

〈논 문〉

## 고속회전 원형 톱의 불안정 현상

### Unstable Phenomenon of High-Speed Rotating Circular Saws

임 경 화\* · C. D. Mote, Jr.\*\*

Kyung-Hwa Rim and C. D. Mote, Jr.

(1999년 8월 24일 접수 : 1999년 10월 29일 심사완료)

**Key Words** : Circular Saw(원형 톱), Parametric Instability(매개 불안정), Cutting Process(절단공정), Critical Speed(임계속도), Follower Force(추종력), Unstable Phenomenon(불안정 현상)

#### ABSTRACT

This paper presents schematic process of identifying the principal cause to make the vibration problem of rotating circular saws. In the tandem pencil slat saw lines, feeding of cedar blocks is often stopped because excessive motor current is required in a saw motor. These events are called "kick-offs" in technical reports. Research on saw behavior at kick-offs is required to understand and reduce the frequency and severity of kick-offs events. This research aims at finding out the principal cause of kick-offs, and evolving design improvements for high cutting performance with fewer and less severe kick-offs. Measurements of critical speed, cutting force, cutting temperature and dynamic displacements are carried out to observe the instability mechanism and also to obtain saw design parameters for the numerical analyses. And the numerical analyses involving FEM and multiple scale method are utilized to show the possibility of the principal cause.

#### 1. 서 론

원형 톱, 광디스크, 웨이퍼 톱, 하드디스크 등을 이용하는 제품에서는 회전 원판의 안정성은 매우 중요한 특성이다. 최근에는 데이터 전송속도, 절삭 생산성을 향상시키기 위해 회전속도가 높아짐에 따라 원판의 안정성은 더욱 중요한 설계특성으로 인식되고 있다. 이에 따라 고속 회전에 따른 진동 문제점 또는 안정성 연구를 많이 하고 있다.<sup>(1,2)</sup>

그러나 대부분의 연구들은 특정한 한 개의 요인에 의해 원판 불안정성 발생의 가능성을 확인하는 경우가 많았다. 이에 비해 본 연구에서는 실제 현장에서

발생하고 있는 회전 톱의 불안정 현상을 분석하면서, 각 요인의 발생 가능성을 종합적으로 다루고자 한다. 미국 캘리포니아 회사에 있는 목재 절단공정에서 회전속도를 증가시키에 따라 원형 톱에서 불안정 현상인 "kick-offs" 현상이 발생되었어, 수시로 작업이 중단되는 경우가 발생하였다. "kick-offs" 현상은 나무를 절단하는 공정에서 절단 부하가 갑작스럽게 커져 작업이 중지되는 경우를 지칭하는 현장 용어이다. "kick-offs" 현상에 대한 분석 연구는 McKenzie<sup>(3)</sup>에 의해서 처음으로 연구하게 되었다. 그는 "kick-offs" 현상이 일어나는 순간에 나무 블록(block)의 절단면을 조사하여 회전 톱에서 과대한 진동이 발생하는 것을 추정하였다.

본 연구의 목적은 불안정현상인 "kick-offs"의 주요 요인을 알아내서, 적절한 대책을 세우는 데 있다. 기존 연구들에서는 제기한 회전 원판의 불안정 요인

\* 정회원, 한국기술교육대학교 제어기계공학과

\*\* University of Maryland

으로는 좌굴 현상을 일으키는 절단력<sup>(4)</sup>, 임계속도 (critical speed)를 저하시키는 절단열<sup>(5)</sup>, 매개 불안정 (parametric instability)을 일으키는 절단재의 동특성<sup>(6)</sup>, 절단과정에서 생기는 추종력(follower force)<sup>(7)</sup> 등을 제기하였다. 그래서 본 연구에서는 종합적인 분석을 위하여 각 불안정 요인에 대해서, 실험 및 수치해석을 이용하여 발생 가능성을 확인하고자 한다. 우선 작업상태 확인과 함께 원형 톱의 임계속도(critical speed), 정상 운전에서의 절단력을 측정한다. 그리고 "kick-offs" 현상이 일어날 때, 원형 톱의 온도와 변위를 측정된 뒤에 유한요소법과 multiple scale method의 수치해석들을 통하여 각 요인에 대한 가능성을 분석한다. 최종적으로는 분석결과에 근거하여 "kick-offs"에 대한 대책을 제시한다.

## 2. 원형 톱 시스템의 특성 측정

현장라인에서 가동되고 있는 원형 톱 시스템을 우선 파악하고, 측정을 용이하게 위하여 현장 구조와 흡사하게 만든 실험라인에서는 원형 톱의 임계속도와 정상 작업에서의 절단력을 측정하였다. 또한 현장라인에서는 kick-offs 경우를 포착하여 그 때 원형 톱의 과다 변위와 온도를 측정하였다.

### 2.1 원형 톱 시스템의 구조

"kick-offs"가 발생되고 있는 절단공정 라인인 원목 블록(wood block)을 여러 개의 얇은 나무판으로 순차적으로 절단하기 위한 현장라인이다. Fig. 1과 같이 원목이 원목 저장고에서 이송대(guide rail)를 통하여 원형 톱에 전달되면, 연속적으로 설치되어 있는 여러 개의 원형 톱에 의해 측면이 고정된 상태에서 순차적으로 절단이 된다. 절단 중에 원형 톱의 구동모터에 과전류가 발생하면, 라인 운전이 중지되도록 제어부가 설계되어 있다. 원형 톱은 3550 rpm

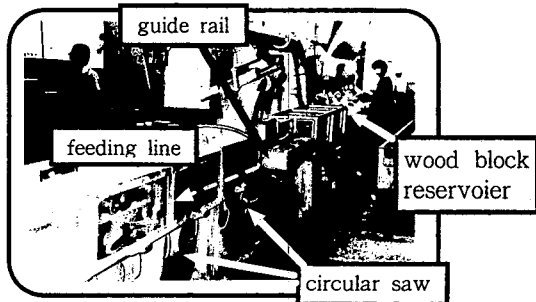


Fig. 1 Overview of factory line

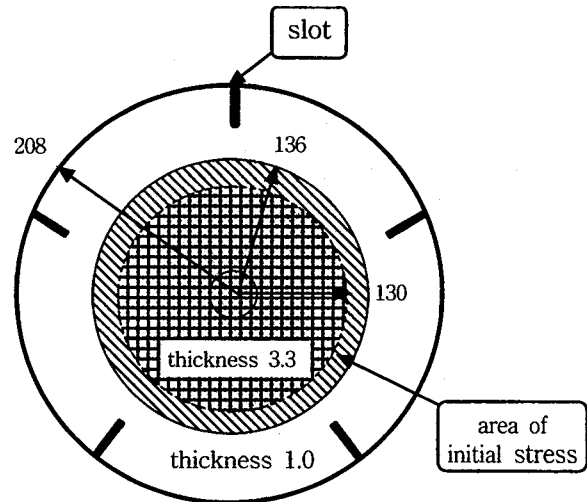


Fig. 2 Shape and dimension of circular saw : unit mm

으로 고속으로 회전되고, 모양과 크기는 Fig. 2와 같다. 외주에 있는 5개의 슬롯(slot)은 절단과정에서 발생하는 열로 인해 압축응력이 원주 근처에 생기지 않도록 하기 위하여 고안된 형상이다. 그리고 일반 탄소강으로 만들어진 원형 톱은 임계속도를 가능한 올리기 위하여 톱의 중간 환형부에 초기응력이 부가된 특수구조 형태로 되어있다.<sup>(1)</sup>

"kick-offs" 현상은 각 공정라인에서 평균 1~2회/시간 정도로 자주 발생한다. 불규칙적으로 발생하는 것을 고려하면 원형 톱의 특성과 함께 피절단재인 나무 블록의 특성과도 관련이 있음을 예상할 수 있다. 현장 조사에서도 대부분 "kick-offs"는 원목 블록의 결함(knot, crack 등)에 의해 시작되는 것을 확인할 수 있었다.<sup>(3)</sup>

### 2.2 임계속도 측정

회전 원판의 임계속도(critical speed) 근처에서 회전을 시키면 절단력에 의한 공진 또는 시스템 매개 불안정(parameter instability) 현상이 일어나므로,<sup>(6)</sup> 보통 임계 속도의 85% 이하에서 운전하도록 권장하고 있다.

현 공정에서의 회전 속도인 3550 rpm의 타당성을 확인하기 위하여, 회전 원판에 대한 모드 시험을 통하여 임계속도를 측정하였다. 공정라인의 회전 톱과 동일한 모델을 실험 라인에 설치한 뒤에 정지부터 작업 회전수 이상까지 회전 속도를 변화시키면서 회전 원판의 고유진동수를 측정하였다. Fig. 3의 실험 장치에서 볼 수 있듯이, 한 지점에 전자석 가진기(exciter)로 랜덤 가진(random excitation)을 하고

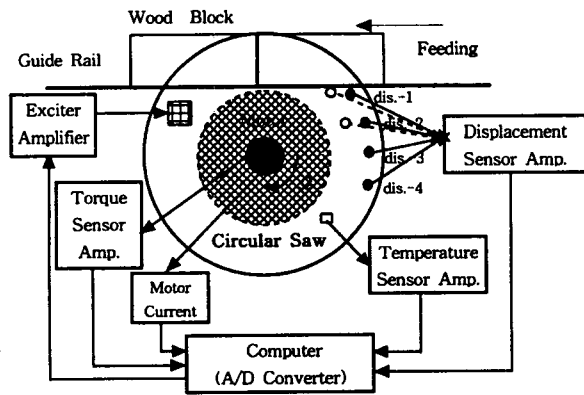


Fig. 3 Experimental setup

두 지점에서 와전류형 비접촉 변위 센서로 진동 변위를 측정하였다. 측정된 가진 입력전류와 변위를 신호분석기에서 신호처리하여 고유진동수를 구하였다. 원판의 전진파(forward traveling waves)와 후진파(backward traveling waves) 등의 모드 확인은 두 지점에서 측정된 변위의 위상 차이를<sup>(8)</sup> 이용하였다. 임계속도 근처에서는 후진파의 모드들이 인접되어 있을 뿐만 아니라 고속 회전으로 인한 잡음(noise)이 상대적으로 크기 때문에 정현파 가진(sinusoidal excitation) 방법도 혼합하여 고유진동수를 측정하였다.

Fig. 4는 회전 속도를 변화시키면서 원판의 전진파와 후진파의 고유진동수를 측정한 것이다.  $(m, n)$ 은  $m$ 개의 절원경(nodal circle)과  $n$ 개의 절직경(nodal diameter)을 가진 모드를 표시한 것이다.  $(m, n)F$ 와  $(m, n)B$ 은 각각  $(m, n)$ 모드의 전진파와 후진

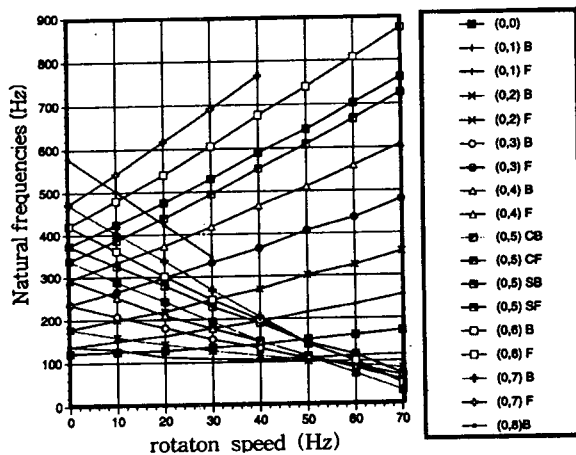


Fig. 4 Natural frequencies with the variation of rotation speed

파를 나타낸 것이고,  $(m, n)C$ 와  $(m, n)S$ 는 절직경이 각각 원판의 슬롯(slot) 위와 슬롯 사이에 있는 모드를 나타낸 것이다. 절직경을 가진 모드들은 회전 주파수에 따라 식 (1)과 같이 변한다.<sup>(9)</sup>

$$\omega_{mnf} = \omega_{mn0} + n\Omega + S(\Omega)$$

$$\omega_{mnb} = \omega_{mn0} - n\Omega + S(\Omega) \quad (1)$$

여기서  $\omega_{mn0}$ 은 정지 원판에서  $(m, n)$  모드의 고유진동수이고,  $\Omega$ 는 회전주파수이다.  $S(\Omega)$ 는 회전으로 인한 원심력이 고유진동수에 미치는 효과이다.

회전 톱의 슬롯이 5개가 있기 때문에 Fig. 4에서의  $(0,5)$  모드는 정지상태부터  $(0,5)C$ 와  $(0,5)S$ 로 분리된다. 중심 고정 원판(center-clamped disc)인 경우는 회전을 하게되면 원심력으로 인해 원판에 인장 응력(tensile stress)이 발생되므로, 전진파와 후진파 고유진동수의 평균치는 증가하는 것을 알 수 있다.

정지좌표계에서 원판의 고유진동수가 0이 되는 임계속도 근처에서는 몇 개 모드가 비슷하게 고유진동수 0에 수렴되는 것을 볼 수 있다. 실제 사용되는 톱이기 때문에 임계 속도 근처로 갈수록 진동이 매우 심해져서 임계속도를 정확하게 측정하지 못하였다. 그러나 Table 1에서 임계속도 아래에서의 고유진동수들의 변화를 살펴보면 임계 속도는 75~77 Hz 정도로 예상할 수 있고, 임계 모드는  $(0,7)B$  모드임을 알 수 있다. 그러므로 3550 rpm의 현재 회전 속도는 임계 속도의 77~80% 수준에 있으므로 85% 이하의 일반 설계기준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

### 2.3 정상 작업의 절단력 측정

정상 작업의 절단력 크기를 알아내고 절단력과 모터 입력전류간의 관계를 알아내기 위하여, 회전 톱의 구동 모터에 작용되는 비틀림 모멘트를 측정하였다. 실험라인에서 이송되는 나무블록에 미치는 절단력을 직접적으로 측정하는 것이 힘들기 때문에 비틀림 모멘트 센서를 Fig. 3과 같이 설치하였다.

Fig. 5는 정상 절단 전후에 원형 톱의 외주 두 지

Table 1 Backward traveling frequencies.

Rotation speed (Hz)	Frequencies (Hz)			
	(0,4)B	(0,5)CB	(0,6)B	(0,7)B
60	85	72	101	86
70	56	32	48	28
74	45	17	27	5

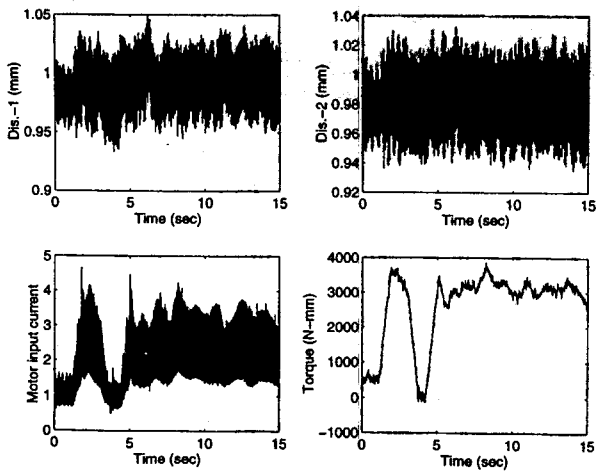


Fig. 5 Time measurements of displacements, motor current and motor torque at 90 blocks/min of feeding speed

점에서의 변위, 모터 전류 및 비틀림 모멘트의 변화를 보여준다. 절단 전후에 원판의 변위는  $\pm 0.02$  mm 범위 내에서 크게 변하지 않지만, 모터 전류와 비틀림 모멘트는 크게 변하는 것을 볼 수 있다. 3상 전원을 사용하기 때문에 모터 전류에 120 Hz 성분이 포함되어 있지만, 모터 전류의 저주파수 성분만 추출하면 비틀림 모멘트의 측정치와 비슷함을 알 수 있다. 그러므로 센서등의 부가장치가 필요로 하는 비틀림 모멘트 측정을 하지 않더라도 모터 전류를 측정하면 절단력을 간접적으로 추정할 수 있음을 알 수 있다. 또한 현재 최대 이송속도(90 block/min)에서 측정된 비틀림 모멘트를 이용하면, 접선방향의 절단력이 약 14~15 N정도가 됨을 알 수 있다.

#### 2.4 Kick-Offs 원형 톱의 온도와 변위 측정

"kick-offs"가 발생되면 가열된 원판의 온도가 압축 열응력을 발생시켜, 원판이 불안정하게 될 가능성이 있다. 원형 톱의 온도 분포를 알기 위하여 내주와 외주의 온도를 특수 제작된 온도센서를 이용하여 측정하였다. 회전체에 일반적으로 사용하는 적외선 온도센서는 고속 회전의 원판 주위에 발생하는 공기유동 때문에 정확하게 측정되지 못하였다.

정상 작업 동안은 대체적으로 내주와 외주간의 온도차이가  $10^{\circ}\text{C}$  이하이었고, kick-offs시는  $25^{\circ}\text{C}$  이하이었다.

현장 라인에서 가동되고 있는 원형 톱에 변위 센서를 Fig. 3과 같이 항상 설치한 뒤에 "kick-offs"가 일어날 때마다 컴퓨터의 신호처리장치를 이용하여

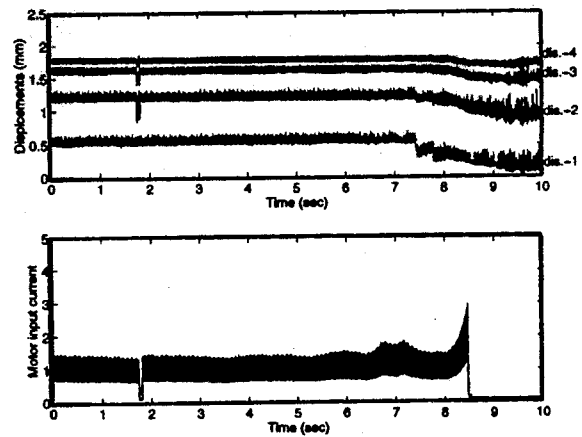


Fig. 6 Displacements with large amplitude near kick-off (type 2)

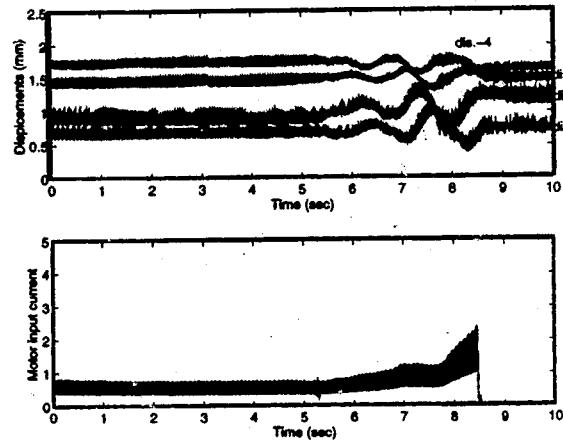


Fig. 7 Displacements with large amplitude near kick-off (type 3)

회전 원판의 변위를 습득(acquisition)하였다. 외주에 있는 5개의 슬롯의 영향 유무를 확인하기 위하여, 외주 근처의 네 지점(● 표시, Fig. 3)과 내주 근처의 두 지점(○ 표시, Fig. 3)에서 변위를 측정하였다.

외주 근처에서 측정된 "kick-offs"의 50개 데이터를 형태에 따라 분류하면, 큰 변위가 생기지 않는 경우, 큰 변위가 생기는 경우(Fig. 6) 및 불안정 모드가 발생하는 경우(Fig. 7)의 3종류로 분류할 수 있었다. Fig. 6의 형태에 해당하는 "kick-offs"는 상당히 많았지만, Fig. 7의 경우는 1개의 사건(event)만 발견되었다. Fig. 7의 불안정 모드는 위상 차이를 검출하면 (0,7)B 모드임을 확인할 수 있었다. "kick-offs"의 전후에 과다 변위의 주파수 변화를 살펴보기 위하여, Fig. 6의 시간 데이터를 시간별로 주파수 분석한 것을 Fig. 8에서 볼 수 있다. "kick-offs" 전

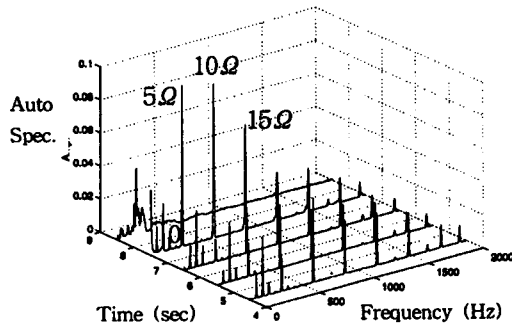


Fig. 8 Auto-spectrum of displacement at point 1

후에 0과 5Ω 배수성분이 급격하게 커짐을 확인할 수 있다. 이에 비해 내주에서 측정된 변위에서는 0 성분만이 급격하게 커졌다. 그래서 외주의 5Ω 배수성분의 변화를 슬롯으로 인해 발생하는 것으로 판단할 수도 있지만, "kick-offs" 전후에 급격한 변화를 고려하면 단순히 슬롯 통과로 인한 변위 센서에서 발생하는 신호는 아님을 알 수 있다. 외주에 있는 슬롯으로 인해 원판의 국부적 강성 차이가 발생하여 생기는 것으로 판단된다.

대체적으로 변위의 변화는 "kick-offs" 발생 전에 일어나므로 능동제어 또는 진단을 위해서 변위 측정이 효과적인 수단으로 판단된다. 또한 잡음을 고려하면 변위의 시간 데이터에서 주파수 0 또는 5Ω 배수성분만 대역 필터(bandwidth filter)로 추출하는 것이 효과적일 것이다.

### 3. 예상 요인의 분석

기존 연구들을 이용하여 얻은 원형 톱의 불안정 예상 요인들에 대해서, 앞에서 구한 실험치와 함께 수치해석을 수행하여 발생 가능성을 정량적으로 분석하고자 한다.

#### 3.1 절단력의 평면성분(In-Plane Component)에 의한 불안정성

절단력의 평면성분에 의해서 원판의 좌굴현상의 발생 가능성을 확인하기 위하여, 유한요소법을 이용하여 좌굴 분석을 하였다. 막강성(membrane stiffness)과 굽힘강성(bending stiffness)이 포함된 평판요소(plate element)를 이용하여, 182개 요소로 회전 톱을 모델링 한 뒤에 횡방향의 고유진동수를 계산하였다. Fig. 9는 절단각이 45°로 절단력이 원판에 압축

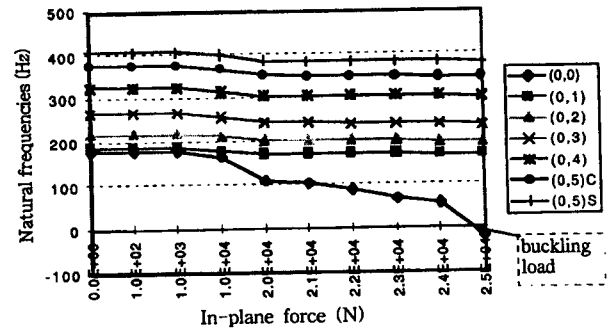


Fig. 9 The effect of in-plane forces on natural frequencies

력으로 작용할 때, 절단력의 평면성분 크기에 따라 원판의 고유진동수를 구한 것이다. 대부분 모드들은 100~1000 N까지는 거의 고유진동수가 변하지 않다가, 더 커지면 평면력 성분에 의한 압축 응력 때문에 고유진동수가 감소되기 시작한다. 특히 (0,0)모드는 평면력이 일정수준 이상 커지면 급격하게 감소되면서 약 25 kN 근처에서 좌굴현상이 일어난다. 앞에서 실험라인에서 측정된 절단력 크기가 14~15 N 임을 감안하면, 절단력에 의한 좌굴현상의 불가능성 뿐만 아니라 고유진동수에 대한 영향도 거의 없다고 판단된다.

#### 3.2 절단열에 의한 불안정성

절단열로 인한 열응력이 발생하여 임계속도가 감소되어 원판의 불안정성을 가져올 수 있다. 이것을 해석하기 위해서는 온도 분포가 필요한데, 현장에서 모든 영역의 온도 분포를 정확하게 측정하는 것이 매우 힘들다. 그래서 기존연구의<sup>(5)</sup> 실험데이터를 이용하여 구한 회전원판의 온도분포 함수를 이용하고, 실험에서 측정된 내주와 외주의 온도를 이용하여 현재 원판의 온도 분포를 추정한다. 식 (2)는 고속회전으로 절단할 때, 실험적으로 구한 축대칭형 온도분포 함수이다.

$$T(r) = T_a + T_b \left( \frac{r-a}{b-a} \right)^{1.5} \quad (2)$$

여기서  $r$ 은 임의 반경위치이고,  $a$ 와  $b$ 는 각각 원판의 내반경과 외반경이고,  $T_a$ 와  $T_b$ 는 각각 내반경과 외반경의 절대온도이다.

앞 절에서 이용한 유한요소법 프로그램을 이용하여 온도에 따른 원판의 고유진동수 변화를 조사하였다. 이 프로그램은 회전의 효과도 고려할 수 있는 프로그램이다. 유한요소법의 모델링은 앞 절과 동일

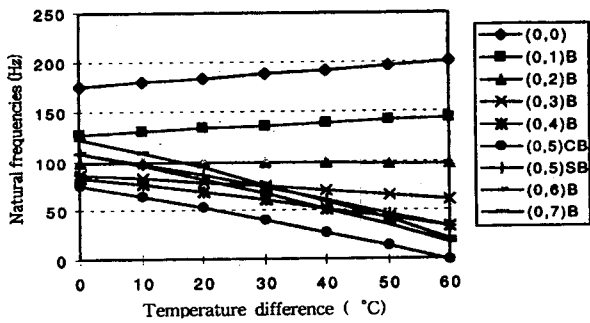


Fig. 10 The effect of temperature difference on natural frequencies of backward traveling wave

하게 평판요소 182개를 사용하였다. Fig. 10은 현재 회전수 3550 rpm에서 고려되는 원형 톱의 내주와 외주간의 온도차이에 따라 회전 원판의 고유진동수의 변화를 살펴본 것이다. 온도 차이가 적어도 60°C 이상이 되어야 현재 회전 속도가 임계 속도가 됨을 알 수 있다. 현장라인에서 측정한 내주와 외주간의 온도차이가 25°C이하임을 감안한다면 열에 의한 원판의 불안정성은 일어나기는 어렵다는 것을 알 수 있다.

3.3 피절단재의 동특성에 의한 불안정성

회전 톱의 굽힘 특성과 피절단재간의 동특성(질량, 감쇠, 강성) 간의 간섭으로 인해 매개 불안정(parametric instability)이 일어날 가능성이 있다. 기존연구들이 제기한 수치해석방법을 이용하여 정량적으로 확인하고자 한다.

회전좌표계 (r, θ)에서의 회전 원판에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + D^* \nabla^4 \frac{\partial w}{\partial t} + D \nabla^4 w = -\frac{1}{r} \delta(\theta - \Omega t) \delta(r - r_b) f_\theta \frac{\partial w}{r \partial \theta} \quad (3)$$

$$[m(\frac{\partial}{\partial t} + \Omega \frac{\partial}{\partial \theta})^2 w + c(\frac{\partial}{\partial t} + \Omega \frac{\partial}{\partial \theta}) w + kw]$$

여기서 w는 원판의 횡방향 변위이고, t는 시간이고, ρ와 h는 면적밀도와 두께이고, D\*와 D는 굴곡 점성계수와 굴곡 강성계수이고, Ω는 회전수이다. 그리고 r<sub>b</sub>는 피절단재의 반경방향 위치이고, m, c, k는 각각 절단재의 등가 질량, 등가 점성계수, 등가 강성계수이다.

불안정한 영역을 계산하기 위하여 multiple scale method<sup>(6)</sup>를 이용하였고, 실제 계산할 때는 기존프로

그램인 Maple를 이용하였다. 변수 불안정(parametric instability)은 축대칭 원판인 경우는 항상 임계속도 이상에서만 발생하지만, 현 모델처럼 비대칭 원판(asymmetrical circular plate)인 경우는 임계속도 아래에서도 발생할 수 있음을 증명한 연구결과가 있다.<sup>(6)</sup> 그러나 현재 모델에 대한 수치해석을 한 결과, 원판의 손실계수가 0.01%이상만 되어도 임계속도 아래에서는 불안정 현상이 일어날 수 없음을 확인하였다. 현재 회전속도는 임계속도의 77~80%밖에 되지 않으므로, 다른 요인에 의해서 원판의 임계 속도가 떨어지지 않는다면 피절단재의 동특성으로 인한 불안정성은 발생되기가 어렵다는 것을 판단할 수 있다.

3.4 추종력에 의한 불안정성

추종력(follower force)은 절단력 성분 중에 톱의 표면을 따라 발생하는 힘이다. 이러한 추종력은 브레이크, 터빈 등에 발생하여 시스템을 불안정하게 하는 경우가 있었다. 본 모델에서도 이러한 가능성을 확인하기 위하여 추종력이 있는 회전 원판의 운동방정식을 회전좌표계 (r, θ)에서 수립하였다.

$$\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + D^* \nabla^4 \frac{\partial w}{\partial t} + D \nabla^4 w = -\frac{1}{r} \delta(\theta - \Omega t) \delta(r - r_b) f_\theta \frac{\partial w}{r \partial \theta} \quad (4)$$

여기서 f<sub>θ</sub>는 추종력이다.

불안정 영역을 계산하기 위하여 앞 절과 마찬가지로 multiple scale method를 이용하였고, 기존프로그램인 Maple를 이용하였다. Fig. 11은 원판의 손실계수가 0.1%일 때 추종력 크기에 따라 각 모드별로

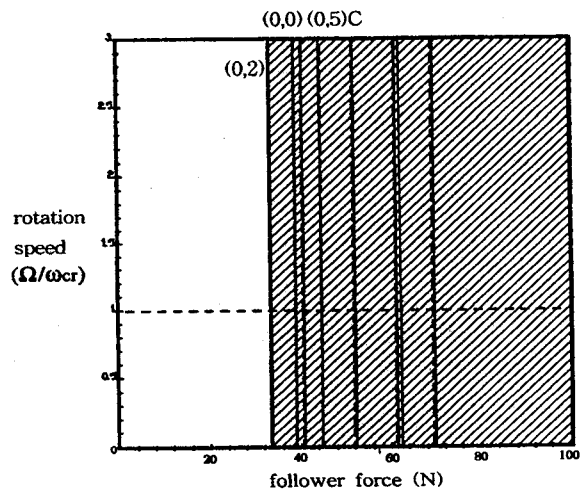


Fig. 11 Influence of follower force upon stability

Table 2 Characteristics of expected causes

Causes \ Characteristics	In-plane force	Heat	System parameters of material	Follower force
Rotation speed of occurrence	Critical speed ( $\Omega = \Omega_{cr}$ )	Critical speed ( $\Omega = \Omega_{cr}$ )	Particular speeds ( $\Omega = \frac{\omega_{mn} \pm \omega_{pl}}{n-1}$ )	Any speed
Main frequency components of displacements	$0, 2p \Omega_{cr}^*$	$0, 2p \Omega_{cr}$	$\omega_{mn} \pm n\Omega$ $\omega_{kl} \pm l\Omega$	$5 \Omega$ (i: integer)

\*  $\Omega_{cr}$  : Critical speed,

p : Number of nodal diameter of critical mode

불안정한 회전수 영역을 표시한 것이다. 추종력이 커지면 (0,2)모드부터 불안정하게 되면서 다른 모드들도 불안정하게 된다. 또한 특정한 회전수에 발생하는 매개 불안정(parametric instability)과 달리 모든 회전수 영역에서 불안정한 현상이 발생될 수 있다.

각 요인에 대해서 기존연구들을 조사하면, 불안정 영역의 회전수와 불안정 변위의 주파수 성분은 Table 2와 같다. 이 결과와 각 요인을 분석한 내용을 종합적으로 고려하면 "kick-offs"는 나무 블록의 결합에 의해 시작되어서 최종적으로 추종력이 주요 요인이 되어서 발생된 것으로 판단된다.

따라서 다음과 같은 대책을 생각할 수 있다. 우선 원목의 품질 관리를 위하여 원목 이송부의 시작 위치에서 나무의 결합을 탐지하는 자동화 장치를 설치한다. 또한 급격한 변위로 인한 원목과 톱의 접촉현상을 가능한 막기 위하여, 전자석 가진기로 제어하는 능동제어 장치를 설치하거나 저마찰의 구속판을 설치하는 것이 필요하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

고속 절단 공정에서 일어나는 불안정 현상인 "kick-offs"에 대해서 고유진동수, 절단력, 온도 및 진동 변위의 측정과 함께, 유한요소법 및 안정성 해석의 수치해석을 통하여 주 요인을 확인하였다. 본 연구에서 검토한 "kick-offs"는 원목의 결합으로 인해 추종력이 발생되면서 원판이 불안정하게 되는 현상으로 판단되었다.

본 연구에서 제기한 분석방법 및 대책은 유사한 문제가 발생하는 일반 절단 원판에서도 적용될 수 있는 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 1996년도 후반기 해외 Post-doc 연수지원에 의하여 연구된 결과이며, 재단의 연수 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Mote, Jr. C. D., 1965, "Free Vibration of Initially Stressed Circular Disks," Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 87, pp. 258~264.
- (2) Rim, Kyung-Hwa and Lee, Chong-Won, 1993, "Free Vibration of Outer-Clamped Annular Plates Subject to Arbitrary In-Plane Force," Journal of Sound and Vibration, Vol. 166(2), pp. 237~253.
- (3) McKenzie, W. M., 1995, Saw Behavior Leading to Excessive Runout and Removal, Technical Report of California Cedar Products Company.
- (4) Radcliffe, Clark J. and Mote, Jr. C. D., 1975, "Stability of Stationary and Rotating Discs under Edge Load," Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, pp. 567~574.
- (5) Neih, L. T., 1972, Rotating Disc Stability Spectral Analysis and Thermal Effects, Ph. D. thesis.
- (6) Shen, I. Y. and Mote, Jr. C. D., "Parametric Excitation under Multiple Excitation Parameters: Asymmetric Plates under a Rotating Spring," 1992, Int. J. Solids Structures, Vol. 29(8), pp. 1019~1032.
- (7) Chan, S. M., Mottershead, J. E. and

Cartmell, M. P., 1994, "Parametric Resonances at Subcritical Speeds in Discs with Rotating Frictional Loads," J. of Mechanical Engineering Science, Vol. 208, pp. 417~425.

(8) Ahn, T. K. and Mote, Jr. C. D., 1996, Monitoring and Preventing the Kick-off during

Cutting, Technical Report of California Cedar Products Company.

(9) 김명업, 임경화, 이종원, 1992, "웨이퍼 가공기의 진동해석 및 실험적 검증," 대한기계학회지, 제 16 권, 제 1 호, pp. 22~30.