creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

[UCI]I804:48009-200000367525

공 학 석 사 학 위 논 문

단결정 실리콘의 나노스케일 기계가공 시 결정방향에 따른 소성변형 특성에 관한 연구

A Study on the Plastic Deformation Characteristics of Single Crystal Silicon According to the Crystal Direction in Nanoscale Machining

울산대학교 대학원

첨단소재공학과

권 예 필

단결정 실리콘의 나노스케일 기계가공 시 결정방향에 따른 소성변형 특성에 관한 연구

지 도 교 수　전 은 채

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2021년 02월

울산대학교 대학원
첨단소재공학과
권 예 필

권예필의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원장 신 상 용 (인)

심사위원 이 정 구 (인)

심사위원 전 은 채 (인)

울산대학교 대학원

2021년 02 월

감사의 글

처음 대학원 진학을 마음먹었을 때는 2년이라는 학위과정이 길게만 느껴지고, 과연 내가 해낼 수 있을까 걱정되었는데, 대학원 생활을 마무리하는 지금 지나온 순간을 돌이켜 보니 '찰나와 같이 짧은 시간이였구나.' 하고 생각됩니다. 주위에 많은 분들이 도움을 주셨기에 어려움 없이 생활할 수 있어 대학원 학위 과정이 쏜살같이 지나간 것 같습니다. 제가 대학원 생활을 하는 동안 많은 도움을 주신 모든 분들께 이 글을 통해 감사의 말씀을 드리고 싶습니다.

우선 부족한 저를 격려와 함께 지켜봐 주시고, 열정적으로 지도해주신 전은채 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 교수님의 따뜻한 지도 덕분에 이 논문을 작성할 수 있었고, 자신감이 부족했던 제가 당당한 사회의 구성원으로 발돋움할 수 있게 되었습니다.

학위논문 심사를 통해 제가 미처 생각하지 못했던 부분을 일깨워 주심으로써 더 나은 논문이 될 수 있도록 지도해주신 신상용 교수님, 이정구 교수님과 대학원 과정 동안 지도해주신 학과의 여러 교수님께도 감사드리며, 부족한 선배를 도와주느라 고생한 연구실의 후배들과 학부와 대학원을 함께 해온 동기들에게도 고마움을 전합니다.

마지막으로 제가 대학원에 진학하여 2년의 기간동안 학업을 이어 나갈 수 있도록 지원해주신 부모님께 감사인사를 드리고 싶습니다. 항상 걱정만 끼치는 아들을 믿고 지켜봐 주신 부모님께 이 논문을 빌려 감사드립니다.

끊임없이 노력하고 발전하여 사회에 큰 발자취를 남길 수 있는 사람이 되도록 최선을 다하겠습니다. 감사합니다.

국문 요약

AI, IoT 등과 같은 4차 산업혁명이 시작되면서 반도체 시장 규모가 성장하고 있으며, 이에 반도체 산업의 주요 소재인 단결정 실리콘의 가공에 대한 연구 필요성이 증가하고 있다. 단결정 실리콘은 기존에 리소그라피 방식을 이용하여 가공하였는데, 리소그라피 방식은 단면 형상 자유도가 낮아 복잡한 형상의 제작에 어려움이 있어 기계가공 방식으로 활용하는 연구가 진행되어 왔다. 그러나 기존 연구는 대부분이 정성적 분석을 통해 취성 재료인 단결정 실리콘의 연성가공 한계점을 결정하였으며, 정량적 분석을 실시한 연구의 경우에도 단결정 실리콘의 결정방향을 고려하지는 않았다. 단결정 실리콘은 동일한 결정면에서도 결정방향에 따라 재료의 물성이 다르게 나타나므로, 결정방향을 고려하지 않으면 취성 파괴가 발생하는 지점을 정의하는 과정에서 오차가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 나노스크래치 테스터(Nano Scratch Tester)를 이용하였는데, 나노스크래치 테스터는 일반적으로 박막의 접합력을 분석하는 장비지만, 나노스케일에서 우수한 분해능으로 재료의 변형을 정량적으로 분석할 수 있는 장비이기 때문에 본 연구에서 활용하였다. 가공은 (001)/(111) 단결정 실리콘에 대해 (001) 단결정 실리콘은 [100], [110] 결정방향으로 가공을 실시하였고, (111) 단결정 실리콘에 대해서는 [110] 결정방향으로 가공을 실시하여 결정방향에 따른 연성가공한계지점을 결정하고, 결정방향이 가공 시 소성변형에 미치는 영향을 분석하기 위해 기계가공 분야의 '비절삭저항'을 이용하여 변형 특성을 분석하였다.

나노스크래치 테스터를 이용해 실리콘을 가공하여 나온 절삭력과 가공 깊이를 정성적/정량적으로 분석한 결과, 실험을 진행한 모든 결정방향에 대해서 기존의 연구 결과와 같이 연성가공이 이루어지다가 취성 파괴로 바뀌는 경계점이 존재하지만, 결정방향에 따라 절삭력에 차이가 있음을 확인하였다. 또한, 모든 결정방향에서 패턴 단면을 확인한 결과

가공 공구의 단면 형상인 V형 단면이 생성되고, 패턴 내부에 취성파괴가 발생하지 않는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 정량적 분석을 이용하여 연성가공 한계지점을 결정하는 방법을 활용하면 기계가공을 통해 단결정 실리콘의 취성 파괴가 발생하지 않는 가공이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구의 연성가공 한계지점이 가지는 물리적 의미를 분석하기 위해 비절삭저항을 계산한 결과, 결정방향과 무관하게 비절삭저항은 크기 효과가 발생하지만 결정방향에 따라 비절삭저항의 크기에 차이가 존재하고 연성가공 한계지점 이전에서 수렴하는 현상이 나타났다. 이러한 현상의 원인을 규명하기 위해 가공 시 가공 공구와 재료가 접하는 길이와 면적 간 비율과 비절삭저항의 상관관계를 분석하여 공구와 재료가 접하는 길이와 면적 간 비율이 비절삭저항의 크기 효과를 일으키고 수렴 현상이 발생하게 할 것이라는 결론을 도출하였다. 기존의 연구에서 수직 응력과 수평 응력 간 비율을 통해 재료의 파괴 거동이 결정된다는 이론이 제시되었는데, 이를 연성가공 한계지점 발생 원인에 적용할 수 있을 것으로 예측하여, 본 연구에 적용한 결과, 가공 깊이가 증가함에 따라 수직 응력/수평 응력의 비율이 감소하다 수렴하는데, 이 때 수직 응력/수평 응력의 수렴 지점이 연성가공 한계지점과 일치하는 것을 확인하였다. 이를 통해 수직 응력과 수평 응력의 비율이 연성가공 한계지점의 발생 원인이라는 결론을 도출하였다.

차 례

1. 서론 ..... - 1 -

1.1 연구 배경 및 목적 ..... - 1 -

2. 연구 필요성 ..... - 3 -

2.1 연성가공 한계지점의 정량적 분석의 필요성 ..... - 3 -

2.2 단결정 실리콘 가공 시 결정방향의 중요성 ..... - 5 -

3. 실험방법 ..... - 7 -

3.1 실험장비 및 실험방법 ..... - 7 -

3.2 패턴 표면 관찰 ..... - 10 -

3.3 패턴 단면 관찰 ..... - 13 -

4. 실험 결과 및 고찰 ..... - 15 -

4.1. 연성가공 한계지점의 정성적/정량적 분석 ..... - 15 -

4.1.1 배분력의 증가에 따른 절삭력의 정량적 분석 ..... - 15 -

4.1.2 배분력의 증가에 따른 가공 깊이의 정량적 분석 ..... - 19 -

4.1.3 SEM을 이용한 연성 가공 한계 지점 검증 ..... - 22 -

4.2 AFM을 이용한 패턴 단면 검증 ..... - 24 -

4.2.1 가공 모드에 따른 가공 특성 일치 여부 검증 ..... - 24 -

4.2.2 AFM 패턴 단면 분석 ..... - 27 -

4.3 연성가공 한계지점의 물리적 의미 분석 ..... - 31 -

4.3.1 가공 공구의 가공 깊이에 따른 면적 정의 - 32 -

4.3.2 결정방향 별 비절삭저항 분석 - 35 -

4.3.3 비절삭저항의 수렴 원인 분석 - 39 -

4.3.4 연성가공 한계지점 발생 원인 분석 - 42 -

5. 결론 - 45 -

6. 참고문헌 - 47 -

그림 목차

그림 1-1. 연도별 사물인터넷 매출액 현황

그림 2-1. 미변형 칩의 SEM 관찰 (좌) 연성 가공 / (우) 취성 파괴

그림 2-2. SEM 관찰을 통한 가공 패턴의 정성적 분석

그림 2-3. (001) Silicon Wafer의 결정방향

그림 2-4. 단결정 실리콘의 결정방향에 따른 Young's Modulus와 Poisson's ratio 값

그림 3-1. 나노스크래치 테스터

그림 3-2. 나노스크래치 테스터의 Progressive mode (좌) / Constant mode (우)

그림 3-3. 시편 제작 과정 개략도

그림 3-4. 원자간력 현미경(AFM) XE-100

그림 4-1. (001)[110] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 절삭력 변화 그래프

그림 4-2. (001)[100] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 절삭력 변화 그래프

그림 4-3. (111)[110] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 절삭력 변화 그래프

그림 4-4. 가공 영역 별 원자 간 결합이 끊어지면서 새롭게 생성되는 계면 영역

(A) 연성 가공 영역 (B) 취성 파괴 영역

그림 4-5. (001)[110] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 가공 깊이 변화 그래프

그림 4-6. (001)[100] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 가공 깊이 변화 그래프

그림 4-7. (111)[110] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 가공 깊이 변화 그래프

그림 4-8. SEM을 이용한 (001)[110] 결정방향의 연성가공 한계지점 검증

그림 4-9. SEM을 이용한 (001)[100] 결정방향의 연성가공 한계지점 검증

그림 4-10. SEM을 이용한 (111)[110] 결정방향의 연성가공 한계지점 검증

그림 4-11. 결정방향 별 'Constant mode'의 'Progressive mode'의 배분력에 따른 절삭

력 및 가공 깊이 비교

그림 4-12. 10mN 배분력으로 가공한 패턴 단면의 AFM 분석 결과

그림 4-13. 20mN 배분력으로 가공한 패턴 단면의 AFM 분석 결과

그림 4-14. 30mN 배분력으로 가공한 패턴 단면의 AFM 분석 결과

그림 4-15. 마이크로스케일에서의 비절삭저항 크기 효과

그림 4-16. 가공 공구의 Tip blunting 영역 측정

그림 4-17. Tip blunting 영역 안 / 밖 (좌/우) 가공 면적 정의

그림 4-18. 가공 공구의 Tip blunting 영역의 면적 계산을 위한 도식

그림 4-19. (001)[110] 결정방향의 가공 깊이에 대한 비절삭저항

그림 4-20. (001)[100] 결정방향의 가공 깊이에 대한 비절삭저항

그림 4-21. (111)[110] 결정방향의 가공 깊이에 대한 비절삭저항

그림 4-22. 결정방향에 따른 비절삭저항 차이

그림 4-23. 가공 깊이에 따른 공구와 재료 간 길이/면적 및 비절삭저항 변화

그림 4-24. (001)[110]의 가공 깊이에 따른 수직 응력/수평 응력 비율 변화

그림 4-25. (001)[100]의 가공 깊이에 따른 수직 응력/수평 응력 비율 변화

그림 4-26. (111)[110]의 가공 깊이에 따른 수직 응력/수평 응력 비율 변화

표 목차

표 1-1. 나노스크래치 테스터 가공 조건표

표 4-1. 결정방향별 'Constant mode'의 배분력에 따른 절삭력 및 가공 깊이

표 4-2. 10mN 배분력에 대한 결정방향 별 가공 깊이 및 탄성률

표 4-3. 20mN 배분력에 대한 결정방향 별 가공 깊이 및 탄성률

표 4-4. 30mN 배분력에 대한 결정방향 별 가공 깊이 및 탄성률

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

AI, IoT, 자율주행 등과 같은 정보통신기술(ICT)의 융합으로 이뤄진 4차산업혁명이 시작되면서, 첨단 산업 시장의 규모가 성장함에 따라 반도체 시장 규모도 동반 성장하여 지속적으로 시장규모가 증가하고 있다[1-2]. 이에 따라 반도체 산업의 주요 소재인 단결정 실리콘을 더욱 원활히 산업에 사용하기 위하여 단결정 실리콘 가공에 관한 연구 필요성도 높아지고 있다. 기존에 단결정 실리콘을 가공하는 방식으로는 주로 리소그라피 방식이 사용되었다. 리소그라피 방식으로 미세 패턴을 제작하는 방법은 포토마스크를 이용하여 선택적으로 빛을 포토레지스트 상에 조사하여 패턴을 제작하는 기술이다[3-6]. 그러나 리소그라피 방식은 단면 형상 자유도가 낮아 복잡한 형상을 가공하는 것에 어려움이 있어, 단면 형상 자유도가 높은 기계가공 방식을 활용하여 단결정 실리콘을 가공하려는 연구가 진행되고 있다[7-17].

기계가공 방식을 활용하여 단결정 실리콘을 가공하는 경우, 단결정 실리콘이 취성 재료이기 때문에 가공 시 대부분 소성 변형보다는 취성파괴를 발생시킨다. 그로 인해 기계가공 시 취성 재료인 실리콘이 쉽게 파괴가 발생해 산업에 적용하기 어려운 문제를 가지고 있다. 이를 극복하기 위하여 K. Liu et al. 등은 마이크로 스케일의 하중 범위에서 기계가공을 실시한 후 광학 이미지나 SEM(Scanning Electron Microscope) 이미지의 분석과 같은 정성적 분석 방법을 이용하여 재료의 취성파괴 발생 여부를 조사하였다[18-19]. SEM 이미지 분석과 같은 정성적인 분석 방법을 통해 재료의 취성파괴 발생 여부를 결정하게 될 경우, 패턴의 표면을 관찰하는 것만으로도 취성 파괴 여부를 알 수 있어 분석이 빠르고 간편하다는 장점을 가지지만, 기계가공으로 제품을 생산해야 하는 산업에 적용할

경우, 취성 파괴가 발생하기 시작하는 정확한 하중을 정의하지 않으면, 제품 생산 시 일정한 품질의 제품을 얻을 수 없기 때문에 최초 취성 파괴가 발생하는 지점을 정량적으로 분석하여 정확한 수치를 얻는 것이 중요하다. 또한 단결정 실리콘의 경우, 실리콘 결정의 결정방향에 따라 물리적 특성이 다르게 나타나기 때문에 [20-23] 동일한 실리콘을 가공하는 경우에도 가공 방향에 따라 재료의 취성 파괴가 발생하는 지점에 차이가 발생한다. 따라서, 실리콘의 결정방향 별로 취성 파괴가 발생하는 지점의 하중을 정의해야 한다.

이에 본 연구에서는 결정방향별 기계가공 시 단결정 실리콘의 취성 파괴가 발생하지 않는 연성가공 한계점을 제시하고자 한다. 추가로, 본 연구에서 제시한 연성가공 한계점에 대해 기계가공 분야에서 가공 시 공구 및 가공 장비에 가해지는 힘을 예측하는 데 사용할 수 있는 인자인 비절삭저항 변화를 확인하면 연성가공 한계점의 물리적 의미를 분석하여 결정방향에 따른 단결정 실리콘의 소성변형 특성을 확인할 수 있을 것을 예상할 수 있다.

[단위 : 백만원]

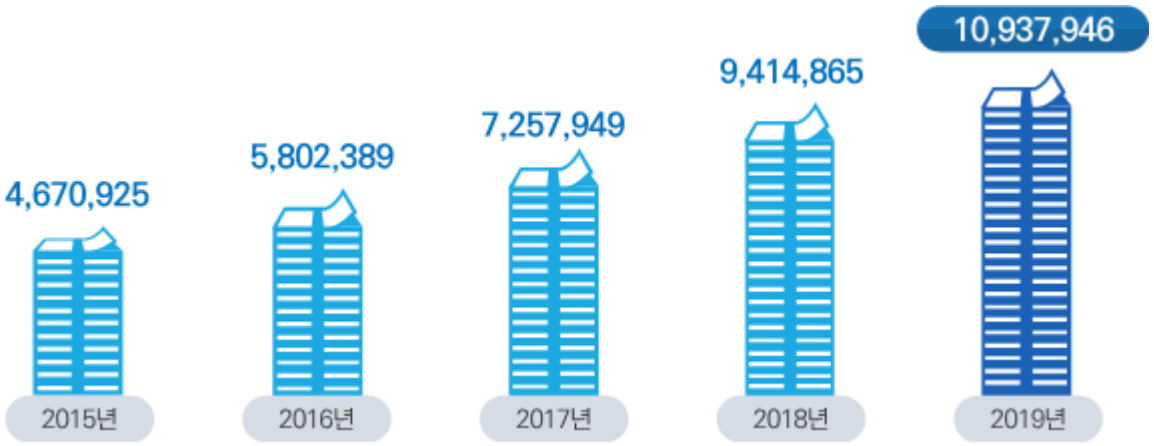

그림 1-1. 연도별 사물인터넷 매출액 현황 [출처 : 과학기술정보통신부]

2. 연구 필요성

2.1 연성가공 한계지점의 정량적 분석의 필요성

취성 재료에 대한 연성 가공 방법을 연구한 기존의 연구들은 대부분 재료를 가공할 때 생성되는 chip에 대해서 미변형 칩 두께(Undeformed chip thickness)를 광학현미경이나 전자현미경을 이용하여 관찰하여 chip의 형상이 끊어진 부분 없이 연속적이며 chip의 끝 부분이 날카롭지 않으면 재료가 연성 가공되었다고 판단하고, chip의 형상이 가시 모양으로 뾰족하고 잘게 부서져 있으면 취성 파괴가 발생하다고 판단하거나 패턴 표면을 관찰하여 파괴가 발생한 지점을 기준으로 연성가공과 취성 파괴를 구분 짓는 정성적 분석 방법으로 재료의 연성 가공 유무를 정의하였다[24-28]. 그러나, 나노스케일에서 가공 시 가공 잔여물인 chip은 그 크기가 수 μm 이하 수준으로 매우 작은 크기이므로 chip에 손상이 가지 않도록 모아서 관찰하기란 쉽지 않은 일이다. 또한, 매 실험마다 가공 조건을 변경하면서 연성가공이 발생하는 경우와 취성 파괴가 발생하는 경우를 확인하여야 하므로, 실험을 통해 재료의 연성가공 한계를 확인하는데 시간이 오래 걸리고, 정확한 연성가공 한계지점을 결정하는 것이 사실상 불가능하다.

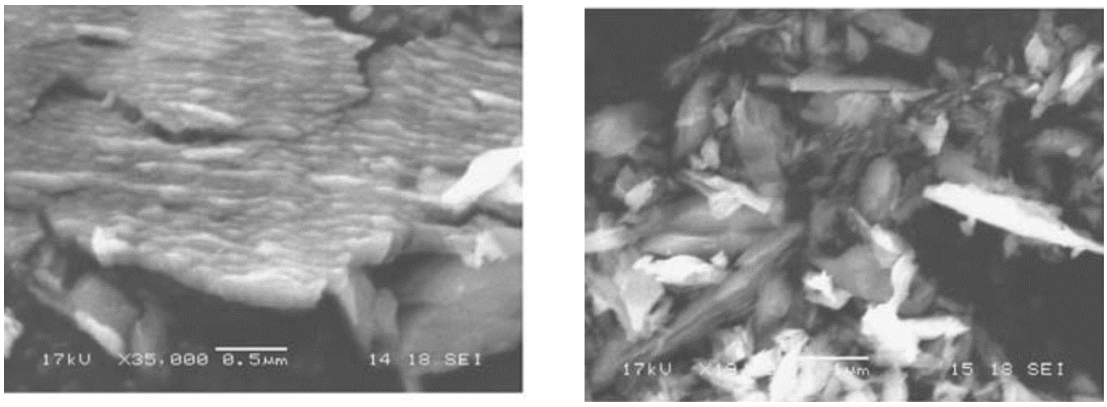

그림 2-1. 미변형 칩의 SEM 관찰 (좌) 연성 가공 / (우) 취성 파괴 [24]

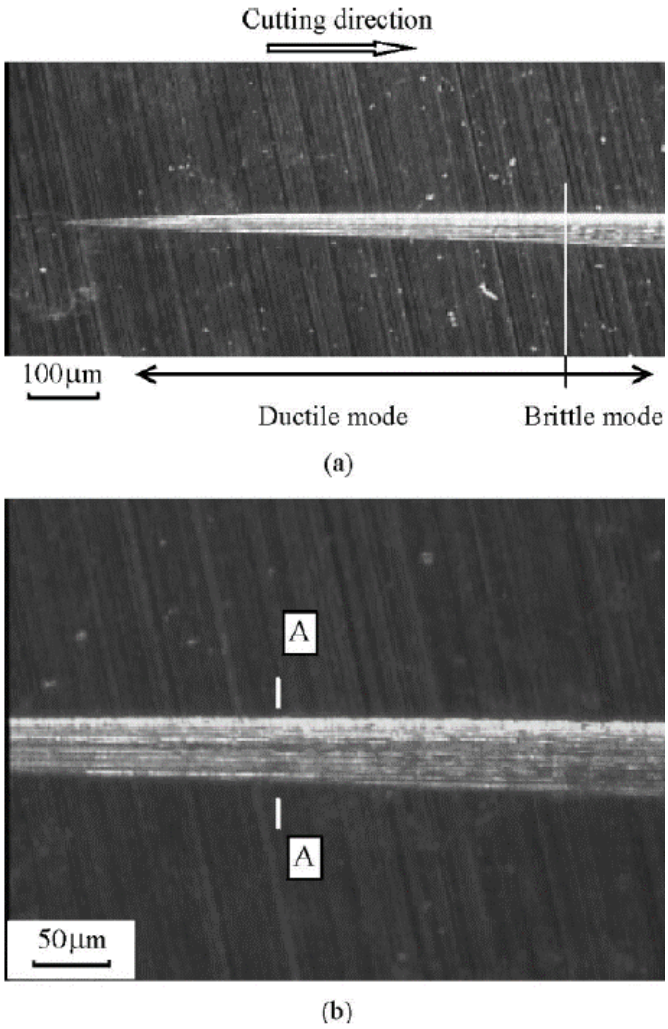

그림 2-2. SEM 관찰을 통한 가공 패턴의 정성적 분석 [30]

그림 2-2와 같이 SEM을 이용해 가공 패턴을 관찰하여 패턴에서 관찰되는 파괴에 의한 표면 손상 여부를 통해 연성가공 한계지점을 결정하는 방법[29-33] 또한, 그림에서 드러나듯 고배율의 전자현미경을 이용해도 패턴에서 최초로 파괴가 발생하는 지점을 명확하게 정의하기란 어려운 일이다. 따라서 정성적 분석으로 연성가공 한계지점을 정확하게 결정하는 것은 어려운 일이므로 본 연구에서 목표로 하는 취성 재료에 대한 최초 파괴가 발생하는 지점의 정량적 분석을 통한 연성가공 한계지점 결정이 필요하다.

2.2 단결정 실리콘 가공 시 결정방향의 중요성

단결정 실리콘은 MEMS(Micro-Electro Mechanical Systems), 태양전지, 반도체 산업 등에 널리 사용되는 재료이다. 단결정 실리콘이 여러 산업에서 사용될 수 있는 이유는, 재료의 격자 구조가 연속적이며, 격자 방향이 일정하여 동일한 결과를 얻을 수 있고 재료의 물성이 전기적, 기계적 측면에서 적합하기 때문이다[20-23, 34-35]. 그러나, 단결정 실리콘은 그림 2-3과 같이 동일한 결정면에서도 여러 결정방향이 존재하고, 각각의 결정방향에 따라 재료의 물성이 다르게 나타난다.

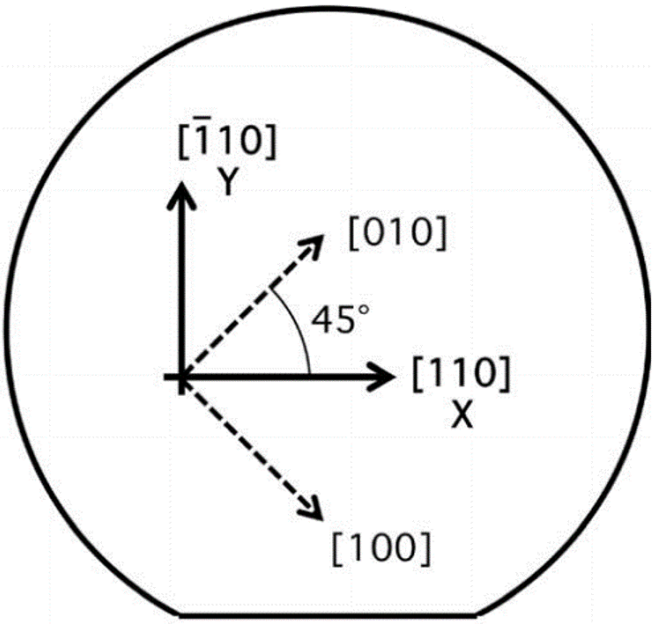

그림 2-3. (001) Silicon Wafer의 결정방향 [35]

Masolin. A., et al.에 의하면 단결정 실리콘은 결정 방향에 따라 경도와 같은 물리적 특성 뿐만 아니라, 열적 특성, 파괴 특성 또한 다르게 나타나며, [34] Hopcroft. M. A et al.은 단결정 실리콘의 Young's Modulus(E)와 Poisson's ratio가 결정방향에 따라 다른 결과를 보이는 것을 밝혀내었다[35]. 이와 같이 단결정 실리콘은 결정방향에 따라 재료의 특성이

다르기 때문에 결정방향이 가공 특성에 영향을 미칠 것으로 판단되어진다. 따라서 본 연구에서는 여러 결정방향에서 가공을 실시하여 결정방향이 가공에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

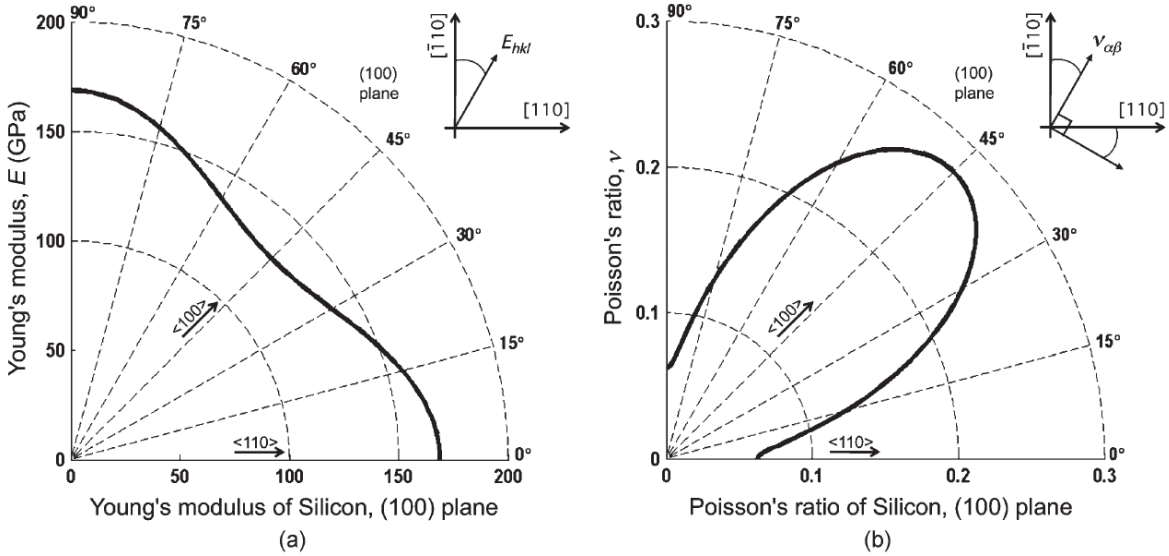

그림 2-4. 단결정 실리콘의 결정방향에 따른 Young's Modulus와 Poisson's ratio 값 [35]

3. 실험방법

3.1 실험장비 및 실험방법

본 연구에서는 Anton Paar 社가 개발한 나노스크래치 테스터(Nano Scratch Tester)를 사용하여 실험을 진행하였는데, 일반적으로 나노스크래치 테스터는 1 μm 미만의 박막 및 코팅의 밀착력 및 손상(스크래치)에 대한 저항 특성을 정량적으로 분석하는 데 사용되는 장비이다. 또한 장비는 하중과 깊이를 측정하는 센서가 있어 실시간으로 재료의 변형을 측정할 수 있으며, 하중과 깊이 분해능이 우수하여 본 연구가 진행되는 나노 스케일에서의 정밀한 측정이 가능하다[36-40]. 이에 본 연구에서는 나노스크래치 테스터를 활용하여 나노스케일에서 단결정 실리콘의 가공을 실시하였으며, 가공 시 측정되는 배분력과 가공 깊이를 정량적으로 분석하였다.

나노스크래치 테스터는 배분력과 가공길이를 제어하여 표면을 긁어 재료를 분석하며 장비를 제어하는 방법은 두 가지 방식이 존재한다. 첫 번째는 'Progressive mode'이며, 두 번째는 'Constant mode'이다. 우선 'Progressive mode'는 측정하고자 하는 시험편에 가해주는 배분력을 0에서부터 임의로 설정한 힘까지 선형적으로 증가시키며 가공하는 방식이다. 본 연구에서는 실리콘의 취성파괴가 발생하기 시작하는 지점의 배분력 및 절삭력을 정량적으로 분석하여 연성가공 한계 지점을 결정하고 비절삭저항의 변화 양상을 분석하기 위해 'Progressive mode'를 활용하였다. 다음으로 'Constant mode'는 사용자가 설정한 임의의 배분력을 일정하게 유지시켜주며 시편을 가공하는 방식이다. 본 연구에서는 연성가공 한계 지점의 배분력 보다 낮은 임의의 배분력을 실리콘에 가해주어 가공된 실리콘의 패턴 내부에 취성 파괴가 발생하였는지 검증하기 위해 'Constant mode'를 활용하였다.

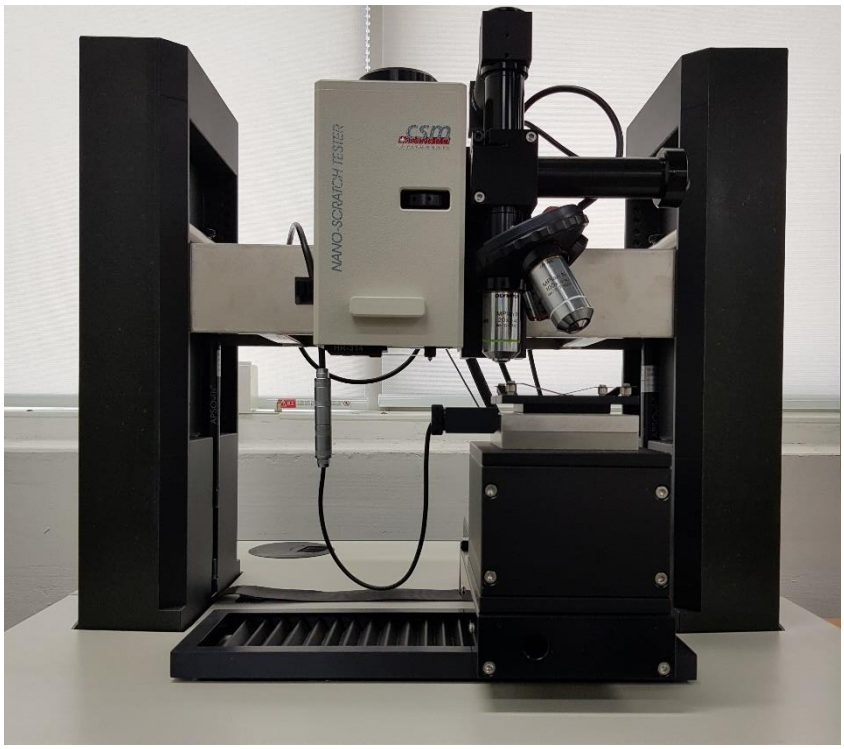

그림 3-1. 나노스크래치 테스터

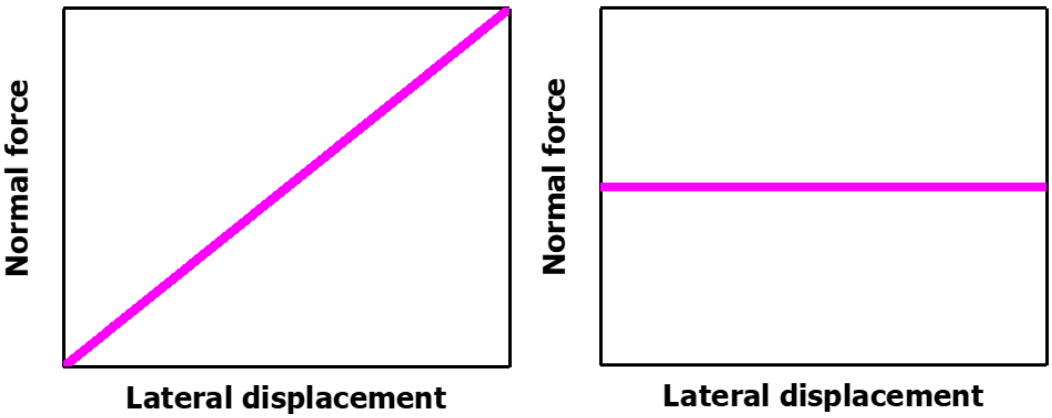

그림 3-2. 나노스크래치 테스터의 Progressive mode (좌) / Constant mode (우)

본 연구의 실험 조건은 다음의 표와 같다.

표 1-1. 나노스크래치 테스터 가공 조건표

시 편	(001) / (111) 단결정 실리콘
가공 공구	90° 원뿔형 단결정 다이아몬드 공구
가공 방향	[100] / [110]
가공 길이	1 mm
가공 속도	1 mm/min
최대 배분력	50 mN (PM) / 10, 20, 30 mN (CM)

일반적으로 반도체 산업, MEMS 등 실리콘 웨이퍼를 사용하는 산업에서는 주로 (001)과 (111) 방향으로 성장시킨 단결정 실리콘을 사용한다. 이에 본 연구에서도 산업에 주로 사용되는 (001)면 또는 (111)면 방향으로 성장시킨 단결정 실리콘 시편을 활용하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 가공 공구는 90° 원뿔형 단결정 다이아몬드 공구이며, 실리콘의 [100], [110] 결정방향에 대해 1mm의 가공 길이를 1mm/min의 속도로 가공을 실시하였다. 'Progressive mode'에서 가공 시 시편에 가해준 최대 배분력은 기존의 연구 결과를 바탕으로 50mN으로 가공을 진행하였으며, [36-37] 'Constant mode'에서 가해준 배분력에 10, 20, 30mN으로 선정하였으며 이러한 배분력의 선정 기준은 뒤에서 자세히 다룰 예정이다.

3.2 패턴 표면 관찰

본 연구에서는 패턴 표면 관찰을 위해 다음과 같은 순서로 시편을 준비하였다. 우선 직경 100mm의 실리콘 웨이퍼를 가로X세로 (20 X 20 mm) 크기의 사각형으로 자른 후, 시편에 남아있는 파편 및 불순물들을 제거하기 위해 Acetone과 IPA(Isopropyl Alcohol), DI Water에 각각 5분의 시간동안 초음파 세척을 실시한 후, 압축공기로 표면을 불어내어 잔류 부유물을 제거하고 표면을 건조시켜주었다[28]. 이 후, 나노스크래치 테스터를 활용하여 단결정 실리콘 시편에 가공을 실시하였다. 가공이 완료된 시편은 깨끗한 표면의 관찰 통해 최초 취성파괴 지점을 정밀하게 찾기 위해 가공 중 발생한 chip(파편)을 제거하고자 앞서 실시한 Acetone, IPA, DI Water의 세척 과정을 동일하게 진행한다. 세척 및 건조 과정이 완료된 시편은 JEOL 社의 IT-200 측정 장비를 활용하여 표면에 생성된 패턴을 관찰한다. 패턴 관찰 시 SEM의 가속전압은 5~10kV를 사용하였는데, 이는 실리콘의 특성상 표면에 전자빔이 조사될 경우 표면이 빠른 속도로 손상되어, 깨끗한 표면 이미지를 얻을 수 없기 때문이다.

이러한 과정을 통해 SEM으로 관찰한 표면의 패턴 이미지는 'Progressive mode'를 통해 가공하였을 때 가공 길이에 따라 선형적으로 증가하는 배분력에 의한 시편의 변화하는 모습을 확인하기 위해 한 장의 파노라마 이미지로 제작하였다. 파노라마 이미지를 제작하는 방식은 나노스케일의 극저하중에서 가공이 이루어진 본 연구의 특성상 정확한 가공 시작점을 찾는 것에 어려움이 있기 때문에 취성 파괴가 발생하여 명확하게 가공이 완료된 것이 보이는 가공 종료점을 기준으로 하여 본 연구에서 설정한 가공 길이인 1mm의 길이를 이용해 가공 시작점을 확인하였다. 이러한 방식으로 확인한 가공 시작점에서 패턴 표면의 최초 파괴가 발생한 것으로 보이는 지점까지의 길이를 구한 후, 나노스크래치 테스터를 통해 얻은 절삭력과 가공깊이의 정량적 분석 결과와 매칭시켜 비교 분석을 진

행하였다. 이를 통해 정량적 분석으로 결정한 연성가공 한계 지점이 실제로 취성 파괴가 발생하는 지점과 일치하는 지 검증하였다. 이 후, ‘Constant mode’를 활용하여 가공한 패턴에 대해서 전체 패턴 길이 중 초반, 중반, 후반부의 세 부분에 대해 SEM으로 표면을 관찰하여, 일정한 하중이 가해졌을 때, 재료의 표면에 생성된 패턴이 일정한 모습을 보이는 지 확인하였다.

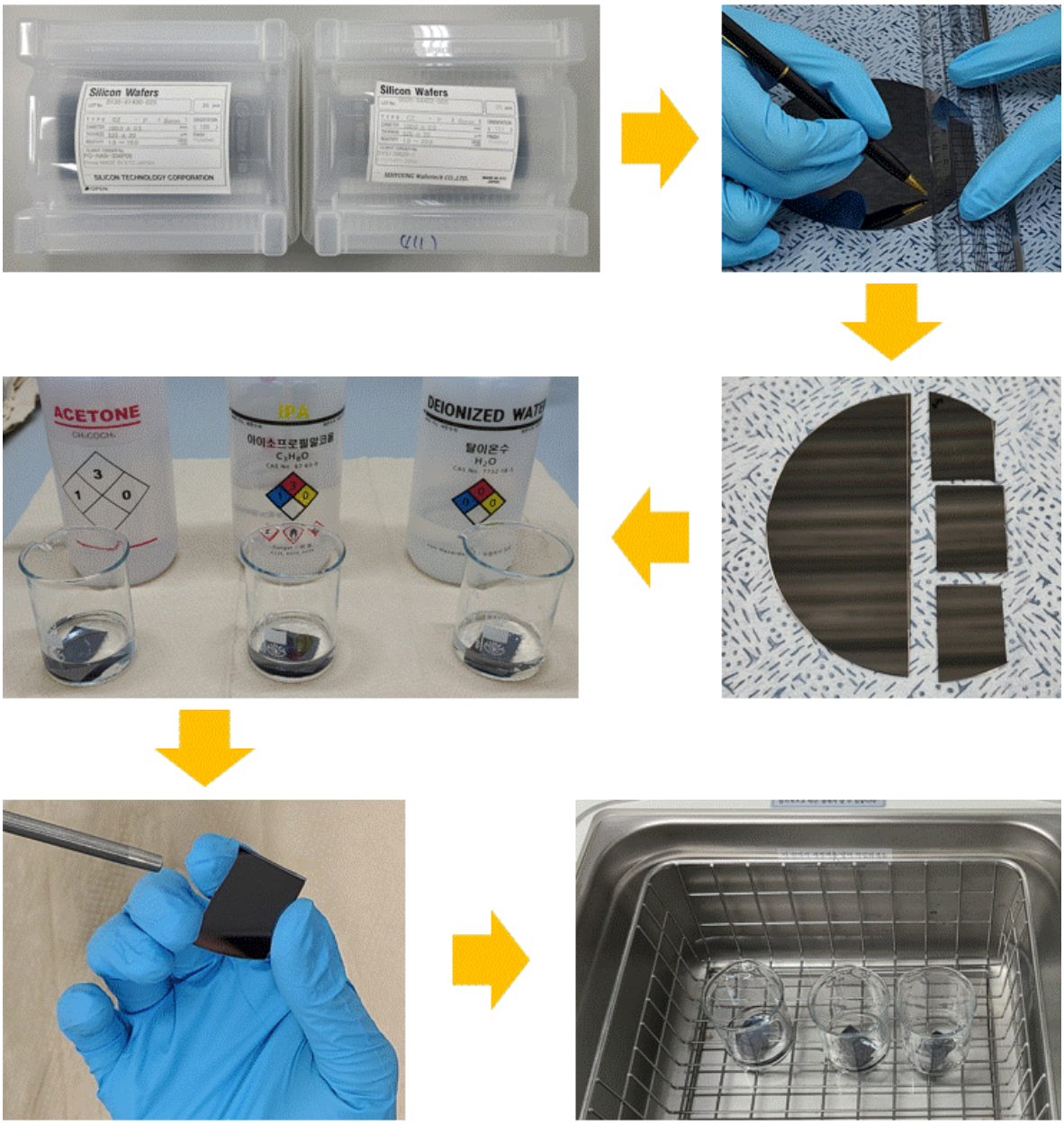

그림 3-3. 시편 제작 과정 개략도

3.3 패턴 단면 관찰

패턴 단면 관찰을 위한 시편은 표면 관찰을 위한 시편 제작 과정과 동일하게 직경 100 mm의 실리콘 웨이퍼를 적당한 크기로 자른 후, Acetone, IPA(Isopropyl Alcohol), DI Water 순서로 각 5분씩 초음파 세척을 진행하고, 압축공기로 표면의 잔류 부유물을 제거하고 건조하여 준비하였다[28]. 준비된 시편은 나노스크래치 테스터의 'Constant mode'를 활용하여 일정한 배분력으로 시편에 패턴을 가공하였는데, 'Constant mode'를 활용하여 시편에 패턴을 가공한 것은 크게 두 가지의 이유가 있다.

첫 번째로, 'Progressive mode'를 활용하여 시편을 제작할 경우, 패턴 단면을 관찰할 때, 관찰하는 지점에 가해진 정확한 배분력을 알 수 없어 배분력에 따른 가공 깊이의 영향에 대한 정량적 분석이 불가능하다. 두 번째 이유는 본 연구에서는 연성가공 한계지점을 찾기 위해 'Progressive mode'를 활용하여 시편을 가공하였지만, 산업 현장에서 사용되는 일반적인 기계 가공 기술은 가공 시 가공 깊이가 일정하게 유지되는 환경에서 작업이 이루어진다. 이는 나노스크래치 테스터의 'Constant mode'의 가공환경과 일치한다[36-37]. 앞선 두 가지 이유를 바탕으로 'Constant mode'로 패턴을 가공하였으며, 패턴 가공이 완료된 시편은 Park systems 社의 원자간력 현미경(AFM) XE-100 장비를 이용하여 패턴 단면을 측정하였다. 해당 장비는 최대 스캔 영역이 X-Y-Z 기준 45 X 45 X 12 μm이며, Z 방향의 분해능이 0.01 nm로, 나노스케일에서 가공이 이루어지는 본 연구의 단면 분석에 적합하다.

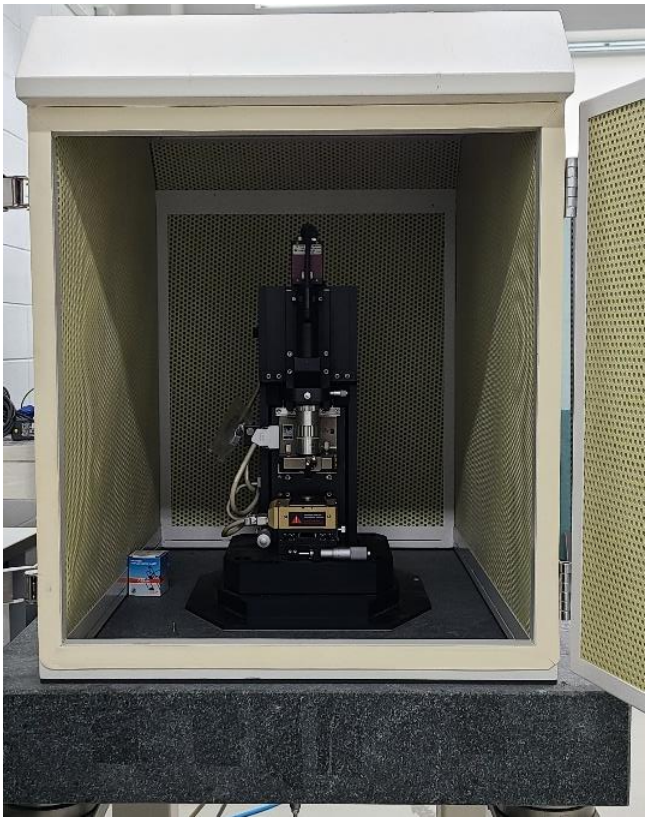

그림 3-4. 원자간력 현미경(AFM) XE-100

AFM은 일반적으로 'Contact mode', 'Non-contact mode', 'Tapping mode'의 세 가지 방식으로 분석이 진행되는 데, 본 연구에서는 Non-contact cantilever를 이용하여 'Non-contact mode'에서 분석을 진행하였다. 'Non-contact mode'를 사용한 이유는 'Contact mode'를 사용할 경우, cantilever가 시편과 접촉하면서 분석을 진행하기 때문에, 측정이 진행되는 부분이 cantilever에 의해 손상이 발생하기 때문이다. AFM을 이용하여 패턴 단면을 분석할 때 설정한 스캔 영역은 X-Y에 대해 6 X 6 μm로 진행하였는데 이는, 가공된 패턴과 가공되지 않은 패턴 밖의 부분을 모두 확인할 수 있는 영역 크기이다. 표면 스캔 시 스캔 속도는 장비의 초기 설정 속도인 1Hz보다 낮은 0.2 ~ 0.4Hz의 스캔 속도로 분석을 진행하였다. 이를 통해 분석 시 cantilever가 Z 방향으로 충분히 스캔을 진행하여, 패턴 단면의 분석 결과에 대한 오차를 최소화하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 연성가공 한계지점의 정성적/정량적 분석

4.1.1 배분력의 증가에 따른 절삭력의 정량적 분석

결정방향에 따라 나노스크래치 테스터를 이용하여 0에서부터 50mN까지 배분력을 선형적으로 증가시키며 가공하였을 때 절삭력의 변화를 그림 4-1 ~ 4-3에 나타내었다.

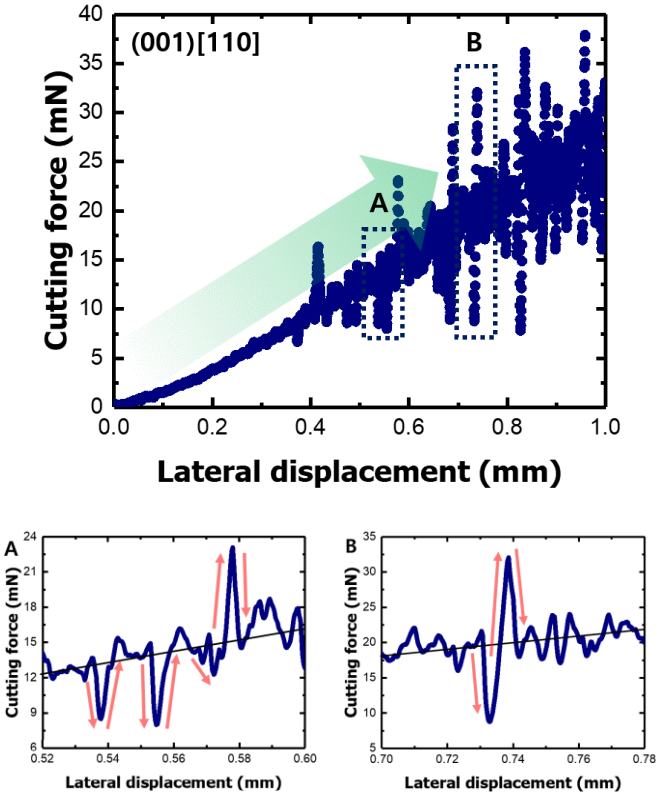

그림 4-1. (001)[110] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 절삭력 변화 그래프

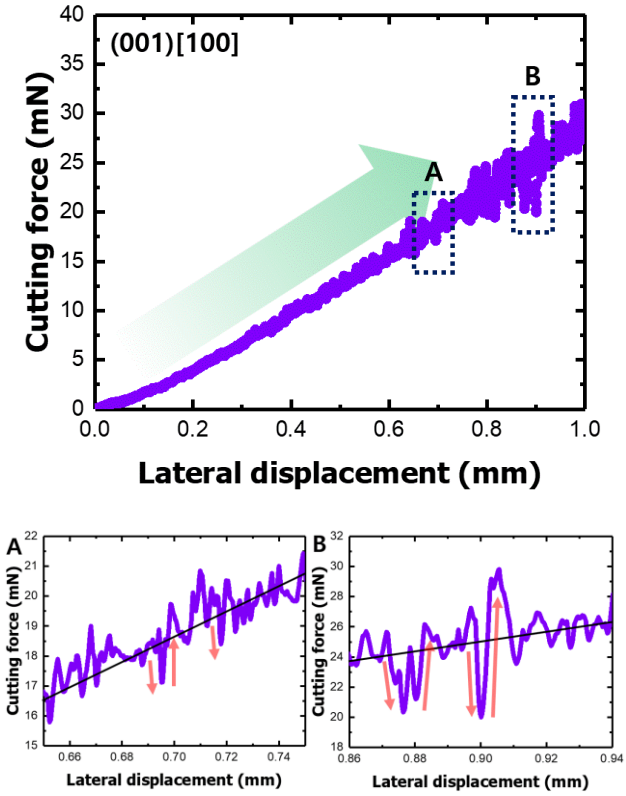

그림 4-2. (001)[100] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 절삭력 변화 그래프

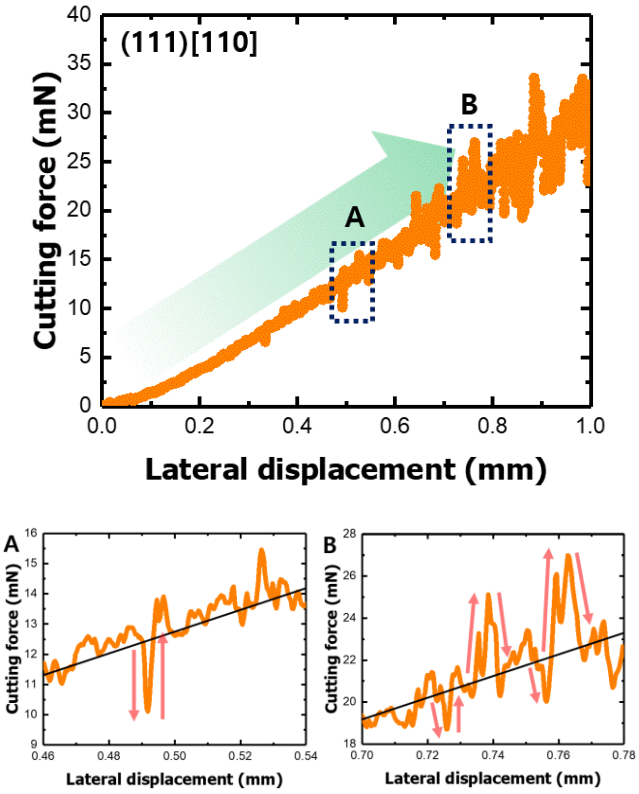

그림 4-3. (111)[110] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 절삭력 변화 그래프

결과 그래프를 보면, 가공 초기의 낮은 배분력에서는 재료에 가해지는 절삭력이 완만하게 증가하며, 일정한 지점에서 절삭력이 급격하게 감소하였다가 증가하는 거동을 보이는 것이 실험을 진행한 모든 결정방향에서 관찰되어진다. 그러나 결정방향에 따라 최초로 절삭력이 급격히 감소하였다 증가하는 지점은 차이를 보이고 있다. 결정방향에 따른 절삭력의 정량적 분석 결과 (001)의 결정면에 대해서 [110]의 결정방향으로 가공하였을 때, 재료에 가해지는 절삭력이 평균적으로 약 10mN인 지점에서 최초로 절삭력이 급격히 감소하였다 증가하는 모습을 보이고 있으며, 최초의 절삭력의 급격한 변화 지점 이후로 지속적으로 절삭력의 급격한 변화 거동을 보이다 가공이 완료되는 지점에서 재료에 가해지는 절삭력의 크기는 약 30mN의 하중을 보인다. (001)의 동일한 결정면에서 [100]의 결정방향으로 가공하였을 때는 평균적으로 약 9mN인 지점에서 최초로 절삭력이 급격히 감소하였다 증가하는 모습을 보이지만, [110]의 결정방향으로 가공하였을 때와 비교하여, 절삭력의 변화 거동 정도가 크지 않으며, 최종적으로 약 28mN의 절삭력이 가해지며 가공이 완료된다. (111)의 결정면에 대해서 [110]의 결정방향으로 가공하였을 때 약 8mN의 절삭력이 가해지는 지점에서 최초의 절삭력 변화 거동이 나타났으며, 가공이 완료되는 시점에서 재료에 약 31mN의 절삭력이 가해지는 모습을 보였다.

본 연구에서는 절삭력의 급격한 감소 후 증가 거동을 보이는 지점을 파괴가 발생한 지점이라고 판단하였는데, 이러한 판단의 근거는 다음과 같다. 그림 4-4와 같이 재료를 가공한다는 의미는 원자 간 결합을 끊어내는 것이라고 볼 수 있는데, 낮은 하중에서는 소성 변형만 발생하므로 가공 시 가공 공구가 원자간 결합을 끊어내는데 일정한 에너지를 사용하기 때문에 절삭력의 급격한 변화가 발생하지 않는다. 그러나, 하중이 증가하면서 재료에 취성 파괴가 발생하면 기존의 소성 변형으로 원자간 결합을 끊어내는 에너지가 사용되는 것에 더하여 취성 파괴의 발생으로 인한 가공시킬 재료의 순간적인 탈락이 발

생하면서 공구가 재료와 맞닿는 면적이 순간적으로 감소하며 재료와 공구가 맞닿는 면적이 감소함에 따라 재료 제거에 필요한 에너지가 순간적으로 급격히 감소하게 된다. 필요 에너지의 급격한 감소 현상이 발생함에 따라 절삭력이 순간적인 감소하는 모습을 보인다 [37]. 이러한 이유로, 본 연구에서는 최초로 절삭력이 급격히 변화하는 지점을 취성 파괴가 발생하기 시작하는 지점인 연성가공 한계 지점으로 정의하였다.

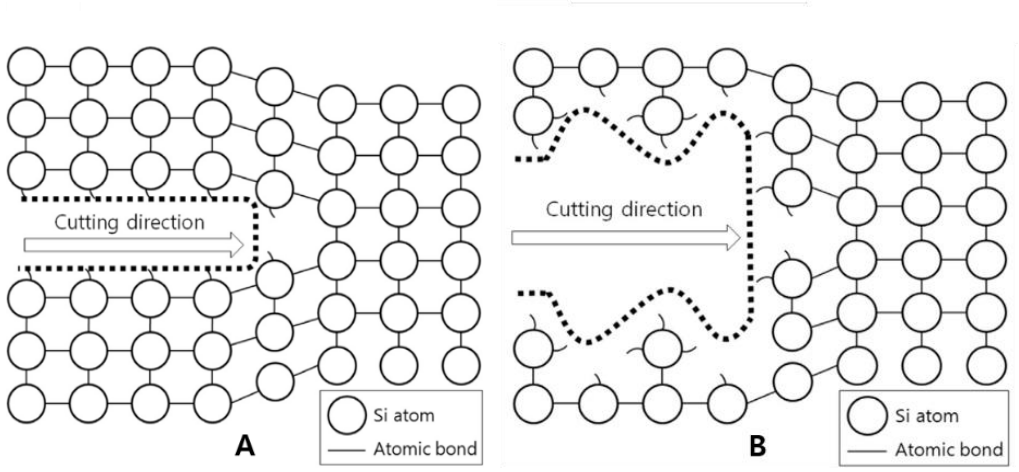

그림 4-4. 가공 영역 별 원자 간 결합이 끊어지면서 새롭게 생성되는 계면 영역 [37]
(A) 연성 가공 영역 (B) 취성 파괴 영역

4.1.2 배분력의 증가에 따른 가공 깊이의 정량적 분석

나노스크래치 테스터를 이용하여 배분력을 0에서부터 50mN까지 선형적으로 증가시키며 가공을 실시하였을 때의 가공 깊이의 변화를 그림 4-5 ~ 4-7에 나타내었다. 가공 깊이 또한 모든 결정방향에서 절삭력의 변화와 유사하게 가공 초기의 낮은 배분력이 재료에 가해지는 동안에는 가공 깊이 또한 완만하게 증가하는 모습을 보이고 있으며, 절삭력이 급격히 감소하였다 증가하는 거동을 보이는 연성 가공 한계지점에서 가공 깊이가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 설명하였던 것처럼, 취성 파괴가 발생하면서 순간적으로 재료가 탈락함에 따라 가공 깊이가 증가하는 것으로 판단된다. 결정방향에 따른 가공 깊이 변화를 정량적으로 분석한 결과는 다음과 같다.

(001) 결정면의 단결정 실리콘에 대해서 [110]의 결정방향으로 가공을 실시하였을 때의 가공깊이는 약 660nm 부근에서 취성 파괴에 의한 급격한 증가 거동이 최초로 확인되었으며, 최종적으로 약 1500nm의 깊이로 가공이 완료되었다. 동일한 결정면에서 [100]의 결정방향으로 가공을 실시하였을 때는 약 640nm 전후에서 최초의 취성 파괴 발생 거동이 확인되었으며, 최종 가공 깊이는 약 1400nm의 깊이로 가공되었다. (111)의 결정면에 대해서 [110]의 결정방향으로 가공을 실시하였을 때 최초의 취성 파괴 발생 거동이 확인되는 지점은 약 550nm 전후이며, 약 1300nm 깊이에서 최종적으로 가공이 완료되었다. 정량적 분석 결과 가공 시 결정방향에 따른 절삭력의 변화와 유사하게 가공깊이 또한 결정방향에 따라 차이가 발생하는 것이 확인되었다. 따라서, 단결정 실리콘을 가공하게 될 경우 결정방향을 고려하여 가공 조건을 설정하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

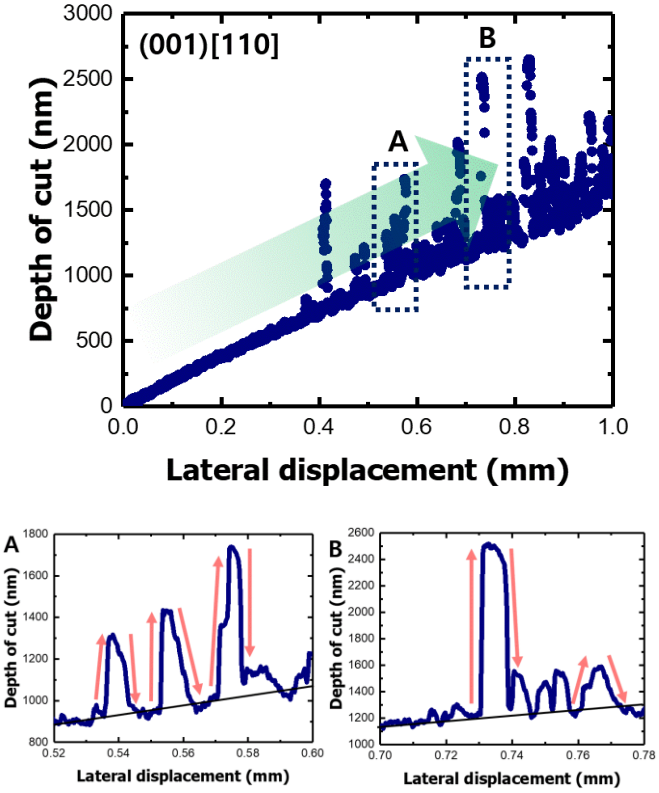

그림 4-5. (001)[110] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 가공 깊이 변화 그래프

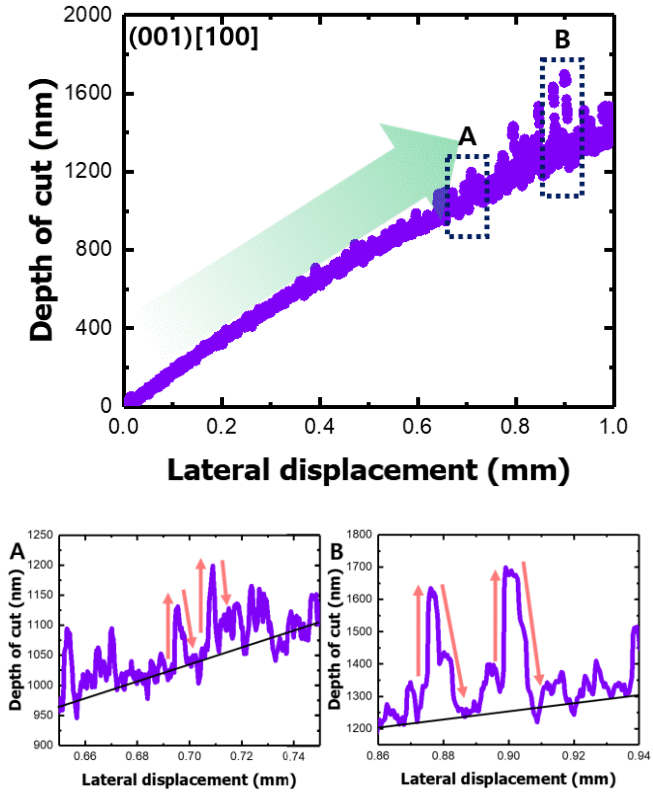

그림 4-6. (001)[100] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 가공 깊이 변화 그래프

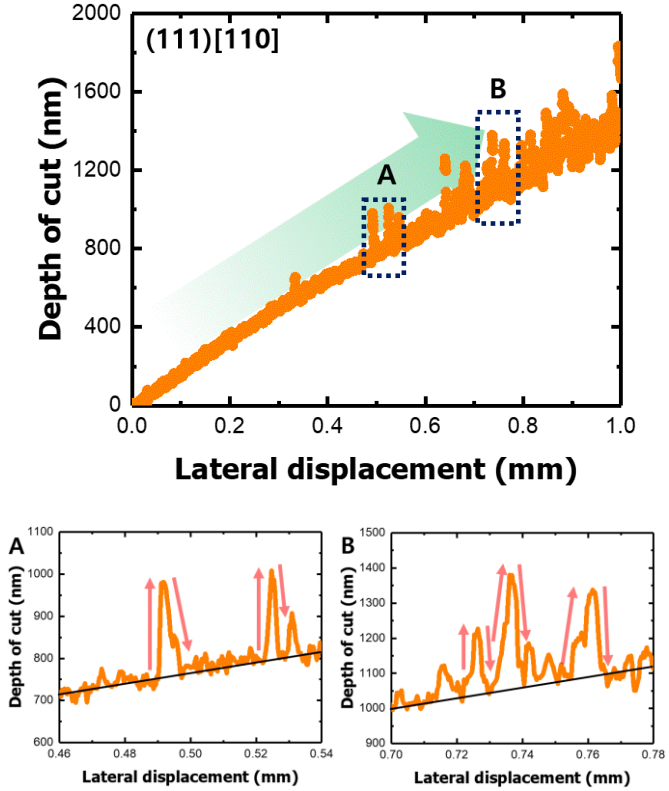

그림 4-7. (111)[110] 결정방향으로 가공한 가공 길이에 대한 가공 깊이 변화 그래프

4.1.3 SEM을 이용한 연성 가공 한계 지점 검증

앞서 절삭력과 가공 깊이의 정량적 분석을 통해 결정한 연성 가공 한계 지점에 대해서 해당 지점이 실제로 취성 파괴가 발생한 지점인지 확인하기 위하여 주사전자 현미경(SEM)으로 가공된 패턴의 표면을 관찰하여 정량적 분석 결과와 비교 분석한 것을 그림 4-8 ~ 4-10에 나타내었다. 그림 4-8 ~ 4-10과 같이 절삭력과 가공 깊이의 급격한 변화 거동이 보이는 정량적 분석으로 결정한 최초 파괴 지점과 SEM 관찰을 통해 확인한 패턴 표면의 최초 파괴 지점이 일치하는 것이 확인되었다. 이를 통해 기존의 연구들의 연성가공 한계지점 결정 방식인 SEM 관찰을 통한 정성적 분석에서 나아가 절삭력과 가공 깊이의 정량적 분석을 통한 연성 가공 한계 지점 결정이 가능함을 확인하였으며, 이를 통해 기계 가공 산업에서 본 연구의 정량적 분석 방법을 바탕으로 취성 재료의 연성 가공 한계 지점을 정의하여 재료의 가공이 가능할 것으로 사료된다.

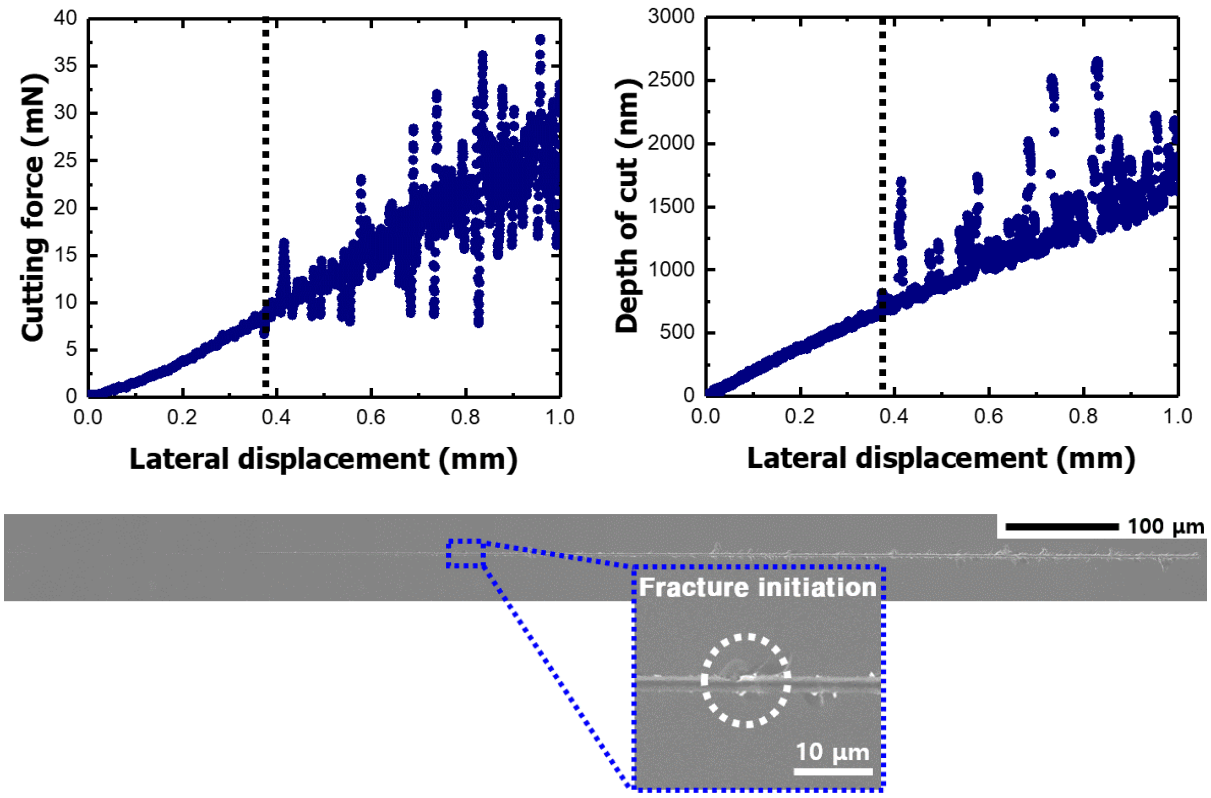

그림 4-8. SEM을 이용한 (001)[110] 결정방향의 연성가공 한계지점 검증

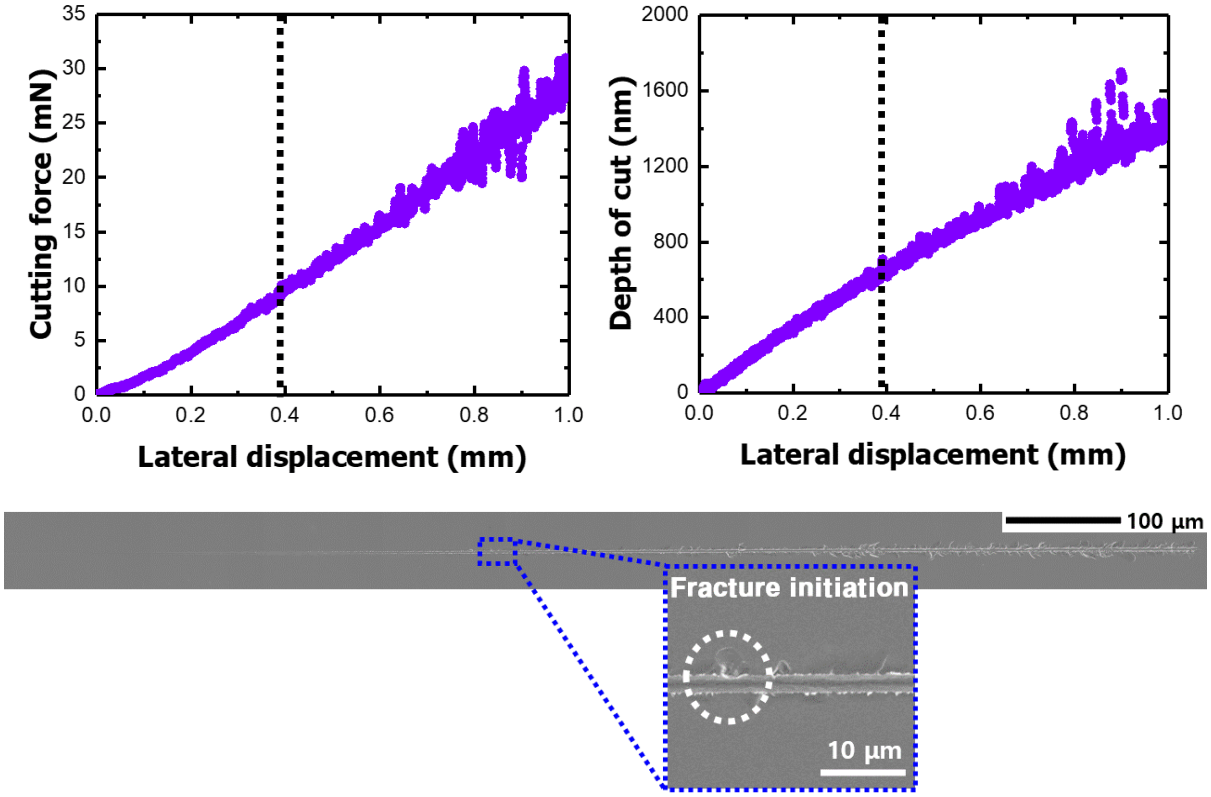

그림 4-9. SEM을 이용한 (001)[100] 결정방향의 연성가공 한계지점 검증

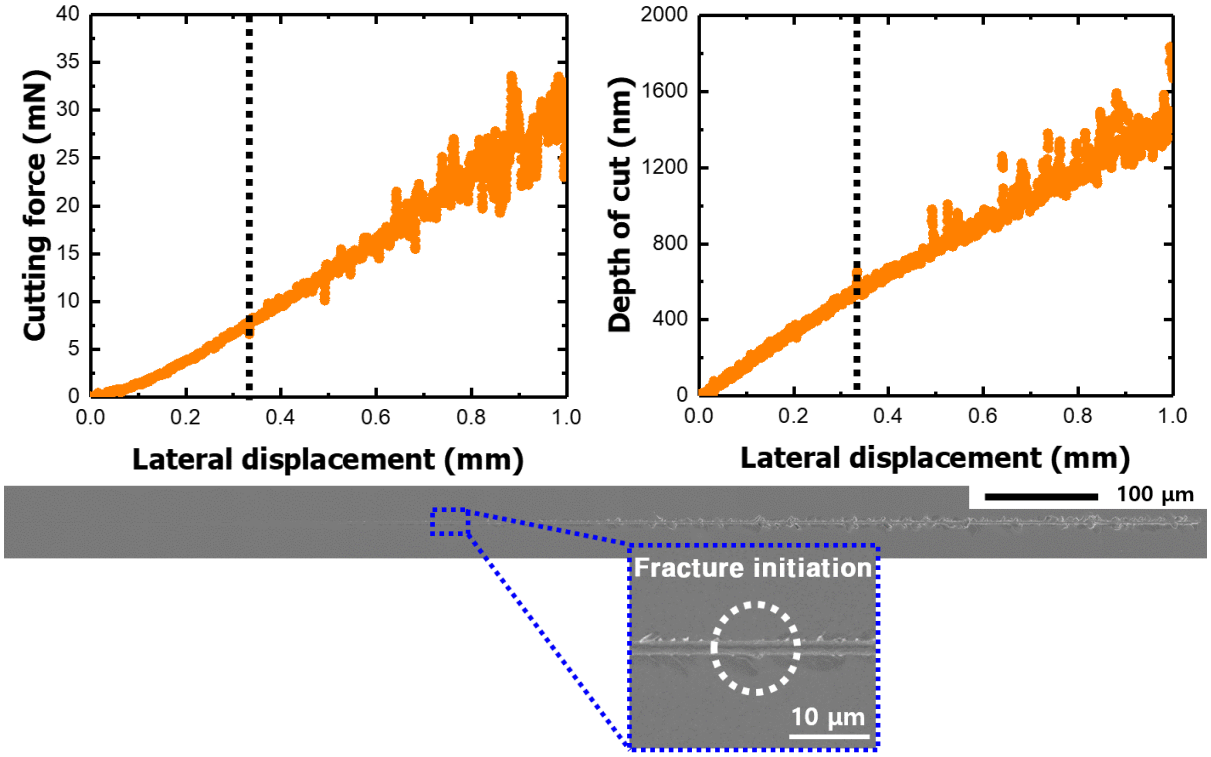

그림 4-10. SEM을 이용한 (111)[110] 결정방향의 연성가공 한계지점 검증

4.2 AFM을 이용한 패턴 단면 검증

4.2.1 가공 모드에 따른 가공 특성 일치 여부 검증

본 연구에서는 가공에 사용하는 공구로 90도의 단면 형상을 가지는 원뿔형 다이아몬드 공구를 활용하였다. 따라서, 나노스케일에서 정상적으로 가공이 이루어졌다면, 공구 단면의 형상인 V형의 단면이 생성되어야 한다. 또한, 본 연구에서 정량적 분석을 통해 정의한 연성 가공 한계 지점에 대해서 연성 가공 한계 이하의 배분력이 재료에 가해졌을 때 취성 파괴가 발생하지 않아야 한다. 그러나 SEM을 통한 패턴 표면 관찰로는 패턴 내부의 파괴 발생 여부 검증이 불가능하다. 이에 본 연구에서는 결정방향 별로 최초 취성 파괴가 발생하기 시작하는 배분력에 가까운 20mN의 하중을 기준으로 연성 영역의 배분력인 10mN과 취성 파괴가 발생하는 30mN의 하중을 선정하여, 나노스크래치 테스터의 'Constant mode'를 활용해 10, 20, 30mN의 배분력을 단결정 실리콘에 가해주어 가공을 실시한 후 패턴의 단면을 관찰하고자 하였다.

패턴의 단면을 관찰하기 전에 나노스크래치 테스터의 'Progressive mode'를 통해 배분력을 선형적으로 증가시키며 가공을 실시하였을 때의 절삭력 및 가공 깊이 변화와 'Constant mode'를 이용하여 배분력을 일정하게 유지시켰을 때의 절삭력 및 가공 깊이 변화의 일치여부에 대한 검증이 필요했다. 만약 'Constant mode'의 환경에서 재료를 가공할 때와 'Progressive mode'에서의 결과가 다르다면, 가공 후 생성되는 패턴 단면이 다르게 나타나기 때문이다. 이에 'Progressive mode'에서 가공을 실시하였을 때의 절삭력 및 가공 깊이 변화를 'Constant mode'에서 가공을 실시하였을 때와 비교해보았다. 결정방향 별로 배분력에 따른 재료에 가해진 절삭력 및 가공된 깊이는 표 4-1에 작성하였으며, 그림 4-11에 이를 그래프로 나타내었다. 그림 4-11과 같이 모든 결정방향에서 동일한 배분력이 가해질 때 가공 모드가 달라도 재료에 가해지는 절삭력이 유사하고, 가공

깊이 또한 비슷한 수준으로 가공되었다. 따라서, 'Constant mode'를 통해 가공한 패턴의 단면을 분석하는 것으로도 'Progressive mode'를 통해 가공하였을 때의 패턴 단면을 분석하는 것과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

표 4-1. 결정방향별 'Constant mode'의 배분력에 따른 절삭력 및 가공 깊이

		(001)[110]		(001)[100]		(111)[110]	
		절삭력 (mN)	가공깊이 (nm)	절삭력 (mN)	가공깊이 (nm)	절삭력 (mN)	가공깊이 (nm)
배분력 (mN)	10	3.48	337.63	3.63	341.11	3.55	357.53
	20	9.16	715.65	9.49	649.92	9.57	677.33
	30	15.35	1074.56	15.79	908.62	16.11	1010.70

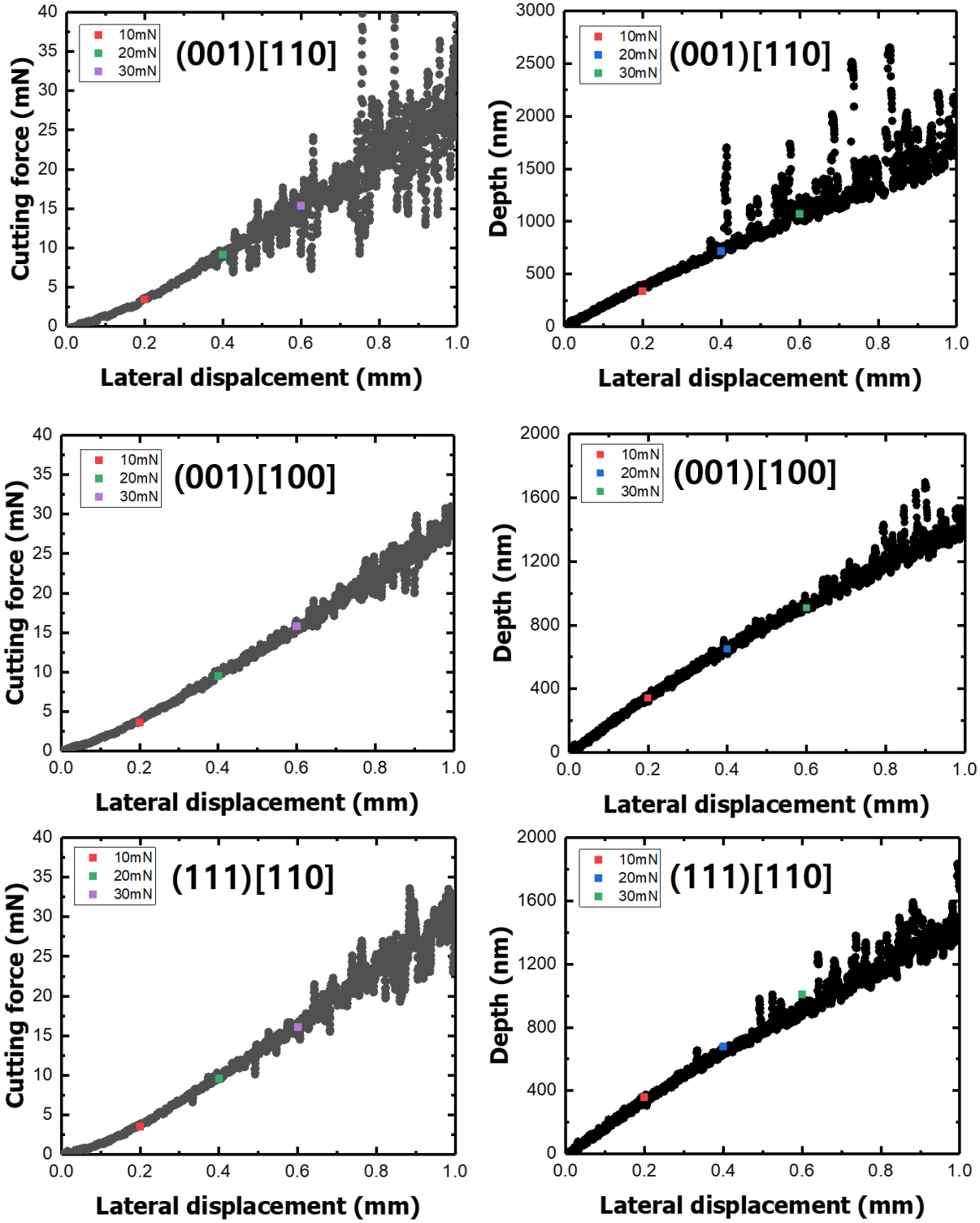

그림 4-11. 결정방향 별 'Constant mode'의 'Progressive mode'의 배분력에 따른 절삭력 및 가공 깊이 비교

4.2.2 AFM 패턴 단면 분석

본 연구에서는 Park Systems 社의 XE-100을 이용하여 관찰한 패턴 단면의 형상을 그림 4-12 ~ 4-14에 나타내고, 탄성 회복이 일어나기 전 가공 깊이인 나노스크래치테스터의 'Constant mode'로 측정한 가공 깊이와 탄성 회복이 일어난 후의 가공 깊이인 AFM으로 측정한 결과를 비교한 표를 표 4-2 ~ 4-4에 도시하였다.

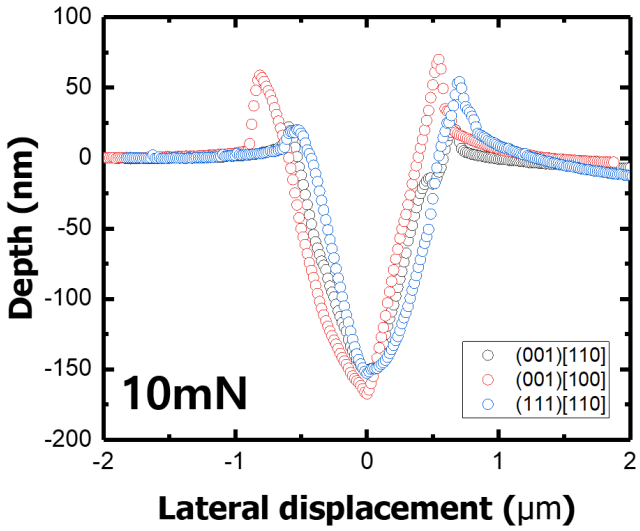

그림 4-12. 10mN 배분력으로 가공한 패턴 단면의 AFM 분석 결과

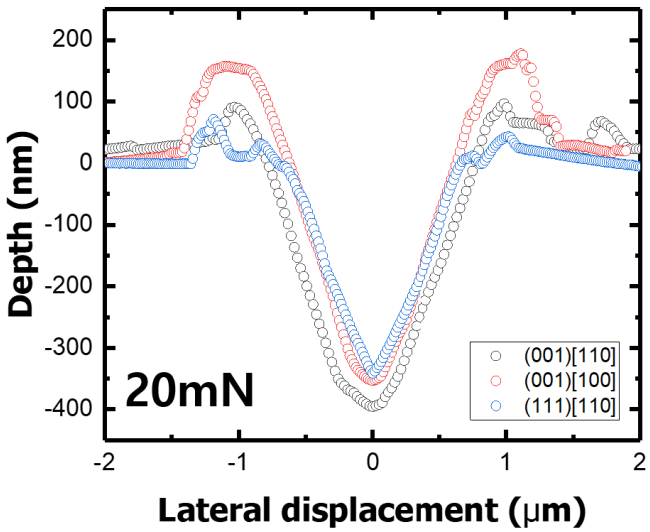

그림 4-13. 20mN 배분력으로 가공한 패턴 단면의 AFM 분석 결과

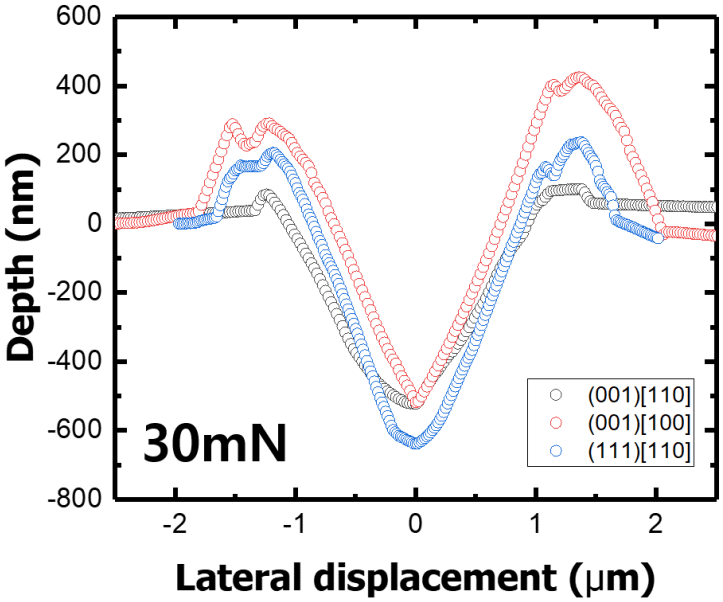

그림 4-14. 30mN 배분력으로 가공한 패턴 단면의 AFM 분석 결과

표 4-2. 10mN 배분력에 대한 결정방향 별 가공 깊이 및 탄성률

배분력 (10mN)	탄성 회복 전 Depth (nm)	탄성 회복 후 Depth (nm)	탄성률 (%)
(001)[110]	337.63	151.51	55
(001)[100]	341.11	167.48	51
(111)[110]	357.53	152.95	57

표 4-3. 20mN 배분력에 대한 결정방향 별 가공 깊이 및 탄성률

배분력 (20mN)	탄성 회복 전 Depth (nm)	탄성 회복 후 Depth (nm)	탄성률 (%)
(001)[110]	715.65	395.51	45
(001)[100]	649.92	353.39	46
(111)[110]	677.33	341.47	50

표 4-4. 30mN 배분력에 대한 결정방향 별 가공 깊이 및 탄성률

배분력 (30mN)	탄성 회복 전 Depth (nm)	탄성 회복 후 Depth (nm)	탄성률 (%)
(001)[110]	1074.56	523.19	51
(001)[100]	908.62	517.87	43
(111)[110]	1010.70	638.84	37

AFM으로 측정한 패턴 단면의 형상을 보면 실험을 진행한 모든 결정방향에 대해서 배분력과 무관하게 패턴 내부에 V형의 단면이 생성된 것을 확인할 수 있으며, 연성가공 한계 지점 이전의 배분력에서 가공된 패턴 내부에 취성 파괴가 관찰되지 않았다. 또한 20~30mN의 연성 가공과 취성 파괴 현상이 공존하는 영역에서도, 표면이 연성가공된 것으로 보이는 영역에 대하여 AFM으로 단면을 관찰하였을 때, 내부에서 취성 파괴가 발생하지 않은 것이 확인되었다. 이를 통해서, 쉽게 파괴가 발생하는 취성 재료에 대하여 나노스케일에서 V형과 같은 복잡한 형태의 가공이 가능함을 확인하였다. 표 4-2 ~ 4-4의 결과를 보면 AFM을 이용해 측정한 가공 후 탄성회복이 완료된 패턴의 깊이는 결정방향과 무관하게 비슷한 수준의 깊이가 측정되었지만, 재료에 가해준 배분력이 증가함에 따라 가공 깊이가 깊어지면서 재료의 탄성률이 낮아지는 것을 알 수 있다. 배분력이 30mN일 때의 결과는 다른 두 배분력의 결과와 비교하였을 때 탄성률의 비율이 다르게 나타나는 데 이는 취성파괴로 인해 재료의 탈락이 발생하여 차이가 발생한 것으로 보인다.

4.3 연성가공 한계지점의 물리적 의미 분석

본 연구에서는 연성가공 한계 지점이 가지는 물리적 의미를 설명하기 위해서 기계 가공 분야의 '비절삭저항'이라는 개념을 이용하였다. 비절삭저항은 가공 시 공구에 가해지는 소재의 저항을 의미하며, 마이크로스케일에서는 크기 효과가 발생하여 가공 깊이가 깊어질수록 비절삭저항이 작아지는 사실이 알려져 있다[41]. 비절삭저항은 단위 부피 당 절삭에 필요한 에너지로 설명되며 이는 재료 제거에 필요한 단위 면적 당 응력으로 표현할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

비절삭저항(K_s) = 수평 응력 (수평 하중(=절삭력) / 수평 면적)

따라서, 수평 방향으로 재료가 가공되는 본 연구에서 비절삭저항을 계산하기 위해 가공 깊이를 바탕으로 수평 면적을 계산하여야 한다.

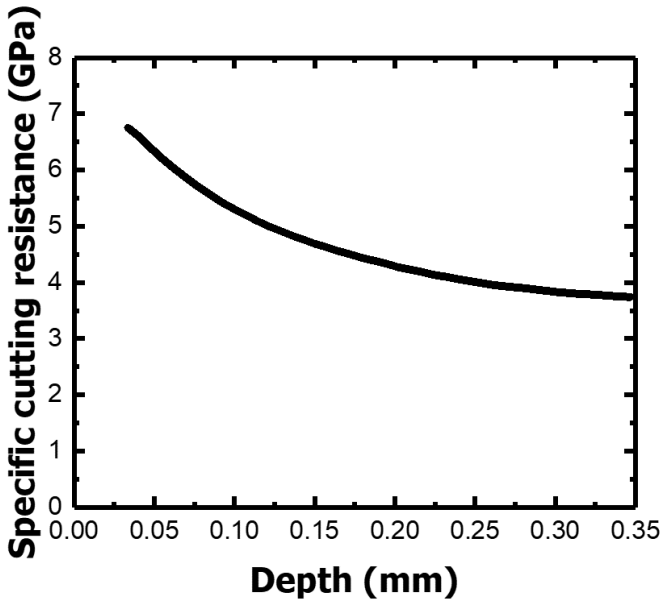

그림 4-15. 마이크로스케일에서의 비절삭저항 크기 효과 [41]

4.3.1 가공 공구의 가공 깊이에 따른 면적 정의

가공 공구의 끝부분에는 가공 기술의 한계로 인하여 끝부분에 무딘 부분(Tip blunting)이 존재할 수 밖에 없지만 일반적인 가공 환경과 같은 경우에서는 무딘 부분에 의한 영향이 무시할 수 있을 만큼 그 영향력이 크지 않다. 그러나, 본 연구와 같이 나노스케일에서 가공이 이루어질 경우, 무딘 부분의 형상을 정확하게 정의하지 않으면 가공 면적이 잘못 계산될 수 있으며, 이는 비절삭저항의 계산 결과에 큰 오차를 발생시키게 된다. 따라서, 본 연구에서는 가공 공구의 끝부분을 SEM으로 관찰하여 가공 공구의 끝부분에 존재하는 무딘 부분의 정확한 형상을 측정하여 그림 4-16에 나타내었다.

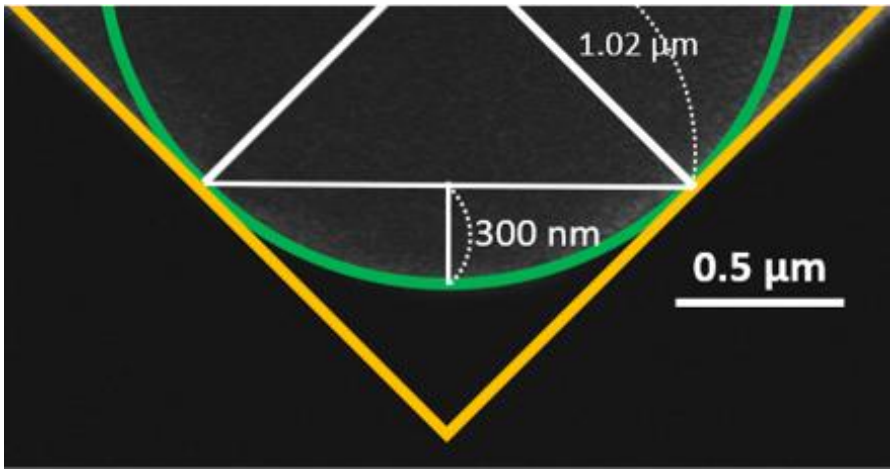

그림 4-16. 가공 공구의 Tip blunting 영역 측정

가공 공구의 끝부분을 SEM으로 관찰한 결과, 공구의 무딘 부분은 반지름이 1.02µm인 구의 형상에 근사한 것을 알 수 있었고, 이러한 무딘 영역에 해당하는 최대 가공 깊이는 약 300 nm인것으로 측정되었다. 이러한 측정 결과를 바탕으로, Tip blunting 영역 안과 밖의 가공 면적을 정의하는 것을 그림 4-17에 나타내었다. 최대 가공 깊이인 300nm 이하의 가공 깊이에서는 그림 4-17의 왼쪽 사진과 같이 가공 면적을 초록색으로 표시된 원

의 일부분으로 계산하였고, 300nm를 넘어선 경우는 300nm 이하에서 계산된 원의 일부분의 면적에 더하여 노란색 선으로 표시된 사다리꼴 형상을 더하여 가공 면적을 계산해 주었다. 최대 가공 깊이 이하의 가공 면적은 그림 4-18을 바탕으로 계산식을 유도하였다.

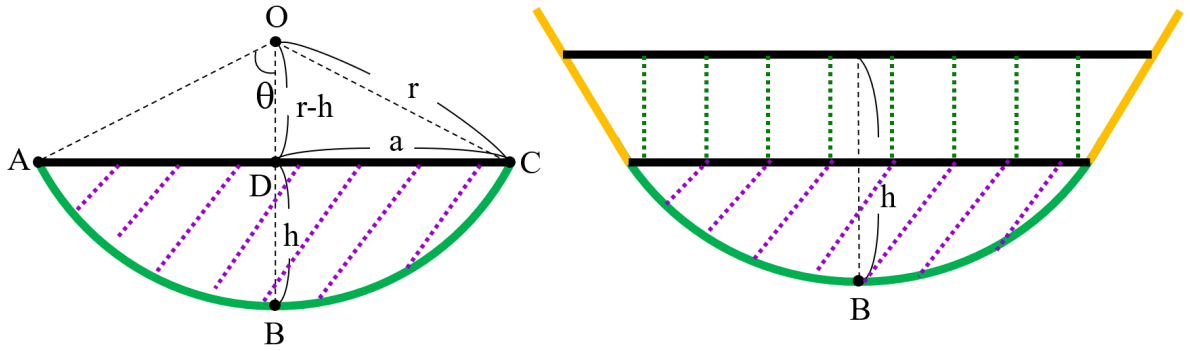

그림 4-17. Tip blunting 영역 안 / 밖 (좌/우) 가공 면적 정의

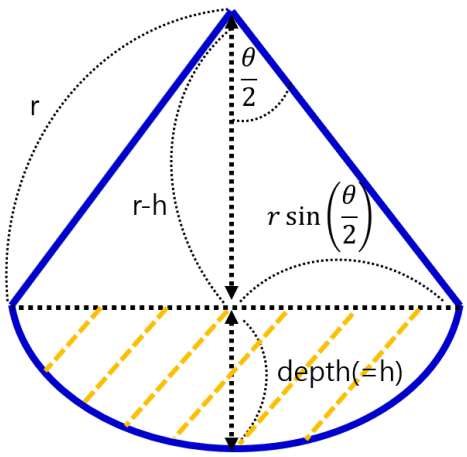

그림 4-18. 가공 공구의 Tip blunting 영역의 면적 계산을 위한 도식

최대 가공 깊이 이하의 가공 면적 = 부채꼴 넓이 – 삼각형 넓이

부채꼴 넓이 ➔ $\frac{1}{2}rl$ ($l = r\theta$) = $\frac{1}{2}r^2\theta$ ($2\,cos^{-1}\left(\frac{r-h}{r}\right) = \theta$) Eq. (1)

삼각형 넓이 ➔ $(r-h) \times r\,sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ ($\sin(cos^{-1}x) = \sqrt{(1-x^2)}$) Eq. (2)

$$\frac{1}{2}r^2 \times 2\,cos^{-1}\left(\frac{r-h}{r}\right) - \{r\,sin\left(\frac{2\,cos^{-1}\left(\frac{r-h}{r}\right)}{2}\right) \times (r-h)\}$$

$$= r^2\,cos^{-1}\left(\frac{r-h}{r}\right) - \{r\,sin\,(cos^{-1}\left(\frac{r-h}{r}\right)) \times (r-h)\}$$

$$= r^2\,cos^{-1}\left(\frac{r-h}{r}\right) - \{r\sqrt{1-\left(\frac{r-h}{r}\right)^2} \times (r-h)\}$$

$$= r^2\,cos^{-1}\left(\frac{r-h}{r}\right) - \{(\sqrt{r^2-(r-h)^2}) \times (r-h)\}$$

$$= r^2\,cos^{-1}\left(\frac{r-h}{r}\right) - \{(2r\mathrm{h} - h^2)^{\frac{1}{2}} \times (r-h)\} \quad \text{Eq. (3)}$$

4.3.2 결정방향 별 비절삭저항 분석

SEM을 통해 정의한 가공 면적을 바탕으로 계산한 비절삭저항을 그림 4-19 ~ 4-21에 나타내었다. 본 연구에서 나노스크래치 테스터를 통해 얻은 가공 깊이는 결정방향에 따라 평균 1300nm에서 1500nm 수준까지 가공된 것이 확인되었으나 비절삭저항의 계산을 통해 얻은 그래프는 600nm 까지만 표시하였는데, 그래프의 가공 깊이를 600nm 까지만 나타낸 이유는 결정방향에 따라 약간의 차이는 존재하지만 평균 600~700nm 수준에서 최초 파괴가 발생하고 파괴가 발생하면 순간적으로 재료의 절삭력과 가공 깊이가 급격히 변화하므로 해당 지점에 대한 비절삭저항의 정확한 계산이 불가능하기 때문이다. 비절삭저항 계산 결과, 실험을 진행한 모든 결정방향에서 가공 깊이가 깊어질수록 비절삭저항이 감소하는 크기 효과가 나타나는 것을 알 수 있었고 이를 통해 비절삭저항은 마이크로스케일 뿐만 아니라 나노스케일에서도 크기 효과가 발생하는 것이 확인되었다. 이에 결정방향이 비절삭저항의 계산 결과에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 각 결정방향 별 비절삭저항 계산 결과를 하나의 그래프로 그림 4-22에 나타내었다.

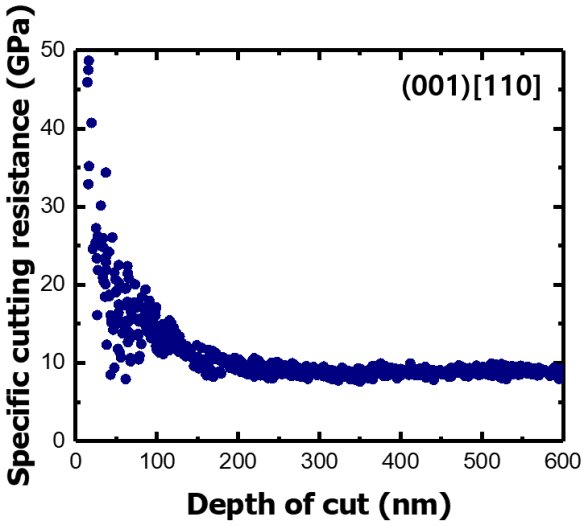

그림 4-19. (001)[110] 결정방향의 가공 깊이에 대한 비절삭저항

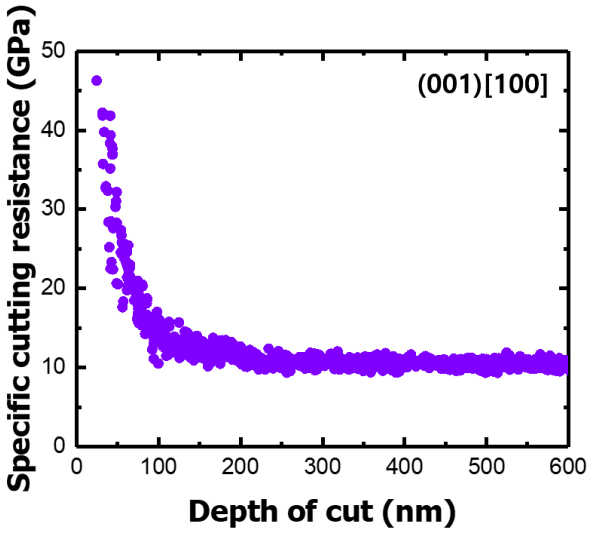

그림 4-20. (001)[100] 결정방향의 가공 깊이에 대한 비절삭저항

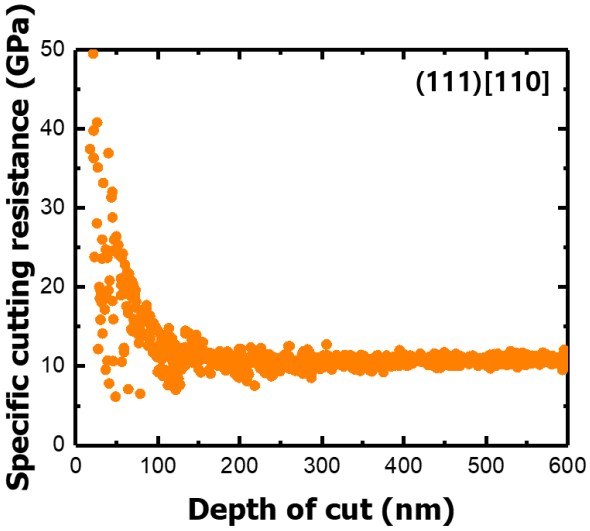

그림 4-21. (111)[110] 결정방향의 가공 깊이에 대한 비절삭저항

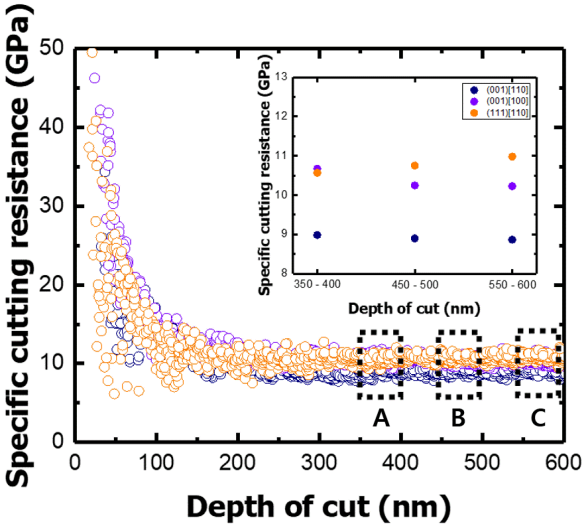

그림 4-22. 결정방향에 따른 비절삭저항 차이

그림 4-22을 보면 비절삭저항이 결정방향에 따라 약간의 차이가 나타나는데 결정방향이 비절삭저항에 미친 영향을 명확하게 확인하고자, 연성가공 한계 이전의 세 영역을 선정하여 결정방향 별 비절삭저항을 확인하였다. 그 결과, 350-400nm에서 (001)[100]과 (111)[110]의 비절삭저항 결과가 나머지 두 영역의 결과와 다르게 나타났지만, 전체적인 경향은 (001)면에 [110]의 결정방향으로 가공한 것이 약 9GPa로 가장 낮은 비절삭저항을 보이며 (001)[100]은 약 10.4GPa, (111)[110]은 약 10.8GPa의 결과를 보이며, (001)면에서 [110] 결정방향으로 가공하였을 때의 비절삭저항을 기준으로 그림 4-20 의 A,B,C 영역에서의 결정면 및 결정방향에 따른 비절삭저항 비율은 계산한 결과, A 영역에서 (001)[100]은 119%의 비율을 보이고 (111)[110]의 비절삭저항은 (001)[110] 대비 118%의 비율을 보인다. B 영역과 C 영역에서는 (001)[110] 대비 (001)[100]은 115% 비율을 보이며, (111)[110]은 (001)[110] 대비 각각 121%와 124%의 차이를 보이는 것이 확인되었다.

결정방향에 따라 비절삭저항의 크기가 다르게 나타나는 현상에 대하여 기존의 실리콘 결정방향에 따른 물성 차이에 관한 연구 결과와 연결 지어 확인해보았다. Ando. T. et al.

의 연구에서 (001) 결정면의 단결정 실리콘에 대해 <100>과 <110>의 결정방향으로 하중을 인가하였을 때 <100> 결정방향의 파괴강도는 5.36 ± 1.26GPa 로 확인되었으며, <110> 결정방향의 파괴강도는 4.82 ± 0.91GPa를 가진다는 연구 결과를 확인하였다[22]. 이 연구 결과를 본 연구의 결과와 같이 (001)면에서 [110] 결정방향으로 가공한 것을 기준으로 파괴 강도 비율을 계산한 결과, 약 111%의 차이를 보이는 것이 확인되었다. 다음으로 Brantley, W. A.의 연구결과를 보면 (111) 결정면과 (001)의 결정면에서 [110] 결정방향으로 가공할 때의 탄성계수 비율을 나타내고 있는데, (111) 결정면의 탄성계수는 2.290×10^{12} dyn/cm^2 이며, (001) 결정면의 탄성계수는 1.805×10^{12} dyn/cm^2 를 가진다는 결과를 보이고 있다[23]. 이 결과를 (001)면에서 [110] 결정방향으로 가공하였을 때를 기준으로 탄성 계수 비율을 계산한 결과, 약 127%의 차이를 보이는 것을 확인하였다.

두 연구결과를 바탕으로 계산한 결정방향 별 파괴 강도와 탄성계수의 비율을 본 연구의 비절삭저항 비율과 비교해보면, (001)의 동일한 결정면에서 [100]과 [110]의 서로 다른 결정방향으로 가공을 실시하였을 때, (001)[110]을 기준으로 비절삭저항과 파괴 강도의 비율은 각각 115%와 111%의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 또한, (001)과 (111)의 서로 다른 결정면에서 [110]의 동일한 결정방향으로 가공하였을 때 (001)[110]을 기준으로 비절삭저항과 탄성 계수의 비율은 각각 124%와 127%의 차이를 보이는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 결정방향에 따라 재료의 물성인 파괴 강도 및 탄성 계수 비율이 차이가 존재하며 이 때의 비율은 결정방향에 따른 비절삭저항의 비율 차이와 유사한 것을 알 수 있었고, 이에 결정방향에 따른 재료의 물성 차이가 가공에 영향을 미칠 것이라는 결론을 도출해 낼 수 있었다.

4.3.3 비절삭저항의 수렴 원인 분석

앞 절에서 나노스케일의 비절삭저항이 마이크로스케일과 같이 가공 깊이가 깊어질수록 비절삭저항이 감소하는 크기 효과가 나타나는 것을 확인하였다. 그러나, 마이크로스케일의 비절삭저항과 나노스케일의 비절삭저항은 차이점이 존재하는데, 마이크로스케일의 비절삭저항은 가공 깊이가 깊어짐에 따라 비절삭저항이 지속적으로 감소하지만, 나노스케일에서의 비절삭저항은 그림 4-19 ~ 4-21와 같이 최초 취성 파괴가 발생하는 연성가공 한계지점 이전에서 비절삭저항이 수렴하는 현상이 발생하였다. 비절삭저항이 크기 효과가 발생하는 것은 가공 깊이에 따라 비절삭저항이 변화하기 때문인데, 이러한 현상은 가공 깊이가 감소함에 따라 전체 가공에 쓰인 힘 중 경작력의 비중이 증가하기 때문이다 [41]. 이는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$K_S = \frac{F}{A_C}\ ,\ F = F_C + F_P \qquad \text{Eq. (4)}$$

$$F_C = nA_C\ , F_P = ml \qquad \text{Eq. (5)}$$

K_S = 비절삭저항 , F_C = 절삭력 , F_P = 경작력 , A_C = 가공 면적

l = 공구와 재료가 접하는 길이 , m, n = 비례 상수

Eq. (5)의 식에서 절삭력은 가공 면적에 비례하고, 경작력은 공구와 재료가 접하는 길이에 비례한다고 하였는데, 이는 앞선 내용인 4.3.1절의 그림 4-17를 통해 설명할 수 있다. 그림 4-17은 가공이 이루어질 때 단면의 모습을 표현한 것으로, 가공 깊이가 깊어지면 재료에 가해지는 절삭력이 증가하며, 가공 깊이가 깊어짐에 따라 점선으로 표시한 영역인 공구가 재료를 제거하는 수평 면적이 증가한다. 이 때의 수평 면적은 가공 면적과 동일한 의미이다. 따라서 절삭력이 가공 면적과 비례한다고 설명할 수 있다. 경작력이 공구와 재료가 접하는 길이에 비례하는 이유는 경작력의 정의와 관련 있다. 경작력은 재료를 가공할 때 가공에 쓰이는 힘 외에 공구가 재료에 끌리면서 가해주는 힘을 의미하는데,

이는 가공 시 단면을 보았을 때 그림 4-17에서 부채꼴의 호에 해당하는 실선 부분이며, 실선 부분은 공구와 재료가 접하는 길이에 해당한다. 위의 수식을 바탕으로 하여 비절삭저항을 공구와 재료가 접하는 길이와 면적 간의 비율에 관련된 식을 유도하면 다음과 같은 수식을 도출할 수 있다.

$$K_S = \frac{F}{A_C} = \frac{F_C+F_P}{A_C} = m\frac{l}{A_C} + n \qquad \text{Eq. (6)}$$

이 수식을 통해 $\frac{l}{A_C}$가 비절삭저항과 선형적인 관계를 가지는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 이러한 수식과 비절삭저항 간의 상관관계를 통해 비절삭저항의 수렴현상이 발생하는 것에 대해 규명할 수 있을 것으로 예상하고 분석을 진행하였다.

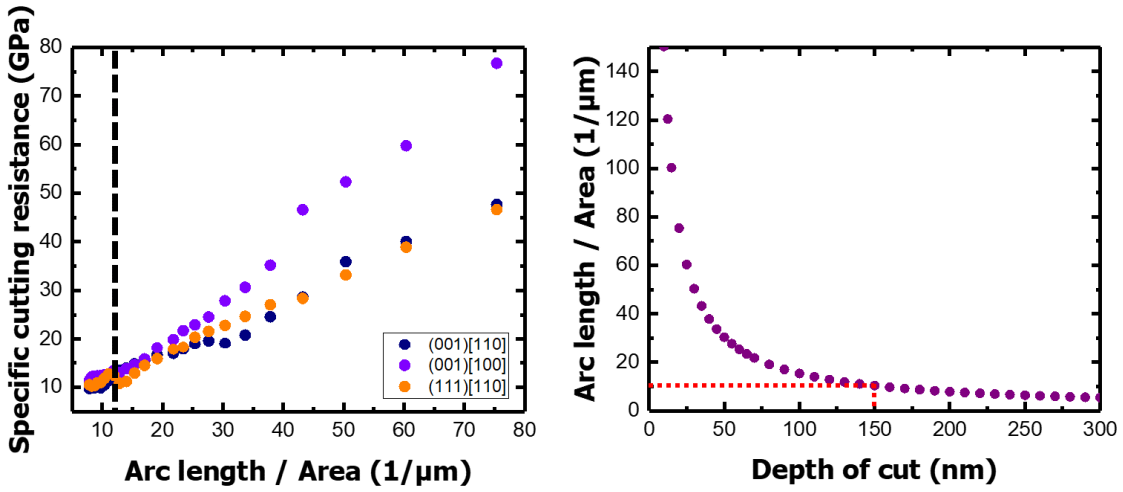

그림 4-23. 가공 깊이에 따른 공구와 재료 간 길이/면적 및 비절삭저항 변화

앞서 비절삭저항과 절삭력 및 경작력에 대한 식을 바탕으로 유도한 Eq. (6)에서 공구와 재료가 맞닿는 길이/면적의 비율 (l/A)가 비절삭저항과 선형적인 관계를 가질 것으로 예상하였는데, 실제 실험 결과를 바탕으로 l/A와 비절삭저항 간 상관관계를 그린 그림 4-23을 보면 실험을 진행한 모든 결정방향에 대하여 l/A가 감소함에 따라 비절삭저항이 선

형적으로 감소하는 모습을 보였다. 이에 l/A와 비절삭저항 간 상관관계를 Pearson's r을 이용하여 실험결과가 얼마나 선형적인 관계를 가지는 지 계산한 결과, 세 결정방향 모두 약 0.99의 Pearson's r을 나타내는 것이 확인되었다. Pearson's r은 1에 가까울수록 선형적인 관계를 가지는 것을 의미하는 데 약 0.99의 결과를 보이고 있으므로, l/A와 비절삭저항은 서로 선형적인 상관관계를 가진다고 얘기할 수 있다. 그러나 l/A에 대한 비절삭저항의 변화 그래프에서 l/A가 12.5μm^{-1} 이하 일 때, 비절삭저항이 선형적인 관계를 벗어나 일정한 값으로 수렴하는 모습이 보인다. 이러한 수렴 현상이 발생하는 지점의 가공 깊이를 확인한 결과, 약 150 nm의 가공 깊이에서 비절삭저항이 선형적인 관계를 벗어나는 것으로 확인되었다. 이 때, 비절삭저항이 선형적인 관계를 벗어나는 지점의 가공 깊이인 150nm는 비절삭저항의 크기 효과가 수렴하는 지점과 일치하는 지점이다. 이러한 l/A와 비절삭저항의 관계 및 가공 깊이와 l/A의 관계에 대해 연속적으로 생각하면 공구와 재료가 맞닿는 길이를 면적으로 나눠준 l/A가 감소할 때 비절삭저항도 선형적으로 감소하며, l/A가 12.5 μm^{-1}인 지점에서 비절삭저항이 선형적인 관계를 벗어나 일정하게 수렴하며 이 때의 가공 깊이는 150nm로 비절삭저항이 크기 효과를 보이다가 수렴하는 지점과 일치한다. 따라서, l/A가 12.5 μm^{-1}인 지점에서 비절삭저항의 크기 효과가 수렴할 것이라는 결론을 도출해낼 수 있었다.

4.3.4 연성가공 한계지점 발생 원인 분석

K. Liu et al.의 연구에서 수직 응력과 수평 응력 간의 비율이 변화하는 것에 따라 파괴 현상이 발생하며, 이러한 현상이 발생하는 것은 수직 응력을 수평 응력으로 나눠준 수직 응력과 수평 응력 간 비율이 증가하는데 이는 수직 응력이 증가를 의미함에 따라 재료에 변형 지점에 가해지는 압축 응력이 커지고 그로 인해, 균열의 전파가 억제되어 재료의 파괴 현상이 발생하는 것이 억제된다는 결론을 보였다. 이 때, 수직 응력과 수평 응력 간 비율은 수평 하중과 수직 하중의 함수를 통해 다음과 같은 수식으로 표현하였다[27].

$$\frac{\sigma_S}{\tau_S} = \frac{1+(F_l/F_n)\tan\gamma}{F_l/F_n-\tan\gamma} \qquad \text{Eq. (7)}$$

수식에서 F_l은 수평 하중을 의미하며, F_n은 수직 하중 γ는 공구의 경사각을 의미한다.

본 연구에서는 K. Liu et al.이 제안한 수식을 이용하면 연성가공 한계지점의 발생 원인을 규명할 수 있을 것이라고 판단하고, 3.1절의 실험 방법을 통해 얻은 결과에 적용해보았다. 본 연구의 배분력은 위의 수식에서 수직 하중에 해당하며, 절삭력은 수평 하중에 해당한다. 90도의 원뿔형 공구를 사용한 본 연구에서 공구의 경사각은 -45°의 각도를 가진다.

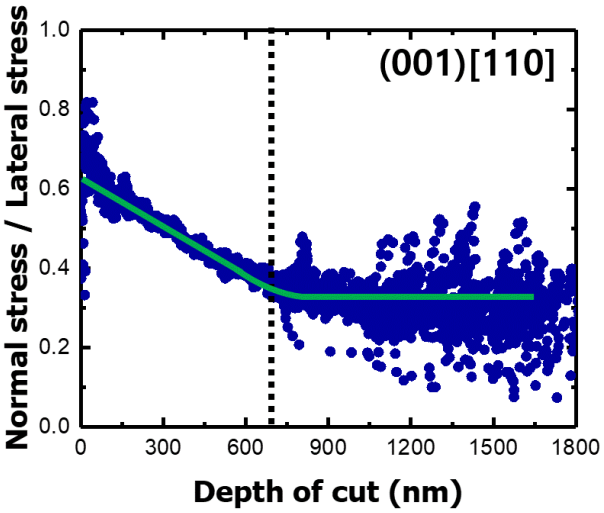

그림 4-24. (001)[110]의 가공 깊이에 따른 수직 응력/수평 응력 비율 변화

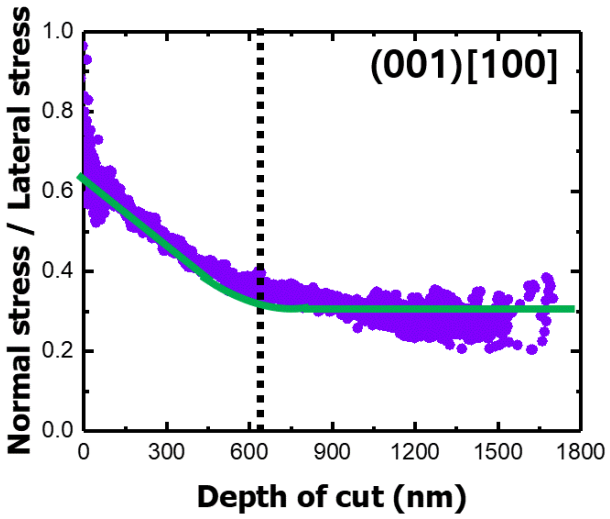

그림 4-25. (001)[100]의 가공 깊이에 따른 수직 응력/수평 응력 비율 변화

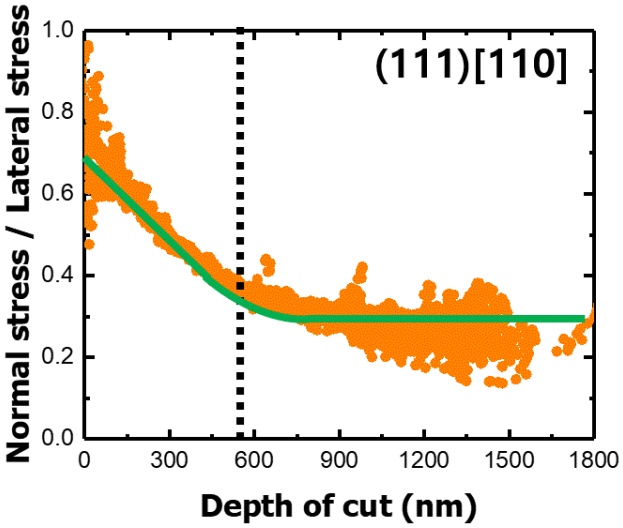

그림 4-26. (111)[110]의 가공 깊이에 따른 수직 응력/수평 응력 비율 변화

그림 4-24 ~ 4-26를 보면 가공 깊이가 깊어짐에 따라, 수직 응력 변화 대비 수평 응력의 변화가 크게 나타나면서, 수직 응력/수평 응력의 값이 작아지는 것이 확인된다. 이후 결정방향에 따라 (001)[110]의 경우 약 683nm의 가공깊이 이후부터 수직 응력/수평 응력의 비율이 일정하게 수렴하는 현상이 보이며, (001)[100]의 경우는 약 643nm의 가공깊이일 때, (111)[110]의 경우는 약 549nm일 때까지 응력비가 감소하다가 수렴하는 현상이

관찰된다. 이 때 수직 응력/수평 응력의 비율이 수렴하는 지점과 앞의 4.1절에서 확인한 최초로 파괴가 발생하기 시작하는 연성가공 한계지점을 비교하면 응력 비가 수렴하는 지점과 최초 파괴가 발생한 연성가공 한계지점이 유사한 것이 확인되었다. 따라서 수평 응력과 수직 응력의 비율에 의해 연성 가공 한계지점이 발생하는 것으로 판단되어진다.

5. 결론

본 연구에서는 나노스크래치 테스터를 이용하여 (001)면과 (111)면의 단결정 실리콘에 대해 [100]과 [110]의 결정방향으로 가공을 실시하여, 결정방향에 따른 단결정 실리콘의 연성가공 한계지점을 정량적/정성적으로 분석하고, AFM을 이용하여 본 연구에서 결정한 연성가공 한계지점 이전에 패턴 내부에 파괴가 발생하는 지 확인하였다. 또한, 연성가공 한계지점이 물리적으로 어떠한 의미를 가지는지에 대해 기계가공 분야에서 사용되는 '비절삭저항'을 본 연구에 적용하여 분석하였다.

1) 절삭력 및 가공 깊이의 변화를 정량적으로 분석하여 극저하중에서 가공할 때 연성가공이 이루어지다 취성 파괴로 바뀌는 연성가공 한계점이 실험을 진행한 모든 결정방향에서 존재하는 것을 확인하였으며, 연성가공 한계지점의 절삭력 및 가공 깊이가 결정방향에 따라 약 10~25% 가량 차이가 발생하는 것을 통해 결정방향이 가공에 영향을 미치는 것을 밝혀내었다.

2) 정량적 분석을 통해 결정한 연성가공 한계지점 전 · 후의 배분력을 재료에 가해주어 가공한 패턴을 AFM으로 관찰한 결과, 모든 결정방향에서 가공공구의 단면 형상과 유사한 V형 형상이 생성되었고, 가해준 배분력과 관계없이 표면에 연성가공된 부분의 단면을 확인하였을 때 내부에서 취성 파괴가 관찰되지 않았다. 따라서, 표면을 관찰하는 것만으로도 내부의 취성파괴 발생 유무까지 결정할 수 있다.

3) 가공 공구의 형상을 측정하여 가공 면적을 정의하여 계산한 비절삭저항을 확인한 결과, 모든 결정방향에서 가공 깊이가 깊어질수록 비절삭저항이 감소하는 크기 효과가 나타났으나 연성가공 한계지점 이전에서 수렴하는 현상이 발생하였으며, 결정방향 및 결정면에 따라 비절삭저항의 크기가 약 15~25% 가량 차이가 발생

하였다. 이러한 비절삭저항이 수렴하는 현상은 공구와 재료가 접하는 길이와 면적의 비율과 관련 있으며, 비절삭저항의 크기 차이는 재료의 물성 차이와 유사한 결과이다.

4) 수직 응력과 수평 응력 간 비율을 계산하여 재료의 파괴 거동을 분석한 결과, 가공 깊이가 증가할수록 수직 응력의 변화 대비 수평 응력의 변화가 증가하며, 각 결정방향 별 최초 파괴가 발생하는 지점에 해당하는 가공 깊이에서 수직 응력/수평 응력의 비율이 수렴하는 것을 확인하였다. 따라서, 수평 응력과 수직 응력의 비율에 따라 연성가공 한계지점을 발생하는 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

[1] B. M. Byun, Asian Survey, 34 (8), pp. 706-720 (1994)

[2] L. Jelinek, Global Semiconductor Market Trends, HIS Markit, May, (2018)

[3] N. F. Za'bah, K. S. Kwa, L, Bowen, B. Mendis, A. O'Neill, Journal of applied physics, 112 (2), pp. 1-5 (2012)

[4] S. I. Gang, The Magazine of the IEIE, 33 (4), pp. 39-48 (2006)

[5] J. H. Jeong, Y. J. Shin, E. S. Lee, K. H. Whang, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 20 (3), pp. 15-22 (2003)

[6] J. J. Lee, K. B. Choi, G. H. Kim, S. Y. Park, Journalf of the Korean Society for Precision Engineering, 26, pp. 21-25 (2009)

[7] J. Patten, W. Gao, K. Yasuto, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 127 (3), pp. 522-532 (2005)

[8] J. Gong, D. J. Lipomi, J. Deng, Z. Lie, X. Chen, N. X. Randall, R. Nair, G. M. Whitesides, Nano Letters, 10 (7), pp. 2702-2708 (2010)

[9] J. W. Lee, S. W. Youn, C. G. Kang, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 21 (3), pp. 139-146 (2004)

[10] S. W. Youn, C. G. Kang, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 21 (5), pp. 24-31 (2004)

[11] E. K. Antwi, K. Liu, H. Wang, Frontiers of Mechanical Engineering, 13 (2), pp. 251-263 (2018)

[12] S. H. Lee, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 61, pp. 71-79 (2012)

[13] J. Zhang, L. Han, J. Zhang, H. Liu, Y. Yan, T. Sun, Journal of Manufacturing Processes, 45, pp. 670-681 (2019)

[14] J. J. J. Wang, Y. Y. Liao, Journal of engineering materials and technology, 130 (1), pp.

011002-1 – 6 (2008)

[15] R. Gassiloud, C. Ballif, P. Gasser, G. Buerki, J. Michler, physica status solidi (a), 202 (15), pp. 2858-2869 (2005)

[16] F. Z. Fang, V. C. Venkatesh, CIRP annals, 47 (1), pp. 45–49 (1998)

[17] T. Nakasuji, S. Kodera, S. Hara, H. Matsunaga, N. Ikawa, S. Shimada, CIRP annals, 39 (1), pp. 89-92 (1990)

[18] K. Liu, X. Li, S. Y. Liang, X. D. Liu, Journal of Manufacturing Processes, 7 (2), pp. 95-101 (2005)

[19] W. S. Blackley, R. O. Scattergood, Precision Engineering, 13 (2), pp. 95-103 (1991)

[20] H. Wu, S. N. Melkote, Materials Science and Engineering: A, 549, pp 200-205 (2012)

[21] F. Ebrahimi, L. Kalwani, Materials Science and Engineering: A, 268, pp 116-126 (1999)

[22] T. Ando, X. Li, S. Nakao, T. Kasai, M. Shikida, K. Sato, 17th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Maastricht MEMS 2004 Technical Digest, pp 177-180 (2004)

[23] W. A. Brantley, Journal of Applied Physics, 44 (1), pp 534-535 (1973)

[24] K. Liu, X. P. Li, M. Rahman, K. S. Neo, X. D. Liu, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 32 (7-8), pp. 631-637 (2007)

[25] T. J. Ko, H. S. Kim, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47 (14), pp. 2111-2119 (2007)

[26] J. C. Morris, D. L. Callahan, J. Kulik, J. A. Patten, R. O. Scattergood, Journal of the American Ceramic Society, 78 (8), pp. 2015-2020 (1995)

[27] K. Liu, X. P. Li, S. Y. Liang, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33 (9-10), pp. 875-884 (2007)

[28] K. Liu, X. P. Li, M. Rahman, X. D. Liu, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 24 (5-6), pp. 321-326 (2004)

[29] W. S. Blackley, R. O. Scattergood, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 116 (2), pp. 263-266 (1994)

[30] K. Liu, X. P. Li, Journal of Materials Processing Technology, 113 (1-3), pp. 348-354 (2001)

[31] P. N. Blake, R. O. Scattergood, Journal of the American ceramic society, 73 (4), pp. 949-957 (1990)

[32] T. Shibata, S. Fujii, E. Makino, M. Ikeda, Precision Engineering, 18 (2-3), pp. 129-137 (1996)

[33] T. Sata, Y. Takeuchi, Annals of the CIRP, 45 (1), pp. 401-404 (1996)

[34] A. Masolin, P-O. Bouchard, R. Martini, M. Bernacki, J Mater Sci, 48, pp 979-988 (2013)

[35] M. A. Hopcroft, W. D. Nix, T. W. Kenny, Journal of Microelectromechanical Systems, 19 (2), pp. 229-238 (2010)

[36] D. H. Choi, E. c. Jeon, M. A. Yoon, K. S. Kim, T. J. Je, J. H. Jeong, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 33 (1), pp. 11-16 (2016)

[37] D. H. Choi, J. R. Lee, N. R. Kang, T. J. Je, J. Y. Kim, E. c. Jeon, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 113, pp. 1-9 (2017)

[38] R. Consiglio, N. X. Randall, B. Bellaton, J. von Stebut, Thin Solid Films, 332, pp. 151-156 (1998)

[39] J. W. Lee, S. W. Youn, C. G. Kang, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 21 (3), pp. 139-146 (2004)

[40] N. X. Randall, Surface & Coatings Technology, 380, pp. 1-17 (2019)

[41] W. A. Knight, G. Boothroyd, Fundamentals of metal machining and machine tools, 198, pp. 69-84, CRC Press (2005)

영문 요약

With the start of the 4th industrial revolution such as AI and IoT, the size of the semiconductor market is growing, and there is an increasing need for research on the processing of single crystal silicon, a major material in the semiconductor industry. Single crystal silicon was previously processed using a lithography method, but the lithography method has a low degree of freedom in cross-sectional shape, which makes it difficult to fabricate a complex shape, so studies have been conducted to use it as a mechanical machining method. However, most of the existing studies have determined the ductile processing limit of single crystal silicon, which is a brittle material, through qualitative analysis, and even in the case of quantitative analysis, the crystal orientation of single crystal silicon has not been considered. Since single crystal silicon exhibits different material properties depending on the crystal direction even on the same crystal plane, errors may occur in the process of defining the point where brittle fracture occurs if the crystal direction is not considered. So, in this study, a Nano Scratch Tester was used. Nano Scratch Tester is generally an equipment that analyzes the adhesion of a thin films, but was used in this study because it is an equipment that can quantitatively analyze the deformation of materials with excellent resolution at the nanoscale. (001)/(111) single crystal silicon was machined in the [100] and [110] crystal directions using a Nano Scratch Tester. (001) single crystal silicon was machined in the [100], [110] crystal direction, and (111) single crystal silicon was machined in the [110] crystal direction. Through this, in order to determine the critical point of ductile machining according to the crystal direction and to analyze the effect of the crystal direction on plastic deformation during machining, the deformation

characteristics were analyzed using 'specific cutting resistance' in the mechanical machining field.

As a result of qualitative/quantitative analysis of the cutting force and depth of cut resulting from machining silicon using a nano scratch tester, the transition point at which ductile machining is performed as shown in the previous research results for all crystal directions in which the experiment was conducted, and then changes to brittle fracture. Although present, it was confirmed that there is a difference in cutting force according to the crystal direction. In addition, as a result of checking the pattern cross-section in all crystal directions, it was confirmed that a V-shaped cross-section, which is a cross-sectional shape of the machining tool, was generated, and brittle fracture did not occur inside the pattern. Therefore, if the method of determining the ductile processing limit point using the quantitative analysis presented in this study is used, mechanical machining without brittle fracture of single crystal silicon through machining is possible. As a result of calculating the specific cutting resistance to analyze the physical meaning of the critical point of ductile machining of this study, the specific cutting resistance has a size effect regardless of the crystal direction, but there is a difference in the magnitude of the specific cutting resistance depending on the crystal direction. And convergence before the limit point of ductile processing appeared. To find out the cause of this phenomenon, the correlation between the ratio between the length and the area of the tool and the material in contact with the material and the specific cutting resistance are analyzed. It was concluded that the convergence phenomenon would occur. In previous studies, the theory that the fracture behavior of the material is determined through the ratio between the

vertical stress and the horizontal stress has been suggested, and it is predicted that this can be applied to the cause of the critical point of ductile machining. As a result of applying it to this study, the ratio of vertical stress/horizontal stress decreases and converges as the processing depth increases. At this time, it was confirmed that the convergence point of the vertical stress/horizontal stress coincides with the ductile processing limit point. From this, it was concluded that the ratio of vertical stress and horizontal stress was the cause of the ductile machining limit.