

고속 회전 톱의 불안정 현상에 대한 진단

°임 경 화*, C. D. Mote, Jr.**

Diagnosis on Unstable Phenomenon of High-Speed Rotating Circular Saws

K. H. Rim and C. D. Mote, Jr.

ABSTRACT

In the tandem pencil slat saw lines, feeding of cedar blocks is often stopped because excessive motor current is required in a saw machine. These events are called "kickoffs" in factory lines. Kickoffs decrease productivity due to machine down-time and damage to saw blades often accompanies them. Researches on saw behavior at kickoff are required to understand and reduce the frequency and severity of kickoff events. This research aims at understanding the fundamental mechanisms of kickoffs during cutting, predicting the impending kickoff and evolving design improvements for high cutting performance with fewer and less severe kickoffs.

1. 서론

원형 톱, 하드디스크, 광 메모리 시스템 등에 있는 회전 원판의 안정성은 시스템 성능 관점에서 매우 중요한 특성이다. 특히 원형 톱의 불안정성은 생산성 향상을 위해 회전속도가 고속화됨에 따라 작업 공정에서 수시로 발생하는 경우가 있다⁽¹⁻²⁾.

본 연구는 미국 캘리포니아 Cedar Product 회사의 나무 절단 공정에서 발생해 왔던 원형 톱의 불안정성에 대해서 조사를 정확하게 함으로써 적절한 대책을 세우는 데 목적이 있다. 원형 톱의 불안정성을 야기할 수 있는 예상요인에 대해서 지금까지 많은 연구를 해왔다. 관련 공정 시스템의 상태를 고려하면, 주요한 예상요인으로 회전 원판의 임계 속도(critical speed)를 낮추는 절단 열 효과⁽³⁾, 절단재 강성과 점성 특성에 의한 매개 불안정(parametric instability) 효과⁽⁴⁾, 절단력에 의한 좌굴 효과⁽⁵⁻⁶⁾, 절단력의 추종성분에 의한 불안정 효과⁽⁴⁾ 등을 생각할 수 있다. 본 연구의 조사방법은 현재 원판의 고유진동수, 등가 절단력 및 불안정시 진동 특성을 측정함으로

써 고려된 회전 원판의 동특성을 우선 파악한다. 그리고 이 실험데이터를 근거로 하여 예상 요인들에 대해서 각각 수치해석을 통하여 요인의 가능성을 확인한다.

2. 시스템 파악

미국 회사의 공정 라인은 원목 블록(wood block)을 여러 개의 얇은 나무판으로 절단하기 위하여, 한 공정에 10개 원형 톱을 연속적으로 설치되어 있다. 나무 블록은 이송 벨트에 의하여 자동 공급되고, 원형 톱의 구동모터는 3상 교류 모터로서 3550rpm으로 회전한다. 절단시 원판 불안정 등에 의해 모터에 과전류가 걸리면 자동으로 이송 작업이 중단된다. 이러한 작업 중단을 "kickoffs" 라고 한다. 대체적으로 "kickoffs" 현상은 각 공정 라인에서 시간당 1-2회, 각 원형 톱에서 1일당 1-2회 정도로 빈번하게 발생되고 있다. "kickoffs"에 대한 진단을 하기 위하여 현장 데이터의 조사, 원판의 임계 속도 측정, 절단력 측정 및 원판의 변위 측정을 한다.

2-1. "kickoffs" 현장 데이터의 조사

"kickoffs" 현상이 불규칙적으로 발생함에 따라,

* 한국기술교육대학교 제어기계공학과

** U. C. Berkeley, Dept. of Mech. Eng.

나무 블록의 결합에 의해 문제가 될 수 있음을 예상할 수 있다. 이에 따라 작업라인에서 “kickoffs”가 일어날 때, 블록의 상태를 검사 한 자료⁽¹⁾를 분석하였다. Table 1에서 볼 수 있듯이 “kickoffs”는 원목의 결합과 대부분 관련이 있었다. 즉 대부분의 원판 불안정은 원목의 결합에 의해 유발된 뒤에 원판의 동적 특성과 연결되어 여러 형태로 “kickoffs”이 발생됨을 알 수 있었다.

Table 1. Trigger feature

Triggering events	Count
knots	22
wane, shim	10
saw flutter	2
colored wood	3
cracks in bottom	1
flower grain	2
no evidence	3
Total	44

또한 “kickoffs”시 원판의 동적 거동을 파악하기 위하여, “kickoffs”직후에 원판 상태를 검사한 작업 기록표를 조사하였다. Table 2에서 볼 수 있듯이 작은 원판의 동적 변위가 발생한 사건(a serial kickoff)에 비해 큰 동적 변위가 발생한 사건(snakes, blue spots, brown spots, bent)이 상대적으로 많았다. 그래서 본 연구에서는 “kickoffs”현상 중에서도 원판 변위가 큰 경우, 즉 원판의 불안정한 경우에 국한해서 조사하기로 하였다.

Table 2. Reasons changed

Reasons changed	Count (%)
a serial kickoff	37
snakes	30
blue spot	6
brown spot	2
rough	9.5
no teeth	14
bent	1
pull	0.5
Total	100

2-2. 원판의 임계 속도 측정

현 공정에서의 회전 속도 3550rpm에 대해 원판의 설계 적절성을 조사하기 위하여 현재 사용되

고 있는 원판의 임계 속도를 측정하였다. 공정라인의 회전 톱과 동일한 치수와 경계조건을 갖는 원판 시스템을 실험실에 설치한 뒤에 회전속도를 변화시키면서 원판의 고유진동수를 측정하였다. Fig. 1처럼 한 지점에서 전자기 가진기로 랜덤 가진하고 두 지점에서 변위 센서로 동적 변위를 측정하는데, 신호 분석기를 이용하여 회전 원판의 전달함수를 구하였다. 원판의 모드 형상은 원판 전진파(forward travelling waves) 또는 후진파(backward travelling waves)에 대한 두 지점의 위상 차이⁽²⁾를 이용하여 확인하였다. Fig. 2는 회전 속도에 따라 원판의 전진파와 후진파의 고유진동수를 측정 한 것이다. (m,n)은 m개의 절원경(nodal circle)과 n개의 절직경(nodal diameter)을 가진 모드를 표시한 것이다. (m,n)F와 (m,n)B은 각각 (m,n) 모드의 전진파와 후진파이고, (m,n)C과 (m,n)S은 각각 절직경이 원판의 슬롯(slot) 상과 슬롯 사이에 있는 모드이다. Table 3은 임계 속도 근처에서 측정 한 고유진동수인데, 고유진동수의 변화를 생각하면 임계 속도는 75-77Hz 정도가 되고 임계 모드는 (0,5)CB, (0,6)B, (0,7)B 모드 들 중에 하나가 될 것으로 예상된다. 지금까지 관련 회사에서는 (0,4) 모드가 임계 모드로 인식하고 있었으므로, 원판에 대한 설계 방법이 재검토되어야 한다. 현재 회전 속도가 3550rpm임을 고려하면 임계속도는 회전속도의 85-87 % 수준에 있음을 확인할 수 있다.

Table 3 Natural frequencies around critical speed

rotation speed (Hz)	natural 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

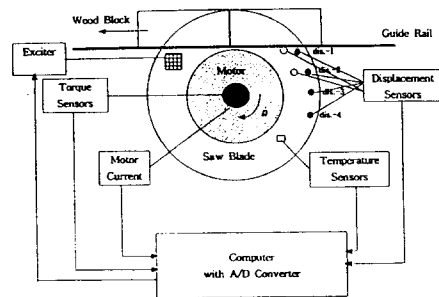


Fig. 1 실험 장치.

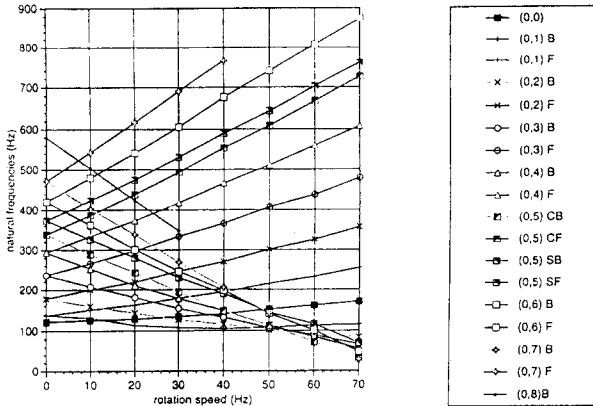


Fig. 2 회전 속도 변화에 대한 고유진동수 변화

2-3. 절단력 측정

현장 라인과 흡사하게 만든 시험 라인에서 비틀림 모멘트 측정(torque measurement)을 통하여 원판 접선방향의 등가 절단력을 측정하였다. 비틀림 모멘트 측정기는 Fig. 1과 같이 설치한 뒤에 이송속도를 변화시키면서 정상 작업 조건에서 모터 입력 전류와 비틀림 모멘트를 측정하였다. 시험 라인에서는 “kickoffs” 현상을 만들기가 어려워서 정상 작업에서만 측정하였다. Fig. 3은 절단 전후에 외주 근처의 원판 변위, 모터 전류 및 모터 비틀림 모멘트를 측정한 것인데, 절단이 시작되면서 동적 변위는 ± 0.02 mm 범위 내에서 크게 변하지 않지만, 모터 전류와 모멘트는 유사한 형태로 증가하고 있다. 즉 모터 전류의 저주파수 성분으로 모멘트 변화를 예측할 수 있음을 알 수 있다. Table 4는 이송 속도 변화에 따른 절단력의 크기를 살펴본 것인데, 예상과 달리 이송속도 따라 크게 변하지 않고, 현 이송 속도(90 block/min)에서는 접선 방향의 등가 절단력의 크기는 약 14-15 N 정도이다.

Table 4. The effect of feed rate on cutting force

feeding rate (block/min)	torque (N*mm)	equivalent cutting force at the rim (N)
50	2500	12.0
70	2800	13.4
90	3000	14.4

2-4. 원판 불안정시 원판의 변위 측정

현장 공정에 가동되고 있는 원형 톱에 변위 센서를 Fig. 1과 같이 설치한 뒤에 모터 입력 전류가 커지면서 원판 불안정이 예상될 때, Trigger신호를 이용하여 컴퓨터에서 원판의 변위들을 측정하였다. 원판 불안정시 그 순간의 원판 동적 거동을 파악하기 위하여 내주의 두 지점과 외주의 네 지점에서 변위를 측정하였다. 측정한 원판의 외주 부위에 5개 슬롯(slot)이 등간격으로 배치되어 있으므로, 외주에서 변위를 측정하는 경우는 슬롯의 영향이 있을 것으로 예상되었다. 그래서 슬롯 영향이 없는 내주에서도 변위를 측정하였다. Fig. 4-1은 원판 불안정시 외주 지점에서 측정한 변위와 모터 전류의 변화를 보여주고 있다. 모터 입력 전류는 변위의 급격한 변화에 따라 약 1초 동안 증가하면서 원판 불안정이 되는 것을 알 수 있다. 또한 절단 부위에 제일 가까운 위치 1의 변위는 상당히 변하는 것에 비해 다른 위치의 변위는 상대적으로 작다. Fig. 4-2는 위치 1의 변위를 원판 불안정 시점(약 8.5 초) 근처에서 시간에 따라 주파수 성분을 조사한 그림이다. 원판 불안정 근처에서 정적 성분과 5Ω 성분이 급격하게 커짐을 확인할 수 있다. 그러나 내주에서 측정한 변위는 Fig. 5-1과 Fig. 5-2 처럼 5Ω 성분이 커지는 현상은 없다. 이러한 현상 차이를 변위 센서에 대한 슬롯 효과로 볼 수도 있지만 특정한 시점에서 5Ω 성분의 급격한 변화를 생각하면 슬롯의 효과는 아닌 것으로 판단된다. 다만 슬롯으로 인해 국부적 강성 차이로 인해 발생하는 것으로 판단된다.

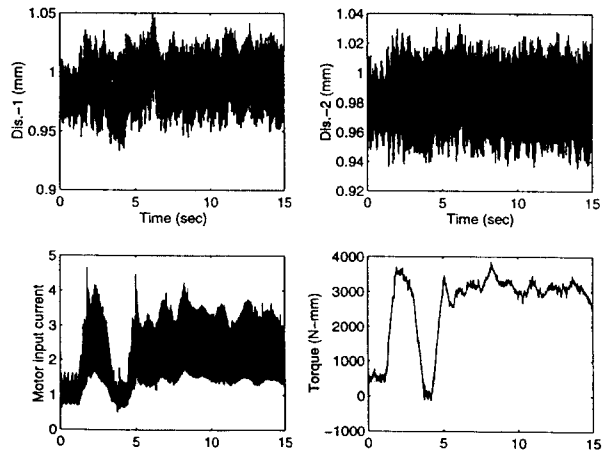


Fig. 3 정상 작업에서의 진동 변위, 모터 전류 및 모터 비틀림.

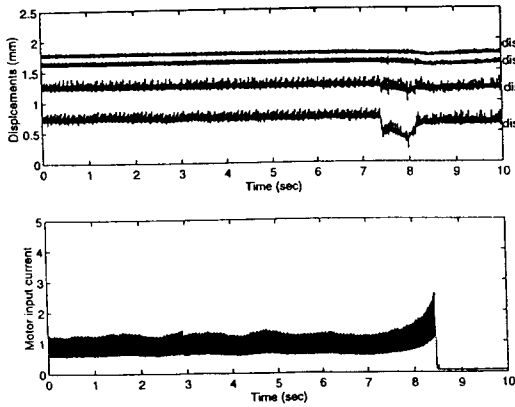


Fig. 4-1 외주에서의 동적 거동과 모터 입력 전류.

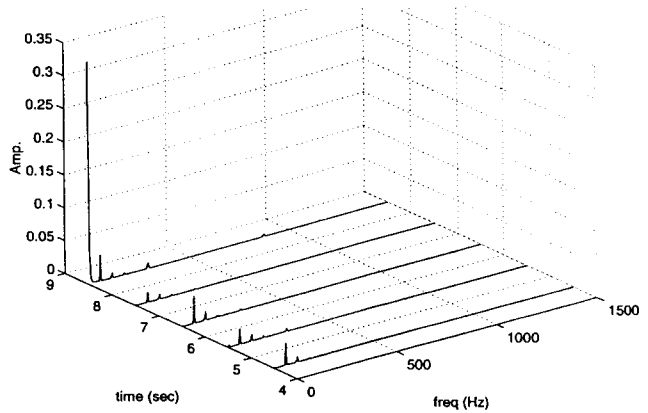


Fig. 5-2 내주 위치1의 변위 스펙트럼.

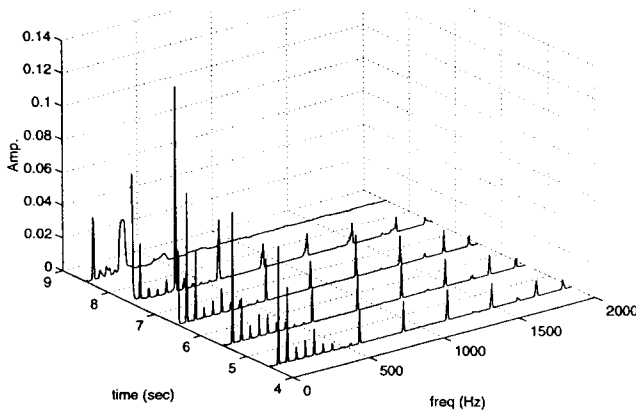


Fig. 4-2 외주 위치1의 변위 스펙트럼.

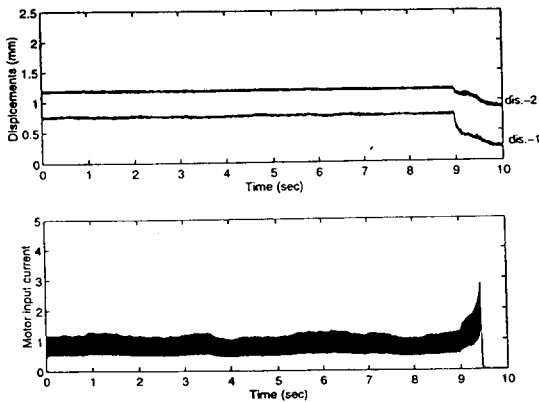


Fig. 5-1 내주에서의 동적 거동과 모터 입력 전류.

3. 예상 요인 분석

시스템 파악을 통하여 원판 불안정이 일어나는 형태는 Fig. 6 처럼 분류할 수 있다. 각 예상 요인에 대해서 수학적 모델을 이용하여 정량적으로 검증하고자 한다. 회전원판과 절단으로 발생하는 요인들에 대해서 Fig. 7 처럼 모델링 할 수 있다.

3.1 피절단재의 매개변수에 의한 안정성 분석

피절단재의 매개변수(질량, 감쇠계수, 강성) 간섭으로 인한 원판의 안정성을 분석하기 위하여 회전 원판에 대한 운동 방정식을 회전 좌표계에서 다음과 같이 세울 수 있다.

$$\begin{aligned} & \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + D^* \nabla^4 \frac{\partial w}{\partial t} + D \nabla^4 w \\ & = -\frac{1}{r} \delta(\theta - \Omega t) \delta(r - r_0) \left[m \left(\frac{\partial}{\partial t} + \Omega \frac{\partial}{\partial \theta} \right)^2 w \right. \\ & \quad \left. + c \left(\frac{\partial}{\partial t} + \Omega \frac{\partial}{\partial \theta} \right) w + k w \right] \quad (1) \end{aligned}$$

여기서 w 는 원판의 변위, t 는 시간, ρ 와 h 는 면적 밀도와 두께이고, D^* 와 D 는 굴곡 점성계수와 굴곡 강성계수이고, Ω 는 회전수이다. 그리고 m , c , k 는 각각 절단재의 등가 질량, 점성계수, 강성이다.

불안정 영역을 구하기 위하여 multiple scale

방법을 적용하면 불안정 영역을 구할 수 있다. 원판의 감쇠계수가 매우 작은 경우(손실계수 0.01% 이하)는 임계속도보다 작은 회전 속도 영역에서도 불안정 현상이 일어날 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 실제 공정 상에서 예상되는 원판의 감쇠계수를 고려하면 사실상 임계속도 아래에서 불안정 현상이 일어나기는 매우 어렵다는 것을 알 수 있다. 현재 회전속도는 임계속도의 85% 정도밖에 되지 않으므로 임계속도를 낮추는 다른 영향이 없다면, 피절단재의 매개변수로 인한 불안정성은 발생하기가 매우 어렵다.

3.2 절단 열에 의한 안정성 분석

원목을 절단하는 과정에서 열이 발생되면, 원판의 온도가 상승하게 된다. 대체적으로 온도 분포 형태는 Fig. 7 형태로 온도 기울기가 발생한다. 유한요소법을 통하여 이러한 온도 기울기가 원판의 고유진동수에 미치는 효과를 조사하였다. 원판을 182 요소(element)로 유한요소법 모델링을 하였고, 슬롯 효과와 회전 효과를 고려하였다. Fig. 8는 원판 내주와 외주의 온도 차이에 따라 고유진동수 변화를 살펴보았다. 약 60° C 정도 차이가 나면 (0,5)CB 모드의 고유진동수가 0, 즉 임계 모드가 됨을 알 수 있다. 그러나 실제 현장에서 간단한 측정을 통하여 예상되는 온도 차이는 60° C 보다 훨씬 작으므로 절단 열에 의한 불안정 현상의 발생은 매우 어려울 것으로 예상된다.

3.3 평면 절단력에 의한 안정성 분석

Fig. 7 처럼 절단력의 평면 성분에 의한 좌굴 현상의 불안정성을 조사하기 위하여, 유한요소법을 이용하여 조사하였다. 절단력의 각도는 반경에 대해 45° 로 가정하고 각 모드의 고유진동수를 구하였다. Fig. 9는 평면 절단력 크기에 대한 각 모드의 고유진동수 변화를 표시한 것인데, 첫 번째 좌굴 모드는 (0,0) 모드로서 좌굴력(buckling load)이 25 kN 정도 되는 것을 확인하였다. 앞에서 정상 작업시 접선 방향의 등가 절단력 성분이 14-15 N 이었던 사실을 고려하면, 절단력에 의한 좌굴 현상은 일어날 수 없음을 알 수 있다.

3.4 추종력에 의한 안정성 분석

원판 표면을 추종하는 절단력 성분을 고려하면 다음과 같이 운동방정식을 만들 수 있다.

$$\rho h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + D^* \nabla^4 \frac{\partial W}{\partial t} + D \nabla^4 W = -\frac{1}{r} \delta(\theta - \Omega t) \delta(r - r_0) f_\theta \frac{\partial W}{r \partial \theta} \quad (2)$$

여기서 f_θ 는 원판 면을 추종하는 절단력 성분(follower force)이다. 안정성 분석을 위하여 Multi-scale 방법을 적용하였다. Fig. 10은 무차원 추종력의 크기에 따라 원판의 안정성을 보여주고 있다. 원판의 감쇠 정도에 따라 불안정성이 발생하는 것을 보여주고 있다.

각 원인 분석의 결과를 고려하면, 예상요인들 중에 추종력이 주요인으로 판단된다.

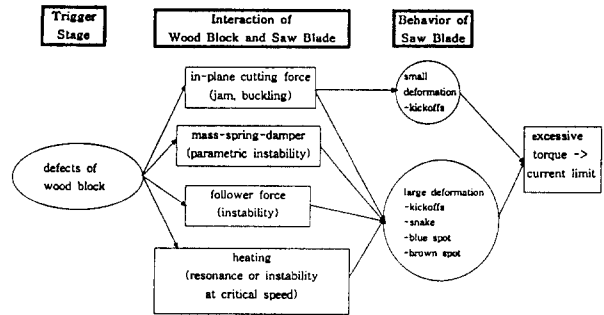


Fig. 6 원판 불안정 현상의 분석.

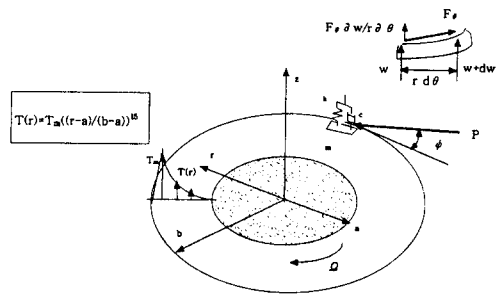


Fig. 7 원판과 피절단재 효과에 대한 모델링.

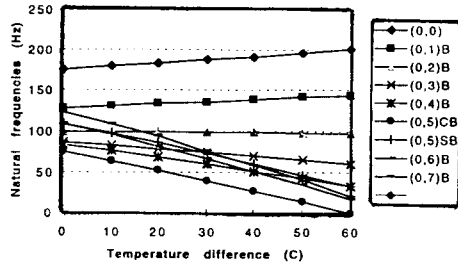


Fig. 8 축대칭 형태의 온도 구배에 대한 고유진동수 변화

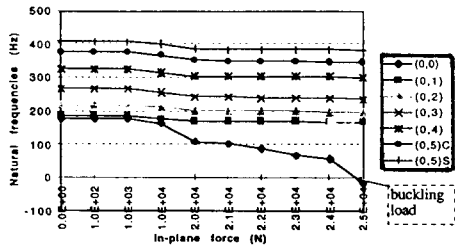


Fig. 9 평면 절단력(in-plane cutting force)에 의한 고유진동수 변화

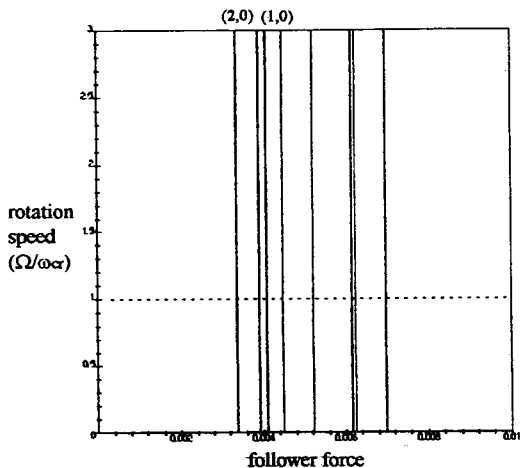


Fig. 10 절단 추종력에 의한 원판의 안정성 영역 ; 손실계수 0.1%.

4. 대책

1) 나무 품질 관리

나무 결함으로 인해 대부분의 원판의 불안정성이 발생되므로, 결함이 많은 나무 블록들은 이송(feeding)이 되지 않도록 한다. 즉 나무의 결함을 확인할 수 있는 장치를 이송 장치 앞에 설치한다.

2) 구속판(constraint plate) 설치

추종력으로 인해 원판의 불안정이 발생하는 경우는 초기 변위가 커지기 전에 제한하면 효과적일 수 있다. 그래서 절단 위치 근처의 외주에 마찰계수가 작은 구속판을 설치하면 원판의 불안정 회수를 감소시킬 수 있을 것이다.

3) 원판의 최적 설계

임계 모드가 (0,5)C, (0,6) 및 (0,7) 중에 하나일 것이므로, 현재 (0,4)모드를 최대한 올리기 위한 초기 응력 분포를 재검토해야 할 것이다.

4) 능동제어 장치 설치

절단위치 직후의 외주에서 측정된 변위를 측정하여 능동제어로 변위를 제어한다. 변위가 커진 뒤 1-1.5초 후에 작업이 중단되므로 반응 속도가 빠른 액츄에이터를 이용해야 한다.

5. 결론

현장에 일어나고 있는 원판의 불안정 현상을 예상될 수 있는 요인을 설정하고, 관련된 이론을 적용하여 체계적으로 주요 요인을 분석하였다. 그리고 현장 공정에 적용할 수 있는 대책을 제안하였다.

참고문헌

1. W. M. McKenzie, "Saw Behavior Leading to Excessive Runout and Removal," Technical Report of California Cedar Products Company, 1995.
2. 안태길, C. D. Mote, Jr., "회전원판의 진동 특성 감시," 한국소음진동공학회 추계학술대회, pp. 438-442, 1996.

3. L. T. Neigh, "Rotating Disc Stability Spectral Analysis and Thermal Effects," Ph. D. Thesis, 1972.
4. S. N. Chan, J. E. Mottershead and M. P. Cartmell, "Parametric Resonances at Subcritical Speeds in Discs with Rotating Frictional Loads," Proc. Instn. Mech., Vol. 208, pp. 417-425, 1994.
5. C. D. Mote, Jr., "Edge Loading in Rotating Disc Critical Speed Analysis," University California Forest Products Laboratory, Technical Report, No 1, 1974.
6. Clark J. Radcliffe and C. D. Mote, Jr., "Stability of Stationary and Rotating Discs under Edge Load," Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, pp. 567-574, 1975.