

음압을 이용한 선삭작업에서의 마모, 파손 감시 Tool Wear and Fracture Monitoring through the Sound Pressure in Turning Process

이성일*, 정성중

한양대학교 공과대학 기계공학부, 생산시스템 및 제어 실험실

S.I. Lee*, S.C. Chung

MANufacturing Systems & Control Laboratory
HANYANG UNIVERSITY

Abstract :In order to make unmanned machining systems with satisfactory performances, it is necessary to incorporate appropriate condition monitoring systems in the machining workstations to provide the required intelligence of the expert. This paper deals with condition monitoring for tool wear and fracture during turning operation. Developing economic sensing and identification methods for turning processes, sound pressure measurement and digital signal processing technique are proposed. The validity of the proposed system is confirmed through the large number of cutting tests.

1. 서론

선삭 가공 중 발생하는 여러 이상 상태 중 공구의 마모와 파손 감시는 공장자동화 및 무인화에 있어서 매우 필요한 부분임에도 불구하고 온라인 감시가 어려운 부분이다. 이는 공구상태가 절삭조건에 따라 다양하면서도 불규칙적인 반응을 보일 뿐만 아니라 칩 및 절삭유 등 열악한 환경 속에서 작업되기 때문에 센서의 장착과 적용이 어렵기 때문이다. 더욱이 최근의 절삭공정이 고속화, 고경도화 됨에 따라 공구수명에 이르기 전에 예측지 못한 파

손과 손상이 일어나 경제성과 생산성에 영향을 미치므로 이에 대한 효과적인 감시 대책이 요구된다.^[1]

본 논문에서는 무인가공에서 전문가를 대신할 수 있는 신뢰성 있는 공구마모, chipping 그리고 파손감시장치를 연구하였으며, 경제적이고 효율적인 감시시스템에 대하여 연구하였다.

채터감시에 효율적이었던^[2] 음압을 이용한 마모 감시 실험장치를 범용선반에 설치하고, 기존 센서 신호들과의 비교를 통해 마모 신호의 거동 특성을 규명하였다. 또한 음압 신호만을 채취한 후 신호처리 기법을 이용한 처리를 통해 마모기준을 세울 수 있는 차원·무차원 특징인자를 추출하고 공구의 수명한계 제시와 아울러 마모와 파손예측의 적용가능성을 제시하였다.

2. 음압신호와 마모지수

2.1 마모기구

절삭공구의 마모 메카니즘은 주로 기계적인 연마작용(abrasion)에 의한 것과 고온, 고압에 의한 응착(adhesion) 및 확산(diffusion)작용에 의한 것으로 알려져 있다.^{[3][4]} 이 외에도 미소파손(chipping)^[5]에 의한 마모 원인을 들

수 있다. 이 세가지 마모 메카니즘은 복합적으로 나타나지만 절삭조건에 따라 열적 특성이 강해지기도 하며 기계적 특성이 두드러지기도 한다.

일반적으로 마모의 기준은 Fig.1에 보인 것처럼 VB(flank wear)와 KT(crater wear)로 주어진다. VB는 여유면이 공작물과 연마되어 나타나며 KT는 경사면이 칩에 의해 고온, 고압으로 응착, 확산되어 일어난다.

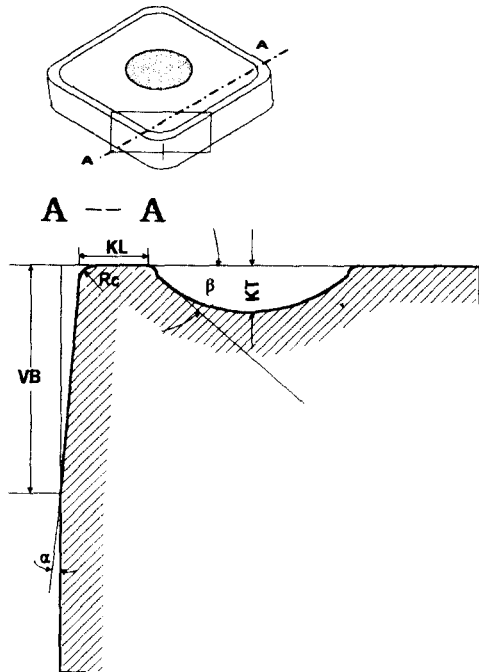


Fig.1 Flank and crater wear of a tool

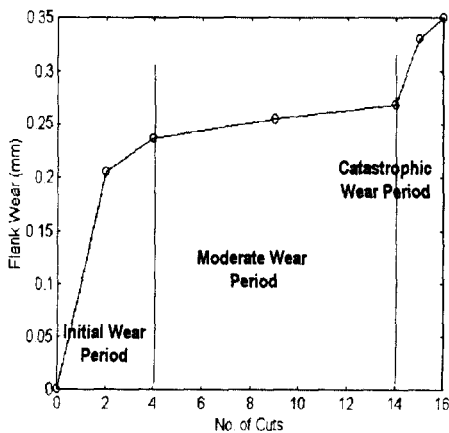


Fig.2 Flank wear and wear mode

2.2 마모지수

마모가 발생할 때의 이상진동은 공작물,

공구, 공작기계 구조부를 진동시키고 이때 발생하는 소음은 공기중으로 전달되어 음압의 변화로 나타난다. 절삭가공 중 발생하는 음압 신호에는 여러 음원(sound source)들의 특성정보가 포함된다. 그 중에는 스펀들과 공작물의 회전으로 인한 진동, 기어박스, 공작기계의 여러 요소들, 공구와 공작물 사이의 마찰, 칩의 생성과 절단으로 인한 소음 등이 있다. Flank 마모가 발생할 때는 주로 공구와 공작물의 진동이 주요원인이 되므로, 이로 인해 야기되는 소음의 특징을 추출하기 위해서는 마모지수(Wear Index)의 정의가 필요하다.

Fig.2는 선삭작업에서 절삭이 이루어지는 횟수에 따라서 발생하는 Flank마모량을 보인 것이다. 음압의 마모량에 따른 변화를 관찰하고 그에 따른 마모지수를 규명하기 위해 소음 에너지양의 척도로서 다음과 같은 음압의 실효치를 정의하였다.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

여기서, x_i : i 번째 음압신호, N : 데이터 수

절삭소음은 그 평균치가 증가함에 따라 표준편차가 증가하는 경향이 있으므로 평균치에 따른 표준편차의 변동값으로 다음과 같은 무차원 변동계수(Coefficient of Variation, CV)를 정의하였다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

여기서, σ : 표준편차, \bar{x} : 평균치

절삭소음 중에는 미소파손(chipping)이나 공구파손 등으로 인한 충격파가 실려 있으므로 신호의 평균치를 중심으로 한 왜곡성과 첨예성을 나타내는 척도로서 다음과 같이 무차원 변수인 Skewness와 Kurtosis를 정의하였다.

$$\beta_1 = \frac{\mu^3}{\sigma^3} \quad (4)$$

$$\beta_2 = \frac{\mu^4}{\sigma^4} \quad (5)$$

$$\mu^k = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^k \quad (6)$$

여기서, β_1 : Skewness, β_2 : Kurtosis

μ^k : k-th moment

절삭소음은 백색잡음이 입력으로 작용할 때 발생하는 출력으로 가정할 수 있으며, 이는 자동회귀모형(Autoregressive model)으로 모델링 된다. 마모의 진전에 따라서 특정한 AR 계수에 변화가 야기되며^{[6][7]}, 이를 이용하면 소음신호의 모델링을 통한 마모를 정의할 수 있다.

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} \dots + \phi_n x_{t-n} + e_t \quad (7)$$

여기서, x_t : 계의 응답

$\phi_1, \phi_2 \dots \phi_n$: 자동회귀 계수

e_t : 백색잡음

3. 실험장치 및 방법

Fig.3은 공구마모 및 파손실험을 위한 절삭소음 측정장치를 보인 것이다. 1회 (1pass)절삭에 50초씩 16회 가공하였으며 환봉의 선삭시 직경 감소에 따른 절삭속도의 저하를 줄이기 위해 직경이 큰 공작물을 선택하였다.

마모량은 2회 절삭마다 공구현미경으로 Flank 마모량(VB)을 측정하였다. 절삭력과 절삭진동, 절삭소음을 각각 테이프레코더에 저장한 후 디지털 오실로스코프로 신호를 감시하면서 테이프레코더의 A/D변환기를 통하여 PC에 저장하였다. 저장된 데이터를 2.2 절에 정의된 마모지수를 이용하여 PC상에서 신호처리 및 분석하였다.

Table. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 사양을 보인 것이다. 공구는 중절삭용 칩브레이커(chip breaker)를 사용하였고 마모가 일어나기 쉽도록 코팅처리가 안된 초경공구를 사용하였다. Table. 2에는 마모실험의 절삭조건을 보인 것인데 마모현상을 현저하게 나타내기 위해 중절삭조건을 적용하였다.

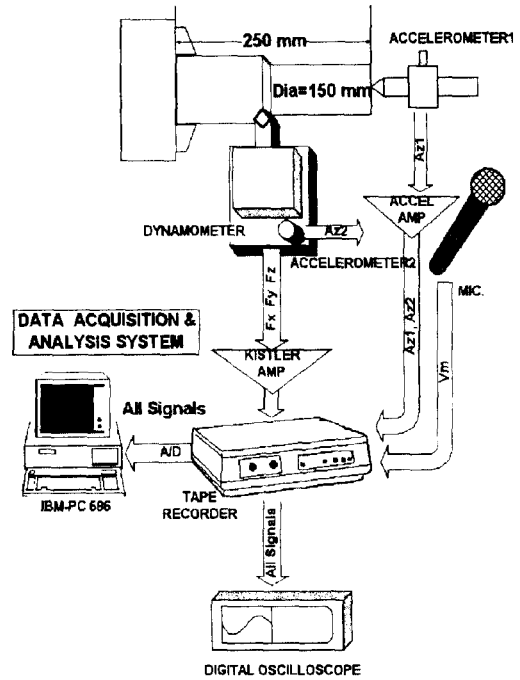


Fig.3 Schematic diagram of experimental setup

공구파손 규명은 Fig.4와 같이 EDM으로 흠을 낸 공구인서트를 장착하여 실험하였다. Table. 3은 파손실험의 절삭조건이다.

Table 1. Specification of experimental setup

Turning Machine	Hwacheon.co. 380B Lathe
Workpiece	SM45C (dia150×length250)
Insert	Korea Tungsten SNMG120408, P20 TNMG160404, KT250
Tool holder	Korea Tungsten PSDNN2020K12 entering angle 45° point angle 90° backrake angle -7°
Tool Dynamometer	KISTLER 9257B
Accelerometer	PCB 303A03, 342A
Microphone	DM835 Condenser Microphone
Personal Computer	IBM-PC 586
Charge Amplifier	KISTLER 5019A(3-channel)
Tape Recorder	TEAC RD-135T
Microscope	Toolmakers Microscope TM-301, MITUTOYO. Zoom Stereo Microscope SZ4045TR, OLYMPUS.

Table 2. Cutting conditions for tool wear

Cutting speed	292.2 (m/min)
Feed	0.3 (mm/rev)
Depth of cut	1.2 (mm)

Table 3. Cutting conditions for tool fracture

Cutting speed	201 (m/min)
Feed	0.15 (mm/rev)
Depth of cut	1.5 (mm)

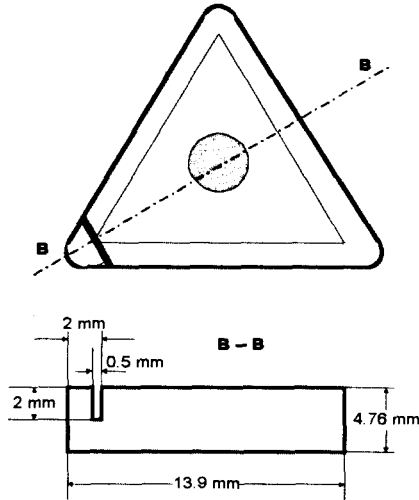


Fig.4 Slotted insert for fracture test

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 마모실험 결과

Fig. 5는 Fig.2에서 정의된 마모상태에 따라 마모과정을 세 상태로 분류하여 각 과정의 대표적인 음압신호 변화를 보인 것이다. 스피들 1회전(0.1sec) 동안 200개의 데이터를 샘플

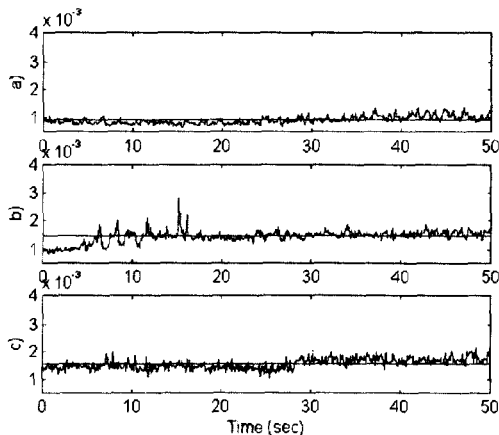


Fig.5 Sound pressure (RMS) according to wear state
a) initial wear, b)moderate wear, c)catastrophic wear

하여 1회 절삭, 50초 동안의 RMS치를 보인 것이다. 초기마모상태에서는 Fig.2에서 볼 수 있듯이 일정한 비율로 마모가 빠르게 진전되어 감을 볼 수 있으며 중간상태에 이르면 chipping에 의한 일정한 마모가 이루어 짐을 보여준다. 최종에는 급격하면서도 단속적인 RMS의 증가를 나타내고 있는데 이 때 높은 주파수의 진동이 나타난다. Fig.6은 마모가 진행되는 과정에서 주파수의 변동을 절삭회수에 따라 보인 것이다.

마모가 진행될수록 공구의 인선이 마모되어 댐핑이 증가하면 공작물의 고유진동수인 564Hz와 공구홀더의 고유진동수인 4,928Hz에서 스펙트럼의 최고치가 증가되어 감을 알 수

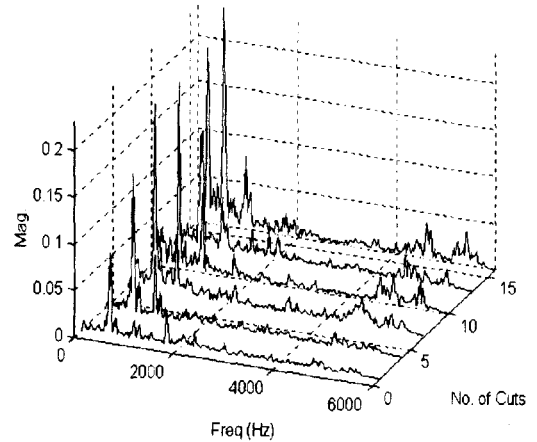


Fig.6 Waterfall spectrum of sound pressure

있다.

Fig.7은 배분력의 평균치를 마모량 VB에 따라 보인 것이다. VB 0.255mm에서 절삭력이 크게 줄어든 것은 공작물을 교체했기 때문이다. 또한 VB 0.33mm에 이르렀을 때는 공구수단이 파손되었다.

Fig.8, Fig.9는 마모진행에 따른 음압을 이용한 마모지수들의 변화를 보인 것이다. 절삭력의 변화와 유사한 변화를 나타내고 있으며, VB값이 0.24mm를 초과할 때 급격한 마모지수의 증가를 보이는데 그 경향은 Fig.7에서 절삭력 변화보다 더욱 뚜렷한 경향을 보인다. 그리고 마모상태는 최종마모상태로 진입하는 것을 알 수 있다. 실시간에서 음압을 이용한 마모 여부 평가시 급격한 마모지수의 변화가 일어나는 이 지점을 공구수명으로 볼 수 있

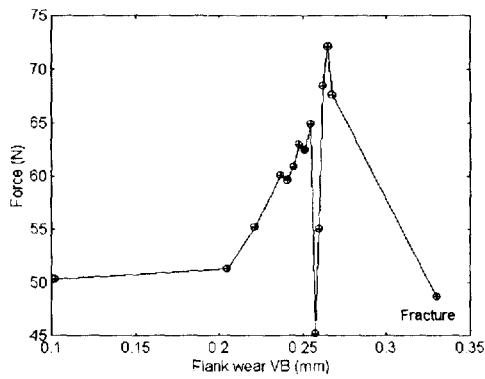


Fig.7 Radial force according to wear length

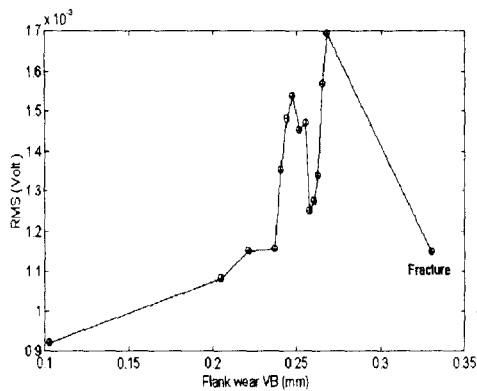


Fig.8 Sound pressure (RMS) according to wear length

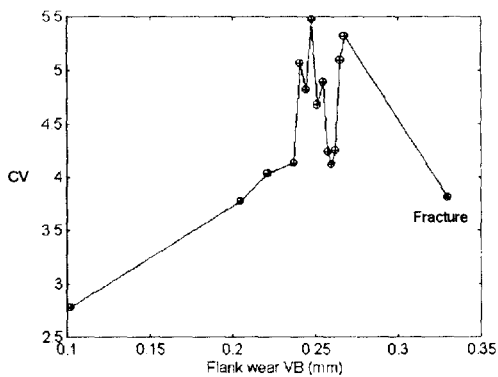


Fig.9 Sound pressure(CV) according to wear length

으며, 다른 마모지수와도 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig.10에는 절삭시간에 따른 Skewness와 Kurtosis의 변화를 보인 것이다. 마모 중간상태의 초기와 최종상태의 초기부분에서 chipping이 많이 발생했음을 보여주고 있으며(Fig.11 참조) 13분경에는 파손되었음을 나타내고 있다.

Fig.12에는 식 (7)과 같은 모델링을 통하여 음압신호를 AR(8)로 모델링한 결과를 마모 상태에 따라 보인 것이다. 마모가 진전됨에 따라서 5, 6번째 계수가 증가함을 알 수 있고 절삭중 AR모델의 5, 6번 계수의 변화를 감지하면 마모를 실시간 감시할 수 있을 것이다.

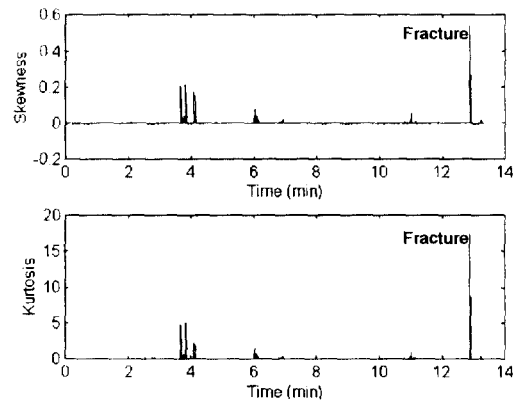


Fig.10 Skewness and kurtosis of sound pressure according to cutting time



Fig.11 Flank wear surface

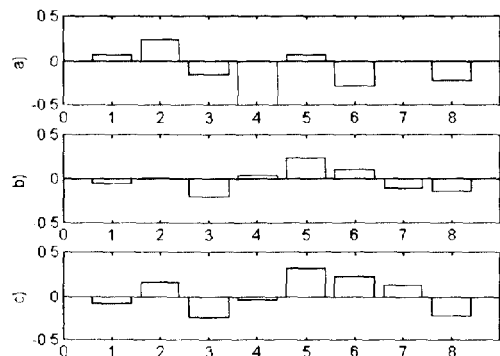


Fig.12 AR parameters of sound pressure
a) initial wear, b) moderate wear, c) catastrophic wear

4.2 파손실험 결과

파손실험에서도 앞서의 마모실험에서 정

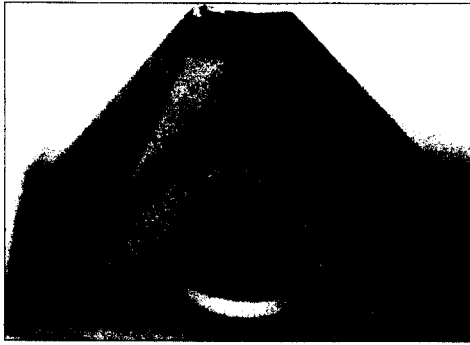


Fig.13 Fractured insert

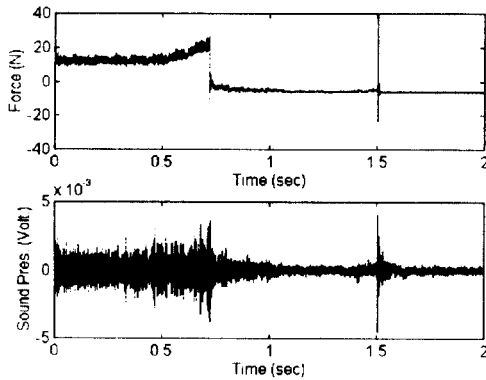


Fig.14 Force and sound pressure signals during fracture

의한 지수들을 사용하여 파손될 때의 한계치를 규명하였다. Fig.13은 파손된 공구를 보인 것이며 Fig.14는 파손이 일어났을 때 절삭력의 주분력과 음압신호이다. 0.7sec에서 파손이 발생했으며, 1.5sec에서는 공구가 완전히 파단되었다.

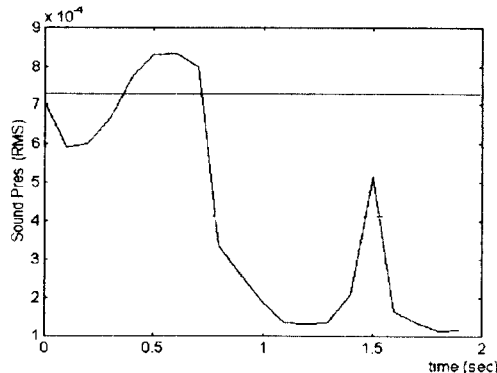


Fig.15 Sound pressure (RMS) during fracture

Fig.15에서는 파손과정을 음압의 RMS로 나타내었다. 공구가 파손되는 시점인 0.7sec 보다 약 0.4sec (4회전) 전에 RMS값이 급히

상승하게 되며 파손을 예측할 수 있음을 보여 준다.

5. 결론

1. 선삭작업에서 음압을 이용한 마모지수를 정의하고 절삭력 신호와 비교한 결과 마모와 파손감시에서 음압신호의 유용성을 입증하였다.

2. 중절삭 조건에서의 마모실험을 통해 음압을 이용하여 정의한 마모지수가 공구수명 예측과 감시에 적합함을 입증하였다.

3. 음압의 kurtosis는 마모과정 중 상태가 변하는 과도기 부분에서 일어나는 미소파손(chipping)현상을 잘 규명하였다.

4. 공구파손실험을 적용한 결과 음압의 RMS값을 이용하여 0.4sec 전에 파손을 예측할 수 있었다.

참고문헌

- [1] David A. Dornfeld, "In Process Recognition of Cutting States", JSME, Series C, Vol.37, No.4, 1994. pp.638-650.
- [2] 이성일, 정성중, "음압을 이용한 선삭작업에서의 채터 감시 및 제어", 1996년도 공작기계기술학회 추계 학술대회 논문집. pp.85-90.
- [3] C.Rubenstein, "An Analysis of Tool Life Based on Flank-Face Wear" Part1, Part2, ASME, Journal of Engineering for Industry, 1976, pp.221-232.
- [4] P.A.Dearnley, "Rake and Flank Wear Mechanisms of Coated and Uncoated Cemented Carbides", ASME, Vol.107, 1985. pp.68-82.
- [5] Shintani, K., "Optimum Tool Geometry of CBN Tool for continuous Turning of Carburized Steel", Int.J.Mach. Tools Mfg., Vol.29.No.3, 1989, pp.403-413.
- [6] Y.B.Chen, S.M.Wu, "A Real-Time Automated Diagnostic Monitoring System For Manufacturing Processes", Manufacturing Intelligence, Vol.5, 1990. pp.51-56.
- [7] Y.Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements", ASME, Vol.114, 1992. pp.386-392.