

리튬이온 전지용 슬리터의 구조안정화 설계

이태훈*·노승훈**†·윤현진**·김영조***·김건형****·김동욱*****

*금오공과대학교 대학원, **†금오공과대학교 기계시스템공학과, ***구미대학교 기계공학과
**** 위드, ***** 국방과학연구소

Structural Design of a Li-Ion Battery Slitting Machine for the Improved Stability

Tae Hoon Lee*, Seung Hoon Ro**†, Hyun Jin Yoon**, Young Jo Kim***,
Geon Hyeong Kim**** and Dong Wook Kim*****

*Graduate School, Kumoh National Institute of Technology,

**†Dept. of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology,

***Dept. of Mechanical Engineering, Gumi University

****With co.

*****Agency for Defense Development

ABSTRACT

Slitting, which is supposed to be one of the most critical processes in Li-Ion battery manufacturing, is supposed to cut off the uncoated parts of the foil, and cut the wide foils into the size of the Li-ion batteries. Vibrations of slitting machines are the most critical factors for uneven cut surface such as surface roughness and burr, which are the main reasons of the tearing of microporous membranes to separate the cathodes and the anodes, and eventually causing explosion of the batteries. In this study, the structure of a slitting machine has been analyzed through computer simulations to figure out the main reasons of the vibrations. The result of the study shows that simple design alterations of the supporting area and roller without modifying the main structure of the machine can suppress the vibrations effectively, and further to prevent the devastating explosion.

Key Words : Li-Ion Battery, Slitting Machine, Design alterations, Improved stability, Explosion

1. 서 론

현재 세계는 화석연료 고갈에 대응하기 위하여 대체 에너지원의 개발에 대한 필요성이 높아지고 있으며 '교토 의정서 국제협약'에 기준하여 대기오염 해소 및 이산화탄소 가스 감축 필요로 인해 신재생에너지사업 분야가 각광받고 있다.

신재생에너지의 한 분야인 리튬이온 전지는 노트북, 휴

대폰 등 휴대용 IT기기뿐만 아니라 수송기계, 산업용기기, 전동공구 및 전기자동차의 에너지원으로 사용되는 등 사회 전반의 여러 분야에서 활용되고 있다.

리튬이온 전지의 제조공정은 Fig. 1과 같이 크게 전극제조공정과 셀 조립공정 그리고 포메이션공정으로 분류되며 본 논문의 주제인 슬리터는 전극제조공정의 핵심공정 장비이다.[1]

† E-mail: shro@kumoh.ac.kr

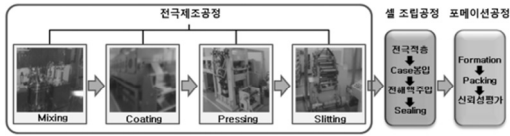


Fig. 1. Li-Ion battery manufacturing process.

리튬이온 전지 제조과정 중 슬리팅 공정은 Fig 2의 (a)와 같이 양극재 및 음극재가 코팅된 호일에서 코팅이 되지 않은 양 끝부분을 절단하는 공정과 (b)와 같이 광폭의 호일을 낱개의 리튬이온 전지용 크기로 자르는 공정으로 가공 중 장비 진동에 의해 (c)와 같이 절단면이 거칠어지면서 발생된 버(burr)에 의해 양극과 음극을 분리하는 미세다공성 고분자 필름인 분리막이 찢어지게 되면 양극과 음극이 서로 맞닿아 전기가 폭발하는 위험성이 있어 버가 발생되지 않도록 진동제어를 통한 정밀한 절단기술이 요구된다. 또한, 장비의 진동은 가공 정도를 저하시킬 뿐만 아니라 장비의 내구성에도 영향을 미치므로 본 논문에서는 장비의 진동제어를 통한 장비 안정성 및 가공 정도 향상을 목표로 진행하였다.

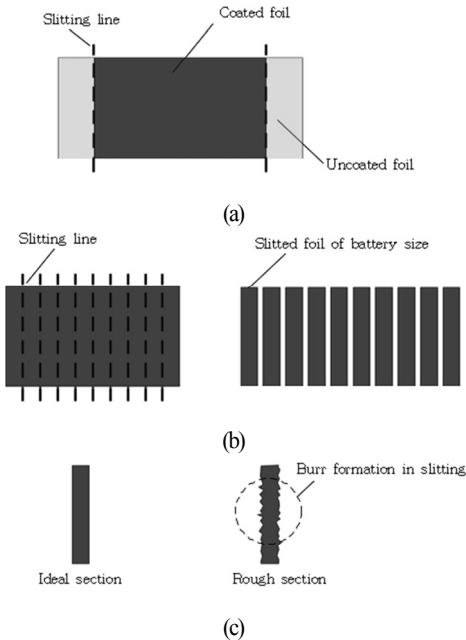


Fig. 2. Slitting procedures.

컴퓨터 시뮬레이션 모델을 구현하고 동특성 분석결과를 바탕으로 큰 진동의 원인을 분석하여 이를 개선할 수 있는 설계 변경안을 도출하였다.

도출된 설계 변경안을 시뮬레이션 모델에 적용해 개선 효과를 확인하는 과정을 거쳐 최종 설계 개선안을 확정하였다.[2]

2. 장비의 동특성 분석

2.1 진동의 이론적 분석

일반적으로 기계 구조물은 모터, 플라이휠, 스프링, 축 등과 같은 회전체의 회전중심과 질량중심 사이에 편심이 존재하면 회전과 함께 원심력이 자연 발생되어 진동이 발생하게 된다.[1]

리튬이온 전지용 슬리터의 경우 모터의 작동진동수가 ω , 구조물의 질량, 감쇠, 강성이 각각 m, c, k 일 때 구조물을 1자유도계로 가정하면 진동은 아래의 식과 같은 운동방정식으로 표현된다. 또한, 가진력의 크기 f_0 는 회전체의 질량 m , 편심량 e 및 회전각속도 ω 에 의해 결정되는 원심력에 해당된다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f_0 \sin \omega t, \quad f_0 = m\omega e^2$$

위 미분방정식의 해를 구하면 다음과 같고

$$x(t) = X \sin(\omega t - \phi)$$

진동의 크기는 아래와 같이 표현된다.

$$X = \frac{f_0/k}{\sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2)^2 + (2\zeta \frac{\omega}{\omega_n})^2}} \approx \frac{f_0/k}{|1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2|}$$

위 식에서 ζ 는 일반적으로 작은 값으로 무시할 수 있으며 내부 가진원의 작동진동수(ω)가 구조물의 고유진동수 ($\omega_n = \sqrt{k/m}$)와 일치하게 되면 위 식의 분모가 0에 근접하여 매우 큰 진동이 유발되며 이 경우를 공진이라 한다. 따라서 리튬이온 전지용 슬리터의 진동을 억제하기 위해서는 구조물의 회전부위의 작동진동수 및 고유진동수를 파악하여 이 값들이 근접한 경우 구조물의 고유진동수 변경을 통하여 작동진동수와 고유진동수 간의 공진이 억제되도록 설계하여야 한다.[3]

2.2 유한요소해석(FEM)을 이용한 모델링

구조물의 진동 특성을 분석하기 위하여 구조물 전체 및 각 부위 요소들의 진동 상태를 유한요소해석을 통하여 규명한다. 즉, 시뮬레이션 모델을 구현하고 해석을 통하여 얻은 시뮬레이션 결과를 분석하여 기계 구조물 전

체와 내부 요소들의 진동 상태를 분석한다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 개선안을 도출하여 시뮬레이션 모델에 적용하고 그 결과를 확인하는 과정을 반복하여 효과가 큰 최적 설계 개선안을 완성할 수 있다.

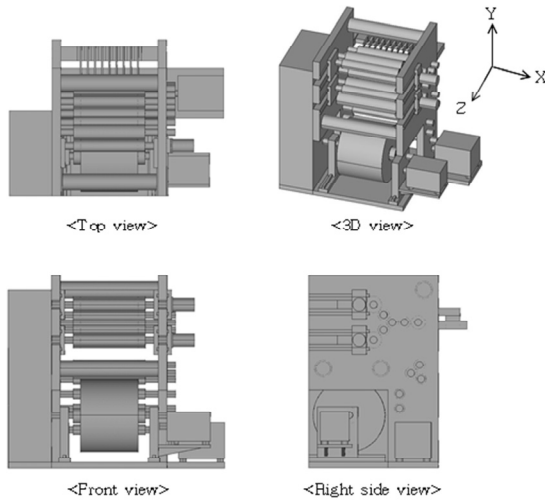


Fig. 3. A simulation model of a slitting machine.

Fig. 3은 Ansys를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 구현한 모델이며 이를 통하여 얻은 고유진동수 및 진동 형은 Fig. 4와 같다. 본 연구에서는 국내 슬리터 제작회사인 S사, P사, I사 제품을 참고하여 권출부로부터 나온 양극재 또는 음극재가 코팅된 호일이 롤러를 거쳐 절단부에서 절단되고 다시 두개의 권취부로 분류되어 감겨 나오는 방식으로 구성하였다. 제원은 2ton, (W)1.5×(D)1.2×(H)1.34m 이다.

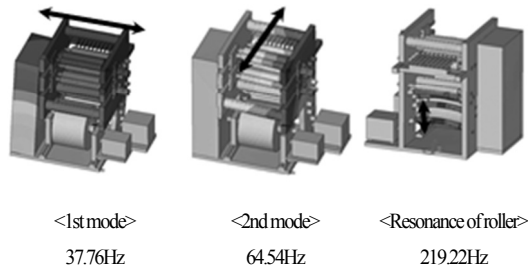


Fig. 4. Natural frequencies and mode shapes of the slitting machine.

Fig. 4와 같이 구조물의 1차 고유진동수는 37.76Hz로 진동 형태는 구조물 전체가 좌우로 진동하는 것이며, 2차 고유진동수는 64.54Hz로 구조물이 앞뒤로 진동하는 형태이다. 또한, 219.22Hz에서는 각 롤러들이 상하 진동하는 형태로 각 롤러들의 고유진동수가 일치하여 같은 주파수에서 진동함을 알 수 있다.

2.3 장비의 동적 안정성 분석

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석된 구조물의 동특성과 구조물의 작동조건을 고려하여 구조물의 큰 진동의 원인을 분석한다. 구조물의 가진원은 Fig. 5에 도시하였고 해석의 편의를 위하여 각 롤러에 번호를 부여하였다. 또한, 권출부 및 권취부의 이송용 모터는 그 영향이 매우 작아 배제하였다.

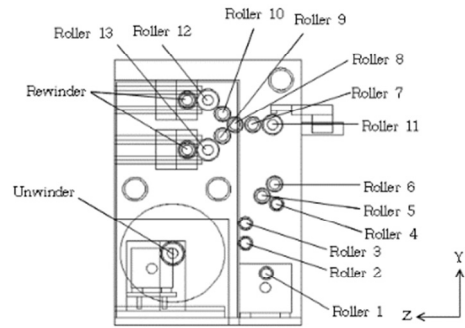


Fig. 5. The excitation sources of the slitting machine.

각 가진원의 작동속도 및 외력은 Table 1과 같다. 구조물의 작동속도는 최대 300mpm으로 각 롤러들의 외경을 고려하여 작동속도 및 외력($f_0 = m\omega^2$)을 계산하였고 권출부 및 권취부의 경우 가공에 의한 외경 변화에 따른 작동속도 변화와 그에 따른 외력의 변화를 고려하여 도출하였다.

Fig. 4와 같이 시뮬레이션을 통해 분석된 구조물의 동특성과 Table 1의 가진원을 비교한 결과 구조물의 고유진동수와 가진원의 작동속도가 공진 영역에 존재하지 않으므로 공진에 의한 큰 진동을 유발하는 요인은 없는 것으로 분석된다.

Table 1. Excitation sources

Excitation sources	Excitation frequencies[Hz]	Excitation forces[N]
Unwinder	3.18 ~ 13.26	9.91 ~ 18.37
Rewinder	3.46 ~ 19.9	6.92 ~ 10.19

Roller 1~4	22.74	7.1
Roller 5~10	19.9	6.92
Roller 11	15.92	6.82
Roller 12~13	14.47	6.86

구조물에 다수의 가진원이 존재하고 있으며 특히 롤러의 경우 다수의 롤러가 서로 동일한 고유진동수를 가지며 작동속도 또한 서로 동일하여 큰 진동을 유발할 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 가공물 교체작업의 편리성을 위해 권출부 및 권취부를 기계 전면에 배치하도록 설계되어 기존 구조에 비하여 컬럼 하부 강성이 상대적으로 취약하여 구조물의 불안정을 유발할 수 있고 그로 인해 큰 진동 발생의 원인이 될 수 있는 것으로 분석되며 이와 같은 구조물의 문제점을 개선할 수 있는 안정화 설계안이 필요하다.[4,5]

3. 안정화 설계안 도출 및 효과 확인

3.1 개선방향 설정

본 논문의 대상으로 설정된 슬리터는 권출부 및 권취부에서 가공물 교체작업의 편리성을 위해 컬럼의 강성이 취약하게 설계되어 장비 구조 불안정을 유발시키므로 보강대 설치 또는 프레임 추가를 통한 컬럼의 강성을 강화할 필요가 있다. 또한, 각 롤러들의 고유진동수가 서로 일치하여 공진하여 큰 진동을 유발시킬 수 있으므로 각 롤러들의 고유진동수를 서로 다르게 설계하여 서로 공진 영역에 존재하지 않도록 설계하는 것으로 개선 방향을 설정하고 본 연구를 진행하고자 한다.[4]

3.2 설계 변경안 #1

컬럼의 강성을 강화하여 진동을 억제하고자 Fig. 6과 같이 컬럼의 강성을 강화하기 위하여 보강대를 설치하였으며 설계 변경안을 적용하여 해석한 결과는 Table2와 같다.

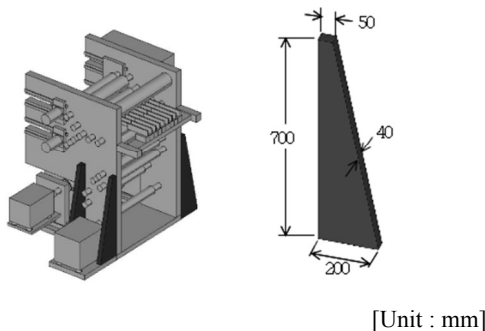


Fig. 6. Design alteration #1.

Table 2. Vibration magnitudes of original model and alteration #1

Vib. magnitudes		Original	Alteration #1	Comparison
		Knife unit	X	0.178
Y	0.026		0.018	29.97% ↓
Z	0.354		0.3	15.3% ↓
Support roller	X	0.197	0.097	50.83% ↓
	Y	0.25	0.245	1.93% ↓
	Z	0.565	0.511	9.48% ↓
				Average magnitude : 27.75% ↓

구조 변경으로 인해 컬럼의 강성이 강화되어 전체적으로 고유진동수가 증가하였고 특히 구조물의 1차 진동형에 해당하는 좌우 방향 진동형의 안정성이 향상되었으나 여전히 앞뒤 방향(Z 방향)의 진동이 문제임을 알 수 있다.

3.3 설계 변경안 #2

설계 변경안 #1의 결과 보강대 설치로 인해 컬럼의 강성이 강화되어 구조물의 좌우 방향의 진동은 억제되었으나 여전히 앞뒤 방향 진동에 취약하여 이를 억제하고자 Fig. 5와 같이 권출부가 설치된 부분에 가공물 교체 시의 편의성을 갖추면서 가공 시에는 컬럼의 강성을 강화할 수 있도록 탈부착이 가능한 프레임을 추가하였다. 설계 변경안을 적용하여 해석한 결과는 Table3과 같다.

컬럼의 강성 강화를 위해 프레임을 추가한 결과 전체적으로 고유진동수가 증가하였고 특히 구조물의 2차 진동형에 해당하는 앞뒤 방향의 진동형의 안정성이 향상되었다.

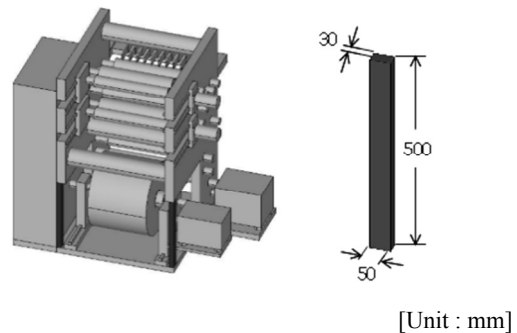


Fig. 7. Design alteration #2.

Table 3. Vibration magnitudes of original model and alteration #2

Vib. magnitudes	Original			Alteration #1			Comparison		
Knife unit	X	0.178	0.071	60.22%	↓				
	Y	0.026	0.025	2.63%	↓				
	Z	0.354	0.176	50.47%	↓				
Support roller	X	0.197	0.077	60.82%	↓				
	Y	0.25	0.246	1.5%	↓				
	Z	0.565	0.391	30.79%	↓				
Average magnitude : 34.41% ↓									

Roller 8	#2, Aluminum	256.08	200.74	21.6%	↓
Roller 9	#3, Steel	256.08	265.66	3.7%	↑
Roller 10	#3, Aluminum	256.08	258.66	1%	↑
Roller 11	#1, Steel	275.59	-	-	-
Roller 12	#1, Steel	277.62	315.11	13.5%	↑
Roller 13	#2, Aluminum	277.62	224.23	19.2%	↓

3.4 설계 변경안 #3

설계 변경 #1, 2를 통해 컬럼 강성 강화를 통하여 가공부의 안정성을 향상시킬 수 있었다. 그러나 슬리터의 가공 정도를 좌우하는 중요한 요소 중 하나인 롤러의 안정성 향상을 통하여 가공물의 인장력을 일정하게 제어하기 위해 Fig. 8과 같이 3가지의 롤러 형상과 2가지의 재질을 각각 사용함으로써 각 롤러들의 고유진동수를 서로 다르게 분포시켜 고유진동수 간의 공진을 억제하도록 설계 변경안을 도출하였으며 해석 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Natural frequencies of original model and alteration #3

Nat. Freq.	Type, Material	Nat. freq.[Hz]		Comparison
		Original	Alteration #3	
Roller 1	#1, Steel	219.22	-	-
Roller 2	#1, Aluminum	219.22	230.45	5.1% ↑
Roller 3	#2, Steel	219.22	192.55	12.2% ↓
Roller 4	#2, Aluminum	219.22	187.52	14.5% ↓
Roller 5	#1, Steel	256.08	-	-
Roller 6	#1, Aluminum	256.08	249.58	2.5% ↓
Roller 7	#2, Steel	256.08	206.20	19.5% ↓

설계 변경안 #3에서 도출된 롤러 형상과 재질은 비교적 쉽게 적용 가능하고 일반적으로 널리 사용되는 철 및 알루미늄 재질로 구성하였다. #1은 기본 구조이고 #2는 기존 구조에서 축을 관통시킨 형상이다. #3은 #1의 구조에서 축의 형상변화를 통해 고유진동수가 변하도록 개선하였으며 그 결과 Table 4와 같이 형상 및 재질변경을 통하여 각 롤러들의 고유진동수가 서로 일치하지 않게 됨을 알 수 있다.[3]

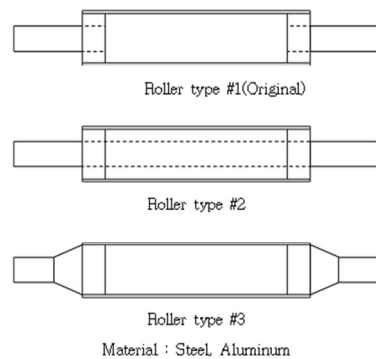


Fig. 8. Design alteration #3.

3.5 최적 설계안 도출

앞에서 언급된 설계안 #1, #2, #3의 결과 모두 진동 저감 효과가 크므로 Fig. 9와 같이 3가지 설계안을 조합한 조건을 최적 설계안으로 확정하였다. 최적 설계안을 적용하여 해석한 결과는 Table 5~6과 같다.

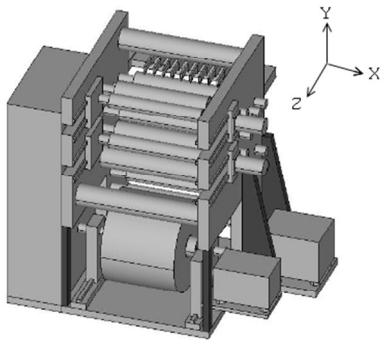


Fig. 9. Optimum design of the slitting machine.

Table 5. Natural frequencies of original model and alteration #1+#2+#3

Nat. freq.		Original	Alteration	Comparison
Nat. freq. [Hz]	1st	37.76	53.3	41.15% ↑
	2nd	64.54	94.88	47.01% ↑
Resonance of Roller		219.22	-	-

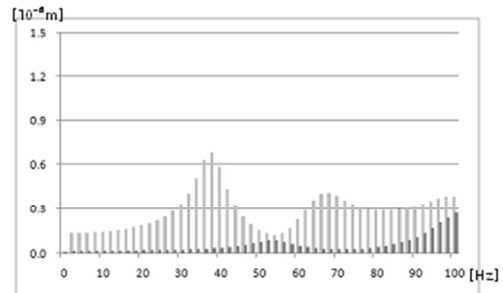
Table 6. Vibration magnitudes of original model and alteration #1+#2+#3

Vib. magnitudes		Original	Alteration	Comparison
Knife unit	X	0.178	0.024	86.38% ↓
	Y	0.026	0.02	23.83% ↓
	Z	0.354	0.165	53.52% ↓
Support roller	X	0.197	0.034	82.78% ↓
	Y	0.25	0.243	2.56% ↓
	Z	0.565	0.381	32.61% ↓
Average magnitude		46.95% ↓		

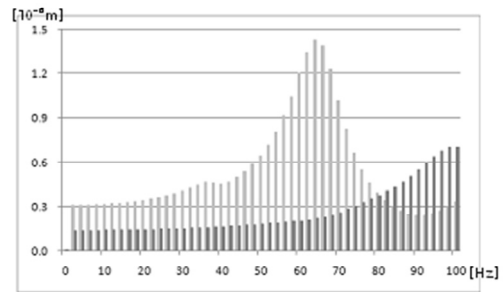
최종 개선안을 적용한 결과 고유진동수가 Table 5와 같이 크게 증가하고 각 롤러간의 고유진동수 일치에 의한 공진이 억제되었음을 확인할 수 있다. 또한, 구조물의 강성강화로 인해 Table 6과 같이 기존과 비교하면 진동이 46.95% 감소하였음을 확인할 수 있으며 특히 절단 작업에 가장 큰 영향을 미치는 절단부와 받침 롤의 X방향 진동이 각각 86.38%, 82.78% 억제되었다.

3.6 설계 개선 효과 확인

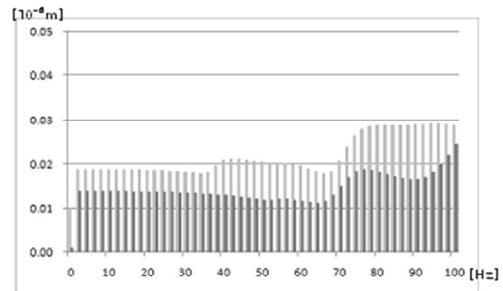
설계 개선 전후의 진동 크기를 효과적으로 비교하기 위해서 Fig. 10과 같이 비교 그래프를 도시하였다. Fig. 10에서 보이듯이 개선전과 비교하여 개선 후(최적 설계안)의 진동이 X, Y, Z방향 모두 감소함을 알 수 있다. 또한, 절단 작업에 가장 큰 영향을 미치는 X방향의 진동이 기존 진동의 약 85% 이상 소멸됨을 확인할 수 있다. 따라서 최적 설계안이 적용될 경우 슬리터의 절단부 및 받침 롤의 진동이 현격히 소멸됨으로써 가공 품질의 제고와 생산성 향상의 토대가 될 수 있을 것으로 기대된다.



(a) Magnitudes of vibrations along X direction



(b) Magnitudes of vibrations along Z direction



(c) Magnitudes of vibrations along Y direction

■ : Original structure, ■ : Alteration

Fig. 10. Magnitudes of vibrations along X, Y, Z directions.

4. 결 론

슬리터의 진동 억제를 통해 생산성과 가공 정도를 높이기 위한 장비 안정화를 목표로 시뮬레이션을 통한 동특성 분석과 진동 크기 및 진동형을 조사하여 진동의 주된 원인을 분석하고 이를 바탕으로 설계 변경안을 결정하였으며 설계 개선안의 효과 검증을 거쳐 최적 설계안을 도출하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 본 연구의 대상인 슬리터의 구조 불안정 요인은 컬럼의 취약한 강성과 각 롤러 간의 고유진동수 일치에 의한 공진으로 큰 진동을 유발할 수 있으므로 컬럼의 강성을 강화하고 각 롤러의 고유진동수 변화를 통하여 롤러 간의 공진을 억제할 수 있는 개선안을 도출하였다.

2) 구조물의 동특성을 바탕으로 3장에서 제시된 바와 같은 설계 변경을 통하여 구조물 전체의 진동을 46.95% 억제할 수 있으며, 절단 작업에 영향을 미치는 절단부 및 받침 롤의 X방향 진동을 85% 정도 억제할 수 있음을 확인하였다.

3) 제시된 설계 개선 방법을 적용하면 리튬이온 전지의 전극제조공정에서 슬리팅 공정의 안정성이 향상되어 가공품질의 제고와 더불어 가공 불량에 의한 버의 생성이 억제되어 리튬이온 전지의 폭발을 유발시키는 원인을 제거함으로써 리튬이온 전지 분야의 기술경쟁력 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

4) 본 연구의 결과를 응용하여 종이류, 필름류 및 판금

류 등 다양한 산업 분야에 사용되는 슬리터 및 유사 장비의 안정화를 통해 가공품질의 제고는 물론 관련 분야의 원천기술 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Ro, S. H., Mechanical Vibrations with Applications, Chaosbook, pp. 22-58, 219-223, 2013.
2. Ro, S. H., "Design Alteration of a Milling Machine Structure for the Improved Stability," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 5, pp. 72-78, 2006.
3. Cho, H. J., and Ro, S. H., "Effect of Design Parameters on the Variation of Natural Frequencies of the Uniform and the Nonuniform Cantilever Beams," Transactions of the KSME, Vol. 23, pp. 697-708, 1999.
4. Ro, S. H., and Park, Y. R., "Stability Design of a Laser Cutter for the Strengthened Glass", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 14, No. 1, pp. 19-25, 2015.
5. Shin, H. B., and Ro, S. H., "Design Alterations of a Squaring & Grinding Machine for the Solar Cell Wafer to Suppress Vibrations", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 25-30, 2017
6. Yi, I. H., and Ro, S. H., "Structural Design of an Ingot Grower of the Semiconductor Wafer for the Stability Improvement", Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 1, pp. 14-39, 2017.

접수일: 2018년 8월 24일, 심사일: 2018년 9월 16일,
게재확정일: 2018년 9월 19일