https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.5.231

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

전문가 듀플렉스 밀링 조건 설정의 비절삭음량 최소화 모델링

전재호[a], 박수빈[b], 조동현[b], 김수진[b,*]

Modeling Expert's Duplex Milling Condition Settings with Specific Cutting Sound Level Minimization

Jae-Ho Jeon[a], Su-Been Park[b], Dong-Hyeon Jo[b], Su-Jin Kim[b,*]

[a] Graduate school of Convergence Science & Technology, Gyeongsang National University
[b] School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University

ARTICLE INFO

Article history:
Received 16 August 2024
Revised 6 September 2024
Accepted 19 September 2024

Keywords:
Duplex
Ball end mill
Machining conditions
Specific cutting sound level
Material removal rate
Tool wear

ABSTRACT

In this study, a field expert with 20 years of experience used the auditory feedback from a milling process to optimize the conditions for a 20 mm diameter ball end mill from Company T. and a theoretical researcher attempted to fine a physical model of his method. By adjusting the transfer speed, processing depth, and rotation speed based on the milling sound, stable and productive conditions were achieved. The study defined the ratio between sound volume and material removal rate as specific cutting sound and found that setting processing conditions using field hearing aligned with the specific cutting sound volume minimization. Further, the insert's plank wears were compared using the conditions set by the tool manufacturer, field expert, and specific cutting sound volume minimization. The expert's settings matched the specific cutting sound volume minimization conditions, resulting in approximately three times higher productivity than that with the manufacturer's conditions. However, the insert cracked.

1. 서 론

가공조건은 절삭 공정의 효율성과 안정성에 직접적인 영향을 미친다. 특히 높은 기계적 강도, 용접성, 내부식성으로 유전 드릴과 로켓에 사용되는 듀플렉스강(duplex stainless steel)은 고온 소성 가공에는 적합하지만, 대표적인 고강도 난삭제로 절삭력이 높고 공구마모가 빠르게 발생해 문제가 되고 있다. 따라서, 다양한 연구들이 듀플렉스 스테인리스강의 가공성과 공구마모를 개선하기 위해 수행되었다.

듀플렉스강은 페라이트와 오스테나이트 미세조직을 비슷한 비율로 함유하고 있으므로 높은 기계적 강도, 다양한 환경하에서 발생하는 부식에 대한 높은 저항성, 낮은 열팽창계수, 그리고 우수한 용접성으로 기존의 오스테나이트합금강을 대체하여 사용되고 있다.

Yoon J. H et al. (2019)은 이러한 듀플렉스강의 초소성 특성을 이용하여 연소기 챔버의 외피를 제작하고, 이를 위한 금형 설계 및 공정 해석을 통해 최적의 성형 조건을 도출하였다[1].

Nomani et al. (2015)은 듀플렉스 스테인리스강의 칩 형성 메커니즘과 가공성을 조사하여, 듀플렉스 스테인리스강 SAF 2205 및 SAF 2507의 칩 형성 메커니즘과 가공성을 조사하여, 절삭 공구의 진행 과정에서의 상 변화와 공구 마모 특성을 분석하였다[2].

* Corresponding author. Tel.: +82-55-772-1636
E-mail address: sujinkim@gnu.ac.kr (Su-Jin Kim).

Ahmed et al. (2019)은 듀플렉스 스테인리스강의 구성인선(BUE) 형성에 대한 연구를 통해 가공 성능을 개선하는 방안을 제시했다[3].

Marques et al. (2023)은 슈퍼 듀플렉스 스테인리스강의 공구마모, 표면 잔류 응력 및 내식성에 대한 밀링 매개변수의 영향을 조사하였으며, 낮은 절삭 속도와 이송이 공구 수명을 증가시키고 더 높은 압축 응력을 생성하며, 절삭 매개변수의 변화가 부품의 내식성에 큰 영향을 미치지 않음을 확인했다[4].

그러나 이러한 연구들은 공구마모가 발생할 때까지 제품을 가공한 이후 또는 고가의 시험장치 위에서 적합한 가공조건을 제시하기 때문에, 빠른 조건 설정이 필요한 현장에 적용하기 힘들다.

최근에는 소리 기반 모니터링이 가공조건 최적화에 유용한 도구로 주목받고 있다. 다양한 센서를 활용한 모니터링 시스템과 소리 맵핑을 통한 밀링 프로세스의 안정성 평가 등이 그 예이다.

Bagci (2011)은 다양한 센서를 활용해 다양한 가공 조건에서 조각 표면 밀링 공정을 모니터링하고, 음압 레벨을 이용하여 MRR(material removal rate) 기반 이송 속도 최적화를 평가하며, 절삭 조건, 공구 처짐, 절삭력 및 사운드 신호 간의 관계를 동적으로 조사했다[5].

Quintana et al. (2009)은 밀링 작업에서 발생하는 사운드를 분석하여 사운드 매핑 방법론을 통해 안정성 로브 다이어그램을 결정하고, 이를 통해 절삭 공정의 안정성과 채터 현상을 평가했다[6].

Rech et al. (2017)은 가공 작업의 소음 수준이 직업 건강 및 안전에 미치는 영향을 분석하여, 알루미늄 부품 밀링 시 부품 강성이 중요한 매개변수임을 입증하고, 새로운 4축 수평 스핀들 가공센터가 소음 방출을 제한하도록 설계되어야 함을 확인했다[7].

그러나 현장 전문가들이 오랫동안 사용해 온 청각을 이용한 가공조건 설정 과정을 수치로 검증하고 컴퓨터로 구현하려는 연구는 부족했다.

본 연구에서는 20년 동안 현장에서 절삭 소리를 통해 밀링 조건을 설정한 전문가가 처음 접하는 듀플렉스 스테인리스 강의 황삭을 가공조건 설정 대상으로 하며, 가공조건 설정 과정을 절삭 소리 크기를 소음 측정기로 측정해 수치적으로 의미가 있는지 알아봤다. 현장 전문가의 가공조건 설정 과정과 소리크기와 소재제거율 비율을 최소화하는 과정의 상관관계를 규명하고, 공구 제조사의 추천 조건, 현장 전문가의 설정 조건, 논문에서 제안한 비율 최소화 조건을 각각 사용해 듀플렉스를 가공하고 볼엔드밀 인서트의 플랭크 마모를 비교하였다.

본 연구의 신규성은 현장의 청각을 통해 가공조건을 설정하는 과정이 수학적으로 타당한지 소리를 측정해 검증하고 컴퓨터로 모사할 수 있도록 모델링하는 것에 있다. 구체적으로는 현장 전문가가 처음 가공하는 듀플렉스 소재를 대상으로 T사 볼엔드밀의 추천 조건에서 가공조건을 설정하는 과정의 소리 신호를 측정해 수치화하고, 소리크기와 소재 제거율(MRR) 간의 관계를 이용한 새로운 수식과 상관관계를 규명한다. 이는 기존 연구와 차별화되는 부분으로, 소리 기반 모니터링을 통한 빠른 가공조건 설정의 가능성을 제시한다. 본 연구의 결과는 제조 현장에서 전문가가 가공조건을 설정하는 과정을 수학적으로 모델링 함으로써, 앞으로 인공지능이 가공조건을 선정해야 하는 스마트 공장 실현에 실질적인 도움을 줄 수 있을 것이다.

2. 가공조건 설정법 제안

2.1 현장 전문가 청각 기반

현장 전문가들은 소리를 들으면서 안정적인 가공이 발생하는 이송속도, 축방향 절입깊이, 회전수 조건을 설정하고 있다. 하지만 이를 측정해 수치화하려는 연구는 부족했다.

이송속도(feed rate) 증대는 직접적으로 생산성을 높이지만 과도할 경우 진동과 공구마모를 증가시키는 중요한 가공조건이다. 그래서 현장 전문가들은 공구 제조사에서 제공하는 추천조건에서 시작해, 청각을 통해 공작물이나 공구에서 비정상적인 소음이 발생하는지 확인하면서, 이송속도를 점진적으로 증가시켜 안정적이면서 생산성이 높은 가공조건을 설정하고 있다.

축방향 깊이 설정 역시 생산성에 큰 영향을 미치는 요소로, 가능한 최대 깊이로 설정하는 것이 좋지만, 가공 깊이가 과도하게 지나치게 깊어지면 진동이 발생해 공구 인서트가 파손될 수 있다. 그래서 공구 제조사의 추천 깊이에서 청각을 통해 진동이 없는지 판단하며, 깊이를 점진적으로 증가시킨다. 이를 통해 공구와 소재의 진동을 최소화하고, 시간당 제거되는 소재의 부피를 최대화하여 황삭 효율을 높이고 있다.

회전수는 체터진동과 공구수명에 직접적인 영향을 미친다. 이송속도와 절삭깊이를 고정하면 회전수가 생산성에 직접적인 영향을 미치지 않음으로, 공구 제조사의 추천 회전수에서 회전수를 높이거나 낮추며 가장 안정적인 소리가 들리는 회전수를 찾고 있다. 소음 진동이 낮은 회전수를 사용함으로써 긴 공구 수명을 기대하고 있다.

2.2 비절삭음량 최소화

본 연구에서는 소리크기를 소재 제거율(MRR)로 나눈 값을 비절삭음량(specific cutting sound level)이라고 정의하고, 비절삭음량과 현장의 청각 기반 가공조건 설정 방법 관계를 규명한다. 구체적으로는 소리크기에서 10 log(MRR) 값을 뺀 식 (1)의 값이 현장의 가공조건 설정 과정에서 어떻게 변하는지 모니터링한다.

Sound level (dB) - 10 log (MRR) (1)

여기서 MRR은 비절삭에너지를 곱하면 시간당 절삭에 필요한 에너지를 알 수 있다. 절삭 에너지 중 진동으로 인해 소리로 방출되는 비율이 높을수록 불안정한 절삭을 의미하므로, 절삭 음량을 소재 제거율로 나눈 비절삭음량이 작은 가공조건이 적합하다. 소리크기는 데시벨(dB) 단위를 사용하고 있으므로, 소재 제거율도 로그를 취하고 10을 곱해 데시벨 단위로 환산하여 일치시키면, 분수는 빼기로 바뀌어 식 (1)이 된다.

이 방법을 통해 공구마모의 원인이 되는 공구와 소재의 진동을 최소화하고, 시간당 제거되는 소재의 부피를 최대화함으로써 황삭 효율을 극대화할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 비절삭음량을 가공조건 설정의 중요한 인자로 고려하여, 이를 최소화하는 방법을 제시함으로써 안정적이고 효율적인 가공을 구현하고자 한다.

이때 식 (2)와 같이 소재 제거율 데시벨에 가중치 Weight를 추가한 비절삭음량을 적용한다면, 현장 전문가의 공구 수명과 가공시간 중요도 개인 차이를 보정할 수 있을 것으로 생각된다.

Sound level (dB) - Weight × 10 log (MRR) (2)

여기서 Weight는 소재 제거율의 영향력을 증감하는 가중치로, 생산성을 중요하게 생각한다면 1.0 정도로 값으로 높이고, 절삭소리 감소를 중요하게 생각한다면 0.5 정도로 낮추어, 전문가의 선호도를 반영할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 새로 제안한 비절삭음량 최소화 방안을 바탕으로 이송속도, 축방향 절입깊이, 회전수 조건을 설정하고자 한다. 가공조건 설정 흐름도는 Fig. 1과 같다. 이송속도와 축방향 깊이는 과도하게 높아지면 공작물이나 공구에서 비정상적인 소음이 발생할 수 있으며, 반대로 너무 낮으면 생산성이 저하될 수 있다. 첫째 공구 제조사에서 제공하는 추천조건에서 시작해 이송속도, 절삭깊이, 회전수를 증감시키며 소리크기(sound level)를 측정한다. 계산된 비절삭음량이 작아지면 같은 방향으로 변화시키고, 비절삭음량이 커지면 반대 방향으로 변경한다. 이러한 과정을 반복하는 경사하강법으로 비절삭음량이 최소가 되는 가공조건을 찾아 최적 가공조건으로 설정한다.

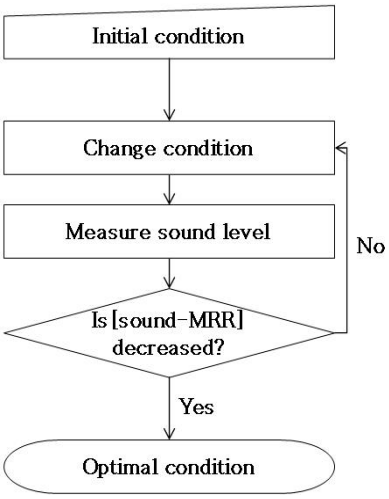


Fig. 1 Machining condition setting process

3. 실험 장치

3.1 가공 장비

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 머시닝센터이다. 주축과 홀더는 BT50으로 연결했고, 콜렛과 나사로 홀더에 고정한 셍크 돌출 길이는 69.8 mm였다. 가공경로는 평면, 경사곡면, 평면을 각각 직선이송, 원호이송, 직선이송으로 지그재그로 왕복하는 사용했고 경로간격은 1 mm로 고정했다. 수용성 절삭유를 소재와 공구 사이에 고압으로 분사하였다.

3.2 가공 소재

Fig. 3은 듀플렉스 소재로 크기는 180 × 114 × 59 mm이다. 왼쪽에 높이 59 mm에 평면 40 mm, 오른쪽에 높이 20.5 mm에 평면 64.5 mm, 높은 평면과 낮은 평면의 높이차 38.5 mm 수평거리 75.5 mm를 연결하는 곡률반경 250 mm인 경사면으로 구성되어 있다.

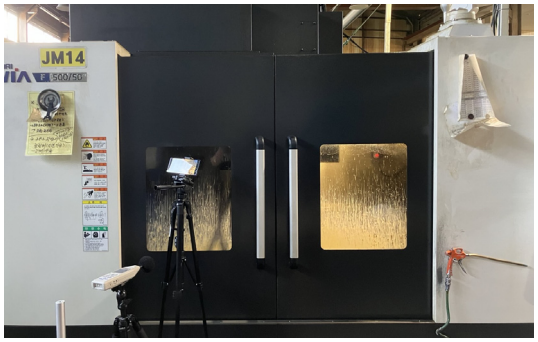


Fig. 2 The machining center used in this study

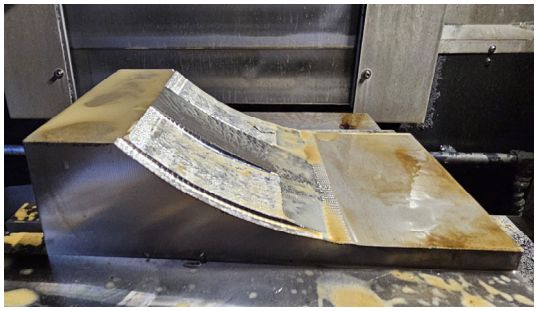


Fig. 3 Duplex stainless steel

Fig. 4 Roughing ballendmill for stainless still

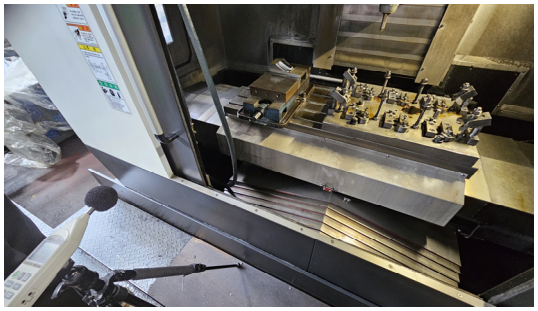


Fig. 5 Sound level meter and machining center

3.3 가공 공구

평균 경사도 0.51의 경사면과 수평면을 가지는 듀플렉스를 동시에 가공하려면 볼엔드밀이 적합하다.

Fig. 4는 스테인리스 가공용 황삭 볼엔드밀이다. 셍크(shank) 규격은 20-13-W25-L150으로 공구 직경 20 mm, 날높이 13.6 mm, 셍크 길이 45.7 mm까지 직경 25 mm, 셍크 길이 150 mm까지 직경 25 mm이다.

인서트(insert) 규격은 2FB 200-ML이고 TT8080 코팅이 적용되어 있다. 이 코팅은 TiAlN 코팅으로 듀플렉스 가공에 가장 효과적인 코팅으로 알려져 있다.

직경 20 mm 황삭 커터를 사용해 듀플렉스를 밀링에 추천한 조건은 절삭속도 80~100 m/min, 이송속도 0.05~0.1 mm/tooth, 깊이 1~2 mm이다.

4. 실험 방법

4.1 현장의 가공조건 설정

공구 제조사의 추천조건은 가공의 효율성과 품질을 고려해 설정된 평균적인 조건이다. 각기 다른 가공 장비, 공구 길이, 소재 고정 방식, 절삭유, 가공 패턴을 사용하는 기업들은 각자의 가공조건을 설정해야 한다. 따라서 가공을 시작할 때 경험을 가진 현장 전문가가 청각을 통해 감각적으로 빠르게 가공조건을 설정하고 있다.

추천조건에서 시작해 현장 전문가가 청각을 이용해 이송속도, 축방향 절삭깊이, 회전수를 증가시키며 안정적이고 생산성이 높은 황삭 조건을 설정하였다. 첫 번째로 회전수 1000 rpm과 깊이 1 mm에서 이송속도를 200, 400, 600, 800, 1000 mm/min으로 단계적으로 높여 소리와 경험을 통해 이송속도를 설정하였다. 두 번째로 깊이를 1, 2, 3 mm로 증가시키며 소리 들어 안정적인 가공 깊이를 찾았다. 세 번째로 회전수를 1000, 1200, 1400 rpm으로 변화시키면서 소리가 가장 안정적인 조건을 찾았다.

4.2 소리크기 측정

현장 전문가의 가공조건과 비절삭음량의 관계를 알아보기 위해서 모든 과정의 음량을 소음계 TES 53H 모델로 측정하였다. 기계음 측정에 적합한 C 주파수 가중치(C-weighting)를 적용하였고, 시간가중치는 느림(slow) 설정을 적용해 1초마다 평균 음량을 표시하도록 하였다. Fig. 5와 같이 머시닝센터 왼쪽 도어 앞 20 cm에 설치해 현장 전문가에게 들리는 절삭 소리 및 공장 배경 소리의 크기와 비슷하게 했다. 다른 장비의 절삭 소리 영향을 받지 않도록 작업자들의 여름 휴가 기간에 실험하였고, 절삭가공을 하지 않을 때 측정한 공장의 배경 소음은 74 dB이었다.

4.3 비절삭음량 최소화

소리크기 측정을 통해 이송속도, 절입깊이, 회전속도와 음량의 기본적인 상관관계를 수치화하고, 새로 제안한 비절삭음량과 현장 전문가의 가공조건 설정 과정과의 상관관계를 규명하였다. 또한 비절삭음량을 최소화 하는 가공조건 설정 방법을 이용해 이송속도, 축방향 절삭깊이, 회전수를 경사면에서 찾고, 평면에서도 세팅 회전수와 깊이에서 비절삭음량이 최소인 이송속도를 찾았다.

4.4 가공시간 공구마모 평가

공구 제조사에서 추천한 가공조건과 본 연구에서 설정한 가공조건으로 제품 듀플렉스 소재 전면을 가공해 가공시간과 공구마모를 평가하였다. 가공 중 영상을 촬영해 실제 가공시간을 측정하고, 가공 후 측면 인서트와 바닥 인서트의 플랭크 마모를 현미경으로 측정하였다.

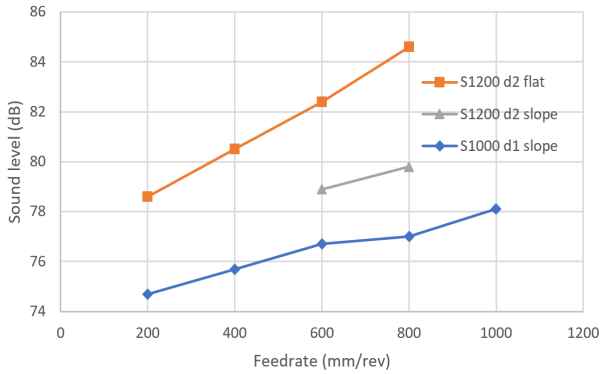
5. 실험결과 및 토의

5.1 가공조건과 소리크기

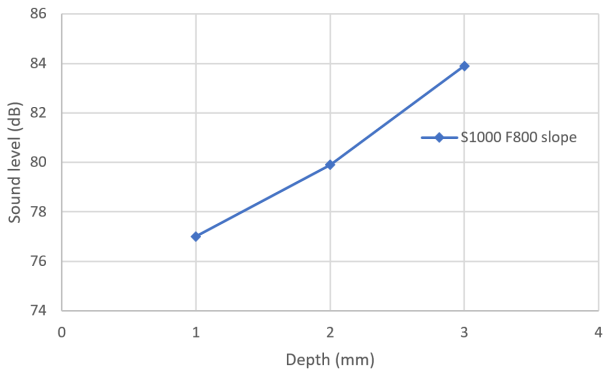
현장 전문가가 가공조건을 변화시키는 과정에서 소음계로 측정한 소리크기를 Fig. 6 그래프로 정리한 결과, 이송 속도와 축방향 깊이가 증가하면 소리크기가 커지고, 같은 조건에서는 경사면보다 평면에서 소리가 크게 발생하였다. 회전수에 따른 소리크기는 특정한 경향을 보이지 않았다.

Fig. 6(a)는 이송 속도에 따른 소리크기 그래프로, 이송 속도가 커질수록 음량은 증가한다. 회전수 1000 rpm, 축방향 가공 깊이 1 mm 경사면 밀링에서 이송 속도가 200 mm/min에서 1000 mm/min으로 증가함에 따라 음량이 74.7 dB에서 78.1 dB로 3.4 dB 증가했다. 회전수 1200 rpm, 축방향 깊이 2 mm 평면 밀링에서 이송 속도가 200 mm/min에서 800 mm/min으로 증가함에 따라 음량이 78.6dB에서 84.6dB로 6dB 증가했다.

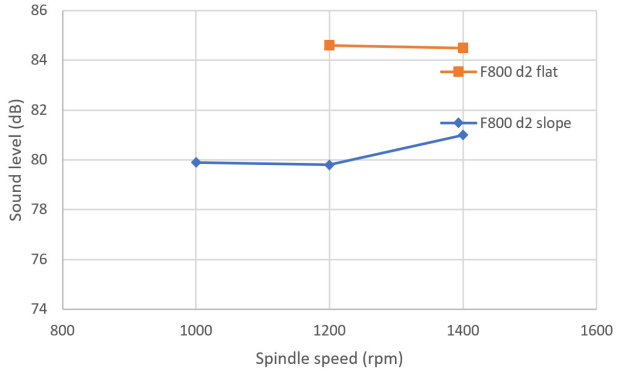
Fig. 6(b)는 경사면 가공 깊이에 따른 음량 그래프이다. 축방향 가공 깊이가 1 mm에서 3 mm로 증가할수록 음량이 77 dB에서 84 dB로 증가해, 깊이가 1 mm 증가할 때 음량이 각각 3 dB, 4 dB 증가했다.



(a) Feedrate



(b) Axial depth



(c) Spindle speed

Fig. 6 Milling conditions and sound level

Fig. 6(c)는 회전수에 따른 음량 그래프이다. 회전수가 1000 rpm에서 1400 rpm으로 변화할 때 음량은 아주 작게 바뀌었다.

Fig. 6(a)에서 같은 회전수 1200 rpm과 깊이 2 mm일 때 경사면보다 평면가공에서 음량이 약 4.2 dB 크게 발생한다. Fig. 6(c) 이송속도 800 mm/min, 축방향 깊이 2 mm, 회전수 1200 rpm과 1400 rpm에서 평면 밀링의 음량이 경사면 밀링보다 4.2 dB 크게 나타났다.

현장 전문가가 선택한 이송속도 600 mm/rev, 축방향 깊이 2 mm, 회전수 1200 rpm과 소리크기에는 상관관계가 나타나지 않았다. 이는 현장 전문가가 가공조건을 설정할 때 소리크기뿐만 아니라 다른 요소도 고려하고 있음을 시사한다.

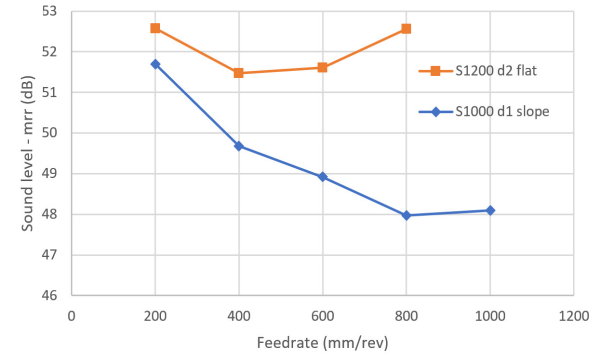
5.2 현장의 조건설정 방법과 비절삭음량 최소화

현장 전문가가 가공조건을 변화시키는 과정에서 소음계로 측정한 소리크기에서 황삭 생산성의 척도인 소재제거율의 데시벨 값을 빼서 계산한 비절삭음량을 Fig. 7 그래프로 정리한 결과, 현장 전문가가 청각과 경험으로 설정한 가공조건이 비절삭음량을 최소화하는 과정과 일치하는 것을 발견하였다. 이는 현장 전문가가 청각을 통해 가공조건을 설정하는 과정을 인공지능이 비절삭음량을 최소화하는 과정으로 모사할 수 있음을 의미한다. Fig. 7(a) Feedrate의 S1000 d1 slope는 현장 전문가가 회전수 1000 rpm 깊이 1 mm로 경사곡면을 밀링하면서 이송 속도를 200 mm/min에서 1000 mm/min으로 등간격으로 높이면서 청각으로 조건을 설정할 때 소음계로 측정한 소리크기와 소재 제거율 데시벨의 차이를 나타낸 것이다.

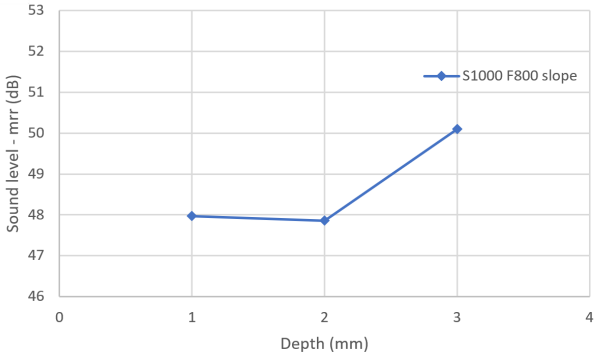
이송속도가 증가하면서 비절삭음량이 감소하다가 800 mm/min에서 최소값에 도달하고 이송속도를 높이면 다시 증가한다. 현장 전문가가 청각으로 선택한 경사면 밀링 이송속도 800 mm/min과 비절삭음량 최소화 이송속도가 서로 일치한다. 공구사 추천 조건 200 mm/min에서 비절삭음량 51.7 dB보다 현장 전문가가 청각으로 설정한 조건 800 mm/min에서 비절삭음량이 48.0 dB로 3.7 dB 감소했다. 경사면 밀링에서 현장전문가의 이송속도 설정과 비절삭음량 최소화 과정의 상관관계가 높음을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 현장 전문가가 설정한 이송속도 800 mm/min에서 축방향 가공 깊이를 1, 2, 3 mm로 증가시켜 선정하는 과정에서 측정한 소리크기와 소재제거율의 차이를 그래프로 나타낸 것이다. 전문가가 청각으로 선택한 깊이와 비절삭음량이 4.79 dB로 최소화되는 깊이 2 mm가 일치해, 청각으로 경사면 축방향 깊이를 설정하는 과정과 비절삭음량 최소화 과정 역시 상관관계가 높음을 알 수 있다.

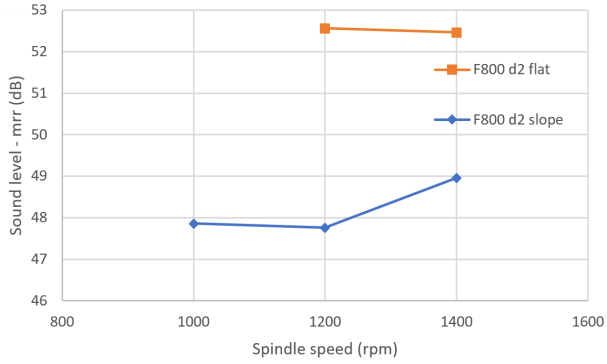
Fig. 7(c)는 전문가가 선정한 이송 800 mm/min, 깊이 2 mm에



(a) Feedrate



(b) Axial depth



(c) Spindle speed

Fig. 7 Milling condition minimizing sound level − MRR

서 회전수를 1000, 1200, 1400 rpm으로 변화시켜 최적 회전수를 선정하는 과정을 소리크기와 소재 제거율 데시벨 차이로 나타낸 그래프이다. 전문가가 청각으로 선정한 회전수가 1200 rpm에서 비절삭음량도 47.8 dB로 가장 작았다. 이렇게 경사면 밀링에서 현장 전문가가 청각을 통해 이송, 깊이, 회전수를 선정하는 과정을 비절삭음량 최소화 과정으로 설명할 수 있었다.

경사면에서 선정한 회전수 1200 rpm, 깊이 2 mm, 이송 800 mm/min 조건으로 평면을 밀링했을 때 소리가 비정상적으로 커서, 전문가가 이송 속도를 600, 400, 200 mm/min으로 감소시켜 청각을 통해 이송속도를 재 선정하였다. 그 과정에서 측정한 소리크기와 소재 제거율 데시벨 차이를 Fig. 7(a) Feedrate의 S1200 d2 flat로 나타내었고, 평면가공에서는 이송속도 400 mm/min에서 비절삭음량이 51.5 dB로 가장 작았다. 현장 전문가는 경사면과 평면을 모두 고려해 600 mm/min을 최종 이송속도로 선정하였다.

현장 전문가가 청각으로 가공조건을 선정하는 과정은 논문에서 정의한 비절삭음량을 최소화하는 과정과 일치했다. 차이점은 현장 전문가는 경사면과 평면에 동일한 이송속도 600 mm/min를 선정했지만, 비절삭음량 최소화 방법은 Fig. 7(a)와 같이 경사면의 이송속도는 800 mm/min를 평면의 이송속도는 400 mm/min을 추천한다는 것이다.

회전수는 1200 rpm, 축방향 깊이는 2 mm로 동일하고, 이송속도는 공구 제조사의 추천조건은 200 mm/min, 현장 전문가의 설정조건은 600 mm/min, 비절삭음량 최소화 조건은 경사면 800 mm/min, 평면 400 mm/min이다.

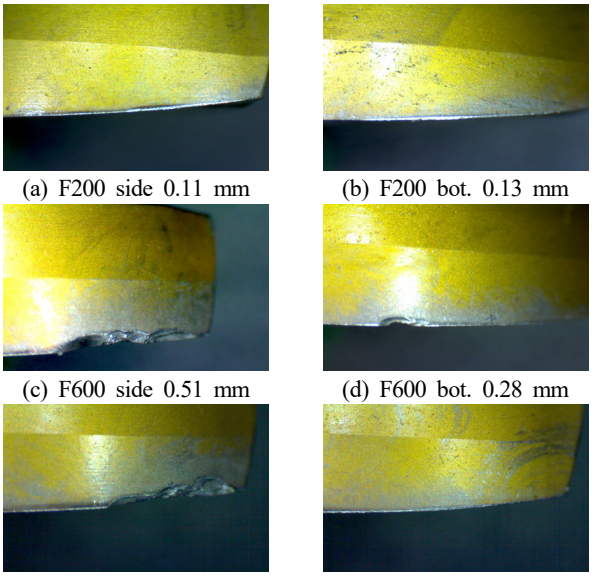
5.3 가공시간과 공구마모 비교

공구 제조사의 추천조건 200 mm/min, 현장 전문가의 설정조건 600 mm/min, 비절삭음량 최소화 조건 경사면 800 mm/min, 평면 400 mm/min으로 듀플렉스 소재를 가공해 공구마모를 Fig. 8와 같이 비교하였다. 세 가지 실험 모두 회전수 1200 rpm, 축방향 깊이 2 mm, 경로간격 1 mm 조건은 동일하다.

Fig. 8(a), (b)는 공구 제조사의 추천 이송 속도 200 mm/min으로 가공한 경우로, 가공 시간은 124분으로 길지만, 공구마모는 0.11, 0.13 mm로 연삭 마모(abrasive wear)가 미세하게 발생했다. 이것은 듀플렉스 가공 시간이 오래 걸리더라도 공구 수명을 늘리고자 할 때는, 회전당 이송 속도를 0.17 mm/rev 이하로 줄여 얇은 칩이 발생하도록 하는 것이 적합하다는 것을 의미한다.

Fig. 8(c), (d)는 전문가가 청각으로 설정한 이송 속도 600 mm/min로 가공한 경우로, 가공 시간이 약 41분으로 짧았지만, 공구마모는 0.51, 0.28 mm로 컸다. Fig. 8(c)는 측면 인서트로 5곳 이상에 깨짐(chipping)이 발생했고, Fig. 8(d)는 바닥 인서트로 측면 인서트 깨짐이 가장 크게 발생한 위치와 동일한 위치에 깨짐이 발생하였다. 현장 전문가가 청각으로 설정하는 가공조건이 생산성을 3배 높였지만, 공구 수명은 크게 단축해서, 공수 수명 관점에서 최적 조건은 아니었다. 듀플렉스 가공 이송 속도를 0.2 mm/rev로 높여 가공 시간이 약 1/3로 감소 했지만, 증가한 칩 두께가 날에 가하는 힘을 증가해 인서트 깨짐이 발생한다.

Fig. 8(e), (f)는 논문에서 제안한 비절삭음량 최소화 방법의 추천조건 경사면 800 mm/min과 평면 400 mm/min로 가공한 결과다. 가공 시간은 43분으로 짧고 공구마모는 0.77, 0.09 mm로 컸다. Fig. 8(e)는 측면 인서트로 4곳 이상에 깨짐(chipping)이 발생했고, Fig. 8(f)는 바닥 인서트로 깨짐이 없이 연삭 마모만 미세하게 발생했다.



(a) F200 side 0.11 mm (b) F200 bot. 0.13 mm
(c) F600 side 0.51 mm (d) F600 bot. 0.28 mm
(e) F400 800 s. 0.77 mm (f) F400 800 b. 0.09 mm

Fig. 8 Cutting condition and tool wear of side and bottom insert

공구 제조사, 현장 전문가, 비절삭음량 최소화 조건으로 듀플렉스 소재를 가공해 공구마모를 비교한 결과, 제조사의 조건에 비해 현장 전문가와 비절삭음량 최소화 조건이 생산성을 약 3배 높였지만, 공구마모가 크게 증가하였다. 이는 비절삭음량 최소화 방법이 현장 전문가의 방법과 비슷한 결과를 보였음을 의미한다.

6. 결론 및 고찰

밀링 이송 속도와 가공 깊이를 높이면 생산성이 향상되지만 과하면 불안정한 진동과 소음을 유발해 현장 전문가들은 오랫동안 소리를 들으며 가공조건을 설정해왔다. 본 연구에서는 전문가가 소리를 들으면서 처음 접하는 듀플렉스 소재의 가공조건을 설정하는 과정의 소리크기를 측정해, 소리크기에서 소재 제거율 데시벨을 뺀 값을 최소화하는 과정과 상관관계가 높음을 발견하였다. 이 관계식을 비절삭음량이라 정의하고, 공구 제조사, 현장 전문가, 비절삭음량 최소화 조건으로 듀플렉스 전면을 가공하는 가공시간과 공구마모를 측정하였다. 실험 결과, 현장 전문가 설정 조건과 비절삭음량 최소화 조건은 모두 공구 제조사 조건과 비교해서 생산성을 3배 정도 높일 수 있지만 인서트 깨짐이 크게 발생해 최적조건은 아니었지만, 현장의 방법과 비절삭음량 최소와 방법이 생산성과 공구수명 측면에서도 비슷한 결과를 보임을 알 수 있었다. 본 연구는 전문가 1명과 1쌍의 소재-공구를 대상으로 하였기 때문에 일반화할 수 없는 한계를 가진다.

References

[1] Yoon, J. H., Yoo, J. T., Lee, H. S., 2019, Manufacturing of Superplastic Forming Parts from Duplex Stainless Steel, Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Spring Conf., 132.

[2] Nomani, J., Pramanik, A., Hilditch, T., Littlefair, G., 2015, Chip Formation Mechanism and Machinability of Wrought Duplex Stainless Steel Alloys, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 80 1127-1135, https://doi.org/10.1007/s00170-015-7113-3.

[3] Ahmed, Y. S., Paiva, J. M., Bose, B., Veldhuis, S. C., 2019, New Observations on Built-up Edge Structures for Improving Machining Performance During the Cutting of Superduplex Stainless Steel, Tribol. Int., 137 212-227, https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.04.039.

[4] Marques, D. C., Suyama, D. I., Antunes, R. A., Hassui, A., 2023, Influence of Machining Parameters on Tool Wear, Residual Stresses, and Corrosion Resistance after Milling Super Duplex Stainless Steel UNS S32750, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 129 801-814, https://doi.org/10.1007/s00170-023-12328-7.

[5] Bagci, E., 2011, Monitoring and Analysis of MRR-based Feedrate Optimization Approach and Effects of Cutting Conditions using Acoustic Sound Pressure Level in Free-form Surface Milling, Sci. Res. Essays, 6:2 256-277.

[6] Quintana, G., Ciurana, J., Inés, F., Rodríguez, C. A., 2009, Sound Mapping for Identification of Stability Lobe Diagrams in Milling Processes, Int. J. Mach. Tools Manuf., 49:3-4 203-211, https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.11.008.

[7] Rech, J., Dumont, F., Le Bot, A., Arrazola, P. J., 2017, Reduction of Noise During Milling Operations, CIRP J. Manuf. Sci. Technol., 18 39-44, https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.09.001.

Jae-Ho Jeon
Student in the Graduate School of Convergence Science & Technology, Gyeongsang National University.
His research interest is CNC Machining.
E-mail: js1116@hanmail.net

Su-Been Park
Student in the School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.
Her research interest is CNC Machining and Production Quality.
E-mail: subean0607@gnu.ac.kr

Dong-Hyeon Jo
Student in the School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.
His research interest is CNC Machining and Machining Precision.
E-mail: mount7429@naver.com

Su-Jin Kim
Professor in the School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University.
His research interest is CAM and CNC Machining.
E-mail: sujinkim@gnu.ac.kr