



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

광학 소자용 금형 가공 방법에 따른
금속의 연성과 변형특성 간 상관관계 분석

Analysis of the Relationship of Ductility and
Deformation in Metals through Mold Machining
Methods for Optical Element

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

이 화 섭

광학 소자용 금형 가공 방법에 따른
금속의 연성과 변형특성 간 상관관계 분석

지도교수 전은채

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2024년 02월

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

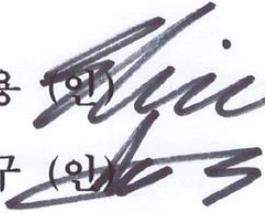
이 화 섭

이화섭의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원장 신 상 용 (인)

심사위원 이 정 구 (인)

심사위원 전 은 채 (인)



울산대학교 대학원

2024년 02 월

감사의 글

대학원 생활을 하면서 그 이전의 어떤 생활보다도 밀도 높은 인생을 살았다는 생각이 들었습니다. 처음 입학 당시를 생각해보면 참 많이 성장했다는 것을 느끼고 있고 이 모든 것이 온전히 제가 한 것이 아니라 저를 지금까지 지도해주신 전은채 교수님을 비롯해서 연구실 생활을 함께한 모두 덕분인 것 같습니다. 정말 감사합니다.

지난 2년동안 전은채 교수님께 지도를 받으며 얻은 과실은 2년 전에는 감히 상상도 못할 것들이라 너무도 감사드린다는 말씀을 드리고 싶습니다. 시간을 2년 전으로 돌리더라도 다시 교수님께 오고 싶을 정도로 좋은 시간들이었습니다. 이 모든 것들이 교수님의 배려와 관심으로부터 왔다는 것을 잊지 않고 앞으로 제가 살아갈 인생에서 하나의 지표로 삼아 열심히 나아가도록 하겠습니다. 감사합니다.

그리고 연구실에서 많은 시간을 함께하며 좋은 순간도 힘든 순간도 많았지만 조언을 아끼지 않고 해준 동현이형, 지윤이누나, 같이 있어 든든했던 동현이, 회연이, 연경이, 민지, 지윤이 모두 감사합니다. 이외에도 함께 고민해주고 힘이 되어준 금속방 친구들을 비롯해 다른 대학원 동기 친구들에게도 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 갑작스러운 진학 결정에도 아무 내색하지 않고 지원해주시고 응원해주시고 관심을 가져 주신 부모님을 비롯한 가족들 너무 감사합니다. 든든한 가정이 있었기에 걱정없이 2년 동안 공부에 전념할 수 있었습니다.

대학원 졸업이 끝이 아닌 새로운 시작이라 생각하고 더 정진하도록 하겠습니다. 감사합니다.

국문 요약

광학 분야에서는 광학적 특성을 제품에 부여하기 위해 다양한 크기 및 형상의 패턴을 활용하고 있으며, 이러한 패턴을 금형에 새기고 사출 성형 등의 방식을 통해 패턴이 복제된 제품을 생산하고 있다. 광학 소자용 금형은 정밀 기계 가공, 소성 가공, 방전 가공, 레이저 가공, 식각 등의 방법을 통해 제작할 수 있으며, 금형을 통해 제작된 광학 소자는 금형의 패턴이 동일하게 복제되기 때문에 정확한 규격의 패턴을 제작하는 것이 중요하다. 이때 금형 가공 방법에 따라, 금형의 기계적 특성에 따라 변형특성이 달라지기 때문에 금형용 소재, 가공 방법 등이 개발될 때마다 변형특성 분석을 새로 해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 변형특성과 상관관계가 있는 인자를 찾아 분석하고 금형을 제작하기 위한 새로운 가공 방법에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 드릴 가공을 통한 금형 제작 시 소재의 연성 및 가공 조건에 따른 변형특성을 분석하는 새로운 방법을 개발하고자 하였으며, 압입 가공을 통한 금형 제작 시 변형특성과 금형을 통해 제작한 광학 소자의 광학적 특성을 분석하는 연구를 진행하고자 하였다.

드릴 가공을 통한 금형 제작 시에는 소재를 제거하여 패턴을 제작하는 기계 가공 특성상 패턴의 치수성과 표면 거칠기가 중요할 것으로 생각되므로, 드릴 가공을 통해 제작된 홀의 입/출구부의 직경과 표면 거칠기를 분석하였다. 입/출구부의 직경은 소재 제거 시 파괴 거동, 가공 중 발생하는 진동 등에 의해 설계한 가공 직경과 차이가 발생할 수 있으므로 가공 직경 대비 입/출구부의 증감율을 통해 치수성을 분석하였다. 표면 거칠기는 공구 이송 거리와 공구 반지름을 통해 이론적으로 계산할 수 있지만, 실제 표면 거칠기는 소재의 기계적 특성, 절삭 속도 등의 영향을 받아 변화한다. 따라서 공구 이송 거리와 공구 반지름의 영향을 배제하기 위해 측정값을 이론값으로 나눈 표면 거칠기 비율을 도입하여 변형특성을 분석하였다.

입/출구부의 직경은 모든 소재 및 가공 조건에서 가공 직경과 1% 미만의 차이로 나타나 치수성이 우수함을 검증할 수 있었다. 표면 거칠기 비율은 소재의 연신율에 영향을 받는 것으로 나타났으며 이는 연신율이 소재 제거 시 필요한 파괴인성과 관련이 있으며, 소재가 제거될 때까지 발생하는 소성 변형 정도를 의미하기 때문으로 판단하였다. 또한 절삭 속도는 공구의 마모 진전 속도에 영향을 주어 표면 거칠기에 영향을 주는 것으로 나타났다. 이를 통해 금형의 기계 가공 시 소재의 연신율과 가공 조건을 통해 표면 거칠기를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

압입 가공은 비교적 최근 개발된 기술으로, 압입자로 소재를 눌러 발생하는 소성 변형을 점형 패턴으로 활용하는 공정이다. 점형 패턴은 단면 형상 및 크기에 따라 광학적 특성이 달라지는 것으로 알려져 있다. 따라서 conical tip 압입자와 Vickers tip 압입자를 통해 3가지 형상의 패턴을 제작하였으며, 각 형상별로 3가지 크기 조건을 선정하여 총 9개의 패턴 어레이를 제작하였다.

압입 가공 시 압입부 주변에 발생하는 pile-up 현상을 억제하기 위해 금형으로 사용할 소재에 열처리를 진행하였으며, 초정밀 가공 장비를 통해 평삭가공을 실시하여 금형 표면을 경면으로 만들었다. Conical tip 압입자와 Vickers tip 압입자를 통해 압입 가공을 수행하여 단면 형상이 원형, 사각형, 마름모 형상인 점형 패턴을 제작하였다. 제작된 금형에 PDMS를 주입하고 경화시켜 광학 소자를 제작한 결과 사각형 및 마름모 형상 점형 패턴은 크기와 관계없이 일정한 광학적 특성을 나타냈으며, 원형의 점형 패턴은 크기가 클수록 빛의 확산 면적 및 반치폭이 증가하였다. 본 연구에서는 이러한 결과를 통해 패턴의 형상 및 크기와 소재의 굴절률을 통해 빛의 굴절각을 계산함으로써 임의의 광학적 특성을 가지는 광학 소자 제작을 위한 금형을 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

차 례

1. 서론	- 7 -
1.1 연구 배경 및 목적.....	- 7 -
2. 이론적 분석	- 11 -
2.1 가공 조건에 따른 이론적 표면 거칠기 계산.....	- 11 -
2.2 압입자 형상에 따른 패턴 높이 및 투영면적 계산.....	- 14 -
2.3 점형 패턴의 형상에 따른 빛의 거동.....	- 16 -
3. 금형의 기계 가공 시 변형특성 변화 분석	- 18 -
3.1 실험 방법.....	- 18 -
3.1.1 실험 장비 및 피삭재.....	- 18 -
3.1.2 가공 좌표 설정.....	- 20 -
3.1.3 실험 조건 및 변형특성 측정 방법.....	- 21 -
3.2 결과 및 고찰.....	- 24 -
3.1.1 공구 마모 분석.....	- 24 -
3.1.2 입/출구 직경 분석.....	- 31 -
3.1.3 표면 거칠기 분석.....	- 33 -
4. 금형의 소성 가공 시 변형특성 변화 분석	- 36 -
4.1. 실험 방법.....	- 36 -
4.1.1 시편 제작.....	- 36 -

4.1.2 실험 장비 및 실험 방법.....	- 39 -
4.1.3 금형을 활용한 광학 소자 제작 및 광학적 특성 분석 방법.....	- 41 -
4.2. 결과 및 고찰	- 43 -
4.2.1 금형 및 광학 소자의 패턴 형상 및 크기 분석.....	- 43 -
4.2.2 패턴의 형상 및 크기에 따른 광학 소자의 광학적 특성 분석.....	- 46 -
4.2.3 원형 점형 패턴의 크기와 반치폭의 상관관계 분석.....	- 49 -
5. 결론.....	- 51 -
6. 참고문헌	- 52 -

그림 목차

그림 1-1. 드릴 가공 중 공구 끼임 현상

그림 1-2. 압입 가공 모식도

그림 2-1. 구형 공구를 활용한 평탄한 소재 가공 모식도

그림 2-2. (a) Vickers tip 압입자 형상 및 (b) conical tip 압입자의 blunt 영역 형상

그림 2-3. 다각형 패턴과 반구형 패턴의 크기에 따른 입사각 비교

그림 3-1. 드릴 가공용 (a) 머시닝센터, (b) 홀더, (c) 인서트 드릴

그림 3-2. 드릴 가공 시 좌표 선정

그림 3-3. 드릴 가공 및 변형특성 분석 실험 순서도

그림 3-4. 표면 거칠기 및 입/출구 직경 측정 위치

그림 3-5. SCM440의 가공 횟수에 따른 공구 마모량

그림 3-6. SM45C의 가공 횟수에 따른 공구 마모량

그림 3-7. STS316L의 가공 횟수에 따른 공구 마모량

그림 3-8. SCM440의 절삭속도 150m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

그림 3-9. SCM440의 절삭속도 170m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

그림 3-10. SCM440의 절삭속도 180m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

그림 3-11. SM45C의 절삭속도 170m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

그림 3-12. STS316L의 절삭속도 150m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

그림 3-13. STS316L의 절삭속도 180m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

그림 3-14. STS316L의 절삭속도 200m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

그림 3-15. SCM440 및 STS316L 가공 시 칩 길이 차이

그림 3-16. STS316L 절삭속도 150m/min 조건의 (a) 내측날 상면, (b) 내측날 코너부 측면, 절삭속도 200m/min 조건의 (c) 내측날 상면, (d) 내측날 코너부 측면

그림 3-17. SCM440의 절삭속도 (a) 150m/min, (b) 170m/min (c) 180m/min 조건의 입/출구부 직경

그림 3-18. SM45C의 절삭속도 170m/min 조건의 입/출구부 직경

그림 3-19. STS316L의 절삭속도 (a) 150m/min, (b) 180m/min, (c) 200m/min 조건의 입/출구부 직경

그림 3-20. SCM440의 가공 횟수에 따른 (a) 십점 평균 거칠기, (b) 중심선 표면 거칠기

그림 3-21. SM45C의 가공 횟수에 따른 (a) 십점 평균 거칠기, (b) 중심선 평균 거칠기

그림 3-22. STS316L의 가공 횟수에 따른 (a) 십점 평균 거칠기, (b) 중심선 표면 거칠기

그림 4-1. 고온 실험용 전기로 (a) 내부, (b) 제어부

그림 4-2. 초정밀 가공 장비

그림 4-3. (a) 열처리 후 시편, (b) 2차 평삭 가공 후 시편

그림 4-4. (a) Conical tip 압입자와 (b) Vickers tip 압입자

그림 4-5. 금형을 활용한 투명 광학 필름 제작 과정 (a) 액상의 PDMS 주입, (b) 기포 제거, (c) 경화된 투명 광학 필름

그림 4-6. 투명 광학 필름의 광학적 특성 분석 실험 모식도

그림 4-7. (a) FF 15.33%, (b) FF 23.67%, (c) FF 37.31% C-type 패턴

그림 4-8. (a) FF 14.53%, (b) FF 24.27%, (c) FF 36.31% S-type 패턴

그림 4-9. (a) FF 15.66%, (b) FF 25.15%, (c) FF 39.31% R-type 패턴

그림 4-10. Au 코팅용 Sputter coater

그림 4-11. 투명 광학 필름에 복제된 (a) FF 15.33% C-type 패턴, (b) FF 14.53% S-type 패턴, (c) FF 15.66% R-type 패턴

그림 4-12. (a) FF 15.33%, (b) FF 23.67%, (c) FF 37.31% C-type 패턴을 통과한 광원

그림 4-13. (a) FF 14.53%, (b) FF 24.27%, (c) FF 36.31% S-type 패턴을 통과한 광원

그림 4-14. (a) FF 15.66%, (b) FF 25.15%, (c) FF 39.31% R-type 패턴을 통과한 광원

그림 4-15. 사각뿔 패턴을 통과한 빛의 굴절 거동

그림 4-16. FF 37.31% C-type 패턴의 빛의 전체 면적 기준 (a) 전체 빛의 면적 비율, (b) 최대 밝기 빛의 면적 비율

그림 4-17. (a) FF 0%, (b) FF 15.33%, (c) FF 23.67%, (d) FF 37.31% 원형 점형 패턴을 통과한 빛의 위치에 따른 빛의 밝기

그림 4-18. 광학 소자 패턴 크기와 반치폭의 상관관계 (a) log-log plot, (b) linear fitting

표 목차

- 표 1. 변형특성 평가에 영향을 미치는 조건
- 표 2. SCM440, SM45C, STS316L 의 조성
- 표 3. SCM440, SM45C, STS316L 의 연신율
- 표 4. 드릴 가공 공구 이송 거리 및 절삭 속도 조건
- 표 5. SCM440 및 STS316L 의 평균 표면 거칠기 및 측정-이론 표면 거칠기 비율
- 표 6. 시편 경면 제작을 위한 평삭 가공 조건
- 표 7. 각 패턴 형상에서의 목표 크기 조건 및 fill factor
- 표 8. 압입 가공을 통해 제작한 점형 패턴의 평균 면적 및 fill factor

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

광학 분야에서는 광학적 특성을 제품에 부여하기 위해 다양한 크기 및 형상의 패턴을 활용하고 있으며, 이러한 패턴은 금형에 새기고 복제하는 방식으로 제품을 생산하고 있다[1-5]. 광학 소자용 금형은 일반적으로 정밀 기계 가공, 방전 가공, 레이저 가공, 식각 등의 방법을 통해 제작되고 있으며, 금형을 통해 제작된 광학 소자는 금형의 패턴이 동일하게 복제되기 때문에 정확한 규격의 패턴을 제작하는 것이 중요하다. 이때 금형 가공 방법에 따라, 금속의 기계적 특성에 따라 변형특성이 달라지기 때문에 금형용 소재, 가공 방법 등이 개발될 때마다 변형특성 분석을 새로 해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 변형특성과 상관관계가 있는 인자를 찾아 분석하고 금형을 제작하기 위한 새로운 가공 방법에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다. 기계 가공을 통한 금형 제작의 경우 공구와 소재의 직접적인 접촉을 통해 소재를 제거하는 방식으로 가공을 진행되며, 가공 시간이 매우 짧기 때문에 가공이 진행되는 시간 대비 공구와 소재에 작용하는 에너지가 매우 높아 돌발적인 공구의 치핑 혹은 파손이 발생할 우려가 있다. 따라서 직접적인 마찰이 진행되는 부분의 안정성이 중요하므로 가공면의 표면 거칠기, 가공부의 크기, 공구 마모 상태, 가공 시 작용하는 힘의 측정 등을 통해 변형특성을 평가하는 것이 일반적이다 [6-13]. 소성 가공을 통한 금형 제작의 경우 소재를 제거하지 않고 소성 변형만을 이용해 가공을 진행하기 때문에 소재에 가해지는 응력에 따라 가공부가 변형되는 정도가 불규칙하며, 가공부 주위로 변형이 전파되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 가공되는 부위가 변형되는 정도와 변형부 주변에서 발생하는 2차 소성 변형의 정도 등을 통해 변형특성을 평가할 수 있다. 이러한 변형특성은 표 1과 같은 다양한 조건들에 의해 영향을 받아

변화하므로, 이러한 조건들을 변수로 활용하여 변형특성을 평가하는 연구가 많이 진행되어 왔다[6-21]. 이중 소재의 연성은 소재 파괴 시까지 발생하는 소성 변형의 양을 의미하므로 표면 거칠기와 2차 소성 변형 등의 변형특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 광학 소자용 금형 제작 시 가공 방법에 따라 금속의 연성이 변형특성에 미치는 영향에 대하여 분석을 진행하고자 하였다. 이때 가공 환경을 최대한 통제하기 위해 수직 방향으로만 가공이 진행되는 드릴 가공과 동일하게 수직 방향으로만 하중을 가해 소재를 변형시키는 압입 가공을 수행하여 변형특성 분석을 진행하였다.

드릴 가공은 공구가 수평 방향으로 회전하면서 소재의 수직 방향으로 진행하여 소재를 제거하여 구멍을 만드는 가공법으로, 가공 중 제거된 소재 즉 칩이 가공 진행 방향의 반대 방향으로 배출되기 때문에 칩이 배출되는 과정에서 공구와의 마찰을 통해 발생한 마찰열을 머금은 칩들이 공구와 지속적인 마찰을 통해 부분 접합이 발생하여 그림 1-1과 같이 가공부에서 공구가 소재에 끼이거나 공구가 조기 파손되는 등의 문제가 발생할 수 있다. 또한 공구의 급속한 마모 진행, 치핑 등의 현상은 가공면을 손상시킬 가능성이 있으므로 가공면의 품질과 직결되는 표면 거칠기를 중점으로 관찰하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 드릴 가공 분야에서 많이 사용되는 상용 소재인 SCM440, SM45C와 상용 소재에 비해 변형특성이 떨어지는 것으로 알려진 소재인 STS316L에 대하여 드릴 가공을 진행하여 금속의 연성에 따른 표면 거칠기 분석을 진행하고자 한다. 또한 공구 수명을 ISO 기준인 0.3mm보다 보수적인 0.2mm로 설정하고 공구 마모를 주기적으로 관찰하여 공구의 파손으로 인한 데이터 왜곡 및 공구 끼임 현상을 방지하고자 하였다.

압입 가공은 점형 패턴을 가공하기 위해 비교적 최근 개발된 기술로 그림 1-2에 나타난 것과 같이 압입자로 소재의 평평한면을 수직 방향으로 눌러 소성 변형을 일으킴으로써 소재에 압입자의 단면 형상과 동일한 형태의 압흔을 제작하는 가공법이다[22-23].

압입 가공은 공구 첨단 의 형상에 따라 다양한 형태의 점형 패턴을 제작할 수 있으며, 기존 점형 패턴 제작에 사용되던 기계 가공, 레이저 식각, 리소그래피 등의 기술에 비해 간단하게 가공이 가능하다는 장점이 있다. 다만 소재 표면을 눌러 소성 변형을 가하는 압입 가공 특성상 압입부에서 발생한 압축 응력에 의해 주변 소재가 밀려 올라가는 pile-up 현상 또는 주변 소재가 압입부로 말려 들어가는 sink-in 현상이 나타날 수 있기 때문에 활용에 어려움이 있다[24-28]. 이에 본 연구에서는 열처리를 진행하여 불규칙한 소성 변형 현상을 억제하는데 성공한 기존 문헌을 참고하여 동일한 조건으로 열처리를 진행하였으며, 패턴의 크기를 고려하여 패턴 간격을 설계함으로써 각 패턴의 가공에서 발생하는 응력장에 의한 영향을 최소화하고자 하였다.



그림 1-1. 드릴 가공 중 공구 끼임 현상

표 1. 변형특성 평가에 영향을 미치는 조건

공구 조건	가공기 종류, 공구 소재, 공구 형상, 공구 코팅 등
소재 조건	소재 연신율, 소재 구조, 합금 비율, 열처리 여부 등
가공 조건	절삭 속도, 이송 거리 등

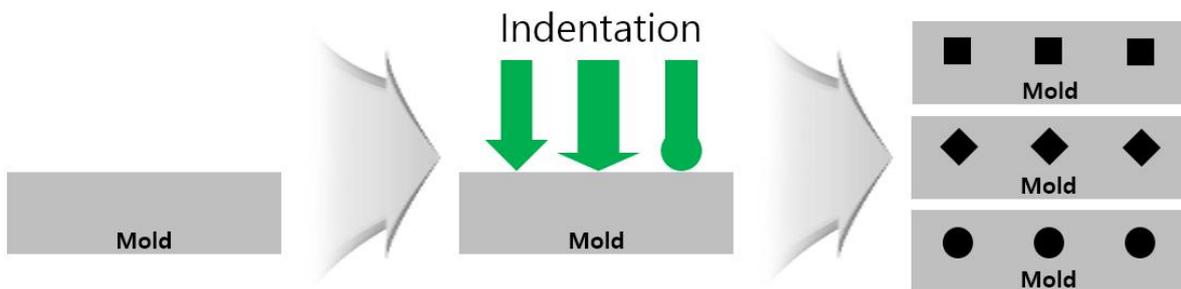


그림 1-2. 압입 가공 모식도

2. 이론적 분석

2.1 가공 조건에 따른 이론적 표면 거칠기 계산

표면 거칠기는 이론적으로 공구 반지름(r)과 공구 이송 거리(f)을 통해 계산되며, 일반적으로 기준 길이 내의 표면 거칠기 곡선에서 의미를 가지는 임의의 값을 추출하여 표현한다. 가장 널리 알려져 있으면서 가장 간단하게 계산되는 형태인 최대 높이 거칠기(R_y)는 표면 거칠기 곡선에서 가장 높은 산(Peak)의 높이와 가장 낮은 골(Valley)의 깊이의 합으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_y \approx \frac{f^2}{8r}$$

이는 전체 표면 거칠기 곡선에서 극히 일부의 수치를 계산한 표면 거칠기로 신뢰성이 비교적 낮기 때문에 일반적으로 십점 평균 거칠기(R_z) 혹은 중심선 평균 거칠기(R_a)를 사용하는 경우가 많다. 십점 평균 거칠기는 가장 높은 산 5개의 높이(R_p)와 가장 낮은 골 5개의 깊이(R_v)의 합을 평균 낸 것으로, 최대 높이 거칠기보다 많은 데이터를 사용하기 때문에 비교적 신뢰성이 높다고 할 수 있으며 수식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_z = \frac{1}{10} \sum_i^5 R_{p_i} + R_{v_i}$$

중심선 평균 거칠기는 기준 길이 내의 표면 거칠기 곡선에서 상단부 면적의 총합과 하단부 면적의 총합이 같아지도록 임의의 중심선을 긋고 중심선을 기준으로 표면 거칠기 곡선을 적분하였을 때 적분 값의 평균을 중심선 평균 거칠기라 한다. 중심선 평균 거칠기는 기준 길이 내에 존재하는 모든 곡선의 평균 높이를 나타내기 때문에 가장 많은 데이터를 사용하여 신뢰성이 높다고 여겨지며, 다음과 같은 수식으로 정의된다.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx$$

십점 평균 거칠기와 중심선 평균 거칠기는 표면 거칠기 곡선에서 10개 이상의 데이터를 활용하여 값을 추출하기 때문에 계산을 위해서는 표면 거칠기 곡선이 필요하지만 십점 평균 거칠기는 표면 거칠기 곡선에서 산의 높이와 골의 높이가 균일하다고 가정하면 이론적으로 최대 높이 거칠기와 동일하기 때문에 이론적으로 계산된 값 또한 동일하다고 간주할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최대 높이 거칠기의 이론값을 십점 평균 거칠기의 이론값으로 적용하였다. 또한 중심선 평균 거칠기의 정의와 그림 2-2에 나타낸 것과 같은 구형 공구를 통해 평탄한 소재를 가공하는 모식도를 통해 다음과 같이 중심선 평균 거칠기를 수식적으로 정의할 수 있으며, 아래 수식을 모두 풀어내면 이론적 중심선 평균 거칠기를 반지름(r)과 공구 이송 거리(f_1)만으로 계산할 수 있다[29]. 결과적으로 십점 표면 거칠기와 중심선 평균 거칠기 모두 공구 반지름과 공구 이송 거리만으로 이론 값을 계산할 수 있으므로 이를 표면 거칠기 분석에 활용하였다.

$$R_a = \frac{r^2 \theta_2 - f_2(r - h_2)}{f_1}$$

$$\begin{cases} \theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{2r^2 - f_2^2}{2r^2} \right) \\ f_2 = 2\sqrt{r^2 - (r - h_2)^2} \\ h_2 = \frac{f_1^2}{8r} - h_1 \\ h_1 = \frac{r^2}{2f_1} \cos^{-1} \left(\frac{2r^2 - f_1^2}{2r^2} \right) - \frac{1}{2} \left(r - \frac{f_1^2}{8r} \right) \end{cases}$$

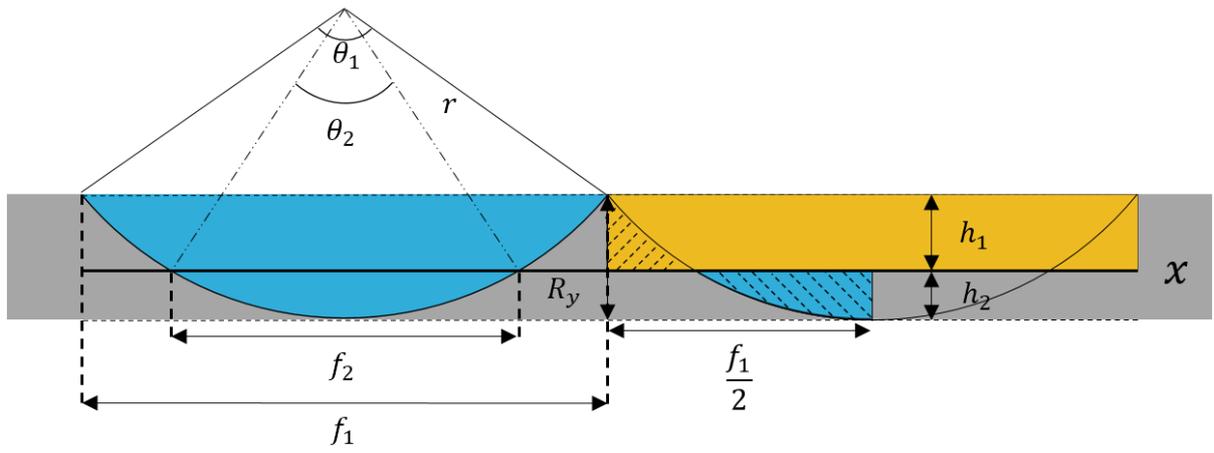


그림 2-1. 구형 공구를 활용한 평탄한 소재 가공 모식도

2.2 압입자 형상에 따른 패턴 높이 및 투영면적 계산

압입 가공은 앞서 설명한 바와 같이 압입자로 재료의 표면을 눌러 소성 변형시킨 재료의 압흔을 패턴으로 활용할 수 있으며, 패턴의 높이 및 형상은 압입자의 팁과 압흔의 직경을 통해 계산할 수 있다. 비커스 경도 시험에서 사용하는 Vickers tip 압입자와 동일한 꼭지각을 가지는 사각뿔 압입자의 경우 대면각이 136° 이므로 그림 2-2 (a)에 나타낸 것과 같이 한 면에서 사각뿔의 중심까지의 각이 68° 가 된다. 이때 사각뿔의 바닥면의 한 변의 길이를 a , 패턴의 높이를 h 라 할 때 삼각함수를 적용하여 패턴의 높이와 투영면적 ($A_{proj.}$)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = \frac{a}{2 \tan 68^\circ}, \quad A_{proj.} = a^2 = 4h^2 \tan^2 68^\circ = 24.5042h^2$$

원뿔 형상의 첨단을 가지는 conical tip 압입자의 경우 미세 가공을 통해 완전 뾰족한 형상을 만드는 것은 불가능하므로 압입자의 팁부분에 뾰족한 부분인 blunt 영역이 존재하며, blunt 영역은 그림 2-2 (b)에 나타낸 것처럼 구형상으로 존재하여 임의의 반지름과 원뿔의 꼭지각을 모두 갖는다. 이를 활용하여 본 연구에서는 conical tip 압입자의 blunt 영역을 통해 반구 형상의 패턴을 가공하고자 하였다. Blunt 영역의 반지름을 r , 바닥면의 직경을 a , 패턴의 높이를 h 라 할 때 원뿔 형상 압입자를 활용하여 가공한 반구 형상 패턴의 높이와 투영면적은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{a^2}{4}}, \quad A_{proj.} = \frac{\pi a^2}{4} = \pi \left(\sqrt{r^2 - (r-h)^2} \right)^2 = \pi h(2r-h)$$

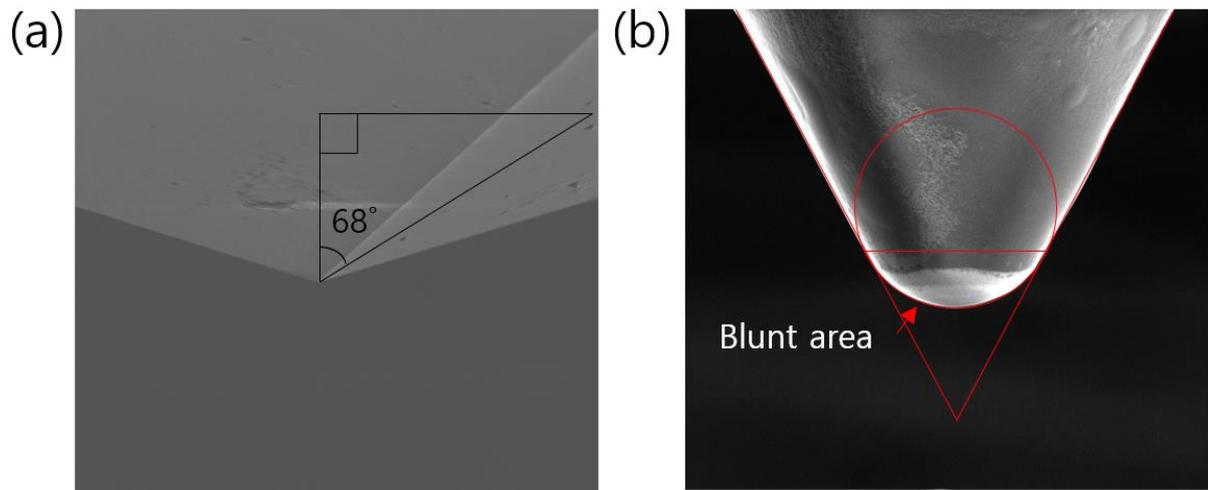


그림 2-2. (a) Vickers tip 압입자 형상 및 (b) conical tip 압입자의 blunt 영역 형상

2.3 점형 패턴의 형상 및 크기에 따른 빛의 거동

빛은 굴절율이 서로 다른 매질을 통과할 때 빛의 입사각에 따라 굴절되는 현상이 발생한다. 빛이 n_1 의 굴절율을 가진 매질 1에서 n_2 의 굴절율을 가진 매질 2로 통과할 때 두 매질 사이의 경계면에 수직한 선을 법선이라 하고 이 법선과 매질 1에서 지나가는 빛이 이루는 각도인 입사각을 θ_1 이라 할 때 법선과 매질 2에서 굴절된 빛이 이루는 각도인 굴절각을 θ_2 라 하면 Snell's law에 의해 굴절율과 입사각, 굴절각은 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}, \quad \sin\theta_2 = \frac{n_1 \sin\theta_1}{n_2}$$

압입 가공을 통해 점형 패턴을 제작한 광학 소자의 경우 그림 2-3와 같이 빛이 평면이 아닌 특정한 형상을 가지는 패턴을 통과하기 때문에 빛이 동일한 각도로 조사되더라도 그 패턴의 형상에 따라 빛이 입사되는 각도가 달라지게 되어 빛이 굴절되는 각도 또한 달라지게 된다. 다각뿔 형상의 패턴의 경우 동일한 공구로 가공한다면 패턴의 높이가 달라지더라도 패턴의 꼭지각이 동일하게 나타나므로 다각뿔 형상의 패턴을 빛이 통과하는 경우 패턴의 동일한 면에 존재하는 임의의 위치에서의 법선과 패턴의 표면이 이루는 각도가 항상 동일하기 때문에 빛은 항상 동일한 굴절각을 가진다. 그러나 원뿔 형상의 공구를 통해 패턴을 가공하는 경우 패턴의 높이가 높을수록 패턴은 공구의 반지름과 동일한 크기의 반구에 가까워지게 되며, 패턴의 표면이 구형상이기 때문에 표면의 모든 점에 대한 수직선은 모두 구의 중심을 통과하여 입사되는 빛과 표면에 수직한 선이 이루는 입사각이 위치에 따라 달라지게 된다. 이때 반구의 끝부분에 한없이 가까운 지점에서 통과한 빛의 입사각은 90° 에 한없이 가까워지며, 사인 곡선은 90° 까지 각도가 커질수록 값이 커지므로 반구 형상의 패턴에서 입사각이 클수록 굴절각이 커지게 된다. 따라서 패턴의 높이가 높을수록 패턴을 지나가는 빛의 최대 입사각이 커져 패턴을 통과한 빛의 최대

굴절각이 커지게 된다.

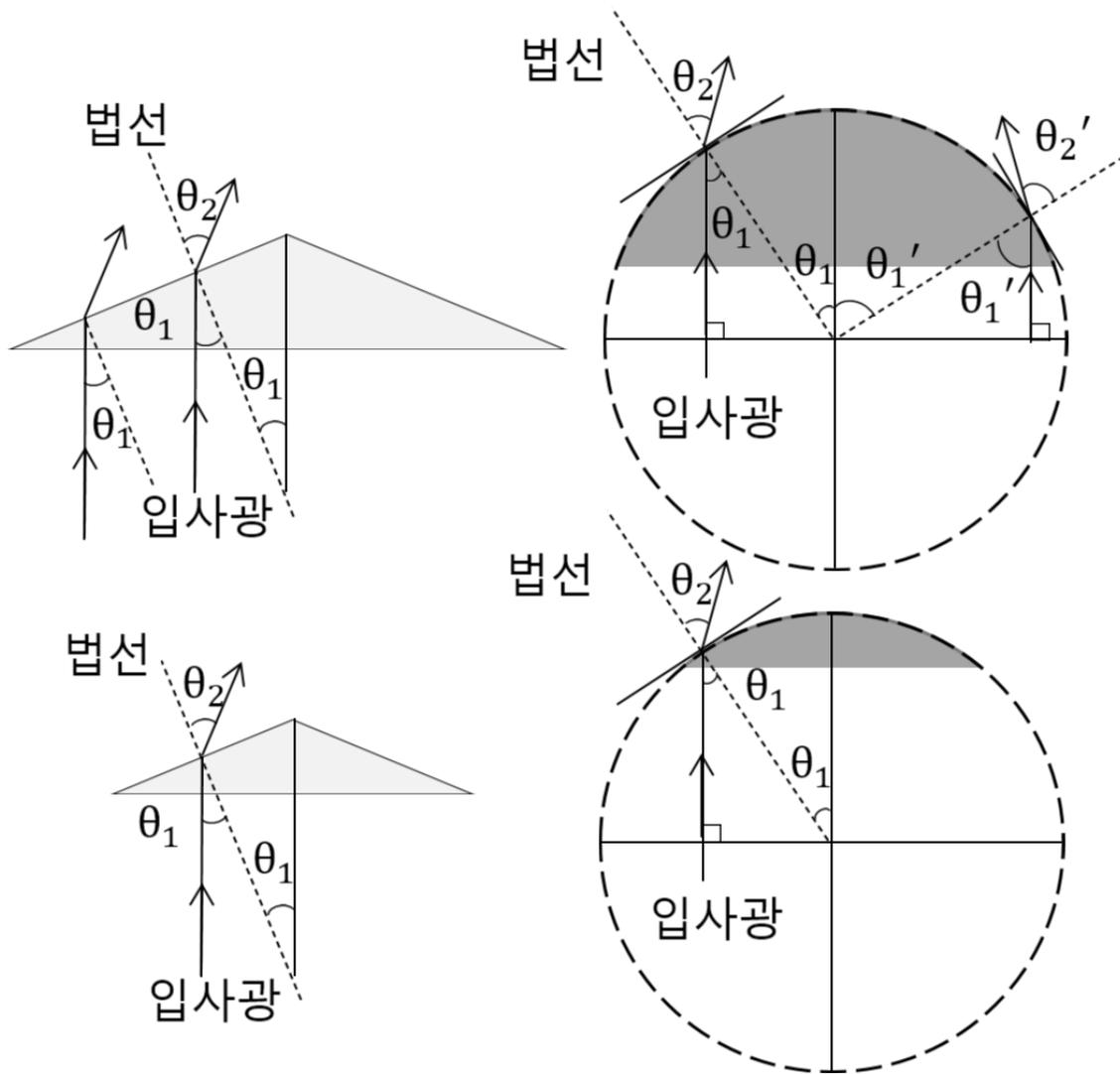


그림 2-3. 다각형 패턴과 반구형 패턴의 크기에 따른 입사각 비교

3. 금형의 기계 가공 시 변형특성 변화 분석

3.1 실험 방법

3.1.1 실험 장비 및 피삭재

드릴 가공은 매우 빠른 속도로 회전하는 공구가 소재를 제거하기 때문에 원활한 가공을 위해서는 절삭유 분사가 필수적이며, 이를 위해서는 머시닝 센터에서 가공을 진행하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 그림 3-1과 같이 디엔솔루션 사의 머시닝 센터(Mynx 6500/50)를 사용하였으며, 머시닝 센터의 스피들에 직경이 26mm인 홀더를 장착한 뒤 홀더에 반지름이 1mm보다 작은 초경합금 재질의 인서트 드릴을 장착하여 드릴 가공을 진행하였다. 인서트 드릴은 가공할 역할을 하는 동일한 규격의 공구 2개를 홀더에 장착하여 각각 구멍의 안쪽의 소재를 제거하는 내측날과 구멍의 외각 즉 소재에 나타나는 가공면의 소재를 제거하는 외측날로 사용하는 공구를 말한다.

드릴 가공에 사용될 피삭재는 소재의 연성에 따른 변형특성 분석을 위해 기계 구조용 강으로 산업에서 많이 활용되는 SCM440, SM45C와 내식성이 강해 다양한 분야에서 활용되는 오스테나이트계 스테인리스강인 STS316L을 사용하였다. 피삭재는 규격이 250mm*500mm*30mm(세로*가로*두께)인 판재를 사용하였으며, 세 강종의 조성과 연신율을 표 2, 3에 나타내었다. 연신율은 재료가 제거되기 전에 발생하는 소성변형의 양을 의미하므로 소재가 제거되기까지 발생하는 소성변형이 가공면에 미치는 영향이 이러한 특성이 표면 거칠기 및 공구 마모에 어떠한 영향을 미치는 지 분석을 진행하고자 하였다

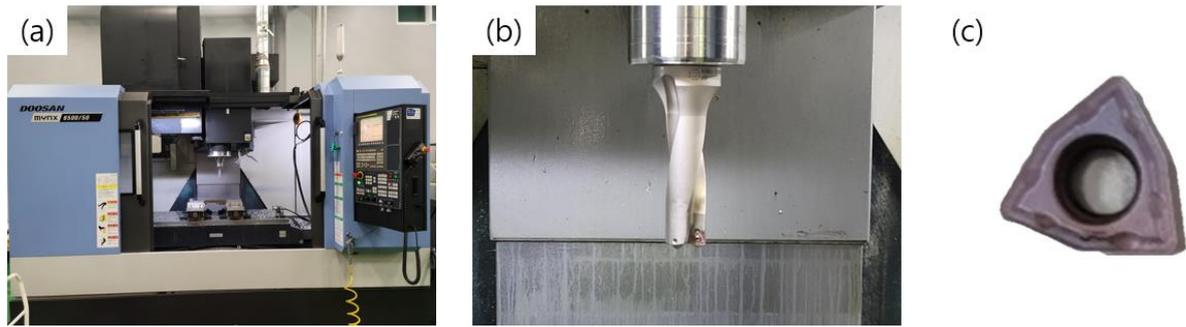


그림 3-1. 드릴 가공용 (a) 머시닝 센터, (b) 홀더, (c) 인서트 드릴

표 2. SCM440, SM45C, STS316L의 조성

Element (wt%)	SCM440	SM45C	STS316L
C	0.390	0.449	0.024
Si	0.260	0.240	0.483
P	0.018	0.009	0.033
S	0.014	0.003	0.017
Cr	0.910	0.028	16.867
Mn	0.690	0.701	1.924
Ni	0.080	0.020	10.072
Cu	0.110	0.020	0.502
Mo	0.160	-	2.049

표 3. SCM440, SM45C, STS316L의 연신율

Material	SCM440	SM45C	STS316L
Elongation (%)	12 ~	17 ~	40 ~

3.1.2 가공 좌표 설정

소재의 긴 방향을 x축, 짧은 방향을 y축이라고 하였을 때 드릴 가공 시 안정적인 가공을 위해 홀더의 직경과 소재의 크기를 고려하여 비가공영역과 가공 간격을 다음과 같이 설정하였다. x축 방향 가장자리 각 12mm를 비가공 영역으로 두었으며 y축 방향 가장자리 각 7mm를 비가공 영역으로 두었다. 가공 간격은 x축 30mm, y축 35mm로 홀 사이 간격이 각각 가로 4.0mm, 세로 9.0mm가 되도록 선정하였다. 이에 따라 그림 3-2과 같이 한 판의 소재 당 x축 16홀, y축 7홀로 총 112홀이 가공되도록 가공 좌표를 설정하였다.

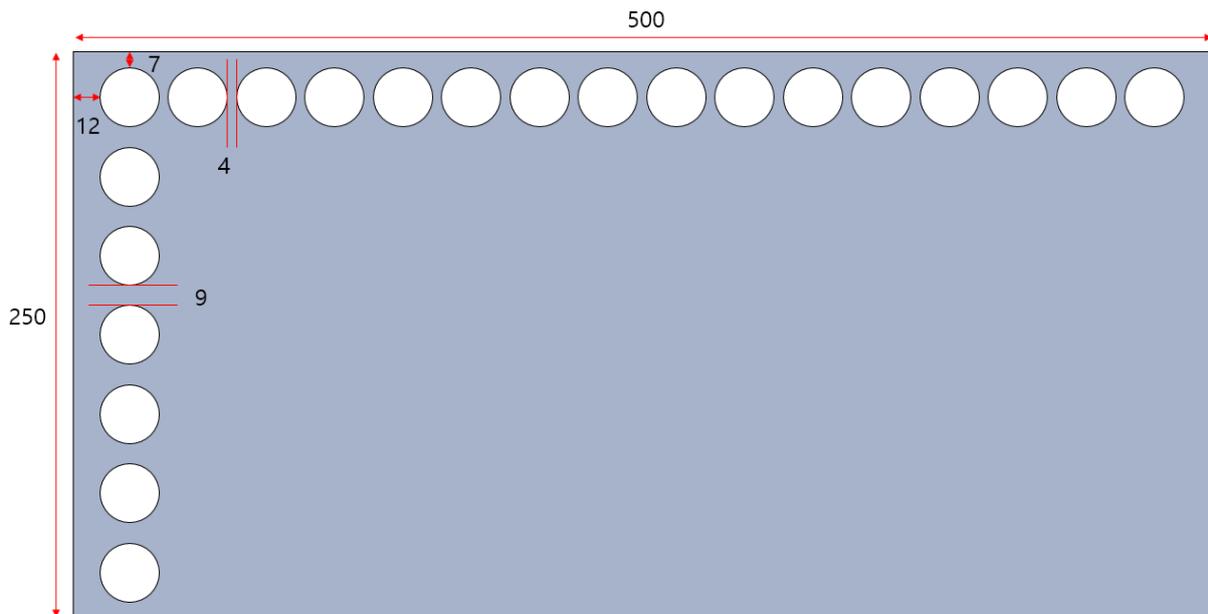


그림 3-2. 드릴 가공 시 좌표 선정

3.1.3 실험 조건 및 변형특성 측정 방법

일반적으로 소재의 연성이 높을수록 소재를 제거하기위한 파괴인성이 높아 공구에 가해지는 부담이 높아지므로 공구의 조기 파손을 방지하기위해 소재의 연성을 고려하여 표 4에 나타낸 것과 같이 SCM440, SM45C보다 STS316L의 공구 이송 거리(Feed) 및 절삭 속도(Cutting speed)를 낮게 설정하여 드릴 가공을 진행하였다. 또한 세 강종 중 연신을 차이가 가장 큰 SCM440과 STS316L을 대상으로 절삭 속도에 의한 영향을 분석하기 위해 공구 이송거리를 고정하고 절삭 속도를 변수로 활용하였다.

실험은 y축 방향으로 공구를 이동시키며 가공을 진행하여 7홀을 1주기로 설정하여 공구 마모량에 따라 주기를 달리하여 실험을 진행하였다. 소재의 연성을 고려하여 SCM440, SM45C는 8주기 단위로 가공을 진행하였으며, STS316L은 2주기 단위로 가공을 진행하였다. 또한 공구의 돌발적인 파손을 방지하기 위해 그림 3-3에 나타낸 것과 같이 현미경을 통해 공구의 내측날과 외측날의 마모량을 주기적으로 확인하여 가공 주기를 유연하게 조절하여 실험을 진행하였다. 이때 내측날은 내부의 소재만 제거하므로 파손여부만 확인한 뒤 가공면의 소재를 제거하는 외측날의 마모를 측정하여 실험 종료 시점을 결정하였다.

표면 거칠기는 Mitutoyo 사의 접촉식 표면 거칠기 측정기를 통해 측정하였으며, 동일한 자리에서 3회 측정 후 평균값을 사용하였다. 이때 기계 가공 특성상 특정 위치에서 편향된 데이터가 나타날 수 있기 때문에 다양한 위치에서 표면 거칠기를 측정하기 위해 측정 간격을 1주기보다 1홀 많게 설정하여 그림 3-4에 나타낸 것과 같이 측정 위치가 이전 측정 위치보다 한 홀씩 밀려나도록 설정하였다.

드릴 가공 시 홀이 일정하게 가공되었는지 확인하기 위해 가공이 시작되는 입구부와 가공이 끝나는 출구부의 직경을 측정하여 공구 직경과 비교 분석을 진행하였으며, 입구부와 출구부의 직경 측정 간격은 표면 거칠기와 동일한 간격으로 설정하였다.

표 4. 드릴 가공 공구 이송 거리 및 절삭 속도 조건

Material	SCM440	SM45C	STS316L
Feed (mm/rev)	0.15	0.15	0.10
Cutting speed (m/min)	150 / 170 / 180	170	150 / 180 / 200

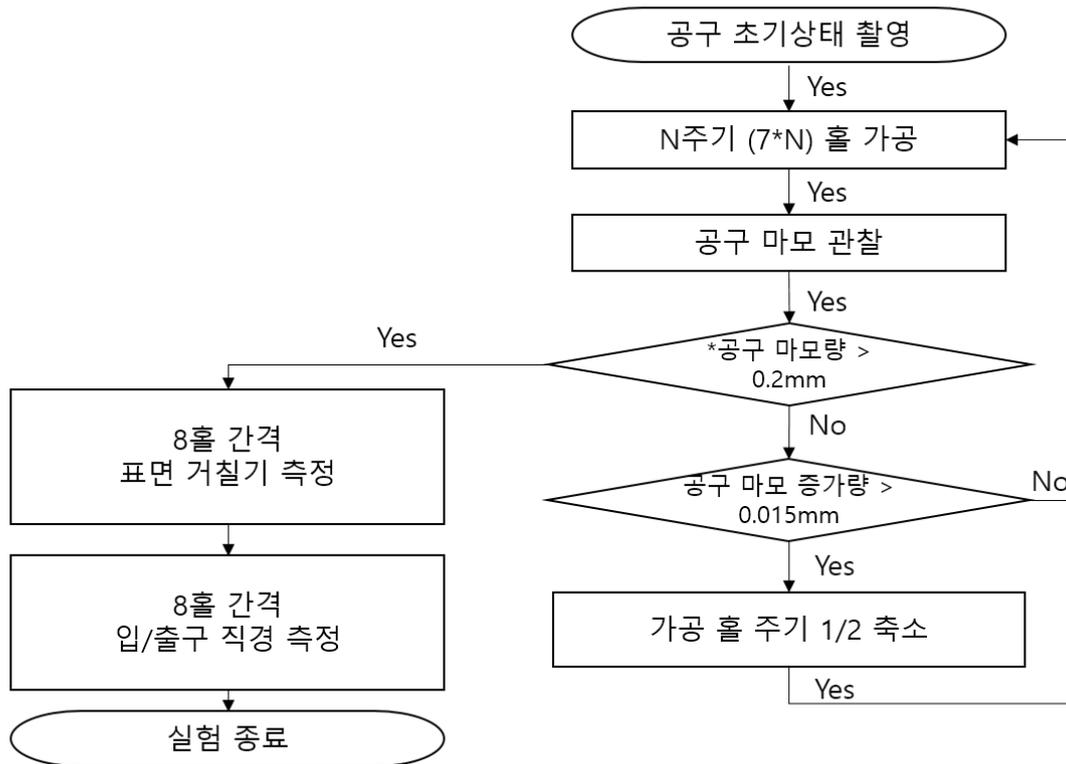


그림 3-3. 드릴 가공 및 변형특성 분석 실험 순서도

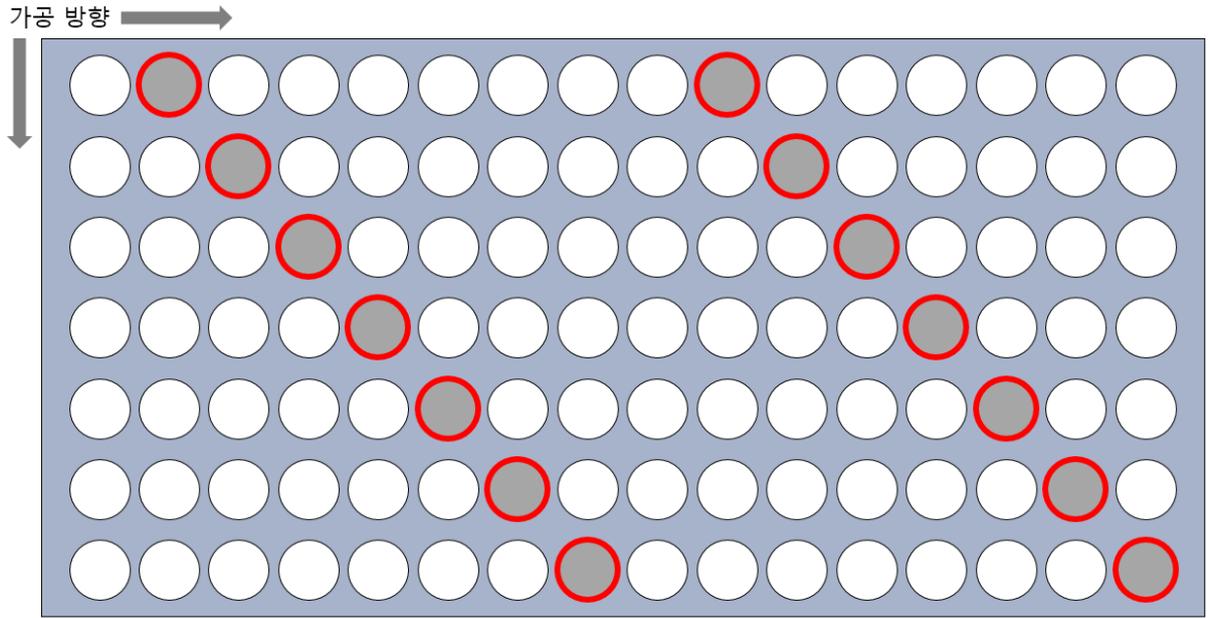


그림 3-4. 표면 거칠기 및 입/출구 직경 측정 위치

3.2 결과 및 고찰

3.1.1 공구 마모 분석

SCM440, SM45C, STS316L의 가공 횟수에 따른 공구 마모량 측정 결과를 그림 3-5~7에 나타내었으며, 초기 공구 사진과 실험 종료 시점에서의 공구 사진을 그림 3-8~14에 나타내었다. SCM440과 SM45C 가공 시 공구 마모는 가공이 진행되는 날부분에서 시작하여 공구의 여유면에서 진행되는 플랭크 마모가 주로 발생하였으며, STS316L 가공 시 절삭 속도가 낮은 조건에서는 플랭크 마모가 주로 발생하였지만 절삭 속도가 높은 조건에서는 내측날에서 치핑에 의한 돌발 파손이 발생하였다. 치핑은 기계 가공에서 소재 제거에 의해 발생한 칩이 공구의 상면부와 지속적으로 충돌하면서 공구가 깨지는 현상으로, STS316L은 SCM440 및 SM45C에 비해 연신율이 매우 높기 때문에 소재가 제거되기 전 소성 변형이 길게 일어나 칩이 더 길게 형성되어 내측날에서 칩과 공구의 충돌이 더 많이 일어난 것으로 판단된다. 그림 3-15에 나타낸 것과 같이 SCM440 가공에서 발생한 칩보다 STS316L 가공에서 발생한 칩들의 길이가 비교적 길게 나타나는 경우가 많은 것을 볼 수 있으며, 그림 3-16에 나타낸 것과 같이 STS316L 가공에 사용된 공구의 내측날 사진을 비교하였을 때 절삭 속도가 낮은 조건에서도 파손은 발생하지 않았지만 마모가 일부 진행된 것을 확인할 수 있었다. 특히 STS316L은 열전도율이 약 15W/mK 수준으로 열전도율이 약 40W/mK이상인 SCM440과 SM45C에 비해 열전도율이 매우 낮기 때문에 공구와의 마찰에 의해 발생한 마찰열을 해소하지 못한 칩들이 공구와 지속적으로 충돌하면서 공구에 열충격을 가해 공구가 파손된 것으로 판단된다[30-36]. 이때 절삭 속도가 높을수록 소재를 제거하는데 소요되는 시간이 짧아져 단위 시간 당 열충격량이 증가하기 때문에 높은 절삭 속도 조건에서 치핑이 급격하게 발생한 것으로 보이며, 외측날의 코너 부도 마모가 빠르게 진행된 것으로 판단된다.

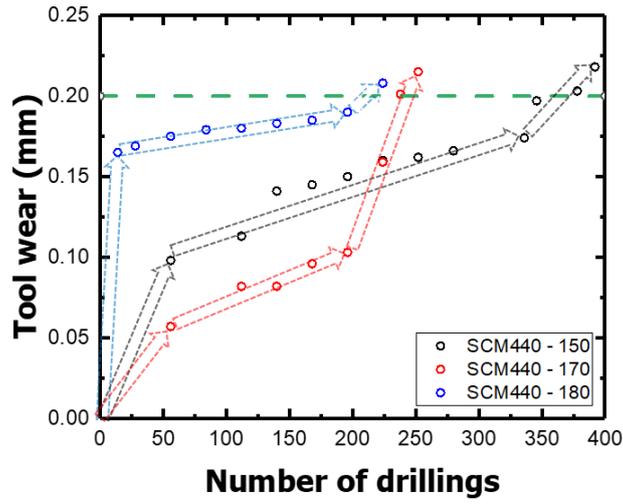


그림 3-5. SCM440의 가공 횟수에 따른 공구 마모량

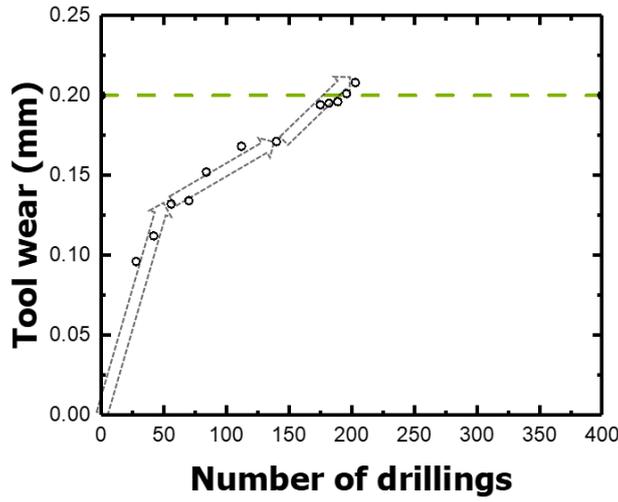


그림 3-6. SM45C의 가공 횟수에 따른 공구 마모량

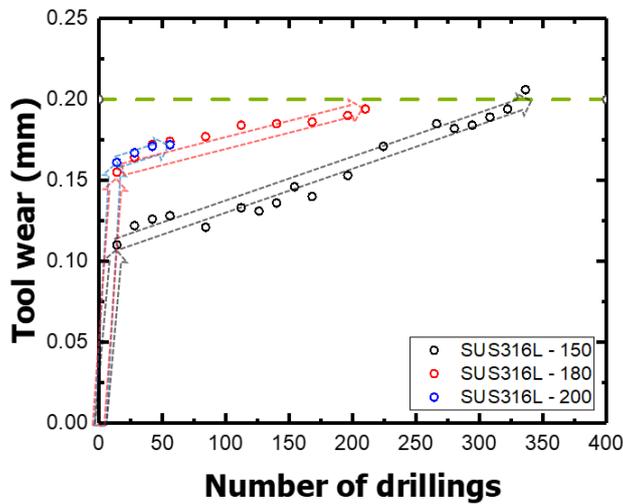


그림 3-7. STS316L의 가공 횟수에 따른 공구 마모량

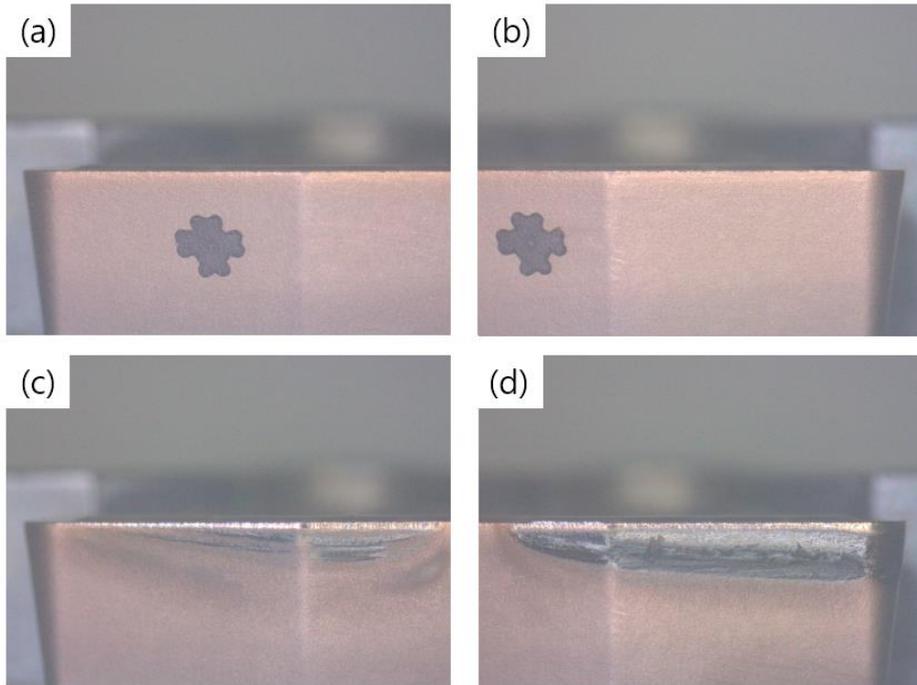


그림 3-8. SCM440의 절삭속도 150m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

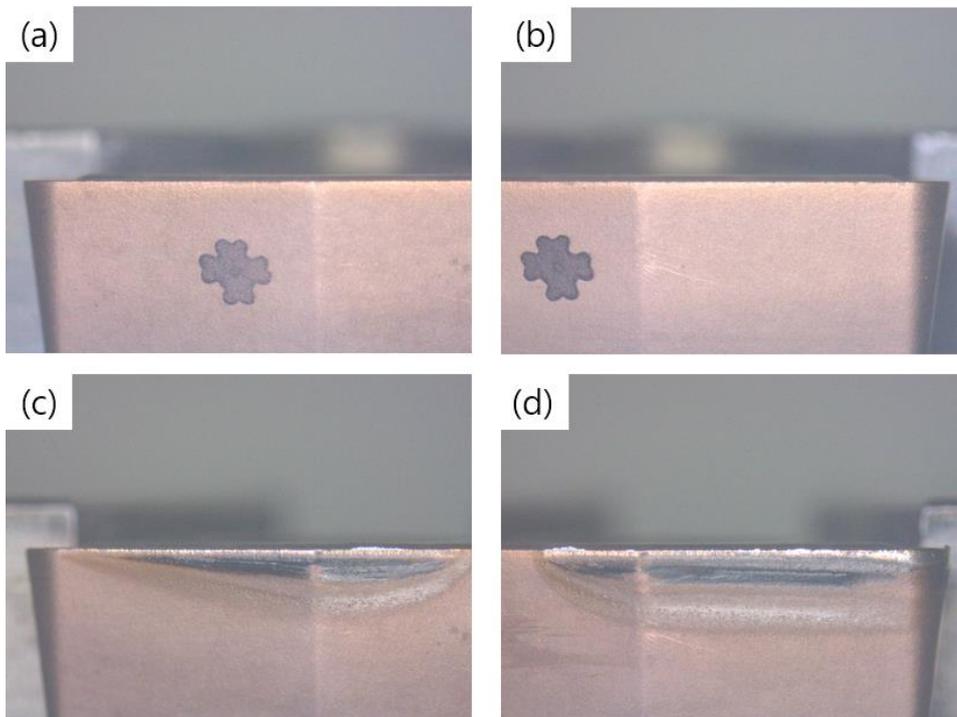


그림 3-9. SCM440의 절삭속도 170m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

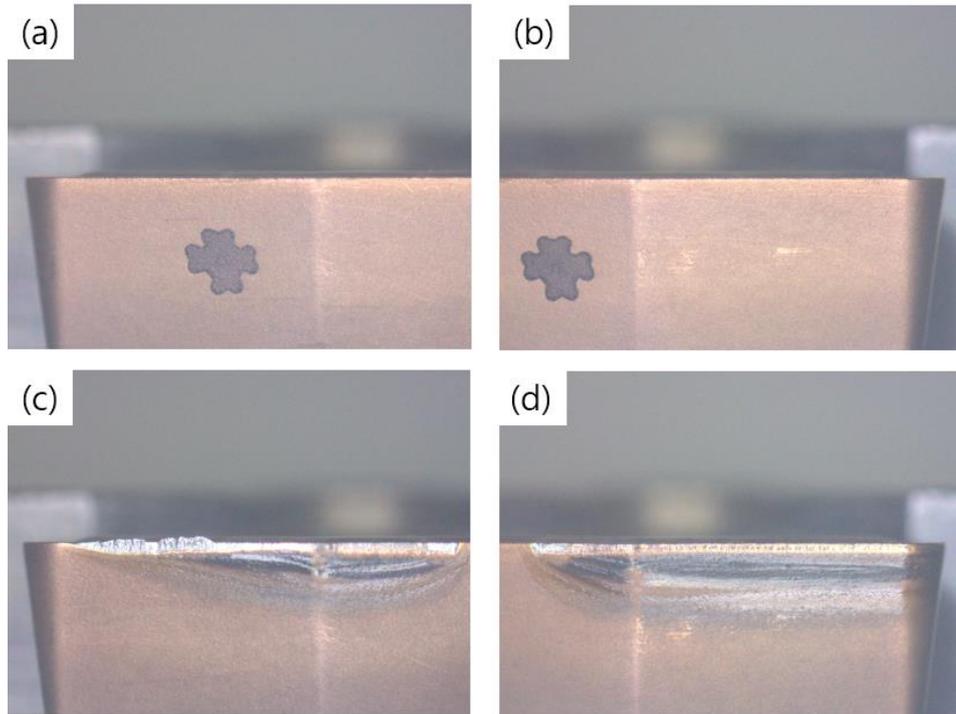


그림 3-10. SCM440의 절삭속도 180m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

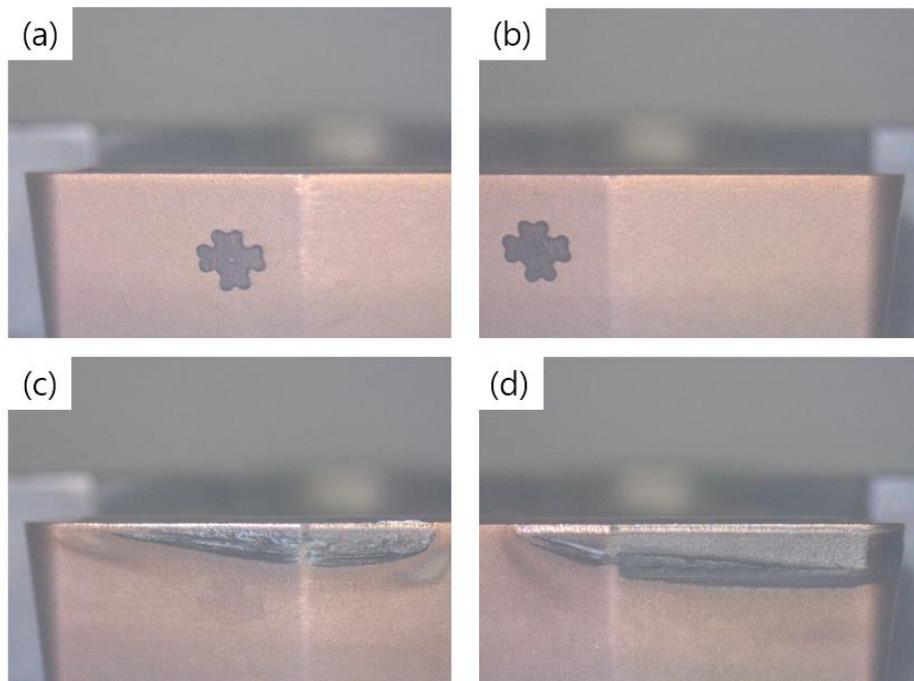


그림 3-11. SM45C의 절삭속도 170m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

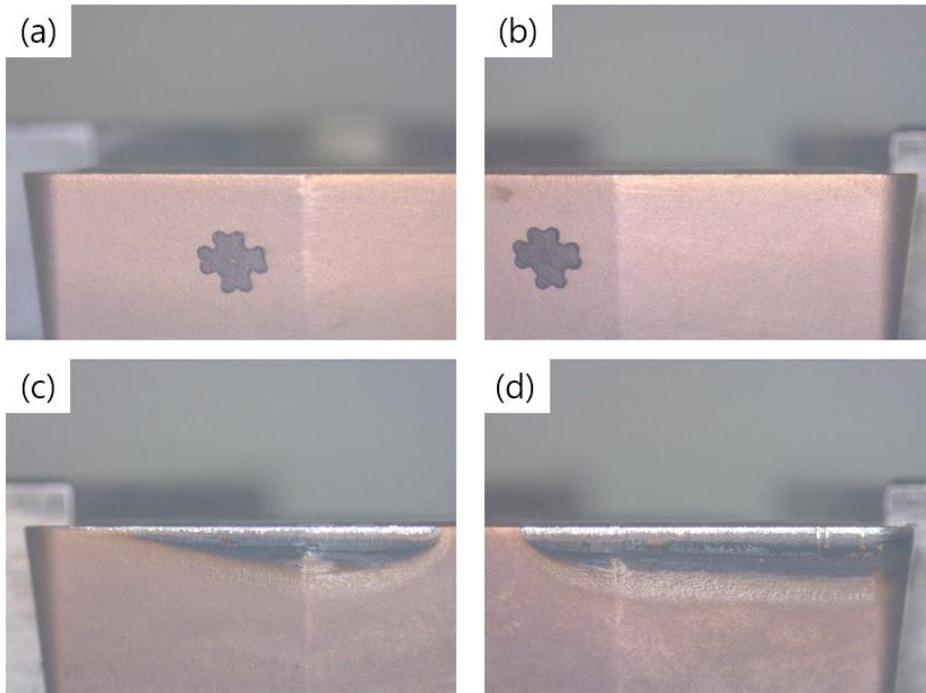


그림 3-12. STS316L의 절삭속도 150m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

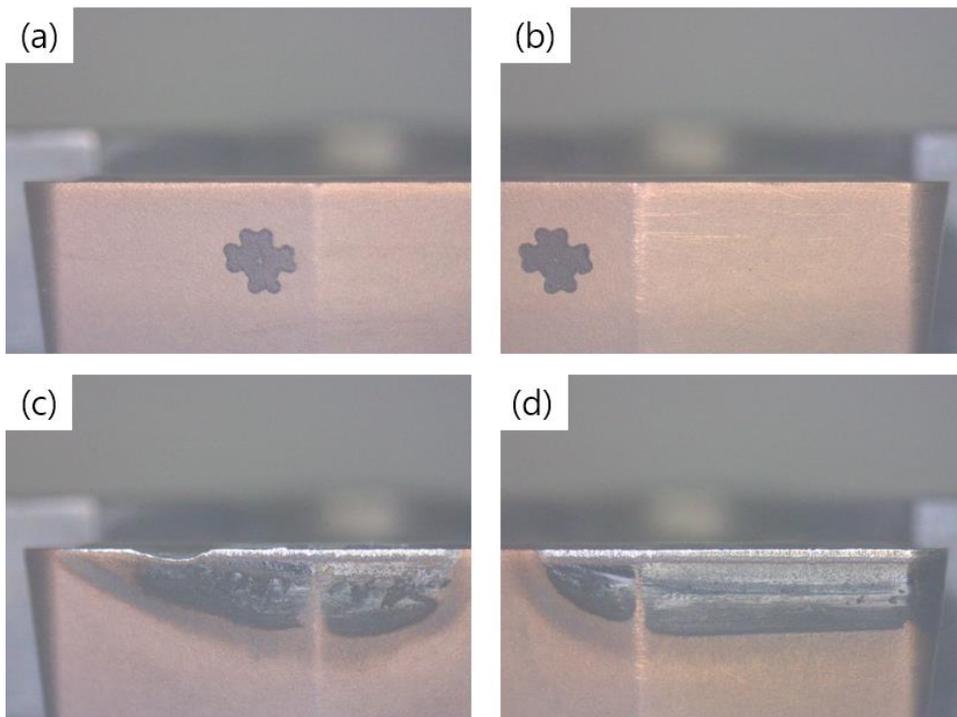


그림 3-13. STS316L의 절삭속도 180m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날

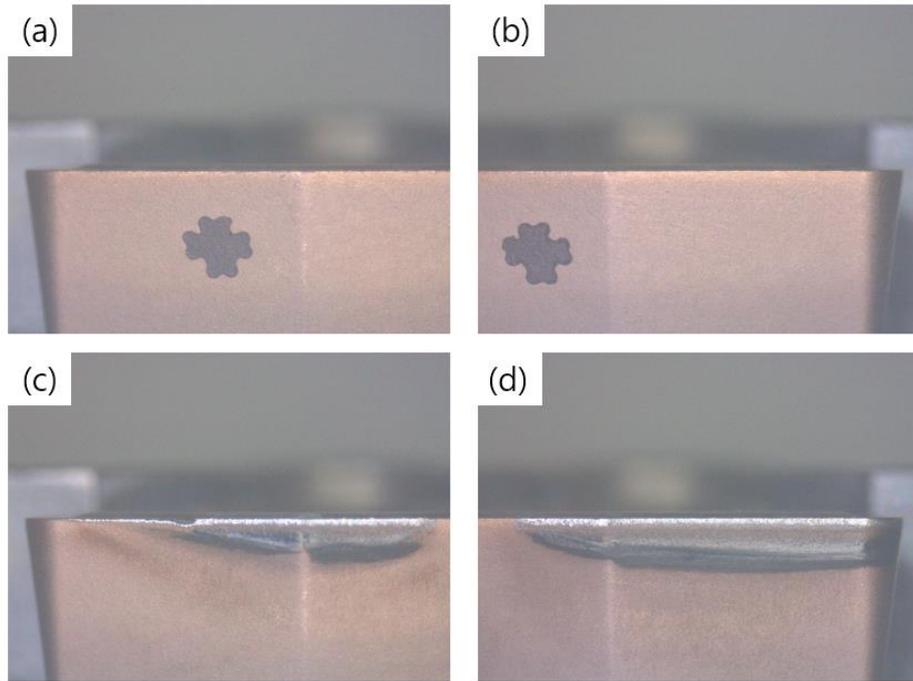


그림 3-14. STS316L의 절삭속도 200m/min 조건 가공에 사용된 (a) 초기 공구 내측날, (b) 초기 공구 외측날, (c) 가공 종료 시점의 내측날, (d) 가공 종료 시점의 외측날



그림 3-15. SCM440, SM45C, STS316L 가공 시 칩 길이 차이

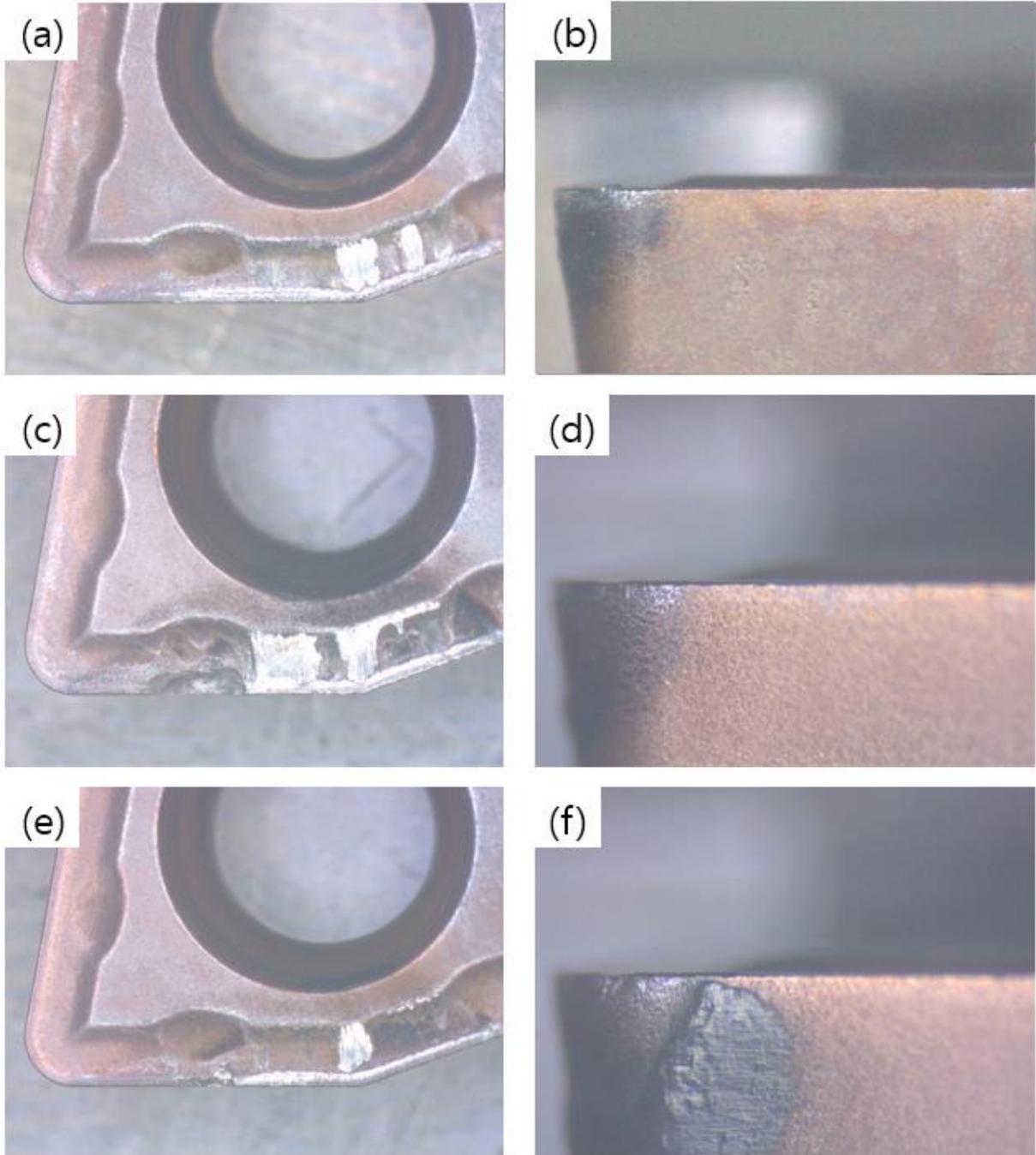


그림 3-16. STS316L 절삭속도 150m/min 조건의 (a) 내측날 상면, (b) 외측날 코너부 측면, 절삭속도 180m/min 조건의 (c) 내측날 상면, (d) 외측날 코너부 측면 절삭속도 200m/min 조건의 (e) 내측날 상면, (f) 외측날 코너부 측면

3.1.2 입/출구 직경 분석

SCM440, SM45C, STS316L의 입구부와 출구부의 직경을 측정된 결과를 그림 3-15~17에 나타내었으며, 공구 직경 대비 입구부와 출구부의 직경이 평균적으로 약 1% 이하의 차이로 설계값과 매우 유사하게 가공되었음을 확인하였다. 절삭 속도가 증가함에 따라 입구부와 출구부의 직경과 공구 직경의 차이가 미세하게 증가하는 경향을 보였지만 그 차이가 매우 미미하였다. 특히 STS316L 가공 중 치핑에 의해 공구 파손이 일어난 시편에서도 입/출구부의 직경에 큰 변화가 없는 것을 통해 내측날의 공구 파손이 가공면에 별다른 영향을 주지 않았다는 것을 확인할 수 있었다.

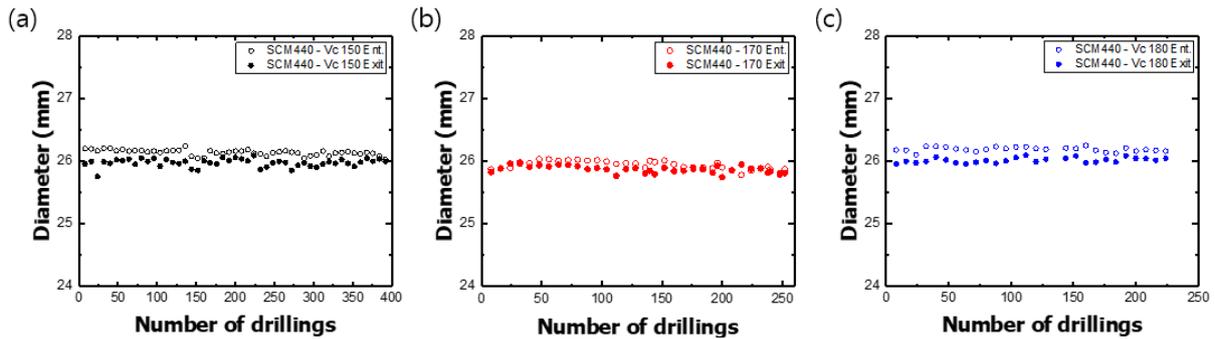


그림 3-17. SCM440의 절삭속도 (a) 150m/min, (b) 170m/min (c) 180m/min 조건의 입/출구부 직경

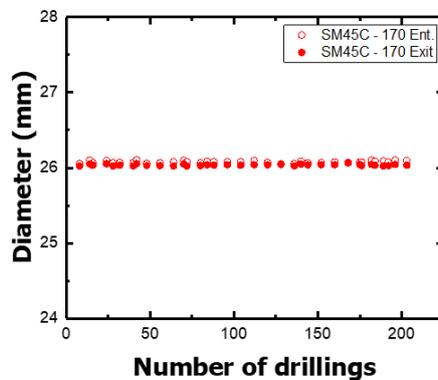


그림 3-18. SM45C의 절삭속도 170m/min 조건의 입/출구부 직경

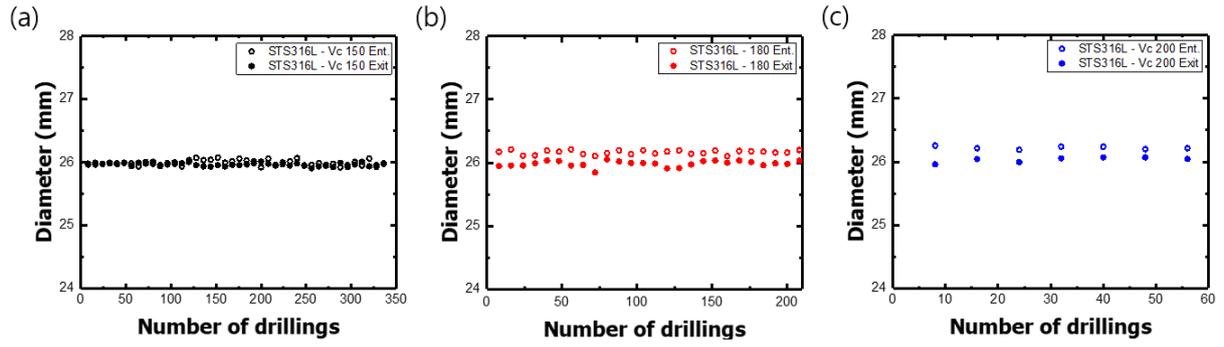


그림 3-19. STS316L의 절삭속도 (a) 150m/min, (b) 180m/min, (c) 200m/min 조건의 입/출구부 직경

3.1.3 표면 거칠기 분석

SCM440과 STS316L의 가공 횟수에 따른 표면 거칠기 측정 결과를 그림 3-20~22에 나타내었으며, 표 5에 각 조건에서의 평균 표면 거칠기 및 측정-이론 표면 거칠기 비율을 나타내었다. 측정-이론 표면 거칠기 비율은 공구 반지름과 공구 이송 거리를 통해 계산한 이론 표면 거칠기로 실제 가공면에서 측정한 표면 거칠기를 나누어 줌으로써 공구 반지름과 공구 이송 거리의 영향을 배제하여 소재의 연성 및 절삭 조건에 따른 비교를 위해 선행 연구에서 새로 개발한 지표이다[29]. 측정-이론 표면 거칠기 비율은 SCM440, SM45C, STS316L 순으로 높아지는 것으로 나타났으며, 이는 연신율의 크기 관계와 일치한다. STS316L은 SCM440, SM45C보다 연신율이 2배 이상 높기 때문에 소재가 제거되기 전에 소성 변형이 많이 발생하여 길고 연속적인 칩을 생산할 뿐만 아니라 가공면에서 소재가 제거되기 전 발생한 많은 소성 변형에 의해 가공부 주변으로 재료들이 밀려나 가공면이 거칠어진 것으로 판단하였다. 이때 절삭 속도가 유사한 조건에서 STS316L의 측정-이론 표면 거칠기 비율이 더 높음에도 불구하고 측정 표면 거칠기 값은 SCM440, SM45C가 되려 더 높게 나타난 것은 소재의 연성에 의한 표면 거칠기 증가율보다 공구 이송 거리에 의한 표면 거칠기 증가율이 더 높다는 것을 의미한다.

절삭 속도에 따른 표면 거칠기 변화를 살펴보았을 때 SCM440은 150m/min에서 180m/min까지 절삭 속도가 증가할수록 표면 거칠기가 증가하는 것으로 나타났으며, STS316L은 절삭 속도가 180m/min으로 증가할 때 표면 거칠기가 증가하였다가 절삭 속도가 200m/min으로 증가하였을 때 표면 거칠기가 다시 감소하는 것으로 나타났다. 두 강종 모두 180m/min에 가까워질수록 표면 거칠기가 증가하는 것으로 나타났는데 이는 절삭 속도가 180m/min에 도달하였을 때 가공 중 발생하는 진동이 장비의 고유 진동수와 일치하여 나타나는 공명 현상이 발생한 것으로 예상된다. 따라서 공명 현상에 의해

가공 중 발생하는 진동이 증폭되어 다른 절삭 속도 조건보다 가공면의 표면이 더 거칠게 나타난 것으로 보인다. 특히 STS316L 가공 시 절삭 속도 180m/min 조건보다 200m/min 조건에서 공구의 외측날 코너부가 더 많이 마모되었음에도 불구하고 절삭 속도 180m/min 조건에서 표면 거칠기가 더 높게 나타난 것을 볼 수 있으며, 이러한 결과는 공구 첨단 의 형상 변화로 인한 표면 거칠기 변화보다 공명 현상에 의한 표면 거칠기 변화가 훨씬 크게 나타난다고 해석할 수 있다. 따라서 절삭 속도가 표면 거칠기에 미치는 영향은 다른 인자에 비해 비교적 적은 것으로 예상되며, 공명 현상에 의한 표면 거칠기 왜곡이 발생하지 않도록 적절한 절삭 속도 조건을 선정하는 것이 중요할 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통해 소재의 연성 및 가공 조건에 따라 표면 거칠기 및 공구 마모가 변화하는 경향을 확인할 수 있었으며, 이를 광학 소자용 금형 제작에 적용하면 소재의 연신율과 공구 이송 거리, 절삭 속도를 통해 표면 거칠기와 같은 변형특성을 사전에 예측하여 정밀한 금형을 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

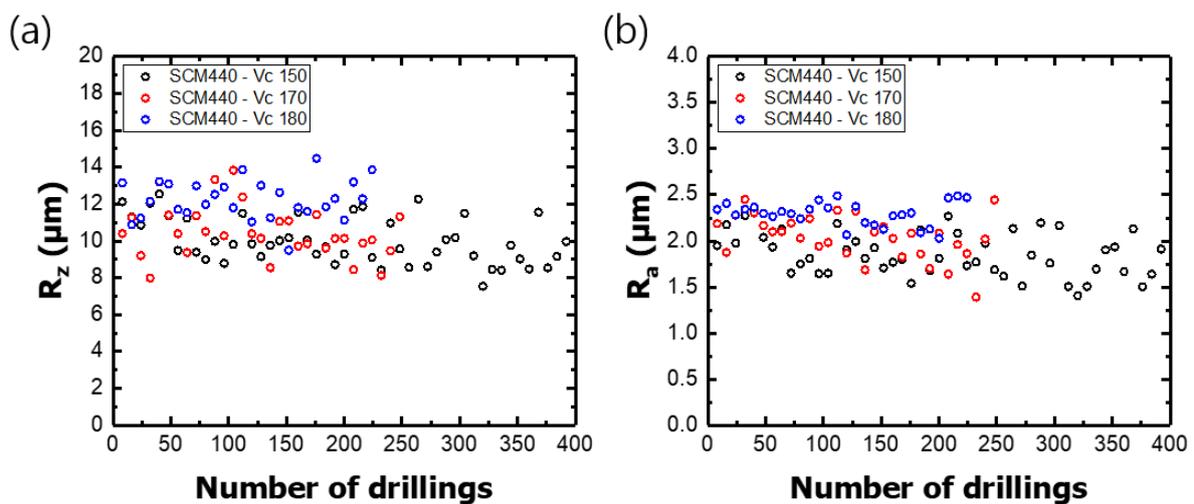


그림 3-20. SCM440의 가공 횟수에 따른 (a) 십점 평균 거칠기, (b) 중심선 평균 거칠기

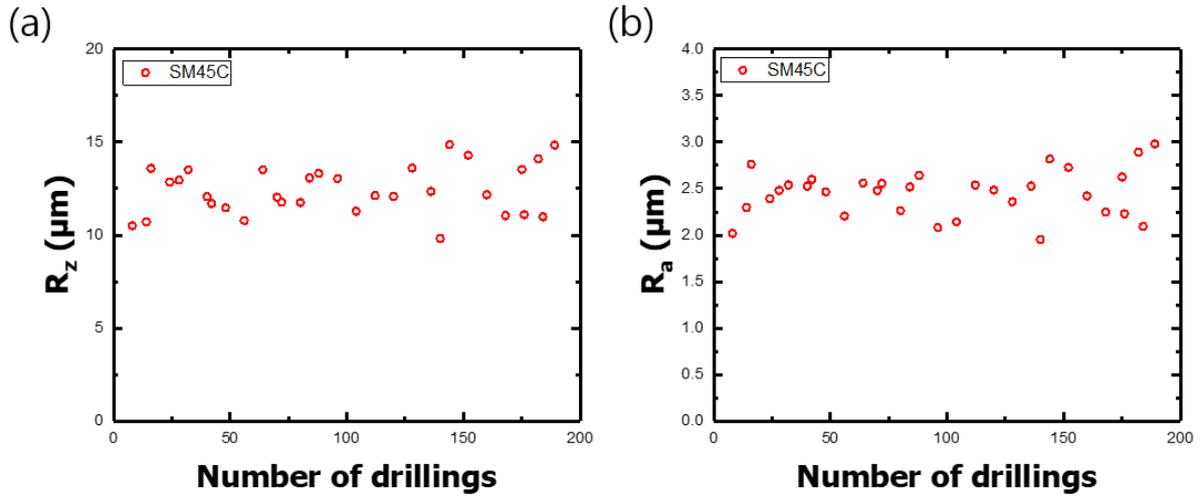


그림 3-21. SM45C의 가공 횟수에 따른 (a) 십점 평균 거칠기, (b) 중심선 평균 거칠기

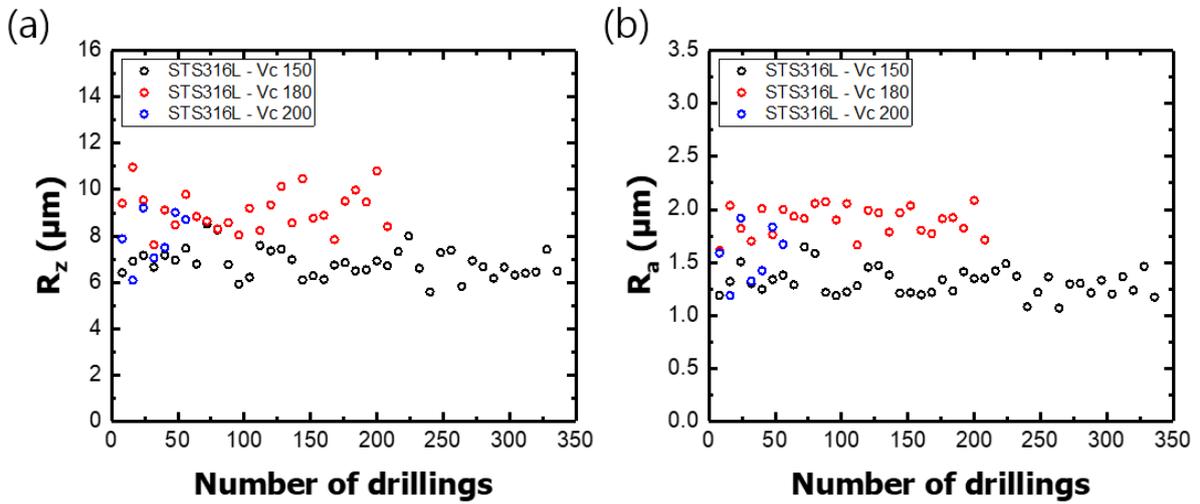


그림 3-22. STS316L의 가공 횟수에 따른 (a) 십점 평균 거칠기, (b) 중심선 평균 거칠기

표 5. SCM440 및 STS316L의 평균 표면 거칠기 및 측정-이론 표면 거칠기 비율

Material	SCM440			SM45C	STS316L		
	Cutting speed (m/min)	Average R_a (μm)	Average R_z (μm)		R_a ratio	R_z ratio	
	150	170	180	170	150	180	200
Average R_a (μm)	1.860	2.040	2.295	2.483	1.312	1.897	1.563
Average R_z (μm)	9.987	10.464	12.251	12.501	6.828	9.114	7.923
R_a ratio	2.068	2.269	2.552	2.762	3.277	4.743	3.904
R_z ratio	2.841	2.976	3.485	3.555	4.370	5.831	5.071

4. 금형의 소성 가공 시 변형특성 변화 분석

4.1. 실험 방법

4.1.1 시편 제작

소재의 소성 변형을 통해 가공을 진행하는 압입 가공 특성상 가공에 사용되는 소재는 연성의 금속을 사용해야 하므로 기계적 특성이 널리 알려진 연성 금속인 황동을 시편으로 선정하였으며, 시편의 규격은 100mm*100mm*11mm인 황동을 사용하였다. 압입 가공 시 가공부 주변에서 발생하는 불규칙한 pile-up 현상을 최소화하기 위해 열처리를 진행하였다. 열처리 조건은 기존 문헌에서 황동을 대상으로 압입 가공 시 pile-up 현상을 가장 많이 억제한 조건을 참고하여 선정하였으며, 그림 4-1와 같은 고온 실험용 전기로를 통해 575 °C에서 12시간 동안 홀딩 후 로 안에서 24시간 이상 냉각을 진행하였다[23]. 열처리 후 시편 표면에 발생한 산화막을 제거하고 압입 가공 시 시편의 표면 거칠기에 의한 가공 오차를 최소화하기 위해 그림 4-2와 같이 초정밀 가공 기계를 활용하여 평삭 가공을 진행하였다.

그림 4-3 (a)에 나타낸 것과 같이 열처리로 인해 발생한 산화막에 의해 시편 표면의 전체적인 높이가 불규칙하게 변하였으므로 Mitutoyo 사의 접촉식 단차 측정 게이지를 통해 시편의 네 모서리를 따라 단차를 측정하여 가장 높은 면을 초기 가공 높이로 설정하였다. 평삭 가공은 공구의 첨단 모양이 반지름이 50 mm, 꼭지각이 10 °인 원형을 가지는 단결정 다이아몬드 소재의 공구를 초정밀 가공 장비에 장착하고 Y축 방향으로 가공 진행 후 X축 방향으로 시편을 이송하여 반복 가공하는 방식으로 진행하였다. 가공 영역은 시편 크기와 가속 및 감속 거리를 고려하여 Y축 가공 거리는 250mm, X축 가공 거리는 105mm로 설정하였다. 시편 표면의 전체적인 단차를 낮추기 위한 1차 평

삭 가공을 먼저 진행 후 표면 거칠기 최소화를 위한 2차 평삭 가공을 진행하였다. 특히 황동을 대상으로 평삭 가공을 진행한 기존 문헌에서 표면 거칠기가 10nm 이하로 나타난 조건을 참고하여 표 6에 나타낸 것과 같이 조건을 설정하여 가공을 진행하여 그림 4-3 (b)에 나타낸 것과 같이 경면 시편을 제작하였다[37].

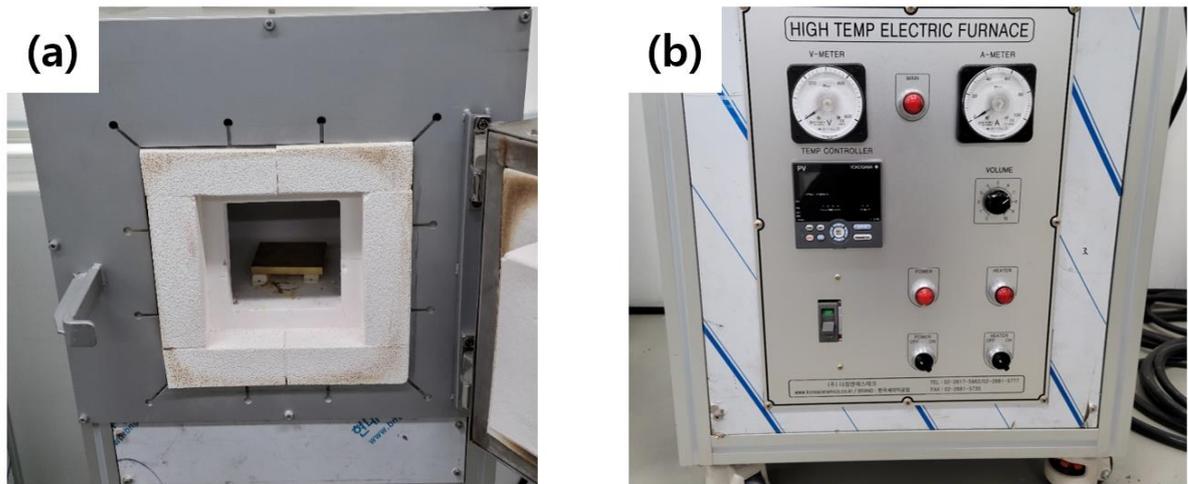


그림 4-1. 고온 실험용 전기로 (a) 내부, (b) 제어부

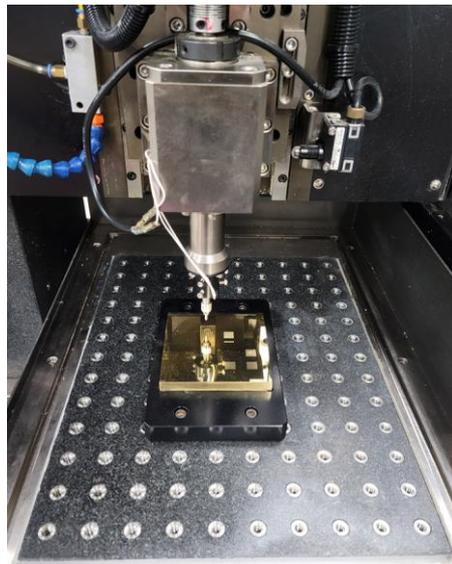


그림 4-2. 초정밀 가공 장비



그림 4-3. (a) 열처리 후 시편, (b) 2차 평삭 가공 후 시편

표 6. 시편 경면 제작을 위한 평삭 가공 조건

	가공 깊이 (μm)	이송 거리 (μm)	가공 속도 (mm/sec)
1차 평삭 가공	5	200	200
2차 평삭 가공	3	50	200

4.1.2 실험 장비 및 실험 방법

압입 가공은 솔레노이드가 내장된 홀더에 압입자를 장착하여 전류를 흘려주면 솔레노이드가 압입자를 시편 방향으로 밀어내고 변형 후 압입자가 돌아오는 방식으로 진행된다. 본 연구에서는 단면 형상이 원형(C-type), 사각형(S-type), 마름모형(R-type)인 점형 패턴을 제작하기 위해 그림 4-4와 같이 다이아몬드가 코팅된 conical tip 압입자와 다이아몬드가 사각뿔 형상으로 형성된 Vickers tip 압입자를 활용하였다.

점형 패턴을 활용한 광학 소자의 특성은 패턴의 형상 및 크기에 따라 달라지는 것으로 알려져 있으며, 패턴의 형상 및 크기를 조절하여 광학 소자의 광학적 특성을 향상시키려는 연구가 다수 진행되고 있다[38-43]. 이에 본 연구에서는 패턴의 크기에 따른 광학적 특성 변화를 분석하기 위해 10mm*10mm 영역 내에 패턴 수를 4096개로 고정한 뒤 전체 면적 대비 패턴이 차지하는 면적의 비율을 의미하는 fill factor를 고려하여 3가지 크기 조건을 선정하였다. 이때 패턴의 단면 형상에 따른 광학적 특성 변화를 분석하기 위해 앞서 선정한 3가지 단면 형상의 패턴에 대하여 투영면적이 동일해지도록 패턴 크기를 조절하였다. 이를 위해 SEM으로 압입자의 tip 형상을 관찰하여 압입자의 꼭지각과 반지름을 측정하고 이를 2.2절에서 도출한 수식에 대입하여 동일한 투영면적을 가지는 3가지 조건을 도출하여 적용하였다. 패턴 어레이 제작 시 패턴 사이의 간섭을 최소화하기 위해 가장 큰 직경을 가지는 패턴 깊이의 10배 이상의 패턴 간격을 설정하였으며, 설계한 값에 해당하는 3가지 크기 조건과 크기에 따른 fill factor를 표 7에 나타내었다.

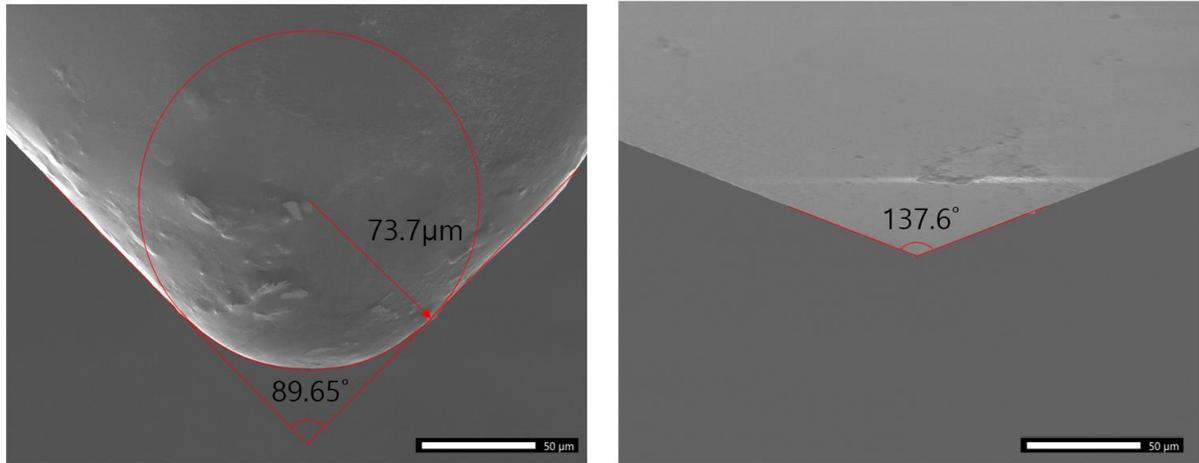


그림 4-4. (a) Conical tip 압입자와 (b) Vickers tip 압입자

표 7. 각 패턴 형상에서의 목표 크기 조건 및 fill factor

Cross-sectional shape		Circle	Square	Rhombus
1	Projected area (μm^2)	3664.02	3659.17	3659.17
	Fill factor (%)	14.67	14.67	14.67
	Height (μm)	8.39	12.22	12.22
2	Projected area (μm^2)	6102.31	6101.75	6101.75
	Fill factor (%)	25.00	25.00	25.00
	Height (μm)	14.63	15.78	15.78
3	Projected area (μm^2)	9033.86	9033.23	9033.23
	Fill factor (%)	37.00	37.00	37.00
	Height (μm)	23.11	19.20	19.20

4.1.3 금형을 활용한 광학 소자 제작 및 광학적 특성 분석 방법

압입 가공을 통해 패턴이 제작된 금형에 액상의 고분자를 주입하여 경화시킨 뒤 제거하면 금형과 동일한 형상의 패턴이 양각으로 복제된 광학 소자를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 PDMS를 활용하여 패턴을 복제하고자 하였으며, PDMS는 PDMS base와 경화제를 10:1의 비율로 섞어 제작하였다. 이를 그림 4-5와 같이 금형 외각을 따라 OHP필름을 크기에 맞게 붙여 울타리를 만든 금형 위에 주입하고 기포를 모두 제거한 뒤 핫 플레이트를 통해 100 °C에서 30분간 가열하여 PDMS를 경화시켜 광학 필름을 제작하였다.

광학 소자의 광학적 특성을 확인하기 위해 그림 4-6에 나타낸 모식도와 같이 광학 필름에 532nm 파장의 다이오드 레이저를 조사하고 패턴을 통과한 광원을 리어스크린에 투사하였다. 리어스크린은 빛이 조사된 면에서 빛이 투과되어 반대면에서 빛을 관찰할 수 있는 양면 스크린으로, 조사된 빛과 동일한 높이에서 다른 장비의 방해없이 관찰이 용이하다. 이를 활용하여 암실에서 리어스크린의 뒷면으로 투사된 빛을 관찰하여 광학 필름의 패턴을 통과한 빛의 형상 변화를 분석하였다.

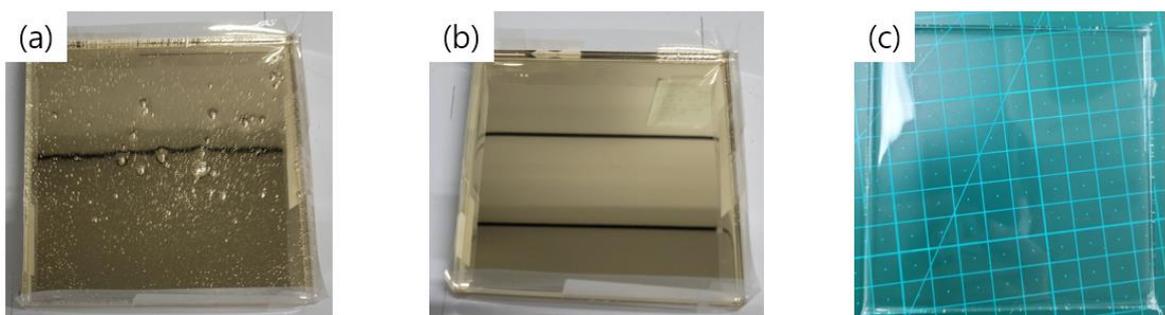


그림 4-5. 금형을 활용한 투명 광학 필름 제작 과정 (a) 액상의 PDMS 주입, (b) 기포 제거 후 PDMS, (c) 경화된 투명 광학 필름

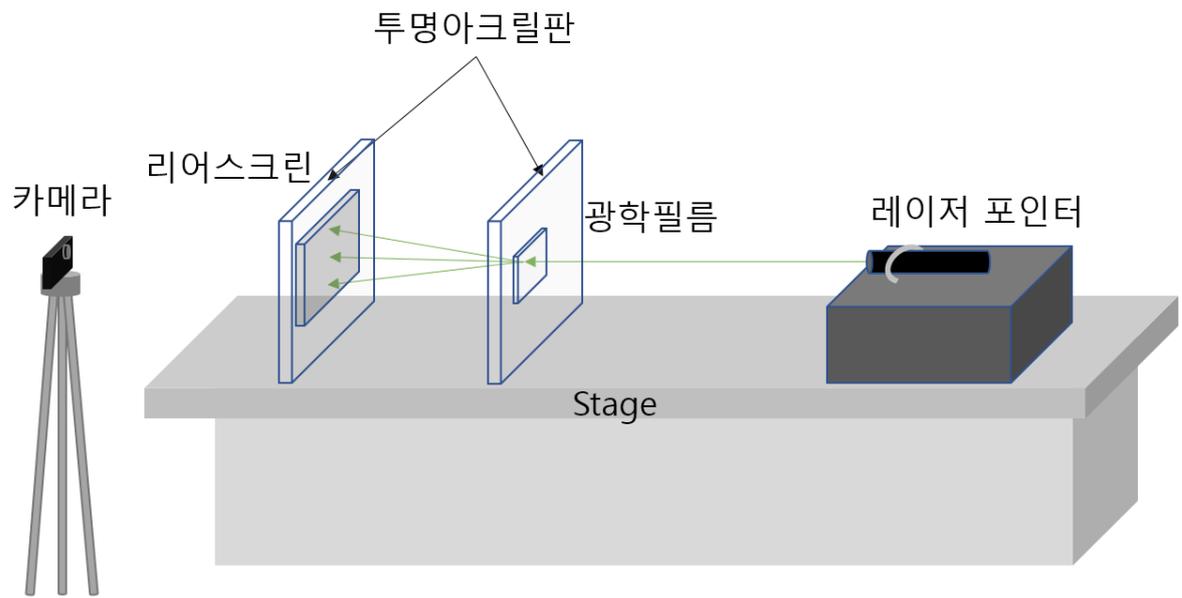


그림 4-6. 투명 광학 필름의 광학적 특성 분석 실험 모식도

4.2. 결과 및 고찰

4.2.1 금형 및 광학 소자의 패턴 형상 및 크기 분석

압입 가공을 통해 제작한 점형 패턴들을 대상으로 각각 랜덤하게 선정한 20개 패턴의 크기를 측정하여 평균 패턴 면적 및 fill factor를 계산하여 표 8에 나타내었으며, 제작된 점형 패턴의 OM 이미지를 그림 4-7, 8, 9에 나타내었다. 각각의 패턴들은 설계값 대비 0.60~6.75%의 크기 오차로 제작되었으며, 각 조건 내에서 형상에 따라 평균 패턴 면적이 약 2~6% 차이를 나타내므로 각 조건 내에서 형상 및 fill factor에 따른 광특성을 비교하기에 적합하다고 판단하였다.

금형을 통해 제작한 광학 소자가 의도한 것과 동일한 광학적 특성을 나타내는 지 검증하기 위해 광학 소자에 복제된 패턴의 채움성을 확인할 필요가 있다. 이를 위해 제작된 광학 소자를 구역별로 잘라 Au target을 장착한 sputter coater를 통해 광학 소자의 표면에 Au coating을 하여 SEM으로 광학 소자의 단면을 관찰하였다. 그림 4-11에 나타낸 것과 같이 각 패턴이 금형에 제작된 것과 동일한 형상 및 크기로 복제되었으며, 최상단 부분까지 잘 채워져 있는 것을 확인하였다.

표 8. 압입 가공을 통해 제작한 점형 패턴의 평균 면적 및 fill factor

	Pattern shape	Circle	Square	Rhombus
1	Average pattern area (μm^2)	3743.78	3546.27	3822.66
	Fill factor (%)	15.33	14.53	15.66
2	Average pattern area (μm^2)	5778.66	5925.18	6140.48
	Fill factor (%)	23.67	24.27	25.15
3	Average pattern area (μm^2)	9108.83	8864.65	9596.93
	Fill factor (%)	37.31	36.31	39.31

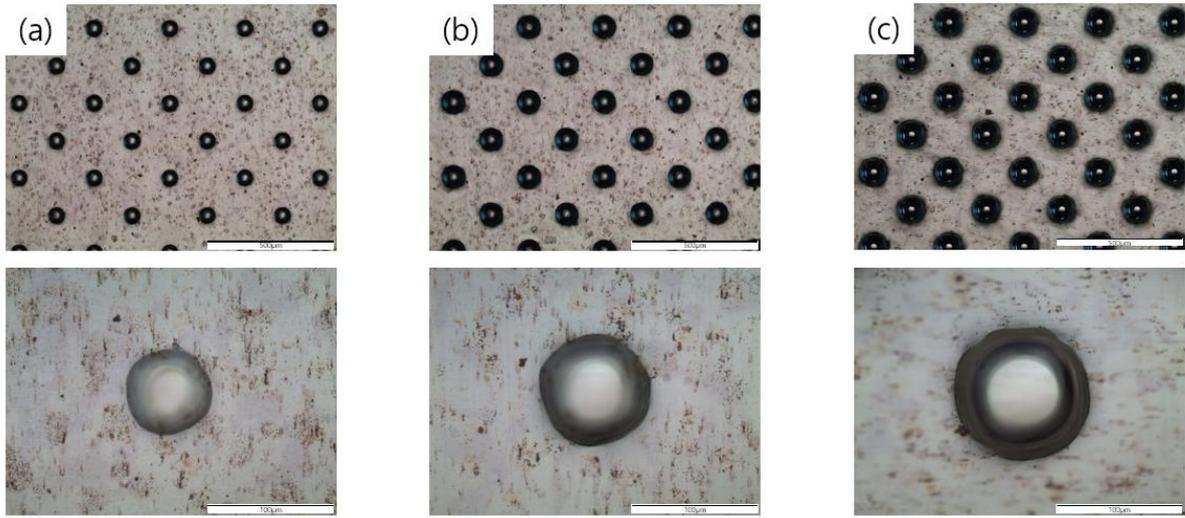


그림 4-7. (a) FF 15.33%, (b) FF 23.67%, (c) FF 37.31% C-type 패턴

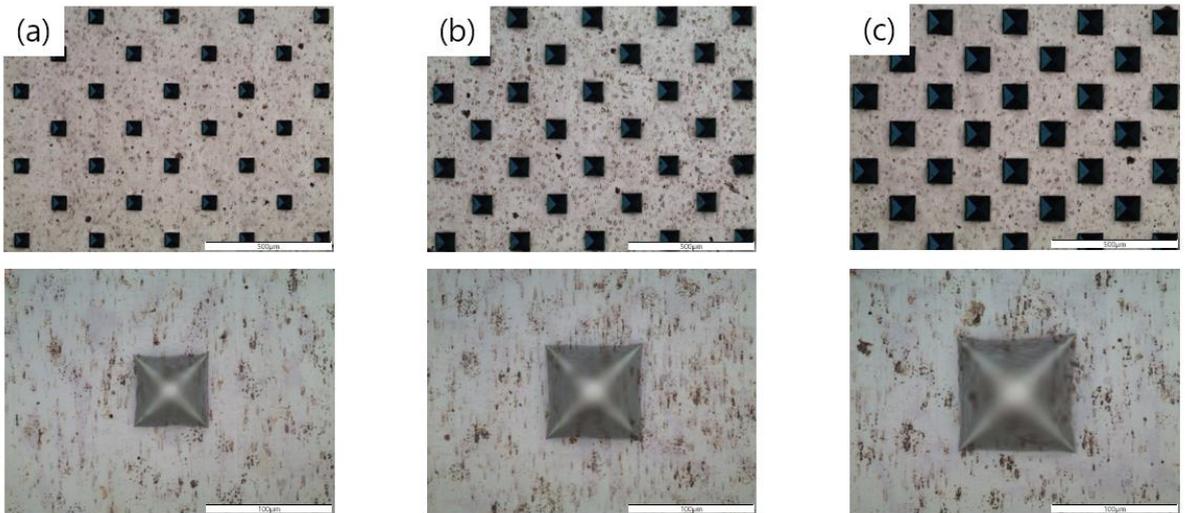


그림 4-8. (a) FF 14.53%, (b) FF 24.27%, (c) FF 36.31% S-type 패턴

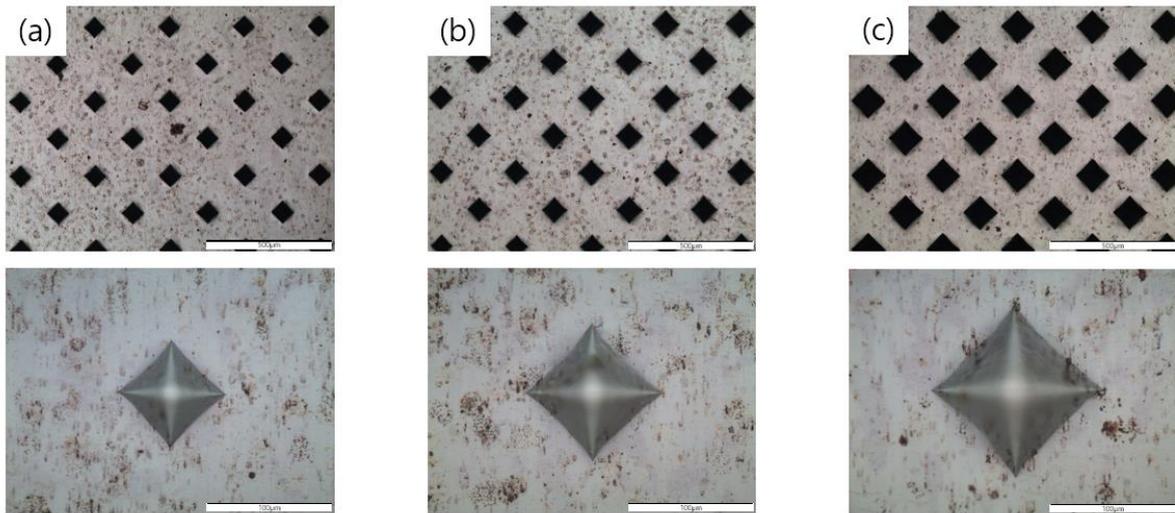


그림 4-9. (a) FF 15.66%, (b) FF 25.15%, (c) FF 39.31% R-type 패턴



그림 4-10. Au 코팅용 Sputter coater

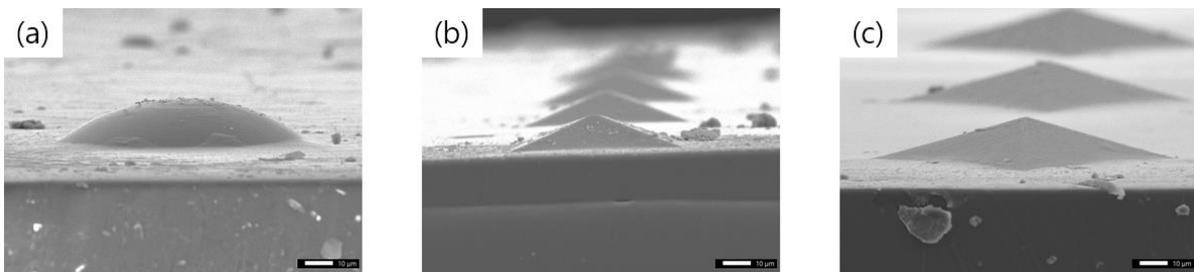


그림 4-11. 투명 광학 필름에 복제된 (a) FF 15.33% C-type 패턴, (b) FF 14.53% S-type 패턴, (c) FF 15.66% R-type 패턴

4.2.2 패턴의 형상 및 크기에 따른 광학 소자의 광학적 특성 분석

4.1.3절에서 설명한 것과 같이 광학 소자에 532nm 파장의 다이오드 레이저를 조사하고 통과한 빛을 리어스크린에 투사한 뒤 카메라를 통해 촬영하여 패턴을 통과한 빛의 거동을 관찰하였으며 그 결과는 그림 4-12~14와 같이 나타났다. 단면 형상이 원형(C-type)인 점형 패턴을 통과한 빛은 광원의 중심부를 기준으로 원형으로 빛이 확산되었으며, 패턴 제작 시 공구 형상에 의해 나타난 것으로 보이는 틀 마크를 따라 빛이 일부 소실된 것을 확인할 수 있었다. 특히 패턴의 크기가 커질수록 빛이 확산되는 면적이 증가하였으며 이에 따라 휘도가 분산되는 것을 육안으로 관찰할 수 있었다. 단면 형상이 사각형(S-type) 및 마름모(R-type)인 점형 패턴을 통과한 빛은 광원의 중심부를 기준으로 45° 회전된 형태로 나타났으며, 패턴의 면이 아닌 꼭지점에서 모서리 및 밑변을 따라 빛이 집중되어 나타났다. 이는 그림 4-15에 나타난 것처럼 사각뿔 패턴의 4개의 면을 통과한 빛이 각각 굴절되면서 빛의 위치가 뒤집혀서 나타났으며, 패턴의 모서리 및 밑변을 통과한 빛의 회절에 의해 광원의 중심부를 가로지르는 직선과 이를 둘러싸는 직선이 나타난 것이다[44].

세가지 형태의 패턴을 통과한 빛의 확산 성능을 비교하기 위해 가장 넓은 범위로 빛이 확산된 FF 37.31% C-type 패턴의 확산 면적을 기준으로 각 패턴에서의 빛의 확산 면적을 그림 4-16 (a)와 같이 비교하였다. FF 15.33%의 C-type, S-type 및 R-type, FF 23.67% C-type, 37.31% C-type 순으로 확산 면적이 크게 나타났으며 이는 2.3절에서 설명한 것과 같이 Snell's law에 따라 패턴을 통과한 빛의 굴절각에 비례하여 나타난 것이다. 이때 최대 밝기 빛의 면적 비율은 빛의 확산 면적에 비례하여 나타났는데 이는 빛이 확산됨에 따라 휘도가 감소하지 않는다는 것을 의미하므로 패턴에 의한 광효율이 유사하게 나타날 것으로 예측된다. 이러한 결과를 통해 압입 가공으로 제작될 패턴의 굴절률을 계산하여

점형 패턴을 제작함으로써 빛이 확산될 방향 및 크기를 제어한 특정한 특성을 가지는 광학 소자를 맞춤 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

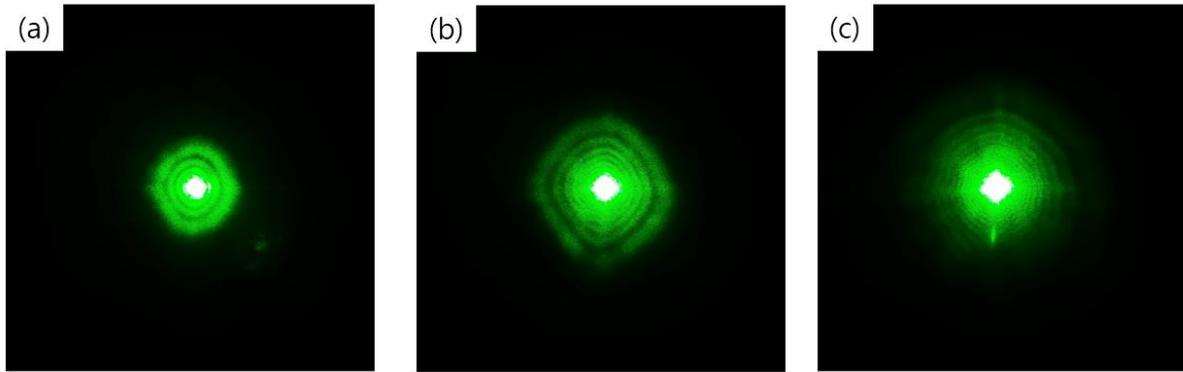


그림 4-12. (a) FF 15.33%, (b) FF 23.67%, (c) FF 37.31% C-type 패턴을 통과한 광원

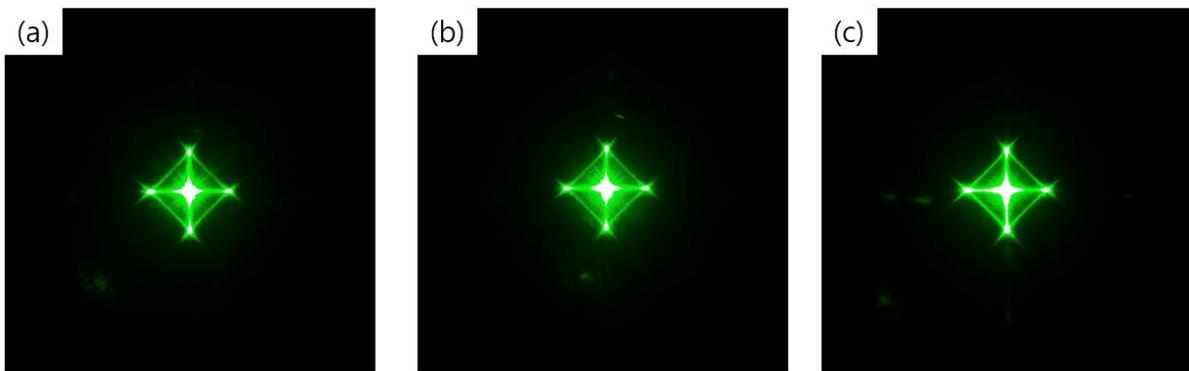


그림 4-13. (a) FF 14.53%, (b) FF 24.27%, (c) FF 36.31% S-type 패턴을 통과한 광원

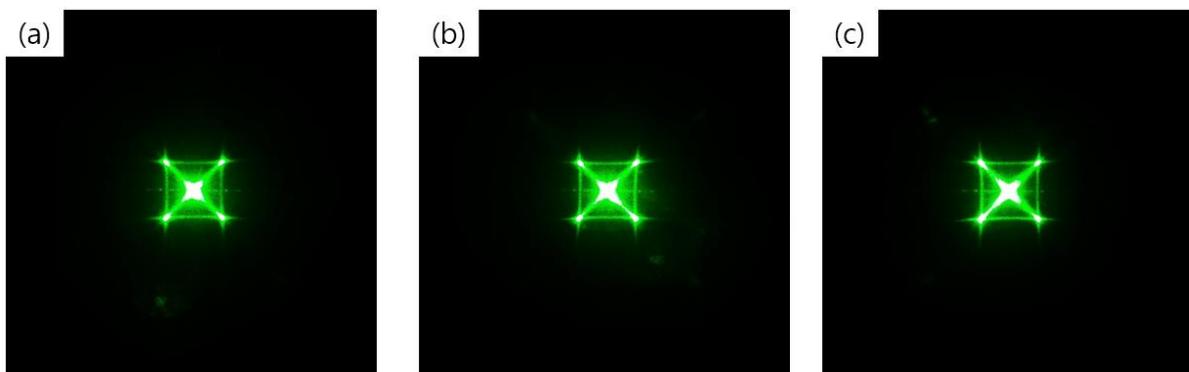


그림 4-14. (a) FF 15.66%, (b) FF 25.15%, (c) FF 39.31% R-type 패턴을 통과한 광원

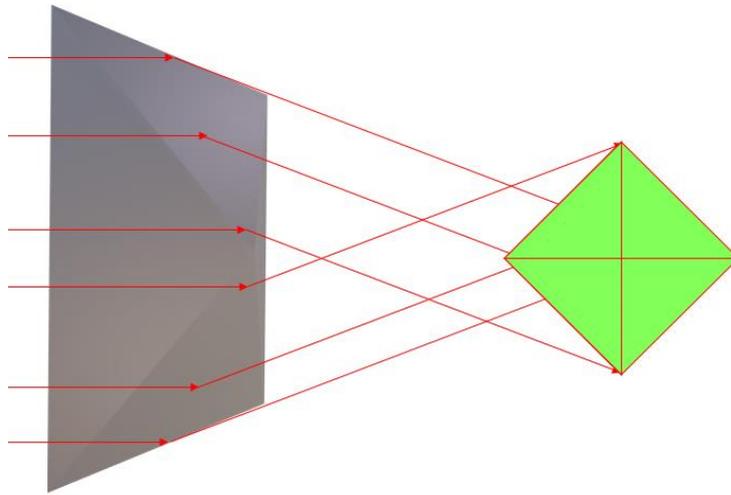


그림 4-15. 사각뿔 패턴을 통과한 빛의 굴절 거동

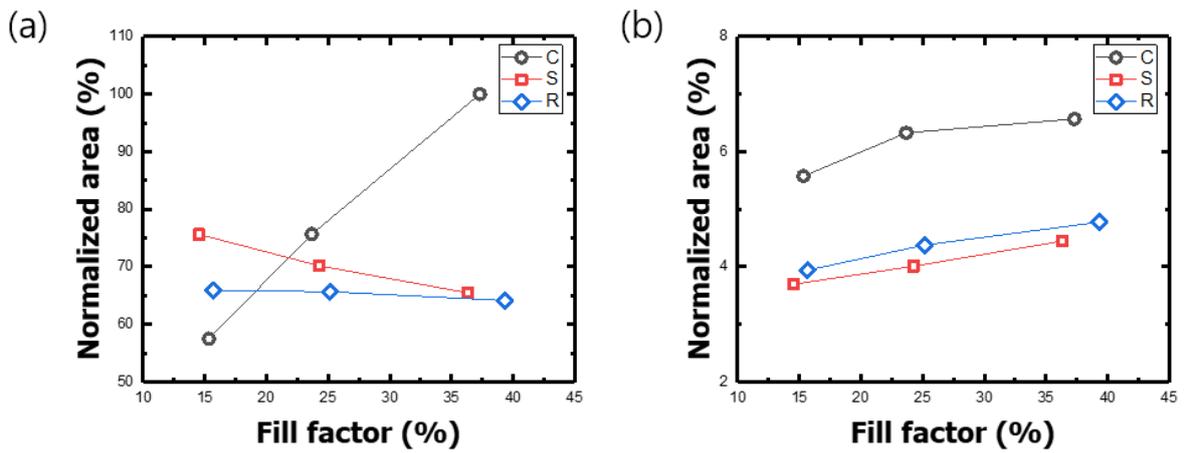


그림 4-16. FF 37.31% C-type 패턴의 빛의 전체 면적 기준 (a) 빛의 확산 면적 비율,
(b) 최대 밝기 빛의 면적 비율

4.2.3 원형 점형 패턴의 크기와 반치폭의 상관관계 분석

C-type 패턴은 크기에 따라 빛이 확산되는 면적 및 최대 밝기 빛의 면적 비율의 차이가 크게 나타났으므로 빛의 분포를 통해 빛의 반치폭을 측정할 필요가 있다고 판단하였다. 본 연구에서는 모든 패턴 어레이의 패턴 수를 동일하기 설계하였기 때문에 패턴 크기 차이를 fill factor(FF)로 나타낼 수 있으므로 fill factor와 반치폭의 상관관계 분석을 진행하였다. 패턴이 없는 상태의 fill factor를 0%로 정의하고 C-type 패턴 어레이의 fill factor에 따른 빛의 분포를 이미지 분석 프로그램을 통해 측정한 결과 패턴의 fill factor에 따라 빛의 분포가 그림 4-17과 같이 달라지는 것을 확인하였다. Fill factor 즉, 패턴의 크기가 증가할수록 빛의 밝기 피크의 반치폭이 증가하였으며 낮은 밝기 영역의 폭도 증가하였다. C-type 패턴의 fill factor가 빛의 반치폭에 미치는 영향을 분석하기 위해 회귀분석을 실시하여 두 인자 간 상관관계를 분석하였으며, 그 결과를 그림 4-18에 나타내었다. Fill factor와 반치폭(Full width half maximum, FWHM)을 log-log식으로 변환 후 일차식으로 피팅한 결과 기울기가 1.05로 나타났으므로 fill factor와 반치폭 간의 관계식이 일차식이라 판단하였다. Fill factor가 0%인 패턴을 지나는 광원의 반치폭은 패턴의 영향이 없으므로 이를 y 절편으로 고정하여 linear fitting을 한 결과 회귀분석의 선형도를 나타내는 Pearson's r 값이 0.98로 산출되는 아래와 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$FWHM = 9.03 * FF + 100$$

이러한 결과를 통해 압입 가공을 활용하여 C-type 패턴의 크기를 제어한다면 빛의 확산 면적 및 반치폭을 제어한 맞춤형 광학 소자를 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

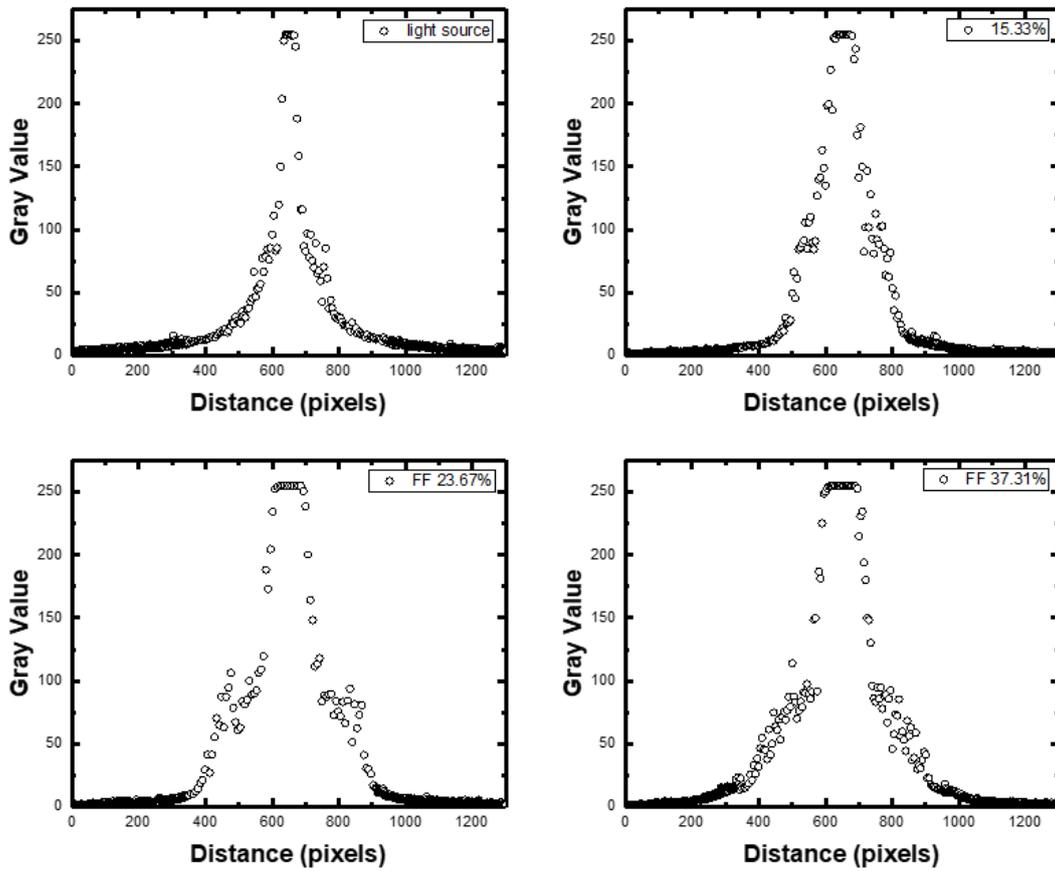


그림 4-17. (a) FF 0%, (b) FF 15.33%, (c) FF 23.67%, (d) FF 37.31% 원형 점형 패턴을 통과한 빛의 위치에 따른 빛의 밝기

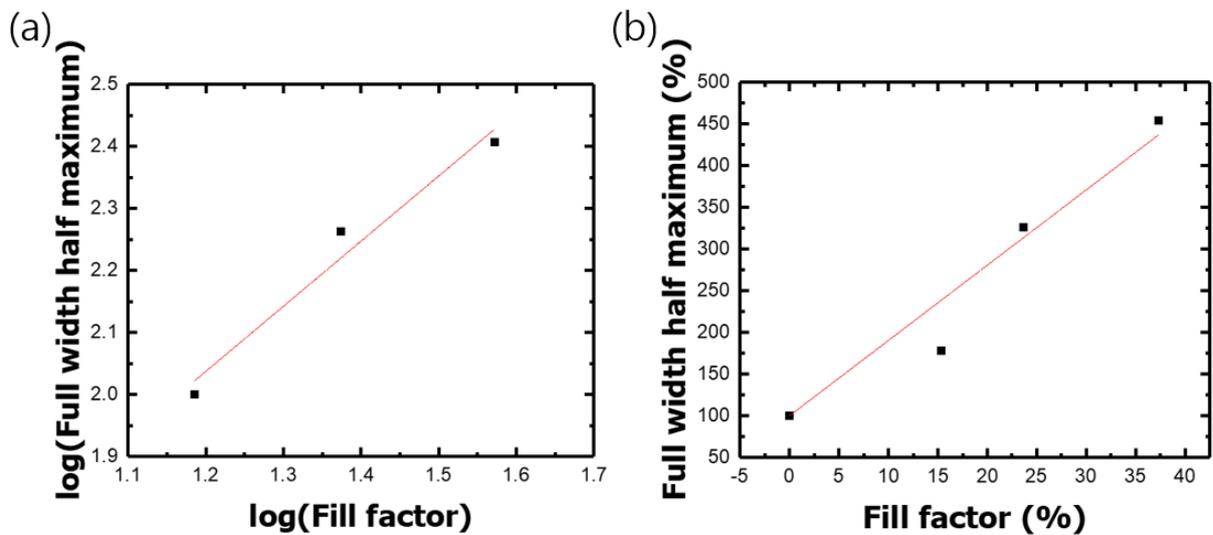


그림 4-18. 광학 소자 패턴 크기와 반치폭의 상관관계 (a) log-log plot, (b) linear fitting

5. 결론

본 연구에서는 기계 가공 및 소성 가공을 활용하여 광학 소자용 금형을 제작하고 금형 소재의 연성에 따른 변형특성을 분석하는 연구를 진행하였으며, 그 결과를 통해 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) SCM440, SM45C, STS316L을 대상으로 인서트 드릴을 통해 드릴 가공을 진행하였을 때 소재의 열전도율과 같은 내열특성으로 인해 공구 마모 개형이 달라지는 것을 확인하였으며, 입/출구 직경은 모든 조건에서 가공 직경과 1% 미만의 차이를 나타내어 치수성이 우수함을 나타내었다.
- 2) 측정-이론 표면 거칠기 비율을 통해 소재의 연성 및 절삭 속도가 표면 거칠기에 미치는 영향을 분석한 결과 소재의 연신율이 높을수록 표면 거칠기가 증가하는 것으로 나타났으며, 절삭 속도는 공구의 마모 속도에 영향을 주며 공명 현상을 통해 표면 거칠기에 영향을 미치는 것으로 나타나 소재의 연신율과 가공 조건을 통해 변형특성을 사전에 예측하는 것이 가능할 것으로 기대된다.
- 3) Vickers tip 압입자와 conical tip 압입자를 활용하여 3가지 크기 및 형상의 점형 패턴 어레이를 제작하였을 때 설계한 수치와 매우 유사한 크기의 패턴을 얻을 수 있었으며, 이를 광학 소자에 복제하였을 때 패턴의 최상단까지 복제가 되어 금형으로 활용이 가능함을 검증하였다.
- 4) Vickers tip 압입자를 통해 제작된 패턴은 크기에 따라 광학적 특성이 크게 변하지 않았지만 conical 압입자를 통해 제작된 패턴은 크기에 따라 빛의 확산 면적, 빛의 반치폭 등의 광학적 특성이 변화하였으며, 이러한 광학적 특성은 패턴 형상 및 크기와 소재의 굴절률을 통해 계산된 빛의 굴절각과 fill factor 를 통해 계산함으로써 임의의 광특성을 가지는 광학 소자 제작이 가능함을 확인하였다.

6. 참고문헌

- [1] Roeder, Marcel, Thomas Guenther, and André Zimmermann. "Review on fabrication technologies for optical mold inserts." *Micromachines* 10.4 (2019): 233.
- [2] Ting, Chia-Jen, et al. "Fabrication of an antireflective polymer optical film with subwavelength structures using a roll-to-roll micro-replication process." *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18.7 (2008): 075001.
- [3] Tsai, Kuo-Ming, Chung-Yu Hsieh, and Wei-Chun Lo. "A study of the effects of process parameters for injection molding on surface quality of optical lenses." *Journal of materials processing technology* 209.7 (2009): 3469-3477.
- [4] Chun, Doo-Man, et al. "Fabrication of transparent superhydrophobic surface on thermoplastic polymer using laser beam machining and compression molding for mass production." *CIRP Annals* 63.1 (2014): 525-528.
- [5] Loaldi, Dario, et al. "Manufacturing signatures of injection molding and injection compression molding for micro-structured polymer fresnel lens production." *Micromachines* 9.12 (2018): 653.
- [6] Singh, B. K., B. Mondal, and Nilrudra Mandal. "Machinability evaluation and desirability function optimization of turning parameters for Cr₂O₃ doped zirconia toughened alumina (Cr-ZTA) cutting insert in high speed machining of steel." *Ceramics International* 42.2 (2016): 3338-3350.
- [7] Ji, Hansong, et al. "Microstructure and machinability evaluation in micro milling of selective laser melted Inconel 718 alloy." *Journal of Materials Research and Technology* 14 (2021): 348-362.
- [8] Xu, Jinyang, et al. "Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/250F CFRP laminates." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 14 (2013): 1687-1696.
- [9] Zaghbani, Imed, et al. "Evaluation of sustainability of mould steels based on

machinability data." *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 7.1-2 (2010): 58-81.

[10] Horng, Jenn-Tsong, Nun-Ming Liu, and Ko-Ta Chiang. "Investigating the machinability evaluation of Hadfield steel in the hard turning with Al₂O₃/TiC mixed ceramic tool based on the response surface methodology." *Journal of materials processing technology* 208.1-3 (2008): 532-541.

[11] Wang, Xiangyu, et al. "A new method to evaluate the machinability of difficult-to-cut materials." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 75 (2014): 91-96.

[12] Kikuchi, Masafumi, and Osamu Okuno. "Machinability evaluation of titanium alloys." *Dental materials journal* 23.1 (2004): 37-45.

[13] Davim, J. Paulo, and Luis Figueira. "Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques." *Materials & design* 28.4 (2007): 1186-1191.

[14] Calleja, Amaia, et al. "Inconel® 718 superalloy machinability evaluation after laser cladding additive manufacturing process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97 (2018): 2873-2885.

[15] Singh, Bipin Kumar, et al. "Development and machinability evaluation of MgO doped Y-ZTA ceramic inserts for high-speed machining of steel." *Machining Science and Technology* 22.6 (2018): 899-913.

[16] Sivaiah, P, et al. "Machinability evaluation during machining of AISI 52100 steel with textured tools under minimum quantity lubrication–A comparative study." *Materials and Manufacturing Processes* 35.15 (2020): 1761-1768.

[17] Eraslan, Doğançan, et al. "Machinability evaluations of austempered ductile iron and cast steel with similar mechanical properties under eco-friendly milling conditions." *Journal of materials research and technology* 11 (2021): 1443-1456.

[18] Çydaş, U. "Machinability evaluation in hard turning of AISI 4340 steel with different

cutting tools using statistical techniques." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 224.7 (2010): 1043-1055.

[19] Ponnuvel, S., and N. Senthilkumar. "A study on machinability evaluation of Al-Gr-B4C MMC using response surface methodology-based desirability analysis and artificial neural network technique." *International journal of rapid manufacturing* 8.1-2 (2019): 95-122.

[20] Kang, Myung-Chang, et al. "Machinability evaluation according to variation of endmill shape for high speed machining." *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* 19.5 (2002): 133-138.

[21] Selvakumar, V., et al. "Machinability evaluation of Al-4% Cu-7.5% SiC metal matrix composite by Taguchi-Grey relational analysis and NSGA-II." *Sādhanā* 41 (2016): 1219-1234.

[22] Jeon, E-C., et al. "A new application of dynamic indentation: indentation machining technology." *Experimental Mechanics* 57 (2017): 1127-1133.

[23] Lee, Je-Ryung, et al. "Manufacture of microscale random pattern using indentation machining technology." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 7 (2020): 1047-1057.

[24] Broitman, Esteban. "Indentation hardness measurements at macro-, micro-, and nanoscale: a critical overview." *Tribology Letters* 65.1 (2017): 23.

[25] N'jock, M. Yetna, et al. "A criterion to identify sinking-in and piling-up in indentation of materials." *International Journal of Mechanical Sciences* 90 (2015): 145-150.

[26] Muthupandi, Gokul, et al. "Pile-up and sink-in nanoindentation behaviors in AlCoCrFeNi multi-phase high entropy alloy." *Materials Science and Engineering: A* 696 (2017): 146-154.

[27] Beake, Ben D., et al. "Temperature dependence of strain rate sensitivity, indentation size effects and pile-up in polycrystalline tungsten from 25 to 950 C." *Materials & Design* 156 (2018): 278-286.

[28] Hu, Jiangjiang, et al. "Nanoindentation-induced pile-up in the residual impression of

crystalline Cu with different grain size." *Crystals* 8.1 (2017): 9.

[29] Lee, Hwa-Sub, et al. "Analysis of correlation between theoretical and measured surface roughness in drill machining for difficult-to-cut materials." *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 22.8 (2023): 55-62.

[30] Chang, Yin-Yu, and Chih-Cheng Chuang. "Deposition of multicomponent AlTiCrMoN protective coatings for metal cutting applications." *Coatings* 10.7 (2020): 605.

[31] Fukuoka, Toshimichi, and Masataka Nomura. "Evaluation of thermal contact resistance at the interface composed of dissimilar materials." *Pressure Vessels and Piping Conference*. Vol. 49217. (2010): 373-379.

[32] Wang, Chao, Yong-Rae Kim, and Jae-Woong Kim. "Comparison of FE models to predict the welding distortion in T-joint gas metal arc welding process." *International journal of precision engineering and manufacturing* 15 (2014): 1631-1637.

[33] Tai, Tzu-Yao, S. J. Lu, and Y. H. Chen. "Surface crack susceptibility of electrodischarge-machined steel surfaces." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57 (2011): 983-989.

[34] Chen, Jenn-Yih, et al. "Prediction model of cutting edge for end mills based on mechanical material properties." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107 (2020): 2939-2951.

[35] Nishimura, Katsuhiko, et al. "Magnetic and transport properties of stainless steels at low temperature." *Acta Metallurgica Slovaca* 23.3 (2017): 257-263.

[36] Lim, Yeongseok, et al. "Ti-6Al-4V/SUS316L dissimilar joints with ultrahigh joint efficiency fabricated by a novel pressure-controlled joule heat forge welding method." *Journal of Materials Processing Technology* 298 (2021): 117283.

[37] Seo, Dong-Hyun, et al. "Effects of cutting parameters on surface roughness in planing using taguchi method." *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 20.8 (2021): 93-98.

- [38] Watson, Edward A., Donald T. Miller, and Kenneth J. Barnard. "Fill factor improvement using microlens arrays." *Miniaturized Systems with Micro-Optics and Micromechanics III*. Vol. 3276. SPIE, 1998.
- [39] Yang, Hsiharng, et al. "High fill-factor microlens array mold insert fabrication using a thermal reflow process." *Journal of micromechanics and microengineering* 14.8 (2004): 1197.
- [40] Surdo, Salvatore, et al. "Single-shot laser additive manufacturing of high fill-factor microlens arrays." *Advanced Optical Materials* 6.5 (2018): 1701190.
- [41] Wu, Dong, et al. "100% fill-factor aspheric microlens arrays (AMLA) with sub-20-nm precision." *IEEE Photonics Technology Letters* 21.20 (2009): 1535-1537.
- [42] Qiu, Jinfeng, et al. "Fabrication of high fill-factor microlens array using spatially constrained thermal reflow." *Sensors and Actuators A: Physical* 279 (2018): 17-26.
- [43] Kwon, Hyouk, et al. "A high-sag microlens array film with a full fill factor and its application to organic light emitting diodes." *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18.6 (2008): 065003.
- [44] Lee, Je-Ryung, et al. "Fabrication and analysis of optical micro-pyramid array-patterns." *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 13.4 (2014): 7-12.

영문 요약

In the field of optics, patterns of diverse sizes and shapes play a crucial role in implementing specific optical properties to products. These patterns are duplicated through molds to produce products. Molds for optical element can be manufactured through methods such as precision machining, plastic working, discharge machining, laser machining, etching, etc., and it is important to manufacture a pattern of an accurate shape because the pattern of optical element manufactured through the mold is samely duplicated by the mold. At this time, it is cumbersome to analyze the deformation characteristics whenever a material for mold, machining method, etc. are developed because the deformation characteristic varies with the mechanical characteristics of the mold and the mold machining method. Therefore, it is necessary to find and analyze factors that are correlated with the deformation characteristics, and research on new machining methods for manufacturing molds should be continuously conducted. Therefore, this study attempted to develop a new method for analyzing the deformation characteristics vary with the ductility and machining conditions of the material when manufacturing a mold through drilling, and to conduct a study to analyze the deformation characteristics and optical characteristics of optical elements manufactured through molds when manufacturing a mold through indentation machining.

When manufacturing a mold through drilling, the dimensions and surface roughness of the pattern are considered to be important due to the nature of machining that manufactures a pattern by removing materials, so the diameter and surface roughness of the inlet/outlet of the hole manufactured through drilling were analyzed. Since the

diameter of the inlet/outlet may differ from the designed machining diameter due to destructive behavior and vibration generated during machining when the material is removed, the dimensionality was analyzed through the increase/decrease rate of the inlet/outlet compared to the machining diameter. Surface roughness can be calculated theoretically through tool feed distance and tool radius, but the actual surface roughness changes due to the influence of the mechanical properties and cutting speed of the material. Therefore, in order to exclude the effect of the tool feed distance and tool radius, the deformation characteristics were analyzed by introducing the surface roughness ratio divided by the measured value by the theoretical value.

The diameter of the inlet/outlet was found to be less than 1% different from the machining diameter under all materials and machining conditions, and it could be verified that the dimensionality was excellent. It was found that the surface roughness ratio was affected by the elongation of the material, which was judged because the elongation was related to the fracture toughness required for material removal and because it meant the degree of plastic deformation that occurred until the material was removed. In addition, it was found that the cutting speed affects the surface roughness by affecting the wear progress rate of the tool. Through this, it is judged that the surface roughness can be predicted through the elongation of the material and the machining conditions when machining the mold.

Indentation machining is a relatively recently developed technology and is a process that utilizes plastic deformation that occurs by indenting a material with an indenter as a point pattern. It is known that the optical properties of a point pattern vary depending on the

cross-sectional shape and size. Therefore, patterns of three shapes were fabricated through Vickers tip and Conical tip indenter, and a total of nine pattern arrays were fabricated by selecting three size conditions for each shape.

A material to be used as a mold was heat treated to suppress the pile-up phenomenon occurring around the indentation during indentation machining, and planing was performed through ultra-precise machining equipment to make the surface of the mold a mirror surface. A point pattern with a circular, square, and diamond-shaped cross-sectional shape was fabricated by indentation machining through the conical tip and the Vickers tip indenter. As a result of manufacturing an optical element by injecting and curing PDMS into the manufactured mold, the square and diamond-shaped point patterns showed constant optical characteristics regardless of their size, and the larger the size of the circular point pattern, the greater the diffusion area and full width half maximum of light. In this study, it is expected that these results can produce a mold for manufacturing optical devices with arbitrary optical properties by calculating the refractive angle of light through the shape and size of the pattern and the refractive index of the material.