연구에서는 마찰계수의 변화가 심한 초기 마멸 영역에서의 마찰계수보다는 안정된 마찰이 진행되는 미끄럼거리 말기의 마찰

계수 데이터를 평균하여 나타내는 것이 마찰조건에 따른 마찰계수의 변화를 쉽게 알 수 있을 것이라고 생각한다.

Fig.5는 안정된 마찰을 보이는 미끄럼 말기에서 SM45C, STS304 및 SKD11의 작용하중에 따른 평균마찰계수 μ 를 나타낸 것이다. 그림에서 3종류의 시험편 재료 모두 작용하중이 증가할수록 μ 는 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 작용하중의 증가에 따른 μ 의 변화에서 재료와는 관계없이 μ 가 모두 감소하는 것은 윤활유 급유부인 pin과 disk에 접촉점에 도입될 때 급유시의 윤활유 보다 작용하중의 증가에 따라 윤활유 분자의 전단응력이 증가하게 되고 또한 전단방향으로 배향하기 쉽게 되기 때문이라고 생각된다. 그리고 STS304에서의 μ 의 변화가 다른 두 재료에 비하여 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 STS304의 조직이 불안정한 오스테나이트 조직이기 때문에 하중이 증가함에 따라 실제접촉부의 전단강도의 감소가 다른 두 재료에 비하여 크게 나타나기 때문이라고 생각되어진다.

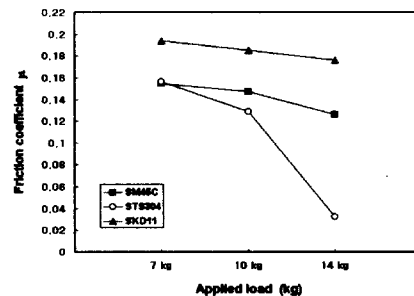


Fig. 5 Effect of sliding distance on the friction coefficient

3-2 마멸분의 형태 파라미터 특징과 마찰계수

본 연구에서 각 마찰조건에 따른 마멸분 하나하나의 파라미터 값으로는 마찰조건 변화에 대한 마멸분의 형태적 특징을 직접적으로 판단하기 곤란하므로, 각 조건에 따른 마멸분의 형태적 특징을 명확히 식별하기 위하여 전체 마멸분의 평균 파라미터 값 등과 같은 집단으로의 성질을 이용할 필요가 있다.

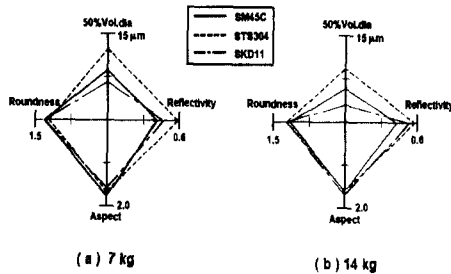


Fig. 6 Diagram of average value of shape parameters, sliding distance : 156~234m

Fig. 6은 미끄럼거리 말기(156~234m)에서 작용하중 (a) 7kg과 (b) 14kg 일 때, 3가지 시험편의 4가지 형태 파라미터의 평균치를 간략화하여 나타낸 선도이다. 이 선도를 통하여 마멸분의 형태적 특징을 살펴보면, 하중에 관계 없이 STS304의 입자의 크기가 다른 두 재료에 비해 큰 것을 알 수가 있다. 또한 광택도에 있어서도 STS304의 값이 모두 높게 나타나고 있다. 이는 STS304에 함유되어 있는 내식성 원소인 Cr의 영향이 지배적으로 작용했기 때문이라고 생각되어진다. 또한, 하중이 증가함에 따라 모든 재료의 입자의 크기가 현저히 감소되고 그 형상도 둥글게 나타나는 것을 볼 수가 있다.

Fig. 7은 각 하중에서 재료에 따른 마찰계수와 (a) 50%체적경과 (b) 광택도의 평

균치와의 관계를 나타낸 것이다. (a) 50% 체적경에서 보면, 각 재료에서의 마찰계수의 값이 작을수록 마멸분의 크기가 대체로 작아짐을 알 수가 있으며, SKD11의 마찰계수의 값이 다른 두재료에 비해 크고 입자의 크기는 작은 것을 볼 수가 있다. 이는 SKD11의 경도(780Hv)가 다른 두 재료보다 크기 때문에 입자의 크기가 작고, 점

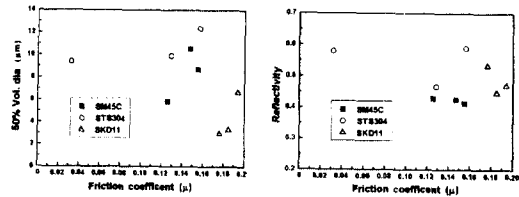


Fig. 7 Relation of shape parameter and friction coefficient

촉점에서 온도가 크기 때문에 마찰계수의 값이 높게 나타난다고 생각되어진다. 그리고 (b) 광택도에서 SM45C와 SKD11의 경우 마찰계수가 높을수록 광택도의 값이 다소 낮게 나타나는 것을 볼 수가 있다. 이는 마찰계수의 값이 높을 때 마찰면에서의 온도상승으로 인한 산화의 영향이라고 생각되어진다.

이러한 결과에서 재료에 따른 마찰계수와 마멸분의 형태적 특징사이의 관계를 명확히 구분할 수 있으며, 마멸분의 형태적 특징을 이용하여 신경회로망에 학습시키므로써 윤활구동계 내의 마찰계수를 추정할 수 있을 것이라고 생각되어진다.

3-3 신경회로망에 의한 마멸찰계수의 추정

Fig. 3에 표시한 4가지의 형태 파라미터는 마멸분이 발생한 마찰조건에 따라 각각

다르므로 이들 다차원 형태 파라미터의 분포만으로는 마멸분의 형태특징을 명확히 식별하기는 무척 곤란하다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 이와같은 다차원의 입력에 대한 마멸분의 패턴(pattern) 인식을 행하기 위하여 오차역전파학습(back propagation)⁽⁸⁾에 기초한 계층형 인공 신경회로망에 의한 형태 파라미터의 학습 및 판정을 통하여 윤활구동계의 마찰계수를 추정하였다.

신경회로망은 계층형 네트워크로 구성되어 있으며, 각층의 처리 유닛은 신경세포(neuron)를 모의한 것으로서, 앞층의 입력치 $y_j^1(j=0 \sim n_1)$ 와 유닛간의 결합강도를 표시하는 가중치 w_{jk}^2 에 의한 가중치의 총합인 x_k^2 를 계산하고 시그모이드(sigmoid) 함수 f 에 의하여 유닛의 활성화 값 $y_k^2=f(x_k^2)$ 을 구하여 다음 층으로 출력한다. 또한 가중치를 보다 양호한 값으로 하기 위하여 네트워크는 감독학습법으로 학습을 행한다. 이 학습을 가능하게 하는 것이 오차역전파학습이고, 출력된 값의 목표 출력값에 대한 오차에 의하여 각 유닛의 가중치가 차례로 수정된다.

본 연구에 사용한 신경회로망은 Fig. 8에서와 같이 모두 3층으로서 은닉층은 1층이고, 그 유닛 수는 10으로 하였다. 또한

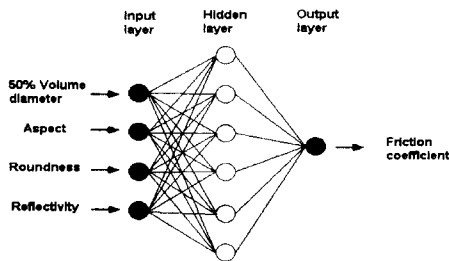


Fig. 8 Diagram of neural network

신경회로망의 입력값으로서 4가지의 마멸분 형태 파라미터를 입력 데이터로 하고, 목표 출력값으로서 마찰조건에 따른 마찰계수를 설정하였다. 그리고 마멸분의 형태 파라미터 전체평균값 또는 마멸분의 데이터를 두 부류로 나누어 두 개의 평균값으로 학습을 행하였으며, 학습 수렴판정 조건으로써 총오차(Total error) 0.0001 이하 또는 학습 반복회수 30,000회 이하로 하였다. 판정은 400개 마다의 마멸분의 형태 파라미터 평균값을 입력하여 출력된 값을 평균하여 마찰계수를 추정하여 나타내도록 하였다.

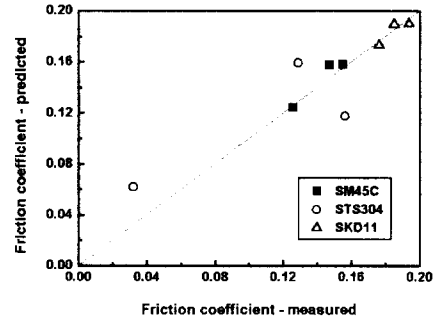


Fig. 9 Value measured and predicted friction coefficient ; average value of all shape parameter

Fig. 9은 마멸분 형태 파라미터의 전체 평균값으로 학습을 하여 추정한 마찰계수의 값과 실제 측정된 마찰계수의 값을 나타낸 것이다. 그림에서 STS304의 경우는 다른 재료에서의 추정값과 실측값의 오차에 비해 다소 오차가 크게 나타나지만, 전체적으로는 양호한 결과를 보여주고 있다. 이 결과로 볼 때, 화상해석으로부터 얻어진 마멸분의 형태 파라미터 데이터를 계층형 신경회로망에 학습하여 그 상태를 추정하는 방법은 직접적으로 측정이 곤란한 기

계구동계의 마찰 상태를 진단하기 위한 유효한 수단이라고 생각되어진다.

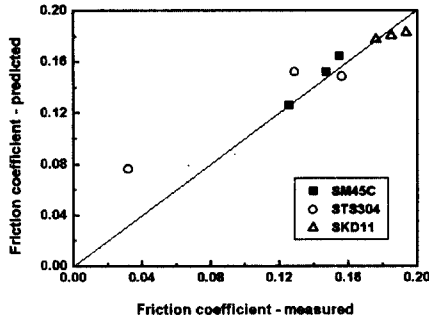


Fig. 10 Value measured and predicted friction coefficient ; 2 average value of 2 classes of shape parameter

Fig. 10은 학습 데이터로써 마멸분 데이터를 두 부류로 나누어 복수의 형태 파라미터 평균값으로 학습하여 추정된 마찰계수의 값과 실제 측정된 마찰계수의 값을 나타낸 것이다. Fig. 10에서의 결과와 비교해 볼 때, STS304에서의 마찰계수 추정값이 어느정도 향상되었음을 볼 수가 있다. 이는 마멸분 형태 파라미터의 전체 평균값으로 학습하였을 때보다 두 부류의 복수의 평균값으로 학습을 행하는 것이 신경회로망으로 추정하기 곤란한 상황에서 판정의 분포범위를 넓게하여 신경회로망으로부터의 반응을 좀더 유연하게 하기 때문이라고 생각되어진다.

이상과 같이 마멸분의 형태와 마찰상태와의 사이에 명확한 관계가 있을 경우에 마멸분의 형태 파라미터로부터 마찰계수의 추정이 가능하였다. 그리고 여기에서 더 나아가 본 연구에서는 고려하지않은 시간에 따른 누적 마멸량과의 관계 등을 병행하여 적용하면 실제 기계구동계에서의 마

찰상태 및 고장 예측·진단의 모니터링이 가능하리라고 예상되어진다.

4. 결론

윤활구동계의 마찰·마멸상태의 식별 및 진단을 목적으로 각 작동조건에 따른 마멸분의 4가지 형태 파라미터(50%체적경, 장단도, 복잡도 및 광택도)를 화상처리하여 마찰상태에 따른 마멸분의 특징을 해석하고, 마멸분의 형태적 특징과 마찰계수와의 관계를 계층형 신경회로망에 학습시켜 마찰계수를 추정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 윤활마찰 실험에서 재료의 경도가 높을수록 접촉점에서의 전단강도 증가로 마찰계수는 증가하고, 작용하중의 증가에 따라 윤활유의 작용으로 마찰계수는 감소한다.
2. 3종류 강 of 윤활유중의 실험에서 작동조건에 따른 마멸분의 형태적 특징에는 분명한 차이가 있고, 이들 정확한 형태 특징을 알기 위하여 마멸분의 집단으로서의 성질인 평균치를 이용하는 것이 작동조건에 따른 마멸분의 형태 해석에 유효하다.
3. 마멸분의 형태적 특징과 마찰계수와의 관계를 명확히 구분할 수 있으며, 이러한 관계를 계층형 인공신경회로망에 학습시키므로써 마찰계수를 추정할 수 있었다.
4. 복수의 평균값으로 학습을 행하는 것이 신경회로망으로 추정하기 곤란한 상황에서 판정의 분포범위를 넓게하여 신경회로망으로부터의 마찰계수 추정이 향상되었다.

5. 참고문헌

1. A. D. H. Thomas, T. Davies and A. R. Luxmoore, "Computer Image Analysis for Identification of Wear Particles", *Wear*, 142, pp. 213~226, 1991.
2. 木村好次, "メンテナンス・トライボロジ-の現状と問題", *トライボロジスト*, 第39巻, 第7號, pp. 553~558, 1994.
3. B. J. Roylance and S. Raadnui, "The Morphological Attributes of Wear Particles - Their Role in Identifying Wear Mechanisms", *Wear*, 175, pp. 115~121, 1994.
4. B. J. Roylance, I. A. Albidewi, M. S. Laghari, "Computer-Aided Vision Engineering (CAVE) - Quantification of Wear Particle Morphology", *Lubr. Eng*, 50, pp. 111~116, 1993.
5. T. B. Kirk, G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor "Factual Parameters and Computer Image Analysis applied to Wear Particles isolated by Ferrography" *Wear*, 145, pp. 347~365, 1991.
6. 박홍식, 전태욱, 서영백, 김형자, "화상 처리에 의한 기계윤활운동면의 마멸분 형태해석", *한국윤활학회지*, 제12권, 제3호, pp. 72~78, 1996.
7. 박홍식, 서영백, 조연상, "신경회로망 모델을 이용한 기계윤활면의 마멸분 형태식별", *한국정밀공학회지*, 제15권, 제3호, pp. 133~140, 1998.
8. 中野 馨, "Cでつくる腦の情報システム", 啓學出版, pp. 11~152, 1990.