

절삭가공에서 퍼지알고리즘을 이용한 칩형상 예측 Chip Form Prediction using Fuzzy Logic in Turning

최 원 식*
Won-Sik Choi*

<Abstract>

In turning, the chip may be produced in the form of continuous chip or discontinuous chip. The continuous chips are dangerous to the operator and difficult to be handled at high speed machining. The signal of AE(Acoustic Emission) is found out to be related to cutting conditions, tool materials, test conditions and tool geometry in turning. In this study, the relationship between AE signal and chip form was experimentally investigated. The experimental results show that the types of chip form are possible to be classified from the AE signal using fuzzy logic.

Keywords : *Chip control, Continuous chip, Broken chip, Fuzzy logic, Acoustic emission, Factor analysis.*

1. 서 론

최근 공작기계와 절삭공구의 성능향상에 따라 절삭가공은 더욱 고속정밀화 되고 있으며 절삭 가공시 생성되는 칩(chip)의 효율적인 처리는 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히, 고속 절삭시 생성되는 연속형 칩은 처리 자체의 어려움이 있을 뿐만 아니라 절삭가공 표면을 손상시키며 공작기계 및 공작물에 영커 정상적인 절삭작업을 방해하기 때문에 절삭작업의 효율성과 원활한 진행을 위해 주기적인 칩의 절단을 통하여 이러한 문제점을 해결함과 동시에 칩 제거를 용이하게 해주어야 한다.⁽¹⁻³⁾

또한 최근 급속히 이루어지고 있는 절삭공정

의 무인화 추세에 따라 가공 공정에 대한 감시의 중요성이 더욱 높아지고 있으며 칩 제어와 관련된 문제로서 칩 형상 모니터링의 필요성이 증대하고 있다.

절삭시 생성되는 칩의 형상 해석 및 모니터링에 대한 연구로서 Spanns⁽⁴⁾, Jawahir⁽⁵⁾ 등은 칩 생성을 직접 고속촬영하였으며, Andreasen⁽²⁾ 등은 공구 동력계로 부터 얻어지는 절삭력 신호의 스펙트럼 분석을 이용한 칩 절단 감시시스템을 소개한 바 있다. 그러나 이러한 연구방법은 측정장비의 복잡성 때문에 실제 절삭가공시에는 매우 제한된 범위에서만 적용 될 수 있다.

한편 AE 신호를 이용한 절삭가공 공정감시에 대한 연구로서 Dornfeld⁽⁶⁾ 등은 2차원 절삭시,

* 정희원, 밀양대학교 기계공학과 교수, 工博/技術士
경남 밀양시 내이동 1025-1, (055)350-5425
E-mail : wschoi@arang.miryang.ac.kr

* Dept. of Mechanical Engineering,
Miryang National University, Ph.D. P.E.
1025-1, Naei-dong, Miryang, Kyungnam, 627-702, Korea

공구경사각과 절삭속도의 변화에 따른 소성변형에 의한 일률 및 AE에너지와의 관계를 이론적으로 유도하였으며, Moriwaki⁽⁸⁾ 등은 AE신호를 코팅공구의 마멸깊이와 연관시켜 공구수명 판정에 응용하였고 최기상⁽⁹⁾ 등은 다이아몬드 공구를 사용한 선삭에서 여유면과 공작물 접촉에서 발생하는 AE를 해석하기 위한 이론적인 모델개발을 제시하였다.

그러나 AE를 이용한 대부분의 연구들은 공구의 마멸과 파손검출 및 소성거동에 대한 것이며 칩형상 예측에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다.

본 연구는 절삭공정에서 칩 생성시 발생하는 AE신호를 이용하여 퍼지추론을 통한 칩형상 예측을 시도하였다.

2. 기초 이론

2.1 AE신호

고체내부에 국부적으로 형성되었던 변형에너지가 급격히 해소되면서 발생하는 탄성파(elastic wave)를 음향방출, 즉 AE(acoustic emission)이라 하며 그 발생원(source)은 거시적 관점에서 보면 소성변형, 파괴 및 균열의 진전, 피로 등이며 미시적 관점에서 보면 전위(dislocation), 미세 균열, 상변태 등을 들 수 있다⁽⁷⁾.

AE신호의 매개변수로는 AE 히트(hits), 에너지(energy), 진폭, 지속시간, 상승시간, 쇠퇴 시간 등이 있으며, AE에너지는 식 (1)과 같이 정의한다.

$$U = \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt \quad \text{-----} \quad (1)$$

V(t)는 신호함수이며 t는 시간을 나타낸다. 에너지 평균값개념을 가진 RMS값은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$RMS_{AE} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt} \quad \text{-----} \quad (2)$$

여기서 $\Delta t = t_2 - t_1$ 을 나타낸다.

AE신호의 에너지 변화율은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며

$$\frac{dU}{dt} \propto [RMS]^2 \quad \text{-----} \quad (3)$$

소성변형으로 생기는 일은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \int_V \sigma_{ij} \cdot d\epsilon_{ij} \cdot dV \quad \text{-----} \quad (4)$$

만약 일정한 응력 σ 을 받고 변형률 속도가 $\dot{\epsilon}$ 라면 식(4)는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며

$$\dot{W} = \sigma \cdot \dot{\epsilon} \cdot V \quad \text{-----} \quad (5)$$

이때 소성변형에 의해 발생하는 일률과 소비되는 에너지 변화율은 일정하며 식 (3)과 (5)로부터 에너지 변화율 dU/dt 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dU}{dt} \propto [RMS_{AE}]^2 = C \cdot \sigma \cdot \dot{\epsilon} \cdot V \quad \text{-----} \quad (6)$$

즉 에너지 변화율(dU/dt)은 응력과 변형률 속도 및 재료의 체적에 의존함을 알 수 있다.

2.2 칩의 절단과정과 AE 발생원

Nakayama⁽¹⁾는 칩 표면의 변형률이 파단 변형률(ϵ_f)이상이 되면 칩의 절단이 이루어진다는 전제하에 칩의 파단 변형률, 칩 두께 및 칩 굴곡 반지름에 대한 식 (7)을 제시하였다.

$$\epsilon_f \leq \frac{t_c}{2} \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_L} \right) \quad \text{-----} \quad (7)$$

여기서 ϵ_f : 칩의 파단 변형률

t_c : 칩두께

R_o : 절단이 이루어지기 전의 칩의 굴곡반지름

R_L : 절단이 이루어진 후의 칩의 굴곡반지름

이다.

칩의 선단이 공작물 표면에 닿게 되면 Fig.1과 같이 칩에 작용하는 힘 F에 의한 굽힘 모멘트가 발생하고 모멘트 값이 칩의 절단에 필요한 크기에 이를 때까지 칩은 성장하게 되는데 식 (8)과 같은 조건이 되면 칩은 파단이 일어나게 된다⁽¹⁰⁾.

$$FA_m \geq \sigma_f \frac{b_c t_c^2}{6} \quad \text{----- (8)}$$

여기서 F : 칩에 작용하는 힘(N)
 Am : 칩절단 모멘트 암(mm)
 σ_f : 칩의 파단응력(N/mm²) 이다.

칩이 발생할 때의 AE신호원으로서는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 제1영역에서의 전단소성변형, 제2영역에서의 공구경사면과 칩 사이의 소성변형과 마찰, 공구 여유면과 공작물 사이의 마찰이 일어나는 제3영역, 칩의 선단이 공작물과 부딪히는 제4영역, 그리고 칩이 절단되는 경우, 절단영역인 제5영역 등을 설정할 수 있다.

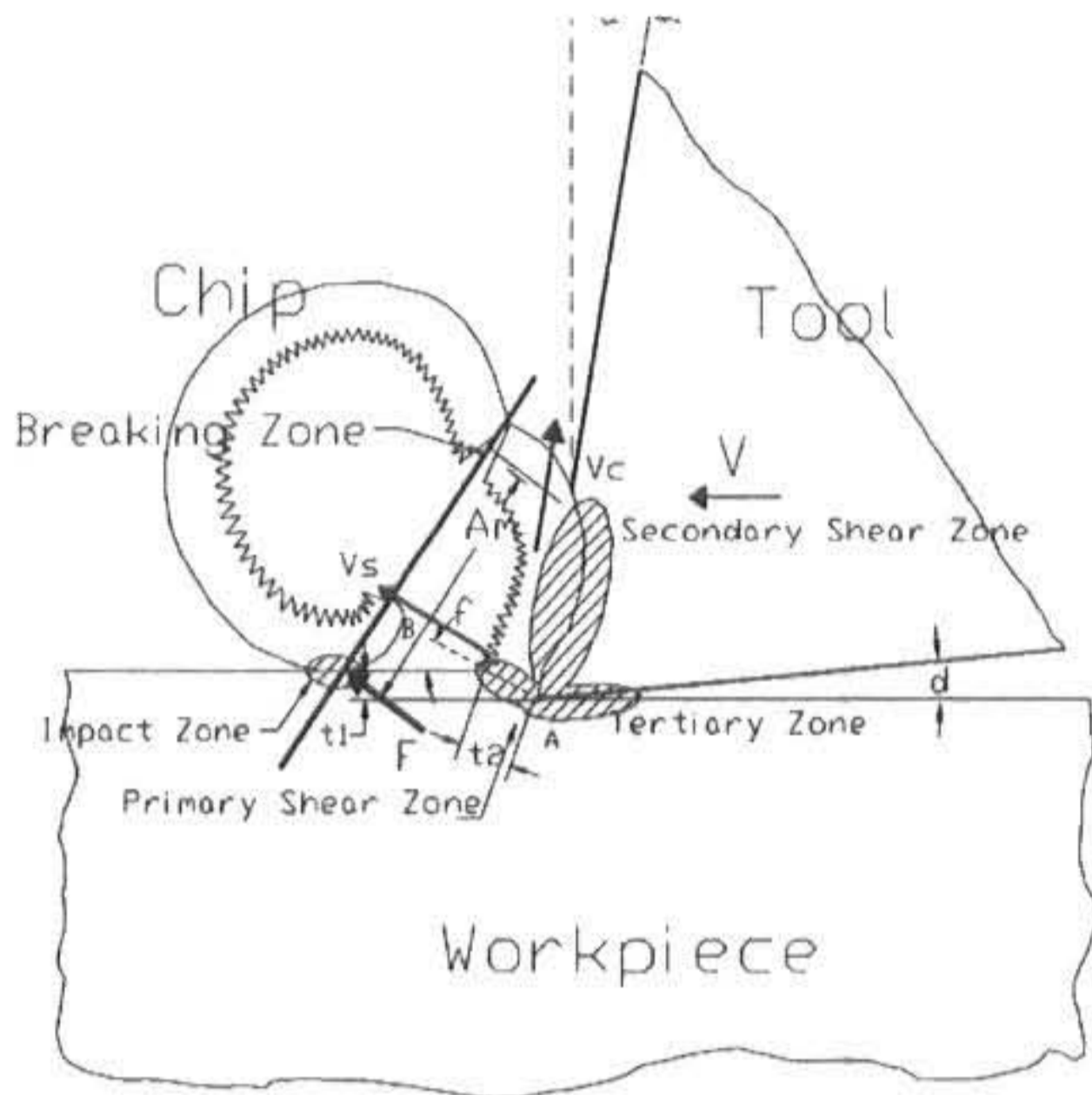


Fig.1 AE source in cutting

AE신호의 파라미터에서 AE 에너지, AE 진폭, AE RMS, AE counts, AE상승시간, AE 지속시간, ASL 등이 있는데 퍼지추론시 모든 파라미터를 입력하면 너무 많은 학습이 요구되므로 본 연구에서는 가장 많이 사용되는 통계패키지인 SAS (Statistical Analysis System)를 이용 식 (9)에 의해 요인 분석하였으며 그 결과 7가지 파라미터 중 AE 진폭과 AE 에너지가 가장 높은 인자 적재값임을 확인 할 수 있었다.

$$x - \mu = LF + \epsilon \quad \text{----- (9)}$$

여기서

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix}, \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_m \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1m} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ l_{p1} & l_{p2} & \dots & l_{pm} \end{bmatrix}$$

으로서 F는 공통인자, ϵ 은 특정인자 L은 상관관계를 나타낸다.

2.3 퍼지추론

말과 지적 판단 등에서 본질적으로 애매함(fuzziness)을 처리하는 수리적 이론과 방법론으로 주어진 규칙(rule)과 사실의 모임으로부터 논리적으로 타당한 새로운 사실 즉 규칙을 얻어내는 과정을 퍼지추론이라 한다.

퍼지 추론 과정은 크게 퍼지화 도입부(Fuzzification interface), 지식 베이스부(Knowledge base), 추론부(decision making-logic), 비퍼지화부(defuzzification interface) 등의 4개의 기본 요소로 구성되며, 본 연구에서는 Fig.2에 나타낸 바와 같이 입력부에 AE 에너지와 진폭을 출력부에 칩형상 식별부를 추가하여 시스템을 구성하였다.

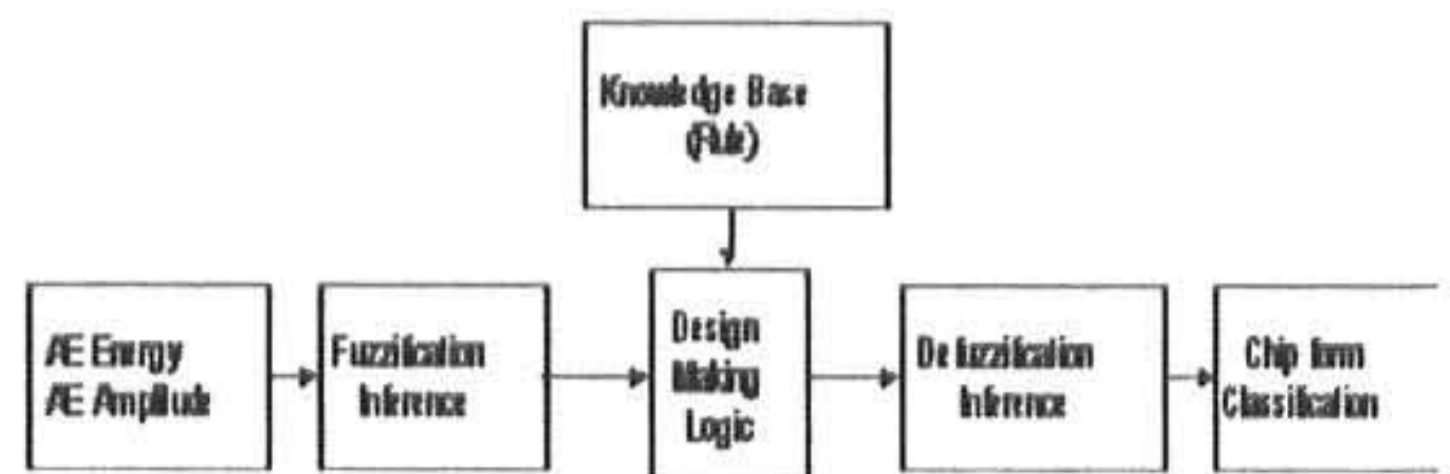


Fig. 2 Schematic diagram of fuzzy inference system

3. 절삭 실험

3.1 절삭 조건 및 실험 장치

본 실험에서의 절삭조건은 Table 1과 같이 하였으며 피삭재는 기계구조용 및 일반구조용으로 널리 쓰이고 있는 SM45C 및 SS41강봉을 사용하였다. 실험장치는 Fig.3과 같다.

Table 1 Experimental Instruments and Cutting Conditions

1. Lathe	
Spindle Speed	: 17 - 1200 rpm
Feed Range	: 0.049 - 1.381 mm/rev
Motor Power	: 10 HP
2. Inserts : KC and MG types	
3. Cutting Conditions	
Cutting Speed	: 200 m/min
Feed Rate(9steps):	0.067 0.111 0.148 0.234 0.296, 0.345 0.444 0.542, 0.641 mm/rev
Width of Cut	: 2.0, 3.0 mm
Cutting Fluid	: none
4. AE Instruments	
Sensor	: PICO, PAC
Preamplifier	: 1220A 40/60dB gain 100~1200kHz BP filter, PAC
Software	: MISTRAS (AEDSP- 32/16), PAC

3.2 실험 방법

절삭실험은 절삭속도를 200m/min으로 일정하게 하고 이송은 Table 1과 같이 0.067에서 0.641mm/rev까지 9단계로 실시하였다. 공구의 형상과 절삭조건이 동일하더라도 절삭시 발생하는 절삭력과 AE신호 및 생성되는 칩의 형태가 공구마멸에 의해 변화되기 때문에 절삭실험 전후 공구의 마멸상태를 확인하여서 마멸되지 않은 공구에 의해 절삭실험을 하였다.

AE 센서는 공구홀더의 밑면에 홈을 파고 심었으며 가능한 한 절삭이 이루어지는 공구끝 가까이에 부착시켰다. 그리고 Preamplifier를 이용하여 센서에서 나오는 AE신호를 40 dB까지 증폭시켰으며, 대역필터(Band Pass Filter)를 사용하여 절삭시 발생하는 전기적 잡음과 기계

적 잡음을 제거하였다. 필터를 통과한 AE신호는 A/D Converter를 거쳐 AEDSP-32/16(PAC)을 통해 Micro Computer에 저장함과 동시에 디지털 오실로스코프(Digital Storage Oscilloscope)를 이용하여 파형을 관찰하였다. 한편 절삭성능을 평가하기 위하여 절삭시 발생하는 힘은 압전형 공구동력계(Kistler,9257A)를 사용하여 측정하였으며 이때 나온 신호는 전하증폭 (Kistler,5807A)를 통해 증폭하고 다시 A/D 변환기(Data translation, DT3831-G)에 의해 디지털화한 후 Micro Computer에 저장하고 모니터로 관찰하였다.

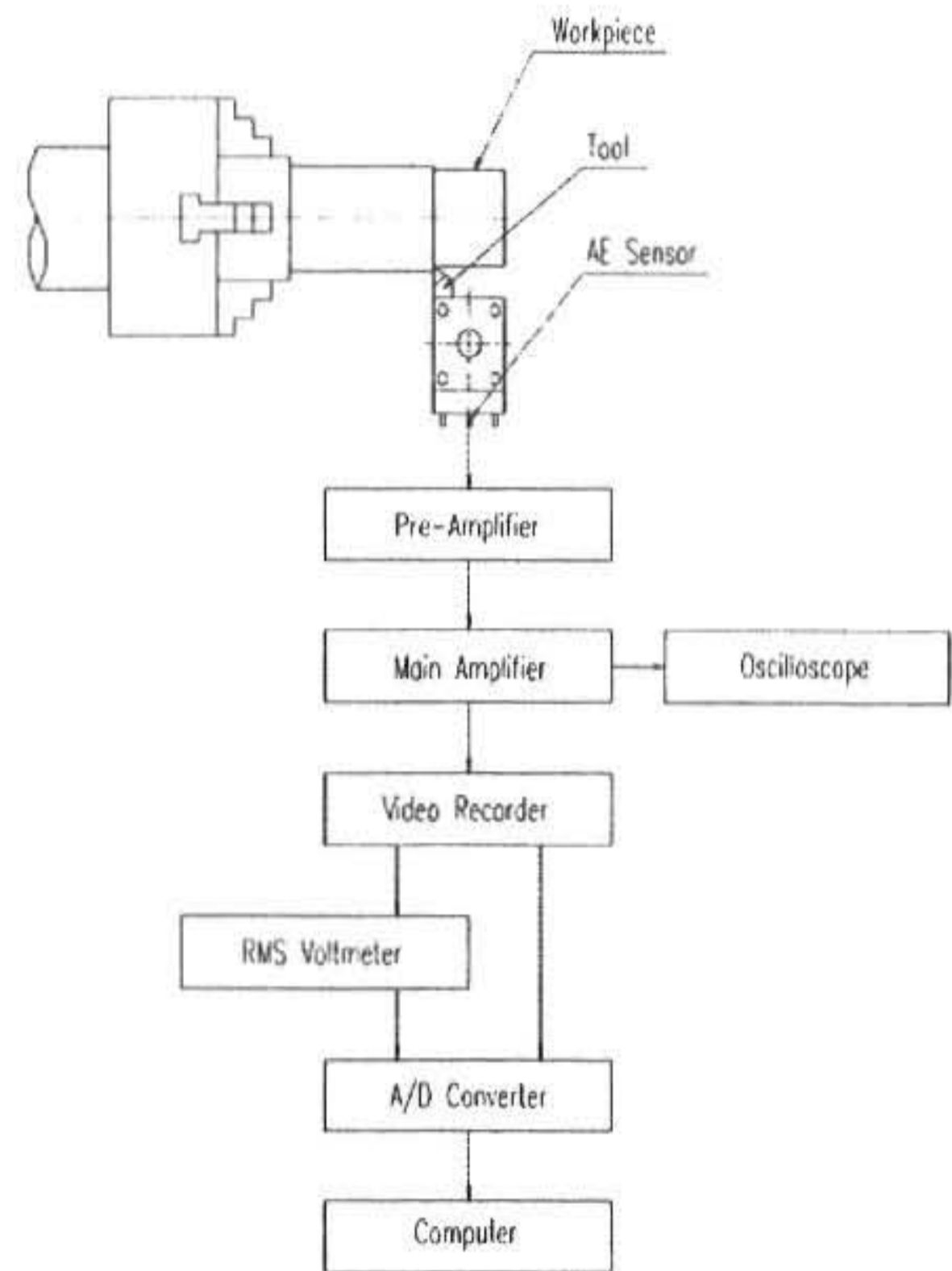


Fig.3 Experimental setup

4. 실험결과 및 고찰

4.1 칩 형상

공구형상과 절삭조건에 따른 칩형상은 피삭재 및 이송에 따라 나타내면 Fig.4, Fig.5와 같다.

그림에서 보는바와 같이 비교적 이송이 낮은 영역에서는 칩두께가 얇기 때문에 칩의 선단이 피삭재인 공작물이나 공구 여유면 등과 접촉하여도 절단이 일어나지 않는 연속칩

이 생성되었다. 이송이 커지면서 생성된 칩은 절삭조건 및 칩포머형상에 따라 다소 차이를 보이고 있으나 칩은 점차 두꺼워지며, 칩의 선단이 공작물이나 공구 여유면 등과 접촉하게 되면 지연이나 역굴곡없이 안정적으로 절단이 이루어지며 C자 형태를 나타낸다. 한편 높은 이송범위에는 칩이 두껍고 굴곡이 심하기 때문에 칩의 자유표면에 큰 주름이 생기거나, 칩의 측면중 길이가 짧은 쪽에 부분적으로 전단파괴 형태를 나타내는 아크형칩이 생성된다.

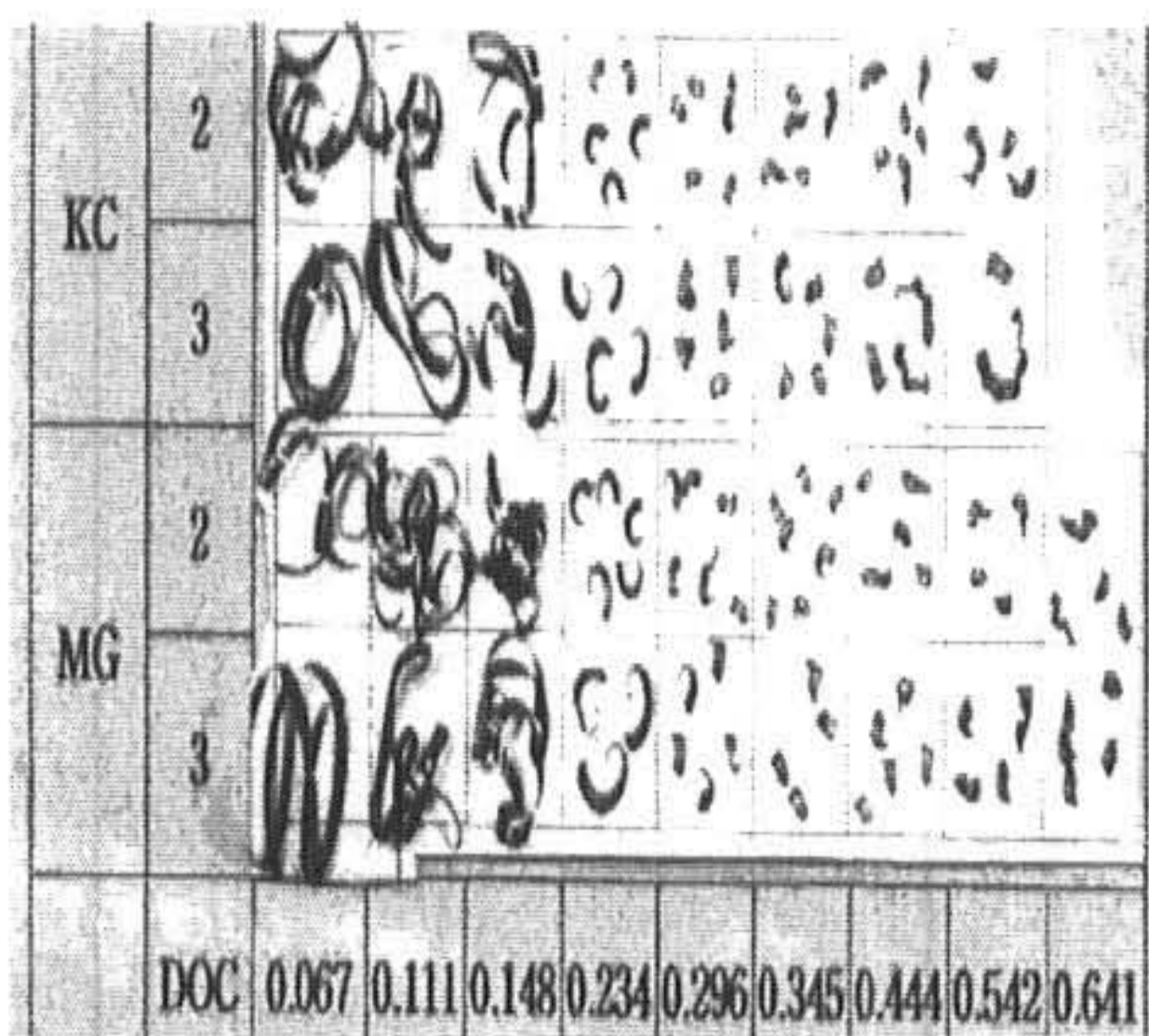


Fig.4 Chip diagram of SM45C

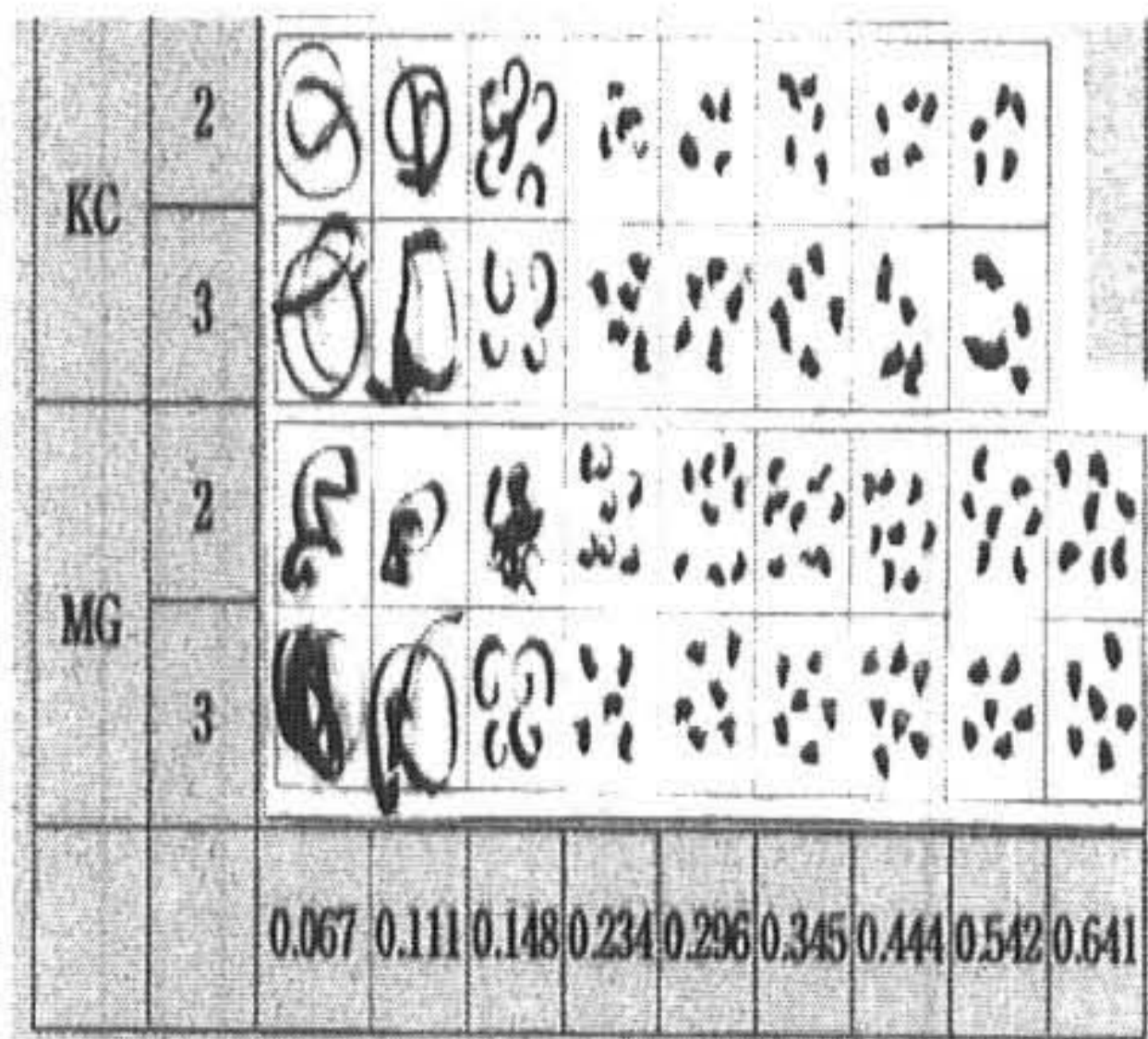


Fig.5 Chip diagram of SS41

4.2 퍼지추론결과

AE 파라미터 중 AE 에너지와 AE 진폭 Data들의 평균값을 구한 후 구해진 값을 퍼지 입력

변수로 사용하기 위해서 식(10)에 나타낸바와 같이 정규화(normalizing)하였다. 불필요한 규칙 공간을 제거하기 위하여 C Mean Clustering 기법을 사용하여 필요한 규칙 수를 얻어내기 위해 3구간으로 나누어 Fig.6과 같이 퍼지규칙을 구성하였다.

$$I_{energy} = \frac{E_{avi} - E_{min}}{E_{max}}$$

$$I_{amp} = \frac{AMP_{avi} - AMP_{min}}{AMP_{max}} \text{-----(10)}$$

퍼지추론기 설계는 Fig.7과 같이 소속함수(Membership function)를 정의하였으며 Mandani의 Min-Max 기법을 사용하여 그 무게 중심값을 구하면 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

IF Energy is N and Amplitude is N then Chip is N
 IF Energy is Z and Amplitude is Z then Chip is P
 IF Energy is P and Amplitude is P then Chip is P

Fig.6 Fuzzy rule base

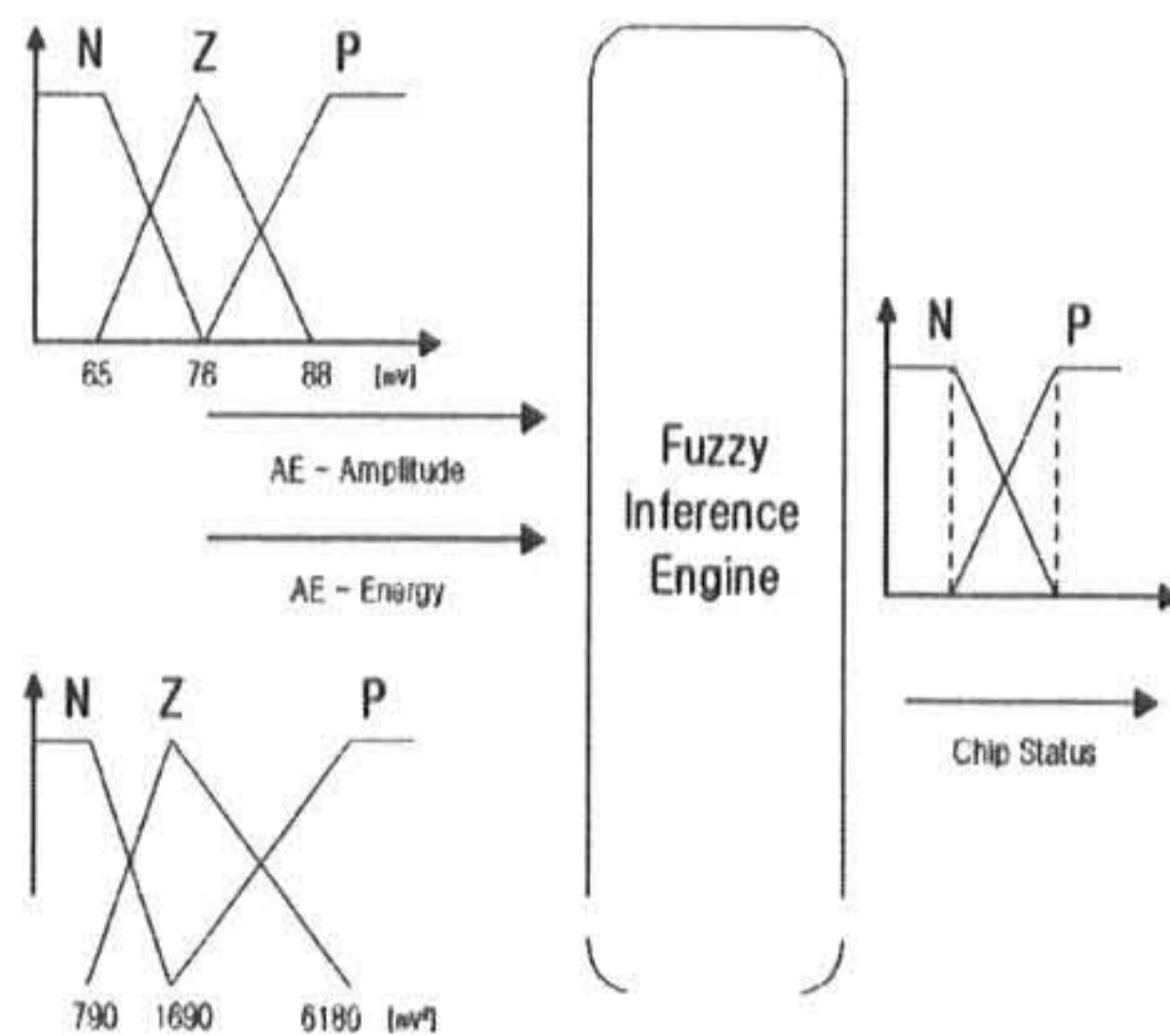


Fig.7 Fuzzy controller

Table 2에서 보는 바와 같이 피삭재 SM45C의 경우 KC공구를 제외하고는 모두 잘 진단됨을 알 수 있었으며 SS41인 경우 모든 절삭조건에 걸쳐 잘 진단됨을 알 수 있었다.

Table 2 Ratio of fault in each conditions

Insert Type	SM45C				SS41			
	KC		MG		KC		MG	
DOC	2	3	2	3	2	3	2	3
Ratio of Fault	1/8	0/8	0/9	0/9	0/8	0/8	0/9	0/9

5. 결 론

본 연구에서는 선삭시 자동화의 문제점으로 대두되는 절삭시 발생하는 연속 칩의 문제를 해결하기 위한 연구로서 선삭용으로 많이 사용되고 있는 SM45C 및 SS41을 피삭재로 하여 선삭실험을 행하여 이때 발생하는 칩을 수거하고 아울러 최근 가장 연구가 활발히 진행되고 있는 AE신호를 함께 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 선삭시 발생하는 AE 신호는 칩의 형상에 잘 반영됨을 알 수 있었으며 AE 파라미터에서 칩의 형상특성을 가장 잘 나타내는 것은 SAS를 통한 인자분석결과 AE 에너지와 AE 진폭신호이었다.
- 2) AE신호 파라미터 중 AE 에너지와 AE 진폭을 이용하여 퍼지추론에 의한 추정된 값과 실제 실험결과에서 얻어진 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있었다.
- 3) AE에 의한 퍼지추론을 이용하면 온라인으로 칩 형상제어시스템을 구축하는데 있어 큰 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1) Nakayama, K. : A Study of the Chip Breaker, Trans. of JSME, Vol.5, pp.142-150, 1962

2) J. L. Andreasen, L. De Chiffre : Automatic Chip-Breaking Detection in Turning by Frequency Analysis of Cutting Force, Annals of the CIRP, Vol.42/1, pp.45-48. 1993

3) Jawahir, I. S. : The Tool Restricted Contact Effect as a Major Influencing Factor in the Chip Breaking an Experimental Analysis, CIRP, Vol.37/1, pp.121-126.1988

4) Spaans, C. : A Systematic Approach to Three-dimensional Chip Curl, Chip Breaking and Chip Control, SME paper Nr., pp.70-241. 1970

5) Jawahir : On the Controllability of Chip Cycle and Modes of Chip Breaking in Metal Machining, CIRP, Vol.1/39, pp.47-51. 1990

6) Dornfeld and Asibu : Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting, ASME Vol.103, August, pp.330-340. 1981

7) Dornfeld, and Asibu : Acoustic Emission during Orthogonal Metal Cutting, Int. J. Mech. Sci., Vol.22, No.5, pp.285-296, 1980,

8) Moriwaki : Detection of Tool Fracture by Acoustic Emission Measurement, CIRP, Vol.29, No.1, pp.35-40. 1980

9) 최기홍, 최기상, 김희식 : 다이아몬드 공구를 사용한 선삭에서 여유면의 접촉에 의한 AE발생, 대한기계학회 논문집, 제17권, 제3호, pp.527-537, 1993

10) 이영문, 최원식, 장승일, 허인호 : 칩절단지수에 의한 칩절단특성평가, 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제11호, pp.1989-1997, 1998

(2000년 9월 25일 접수, 2001년 4월 13일 채택)