

<論 文>

AE를 이용한 로봇그립퍼에서 접촉과 미끄러짐 감시

최기상 · 최기흥
(1994년 8월 27일 접수)

Detection of Contact and Slip in Robot Grippers Using Acoustic Emission

Gi Sang Choi and Gi Heung Choi

Key Words: Acoustic Emission(어쿠스틱에미션), Robot Manipulator(로봇매니퓰레이터), Gripper(그립퍼), Tactile Sensor(접촉센서)

Abstract

The feasibility of using AE for detecting contact and slip between a workpiece and an end effector has been tested. Specifically, the relationship between the contact and slip motion and the characteristics of the AE signal is theoretically and experimentally investigated. The experimental results manifest that the high sensitivity of AE signal to the contact and slip makes it a good alternative as a robot tactile sensor.

기 호 설 명

- A_s : 미끄러짐마찰이 일어나는 면적
- b : Burgers 백터의 크기
- C_1, C_2 : 비례상수
- E, \dot{E} : AE 에너지, 단위시간당 AE 에너지
- n : 두 접촉면 사이의 압력
- u : 두 접촉면 사이의 미끄러짐속도
- V : 소성변형이 일어나는 체적
- \bar{v} : 디스로케이션의 평균속도
- $\dot{W} = \dot{W}_1 + \dot{W}_2$
- \dot{W}_1 : 접촉마찰에 의한 일률
- \dot{W}_2 : 미끄러짐마찰에 의한 일률
- \bar{x} : 디스로케이션의 평균이동거리
- $\epsilon_{ij}, \bar{\epsilon}$: 변형률, 유효변형률
- μ : 마찰계수
- ρ_m : 디스로케이션의 밀도
- $\sigma_{ij}, \bar{\sigma}$: 응력, 유효응력

1. 서 론

현재 로봇은 생산현장에서 정해진 일들을 프로그램에 따라 행하는 수준에 머물고 있으나 이동성이 있으며 오퍼레이터없이 스스로 상황을 판단해서 동작하는 지능형 로봇을 개발하려는 연구들이 진행되고 있으며, 이러한 경향에 비례해서 각종 센서의 개발이 대단히 중요하게 되었다. 일반적으로 로봇 센서는 로봇의 상태를 측정하기 위한 것과 외부환경 및 외부환경과 로봇의 상호작용을 측정하기 위한 것으로 나눌 수 있는데 후자는 다시 비접촉센서와 접촉센서로 대별할 수 있다.

비접촉센서의 대표적인 것은 비전센서로서 로봇 센서의 연구에서 비전시스템이 가장 큰 비중을 차지해 왔고 실용화에서도 큰 진척을 보여왔다. 그러나 주위 환경에 대한 중요한 정보원으로 촉각이 있기 때문에 생체가 용이하게 사물을 인식하고 조작할 수 있다는 점을 고려하면, 생체의 기능과 역할을 모방하는 것을 궁극의 목표로 하는 로봇시스템

*정회원, 서울시립대학교 제어계측공학과

**정회원, 고등기술연구원 생산기술연구실

에서 시각이나 청각뿐 아니라 촉각센서의 개발도 대단히 중요하다. 로봇매니퓰레이터의 촉각센서 중에서 가장 잘 상용화된 것은 손목관절에 설치되어서 엔드 이펙터에 작용하는 3개의 힘과 3개의 고멘트 성분들을 동시 측정할 수 있는 힘/토크 센서(wrist force/torque sensor)이다. 이 밖에 flexible membrane 방법, piezoresistive material 방법, electro-optical 방법 그리고 vibration 방법^(1~14) 등을 이용한 여러 종류의 격자형 접촉센서들이 연구개발되어서 공작물의 무게, 온도, 열특성, 표면조도, 전기저항뿐 아니라 위치, 방향, 크기 그리고 형상 등을 인식하는데 사용된 바 있다.⁽¹⁰⁾ 그러나 이러한 방법들은 대개 적용될 수 있는 범위가 넓지 못하고, 큰 부피를 갖기 때문에 엔드 이펙터에 장착하기 어려우며, 기계적으로 취약해서 손상을 입기 쉬우며, 작은 상대운동에 대해서는 비교적 감도가 낮고, 또 대단히 많은 양의 신호처리를 요한다는 등의 단점들을 갖고 있는 경우가 많아서 실제로 적용하기에는 어려움이 있었다.

AE(acoustic emission)는 고체내에서 변형에너지(strain energy)가 소성변형, 파괴 혹은 상변화 등에 의해 급속하게 방출될 때 발생하는 높은 주파수(50 kHz~1 MHz 정도)의 미세한 응력파(stress wave)이다. AE는 국지적인 현상이지만 AE가 발생하면 응력과 변형도의 동적인 변화를 일으키면서 고체를 통해 전파되며 고체표면에 설치된 압전센서에 의해 감지될 수 있다. 이러한 AE 현상은 비파괴검사에서 결함부위를 찾아내는데 이용되어 왔으며, 또한 최근에 절삭을 비롯한 여러 생산공정의 감시와 해석에 이용된 바 있다.^(15~21)

본 연구에서는 AE 신호를 로봇매니퓰레이터에서 그립퍼와 공작물 사이의 접촉과 미끄러짐의 감시에 이용하는데 그 주된 이유는 AE 신호가 접촉과 미끄러짐에 대해 감도가 매우 높다는 점과 그 주파수 대역이 로봇매니퓰레이터의 기계적 진동은 물론, 대다수 주변 잡음의 주파수 대역보다도 훨씬 높기 때문에 간단한 고역통과 필터를 사용함으로써 공장 환경에서 불가피하게 많이 발생하는 잡음의 영향을 손쉽게 배제할 수 있다는 점이다. 또한, AE 신호를 이용하는 것은 일종의 간접적인 감시 방식으로 다른 접촉 및 미끄러짐 감시센서와 달리 센서가 공작물과 직접 접촉하지 않아도 되므로 센서 자체의 마손이 없고 로봇의 작업에 지장을 초래하지 않으면서 실시간에서 감시할 수 있기 때문이기도 하다.

또 AE 센서는 압전현상을 이용한 것으로서 구조가 간단하며, 크기도 작고, 가격도 비교적 저렴하므로 실용화가 용이하다.

AE를 접촉감지의 목적으로 이용한 것은 Dornfeld와 Cai⁽¹⁶⁾가 연삭공정에 적용한 것이 처음이며, 그 후 Masaki⁽¹⁹⁾는 디버링(deburring)에서 공구와 공작물의 접촉을 감지하기 위하여 AE를 이용한 바 있다. 그는 AE 방법이 디버링공구와 공작물의 접촉의 감지에 매우 신뢰성있는 방법임을 보였다. 로봇매니퓰레이터의 작업을 자동화하기 위하여는 그립퍼와 공작물의 접촉의 감지가 대단히 중요하며, 더 나아가 접촉하는 물체의 물성, 접촉하는 면의 기하학적 특성, 접촉력의 크기 등을 인식할 수 있어야 할 것이다.

로봇그립퍼는 공작물이 미끄러지지 않게 안정된 장악을 할 수 있어야 한다. 생산라인에서 로봇매니퓰레이터들은 많은 경우에 있어서 원통형 혹은 구형의 공작물을 다루게 되는데 특히 이런 공작물들의 경우 그립퍼와 선접촉 혹은 점접촉을 이루므로 그립퍼의 압력이 낮을때나 로봇매니퓰레이터가 큰 속도와 가속도로 움직일 때 미끄러짐이 생길 수 있다. 오퍼레이터없이 자동으로 동작하는 지능형 로봇매니퓰레이터는 이러한 그립퍼와 공작물 사이의 미끄러짐을 자동으로 감지해서 불안정한 상황에서 안정한 상황으로 회복할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 AE의 로봇그립퍼와 공작물 사이의 접촉과 미끄러짐의 감시에의 응용 가능성을 연구한다. AE를 이용해 로봇매니퓰레이터의 그립퍼와 공작물 사이의 접촉과 미끄러짐을 감지하는 것은 Rangwala, Forouhar와 Dornfeld⁽²⁾에 의해 처음으로 시도된 바 있다. 그들은 AE가 그립퍼와 공작물사이의 접촉과 미끄러짐에 민감하다는 것을 실험적으로 보였으나 구체적으로 AE 신호의 특성과 접촉, 미끄러짐 사이의 연관성을 규명하지는 않았다. 본 연구에서는 접촉과 미끄러짐에 의한 AE의 발생을 해석하며 실제로 로봇매니퓰레이터를 운전할 때 발생할 수 있는 여러 조건하에서 AE 신호의 접촉과 미끄러짐에 대한 감도를 실험하고 접촉 및 미끄러짐의 조건과 AE 신호 사이의 연관성을 측정한다.

2. 접촉 및 미끄러짐에 의한 AE

Suh⁽²²⁾가 지정한 대로 금속표면 사이에 접촉이나

미끄러짐이 일어나면 두 표면의 돌출부 사이의 분자적인 결합이 파괴되고 표면층의 변형이 생기는 등 두 표면의 돌출부간의 동적인 상호작용이 일어난다. 이러한 상호작용은 돌출부와 그 아래 층의 변형을 가져올 뿐 아니라 피로, 미소절삭 그리고 접촉에 의한 마모 부스러기의 생성을 가져온다.

서로 가볍게 미끄러짐운동을 하는 두 금속표면 사이에서는 주로 표면의 기하학적 불규칙성에 의한 소성변형에 의해 변형에너지가 소산되며 이 에너지의 일부는 탄성파의 형태로 방출되어 이것이 압전 소자에 의해 검출되었을 때 AE 신호가 된다. 접촉 압력이 높은 경우 여기에 더해 다음과 같은 부가적인 AE의 원천들이 있을 수 있다.

- (1) 균열의 발생과 진형
- (2) 표면 요철의 충돌과 부스러기에 의한 충격
- (3) 경계에서의 접촉과 연이은 미끄러짐에 의해 야기되는 미소진동

이러한 현상들은 복잡한 형태로 상호작용하여 AE를 발생시킨다.

3. 소성변형에 의한 AE 에너지

소성변형에 의한 AE 발생의 원인을 규명하기 위한 연구가 많이 수행돼 왔으나 소성변형에 의한 AE 발생의 구조는 아직 완전하게 알려지지 않고 있다. 소성변형이 AE를 발생시키는 여러 요인 중에서도 결정체 구조재료의 소성변형은 미시적으로 보면 디스로케이션에 의해 발생하는 슬립과 트위닝에 의해 일어나기 때문에 디스로케이션에 의한 응력의 이완이 가장 중요한 요인으로 생각된다.^(23~25)

디스로케이션에 의해 발생하는 AE는 엄밀하게 말해서 변형률, 온도, 속도, 결정구조, 열역학적 그리고 기계적 경로(prior thermal and mechanical history), 그레인(grain)의 크기 그리고 응력장 등 여러 요인에 의해 영향받는다. 그러나 AE 발생의 메커니즘이 이러한 여러 요인, 특히 변형률의 변화에 영향을 받지 않는다고 가정하면, Gills와 Hamstad⁽²⁴⁾가 지적한 바와 같이 AE 신호의 에너지는 주로 동시에 발생하는 디스로케이션의 숫자와 디스로케이션의 평균이동거리에 의해 결정된다고 볼 수 있다. AE 신호의 에너지가 동시에 발생하는 디스로케이션의 숫자와 그 평균이동거리에 비례한다면 AE 에너지 E 는

$$E \propto b \rho_m \bar{x} V \tag{1}$$

라고 할 수 있다. 여기서 b , ρ_m , \bar{x} 와 V 는 각각 Burgers 벡터의 크기, 디스로케이션의 밀도, 디스로케이션의 평균이동거리 그리고 체적이다. 또, \bar{v} 가 디스로케이션의 평균속도라 할 때 소성변형률은 $\dot{\epsilon} = b \rho_m \bar{v}$ 가 되므로 단위시간당 AE 에너지의 발생은

$$\begin{aligned} \dot{E} &\propto b \rho_m \bar{v} V \\ &\propto \dot{\epsilon} V \end{aligned} \tag{2}$$

가 된다. 즉, 단위시간당 AE 에너지 발생은 변형률과 소성변형이 일어나는 체적과의 곱에 비례하며, 이는 소성변형을 일으키기 위한 에너지에 비례한다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 접촉이나 미끄러짐에서 AE 에너지의 대부분은 소성변형에 의해 발생하며, Diei와 Dornfeld⁽¹⁸⁾가 지적한 바와 같이 AE 에너지는 미끄러짐을 일으키기 위한 에너지에 비례한다고 본다.

4. 미끄러짐에 의한 AE 에너지

미끄러짐에 의한 AE의 발생은 두 접촉면의 물성, 상대운동, 접촉면의 면적 등에 의해 결정되는데 Thomson⁽²⁷⁾에 의하면 미끄러짐의 형태는 특히 접촉압력에 의해 크게 달라지며 접촉압력이 작을 경우에는 돌출부에서만 소성변형이 일어나고, 압력이 높아지면 접촉면 전체에서 접착이 일어나고 미끄러지면서 접촉면 전체에서 소성변형이 일어난다.

이러한 접촉압력에 따른 두 가지 다른 모드의 관찰현상은 접촉압력이 높은 경우 접착마찰(sticking friction)이라 하며 접촉압력이 낮은 경우 미끄러짐마찰(sliding friction)이라 한다. 두 경우에 모두 AE 에너지가 변형에너지에 비례한다면 AE 에너지는 다음과 같이 나타내질 수 있다.

$$\dot{E} \propto \text{Mean square AE} = C_1 \dot{W}_1 + C_2 \dot{W}_2 \tag{3}$$

단, \dot{W}_1 와 \dot{W}_2 는 각각 접착마찰에 의한 일률, 미끄러짐 마찰에 의한 일률이며, C_1 와 C_2 는 비례상수로서 각각 접착마찰과 미끄러짐마찰에서 AE 에너지의 변형에너지에 대한 감도를 나타낸다.

4.1 접착마찰에 의해 발생하는 AE 에너지

응력, σ_{ij} 를 받는 체적, dV 에 가해진 일의 증분, dW_i 은 $d\epsilon_{ij}$ 가 소성변형의 증분일 때 다음과

같이 주어진다.

$$dW_1 = \sigma_{ij} \epsilon_{ij} dV \quad (4)$$

따라서 총 일률은 $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 이 각각 유효응력 그리고 유효변형률일 때 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{W}_1 = \int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV = \int_V \bar{\sigma} \bar{\epsilon} dV \quad (5)$$

그리고 AE 신호의 에너지가 변형에너지에 비례한다면, 접착마찰에 의한 AE 에너지는 다음과 같다.

$$\dot{E} \propto \text{Mean square AE} \propto \dot{W}_1 = \int_V \bar{\sigma} \bar{\epsilon} dV \quad (6)$$

4.2 미끄러짐마찰에서 발생하는 AE 에너지

미끄러짐마찰이 일어날 때 마찰력은 법선력에 비례한다. 두 접촉면 사이의 마찰계수가 μ 이며, n , u , A_s 가 각각 두 접촉면 사이의 압력, 두 접촉면 사이의 미끄러짐속도 그리고 미끄러짐마찰이 일어나는 면적일 때 미끄러짐 마찰에 의한 일률, \dot{W}_2 는 $\int_{A_s} \mu n V_s dA$ 이 되고 AE 에너지가 변형에너지에 비례한다면 미끄러짐 마찰에 의한 AE 에너지는 다음과 같다.

$$\dot{E} \propto \text{Mean square AE} \propto \dot{W}_2 = \int_{A_s} \mu n V_s dA \quad (7)$$

5. 실험결과 및 토의

Fig. 1와 같이 강제 플레이트(90 cm×90 cm) 위에 알루미늄 블록(20 cm×20 cm)을 올려놓고 PC에 의해 제어되는 스텝모터로 강제 플레이트와 알루미늄 블록간에 상대운동을 일으켜서 두 금속면간의 미끄러짐에 의한 AE의 발생을 physical acoustics magnetic hold-down MHD-15으로 플레이트 위에 설치한 physical acoustics WD wide band AE 센서를 이용하여 실험하였다. 또한 실제 로봇매니퓰레이터에서의 그립퍼와 공작물간의 접촉 및 미끄러짐현상을 실험하기 위해 Fig. 2과 같은 장치를 구

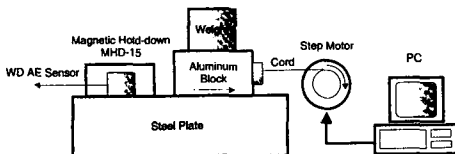


Fig. 1 Experimental setup for aluminum block on steel plate sliding test

성하였다. 6축 대우-Fanuc 로봇매니퓰레이터(arc-mate)에 엔드 이펙터로서 Fig. 3과 같은 3-finger 공압그립퍼를 설치하였으며 공작물로는 원기둥 형상(지름 6 cm, 높이 8 cm)의 알루미늄이 사용되었다. 그립퍼의 장악압력은 컴퓨터로부터의 공기압을 조절함으로써 제어된다. 공기는 hanshin type GH-2 air compressor에 의해 압축되며(20~120 psi), CKD filter F3000, CKD regulator R3000와

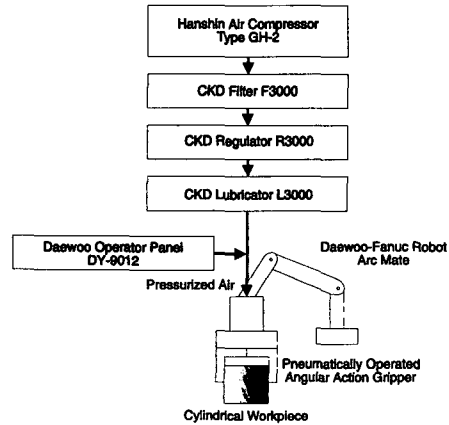


Fig. 2 Experimental setup for gripper/workpiece contact and slip test

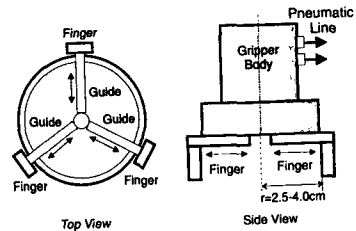


Fig. 3 3-Fingered pneumatic gripper used in the experiment

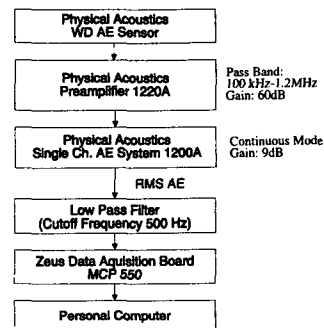


Fig. 4 Data acquisition and signal processing scheme

CKD lubricator L3000를 차례로 거쳐서 여과되고, 압력이 조절되고, 유회되어서 그립퍼를 구동한다. Physical acoustics WD wide band AE 센서는 그립퍼에 Fig. 11(a)의 (B)위치에 설치되었다. 두 종류의 실험에서 AE 센서로부터의 신호는 Fig. 4에서와 같이 100 kHz~1.2 MHz의 통과영역을 갖는 영역통과필터(bandpass filter)가 내장된 Physical acoustics 1220A preamplifier(이득 60 dB)를 통해 physical acoustics 1200A single channel AE system(이득 9 dB)에 전달되어서 증폭되고 AE system의 RMS AE 출력은 저역통과필터(차단주파수 500 Hz)를 통과하고 12 bit A/D 컨버터(최대 샘플링주파수 : 100 kHz, 실제 샘플링주파수 : 2 kHz)를 이용해 퍼스널컴퓨터로 샘플링돼서 해석된다.

그립퍼와 공작물의 접촉에 의한 RMS AE 신호

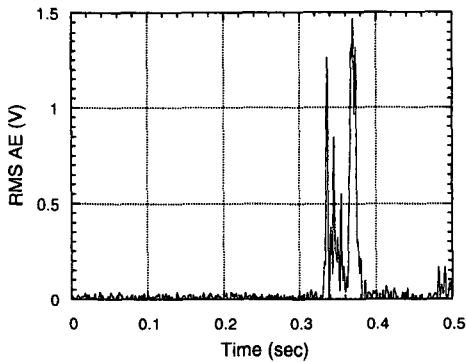


Fig. 5 An example of RMS AE due to finger/workpiece contact(air pressure=120 psi)

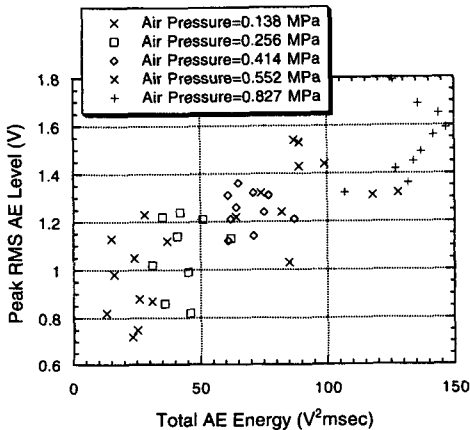


Fig. 6 Variation of peak RMS AE level and total AE energy with air pressure

는 접촉의 형태에 따라 다양하게 나타나지만 Fig. 5에 보인 전형적인 한 예에서와 같이 일반적으로 접촉순간에 큰 피크가 발생하며 그 응답속도가 대단히 빠름을 볼 수 있었다. Fig. 6은 접촉에 있어서 그립퍼에 작용하는 공기압에 따른 RMS AE 신호의 피크치와 전체 AE 에너지의 변화를 보여주는 데 그립퍼가 공작물을 겨우 잡아 올릴 수 있을 정도의 매우 약한 접촉에 대해서도 RMS AE 신호가 민감함을 볼 수 있다. RMS AE 신호는 이렇게 빠른 응답속도와 우수한 감도때문에 신호의 특성이 확률적으로 넓은 분포를 갖는다는(stochastic nature) 단점에도 불구하고 그립퍼와 공작물간의 접촉센서로서 적합하다.

Fig. 7에서는 금속면간의 미끄러짐에 의한 AE 신호의 형태를 알기 위해 강재 플레이트와 알루미늄 블록간에 미끄러짐을 일으키고 이 때 발생하는 전형적인 RMS AE 신호를 도시하였다. Rangwala et al.⁽¹²⁾에 의해 지적된 바와 같이 높은 주파수성분과 낮은 주파수성분이 섞여 나타나는 것을 볼 수 있다. 여기서 낮은 주파수성분은 공작물과 그립퍼 간 접촉력의 동적진동에 따른 것으로 공작물과 그립퍼 사이의 접촉상태와 주변환경 등에 따라 불규칙적인(stochastic) 성질을 크게 가지기 때문에 그 예측과 해석이 어렵다. 높은 주파수성분은 미끄러짐에 따른 돌출부의 미세적인 소성변형과 파괴 등에 의한 것으로 볼 수 있으며 장악압력과 미끄러짐 속도 등의 조건에 직접적으로 관련되며 낮은 주파수성분에 비해 결정적(deterministic)이기 때문에 해석이 비교적 용이하다. RMS AE 신호에서 접촉

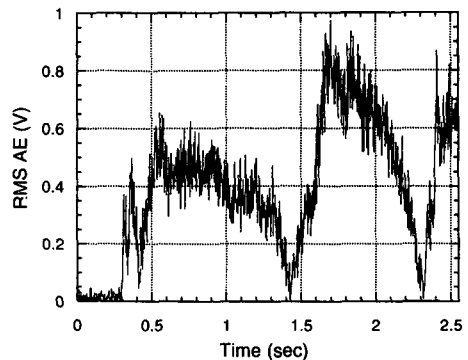


Fig. 7 An example of RMS AE due to slip between finger and workpiece(condition : sliding speed = 4 cm/sec, contact force=5 kgf, contact area = 100 cm²)

력의 동적진동에 관한 정보를 얻으려면 저역통과필터를 사용하고 미시적인 미끄러짐현상에 관한 정보를 얻으려면 고역통과필터를 사용하면 된다.

Fig. 8은 강재 플레이트와 알루미늄 블록간 미끄러짐이 일어났을 때 발생한 RMS AE 신호에서 낮은 주파수성분을 30 Hz의 차단주파수를 가지는 고역통과필터를 사용하여 차단하고 그 나머지 성분의 에너지를 미끄러짐속도를 변화시키면서 측정할 결과를 보여주고 있다. 미끄러짐속도가 증가함에 따라 AE 에너지가 증가하며 그 관계가 대략 선형임을 보여주고 있는데 이는 AE 에너지가 미끄러짐의 미소역학에 의한 에너지 소산에 비례한다는 가정이 맞음을 보여준다. 또한, 이 그림에서 두 금속면간의 압력이 증가하면 RMS AE 전압도 따라서

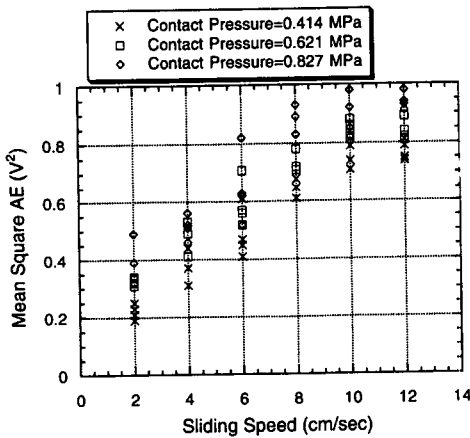


Fig. 8 Variation of mean square AE level with sliding speed in aluminum on steel sliding test

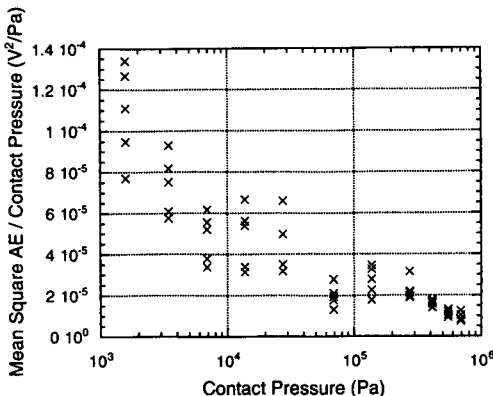


Fig. 9 Variation of (mean square AE)/(contact pressure) with contact pressure in aluminum on steel sliding test

증가하는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 9는 강재 플레이트와 알루미늄 블록간의 미끄러짐 실험에서 두 금속면간의 압력을 변화시키면서 RMS AE 신호(역시, 저주파성분을 30 Hz의 차단주파수를 가지는 고역통과필터를 사용하여 차단한 RMS AE 신호)의 감도를 측정할 결과이다. 구체적으로 RMS AE 제곱의 크기를 압력으로 나눈 값을 압력의 함수로 표시하였다. 만약 압력이 증가함에 따라 AE 에너지가 대략 비례해서 증가한다면 이 값은 상수로 나타나야 한다. 그런데 이 그림에서 압력이 증가함에 따라 (mean square AE)/압력 값이 크게 감소하는 경향이 명백하다. 이는 압력에 따라 AE 발생의 메커니즘이 달라짐을 의미하며, 압력이 낮은 경우 AE는 주로 미끄러짐 마찰에 의해 발생하고 압력이 높아짐에 따라 접촉마찰에 의해 발생하게 되며 AE의 미끄러짐 마찰에 대한 감도가 접촉마찰에 대한 감도보다 높기 때문이라고 설명할 수 있을 것이다. 이렇게 AE는 접촉력이 큰 경우보다 가벼운 접촉력하에서의 미소한 미끄러짐에 대해서 더 높은 감도를 보인다는 점 때문에 미끄러짐센서로서 적합하다.

Fig. 10은 그림퍼와 공작물간의 미끄러짐실험에서 미끄러짐이 일어났을 때 발생하는 전체 AE 에너지의 양 그리고 그림퍼와 공작물간의 미끄러짐 거리의 상관관계를 보여준다. Suh⁽²⁴⁾의 지적대로 금속면간의 미끄러짐이 막 일어나려는 시점과 미끄러짐의 초기상태가 마찰의 가장 중요한 요소이며, 그 상태와 주변환경에 따라 에너지 양이 넓은 분포

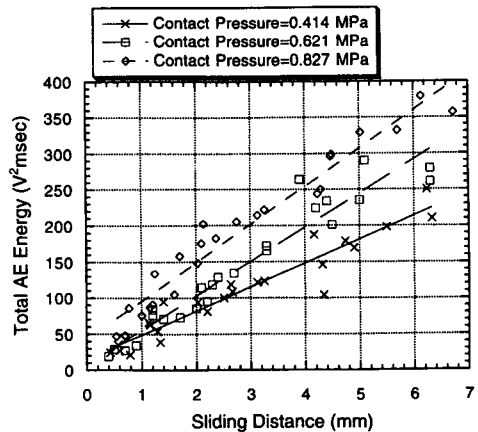


Fig. 10 Variation of total AE energy with sliding distance under constant initial contact pressure in finger/workpiece sliding test

를 가지기 때문에 전체 AE 에너지의 양이 같은 미끄러짐의 조건하에서도 넓은 분포를 가지는 것을 볼 수 있다. 그러나 이러한 확률적(stochastic) 성질에도 불구하고 최초의 접촉압력이 일정한 상태에서 미끄러짐거리가 증가함에 따라 전체 AE 에너지의 양이 증가하는 경향도 확연하다. 또한 미끄러짐거리가 일정할 때 최초의 접촉압력에 따른 전체 AE 에너지 양의 변화를 볼 수 있는데 전체 AE 에너지는 접촉압력이 증가함에 따라 역시 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10에서와 같이 미끄러짐이 일어났을 때 발생하는 전체 AE 에너지의 양이 센서의 위치에 따라 어떻게 변화하는가를 보여준다. 신호의 도달경로를 줄여서 신호의 열화를 최소화하고 매니

플레이트 및 그립퍼의 구동부 운동에 의해 발생하는 잡음의 영향을 최소화하기 위해서는 공작물에 설치하는 것이 좋으나 여러 개의 공작물을 다뤄야 하는 로봇에서는 불가능하다. 그림에 의하면 공작물에 설치되었을 때 (C) 가장 큰 AE 에너지가 발생하나 그립퍼에서 접촉면 가까운 곳에 설치된 경우 (B)에도 비교적 큰 AE 에너지가 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 접촉부위에서 멀어질수록 (A) 접촉에 의한 AE 에너지는 감소하고 노이즈가 증가한다. 실제로 여러 조건하에서 로봇을 운전시켰을 때 미끄러짐에 의한 RMS AE 크기와 구동부의 운동에 의해 발생하는 RMS AE 크기의 상대적인 비(S/N비)는 센서의 위치에 따라 크게 변하는데 (A)에서는 3~20 dB 정도, (B)의 위치는 10~20 dB 정도, (C)에서는 20~30 dB 정도가 되는 것을 볼 수 있었다.

마지막으로 지적할 점은 그립퍼와 공작물간의 미끄러짐은 접촉압력이나 미끄러짐속도뿐 아니라 접촉면의 성질, 로봇매니플레이터의 운동상태 등에 의해 결정되는 대단히 복잡한 동적인 현상으로서 미끄러짐이 일어나는 상황에 따라 AE 신호의 성질이 크게 달라질 수 있다는 점이다. 따라서, 정상상태 모델만으로는 설명하기 어려운 면이 있으며, 미끄러짐현상의 동적인 측면에서 해석이 모델을 개발함에 있어서 고려되어야 할 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 로봇그립퍼와 공작물간의 접촉 및 미끄러짐에 의해 발생하는 AE를 해석하고, 실험데이터를 얻었는데 이로부터 다음과 같은 결론들을 도출할 수 있다.

(1) 그립퍼와 공작물 사이에 접촉이 일어날 때는 AE의 버스트가 발생하고 미끄러짐이 일어날 때는 미끄러짐이 일어나는 시간 전체에 걸쳐 고에너지의 AE가 발생하므로 AE 신호를 모니터링함으로써 접촉과 미끄러짐은 감지될 수 있다.

(2) 미끄러짐에 의한 RMS AE는 접촉력의 동적 진동에 따른 낮은 주기성분과 접촉면에서의 소성변형 및 파괴 등에 따른 높은 주파수성분을 갖는다.

(3) AE 에너지는 미끄러짐의 에너지에 대략 비례한다. 따라서 접촉력이 증가하면 AE 에너지도 증가하며, 접촉력이 일정한 경우 미끄러짐의 속도가 증가함에 따라 AE 에너지도 증가한다.

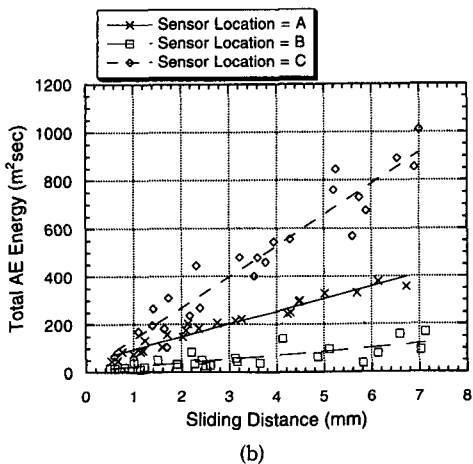
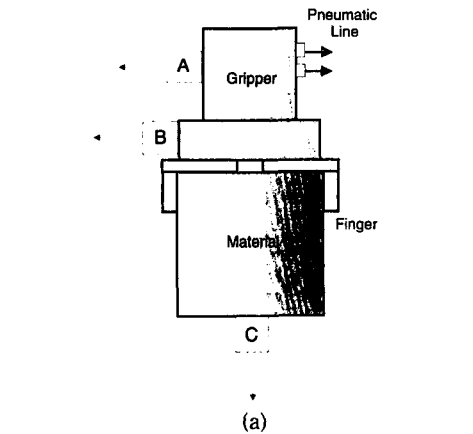


Fig. 11 Variation of total AE energy with the location of AE sensor under constant initial contact pressure in finger/workpiece sliding test

(4) 그립퍼와 공작물 사이의 압력이 낮은 경우 AE는 주로 미끄러짐마찰에 의해 발생하고 압력이 높아짐에 따라 점착마찰에 의해 발생하게 되며 AE의 미끄러짐마찰에 대한 감도가 점착마찰에 대한 감도보다 높다.

본 연구의 결과는 AE 신호가 어느 정도의 불규칙성(stochastic nature)을 가지고 있으나 높은 감도 때문에 로봇그립퍼와 공작물간의 접촉 및 미끄러짐의 해석과 감시에 유효하게 이용될 수 있다는 가능성을 보여주고 있다. 그러나, AE는 그립퍼와 공작물의 재질과 접촉 및 미끄러짐의 조건에 민감하므로 보다 광범위한 조건하에서의 그립퍼와 공작물 재질의 영향 등에 관한 연구가 계속될 필요가 있다고 하겠다. 특히 금속면간의 미끄러짐에서 금속면의 미시적 상태와 AE 신호의 특성과의 관계를 규명할 필요가 있다고 하겠다. 또한, AE를 고도로 신호처리해서 접촉시 공작물의 종류, 위치, 방향 등을 또 미끄러짐시 미끄러짐의 속도, 거리 등을 패턴 인식을 통해서 결정하는 문제까지 본 연구를 확장할 수 있다고 생각된다.

후 기

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 교육부 학술연구조성비의 지원으로 이루어진 것으로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Pham, D. T. and Heginbotham, eds., 1986, "Robot Grippers," *IFS-Springer*.
- (2) Rangwala, S., Forouhar, F. and Dornfeld, D., 1988, "Application of Acoustic Emission Sensing to Slip Detection in Robot Grippers," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 28, No. pp. 207~215.
- (3) Zuech, N., ed., 1992, *Handbook of Intelligent Sensors for Industrial Automation*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- (4) Harmon, L. D., 1982, "Automated Tactile Sensing," *The international Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 2, pp. 3~32.
- (5) Harmon, L. D., 1984, "Automated Taction Industrial Assembly," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 73~76.
- (6) Russel, R. A., 1985, "A Thermal Sensor Array to Provide Tactile Feedback for Robots," *The international Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 3, pp. 35~39.
- (7) Webster, J. G., ed., 1988, *Tactile Sensors for Robotics and Medicine*, New York, John Wiley Sons.
- (8) Nevile, G. E. Jr., Schildwachter, E. F. and Keith, L. D., 1985, "Alternative Skin Geometries and Materials for Induced Vibration Touch Sensors," *Proc. Detroit Meeting, MS85-992-1-7, Sensors*, '85, SME, Dearborn, MI.
- (9) Venugopal, R., Gale, E. N. Jr. and Keith, L. D., 1985, "Real Time Feature Extraction from an Induced Vibration Touch Sensor," *Proc. Detroit Meeting, MS85-993-1-7, Sensors*, '85, SME, Dearborn, MI.
- (10) Russel, R. A., 1990, *Robot Tactile Sensing*, Prentice-Hall of Australia.
- (11) Dario, P., et. al., 1986, "A Sensorized Scenario for Basic Investigation on Active Touch," *International Trends in Manufacturing Technology*, Vol. 2: Robot Sensors: Tactile and Nonvision, Pugh, A., ed., Bedford, UK, IFS Ltd., pp. 33~44.
- (12) Petersen, K., Kowalski, C., Brown, J., Allen, H. and Knutti, J., 1985, "A Force Sensing Chip Designed for Robotic and Manufacturing Automation Applications," *Proceedings of the Philadelphia Meeting*, Ko, W. H. and Wise, K. D., eds., Transducers, '85, *IEEE*, pp. 30~32.
- (13) Rebman, J. and Morris, K. A., 1986, "A Tactile Sensor with Electrooptical Transduction," *International Trends in Manufacturing Technology*, Vol. 2: Robot Sensors: Tactile and Nonvision, Pugh, A., ed., Bedford, UK, IFS Ltd., pp. 144~155.
- (14) James, D. R., 1971, "Relationship Between Acoustic Emission and Dislocation Kinetics in Crystalline Solids," *Journal of Applied Physics*, Vol. 42, No. 12, pp. 4685~4697.
- (15) Iwata, K. and Moriwaki, T., 1977, "An Application of Acoustic Emission to In-Process Sensing of Tool Wear," *Annals of CIRP*, Vol. 26, No.

- 21.
- (16) Dornfeld, D. A. and Cai, H. G., 1984, "An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 106, No. 28.
- (17) Belyi, V. A., Kholodilov, O. V. and Sviridyonok, A. I., 1981, "Acoustic Spectrometry as Used for the Evaluation of Tribological Systems," *Wear*, Vol. 69, pp. 309~319.
- (18) Diei, E. N. and Dornfeld, D., 1987, "Acoustic Emission Sensing of Tool Wear in Face Milling," *ASME J. Eng. Ind.*, Vol. 109, pp. 234~240.
- (19) Masaki, T., 1987, "Automated Deburring Control Using Acoustic Emission Feedback," MS Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley.
- (20) Dornfeld, D. A. and Handy, C., 1987, "Slip Detection Using Acoustic Emission Signal Analysis," *Proc. 1987 IEEE Int. Conf. Robotics Automation, Raleigh, NC*, pp. 1868~1875.
- (21) Jiaa and Chi-Liang, 1989, "Intelligent Acoustic Emission Sensing in Machining for Tool Condition Monitoring," Ph. D Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley.
- (22) Suh, N. P. and Sin H.-C., 1981, "The Genesis of Friction," *Wear*, Vol. 69, pp. 91~114.
- (23) White, R. M. and King, A. A., 1985, "Tactile Array for Robotics Employing a Rubbery Skin and a Solid-State Optical Sensor," *Proceedings of the Philadelphia Meeting*, Ko, W. H. and Wise, K. D., eds., *Transducers, '85, IEEE*, pp. 18~21.
- (24) Gills, P. and Hamstad, M., 1974, "Some Fundamental Aspects of the Acoustic Emission," *Materials Science and Engineering*, Vol. 111, pp. 37~50.
- (25) Ono, K., 1979, "Acoustic Emission Arising from Plastic Deformation and Fracture," *Fundamentals of Acoustic Emission*, K. Ono. Ed., UCLA, pp. 168~207.
- (26) Malen, K. and Bolin, L., 1974, "A Theoretical Estimate of Acoustic Emission Stress Amplitudes," *Phys. Stat. Sol. (b)*, 61, pp. 673~645.
- (27) Thomson, E., Macdonald, A. and Kobayashi, S., 1962, "Flank Friction Studies with Carbide Tools Reveals Sublayer Plastic Flow," *ASME J. Engr. for Ind.*, pp. 53~62.