



알루미늄 박판 스킨밀링 시 음향의 스펙트로그램 분석

김동건^a, 이승민^a, 김규민^b, 김채원^b, 조동현^b, 국정환^{a,b}, 김수진^{a,b,*}

Spectrogram Analysis of Acoustic Emissions in Skin Milling of Thin Aluminum Sheets

Dong-Geon Kim^a, Seung-Min Lee^a, Gyu-Min Kim^b, Chae-Won Kim^b,
Dong-Hyeon Jo^b, Jung-Hwan Kook^{a,b}, Su-Jin Kim^{a,b,*}^a School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University^b School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	2	October	2025
Revised	3	December	2025
Accepted	9	December	2025

Keywords:

Aluminum sheet milling
Spectrogram analysis
Forced vibration
Self-excited vibration
Natural frequency
CNC machining

ABSTRACT

Excessive vibration and noise in thin aluminum sheet milling reduce machining stability, tool life, and surface quality; however, systematic studies remain limited. To address this gap, this study investigated acoustic emissions during skin milling using spectrogram analysis and finite-element model analysis performed with Ansys. Experiments were conducted on 2 mm aluminum sheets, with acoustic signals continuously recorded under varying spindle speeds. At 2500 rpm, forced vibration and self-excited chatter dominated the response. At 5000 rpm, excitation frequencies approached the natural modes, producing resonance and position-dependent variations in vibration intensity. At higher speeds (7500-8000 rpm), harmonic components of forced vibration prevailed, reflecting the increasing influence of tool rotation on dynamic behavior. The results confirm that vibration characteristics are governed by spindle speed, machining position, and structural stiffness, and they can be effectively and reliably utilized for real-time monitoring to enhance process stability, extend tool life, and improve surface quality.

1. 서 론

스킨밀링은 항공기 및 자동차 산업에서 얇은 대형 알루미늄 구조물을 가공할 때 널리 활용되는 절삭 공정으로, 제한된 두께에서도 높은 형상 정밀도를 확보해야 하는 과제가 있다. 얇은 판재의 낮은 강성으로 인해 절삭 중 진동이 쉽게 발생하며, 이는 소음 증가, 표면 품질 저하, 공구 수명 단축으로 이어질 수 있다^[1]. 특히 공구 회전에 따른 강제진동이 구조물의 고유진동수와 중첩될 경우 공진 현상이 발생하여 가공 안정성이 크게 저하된다^[2].

이러한 문제를 해결하기 위해 밀링 공정의 동역학 및 채터 안정성에 관한 다양한 연구가 수행됐다. 안정성 로브(stability lobe) 이론을 기반으로 한 해석적 접근을 통해 공정 안정 영역을 예측하는 방법이 제시되었으며^[1,2], 채터 거동을 효율적으로 모사하기 위한 수치해석 및 시뮬레이션 기법도 개발되었다^[3]. 또한 가공 공정의 실시간 모니터링 및 진동 특성 분석을 통해 공정 이상 상태를 진단하려는 연구도 활발히 진행되고 있다^[4]. 최근에는 밀링 공정 전반의 채터 안정성 메커니즘을 종합적으로 정리하고, 구조-공구 상호작용을 고려한 동역학적 해석의 중요성이 강조되고 있다^[5].

* Corresponding author. Tel.: +82-55-772-1636

E-mail address: sujinkim@gnu.ac.kr (Su-Jin Kim).

그러나 기존 연구는 주로 일반 구조물이나 비교적 강성이 높은 공작물에 초점을 두고 있으며, 얇은 알루미늄 박판과 같이 구조 강성이 매우 낮은 경우에는 공구 날 가진 주파수(tooth passing frequency, TPF)와 구조 고유모드 간의 상호작용이 더욱 복잡적으로 나타난다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 박판 스킨밀링 과정에서 발생하는 진동을 유한요소 기반 모달 해석과 스펙트럼 분석을 통해 정량적으로 규명하고, 가공 조건 및 위치 변화에 따른 진동 특성을 종합적으로 고찰하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 모드해석 방법

본 연구에서는 Ansys를 사용하여 알루미늄 박판의 진동 특성을 조사하였다. 주요 목적은 실험에서 관찰된 진동 현상과 시뮬레이션 결과를 비교하여, 가공 중에 발생하는 진동의 원인과 특성을 더욱 명확히 규명하기 위함이다.

시뮬레이션에서 박판의 재료는 알루미늄 6061로 설정하였으며, 두께 2 mm, 폭 140 mm 및 길이 100 mm로 모델링하였다. 알루미늄 박판의 실제 가공 조건을 반영하기 위하여 바이스 지지부의 접촉 특성과 구조 감쇠를 고려한 모드 해석을 수행하였다. 이를 위해 단변 양측을 탄성지지(elastic support)로 모델링하였고, 경계면의 미세 슬립 및 진동 에너지 소산을 모사하기 위해 댐핑계수(damping coefficient)를 포함하였다. 또한 실제 지지 조건을 반영하기 위해 고정단의 유효 지지 면적을 75% 축소하여 구조적 강성의 공간적 분포를 현실적으로 구현하였다.

2.2 실험 장치 및 소재

실험에 사용된 장치와 소재는 다음과 같다. Fig. 1과 같이 알루미늄 박판은 크기 140 mm × 100 mm, 두께 2 mm로, 단변(100 mm) 양측을 20 mm씩 바이스로 고정하였다. 공구로는 직경 Ø12 mm, 2날의 평엔드밀을 사용하였으며, Hwacheon의 Vesta 3축머시닝 센터를 통해 가공을 수행하였다. 소음 녹음을 위해 샘플링 주파수가 14.2 kHz인 Pilar의 핀 마이크를 스피들 MCT 도어 내부에 고정하였다.

2.3 가공 조건

가공 조건은 다음과 같다. 가공 깊이는 1 mm로 설정하였으며, 앞에서 뒤로 이송하는 가공 경로로 홈을 가공 하였으며, 위치는 중간, 왼쪽, 그리고 오른쪽 순서로 가공하였다. 스피들 회전수는 2500, 5000, 7500 rpm으로, 이송 속도는 1000, 2000, 3000 mm/min으로 각각 설정하여 실험을 진행하였다. 그리고 8000 rpm, 이송 속도 1800 mm/min에서 사각형 포켓밀링 실험을 진행



Fig. 1 Boundary condition

하였다. 절삭유는 가공 중에 지속적으로 공급하였다.

2.4 데이터 처리

녹음된 wav 파일을 Python의 SciPy와 Matplotlib 라이브러리를 이용하여 시간-주파수-음압으로 표시하여 스펙트로그램을 작성하였다. 스피들 회전수에 따른 공구 날 가진 주파수 f 를 식 (1)과 같이 계산하여 강제진동 성분과 박판 FEM 고유진동 성분과 비교하였다.

$$f = n \times z / 60 \quad (1)$$

n : spindle speed (rpm)

z : number of tooth

3. 결과 및 고찰

3.1 모드 해석 결과

먼저 바이스 지지부를 완전 고정(fixed support)으로 가정한 경우 모드 1의 고유진동수는 1,078 Hz로 계산되었다. 이후 지지부를 탄성지지로 변경하면 지지 강성 감소에 따라 약 40 Hz 낮아졌으며, 구조 감쇠의 부여는 고유진동수에는 영향을 주지 않았다. 실제 바이스와 평행블록의 미세한 비평행(tilt)로 인해 지지 면적 전체가 동일하게 고정되지 않는 점을 반영하기 위해, 지지부의 유효 고정 면적을 전체의 75%로 축소하여 모델링한 결과 고유진동수는 866 Hz로 산출되었고, 이는 실험에서 관찰된 주요 진동 주파수에 가장 근접한 것이다.

절삭력은 공구 가진 주파수의 정수배에서 강제진동을 유발하며, 가진 주파수의 정수+0.5배에서는 자러진동(채터)이 발생할 수 있다. 이로 인해 실제 절삭 중에는 수천 Hz 범위의 조화 및 채터 주파수 성분이 동시에 나타나 FEM 모드(866~6,478 Hz) 영역과 중첩된다. 따라서 단순히 공구날 가진 주파수만으로 공진 여부를 판단할 수 없으며, 가공 위치와 모드 형상의 일치 여부에 따라 특정

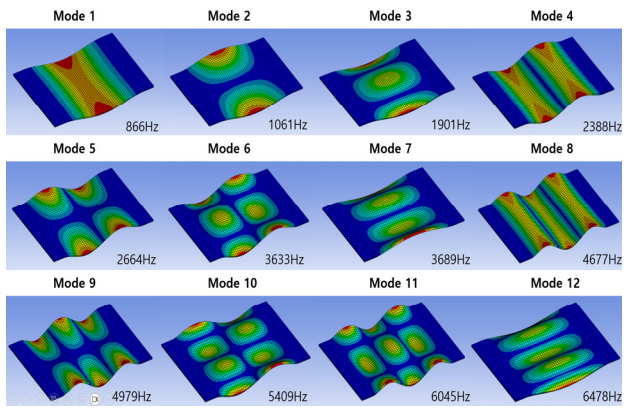


Fig. 2 Natural modes of aluminum sheet

모드가 선택적으로 증폭될 수 있다.

Fig. 2는 알루미늄 박판의 1차부터 12차까지의 모드 형상과 대응 고유진동수를 나타낸다. 첫 번째 모드(866 Hz)는 박판 중앙부가 위아래로 운동하는 가장 기본적인 형태이며 1, 4, 8 번째 모드는 공구 이송 방향을 따라 노달 라인(nodal line)이 나타난다. 툴 경로와 모드 형상의 일치 여부에 따라 특정 모드가 강하게 가진되거나 억제될 수 있다. 모드 1은 중앙에 안티 노달 라인(anti nodal line)이 있어 중앙을 가공할 때 가장 크게 가진되며, 모드 4는 좌측 우측에 안티 노달 라인이 있어 좌측 우측을 가공할 때 가진될 수 있다. 반대로 툴이 노달 라인을 따라 이동하면 진폭이 거의 나타나지 않는다. 이러한 현상은 스펙트로그램에서 가공 위치별 음향 차이를 설명하는 근거가 되며, 단순한 주파수 값 비교가 아니라 모드 형상과 툴 경로의 상호작용을 고려해야 함을 보여준다.

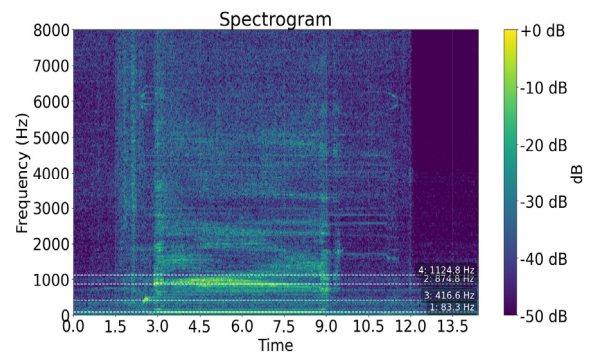
2 번째 모드(1061 Hz)는 전후 방향 진동이 주를 이루고, 3 번째 모드(1901 Hz)는 전후 중앙에 안티 노달 포인트가 있어, 공구가 노달 포인트를 지날 때 진동이 작아지고, 안티 노달 포인트를 지날 때 진동이 커질 수 있다. 고차 모드 역시 각 주파수 영역에서 박판의 진동 양상을 세분화하여 보여준다.

따라서 모드 해석은 박판 가공 시 어떤 조건에서 공진이 발생하고, 어느 위치에서 음압이 증폭되는지를 사전에 예측할 수 있는 근거를 제공한다.

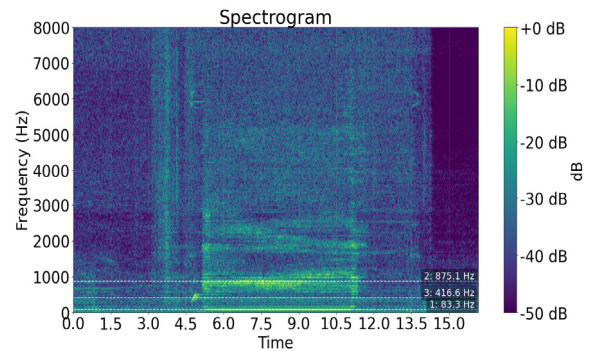
3.2 2500 rpm 가공

가공 시작 약 1.5초 전에 나타나는 세 개의 수직선은 절삭유 분사 장치의 작동으로 인해 발생한 백색 소음(white noise)이며, 가공이 시작되면 진동에 대응하는 주파수 성분들이 명확하게 관찰된다.

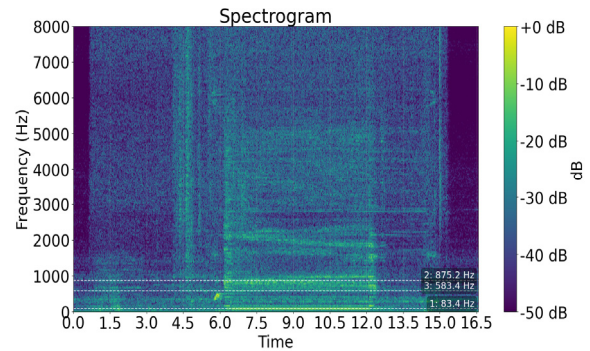
2500 rpm 조건에서 $f = n \times z / 60$ 에 의하여 공구 날 가진 주파수 83.3 Hz로 계산되었고, Fig. 3(a)~(c) 스펙트로그램 하단에서 날의 가진 주파수 성분인 83.3 Hz가 가장 크게 나타났다. 그다음으로 875 Hz, 417 Hz, 1125 Hz 순으로 강한 성분이 확인되었다.



(a) Middle



(b) Left



(c) Right

Fig. 3 2500 rpm spectrogram

밀링에서는 이전 날이 남긴 표면과 다음 날의 깊이에 의해 칩 두께가 결정된다. 두 연속 날이 동일한 위상(phase)에서 지나가면 칩 두께가 균일하고 공구 날 가진 주파수에 의한 강제진동(forced vibration)이 발생한다. 그러나 두 연속 날이 지날 때마다 진동의 위상이 반전된다면, 칩 두께가 번갈아 두껍게 얇게 변화하면서 진동이 증폭되는 자력 진동 채터(self excited vibration)가 발생한다. 그 경우 관측 주파수는 날 가진 주파수의 1.5, 2.5, 3.5배처럼 $(\text{정수} + 0.5) \times \text{TPF}$ 형태로 나타난다.

실험에서 측정된 약 875 Hz의 강한 진동 성분은 가진 주파수의 10.5배로 공구의 가진 주파수의 $(\text{정수} + 0.5)$ 배 임으로 자력 진동 채터로 해석된다. 해당 값은 FEM 해석에서 도출된 박판의 고유진동수 866 Hz보다 약 1.04% 높게 나타났는데, 이는 실제 지그의

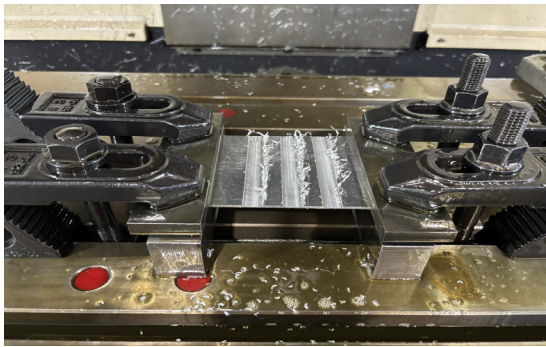


Fig. 4 2500 rpm 1000 mm/min workpiece

유효 고정 면적 및 강성과 마찰조건 차이로 고유주파수가 이동했기 때문으로 보인다.

이 결과는 저속 가공 시 박판의 공구의 날 가진 주파수의 배수인 강제진동이 선명하게 발생하며 및 박판의 고유진동수 근처에서 자려진동 채터가 함께 발생함을 보여준다. 따라서 저속 조건에서는 이러한 박판의 특성을 고려하여 가공 조건을 설정하는 것이 중요하며, 이를 통해 가공 품질을 개선하고 불필요한 진동을 줄일 수 있다.

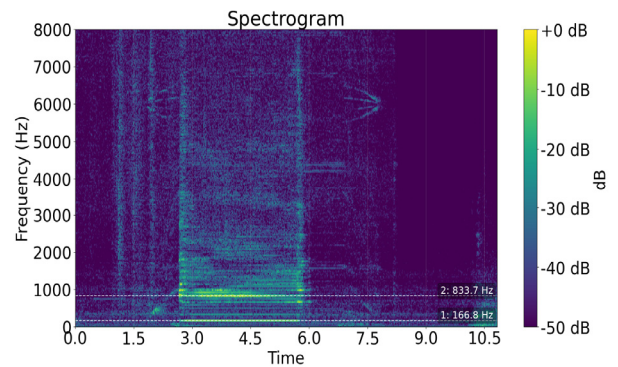
Fig. 4의 홈 형상 관찰 결과, 공구 날이 진입한 좌측 모서리는 비교적 양호한 절삭 면이 형성되었으나, 탈출부인 오른쪽 위 끝에서는 큰 버(burr)가 발생하였다. 이는 진입 시 절삭 날이 안정적으로 소재에 파고드는 반면, 퇴출 시에는 절삭 날이 소재를 이탈하면서 인장 응력이 집중되어 버가 형성되기 때문이다.

3.3 5000 rpm 가공

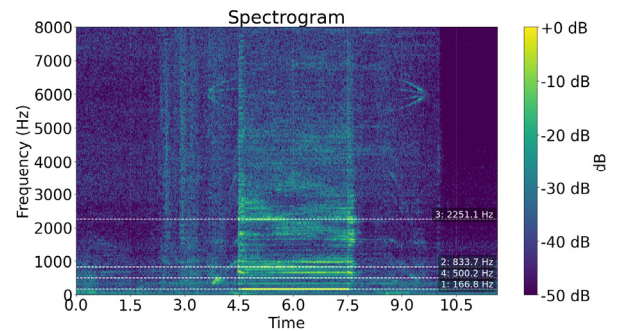
Fig. 5의 스펙트로그램에서는 가공 시작 전·가공 중·가공 종료 후의 음향 및 진동 특성이 뚜렷하게 구분되어 나타난다. 가공 시작 약 1.5초 전에 관찰되는 세 번의 펄스 형태 충격음은 절삭유 분사 장치가 활성화되면서 발생한 백색 소음에 해당한다. 또한 가공 시작 1초 전에는 주축이 가속되면서 회전수가 증가하고, 이 과정에서 스펙트로그램 상에 주파수가 상승하는 경로가 연속적으로 나타나는 패턴이 관찰된다. 가공 종료 후 약 2초 시점까지는 주축 감속 과정이 이어지며, 이에 따라 주파수 곡선이 점차 하강하는 모습이 확인된다.

5000 rpm에서 공구의 날 가진 주파수는 식 (1)에 의하여 166.8 Hz로 계산되었다. 세 개의 스펙트로그램 모두에서 절삭 공구의 날 가진 주파수가 가장 강하게 나타났으며, 5배수에 해당하는 약 834 Hz 성분이 두드러지게 관찰되었다. 이는 절삭력에 의해 유도되는 공구의 강제진동이 박판의 고유진동수에 근접할 때 진폭이 증가하는 현상으로 해석된다.

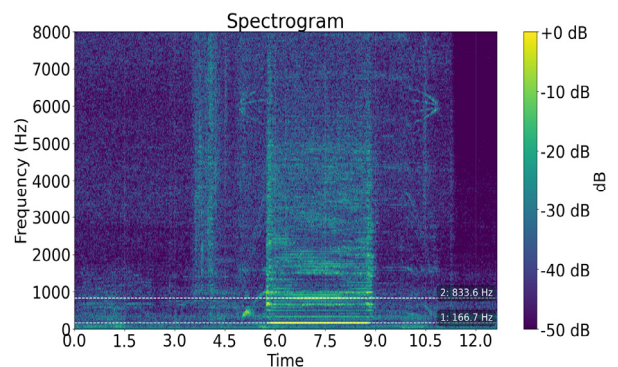
또한 Fig. 5(b)에서는 가진 주파수의 3배수에 해당하는 500.2 Hz 성분이 비교적 약하게 관찰되었으며, 가진 주파수의 약 13.5배에



(a) Middle



(b) Left



(c) Right

Fig. 5 5000 rpm spectrogram

해당하는 2251.1 Hz 성분이 미세하게 나타났다. 이는 공정 중 발생한 자려진동에 의한 채터로 해석된다.

모드 해석 결과에 따르면 모드 4의 고유진동수는 2388 Hz로 계산되었으나, 실험에서는 이보다 약 5.74% 낮은 주파수에서 대응되는 진동 성분이 관찰되었으며 그 원인은 앞에서 설명했다.

가공이 중, 중앙 → 좌측 → 우측 순서로 이동하면서, 875~1000 Hz 주파수 대역의 음압의 세기가 위치에 따라 뚜렷하게 변화하였다. 중앙부에서 가장 강하게 나타나고, 좌·우측에서는 상대적으로 약해지는 경향을 보였는데, 이는 박판의 위치별 지지 강성 변화와 관련이 있으며, 박판의 진동모드 분포 변화가 음압의 세기에 영향이 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6의 가공 홈 형상에서도 탈출 부에서의 버 형성이 동일하게

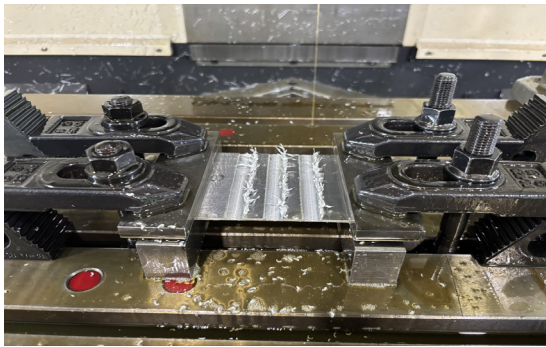


Fig. 6 5000 rpm 2000 mm/min workpiece

관찰되었다.

3.4 7500 rpm 가공

가공 2초 전 3번의 펄스 충격음은 절삭유가 켜지면서 발생하는 백색음이고, 가공 시작 1.5초 전에 주축이 켜져 회전수가 증가하면서 주파수가 변화하는 선이 관측되고, 가공 종료 후 2.5초에 주축 회전이 정지할 때까지 주파수 곡선이 변화하는 모습이 관찰된다.

7500 rpm에서 공구의 가진 주파수는 식 (1)에 의하여 250 Hz로 계산 되었다. Fig. 7(a)~(c) 스펙트로그램에서 가진주파수인 250 Hz와 그 정수배 성분들이 두드러지게 나타나는 특징을 보였다. 스펙트로그램 분석 결과, 250 Hz, 750 Hz, 그리고 1000 Hz에서 강한 진동이 관측되었다.

이러한 진동은 공구 회전수에 의해 발생하는 강제진동이 지배적임을 나타내며, 이는 가공 중 공구의 안정성과 표면 품질에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 특히, 중간 및 좌우의 가공 위치에 따라 음압의 세기가 다르게 나타났으며, 이는 각 위치에서의 박판 강성 차이에 기인하고, 박판의 진동 모드처럼 음압도 박판의 위치에 따라 변화하는 패턴을 보여준다.

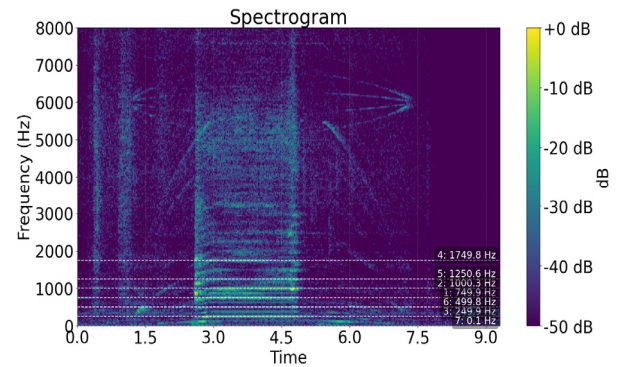
Fig. 8의 가공 결과 역시 탈출부에서 버 형성이 확인되었다.

3.5 8000 rpm 포켓 밀링

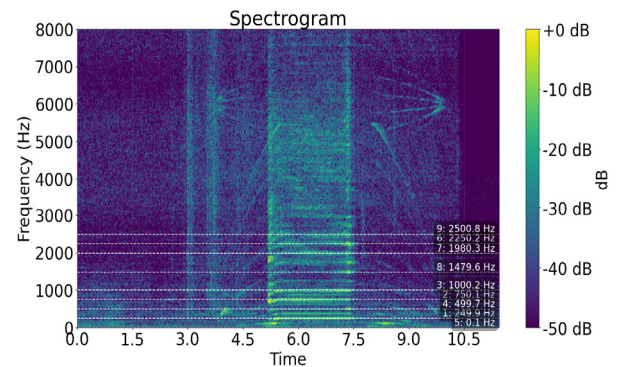
8000 rpm에서 포켓 밀링은 이전의 가공보다 더욱 뚜렷한 강제 진동을 보여, Fig. 9 스펙트로그램에서 날의 가진 주파수인 266.7 Hz 및 그것의 정수배인 주파수에서 강한 진동이 관찰되었다. 주축의 회전 주파수인 133.3 Hz의 정수배에서도 다음으로 강한 진동이 관측되었는데 이는 공구의 런아웃으로 두 날의 절입 깊이가 완전히 일치하지는 않기 때문이다.

가공 중에 발생하는 음압은 가공 위치에 따라 변동성을 보였다. 이는 포켓 밀링의 특성상 가공 부위에 따라 절삭 방향과 절입 깊이 변화가 발생하기 때문으로 보인다.

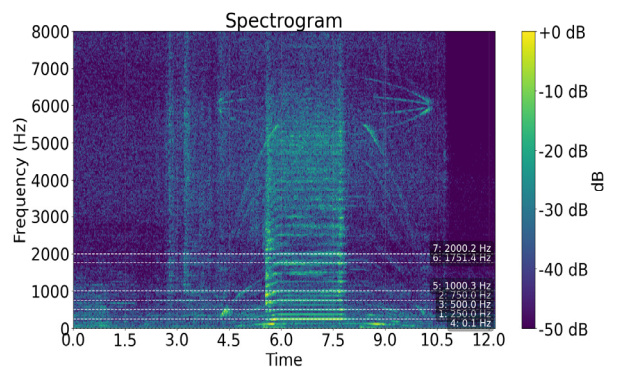
Fig. 10의 사각 포켓 가공 결과를 관찰하면, 포켓의 안쪽 면은 버가 보이지 않는다. 안쪽에서 외부로 사각형을 확장하는 패턴이



(a) Middle



(b) Left



(c) Right

Fig. 7 7500 rpm spectrogram

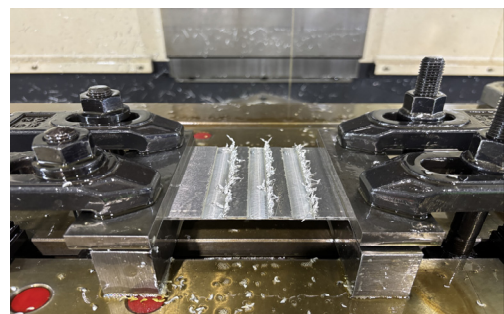


Fig. 8 7500 rpm 2000 mm/min workpiece

으로 안쪽에서 발생한 버는 다음 가공에서 제거되기 때문이다. 마지막 모서리 상단부에서 발생한 버는 제거되지 않고 그대로 남아

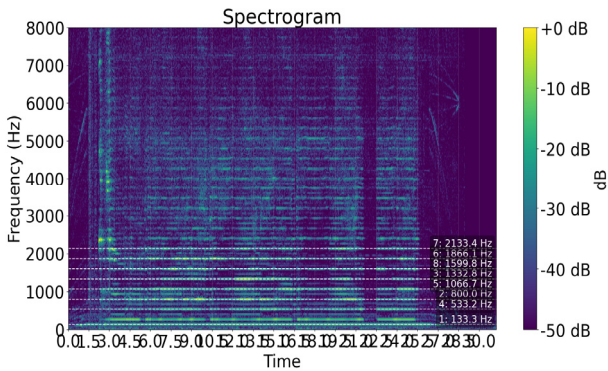


Fig. 9 8000 rpm spectrogram

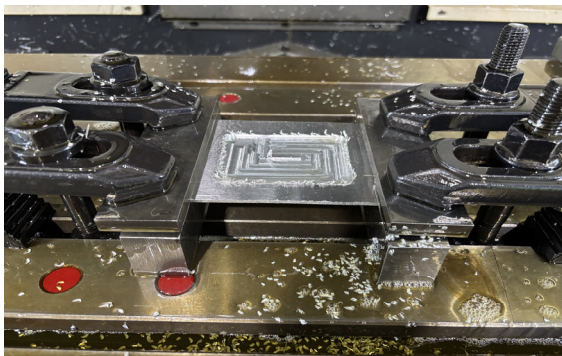


Fig. 10 8000 rpm 1800 mm/min workpiece

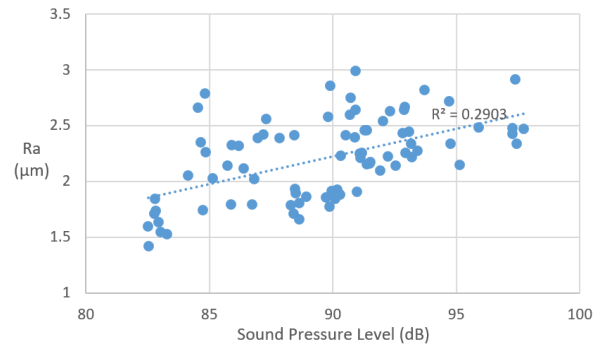
있음을 볼 수 있다.

3.6 표면 거칠기와 음압의 상관관계

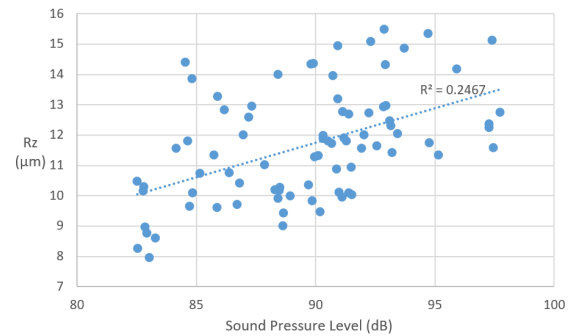
2500 rpm, 5000 rpm, 7500 rpm에서 가공된 알루미늄 박판의 가공 경로를 따라 10 mm 간격으로 총 9개 구간의 표면을 측정하여 Ra 및 Rz 값을 측정하였다. 공작기계의 이송속도(feed rate)를 고려하여 각 10 mm 구간에 대응하는 시간 구간을 산출한 뒤, 해당 시간 범위에 포함되는 음향 데이터를 분리해 음압(sound pressure level)을 계산하였다.

Fig. 11(a), (b)는 변환된 음량(dB)과 표면 거칠기 Ra, Rz의 관계를 나타낸다. 두 지표 모두 음압이 증가할수록 Ra 및 Rz 역시 증가하는 경향을 보였으며, 산점도에 표시된 회귀선은 약한 양의 선형 관계가 나타난다. Ra-음압 관계의 결정계수는 $R^2 = 0.2903$, Rz-음압 관계는 $R^2 = 0.2467$ 로 나타났으며, 이는 음압과 표면 거칠기가 약한 상관관계에 있음을 의미한다.

두 관계식의 결정계수는 0.25~0.29 수준으로, 음압만으로 표면 거칠기를 정밀하게 예측하기에는 제한적이며, 표면 품질은 가공 위치, 절삭력, 국소적 진동모드 등 다양한 인자의 영향을 함께 받는 것으로 판단된다. 그럼에도 음압은 절삭 중 구조적 진동 및 음향 에너지의 변화를 반영하는 지표로서, Ra Rz 증가 구간과 대체로 일관된 증가 경향을 나타내어 보조적 품질 지표로 활용 가능성이



(a) Ra



(b) Rz

Fig. 11 Correlation plot of sound pressure level and surface roughness

있다.

요약하면, 본 연구에서 측정된 10 mm 구간별 음압은 표면 거칠기 변화와 약한 양의 상관성을 보였으며, 이는 절삭 중 음압과 표면 거칠기는 일정 부분 연관됨을 보여준다.

3.7 고찰

스핀들 속도별 주요 관찰 결과를 Table 1에 요약하였다. 낮은 회전수(2500 rpm)에서는 날 가진 주파수의 정수배로 나타나는 강제진동과 박판의 고유진동수 근처에서 발생하는 자려진동 채터가 함께 관찰되었다. 채터 주파수 875 Hz, 1125 Hz는 해석에서 예측한 박판의 고유진동수보다 1.04%, 6.03% 높았으며, 해석과 실험의 차이로 보인다.

중간 회전수(5,000 rpm)에서도 날의 가진 주파수인 166 Hz와 정수배에서 강제진동이 발생했다. 가진 주파수의 5배인 833 Hz에서 가장 강한 음압이 발생한 이유는 박판의 고유진동수 근처에서 공진이 발생했기 때문이다. 이것은 해석에서 예측한 고유진동수보다 3.96% 높은 주파수이다. 자려진동 채터는 2251 Hz에서 약하게 발생하였으며, 예측한 고유진동수의 5.74% 높은 주파수이다.

높은 회전수(7500 및 8000 rpm)에서는 날의 가진 주파수인 250 Hz, 266.7 Hz 및 이의 정수배에서 강제진동이 뚜렷하게 나타

Table 1 Vibration characteristics of aluminum sheet under different spindle speeds

Spindle speed (rpm)	Tooth pass frequency (Hz)	Self excited chatter (Hz)	Frequency pred. error (%)
2500	83.3	875, 1125	1.04, 6.03
5000	166	2251	-5.74
7500	250	None	-
8000	266.7	None	-

났고, 자러진동 채터는 관측되지 않았다. 이는 고속 가공 시 강제진동의 영향이 증가함을 나타낸다.

본 연구는 다양한 가공 조건에서 알루미늄 박판의 진동 특성을 종합적으로 분석하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 박판의 고유진동수와 가공 음향 주파수의 관계를 파악하였으며, 이는 가공 공정의 품질 및 안정성에 직접적인 영향을 미친다.

해석을 통해 박판의 주요 진동 모드와 고유진동수를 예측하였다. 첫 번째 모드는 약 866 Hz에서 발생하며, 두 번째 모드는 약 1061 Hz로 나타났다. 이러한 모드 해석은 박판의 동적 거동을 정량적으로 이해하는데 기여하며, 가공 중 발생할 수 있는 진동 문제를 예측하고 대응하는데 중요한 기초 자료를 제공한다. 얇은 알루미늄 박판의 스킨밀링 과정에서 나타나는 진동 특성을 분석하기 위해 특정 가공 조건을 대상으로 실험을 수행하였으며, 향후 공구 형상, 절삭 조건, 두께 변화 등을 고려한 연구 확장이 필요하다. 특히 박판의 강성 또는 질량이 증가하여 고유진동수가 더 낮은 주파수대로 이동하더라도, 가진 주파수와 고유진동수 간의 상대적 근접성을 기반으로 공진 발생 가능성을 평가하기 때문에 본 연구에서 적용한 스펙트로그램 기반 해석 절차 또한 동일하게 활용될 수 있을 것으로 보인다. 따라서 두께·강성·질량이 변화한 다양한 박판 구조물에서도 본 연구의 방법론은 공정 중 진폭 증폭 여부와 공진 가능성을 검토하는 데 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

추가로, 스펙트로그램 분석 과정에서 절삭유 분사에 따른 초기 펄스 충격음과 공구 가속 시 발생하는 곡선형 음향 패턴이 확인되었다. 이러한 비가공 음향은 공정 모니터링 과정에서 혼동을 유발할 수 있어, 체계적인 분리 및 보정 과정이 필요하다.

4. 결론

본 연구는 알루미늄 박판 스킨밀링 과정에서 발생하는 소음을 대상으로 스펙트로그램 분석을 수행하여, 가공 속도와 위치 변화에 따른 진동 특성을 체계적으로 규명하였다. FEM 기반 모드 해석으로 도출된 고유진동 모드를 실험 결과와 비교하여 박판의 진동 특성을 명확히 파악할 수 있었으며, 이는 공진 발생 가능성을

예측하는 데 중요한 근거가 됨을 확인하였다.

실험 결과, 저속 가공(2500 rpm)에서는 공구 가진주파수의 정수배인 강제진동 및 가진주파수의 (정수+0.5)배인 자러진동채터가 동시에 관측되었다. 중속 가공(5000 rpm)에서는 자러진동 채터 성분이 소폭 감소한다. 강제진동과 자러진동 모두 박판의 고유진동수에 가까워지면서 진폭이 증가한다. 고속 가공(7500~8000 rpm)에서는 날 가진 주파수의 정수배인 강제진동 성분이 두드러지게 나타났다.

가공 위치별 주파수에 따른 음압의 차이가 나타났는데, 이는 공구가 박판의 노달 안티노달 영역을 지나면서 진동이 억제 확대되는 것으로 분석된다. 이러한 결과는 알루미늄 박판 가공 시 소음 거동이 회전 속도뿐 아니라 위치 조건 및 구조적 특성과 밀접하게 연관되어 있음을 보여준다.





스펙트로그램 기반의 소음 분석이 박판 밀링 가공 상태를 진단하고 불안정 요소를 감지할 수 있는 효과적인 방법으로 사료되며, 이를 이용한 감시 체계 적용 시, 가진 주파수의 정수배와 자러진동으로 인한 채터 주파수를 저가 핀 마이크로 모니터링하여 공정 안정성을 조기 진단할 수 있을 것이다.




후 기

이 연구는 연구개발특구진흥재단 기술이전사업 연구개발과제(연구개발 과제번호: 2024-IT-RD-0178-01)의 지원을 받아 수행되었음.

References

- [1] Altıntaş, Y., Budak, E., 1995, Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, *CIRP Ann.*, 44:1 357-362, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62342-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62342-7).
- [2] Budak, E., Altıntaş, Y., 1998, Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling—Part I: General Formulation, *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 120:1 22-30, <https://doi.org/10.1115/1.2801317>.
- [3] Smith, S., Thusty, J., 1993, Efficient Simulation Programs for Chatter in Milling, *CIRP Ann.*, 42:1 463-466, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62486-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62486-X).
- [4] Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., Dornfeld, D., 2010, Advanced Monitoring of Machining Operations, *CIRP Ann.*, 59:2 717-739, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.010>.
- [5] Altıntaş, Y., Stepan, G., Budak, E., Schmitz, T., Kilic, Z. M., 2020, Chatter Stability of Machining Operations, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 142:11 110801, <https://doi.org/10.1115/1.4047391>.

	<p>Dong-Geon Kim Student in the School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University. His research interests include Precision Machining and CAE. E-mail: donggeon@gnu.ac.kr</p>
	<p>Seung-Min Lee Student in the School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University. His research interests include precision machining and CAD/CAM technologies. E-mail: tmdals5797@naver.com</p>
	<p>Gyu-Min Kim Student in the School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. His research interests include CNC machining and AI machine learning. E-mail: kyumin07685@naver.com</p>
	<p>Chae-Won Kim Student in the School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University. Her research interests include precision machining and machine learning. E-mail: doremi7456@naver.com</p>

	<p>Dong-Hyeon Jo Student in the School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. His research interests include CNC machining and sound analysis. E-mail: mount7429@naver.com</p>
	<p>Jung-Hwan Kook Professor in the School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. His research interests include structural optimization for noise and vibration. E-mail: jkook@gnu.ac.kr</p>
	<p>Su-Jin Kim Professor in the School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. His research interests include CAM and CNC machining. E-mail: sujinkim@gnu.ac.kr</p>