



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](#)

공학석사 학위논문

워터젯에 의한 난삭재 3D 형상 밀링가공 특성

Machining Characteristic of 3D Milling on Hard-to-machine
Materials by Waterjet



2018년 8월

한국해양대학교 해사산업대학원

기계시스템공학과

김 동 훈

본 논문을 김동훈의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 손 동 우 (인)

위 원 : 김 의 간 (인)

위 원 : 도 덕 희 (인)



2018 년 6 월 22 일

한국해양대학교 해사산업대학원

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iii
Abstract	vi
제 1 장 서 론	
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 내용	4
제 2 장 연마재 워터젯 가공의 개념	
2.1 연마재 워터젯 가공시스템의 구조	5
2.2 연마재 워터젯 가공 메커니즘	8
제 3 장 워터젯 가공변수 및 소재 특성에 따른 가공성 분석	
3.1 워터젯 가공변수 및 가공 조건 선정	13
3.2 워터젯 가공변수에 따른 난삭재의 피삭성 검토	15
3.3 워터젯 가공변수에 따른 가공품질 평가	23
제 4 장 난삭재 3D 워터젯 형상가공 특성평가	
4.1 가공조건-가공깊이 상호관계 분석을 통한 가공깊이 예측	28
4.2 가공깊이 시뮬레이션 성능평가	35
4.3 난삭재 3D 형상 워터젯 밀링 가공 성능평가	39
제 5 장 결론	46
참고문헌	48

List of Tables

Table 1	Material Properties	13
Table 2	AWJ Cutting Conditions	14
Table 3	AWJ Cutting Conditions by SOD Change	21
Table 4	#80 Abrasive Particle data	36
Table 5	AWJ Cutting Conditions of 3D Shape Machining	40
Table 6	AWJ 3D Shape Cutting Test Result	41



List of Figures

Fig. 1 Application of Hard-to-machine Materials	2
Fig. 2 Environment-friendly Processing Technology	3
Fig. 3 Types of Abrasive Waterjet	5
Fig. 4 Abrasive Waterjet Cutting System Layout	6
Fig. 5 Abrasive Waterjet Cutting Head Section View	7
Fig. 6 Diagram of AWJ Machining System	7
Fig. 7 AWJ Cutting Mechanism	8
Fig. 8 AWJ Cutting Mechanism	9
Fig. 9 Relationship of Pressure and Cutting Speed	10
Fig. 10 Quality level in accordance with SOD Change	11
Fig. 11 Comparison of Cutting Speed Change by Abrasive Mass Flow Rate	12
Fig. 12 Abrasive Particle Size and Shape	12
Fig. 13 Comparison of Depth of Cut by Pump Pressure Change	15
Fig. 14 Comparison of Depth of Cut by Feed Rate Change	16
Fig. 15 Comparison of Depth of Cut by Abrasive Mass Flow Rate Change	17
Fig. 16 Specimen Shape of SUS 304	18
Fig. 17 Specimen Shape of Inconel 600	19
Fig. 18 Specimen Shape of Ti6Al4V	19
Fig. 19 Structure of Air-jet Flow Expansion	20
Fig. 20 Design of Plane Process Path	21
Fig. 21 Depth of Cut by SOD Change	22
Fig. 22 Characteristic of AWJ Impact angle and Undercut	23
Fig. 23 Set up for AWJ Test	24

Fig. 24 Comparison of Depth of Cut by Impact Angle and Overlap Ratio	25
Fig. 25 Comparison of Depth Deviation by Impact Angle and Overlap Ratio	25
Fig. 26 Specimen Shape of Ti6Al4V at Impact angle 90° , Overlap ratio (40%, 50%, 60%)	26
Fig. 27 Specimen Shape of Ti6Al4V at Impact angle 75° , Overlap ratio (40%, 50%, 60%)	26
Fig. 28 Specimen Shape of Ti6Al4V at Impact angle 60° , Overlap ratio (40%, 50%, 60%)	27
Fig. 29 Specimen Shape of Ti6Al4V at Impact angle 45° , Overlap ratio (40%, 50%, 60%)	27
Fig. 30 Schematic Diagram of AWJ Cutting Modeling	32
Fig. 31 Waterjet Energy Distribution at Pump Pressure 1,000bar, Feed Rate 1,000mm/min, Abrasive Mass Flow Rate 100g/min ...	34
Fig. 32 Distribution of Abrasive Particles and Sheet of Abrasive Particles	35
Fig. 33 Experiment Result of 3D Profile Shape	37
Fig. 34 Simulation Result of 3D Profile Shape	37
Fig. 35 Comparison between Experiment and Simulation at Pressure 1,000bar, SOD 5mm, Abrasive Mass Flow Rate 50g/min, Feed Rate 1,000mm/min	38
Fig. 36 Comparison between Experiment and Simulation at Pressure 1,000bar, SOD 7mm, Abrasive Mass Flow Rate 150g/min, Feed Rate 1,000mm/min	38
Fig. 37 Set up for Robot based 3D Shape Cutting System	39
Fig. 38 3D Shape Profile Design in according to Feed Rate	40
Fig. 39 Comparison of Depth of Cut in according Overlap Ratio	42
Fig. 40 Final 3D Shape Design	42

Fig. 41	Result of AWJ 3D Cutting at Overlap Ratio 30%	43
Fig. 42	3D Shape of Ti6V14V Cutting at Overlap Ratio 30%	43
Fig. 43	Result of AWJ 3D Cutting at Overlap Ratio 50%	44
Fig. 44	3D Shape of Ti6Al4V Cutting at Overlap Ratio 50%	44
Fig. 45	Result of AWJ 3D Cutting at Overlap Ratio 70%	45
Fig. 46	3D Shape of Ti6Al4V Cutting at Overlap Ratio 70%	45



Machining Characteristic of 3D Milling on Hard-to-machine Materials by Waterjet

Kim, Dong Hun

Division of Mechanical Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Recently, an attempt to use waterjet as a tool for abrasing of hard-to-machine materials, such as titanium and composites.

When abrasing those materials with the conventional tools, rapid tool wear and thermal deformation are generated. Since waterjet process does not produce such kind of problems, the waterjet process are adopted for various machining for the hard-to-machine materials.

In principle, water is pressurized with ultra high pressure with up to 3,000 bar or more with a high pressure pump for waterjet process and abrasive powder materials are mixed before injected to the target materials through an orifice and a nozzle for manufacturing.

In this study, the influences of the cutting conditions of the abrasive waterjet such as pump pressure, feed rate, abrasive mass flow rate, SOD, onto the machining characteristics of the target materials are investigated.

The cutting depths by the impact angle and by the overlap ratios have been measured for the materials, Ti6Al4V, SUS 304, and Inconel 600. From this, it has been verified that Ti6Al4V was the best machinability and Inconel 600 was the lowest machinability.

It has been found that the cutting depths of AWJ increase the pump pressure and the amount of abrasive increase. On the contrary, the cutting depth of AWJ decrease as the feed rate of the mixed waterjet and S.O.D increases.

It has been confirmed that the cutting depths increased by about 1.78 times as the overlapping ratio of the machining paths increased. It has been also confirmed that the surface roughness becomes less rough as the impact angle approaches 90° to the workpiece, since the water and the abrasive materials injected out from the nozzle become regular spreading.

It has been verified that the waterjet cutting depth error was 10% less than those results obtained by 3D machining simulation.

It is expected that the experimental results obtained through this study can be used as fundamental data for AWJ milling for various hard-to-machine materials.

KEY WORDS : Abrasive Waterjet, AWJ Milling, Depth Control, 3D Shape, Hard-to-machine Materials

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

최근 전 세계적으로 환경규제 및 소비자들의 연비에 대한 인식변화로 연비 향상 요구가 증대하고 있고 이러한 요구를 만족하기 위해 항공우주산업, 자동차산업 등 첨단 주력 산업을 중심으로 티타늄 및 복합재료와 같은 초경량 고경도의 난삭재 사용 비율이 급격히 증가하고 있다. 그러나 난삭재는 물리적 화학적 특성 때문에 가공 생산이 어려우며, 난삭재의 종류도 매우 다양하고 적용되는 범위에 따라서 가공 방법이 달라진다. 따라서 난삭재의 물리적 성질과 기계적 성질에서 야기되는 절삭성을 파악하여 가공 목적에 적합한 가공 기술 개발 및 공구 기술 고도화 등 핵심기술에 대한 고효율, 친환경 가공기술에 대한 관심과 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

난삭재는 고강성 및 초경량 등 기계적 성질이 우수한 반면, 절삭이 어려운 소재로 분류되는 재료들로 내열성, 내식성 및 내마모성이 우수하고 열전도도와 전기전도도가 낮은 티타늄과 인코넬과 같은 신소재부터 알루미늄 합금과 같이 일반적으로 사용되고 있는 소재도 사용 목적에 따라 난삭재로 분류되기도 한다.

Fig. 1과 같이 각 산업분야에 쓰이는 대표적인 난삭재의 종류로는 항공우주산업의 티타늄, 복합재료 및 니켈합금, 자동차산업의 CGI(Compacted graphite iron), 세라믹 및 고경도강 그리고 바이오산업의 바이오 세라믹 및 코발트 크롬 등이 있다. [11]

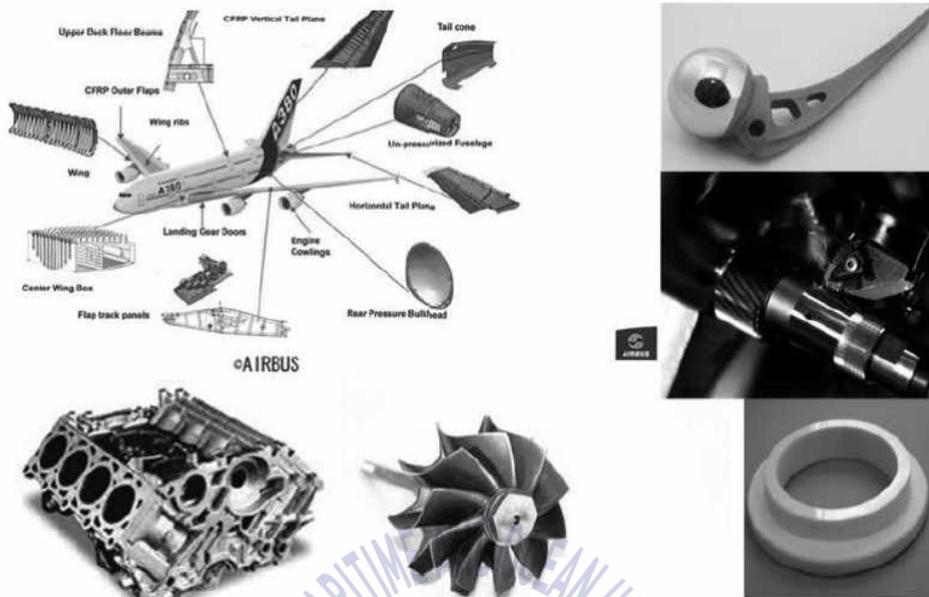


Fig. 1 Application of Hard-to-machine Materials

난삭재는 소재 특성상 공구마모가 빠르고 절삭온도 및 절삭저항이 크며, 표면조도가 크고 절삭 칩이 날에 응착되는 현상이 발생한다. 따라서 소재에 따라 가공 시의 급격한 소성변형, 절삭공구의 급격한 마모 및 공구와의 화학반응 등 다양한 특성을 고려해야 한다. 스테인레스와 내열합금강의 경우 공구와 피삭재가 접촉하여 국부적으로 공구 인선부에 고열이 집중되고 피삭재의 열전도도가 매우 낮아 칩에 의해 가공열이 배출되기 어렵다. 이로 인해 공구의 국부적인 고열 발생으로 인해 공구 마모가 빠르게 진행되어 공구파손이 발생하고, 소재의 표면품질을 저하시키는 원인이 된다.

일반적으로 절삭 가공공정에서 가공온도를 낮추기 위해 절삭유를 사용하고 있는데 과도한 절삭유 사용으로 인해 가공비용 및 에너지소모 증가, 환경오염 및 낮은 효율성 등의 문제가 야기되고 있다. 이를 개선하기 위해 기존의 절삭유 가공방식을 탈피한 고효율, 친환경 가공을 위한 가공기술개발 연구가 활발히 진행 중에 있다.

친환경 가공기술로는 Fig. 2와 같이 절삭가공 부위에 액체질소를 분사하여 발생하는 열을 냉각시키는 극저온가공(Cryogenic machining) 기술, 윤활유를 고압의 미스트(mist) 형태로 분사하여 공구와 소재간의 마찰력을 감소시켜 공구 수명을 증대한 최소윤활(Minimum Quantity Lubrication, MQL) 가공, 레이저 빔으로 가공물의 절삭부위를 순간적으로 가열함으로써 취성재료를 연화시켜 취성과 파괴를 억제한 레이저예열가공(Laser-Assisted Machining, LAM)과 아크방전 플라즈마의 고온, 고속의 에너지로 재료를 절삭하는 플라즈마 보조가공(Plasma-Assisted Machining, PAM), -10°C 이하의 압축공기로 가공 시 발생하는 열을 냉각시키는 냉풍가공 등이 있다. [10,11]

그 중에 연마재 워터젯(Abrasive Waterjet, AWJ) 가공은 고압펌프에서 물을 3,000bar이상의 초고압 상태로 압축하여 노즐을 통해 음속의 2~3배의 속도로 분사시켜 물의 충격에너지와 침식작용으로 소재를 절단하는 방식으로 열 발생에 의한 소재변형, 열 확산 변형 등의 기계적 성질을 최소화하고, 일반적으로 CNC 밀링으로 가공하기 힘든 취성재료, 열처리 소재, 난삭재 등의 가공에 효과적인 친환경 가공법으로 평가받고 있다.

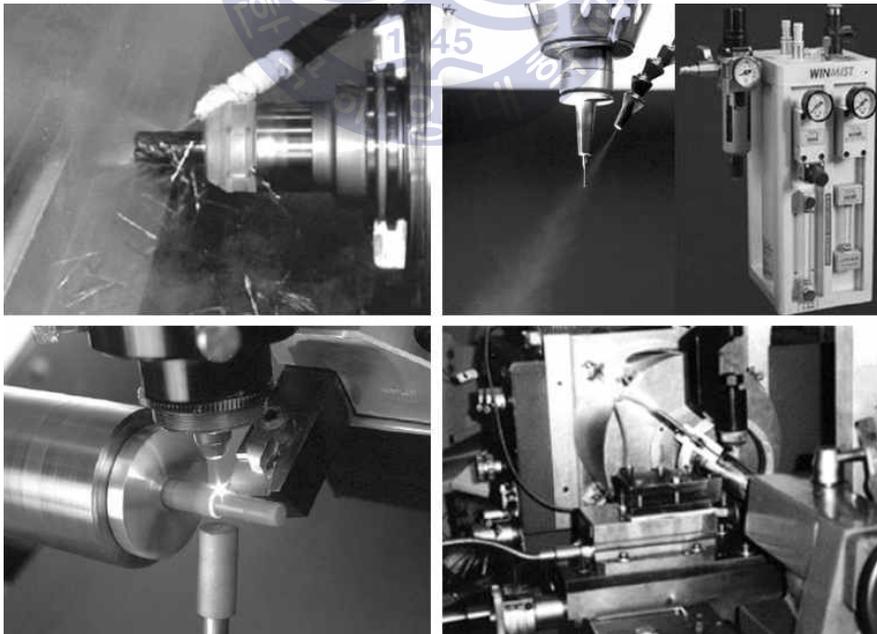


Fig. 2 Environment-friendly Processing Technology

1.2 연구 목적 및 내용

연마재 워터젯 가공(Abrasive Waterjet, AWJ)은 고압펌프를 통해 물을 3,000bar 이상으로 초고압 상태로 전환한 뒤, 믹싱챔버(Mixing Chamber)에서 혼합된 물과 연마재가 오리피스(Orifice)와 노즐(Nozzle)을 통해 분사되면서 좁은 면적에 집중되는 힘을 활용하여 물리적인 힘을 이용하여 소재를 절단하는 방식으로 최근에는 워터젯의 장점이 부각되면서 단순히 절단가공에서 탈피하여 3D 형상 가공이 가능한 AWJ 밀링가공 연구가 진행되고 있다.

AWJ 밀링가공은 일반적으로 사용되고 있는 절단 가공과 다른 메커니즘을 고려해야 한다. 솔리드공구를 이용한 접촉식 밀링가공은 소재의 특성에 따라 CNC 프로그래밍에 의해 정확한 형상가공이 가능하지만, 워터젯 밀링가공은 노즐에서 분사되는 워터젯을 통해 비접촉식 방식으로 소재를 가공하기 때문에 3D 형상에 따른 가공깊이를 제어하는 기술이 필요하다.

본 논문에서는 워터젯 밀링가공의 난삭재 3D 형상 가공 특성을 파악하기 위해 가공품질에 영향을 미치는 가공변수에 따른 가공깊이 변화를 분석하고, 대표적인 난삭재 소재인 SUS 304, Ti6Al4V, Inconel 600 3가지 소재의 기계적 성질에 따른 피삭성을 검토하고자 한다. 그리고 가공조건과 가공깊이의 상호관계 분석을 통해 가공깊이 실험값과 예측값을 비교하여 3D 워터젯 형상가공의 성능평가를 진행하고자 한다.

제 2 장 연마재 워터젯 가공의 개념

2.1 연마재 워터젯 가공시스템의 구조

연마재 워터젯(Abrasive waterjet, 이하 AWJ) 가공시스템은 Fig. 3과 같이 습식 워터젯(Abrasive Suspension Waterjet)과 건식 워터젯(Abrasive Injection Waterjet)으로 분류된다.

습식 워터젯은 물과 연마재가 압력용기에 혼합된 상태에서 노즐을 통해 분사하여 소재를 가공하는 방식으로 가공 후 이물질과 섞여있는 연마재를 폐기하지 않고 필터링 과정을 거쳐 압력용기로 재충전하여 사용함으로써 연마재의 재활용이 가능하며, 비교적 낮은 압력에서도 뛰어난 가공성능을 나타낸다.

반면, 건식 워터젯은 별도의 연마재 저장탱크를 통해 건조한 상태로 공급된 연마재와 물을 믹싱 챔버(Mixing Chamber)를 통해 혼합하여 오리피스(Orifice)와 노즐을 통해 분사하여 소재를 가공하는 방식으로 되면서 사용한 연마재는 재활용되지 않고, 물과 폐 연마재를 분리하여 폐기하며, 높은 압력에서 뛰어난 가공성능을 나타낸다. 본 연구에서는 건식 워터젯을 사용하였다.

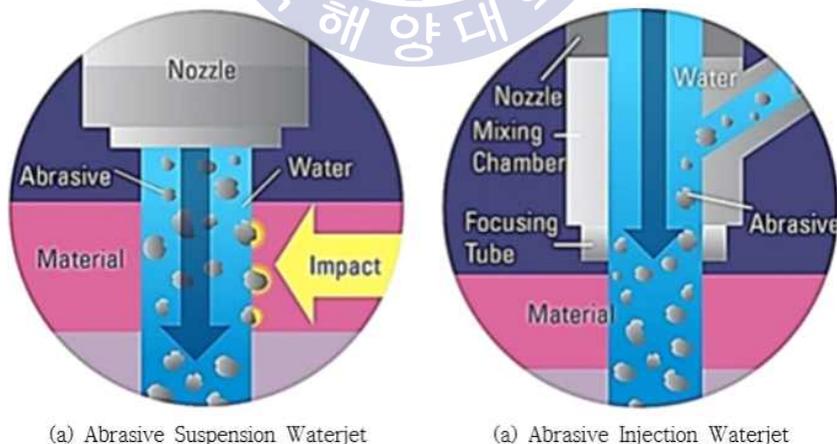


Fig. 3 Types of Abrasive Waterjet

건식 워터젯 가공 시스템은 크게 압력펌프(Pressure Pump), 연마재 탱크(Abrasive Hopper), 커팅헤드(Cutting Head), 워터젯 이송장치(X-Y Traverse System), 제어부(Controller)로 구성되어 있다.

워터젯 가공에 있어서 가장 일반적으로 사용되는 펌프는 증압식(Intensifier) 펌프로 모터를 구동시켜 플런저(Plunger)의 왕복운동으로 인해 물을 초고압으로 증압시키는 압력발생장치이다.

연마재 탱크는 연마재를 저장해 놓은 메인탱크와 워터젯 가공 시 일정한 양으로 커팅헤드로 연마재를 공급하는 보조탱크로 구성되어 있다.

갠트리 구조의 워터젯 이송장치(X-Y Traverse System)는 소재의 절단 방향에 따라 X, Y방향으로 이동하며, 커팅헤드는 물과 연마재를 혼합하는 믹싱 챔버(Mixing Chamber)와 고압수의 압력에너지를 고속의 운동에너지를 갖는 워터젯(Waterjet)으로 변화하는 역할을 하는 오리피스(Orifice), 고압수와 연삭입자를 혼합 가속하는 역할을 하는 노즐(Nozzle)로 구성되어 있다.

Fig. 4는 워터젯 가공 시스템의 레이아웃을 나타내었다.

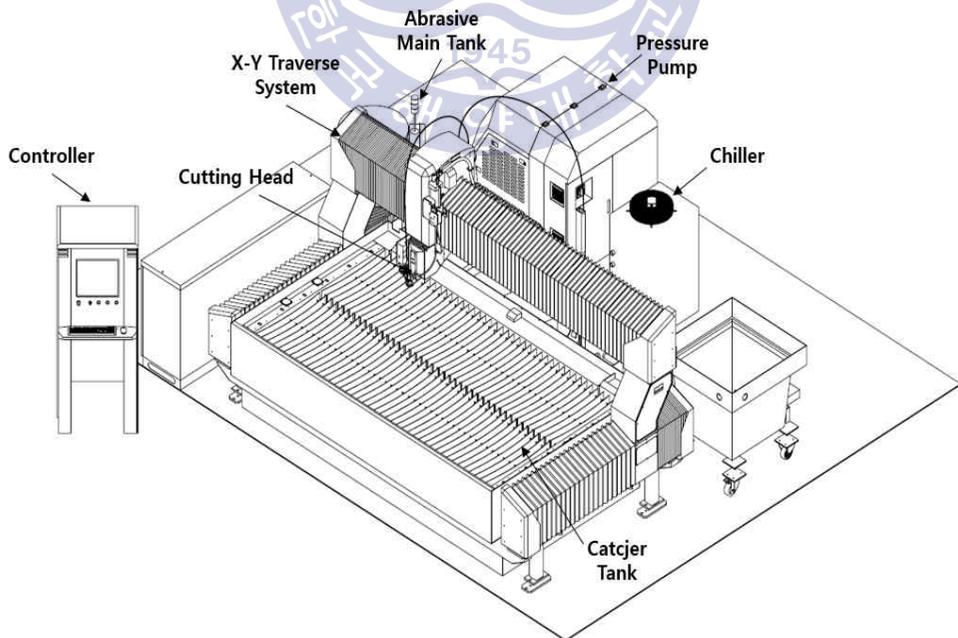


Fig. 4 Abrasive Waterjet Cutting System Layout

Fig. 5는 워터젯 커팅헤드 단면도를 나타내었다. [15]

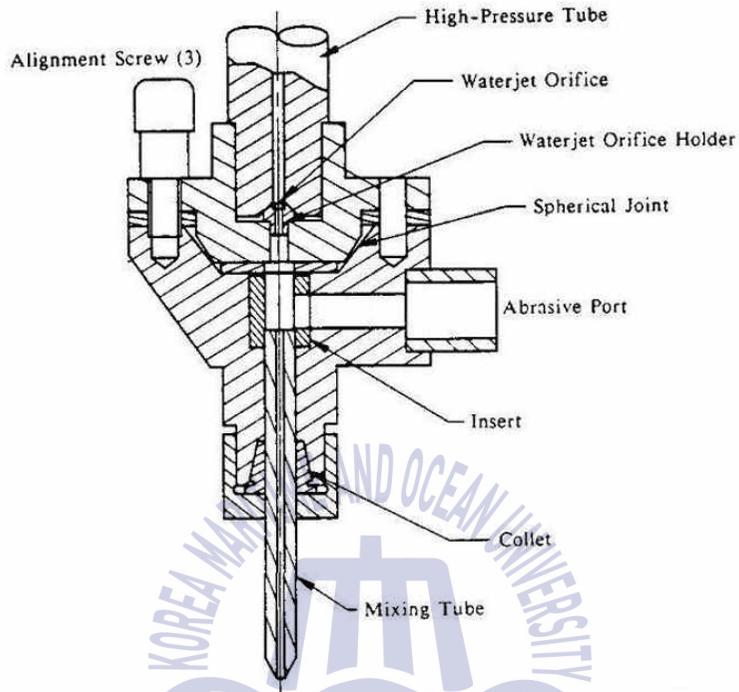


Fig. 5 Abrasive Waterjet Cutting Head Section View

Fig. 6은 AWJ의 가공 시스템의 구성도를 나타내었다. [16]

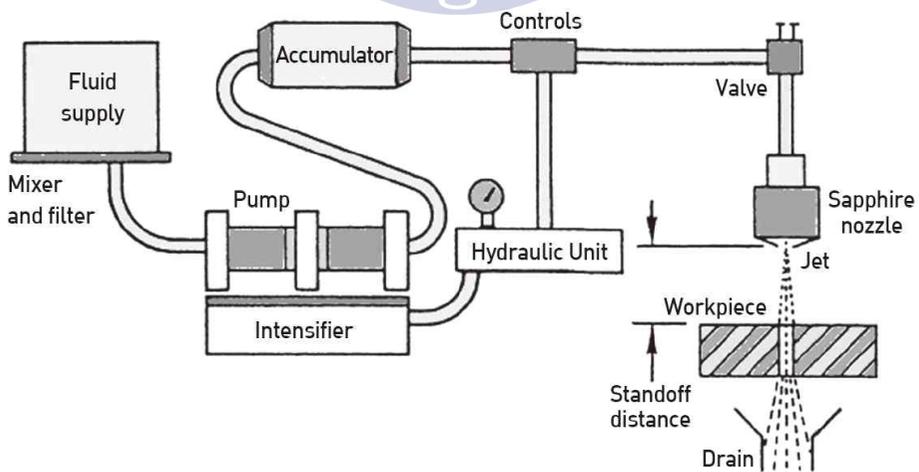


Fig. 6 Diagram of AWJ Machining System

2.2 연마재 워터젯 가공 메커니즘

연마재 워터젯의 재료제거 과정은 Fig. 7과 같이 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 연마재가 소재 충격 시 충격지점의 인접에 발생하는 소성유동(Plastic flow)에 의한 재료 제거와 둘째, 충격에 의해서 생기는 응력파로 인한 네트워크 크래킹(Network cracking)에 의한 재료 제거이다. 연마재 워터젯 가공의 피삭성에는 재료의 소성변형에 관계된 탄성계수(Elastic modulus) 및 강성과 관련된 전단 탄성률(Shear Modulus)이 고려될 수 있다. 연마재 워터젯의 재료제거의 메커니즘에서 가장 핵심과정은 소성변형이며, 탄성계수가 낮을수록 소성변형이 쉽게 발생하고, 전단탄성률이 낮을수록 강성이 낮고, 변형에 대한 저항성이 적다. 즉 탄성계수 및 전단탄성률이 낮을수록 연마재 워터젯의 피삭성이 좋아진다.

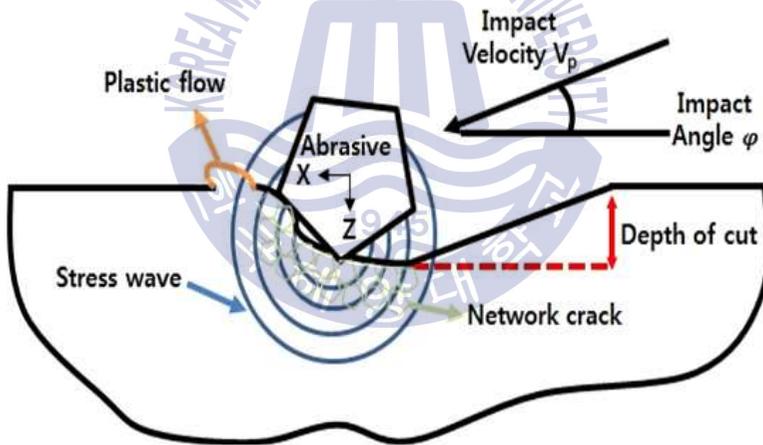


Fig. 7 AWJ Cutting Mechanism

초기 워터젯 가공은 1910년대 러시아에서 석탄채굴에 응용되었고, 1930년대에 저압으로 종이를 재활용하는 공법의 형태로 사용되어져 오다가 1980년대 미국에서 연마재를 이용한 연마재 워터젯 가공법이 개발, 상용화되어 현재까지 CNC제어에 의한 워터젯 가공 시스템과 4차 산업으로 로봇의 적용범위가 점차 확대됨에 따라 워터젯 가공 시스템과 로봇을 응용한 로봇 기반의 워터젯 가공 시스템 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.

연마재 워터젯 가공은 Fig. 8과 같이 일반적인 물을 4,000bar이상의 초고압으로 응축한 후, 작은 구멍의 오리피스를 통과하면서 압력에너지에서 운동에너지로 전환되면서 젯 스트림을 형성하게 된다. 이때 물의 속도는 시속 약 3,600km(2,200마일)이며, 오리피스 아래에 위치한 믹싱 챔버에서 물이 고속으로 통과하면서 순간적으로 진공을 형성하고, 물과 연마재가 혼합되어 가공하고자 하는 피삭재에 충격을 주어 미소 크랙을 형성하고, 나아가 침식을 통해 크랙 확산 또는 연삭 등의 작용에 의해 절단하게 된다.

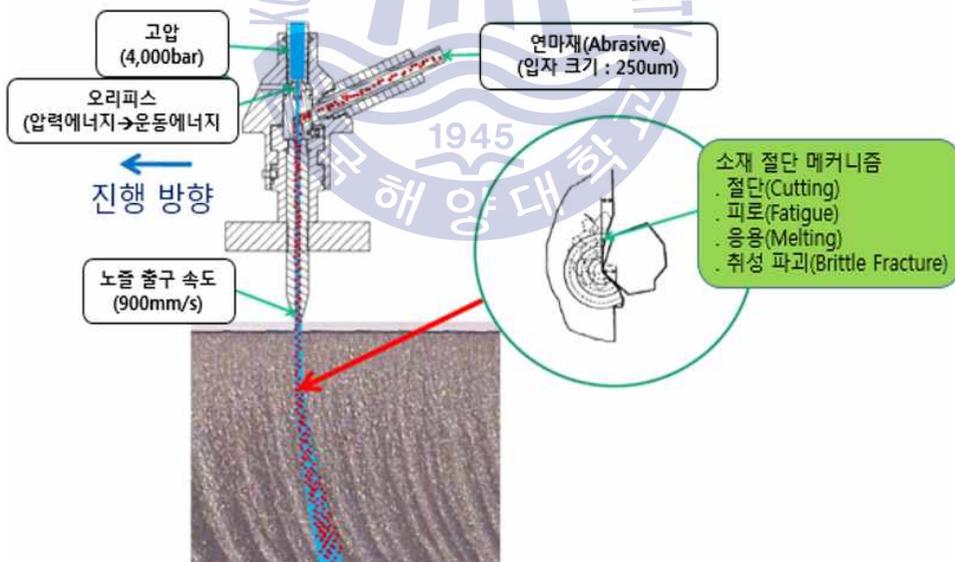


Fig. 8 AWJ Cutting Mechanism

2.2.1 연마재 워터젯 가공변수

연마재 워터젯 가공품질을 결정하는 주요 변수로는 유량 변수, 절단 변수, 노즐 변수, 연마재 변수 등 크게 4가지로 구분할 수 있다.

가. 유량 변수(압력, 오리피스 직경)

유량은 압력과 오리피스 직경에 영향을 받으며, 압력이 높아질수록 오리피스 직경이 커질수록 유량이 증가하게 되며, 유량이 많을수록 가공품질이 우수하게 된다. 하지만 일정 값 이상이 되면 유량의 증가폭이 둔화된다.

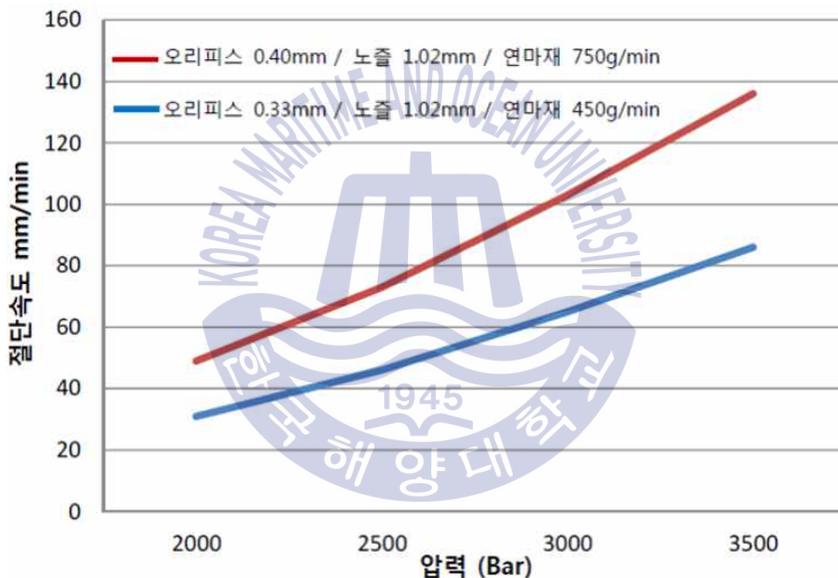


Fig. 9 Relationship of Pressure and Cutting Speed

나. 절단 변수(절단속도, SOD, 절단각도)

절단속도는 단위 시간 동안 피삭재 절단에 관여하는 연마재 입자수와 관계가 있다. 속도가 빠를수록 단위면적당 연마재 입자수가 감소하게 되고, 절단품질이 나빠지게 된다. SOD(Stand-off Distance, 이격거리)는 노즐과 피삭재의 거리를 나타내며, SOD가 커질수록 워터젯 절단 폭이 커지고, 절단 깊이가 감소하여 절단 품질이 나빠지게 된다.



Fig. 10 Quality level in accordance with SOD Change

다. 노즐 변수(노즐 직경, 길이)

노즐 직경은 연마재, 물, 공기의 혼합물 밀도에 영향을 미치며, 노즐 직경이 커질수록 공기 유입이 많아져 혼합물의 밀도가 낮아져 연마재 속도가 감소하게 되고 절단 품질이 나빠지게 된다. 노즐 직경은 오리피스 직경과 연마재 입자크기에 따라 결정되며, 주로 0.51mm~1.5mm 노즐이 사용된다. 노즐의 길이는 연마재 입자가 가속할 수 있는 거리를 의미하며, 일반적으로 75~100mm가 최적화된 노즐로 평가되고 있다. 하지만 일정 값 이상의 노즐길이는 연마재와 노즐 내부의 마찰로 인해 에너지 손실이 발생하여 절단 품질이 나빠지는 악영향을 미친다.

라. 연마재 변수(연마재 유입량, 입자형상, 경도)

연마재 입자 각이 많은 형상일수록, 경도가 높을수록 절단 품질이 뛰어나고, 연마재 유입량이 많을수록 절단 품질이 뛰어나게 된다. 하지만 믹싱 챔버 및 노즐의 사용수명이 감소한다. 연마재는 피삭재의 종류에 따라 #80~#240 입자의 연마재가 사용되고, 일반적으로 석류석(Garnet) 연마재가 많이 사용되고 있다.

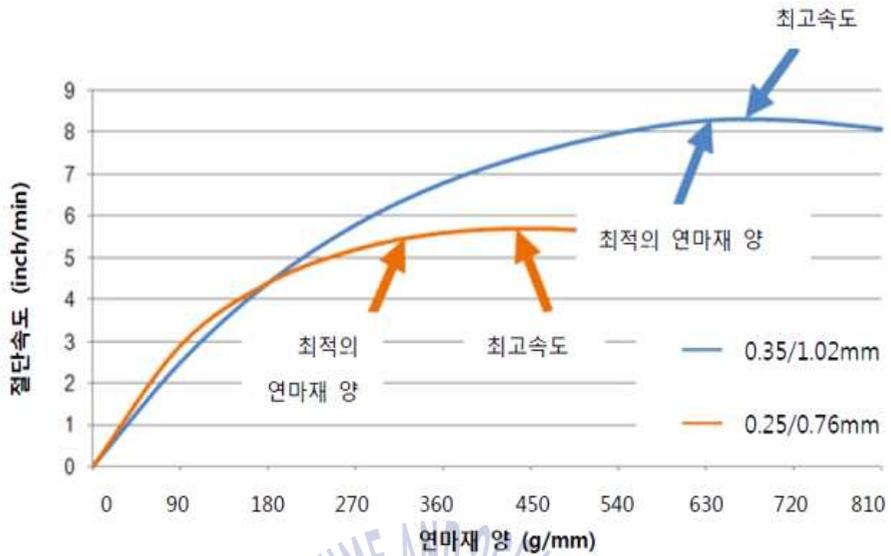


Fig. 11 Comparison of Cutting Speed Change by Abrasive Mass Flow Rate

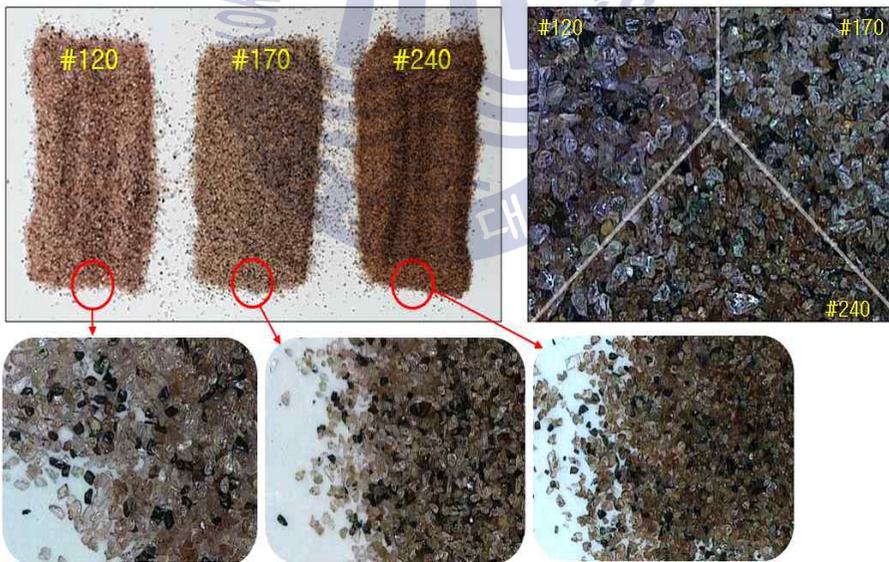


Fig. 12 Abrasive Particle Size and Shape

제 3 장 워터젯 가공변수 및 소재 특성에 따른 가공성 분석

3.1 워터젯 가공변수 및 가공 조건 선정

본 논문에서는 연마재 워터젯(Abrasive Waterjet, 이하 AWJ) 3D 형상 가공에서 가공치수 및 표면정도에 영향을 미치는 가공인자로 펌프압력, 이송속도, 연마재 충격각도, 연마재 유입량, 이격거리, 중첩비율에 따른 가공깊이 변화를 측정하였다.

본 논문에 사용된 소재는 대표적인 난삭재의 일종인 SUS 304, Ti6Al4V, Inconel 600 3가지 소재이며, 각 소재의 물성치는 Table 1과 같다.

SUS 304의 경도는 123, 항복응력은 215MPa, 탄성계수는 190GPa, 전단탄성률은 74GPa로 탄성계수 및 전단탄성률이 높아 변형에 대한 저항성이 높고 툴 가공시 칩 형성이 어려워 피삭성이 떨어진다. 티타늄 합금계열인 Ti6AL4V의 경우 경도 326, 항복응력 790MPa, 탄성계수 110GPa, 전단탄성률 44GPa로 접촉식 공구 가공시 경도가 높아 고강도 공구가 요구되며 따라서 공구 마모도가 높다. 니켈 합금계열인 Inconel 600의 경우, 경도 205, 항복응력 310MPa, 탄성계수 210GPa, 전단탄성률 80GPa으로 경도뿐만 아니라 탄성계수가 세 소재 중 가장 높아 가공이 가장 어려운 소재로 볼 수 있다.

Table 1 Material Properties

Parameter	SUS304	Ti6AL4V	Inconel 600
Density(g/cc)	7.87	4.43	8.47
Hardness, Brinell	123	326	205
Tensile Strength, Yield(MPa)	215	790	310
Elastic Modulus(GPa)	190	110	210
Shear Modulus(GPa)	74	44	80
Shear Strength(MPa)	480	550	419

3가지 소재에 대하여 AWJ 가공의 피삭성을 알아보기 위해 Table 2와 같이 가공조건을 설정하였다. 노즐직경과 길이, 연마재 입도, 이격거리(SOD)는 고정 조건으로 설정하였고, 압력은 1,000bar, 2,000bar, 3,000bar 이송속도 500mm/min, 600mm/min, 700mm/min, 연마재 유입량 100g/min, 150g/min, 200g/min 변화에 따른 가공깊이 변화를 측정하여 난삭재 소재의 가공특성을 파악하였다.

Table 2 AWJ Cutting Conditions

Parameter	Condition		
Material	SUS 304	Ti6Al4V	Inconel 600
Nozzle Diameter (mm)	1.02		
Nozzle Length (mm)	101.6		
Orifice Diameter (mm)	0.33		
Abrasive Material	Garnet		
Abrasive Grain Size	#80		
SOD(mm)	5		
Pressure(bar)	1,000, 2,000, 3,000		
Feed Rate(mm/min)	500, 600, 700		
Abrasive Mass flow Rate(g/min)	100, 150, 200		

3.2. 워터젯 가공변수에 따른 난삭재의 피삭성 검토

3.2.1 펌프압력에 따른 가공깊이 분석

이송속도 500mm/min, 연마재 유입량 100g/min로 고정하고, 펌프압력 1,000bar, 2,000bar 3,000bar일 때 SUS 304, Ti6Al4V, Inconel 600 3가지 소재의 가공깊이를 측정하였다.

실험 결과 Fig. 13과 같이 3,000bar에서 Inconel 600 2.51mm, SUS 304 2.99mm, Ti6Al4V 4.11mm로 가공깊이 변화가 측정되었고, 3가지 소재 모두 펌프압력이 증가할수록 가공깊이가 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 펌프압력이 높을수록 단위시간당 가공에 참여하는 연마재와 물의 운동에너지, 즉 워터젯 에너지가 증가했기 때문으로 분석되었다.

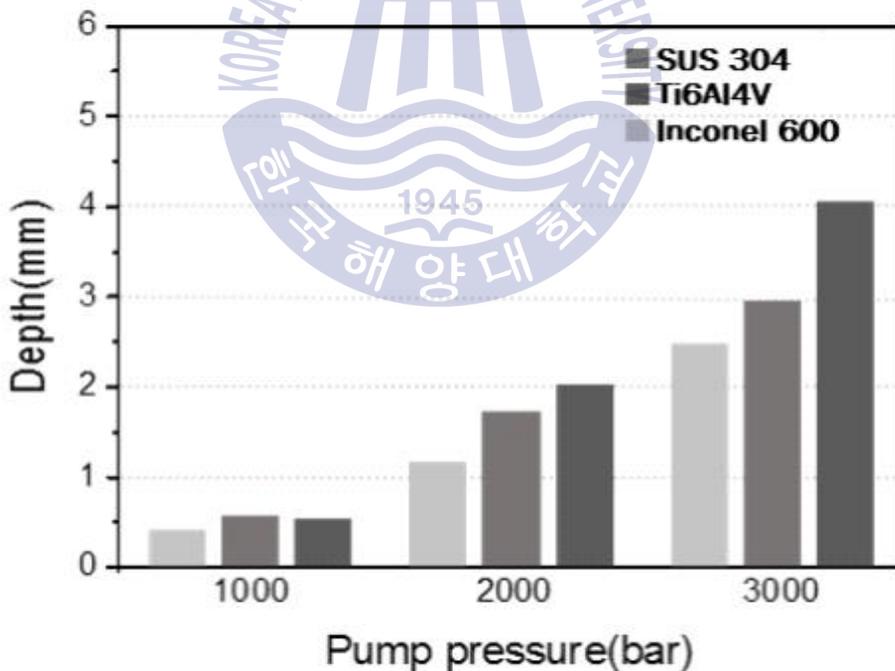


Fig. 13 Comparison of Depth of Cut by Pump Pressure Change

3.2.2 이송속도에 따른 가공깊이 분석

펌프압력 2,000bar, 연마재 유입량 100g/min로 고정하고, 가공속도를 500mm/min, 600mm/min, 700mm/min로 했을 때 소재의 가공깊이를 측정하였다.

실험 결과 Fig. 14와 같이 3가지 소재 모두 이송속도가 증가할수록 가공깊이가 감소하였고, 이는 이송속도가 증가할수록 단위면적당 충돌하는 연마재의 양이 줄어들게 되며 결국 운동 에너지의 전달력이 떨어져 가공깊이가 적어지는 것으로 분석되었고, 동일조건에서 Ti6Al4V, SUS 304, Inconel 600 순으로 가공깊이가 증가하였다.

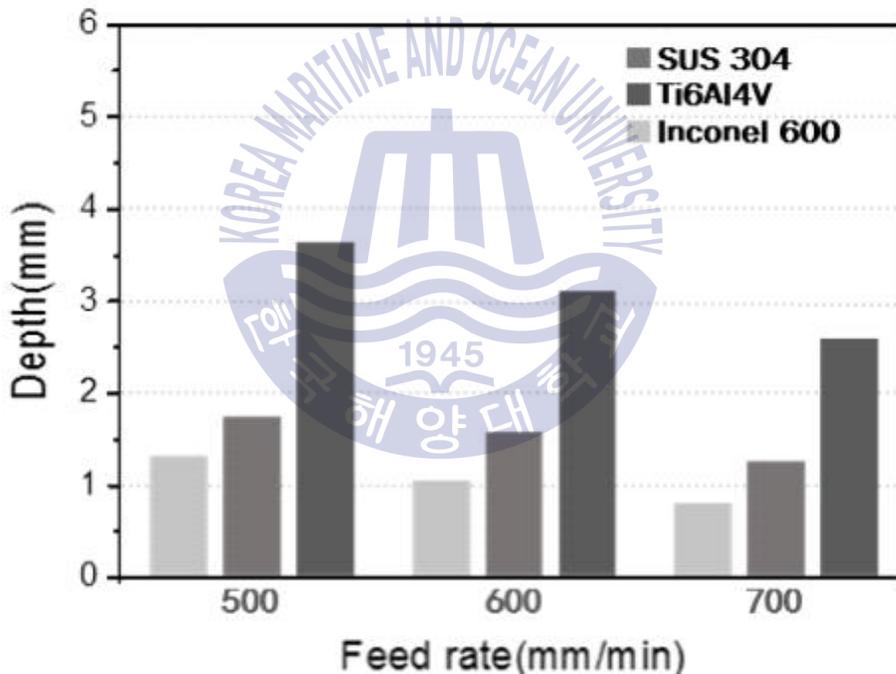


Fig. 14 Comparison of Depth of Cut by Feed Rate Change

3.2.3 연마재 유입량에 따른 가공깊이 분석

펌프압력 2,000bar, 이송속도 500mm/min으로 고정하고, 연마재 유입량을 100g/min, 150g/min, 200g/min으로 했을 때 소재의 가공깊이를 측정하였다.

실험 결과 Fig. 15와 같이 연마재 유입량이 증가 할수록 3가지 소재 모두 가공깊이가 선형적으로 증가하였다. 이는 연마재 유입량이 증가할 경우 운동 에너지를 가진 연마재 입자의 개수가 증가하여 가공깊이가 증가되는 것으로 분석되었고, 동일조건에서 Ti6Al4V, SUS 304, Inconel 600 순으로 가공깊이가 증가하였음을 확인하였다.

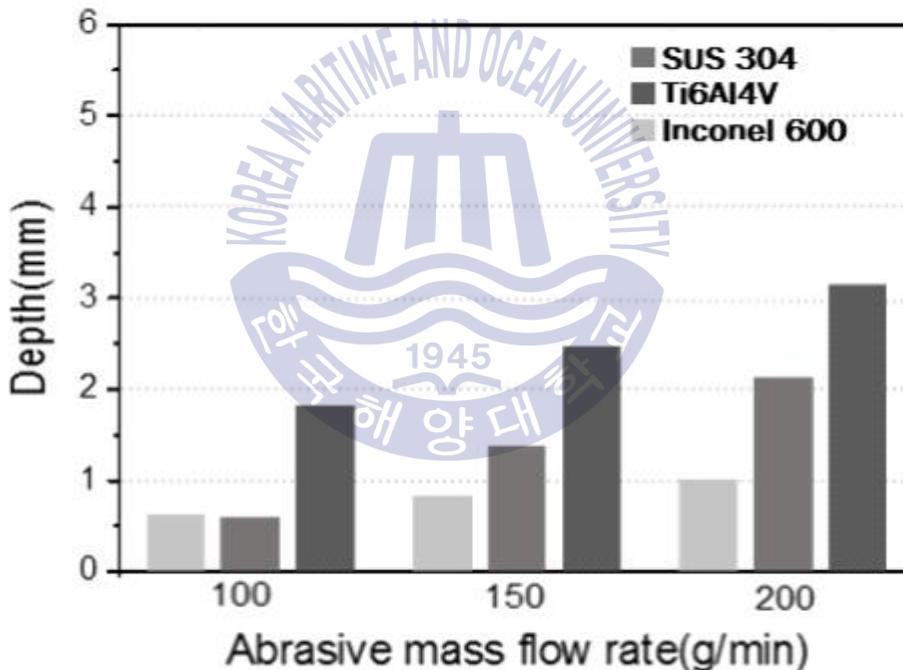


Fig. 15 Comparison of Depth of Cut by Abrasive Mass Flow Rate Change

펌프압력, 이송속도, 연마재 유입량에 따른 가공깊이를 측정한 결과 Ti6Al4V, SUS 304, Inconel 600 소재 순으로 가공깊이가 증가하였고, 그 중 Ti6Al4V의 가공깊이가 가장 크게 측정되었다.

3가지 소재가 가진 물성치와 비교하면 SUS 304의 경우 경도는 낮으나 탄성계수 및 전단탄성률이 크기 때문에 강성이 크고 소재 변형에 대한 저항성이 커 소재의 피삭성이 Ti6Al4V에 비해 좋지 않으며 Ti6Al4V는 3가지 소재 중 가장 경도가 높으나, 탄성계수 및 전단탄성률이 낮아 워터젯 충격에 쉽게 변형을 일으켜 가장 빠른 시간에 많은 양의 소재를 제거 가능한 것으로 보인다. Inconel 600의 경우 경도가 클 뿐 아니라 탄성계수 및 전단탄성률이 높아 3가지 소재에 비교했을 때 가장 피삭성이 떨어진다. 연마제 워터젯의 재료제거의 메커니즘상 소재의 소성변형 및 네트워크 크래킹이 발생할 때 변형에 대한 저항성 또는 소재의 강성이 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 16에서 Fig. 18은 SUS 304, Ti6Al4V, Inconel 600의 가공 시편 모습이다.



Fig. 16 Specimen Shape of SUS 304

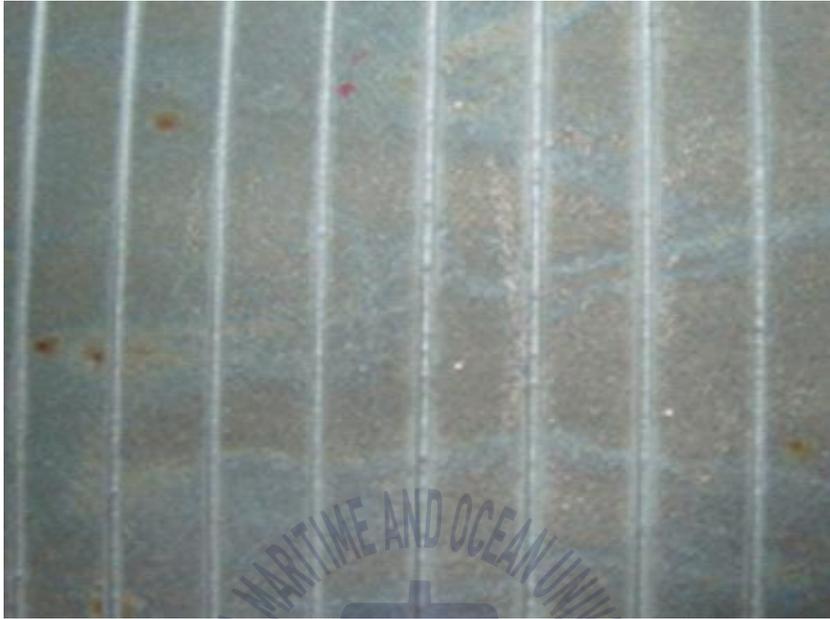


Fig. 17 Specimen Shape of Inconel 600



Fig. 18 Specimen Shape of Ti6Al4V

3.2.4 이격거리에 따른 가공깊이 분석

이격거리는 노즐과 피삭재와의 거리를 의미하며, Fig. 19와 같이 노즐에서 분사되는 젯의 분사거리에 따른 속도장은 이격거리에 따라 내부 영역(Internal region)과 주 영역(Main region)으로 나타낼 수 있다. 내부영역은 젯이 분사될 때 노즐 내부에서 일정한 속도가 유지되는 포텐셜 코어(Potential core)가 존재하는 영역을 의미하고, 주 영역은 젯이 도달 가능한 거리를 의미한다. 노즐의 내부 직경을 d_n 이라고 할 때 퍼텐셜 코어가 존재하는 x_c 의 거리는 $6.2d_n$ 이며, 주 영역에서부터 중심라인의 젯 속도가 감소한다. 따라서 절단 및 절삭을 할 경우 젯 에너지의 손실이 가장 적은 포텐셜 코어 영역 안에서 가공을 진행하는 것이 유리하고, 정삭과 같이 미세 가공을 할 경우에는 이격거리를 증가시켜 주 영역내에서 가공하는 것이 요구된다. [6,8]

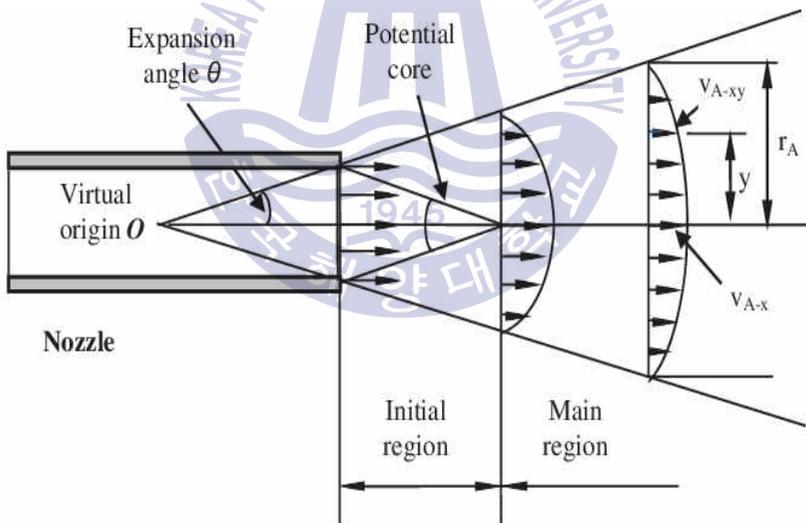


Fig. 19 Structure of Air-jet Flow Expansion

AWJ에서 포텐셜 코어 영역과 주 영역에 따른 가공깊이 변화를 측정하기 위해 Ti6Al4V 소재의 평면가공 실험을 진행하였다. 가공 조건은 Table 3과 같이 펌프압력 2,000bar, 이송속도 1,000mm/min, 연마재 유입량 200g/min, 중첩비율 0%로 고정한 후, Fig. 20과 같이 Ti6Al4V를 단일경로로 가공했을 때 이격거리

(3mm~9mm)에 따라 가공깊이를 측정하였다.

Table 3 AWJ Cutting Conditions by SOD Change

Parameter	Condition
Material(mm)	Ti6Al4V
Nozzle diameter(mm)	1.02
Abrasive(material, mesh)	Garnet, #80
SOD(mm)	3/5/7/9
Pressure(bar)	2,000
Feed Rate(mm/min)	1,000
Abrasive Mass Flow Rate(g/min)	200
Overlap Ratio(%)	0

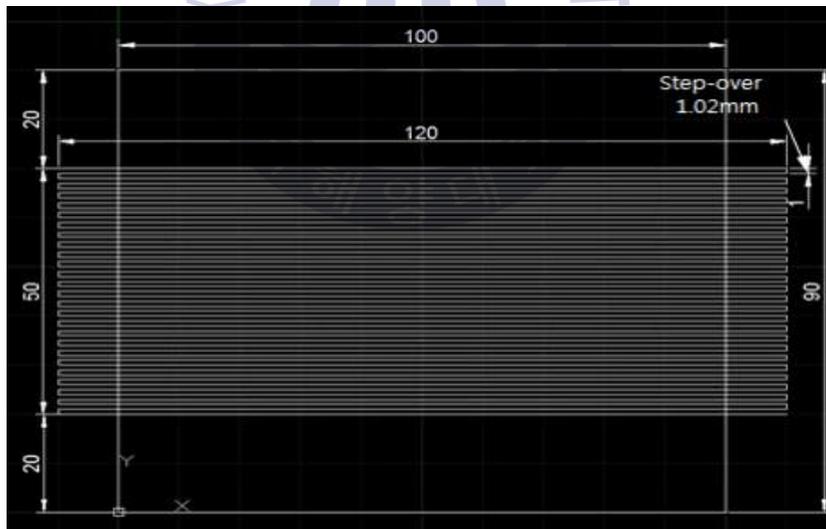


Fig. 20 Design of Plane Process Path

실험 결과 Fig. 21에서와 같이 이격거리가 증가할수록 가공깊이는 감소함을 알 수 있으며, 특히 이격거리 3~5mm사이에서는 가공깊이의 변화가 0.1mm 이 내로 아주 작지만, 이격거리 5mm이상에서는 급격히 감소하는 것을 알 수 있

다. 이는 가공깊이에 크게 영향을 주는 포텐셜 코어 영역인 $6.2d_n$ 이내로 5mm 이내로 이격거리를 설정하는 것이 유리하다고 보여지며, 이격거리가 증가될수록 에너지의 분포 밀도는 분산됨에 따라 가공깊이가 감소하는 것으로 보여진다.

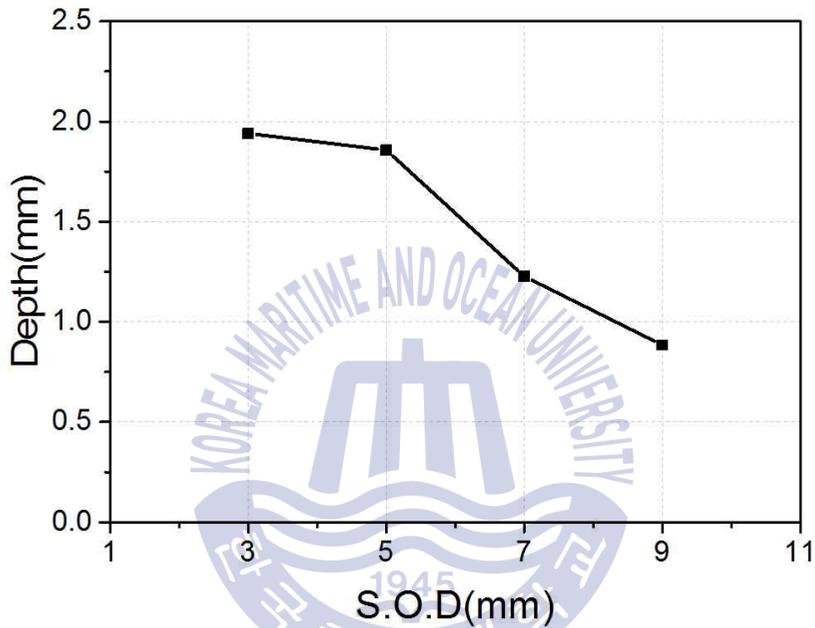


Fig. 21 Depth of Cut by SOD Change

3.3. 워터젯 가공변수에 따른 가공품질 평가

3.3.1 연마재 충척비율에 따른 가공깊이 평가

AWJ의 다양한 가공인자는 치수정밀도 및 가공깊이, 표면거칠기와 밀접한 관계를 가지며 특히 중첩비율과 연마재 충척각도는 언더컷 길이, Taper각도, 가공면의 높이편차 등 가공품질에 영향을 미친다.

Fig. 22는 AWJ 형상가공 시 중첩비율, 연마재 충척각도에 따라 발생하는 가공특성 모식도로, 중첩비율이 증가하면 가공깊이가 증가하고 표면평탄도가 우수하나 중첩비율이 높을수록 비산된 젯이 가공벽면을 재가공 시켜 언더컷을 발생시키며 이는 가공품질을 저하시키는 요소가 된다. 따라서 중첩비율, 연마재 충척각도에 따른 가공품질과의 연관도 분석을 위해 AWJ 연마재 충척각도와 중첩비율변화에 따른 가공깊이를 측정하였다. [13]

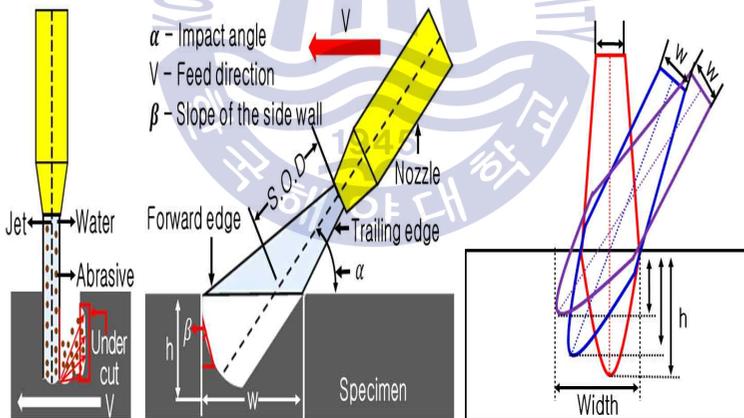


Fig. 22 Characteristic of AWJ Impact angle and Undercut

Fig. 23과 같이 실험 장치를 구성하였고, 펌프압력 1,500bar, 이송속도 1,200mm/min, 연마재유량 200g/min, 이격거리를 5mm로 고정하고, Ti6Al4V에 대한 연마재 충척각도(45° , 60° , 75° , 90°), 중첩비율(50%, 60%, 70%)변화에 따른 포켓가공실험을 진행하였다.

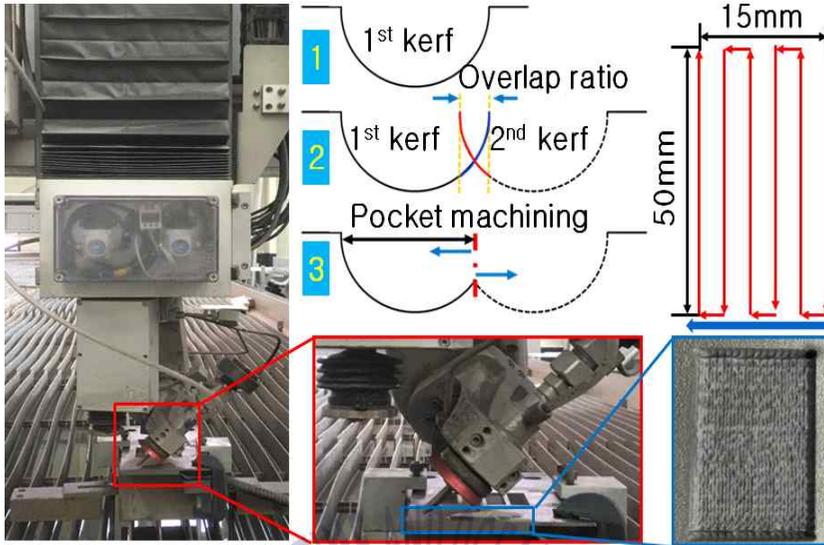


Fig. 23 Set up for AWJ Test

실험 결과 Fig. 24와 같이 가공깊이는 중첩비율과 연마재 충격각도가 클수록 증가하였고, 연마재 충격각도 90° 에서 중첩비율 40%에서는 평균 가공깊이 0.563mm, 중첩비율 50%에서는 평균 가공깊이 0.703mm, 중첩비율 60%에서는 평균 가공깊이가 0.918mm로 측정되어 중첩비율 증가에 따라 가공깊이 증가량이 약 1.78배 증가하였다. 이는 90° 에서 AWJ 깊이방향으로 가공력이 최대가 되고, 중첩비율이 클수록 기 가공된 면을 재가공하는 비율이 증가하기 때문으로 분석되었다.

또한 연마재 충격각도, 중첩비율에 따른 가공깊이 편차는 Fig. 25와 같이 연마재 충격각도가 증가할수록 가공깊이 편차 또한 증가되었다. 이는 연마재 충격각도가 90° 일수록 젯의 분사집중도가 증가하기 때문에 분사형상이 AWJ 깊이방향으로 뾰족한 포물선 형태로 가공경로에 따라 생성된 산과 골의 높이차가 증가하여 가공깊이 편차가 증가하였고, 충격각도가 작을수록 산과 골이 낮아 가공깊이 편차가 감소하였다.

Fig. 26에서 Fig. 29는 포켓가공 시편이다.

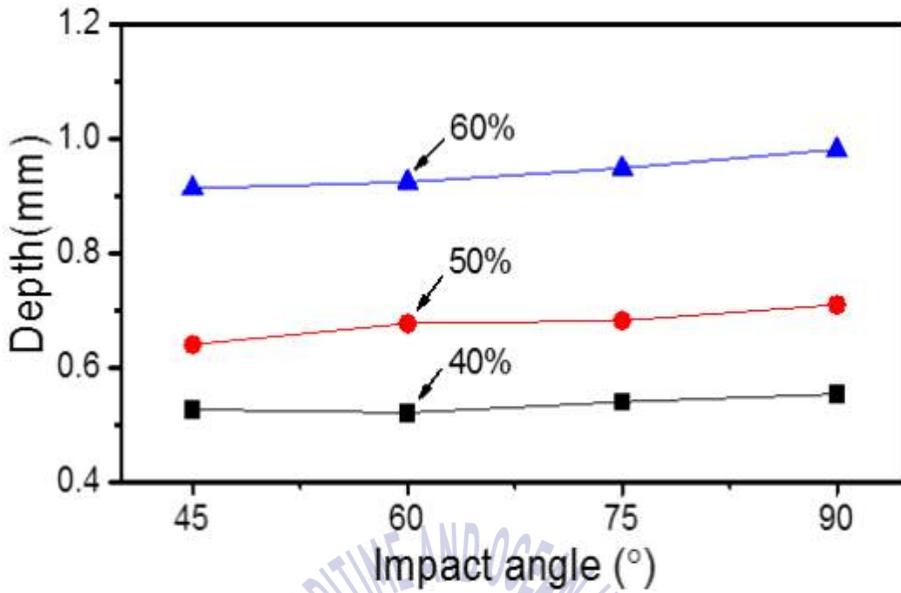


Fig. 24 Comparison of Depth of Cut by Impact Angle and Overlap Ratio

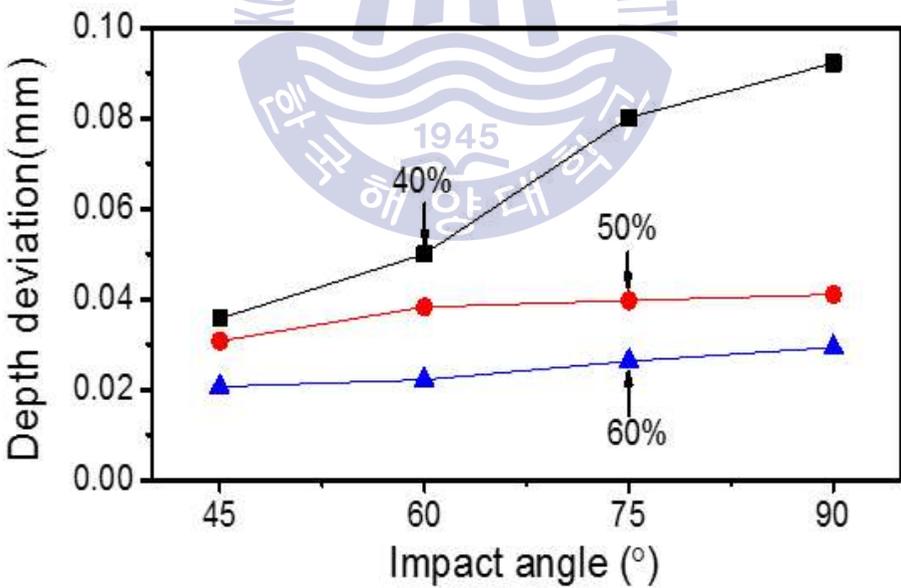


Fig. 25 Comparison of Depth Deviation by Impact Angle and Overlap Ratio

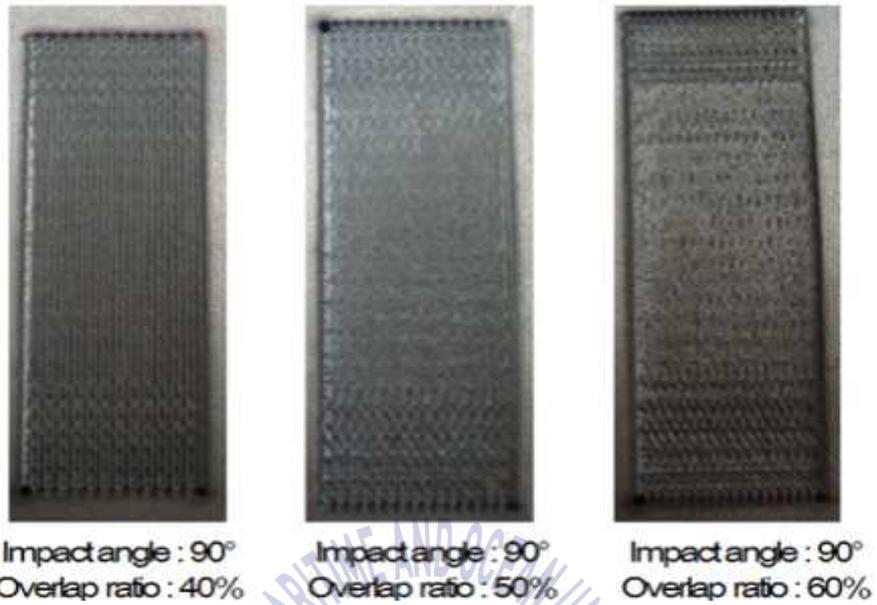


Fig. 26 Specimen Shape of Ti6Al4V at
Impact angle 90° , Overlap Ratio (40%, 50%, 60%)



Fig. 27 Specimen Shape of Ti6Al4V at
Impact angle 75° , Overlap Ratio (40%, 50%, 60%)

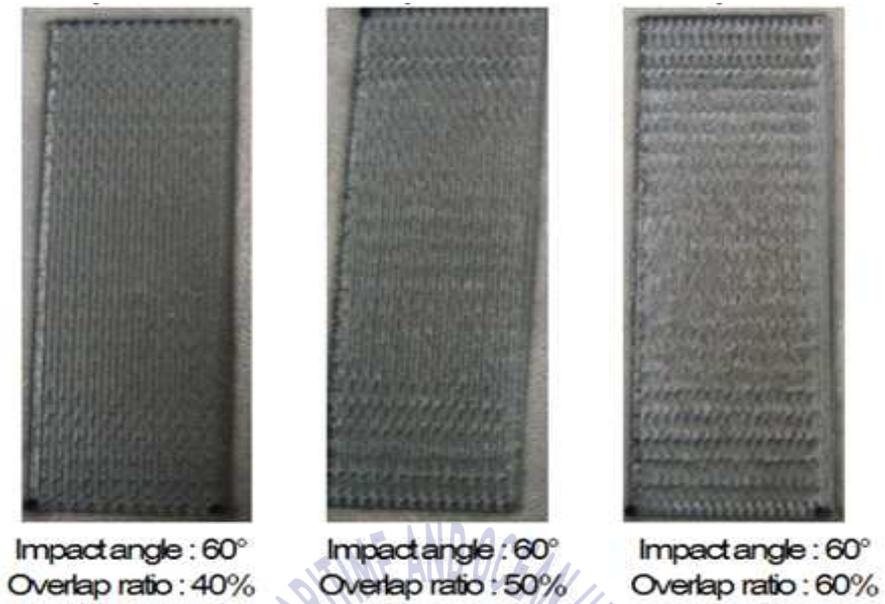


Fig. 28 Specimen Shape of Ti6Al4V at
Impact angle 60° , Overlap Ratio (40%, 50%, 60%)

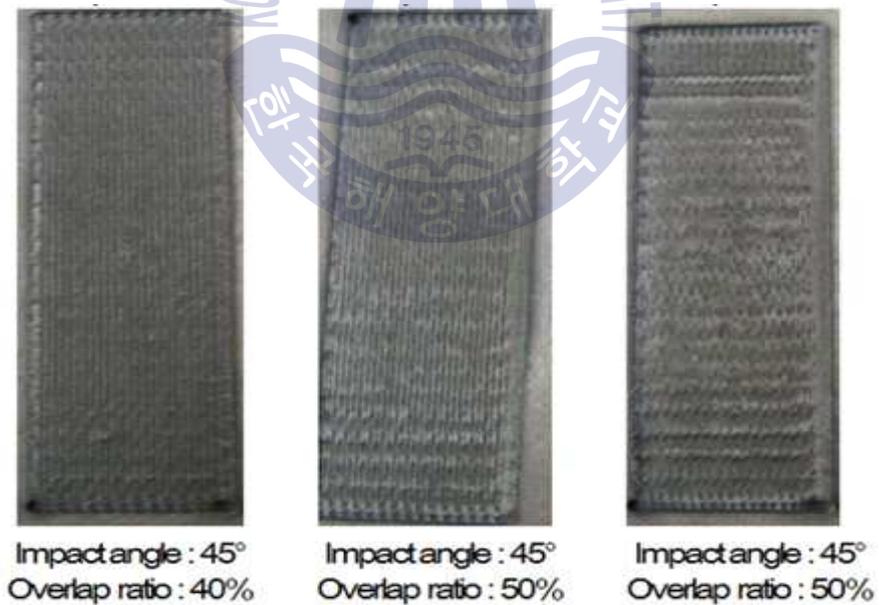


Fig. 29 Specimen Shape of Ti6Al4V at
Impact angle 45° , Overlap Ratio (40%, 50%, 60%)

제 4 장 난삭재 3D 워터젯 형상가공 특성평가

4.1 가공조건-가공깊이 상호관계 분석을 통한 가공깊이 예측

AWJ 가공깊이에 크게 영향을 주는 변수로 펌프압력, 이송속도, 연마재 유입량, 이격거리가 있다. 펌프압력, 이송속도, 연마재 유입량, 이격거리에 의해 연마재 입자의 운동에너지가 발생되고, 이러한 운동에너지가 실제 가공량 또는 가공깊이를 결정한다.

AWJ 가공에서 노즐에서 분사된 젯은 소재의 표면에 연속적인 충돌을 일으켜 가공이 이루어지는 1차 가공과 이송방향의 역방향으로 젯이 배출되면서 가공물과 접촉하여 발생하는 2차 가공으로 이루어진다. 1차 가공에 비해 2차 가공의 크기가 10% 이내로 크지 않고 2차 가공의 경우, 가공깊이보다 표면거칠기 및 표면 상태에 영향을 준다. 실제 가공에선 노즐에서 분사된 연마재가 가공표면에 출동하는 위치 및 간격이 불규칙적으로 발생하지만 통계적으로 연마재의 분사량을 확인할 경우 가공 면적에 동일하게 분포한다고 볼 수 있다. 따라서 가공깊이 예측 모델링에서 가공 면적에 동일하게 분포한다고 가정하였다. 노즐에서 분사되는 젯은 압력에 영향을 받을 포텐셜 코어 내부 영역과 주 영역에서의 젯 중앙라인의 속도 분포는 식 (1)과 같다. 본 논문에 인용된 수식은 문헌 [12]에 의거하여 연마재의 운동에너지에 관한 간략한 수식 전개를 나타낸다.

$$v_s = \begin{cases} v_{awj} & \text{for } S \leq 6.2 d_n \\ v_{awj} \left(\frac{6.2 d_n}{S} \right) & \text{for } S \geq 6.2 d_n \end{cases} \quad (1)$$

d_n : Diameter of Nozzle

젯과 가공물의 거리, 이격거리가 $6.2 d_n$ 이하에서 가공한다고 가정하고 식을

전개하면 젯의 중심에서 r 만큼 거리가 증가함에 따라 젯의 속도는 감소하게 되며 최종적으로 중심에서의 거리가 r_A 가 되면 젯의 속도는 0으로 감소한다. 따라서 식 (2)와 같이 젯의 속도 분포 계산식을 적용할 수 있다.

$$v_{xy} = v_s \exp\left(\ln 2 \left(\frac{r}{r_A}\right)^2\right) \quad (2)$$

r_A : Radius of processing area

r : Distance of center

v_{xy} : Velocity of AWJ

위치에 따른 연마재 입자의 속도를 정리하고 m_a 에 대해서 위의 식을 이용하여 다시 전개하면 식 (3)과 같이 표현이 가능하다

$$v_{xy} = \frac{1}{1 + C_a} \sqrt{\frac{2p_w}{\rho_w}} \exp\left(\ln 2 \left(\frac{\sqrt{r_A^2 - x^2 - y^2}}{r_A}\right)^2\right) \quad (3)$$

x : Distance of center
(orthogonal direction of traverse direction)

y : Distance of center (traverse direction)

위에서 유도한 속도로 운동에너지 방정식에 적용하면 식 (4), 식 (5)와 같이 표현된다.

$$K_e = \frac{1}{2} m_p v_{xy}^2 \quad (4)$$

$$K_e = \frac{1}{2} \frac{1}{(1 + C_a)^2} \frac{\dot{m}_a A}{D v_t} \frac{2p_w}{\rho_w} \exp\left(2 \ln 2 \left(\frac{r_A^2 - x^2 - y^2}{r_A^2}\right)\right) \quad (5)$$

그리고 연마재 유입량(\dot{m}_a)은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_a = C_a \dot{m}_w = C_a \rho_w \frac{1}{4} \pi d_n^2 L_w \frac{1}{t} \quad (6)$$

d_n : Diameter of Nozzle

L_w : Length of water

여기에서 \dot{m}_w 는 초당 분사되는 물의 양을 나타낸다. 만약 노즐에서 분사되는 형상을 노즐의 지름(d_n)과 같은 길이를 가진 원기둥 형상으로 표현할 때 식(6)과 같이 나타나며 L_w 는 원기둥의 높이를 나타낸다. L_w 는 초당 분사되는 물 원기둥의 높이를 나타내기 때문에 시간으로 나누면 물이 초당 가는 거리와 같다. 따라서 식 (7)과 같은 식이 성립한다.

$$\frac{L_w}{t} = v_{wj} \quad (7)$$

따라서 연마재 유입량을 다시 정리를 하면 식 (8)과 같다.

$$\dot{m}_a = C_a \rho_w \frac{1}{4} \pi d_f^2 v_{wj} \quad (8)$$

속도 v_{wj} 를 압력과 관계된 식으로 변경하면 식 (9)와 같이 표현할 수 있다. 따라서 연마재 유입량과 펌프압력 변수가 직접적인 상호 관계가 있음을 확인할 수 있다.

$$\dot{m}_a = C_a \rho_w \frac{1}{4} \pi d_f^2 \sqrt{\frac{2p_w}{\rho_w}} \quad (9)$$

또한, 위의 식을 상수항으로 묶으면 식 (10)과 같다.

$$K_e = k \frac{C_a A}{(1 + C_a)^2} \frac{p_w^{1.5}}{D v_t} \exp\left(2 \ln 2 \left(\frac{r_A^2 - x^2 - y^2}{r_A^2}\right)\right) \quad (10)$$

k : constant

식 (10)은 중심으로부터 이송방향의 직각 방향으로 x , 이송방향으로 y 의 거리가 떨어진 곳에서의 연마재 입자의 운동에너지를 나타낸 것이다. 연마재 입자가 가진 운동에너지는 펌프압력의 1.5승에 비례하고, 가공영역의 지름(D), 즉 이격거리와 이송속도에 반비례한다. 이론적인 식에서 연마재 입자의 형상과 크기를 동일하게 가정하고 젯의 분포 영역에 균일하게 배치된다고 가정하였을 때 연마재 입자의 단위 면적당 무게는 연마재유입량과 이송속도의 비에 의해 결정되는 것을 확인하였다.

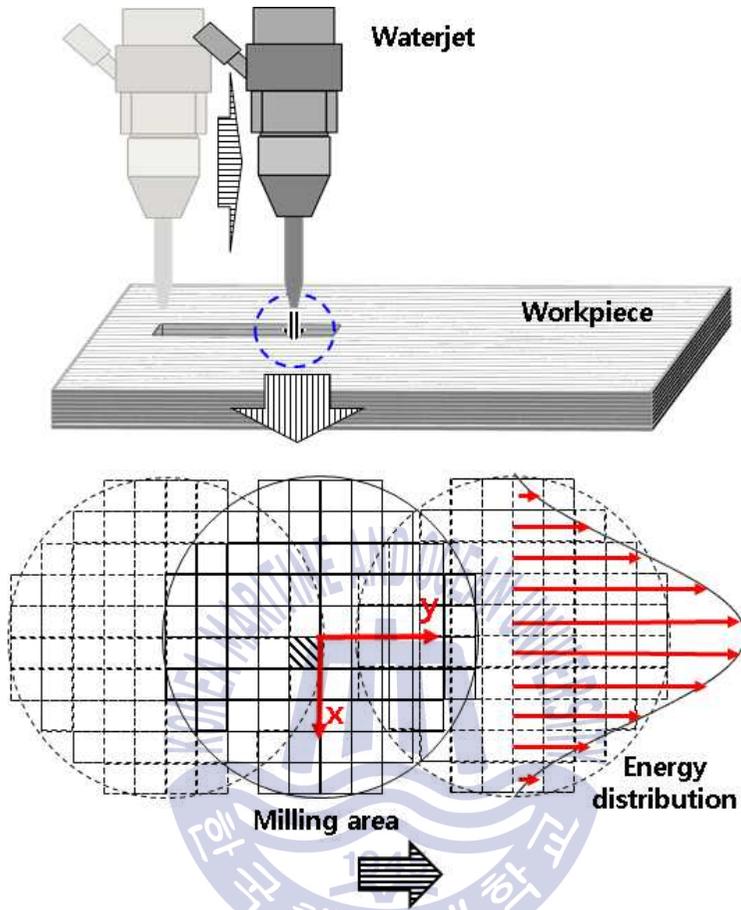


Fig. 30 Schematic Diagram of AWJ Cutting Modeling

연마재의 운동에너지에 관한 식을 기반으로 AWJ 가공깊이 모델링을 통해 가공깊이를 구할 수 있다. 연마재 입자가 가지는 에너지가 소재가 제거되는 부피와 비례하므로, 가공깊이는 젯 중심에서 x 거리만큼 떨어진 곳의 가공깊이(h_x)는 부피(V_x)를 단위면적(A)으로 나눈 것과 같으므로 식 (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$h = K \frac{C_a}{(1 + C_a)^2} \frac{p_w^{1.5}}{D v_t E_f} \int_{-r_A}^{r_A} \exp\left(2 \ln 2 \left(1 - \frac{y^2}{r_A^2}\right)\right) dy \quad (11)$$

식 (11)에 의해 최대 가공깊이는 젯의 중심부(x=0)인 영역에서 발생하고, 젯의 중심부에서 발생하는 최대 가공깊이는 식 (12)와 같이 정리 할 수 있다.

$$h = K \frac{C_a}{(1 + C_a)^2} \frac{p_w^{1.5}}{D v_t E_f} \frac{64 r_A}{15} \quad (12)$$

최종적으로 상수항을 K_h 로 묶게 되면 식 (13)과 같이 정리된다.

$$h = K_h \frac{C_a}{(1 + C_a)^2} \frac{p_w^{1.5}}{v_t E_f} \quad (13)$$

최대 가공깊이에 영향을 미치는 주 변수는 펌프압력(p_w), 이송속도(v_t), 파단 에너지(E_f), 물과 연마재 혼합비(C_a)이다. 실제 가공깊이에 영향을 주는 가중치를 확인하기 위하여 식에 나타난 중요 변수 5가지를 각각 독립 변수로 설정하고 가공깊이를 종속 변수로 설정하여 다중회귀분석을 진행한 결과 식 (14)와 같이 가공깊이 예측 식이 도출되었다.

$$h = 10^{13.27} \frac{C_a^{0.76}}{(1 + C_a)^{1.92}} \frac{p_w^{1.56}}{v_t^{1.31} E_f^{0.51}} \quad (14)$$

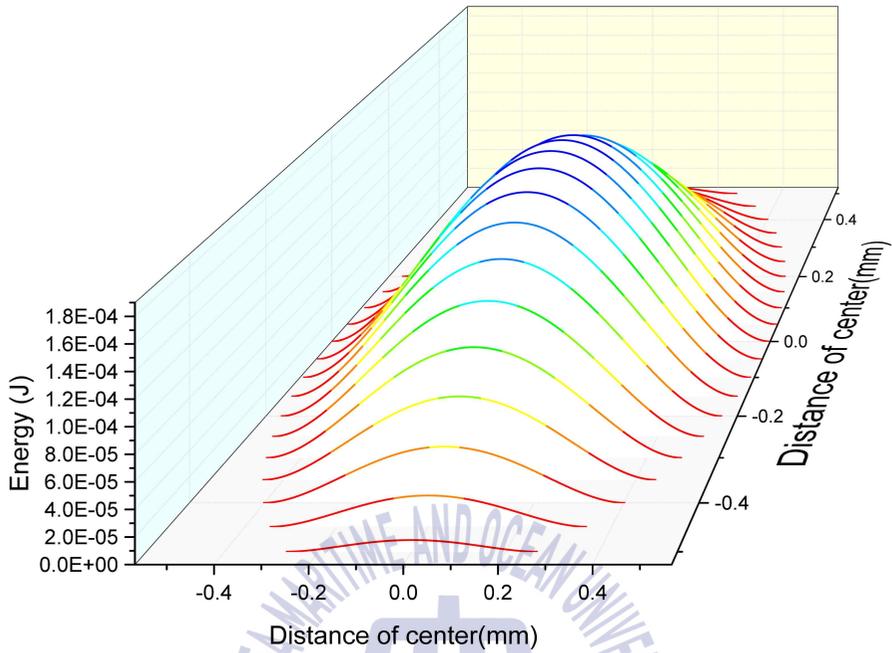
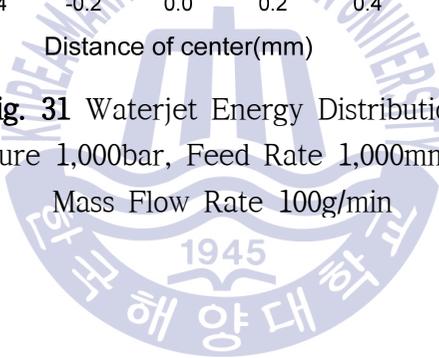


Fig. 31 Waterjet Energy Distribution
 at Pump Pressure 1,000bar, Feed Rate 1,000mm/min, Abrasive
 Mass Flow Rate 100g/min



4.2 가공깊이 시뮬레이션 성능평가

가공깊이 시뮬레이션 성능평가를 위해 다음과 같은 가정을 하였다. 연마재 입자의 형상은 크기가 서로 다른 구의 형태를 가지며, 연마재가 소재에 충돌하여 소재를 제거한 후 사라지도록 하였고, 2차 충돌에 의한 가공은 제외하였다. 연마재는 소재와 충돌 시 항상 일정한 크기들의 조합으로 충돌하게 하였다. 노즐에서 분사된 연마재가 소재에 충돌되는 연마재 크기의 조합을 연마재 전체에서 각 크기별 퍼센트를 정하였다. 이를 이용하여 Fig. 32와 같이 한 번에 소재와 충돌하는 연마재 입자 그룹을 하나의 시트로 정의하고, 시트당 연마재입자의 총무게가 정해지므로 연마재 유입량에 따라 연마재 시트의 개수가 정해지며 초당 소재면에 충돌되는 연마재입자 시트의 개수가 정해진다.

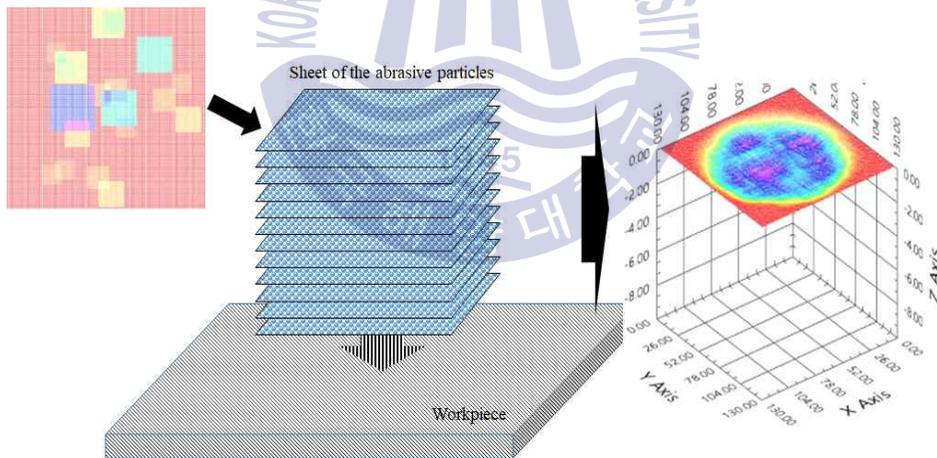


Fig. 32 Distribution of Abrasive Particles and Sheet of Abrasive Particles

노즐에서 분사된 연마재가 소재에 충돌되는 연마재 크기의 조합을 연마재 전체에서 각 크기별 퍼센트를 설정하고, 이를 이용하여 연마재 입자 그룹을 하나의 연마재 충돌시트로 생성이 가능하다. Table 4와 같이 시뮬레이션에 사용된 연마재 #80의 입자 정보를 크기별로 정리하였다.

Table 4 #80 Abrasive Particle data

Size range (mm)	Approximated particle size (mm)	Mass of each particle (mg)	Percentage by mass of each size in the whole garnet abrasive (%)
0.250-0.315	0.275	0.041	0.17
0.200-0.250	0.225	0.029	0.29
0.180-0.200	0.190	0.014	0.13
0.160-0.180	0.170	0.010	0.16
0.125-0.160	0.140	0.006	0.14
0.09-0.125	0.125	0.004	0.11

펌프압력 1,000bar, 이격거리 5mm, 연마재 유입량 50g/min, 이송속도 100mm/min 조건과 펌프압력 1000bar, 이격거리 7mm, 연마재 유입량 150g/min 이송속도 100mm/min 조건에서 실험 데이터와 시뮬레이션 데이터를 비교하였다. 분사되는 연마재 입자는 가우스분포에 의해 노즐 중심부에서 가장 강한 힘으로 가공되고, 노즐 외곽부에 위치한 입자의 분포는 랜덤(Random)분사를 구사하여 실제 가공환경과 유사하게 모식하였다.

실험결과 Fig. 33과 Fig. 34와 같이 실험 데이터와 시뮬레이션 데이터를 비교했을 때 시뮬레이션에서 비 균일한 입자의 운동에너지로 인해 실제 가공과 유사한 형상이 나타나지만, 시뮬레이션의 가공표면 프로파일이 실제 가공된 시편의 표면보다 요철형상이 크게 나타났다. 이는 실제 가공에서는 가공 후 발생하는 후류의 남은 잔류에너지로 인해 2차 가공이 일어나는 것으로 판단되며, 실제 가공에 주로 이용되는 주 에너지는 노즐에서 분사된 젯의 에너지이고, 가공 후 발생하는 후류 에너지는 형상을 완전히 바꿀 정도로 크지 않다고 판단되었기 때문에 개발된 시뮬레이터에서는 이러한 2차 가공 요소는 제외하였다. 2차 가공에 의한 후류 효과를 제외하더라도 가공시편과 시뮬레이션 결과 모두 가공깊이 오차 90%이상의 유사한 가공깊이를 나타냄을 확인하였다. Fig. 35와 Fig. 36은 실험 및 시뮬레이터 결과 단면을 비교한 그래프이다.

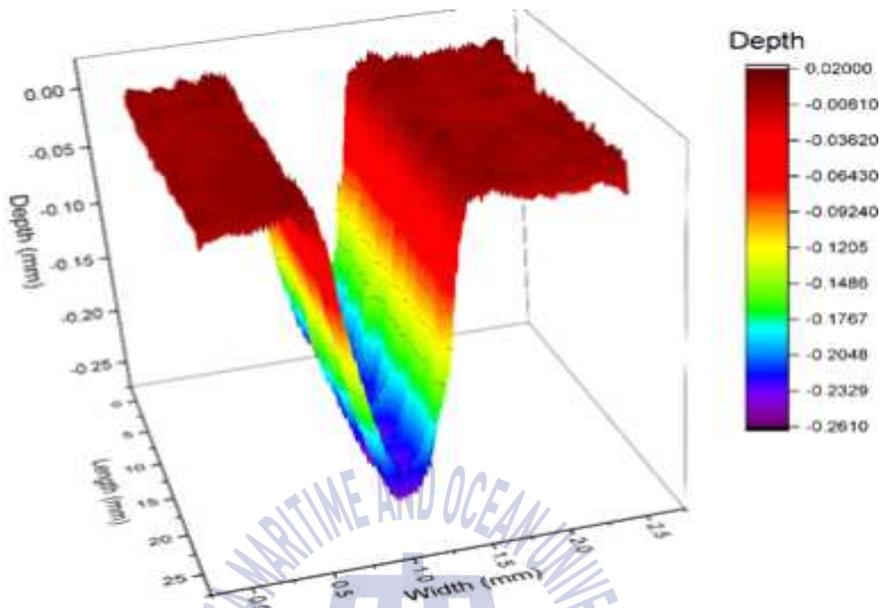


Fig. 33 Experiment Result of 3D Profile Shape

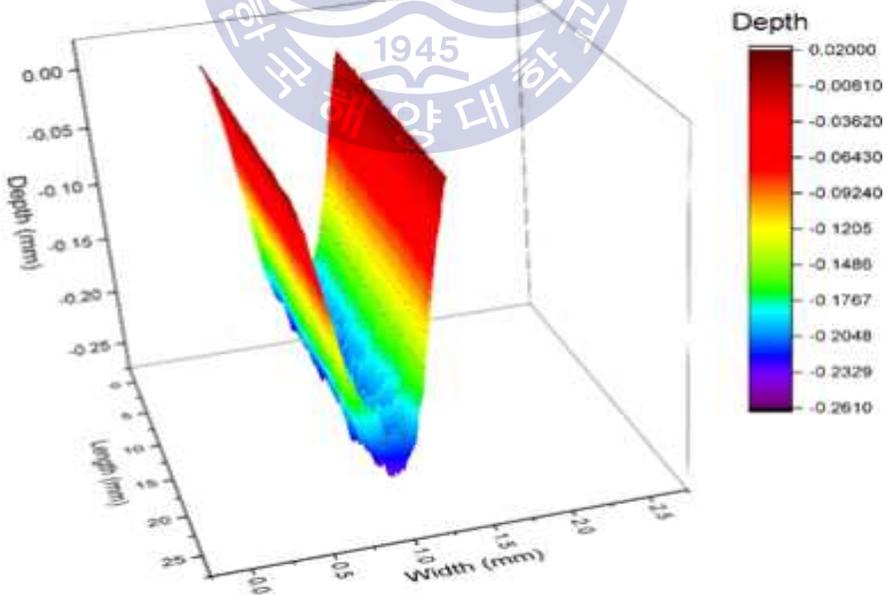


Fig. 34 Simulation Result of 3D Profile Shape

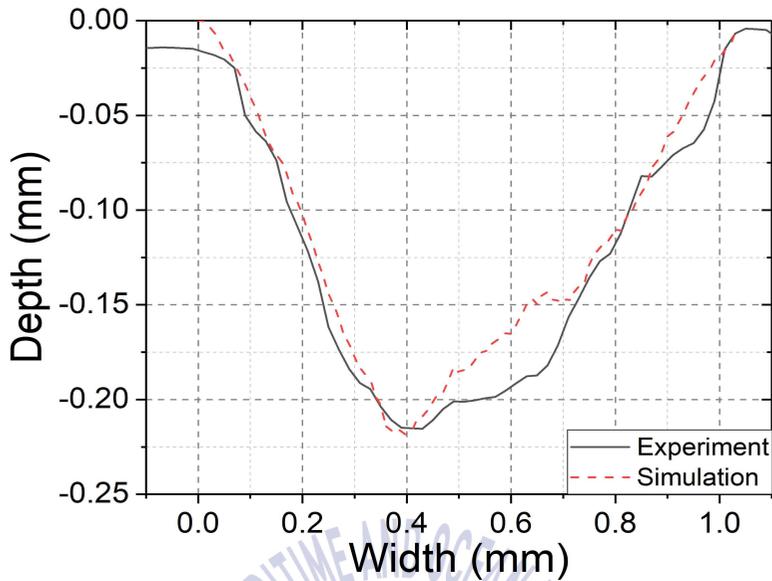


Fig. 35 Comparison between Experiment and Simulation at Pressure 1,000bar, SOD 5mm, Abrasive Mass Flow Rate 50g/min, Feed Rate 1,000mm/min

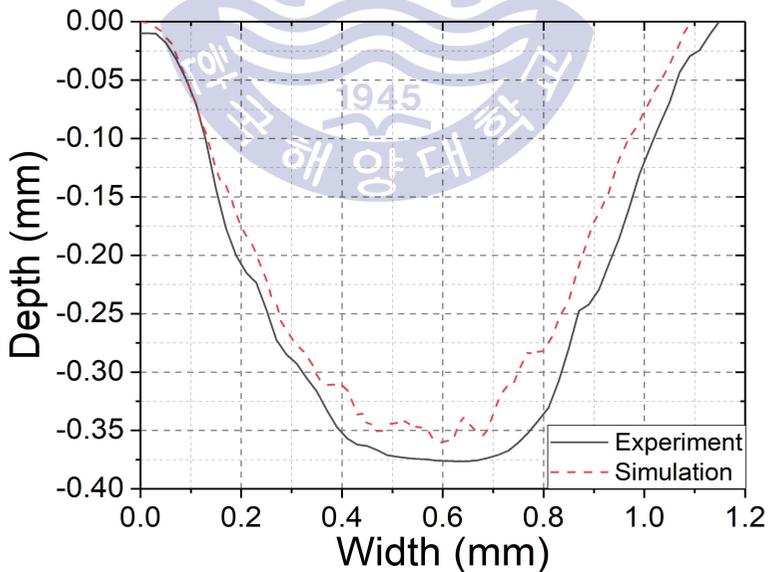


Fig. 36 Comparison between Experiment and Simulation at Pressure 1,000bar, SOD 7mm, Abrasive Mass Flow Rate 150g/min, Feed Rate 1,000mm/min

4.3 난삭재 3D 형상 워터젯 밀링 가공 성능평가

4.3.1 워터젯 3D 형상 가공 시스템 구성

로봇을 이용하여 난삭재의 대표적인 소재인 티타늄 3D 형상을 구현하기 위해 Fig. 37과 같이 실험 장치를 구성하였다. 가공 조건은 Table 5와 같이 펌프압력 1,500bar, 연마재 유입량 200g/min, 이격거리 5mm로 고정하였고, 로봇의 이송속도 변화를 이용하여 Ti6Al4V 소재를 가지고 3D 워터젯 밀링 가공 실험을 수행하였다.

3D 형상 구현을 위해 Fig. 38과 같이 5mm 간격으로 가공깊이 변화를 계산하였고, 곡선 구현을 위해 속도 변화 단계를 20개로 세분화하여 중첩비율 30%, 50%, 70%일 때 이송속도 조건을 선정하였다. 중첩비율이 증가하면 기존에 가공된 면을 재 가공시키는 비율이 증가하여 가공깊이는 증가되기 때문에 중첩비율이 높을수록 속도를 증가시켜 최종 결과물과 같은 수치를 갖도록 하였다.

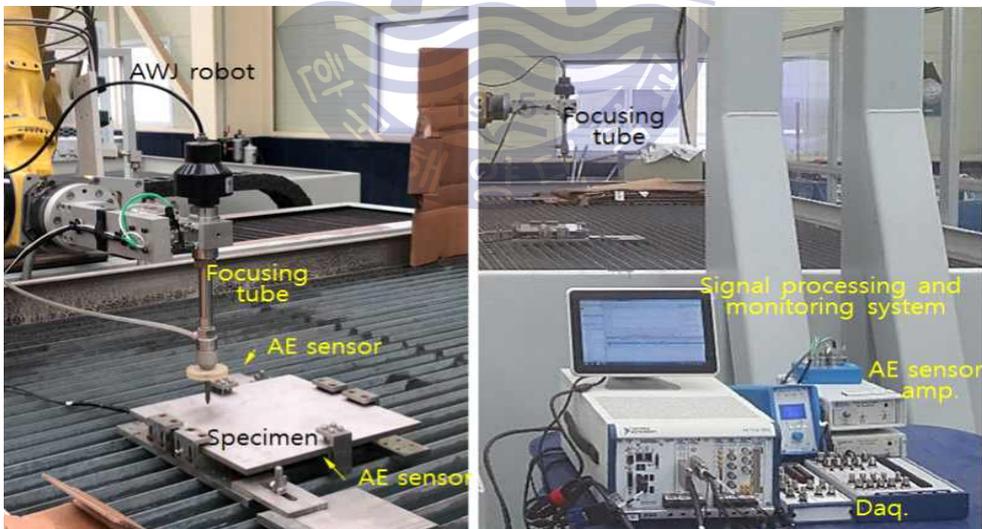


Fig. 37 Set up for Robot based 3D Shape Cutting System

Table 5 AWJ Cutting Conditions of 3D Shape Machining

Parameter	Condition
Material(mm)	Ti6Al4V
Nozzle Diameter(mm)	1.02
Abrasive(material, mesh)	Garnet, #80
SOD(mm)	5
Pressure(bar)	1,500
Feed Rate(mm/min)	0mm/min~75mm/min
Abrasive Mass Flow Rate(g/min)	200
Overlap Ratio(%)	30, 50, 70

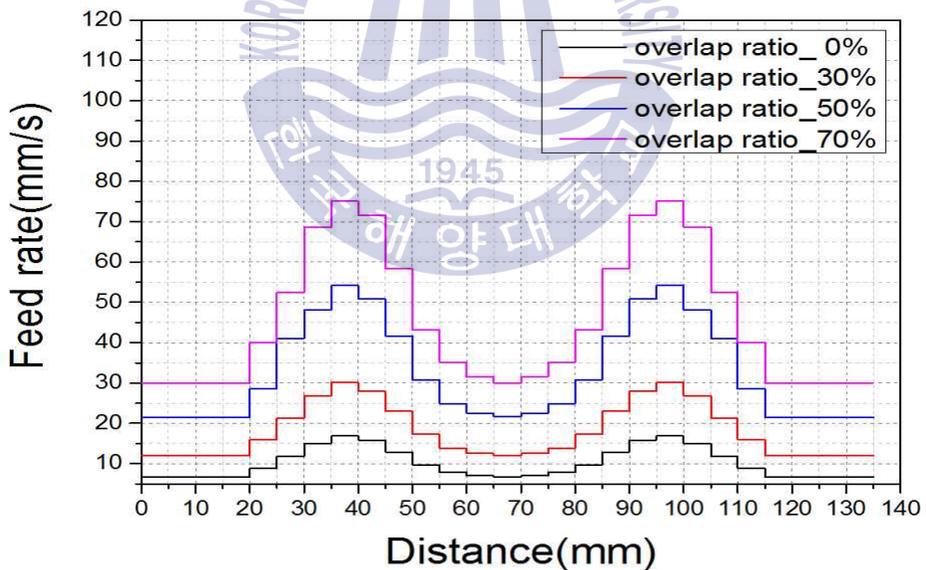


Fig. 38 3D Shape Profile Design in according to Feed Rate

4.3.2 워터젯 3D 형상 워터젯 밀링 가공 결과 비교

중첩비율에 따라 가공깊이를 측정한 결과 Table 6과 같이 중첩비율이 30%일 때는 Max. 0.27mm, Min. 0.039mm 오차가 발생하였고, 중첩비율 50%일 경우 Max. 0.487mm, Min. 0.096mm, 중첩비율 70%일 경우 Max. 0.219mm, Min. 0.022mm 오차가 발생하였다. 이는 중첩비율이 낮을수록 가공깊이가 크고, 중첩비율이 높을수록 가공깊이 오차가 작은 것을 알 수 있었으며, 중첩비율을 다르게 하여도 목표값 대비 0.5mm 이내의 가공오차 범위를 확인하였다.

Fig. 39는 중첩비율에 따른 가공깊이 결과를 나타낸 그래프이며, Fig. 40은 구현하고자 하는 최종 3D 가공 도면이다. Fig. 41과 Fig. 42는 중첩비율 30%일 때 가공 결과와 가공 시편을 나타내었고, Fig. 43과 Fig. 44는 중첩비율 50%일 때 가공 결과와 가공 시편이며, Fig. 45와 Fig. 46은 중첩비율 70%일 때 가공 결과와 가공 시편을 나타내었다.

Table 6 AWJ 3D Shape Cutting Test Result

Pressure (bar)	SOD (mm)	Mass Flow Rate (g/min)	Overlap Ratio (%)	Machining Error (mm)	
				Max.	Min.
1,500	5	200	30	Max.	0.27
				Min.	0.039
			50	Max.	0.487
				Min.	0.096
			70	Max.	0.219
				Min.	0.022

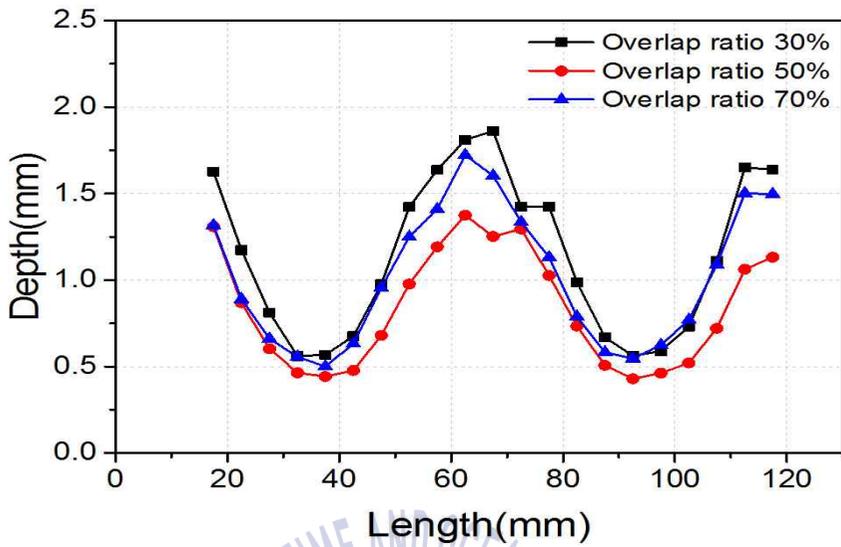


Fig. 39 Comparison of Depth of Cut in according Overlap Ratio

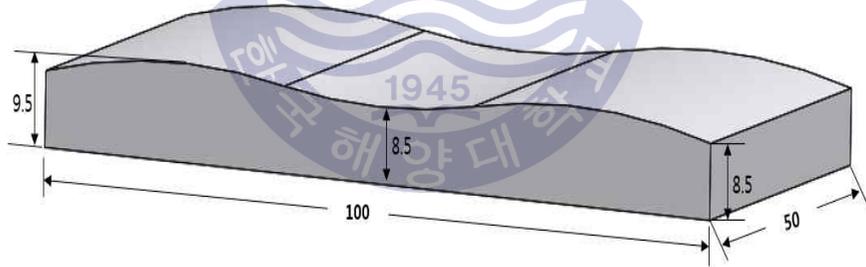


Fig. 40 Final 3D Shape Design

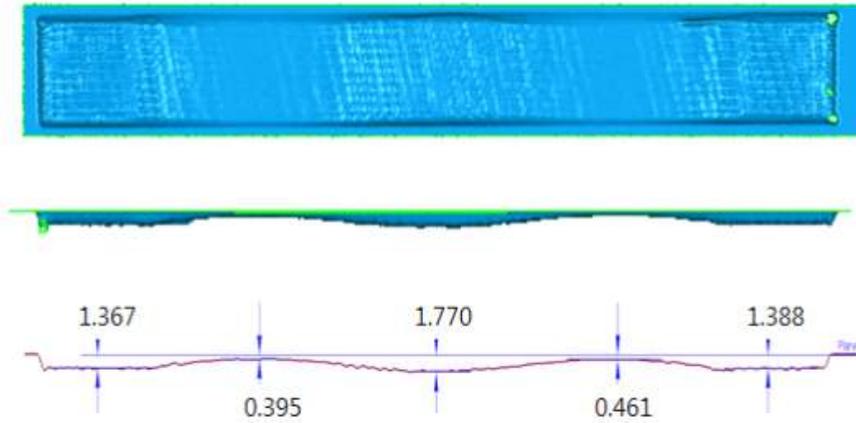


Fig. 41 Result of AWJ 3D Cutting at Overlap Ratio 30%



Fig. 42 3D Shape of Ti6V14V Cutting at Overlap Ratio 30%

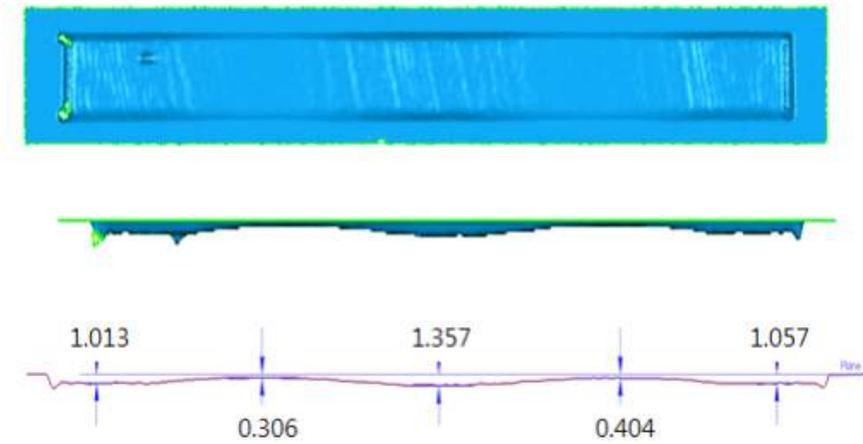


Fig. 43 Result of AWJ 3D Cutting at Overlap Ratio 50%



Fig. 44 3D Shape of Ti6Al4V Cutting at Overlap Ratio 50%

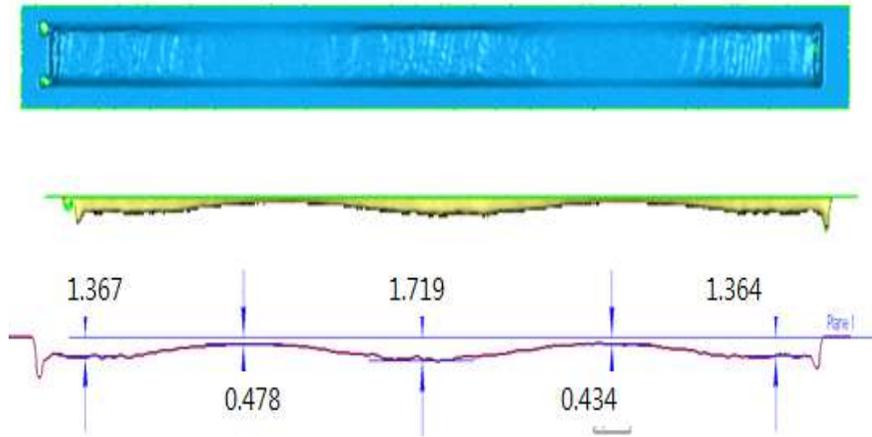


Fig. 45 Result of AWJ 3D Cutting at Overlap Ratio 70%



Fig. 46 3D Shape of Ti6Al4V Cutting at Overlap Ratio 70%

제 5 장 결론

본 논문에서는 대표적인 난삭재 소재인 SUS 304, Ti6Al4V, Inconel 600의 AWJ 밀링가공을 위해 각 소재가 가지고 있는 기계적 특성으로 인한 피삭성을 검토하고, AWJ 3D 형상 가공품질에 영향을 미치는 워터젯 가공변수인 펌프압력, 이송속도, 연마재 유입량, 이격거리, 충격각도, 중첩비율에 따른 가공깊이 변화를 시뮬레이션 예측값과 실험값의 차이를 비교하였다.

1. 펌프압력이 증가할수록 단위시간당 가공에 참여하는 연마재와 물의 운동 에너지, 즉 워터젯 에너지가 증가하여 가공깊이가 증가하였다. 기준 압력 1,000bar 대비 최대 압력 3,000bar에서 가공깊이를 비교한 결과, Ti6Al4V의 경우 약 7.75배, SUS 304의 경우 약 5.24배, Inconel 600의 경우 약 6.12배 증가하였다.
2. 연마재 유입량이 증가할수록 운동 에너지를 가진 연마재 입자의 개수가 증가하여 가공깊이가 증가하였다. 기준 연마재 유입량 100g/min 대비 최대 연마재 유입량 300g/min에서 가공깊이를 비교한 결과, Ti6Al4V의 경우 약 1.73배, SUS 304의 경우 약 3.53배, Inconel 600의 경우 약 1.58배 증가하였다.
3. 이송속도가 증가할수록 단위면적당 충돌하는 연마재의 양이 줄어들게 되어 운동 에너지의 전달력이 떨어져 가공깊이가 감소하였다. 기준 이송속도 500mm/min 대비 최대 이송속도 700mm/min에서 가공깊이를 비교한 결과, Ti6Al4V의 경우 약 0.71배, SUS 304의 경우 약 0.72배, Inconel 600의 경우 약 0.61배 감소하였다.
4. Ti6Al4V, SUS 304, Inconel 600 중 Ti6Al4V이 가장 높은 경도를 가지고 있으나, 탄성계수 및 전단탄성율이 낮아 소재 변형에 대한 저항성이 낮아 절삭성이 뛰어나고, Inconel 600은 높은 정도뿐만 아니라 탄성계수 및 전단탄

- 성율이 높아 절삭성이 낮음을 확인하였다.
5. 이격거리는 워터젯의 에너지 감소와 분사면적 증가영향을 최소화하기 위해 포텐셜 코어 영역인 3~5mm 이내가 유리하며, 이격거리가 증가될수록 에너지의 분포 밀도가 분산됨에 따라 가공깊이가 감소하였다.
 6. 중첩비율이 증가할수록 가공깊이 증가량이 약 1.78배 증가하였고, 충격각도가 90° 에 가까울수록 소재에 분사되는 연마재가 균일하여 표면거칠기가 감소하였다.
 7. 3D 워터젯 밀링 가공에 대한 시뮬레이션 예측값과 실험값을 비교했을 때 가공깊이 오차 90%이상의 유사한 가공깊이를 나타냄을 확인하였으며, 3D 물결 형상에 대한 워터젯 밀링 가공 결과 목표값 대비 0.5mm 이내의 가공오차 범위를 확인하였다.

본 논문을 통해 SUS 304, Ti6Al4V, Inconel 600 등 난삭재 소재의 기계적 특성으로 인한 피삭성을 확인하였고, AWJ 3D 밀링가공의 가공변수에 따른 가공형상 모델링을 통한 가공깊이 오차를 확인할 수 있었다. 본 논문을 기반으로 향후 난삭재 소재의 범위를 확대하여 AWJ 밀링가공 시 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] A. W. Momber and R. Kovacevic, “Principles of abrasive water jet machining, “ New York: Springer, New York, 1998.
- [2] G. A Escobar-Palafox, R.S Gault, K Ridgway. 2012 Characterisation of abrasive water-jet process for pocket milling in Inconel 718, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012
- [3] European Researchers Work on Control Systems for 3D Waterjet Milling 2012. WJTA-IMCA
- [4] M. Hashisi “Milling with Abrasive-Waterjets--A Preliminary Investigation“ 1987 Proceeding of the 4th U.S. Water Jet Conference, 01-20
- [5] M. Hashisi “A Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive Waterjets“ 1984 ASME Journal Engineering Materials and Technology, Vol.106, No.1, pp.88-100
- [6] N. Rajaratnam, Turbulent Jets, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1976. 20
- [7] Kovacevic, R.; Hashish, M.; Mohan, R.; Ramulu, M.; Kim, T.J.; Geskin, E.S., “ State of the art of research and development in abrasive waterjet machining, “ Transactions of ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 119: 765-785, 1997
- [8] Huaizhong Li, “Process analysis of abrasive jet micromachining for brittle materials” , Australian Journal of Mechanical Engineering, January 2012
- [9] H.Z. Li, J. Wang, J. M. Fan “Analysis and modeling of particle velocities in micro-abrasive air jet” , International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.49, Issue 11, September 2009, pp.850-858

- [10] 강명구 등, 2018. Mechanical Cutting Process Trends for Difficult-to-Cut Materials. 2018년도 한국정밀공학회
- [11] 김선창 등, 2012. 친환경 난삭재 가공기술 개발동향. KEIT
- [12] 김철민, 2018. 연마재 워터젯 에너지와 재료 파단에너지의 기반한 가공깊이 모델링. 박사학위논문. 부산:부산대학교
- [13] 박승섭, 김화영, 안중환, 2016. 중첩가공에 의한 워터젯 밀리의 가공면 특성. 2016년도 한국생산제조학회
- [14] 박승섭, 김화영, 안중환, 2016. 티타늄의 워터젯 밀링을 위한 가공깊이/폭 모델링. 2016년도 한국생산제조학회
- [15] [주]티오피에스. 2004. 정밀가공용 abrasive waterjet 설비의 개발에 관한 연구. 산업통상자원부
- [16] 남성호 등, 워터젯을 이용한 탄소섬유복합재(CFRP) 가공기술 동향. KEIT



감사의 글

제 인생에 있어서 큰 목표로 두고 있었던 공학석사 학위를 받기까지 저를 지켜봐주시고 많은 격려와 도움을 주신 모든 분들께 감사드립니다.

논문을 완성해 나가는 지금 이 순간도 공학도로서의 부족함을 많이 느끼고 아쉬움이 남는 시간이지만, 앞으로의 더 나은 미래를 위해 부단히 노력하도록 하겠습니다.

저를 공학도의 길로 이끌어주시고, 공학도가 가져야하는 자세와 가치관을 심어주시고, 많은 가르침과 조언을 아끼지 않으신 도덕희 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

사회생활과 학업을 병행할 수 있도록 배려해 주신 제가 몸담고 있는 (주)티오피에스의 최창훈 사장님께 감사드리며, 제가 지쳐있고 힘들어할 때마다 격려와 칭찬으로 힘이 되는 말과 함께 제 어깨를 두드려주신 제 인생의 선배이자 멘토인 고종민 소장님께 진심으로 감사드립니다.

그리고 논문 작성에 있어 많은 도움을 주신 한국생산기술연구원의 김성렬 박사님, 김철민 박사님께 감사의 인사를 전합니다.

저를 낳아주시고 한결같은 마음으로 응원해주시는 저희 부모님, 학창시절부터 지금까지 저의 든든한 지원군인 누나들과 동생들에게도 감사하며, 저희 집에 장가와서 고생하시는 자형께 이 자리를 빌어서 감사드립니다.

저를 많이 이뻐해 주셨던 장인어른과 항상 따뜻하게 반겨주시는 장모님께 감사의 인사를 전합니다.

마지막으로 우리 가정의 활력소이자 언제나 나를 미소 짓게 하는 천사 같은 내 딸 김수민, 세상에서 가장 사랑하는 아내 송한주씨께 이 순간을 함께 할 수 있어 진심으로 감사하다고 말하고 싶고, 언제나 한 여자의 든든한 남편이자 한 아이의 멋진 아빠가 되도록 노력하겠습니다.

감사합니다.