

친환경 난삭재 가공기술 개발동향

| 저자 | 김선창 PD / KEIT 산업용기계 PD실
박근석 책임 / KEIT 산업용기계 PD실
이석우 본부장 / 한국생산기술연구원
박경희 선임 / 한국생산기술연구원

SUMMARY

■ 목적

- ▶ 최근 항공/우주 및 자동차 등 첨단 주력산업을 중심으로 티타늄 및 복합재료와 같은 초경량 고경도의 난삭 소재의 비중이 급격히 증가함에 따라 난삭재의 고효율·친환경 가공기술 내용을 검토함

■ 주요 동향

- ▶ 유럽, 일본 및 미국 등 선진국에서는 난삭재 및 신소재 가공과 관련된 정부차원의 프로그램을 운용하며 가공 기술 개발에 주력하고 있고, 최근 선진 공구 메이커들은 공구, 소재, 코팅 및 공정 등 난삭재와 관련된 최적의 톨링 솔루션을 개발하여 제공하고 있음
- ▶ 특히, 극저온 가공기술, 극미량 절삭유 가공기술과 레이저 보조 가공기술 등 고효율·환경 친화형 가공기술 개발에 집중
- ▶ 국내에서도 난삭재의 사용이 확대될 전망이나 국내 난삭재 가공기술의 부족으로 난삭재 사용에 어려움을 겪고 있음
- ▶ 일부 국내 대기업과 공구메이커들은 난삭재 가공기술 개발에 노력 중이나 기술력과 연구인력 부족으로 기술 개발에 한계를 느끼고 있음

■ 시사점 및 정책제안

- ▶ 첨단소재의 가공 공정기술에 대한 지원 및 원천 기술 확보 필요
- ▶ 친환경기술 개발로 가공 생산성 확보 및 가공기술의 친환경화
- ▶ 대학 연구기반 확대를 위한 기초연구 프로그램의 병행 추진
- ▶ 공통 기반기술과 연관 산업의 연계 강화

1. 난삭재 개요 및 가공기술의 특성

■ 개요

▶ 난삭재의 정의 및 적용분야

- 난삭재(難削材)는 고강성 및 초경량 등 기계적 성질이 우수한 반면, 절삭이 어려운 소재로 분류되는 재료들로 내열성, 내식성 및 내마모성이 우수한 티타늄과 인코넬 등과 같은 신소재부터 알루미늄 합금과 같이 일반적으로 사용하고 있는 소재도 사용 목적에 따라 난삭재*로 분류되기도 함

* 난삭재 종류: 티타늄(Titanium), CGI(Compacted graphite iron), 인코넬(Inconel), 탄소섬유강화플라스틱(CFRP) 등

[표 1-1] 난삭재의 정의

구분	난삭재 정의
일반적 분류	<ul style="list-style-type: none"> • 경도가 크다 • 인장강도가 크다 • 열전도율이 낮다 • 가공경화가 생기기 쉽다 • 공구재료와 친화성이 높다
광의적 분류	<ul style="list-style-type: none"> • 피가공물의 재질 그 자체가 난삭성을 야기하는 특성을 가진 재료(티탄 합금, 초내열 합금, 세라믹스, FRP...등) • 피삭성이 불명확한 재료(주로 절삭 데이터가 없는 신소재 등) • 최적 가공조건이 다른 두 재료의 동시 가공(금속(Titanium 또는 aluminum)과 복합재료가 결합된 재료) • 형상적·구조적으로 절삭 가공이 곤란한 재료 • 현존하는 설비나 공작기계에서는 실현하기 어려운 고정밀도의 가공 정밀도가 요구되는 것

- 즉, 난삭재는 생산제품의 사용목적, 피삭재의 기계적 및 화학적 성질과 가공방법, 가공에 사용되는 공구 및 공작 기계 등에 의해 결정됨
- 난삭재의 적용분야로는 항공/우주, 자동차 및 바이오분야와 같이 고강성/초경량/고품질의 소재를 요구하는 분야에 주로 사용되고 있으며, 그 비중이 급속히 늘어나고 있는 추세임
- 특히, 항공 및 자동차 산업에서는 연료절감을 위한 고경도 경량소재 사용 비율이 급격히 증가
- 하지만, 이러한 첨단 소재들은 주로 절삭가공이 어려운 고강성 및 고인성 소재로 가공성이 낮은 것이 단점임

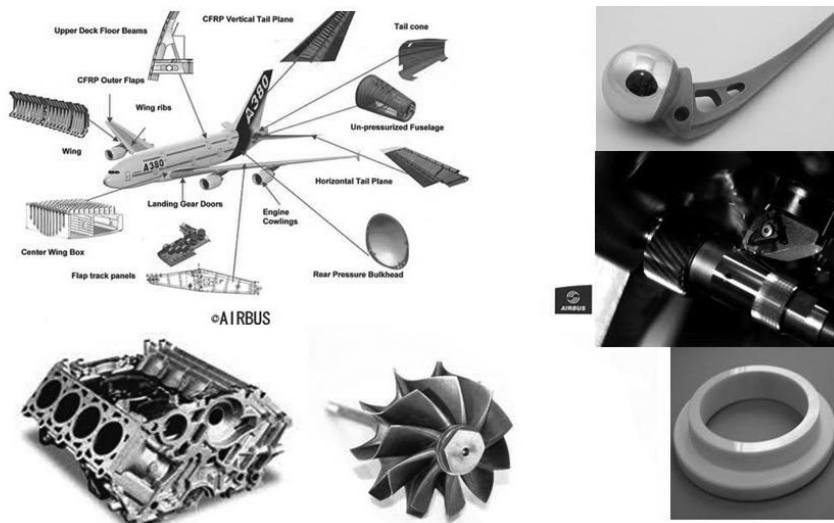
- ▶ 각 산업분야에 쓰이는 대표적인 난삭재의 종류로는 항공/우주 산업의 티타늄, 복합재료 및 니켈합금, 자동차 산업의 CGI(Compacted Graphite Iron), 세라믹 및 고경도강 그리고 바이오 산업의 바이오 세라믹 및 코발트 크롬 등이 있음

[표 1-2] 난삭재 종류 및 특성

난삭재 종류	재료 특성
티타늄(Ti-6Al-4V 등) 항공/우주, 바이오	<ul style="list-style-type: none"> - 고강도 경량 소재(높은 strength/weight ratio) - 뛰어난 내식성(스테인리스강보다 뛰어나 산이나 알칼리에 거의 침식되지 않음) - 낮은 열전도도: 7.0W/mK(탄소강: 50W/mK) - 낮은 탄성계수: 116GPa - 공구 재료와 높은 친화성
복합재료(CFRP* 등) 항공/우주, 자동차	<ul style="list-style-type: none"> - 높은 인장강도(일반강의 5-10배) - 피로 및 부식이 없음 - 고강도 경량 소재(높은 strength/weight ratio) - Fiber의 파손(fracture) 및 벗겨짐(Delamination)
니켈합금(Inconel 등) 항공/우주, 바이오	<ul style="list-style-type: none"> - 철 이상의 고내열성 - 고강도 및 고내식성 - 표면의 열경화 현상 발생(소성변형)
CGI 자동차	<ul style="list-style-type: none"> - 높은 내구성(durability) - 높은 강성(stiffness) 및 인장강도(tensile strength) (인장강도-일반 강철: 25kg/mm², CGI: 45kg/mm²) - 회색주철보다 2배의 피로강성(fatigue strength) - 낮은 가공성
세라믹(SiC 등) 자동차, 바이오	<ul style="list-style-type: none"> - 높은 내열성·내마모성 - 내식성·전기절연성이 뛰어나 - 신축성이 없고 부서지기 쉬움
고경도강 자동차, 기계	<ul style="list-style-type: none"> - 경도가 높고 인성이 풍부 - 내마모성이 우수 - 낮은 소재제거율

* CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics

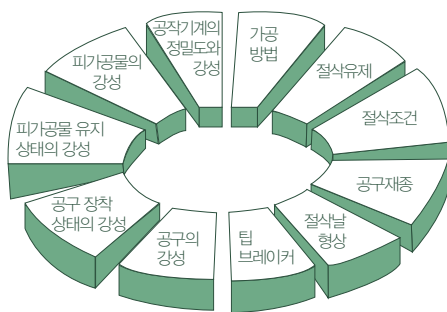
[그림 1-1] 난삭재의 적용분야



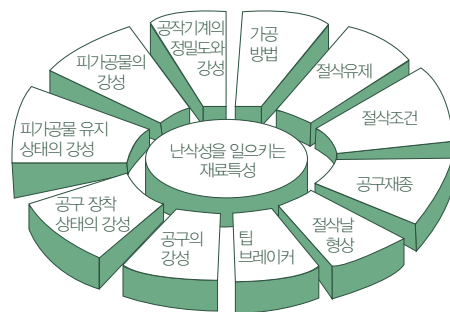
■ 난삭재 가공기술의 특징

- ▶ 난삭재 가공 시에는 공구마모가 빠르고 절삭온도 및 절삭저항이 크며, 표면조도가 크고 절삭칩이 날에 응착하는 현상이 발생함
 - 따라서, 난삭재는 소재에 따라 가공 시의 급격한 소성변형, 절삭공구의 급격한 마모 및 공구와의 화학반응 등 다양한 특성을 고려해야 함
 - 예를 들어, 신비의 금속이라 일컫는 티타늄 및 그 합금의 경우 내열성, 내식성 및 내마모성이 우수하고 열전도도와 전기전도도가 다른 금속에 비하여 낮기 때문에 가공 시 공구의 온도가 높아지고 공구의 마모가 빠르게 진행되어 공구파손이 쉽게 발생함
 - 황동, 구리, 알루미늄 및 그 합금과 같이 일반적으로 연한금속의 경우에는 가공 시 절삭성이 좋지 않기 때문에 가공 후 표면조도가 커져 정밀가공에 어려움이 많음

[그림 1-2] 절삭가공의 문제 요인



일반재료의 경우



난삭재의 경우

[표 1-3] 일반재와 난삭재의 공구수명 비교

피삭재		공구재종	절삭조건			절삭유제		공구 수명 시간 (min)	공구 수명 까지의 칩 제거량 (cm ³)	공구 수명 까지의 절삭거리 (km)
			절삭속도 (m/min)	절삭 (mm)	이송 (mm/rev)	유	무			
일반재	SCM440	UC6010	250	1.5	0.30	-	○	43.0	4.838	10.75
	SNCM439	U610	180	1.5	0.30	-	○	51.0	4.131	9.18
	S45C	NX33	200	1.5	0.28	-	○	58.0	4.872	11.60
	S38C	NX33	250	1.5	0.28	-	○	47.0	4.935	11.75
	FC3000	U410	200	1.5	0.30	-	○	62.0	5.580	12.40

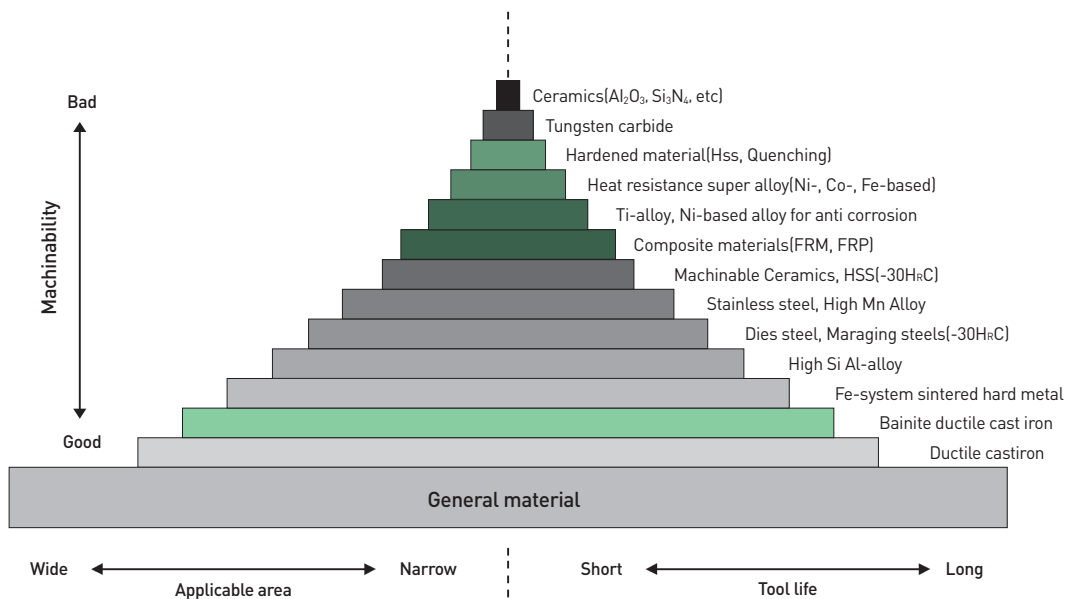
피삭재		공구재종	절삭조건			절삭유재		공구 수명 시간 (min)	공구 수명 까지의 칩 제거량 (cm³)	공구 수명 까지의 절삭거리 (km)
			절삭속도 (m/min)	절삭 (mm)	이송 (mm/rev)	유	무			
난삭재	Stellite No.12	HTi10	20	2.5	0.10	○	-	6.0	30	0.12
	Waspaloy	HTi10	25	1.0	0.10	○	-	14.0	35	0.35
	Hasteolloy B-2	UTi20T	16	1.0	0.15	○	-	7.5	18	0.12
	Inconel 718	HTi10	30	2.0	0.20	○	-	18.0	216	0.54
	Inconel 713C	HTi10	15	1.0	0.10	○	-	8.5	13	0.13
	Hastelloy C-276	HTi10	25	1.5	0.10	○	-	11.0	54	0.28
	Inconel 600	UP10H	40	2.0	0.15	○	-	6.0	72	0.24

▶ 난삭성의 평가

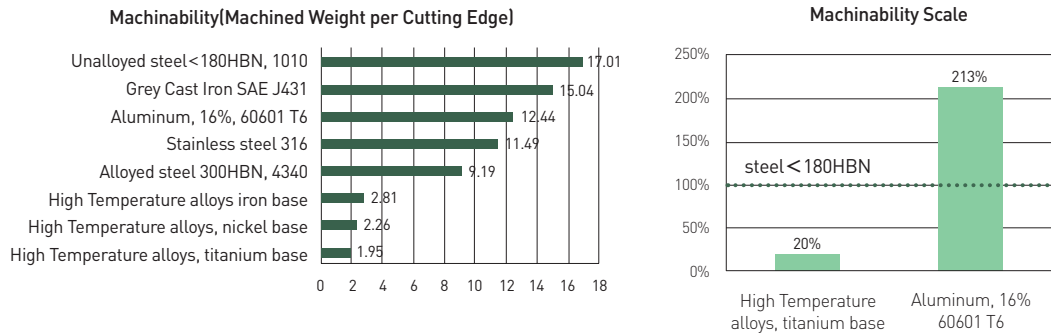
- 공구 손상 시점에서 적용할 수 있는 가공조건 범위의 범위 및 공구 수명과의 관계를 정성적으로 나타낸 난삭재 피라미드*를 이용하여 난삭성을 평가

* 각종 난삭재 중에서 가장 절삭 가공이 곤란하다고 생각되는 것을 정점으로 하고 비교적 절삭 가공이 쉽다고 생각되는 것을 밑변으로 놓고 그린 도식도

[그림 1-3] 난삭재 피라미드



[그림 1-4] 난삭재의 낮은 가공성(Machinability)

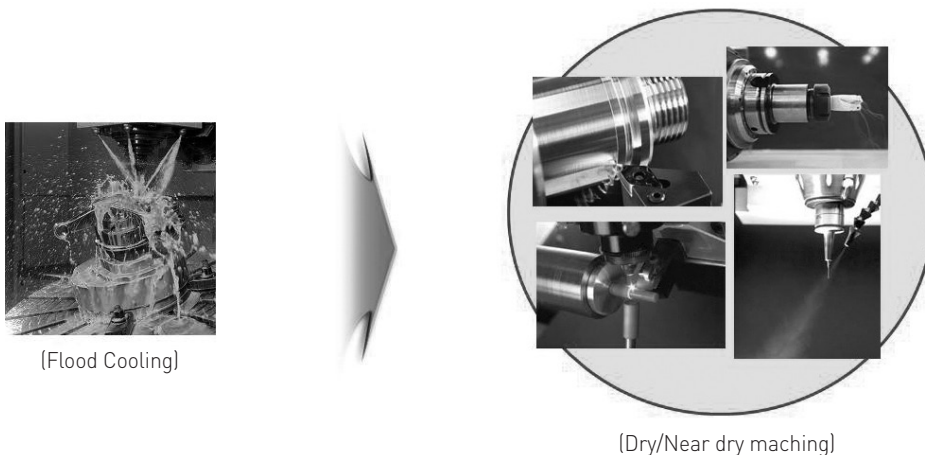


2. 친환경 난삭재 가공기술

■ 친환경 가공기술의 개요

- ▶ 친환경 가공기술은 기존 절삭 가공공정에서 과다한 절삭유 사용으로 인한 가공비용 및 에너지소모 증가, 환경오염 및 낮은 효율성 등의 문제를 개선하기 위해 절삭유를 최소화하거나 절삭유를 사용하지 않으면서 가공효율을 높이는 가공기술
 - 특히, 난삭재 가공 시 발생하는 높은 가공온도는 공구의 마모와 소재의 표면품질을 저하시키는 주요 원인이 되기 때문에, 이 온도를 낮추기 위해 주로 절삭유(cutting fluids)를 사용하고 있음
 - 그러나, 이러한 절삭유의 사용에 따른 악취, 연기 및 박테리아 등은 작업자의 건강을 위협하는 요인이 되고 있고, 절삭유의 폐기에 따른 환경오염의 원인이 되고 있음
 - 따라서, 기존의 절삭유 가공방식을 탈피한 고효율·친환경 가공을 위한 가공기술개발이 필요하게 되었으며, 이와 관련된 활발한 연구가 진행 중임

[그림 1-5] 가공공정의 친환경화

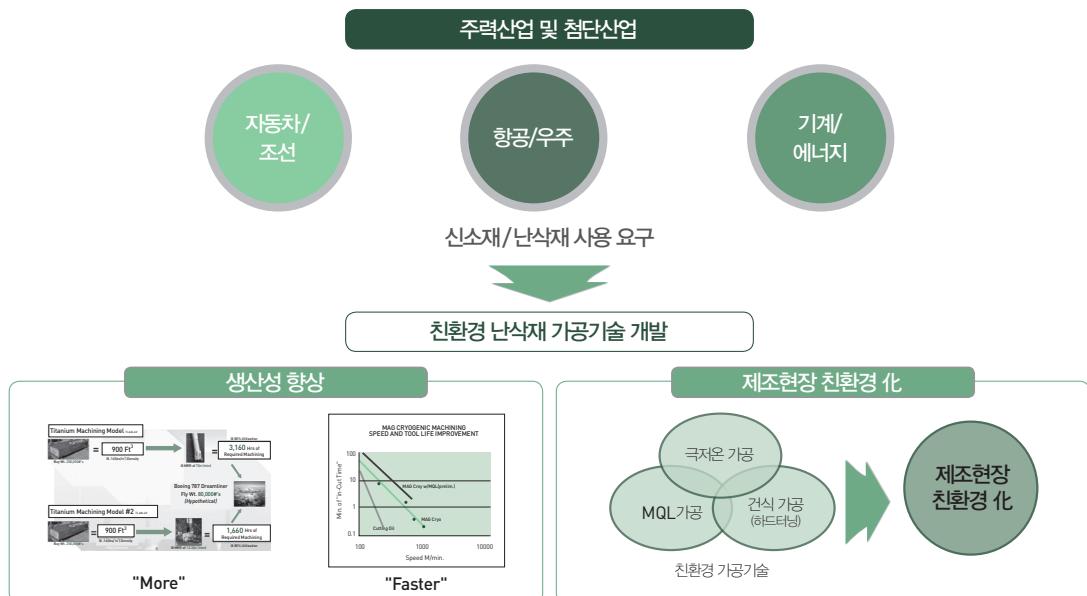


- ▶ 친환경 가공기술개발로는 건식가공 또는 극소량의 절삭유를 사용하는 친환경가공기술관련 개발과 친환경 가공을 위한 공구개발로 나눌 수 있음
 - 친환경 가공기술로는 액체질소(-196°C)를 사용하는 극저온 가공기술, 레이저 보조가공(Laser assisted machining) 기술, 극소량윤활(Minimum Quantity Lubrication)가공기술 등이 있음
 - 공구개발은 공구의 소재개발, 마찰계수가 작거나 윤활기능이 있는 코팅개발 등이 있음

■ 친환경 난삭재 가공기술 개발의 필요성

- ▶ 국내의 경우 난삭재 가공과 관련된 원천기술 부족으로 신규 시장 진입에 어려움을 겪고 있음
 - 에너지 저감과 그린 운송수단의 요구로 고경도 경량소재의 사용량이 급격히 증가
 - 그러나 난삭재의 가공(공구, 소재, 공정기술)을 위한 원천기술 부족으로 고경도 소재의 사용이 제한적이고 신공정 개발이 어려움
 - 특히, 항공/우주 등 첨단산업용 고부가가치 부품시장 진입이 어려움
- ▶ 기계가공기술은 대표적 기술 집약 산업으로 관련 산업으로의 파급효과가 큼
 - 기계가공기술은 공작기계와 절삭공구의 바탕위에 가공 공정기술을 통해서 그 효과가 극대화됨
 - 공작기계와 절삭공구는 첨단 장비 및 소재 산업에까지 영향을 미칠 수 있음
 - 기계가공 공정기술 발전은 공작기계와 절삭공구의 첨단화를 견인함
- ▶ 기계가공부품 기술투자 미비에 따른 주력산업 경쟁력 저하 우려
 - 기계가공 분야는 연관 산업에 근간이 되는 기반 기술임
 - 최근 가공공정 원천기술 개발을 위한 투자 미비로 관련분야 인력 부족 심화

[그림 1-6] 친환경 난삭재 가공기술의 비전

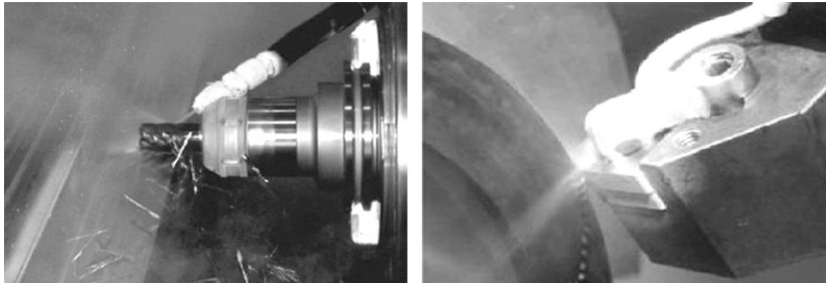


■ 친환경 가공기술의 소개

▶ 극저온가공(cryogenic machining)기술

- 극저온 가공은 액체질소(Liquid nitrogen)의 낮은 비등점(-198℃)을 이용하여 절삭가공 부위에 발생하는 열을 냉각시키는 친환경 가공 방법(무색, 무취, 무독성, CO₂가스 배출 없음)
- 극저온 가공법은 터닝, 밀링, 연삭 등 다양한 공정에 적용 가능하며, BUE(Built-Up Edge) 형성 억제, 표면조도 향상, 공구수명 및 소재제거율(Material Removal Rate(MRR)) 향상에 효과적

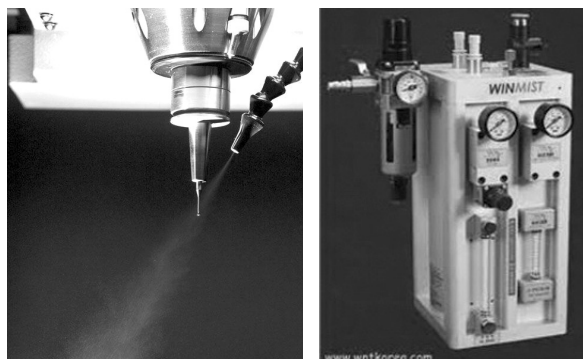
[그림 1-7] 극저온 가공시스템



▶ MQL(Minimum Quantity Lubrication, 최소윤활)가공

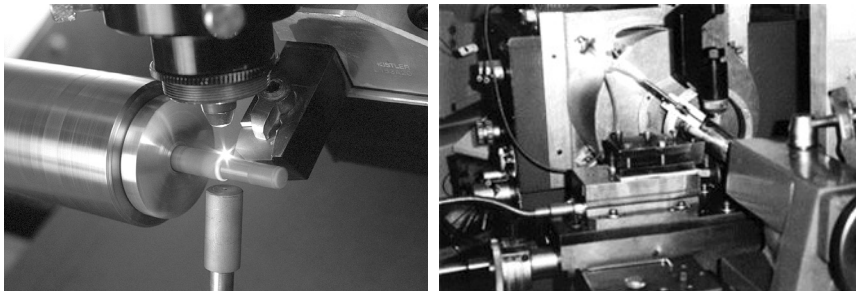
- MQL 가공은 기존의 습식가공에 비해 극미량(1-100ml/min이하)의 윤활유를 압축공기와 혼합하여 절삭 부위에 미스트(mist) 형태로 분사하는 윤활가공 방법으로 가공비용을 낮출 수 있고, 공구 수명을 늘릴 수 있음
- MQL 가공의 오일 미스트는 공구와 소재 및 칩과의 마찰부위에 침투하여 마찰력을 줄이는 동시에 고압의 압축공기로 칩 배출을 용이하게 할 수 있음
- 또한, 무해한 식물성 절삭유를 사용하고 폐기물이 발생하지 않기 때문에 대표적인 환경친화적인 가공기술 중 하나임

[그림 1-8] MQL 가공



- ▶ LAM[Laser-Assisted Machining, 레이저에열가공]&PAM[Plasma-Assisted Machining, 플라스마 보조가공]
 - LAM은 기계적 가공 시 레이저 빔으로 가공물의 절삭부위를 순간적으로 가열함으로써 세라믹 복합/혼합 재료와 같은 취성재료를 연화시켜 취성파괴를 억제하고 소성변형에 의한 절삭가공이 이루어지도록 하는 가공법임
 - PAM은 아크방전 플라스마를 대기 중에 젓모양으로 분출 시 생성되는 고온, 고속의 에너지로 재료의 절삭을 도와주는 가공법으로 반도체 제조, 합성재료, 용접, 고분자, 방식코팅(anti-corrosion coatings), 공작기계, 금속공학, 전기 및 전기 장치, 유해물질 제거 및 고성능 세라믹스 등의 가공에도 응용되고 있음

[그림 1-9] LAM 및 PAM



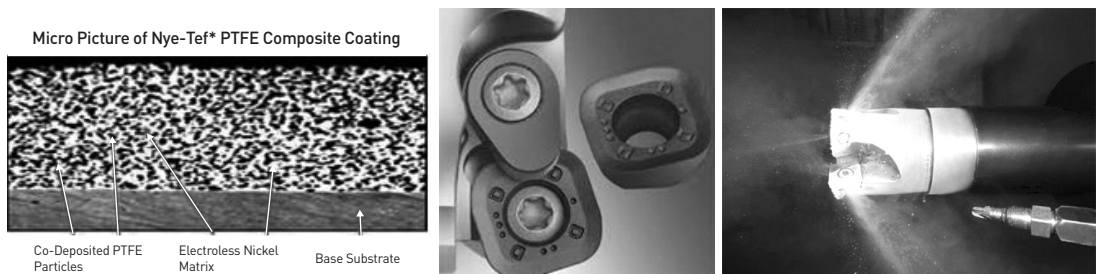
■친환경 가공을 위한 공구 개발

▶ 新 공구 개발(건식가공)

- 가공 시 발생하는 높은 온도로 인해 물리적, 화학적 작용으로 공구 부착(BUE 또는 adhesion)과 공구 마모가 급격히 진행되는 현상을 방지하기 위해 신소재 코팅¹⁾, 최적 공구형상²⁾ 및 윤활가공용 공구³⁾ 개발이 진행 중임(건식가공 시)

- 1) 신소재 코팅: 자가윤활형 코팅, 나노복합소재 코팅 등
- 2) 최적 공구형상: 공구 인선, 칩브레이커, 표면 패턴 등
- 3) 윤활가공용 공구: MQL용 인서트, 극저온 가공용 밀링 커터 등

[그림 1-10] 난삭재 가공용 공구



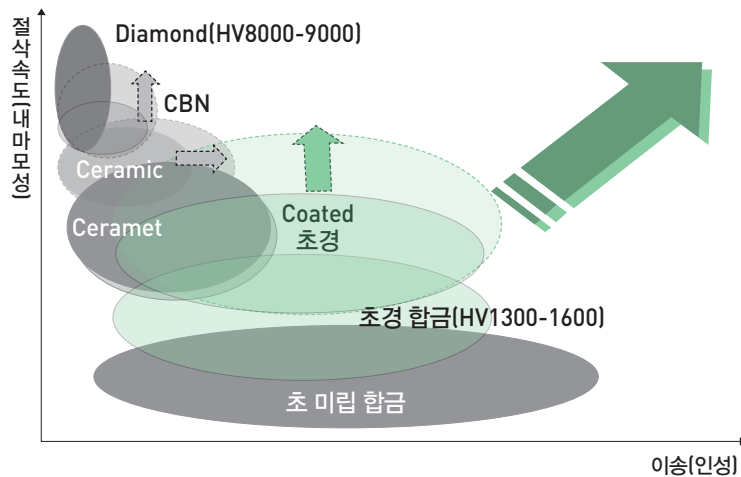
▶ 난삭재 가공용 공구

[표 1-4] 난삭재 가공용 공구의 특징

공구종류	공구특징	가공대상
초경합금	주로 K10 종의 초경합금을 이용한 공구제조	티타늄 합금 등
코팅초경합금	초경합금 공구에 물리증착 법인 PVD(Physical Vapor Deposition), 화학증착 법인 CVD(Chemical Vapor Deposition), DLC(diamond likecarbon) 등의 방법으로 코팅	티타늄 합금, 스테인리스강
세라믹스	알루미나계 세라믹스를 소결로 공구 제조	내열합금
초고압 소결체	CBN* 및 다이아몬드 등의 소결로 공구 제조	알루미늄 합금, 티타늄 합금 등

* CBN: Cubic Boron Nitride, 입방정 질화 붕소

[그림 1-11] 가공조건에 따른 절삭공구



3. 국내·외 난삭재 가공기술 현황

■ 국내·외 난삭재 가공기술 현황

- ▶ 난삭재의 가공기술과 관련된 기술개발은 크게 공작기계, 공구 및 新 가공기술로 나누어 생각할 수 있음
 - 공작기계의 경우 독일과 일본을 중심으로 고성능 난삭재 가공을 위한 공작기계 개발을 주도하고 있는 반면, 국내에서는 아직까지 연구개발 실적이 미흡
 - 난삭재 가공을 위한 공구개발의 경우 미국, 스위스 및 일본을 중심으로 공구의 코팅 및 형상개발위주의 개발을 진행하고 있으며, 국내에서도 일부기업을 중심으로 연구가 진행 중

- 초음파, 레이저 등을 이용한 新 가공기술은 대만과 호주, 독일을 중심으로 연구가 진행되고 있고, 국내의 경우 일부 대학과 연구소에서 연구가 진행 중

[표 1-5] 국내·외 난삭재 가공기술 현황




기술명	개발 내용	연구기관	
공작기계	고성능 난삭재 가공을 위한 공작기계 개발	국외	[독] MAG [일] Makino [일] Mazak [독/일] DMG/MoriSeiki 외 다수
		국내	-
공구개발	공구 개발(코팅 및 형상)	국외	[미] Kennametal Inc. [미] Seco Tools [스] Sandvik Coromant Co [일] 미쯔비시 [일] 쓰미모토 외 다수
		국내	대구텍, 한국야금, YG-1, OSG
	가공특성 연구	국외	[미] Michigan State Univ. [독] Franunhofer CCL [미] Newtech Ceramics
		국내	UNIST, 서울대, 성균관대, KAIST, 현대자동차 외 다수
新 가공기술	초음파, 레이저 등 하이브리드 가공기술	국외	[대] 싱가포르 국립대 [대] SIM -Tech. [호] Industrial Laser Application Lab. [독] Franunhofer IPT
		국내	한국생산기술연구원, 기계연구원, 국민대, 삼척대, 창원대

■ 난삭재에 따른 국내·외 기술수준

▶ 국내·외 기술 수준 분석

- 난삭재의 가공기술과 관련해서 국내에서는 주로 대기업을 중심으로 한 범용공작기계개발에 집중하고 있음
- 반면, 선진국에서는 공작기계, 공구 및 新 가공공정 모든 분야에서 앞서가고 있는 실정임
- 또한, 난삭재 가공은 난삭재의 종류에 따라 공구나 가공기술이 달라지므로 난삭재의 특성에 맞는 가공기술개발이 필요

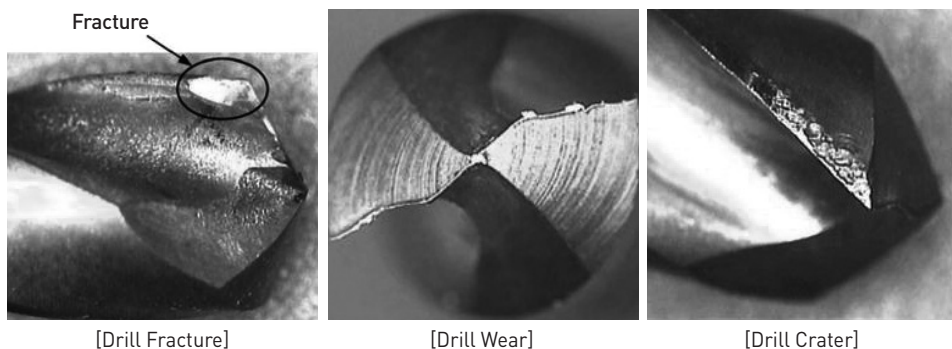
[그림 1-12] 국내·외 기술수준 분석

기술분야(선도국)	선진국 동향	국내기술수준
 공작기계	<ul style="list-style-type: none"> - 고강력/고출력 주축 설계 제작 기술 확보 - 고강성 구조 적용으로 고능률 가공에 대응 	<ul style="list-style-type: none"> - 대기업은 범용 공작기계에 초점 (최근 복합가공기에 집중) - 중소기업은 전용기 개발 중심으로 고강성 확보 기술 미보유
 공구	<ul style="list-style-type: none"> - 소재 특성을 고려한 공구형상 적용 - 공구마모 저감을 위한 특수 코팅 개발 및 시범 적용 	<ul style="list-style-type: none"> - 주요 업체는 외국 본사의 기술 도입 - 수요업체의 국산화 요구에 대응하는 수준(선도기술 개발 미비)
 가공공정(신공정)	<ul style="list-style-type: none"> - 극저온 가공으로 가공 생산성 향상 (공구마모, 가공속도) - 공구마모 메커니즘 규명 연구 수행 중 - 수요업체와의 공동 연구 진행 	<ul style="list-style-type: none"> - 난삭재에 특화된 연구 인프라 열악 - 연구실 수준에서 MQL 및 하드 터닝 연구 수행 중

▶ 티타늄(Titanium) 가공기술 현황

- 티타늄의 절삭가공에서 제일 큰 문제점은 낮은 열전도도로 인한 높은 가공온도와 공구에 절삭칩 부착이 심해 마모가 빠르게 진행되고 공구 파손이 쉽게 일어나는 것으로 알려져 있음
- 티타늄 절삭가공은 Ti-6Al-4V에만 집중되어있고 단순히 실험에 의한 결과만 기록 되어 있음

[그림 1-13] 티타늄 가공 시 공구마모



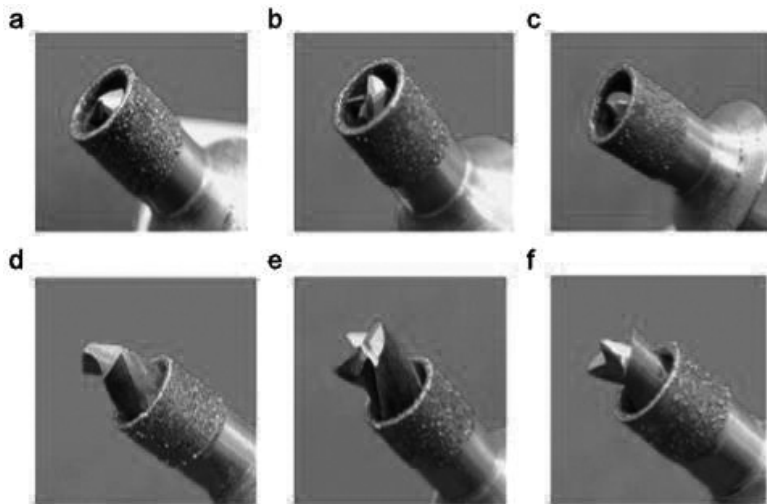
- 티타늄 가공을 위한 절삭공구는 대부분 비철계열 초경(Non-steel grade Carbide)과 다결정질의 다이아몬드 (Polycrystalline Diamond, PCD)가 쓰이는데, PCD는 마모측면에서 카바이드보다 확실히 좋지만 부서지기 쉽고 매우 고가여서 한정된 범위 내에서만 사용되고 있음
- 따라서, 대부분 산업현장에서는 카바이드를 사용하는데 실험결과에 의하면 코팅된 카바이드는 코팅이 쉽게 벗겨져 실제로 비용측면에서 코팅이 안 된 카바이드가 사용되고 있지만, 최근 다이아몬드 코팅기술 개발에 힘입어 다이아몬드 코팅된 카바이드 사용 비중이 늘어남

- 미국 등 선진국에서는 공구의 마모메커니즘에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 중요 마모메커니즘으로는 공구입자가 가공 칩으로의 용해/확산(dissolution-diffusion)에 의한 마모 또는 마찰에 의한 마멸(attrition) 등으로 확인되었으며 이에 따라 새로운 공구 코팅 개발이 진행되고 있음(나노복합 코팅, BAM 코팅 등)
- 또한, CBN(Cubic Boron Nitride, 입방정 질화 붕소)와 TiB₂(티타늄 디보라이드) 코팅이 티타늄 절삭에 있어 용해/확산에 강한 것으로 알려짐
- 국내에서는 대구텍, 한국야금 등 공구회사를 중심으로 난삭재용 신소재 코팅을 개발하여 출시 중임

▶ 복합재료 가공기술 현황

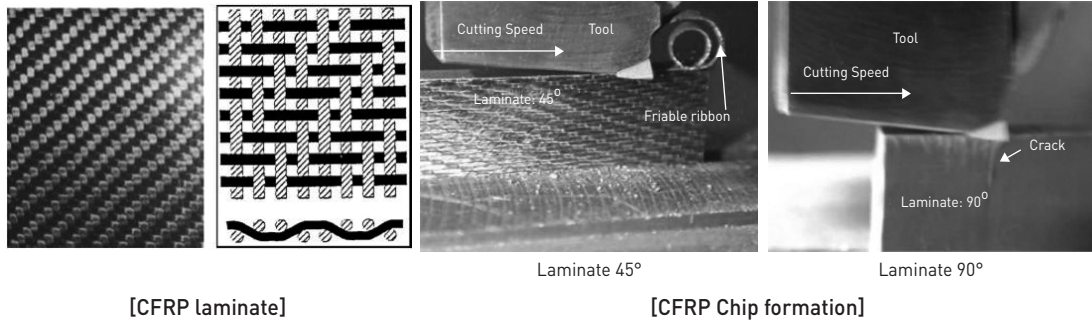
- 복합재료의 절삭가공은 보통 드릴링이나 끝단 트리밍(edge trimming)이 많이 쓰이나 터닝과 밀링도 사용되고 항공 분야에서는 주로 드릴링 공정이 사용됨
- 드릴링에는 소재의 층분리(delamination), 표면조도 악화, 마찰 마모가 많이 발생함
- 복합재료 절삭가공에서는 공구가 파이버(fiber)를 자르므로 공구의 기하적인 특성이 매우 중요하며 특히, 끝단 반경은 공구의 성능을 결정하는 매우 중요한 기하특성임(stagger drill, core drill, step drill, candle stick drill)

[그림 1-14] 복합재료 가공용 드릴 공구



- 미국 Pre-corp의 Vein-drill과 같은 초고가 드릴이 있지만 주로 카바이드가 쓰임(straight carbide가 steel-grade보다 좋음)
- 기존의 복합재료 가공에서 공구코팅(TiN-과 DLC)은 공구수명에 도움이 안 되는 것으로 알려졌으나, 새로 개발된 다이아몬드 코팅은 복합재료 가공에 성공적으로 사용되고 있음
- 다이아몬드 코팅 드릴은 코팅이 안 된 초경드릴과 강도가 CBN만큼 좋은 AlMgB₁₄(or BAM) 코팅 드릴보다 훨씬 성능이 뛰어나다고 증명되었음

[그림 1-15] CFRP 가공



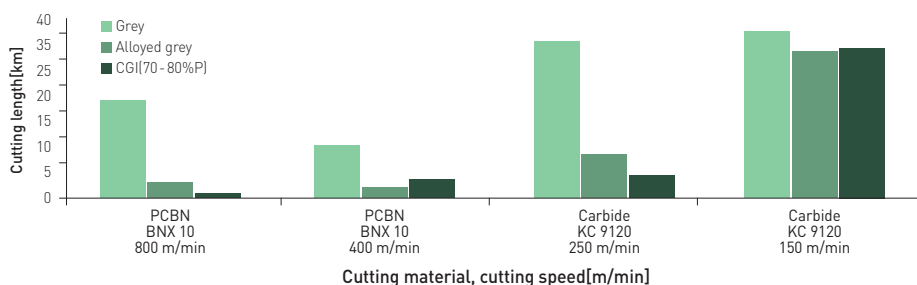
[CFRP laminate]

[CFRP Chip formation]

▶ CGI(compact graphite iron)

- CGI는 경량화 및 내수성 향상을 도모할 수 있지만 가공 속도를 고속화 할 수 없는 단점 때문에 Gray iron에 비해 가공시간이 약 3배 정도임
- CBN, 세라믹 및 다른 공구들은 미세조직 및 황성분의 부족으로 인해서 CGI 가공이 어려움
- 따라서, 일본의 Makino와 스웨덴의 Sandvik Coromet가 CGI 가공 생산성을 높이기 위한 연구를 수행 중이고, 특히 스웨덴의 Sandvik Coromet 사의 경우, CGI 가공 시 공구의 수명을 늘리기 위한 코팅 기술에 관해서 특허를 출원함
- * 예) Face milling-rough 가공 시(가공조건: $V_c=200\text{m/min}$, $F_z=0.20\text{mm/rev}$, $A_p=4\text{mm}$) 기존의 Sandvik GC 4020 공구보다 수명을 695 → 874로 향상시킴
- 일본, 유럽의 공구, 공작기계, 자동차 부품업체를 중심으로 CGI의 가공 생산성을 높이기 위한 연구를 진행하고 있지만 기존 회주철에 비해서는 생산성이 떨어지는 편임
- * Cutting speed(Carbide 공구: 150m/min이상)가 높아질수록 gray iron에 비해서 생산성이 현저히 감소하는 경향성 있음
- 국내의 경우, 아직까지는 CGI 가공에 대한 연구는 미진한 편이지만 현대자동차에서 일부 CGI 가공특성에 관한 연구가 진행됨

[그림 1-16] 가공 소재/속도별 가공거리에 대한 차이



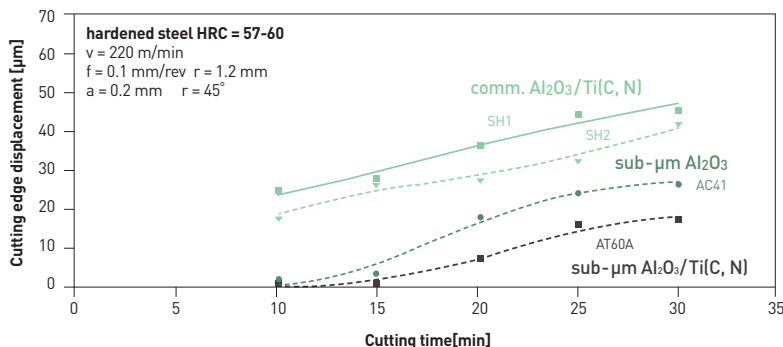
▶ 니켈합금 가공기술 현황

- 니켈합금의 가공 시 발생하는 큰 문제점은 큰 발열, 공구파단 및 공구 홀더의 강성 부족으로 알려져 있음
- 특히, 니켈합금은 가공 시 표면의 열경화 현상이 발생하며 첫 가공면 이후로는 공구와 시편 모두에 소성변형을 일으켜 가공 품질의 문제점을 야기
- 니켈합금 중 주로 Inconel/Waspalloy/Rene/Nimonic/Hastelloy의 밀링, 드릴링 및 그라인딩에 관한 기술개발이 주로 진행되고 있고, 레이저, 방전가공(Electric Discharge Machining(EDM)) 및 전해가공(Electro-chemical Machining(ECM)) 등의 비전통적 가공 방식과 초음파를 이용한 하이브리드 가공에 관한 연구도 함께 진행 중임
- 기존의 코팅이 안된 초경공구의 단점(빠른 공구마모, BUE, 낮은 가공속도)을 극복하기 위해 티타늄질화물(TiN), 알루미늄(Al_2O_3), 티타늄알루미늄질화물(TiAlN), 티타늄질화물/티타늄카바이드(TiN/TiC)와 같은 코팅을 주로 사용하였으나, 현재 높은 내산화성, 고온경도 및 높은 표면윤활성을 가진 신재종의 공구 코팅(PVD)이 개발되고 있음
- 국내의 경우 한국아금에서 니켈합금 및 스테인리스 강 등의 다양한 난삭재 각각에 적합한 공구 상용화
- 부산대 나노과학기술대학, 정밀정형 및 금형가공 연구소에서는 초고속 스피들을 적용하여 니켈-크롬 합금의 밀링가공 특성 평가를 수행

▶ 고경도강 가공기술 현황

- 일본 및 유럽의 경우 고경도강 가공 기술에 대해서 전통적으로 강점을 가지고 있으며, 특히 독일은 Fraunhofer 연구소를 중심으로 미세입자 알루미늄 공구(submicrometer $Al_2O_3/Ti(C, O)$ cutting tool)를 개발하여 고경도강(경도(HRC)=60) 가공에 적용하였음
- * cutting force 및 공구 마모 감소, 가공 표면 조도 향상
- 미국 Makino 사의 경우는 가공 공정의 최적화를 통해서 일반적인 하드 밀링 공정 시간을 50%-67%까지 절감시켰음
- * 예) Rc=60인 harden steel 하드 밀링 가공 경우에 표면조도 $7\mu m$ Ra 달성했음

[그림 1-17] Submicrometer $Al_2O_3/Ti(C, O)$ 공구 수명



- 현재 산업계에서 고경도강 가공에 가장 많이 채용되는 공정은 연삭이지만 상대적으로 높은 가공비와 환경적으로 좋지 않은 쿨링액을 많이 요구함에 따라서 상대적으로 생산성이 높고 건식 가공으로 친환경적인 하드 터닝 공정에 대한 연구가 2000년대 초부터 활발히 이루어지고 있음
- 하드 터닝의 경우에는 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔으며 그 동안의 연구를 종합해보면 HRC45-60 고경도 소재의 건식 가공 시 최적 공정 조건 하에서 200-300nm 표면 조도를 달성할 수 있는 것으로 문헌에 보고되고 있음
- 국내의 경우 한국 야금 및 대구텍을 중심으로 연구를 진행하고 있으며, 크게 공구 코팅 기술을 적용하여 공구의 수명을 증대시키는 연구를 진행함
- 부산대, UNIST 등 국내 대학에서는 코팅과 압축 냉각공기를 이용한 하드터닝 연구를 진행하고 있음

▶ 세라믹 가공기술 현황

- 세라믹은 경도가 높은 취성재료로 표면의 결함이나 크랙을 방지하기 위해서 주로 다이아몬드 가공과 연삭으로 소재를 가공함
- 특히, 자동차 부품 세라믹 재료인 밸브 시트링을 가공하기 위해서 주로 PCD 톨을 사용하고 초경은 낮은 생산성 때문에 사용하지 못함
- 세라믹 가공 공정의 낮은 소재제거율과 짧은 공구 수명의 단점을 보완하기 위해 초음파 보조 가공(ultrasonic assisted machining(UAM)) 또는 레이저 보조 가공(Laser assisted machining(LAM))에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음
- 국내에서는 대학과 연구기관을 중심으로 하이브리드 가공(UAM, LAM) 기술이 개발 중임

■ 국내·외 친환경 가공기술 현황

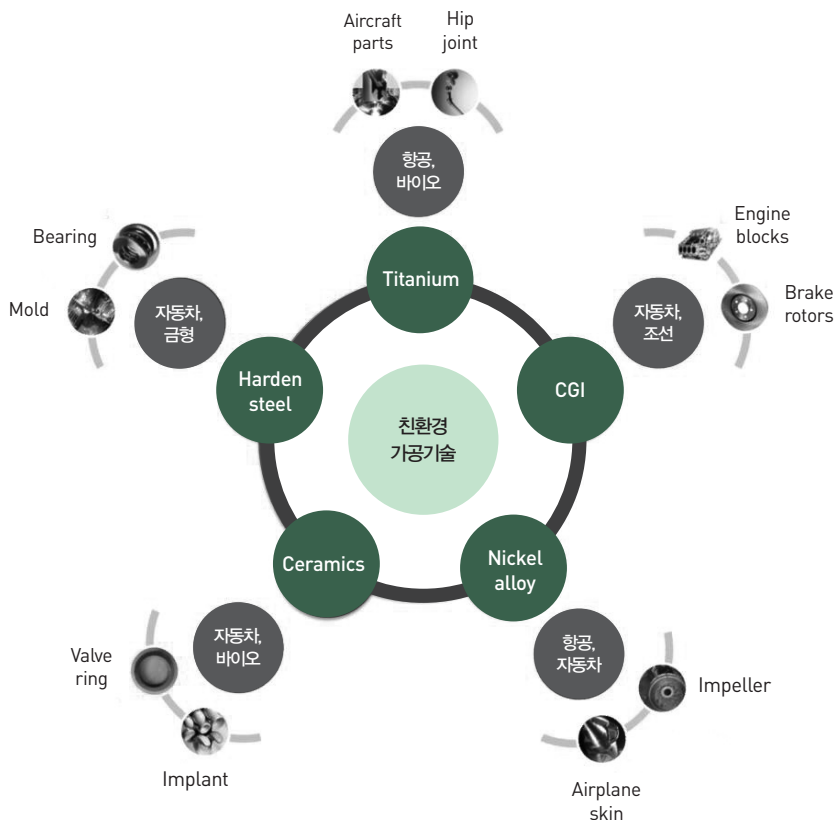
- ▶ 친환경 가공기술은 주로 극저온가공, 레이저보조가공, 최소윤활가공(MQL) 및 하드터닝 위주로 개발되고 있고, 친환경 가공을 위한 공구개발이 같이 이루어지고 있음
- 응용분야로는 항공, 바이오 및 자동차 등 산업 전반에 걸쳐 있음

[표 1-6] 친환경 가공기술 개발 현황

친환경 가공기술	국내·외	개발현황
극저온 가공	국외	[독] MAG, [영] Bath Univ., [미] U.of Massachusetts, [슬] U. of Ljubljana
	국내	-
레이저 보조가공	국외	[미] Purdue Univ., Western Michigan Univ. [호] Swinburne Univ. of Tech.
	국내	창원대, 한국해양대, 국민대, 기계연구원

친환경 가공기술	국내·외	개발현황
MQL	국외	[미] MSU.&Georgia Tech.&U of Mich. [미] UNIST, [미] Kennemetal, [스] Sandvik
	국내	성균관대(대학), (주)원애포코리아, (주)우남산업
하드터닝	국외	[독] Fraunhofer, Achen, [미] Makino, Georgia Tech.,
	국내	UNIST, 포항공대, 대구텍, 한국야금
친환경 공구	국외	[미] Kennemetal, [스] Sandvik, [일] 쓰미모토 외 다수
	국내	대구텍, 한국야금, YG-1

[그림 1-18] 친환경 가공기술 적용분야

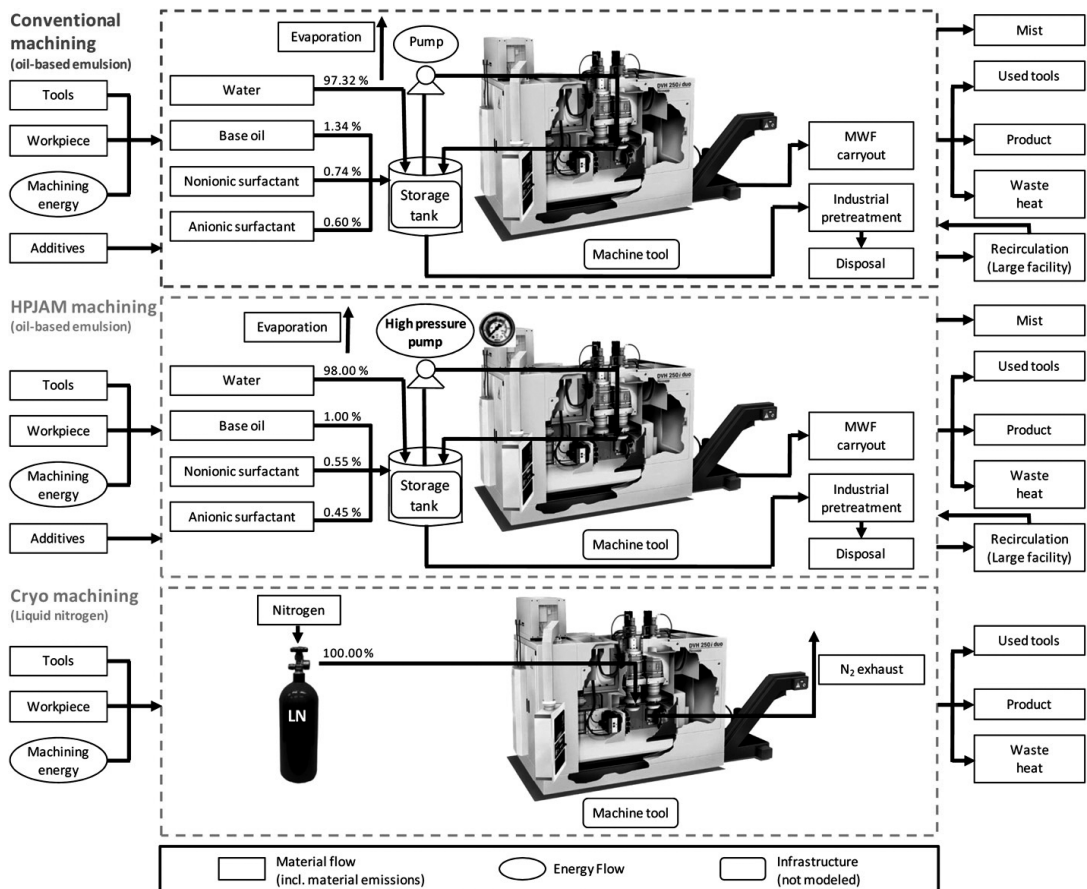


▶ 극저온 가공기술

- 초저온 냉각방식은 연삭가공, 구멍가공 및 밀링가공에도 일부 적용하고 있지만, 아직은 대부분 선삭공정에 집중하고 있음

- 선삭공정과 반대로 간헐적인 밀링작업에 초저온 냉각(cryogenic cooling)을 적용할 경우 절삭공구에 열 균열(thermal cracks)이 발생하기 때문에 실용화에 어려움을 겪고 있지만 고속도강 절삭공구로 합금강을 밀링 가공할 경우 초저온 냉각방식이 건식가공(dry cutting)방식보다 10배 이상 공구 수명이 길어지는 장점이 있음
 - 극저온 가공법은 일반 습식 공정과 고압 제트 공기압 가공법(high pressure jet air machining)에 비해 매우 단순하고 CO₂, water use, 폐기물 등을 생성하지 않는 친환경 가공법임
 - 특히, 독일의 MAG사는 세계 최초로 극저온 가공기를 출시하며 세계 시장을 선도하고 있음
- * MAG사는 현재 난삭재 가공용 공작기계를 상용화하였고 2013년부터 B787 동체(복합재료)를 가공하기 위한 6축가공기를 출시할 예정(MQC: Minimum Quantity Cryogenic)

[그림 1-19] 가공시스템의 비교(일반, HPJAM, 극저온)

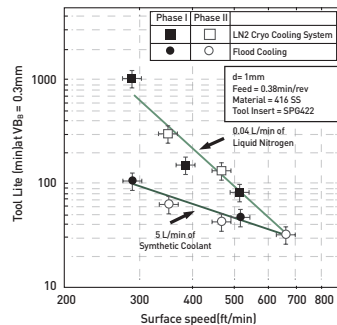
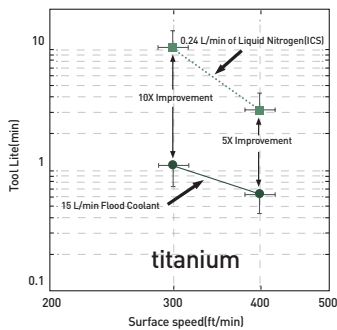


[그림 1-20] 복합재료 가공을 위한 극저온 가공시스템



[그림 1-21] 극저온 가공법의 특징

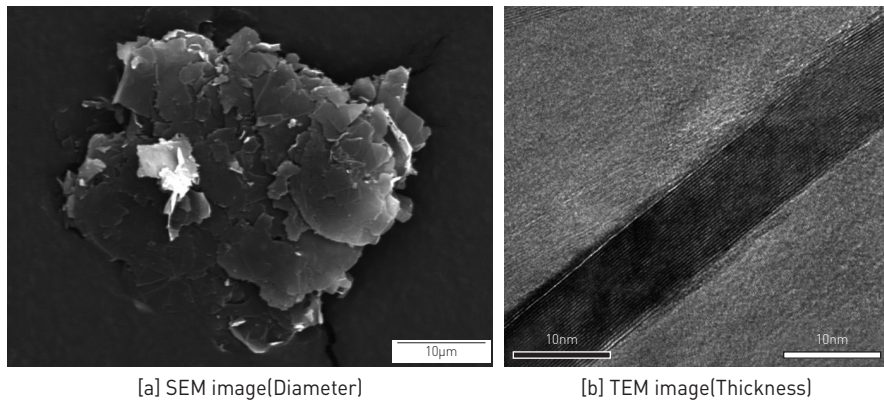
- 절삭유의 기능 변화 : 윤활 → 냉각
- 공구수명 증가 및 가공속도 향상
- 신공정기술 필요 : CGI의 경우 PCD+Cryogenic이 보다 효과적임
- 부가효과 : Safety, Eco-friendly(no contamination, low energy)



▶ MQL(극소량절삭유) 가공

- MQL 가공은 기존의 습식가공에 비해 극미량(1-100ml/min이하)의 윤활유를 압축공기와 혼합하여 절삭 부위에 미스트(mist) 형태로 분사하는 윤활가공 방법으로 가공비용을 낮출 수 있고, 공구 수명을 늘릴 수 있음
- MQL 가공의 오일 미스트는 공구와 소재 및 칩과의 마찰부위에 침투하여 마찰력을 줄이는 동시에 고압의 압축공기로 칩 배출을 용이하게 할 수 있음
- 또한 무해한 식물성 절삭유를 사용하고 폐기물이 발생하지 않기 때문에 환경 친화적인 가공기술임
- 최근 그라핀, 나노튜브, HBN(hexagonal born nitride) 등의 나노 입자를 절삭유와 혼합하여 사용한 나노유체 극미량 절삭유(MQL with nano-particle) 가공 방법도 개발되었음
- MQL 가공의 적용분야로는 스텔재의 금형가공, 절단가공, 오일 구멍가공 등 많은 분야에 적용되고 있다. 난삭 재료에서는 티탄합금이나 인코넬 등에 적용

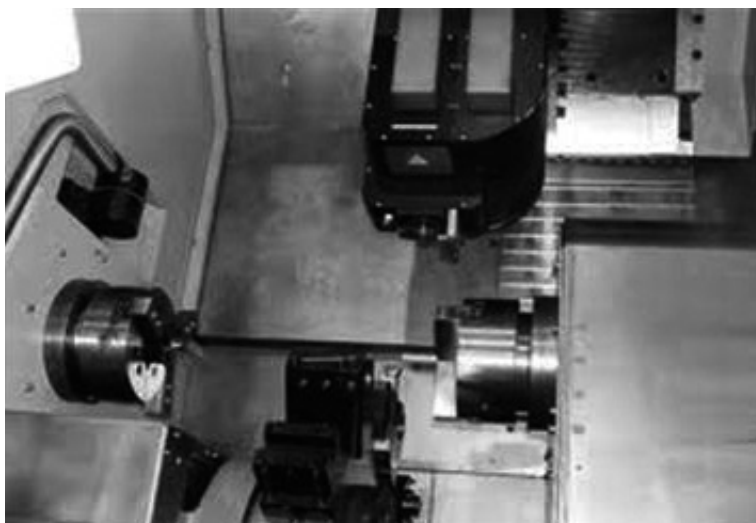
[그림 1-22] 그래핀 나노입자



▶ LAM(Laser-Assisted Machining, 레이저에열가공)

- LAM은 고출력 레이저의 발전과 활용 가능성의 증가에 따라 난삭재 가공에서 크게 주목받고 있으며 연평균 10% 이상의 고성장을 이루고 있는 가운데, LAM은 세계적으로 대부분 선삭공정에 적용되고 있으며, 마이크로 엔드밀에 일부 적용되고 있음
- 캐나다의 Bejjani는 복합재료의 선삭가공에 LAM 기술을 성공적으로 적용하였고 미국 Purdue대학의 Shin은 세라믹과 티타늄 재료를 위한 LAM 공정 연구를 진행하였음
- 국내에서는 기계연구원, 대학(한국해양대, 국민대) 및 (주)아메코와의 공동연구로 레이저 복합가공기를 출시 하였음

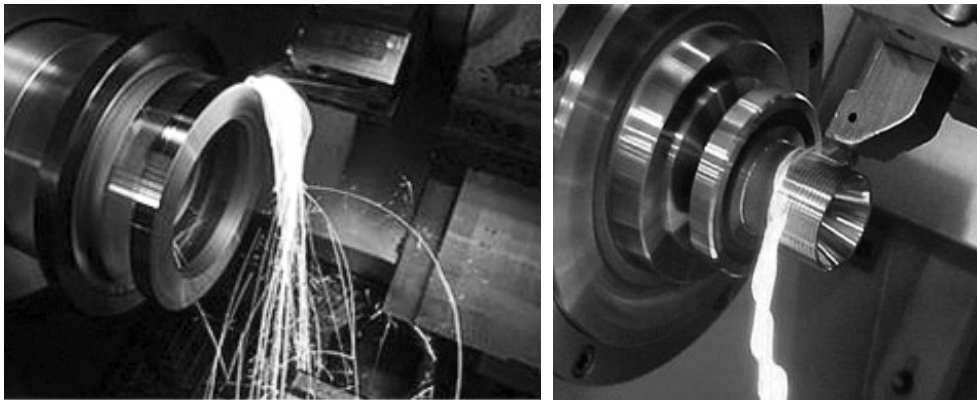
[그림 1-23] 레이저 복합가공기



▶ 하드터닝(Hard Turning)

- 미국은 Purdue 대학의 Liu를 중심으로 베어링 회사(Timken), 자동차 회사(GM), 공구회사(Kennametal) 등이 공동으로 하드터닝을 이용하여 슈퍼피니싱을 이루고자 연구를 해서 목표에 근접한 결과를 얻었음
- 독일의 경우 아헨공대 및 베를린 공대 등을 중심으로 하드터닝에 대한 연구가 활발함. 아헨공대의 Klocke 등은 유정압 베어링이용 고정밀 선반으로 0.86 μ m의 표면조도를 얻었고, 베를린 공대에서는 하드터닝에 있어서 표면품질, 모니터링 등의 연구가 이루어지고 있음
- 일본 자동차 산업계의 경우 Hard Turning을 이용하여 5등급(IT5)의 치수공차를 가지는 기어부품의 연속 생산을 하고 있으며, 4등급(IT4)을 요하는 ABS용과 연료분사 시스템용 부품을 하드터닝으로 가공하고자 연구가 진행되고 있음
- 국내의 경우, 영남대학교, 서울과기대 및 서울대 등을 중심으로 연구가 이루어지고 있으며, 영남대는 고정도강의 단속하드터닝에 적합한 CBN공구를 선정하고, 선정된 공구로 피삭재의 공구마모, 절삭력 및 진동특성을 분석
- 서울과기대는 하드터닝 시 절삭조건이 공작물의 잔류응력에 미치는 영향을 연구
- 서울대는 표면정도에 영향을 미치는 하드터닝 공정에서의 채터 진단에 Wavelet Transform을 이용한 분석이 효과가 있음을 확인
- 두원공과대는 PCD(Polycrystalline diamond), CBN(Cubic Boron Nitride), PCBN(Polycrystalline Cubic Boron Nitride) 등 공구 재종에 의한 공구 마멸 특성 및 절삭 저항 특성을 분석

[그림 1-24] 하드터닝 가공



▶ 新 공구 개발

- 미국의 경우, DCDMM(National Center for Defense Manufacturing and Machining), NSF의 I/UCRC (Industry/University Cooperation Research Center) 프로그램 등을 중심으로 티타늄 및 복합재료 가공을 위한 공구 코팅 개발 연구를 진행 중임

- Sandvik 및 Kennametal 등의 공구 업체는 CoroMill390, CoroDrill 854 등을 지속적으로 출시하며 난삭재 가공을 위한 공구시스템(밀링, 터닝, 드릴링)을 공급
- 국내 난삭재 가공 관련 기술은 대구텍 및 한국야금 등 공구업체 위주로 진행되고 있으나 연구인력과 기술력의 한계로 일부 초경 공구 형상 및 코팅 개발에 머물고 있음

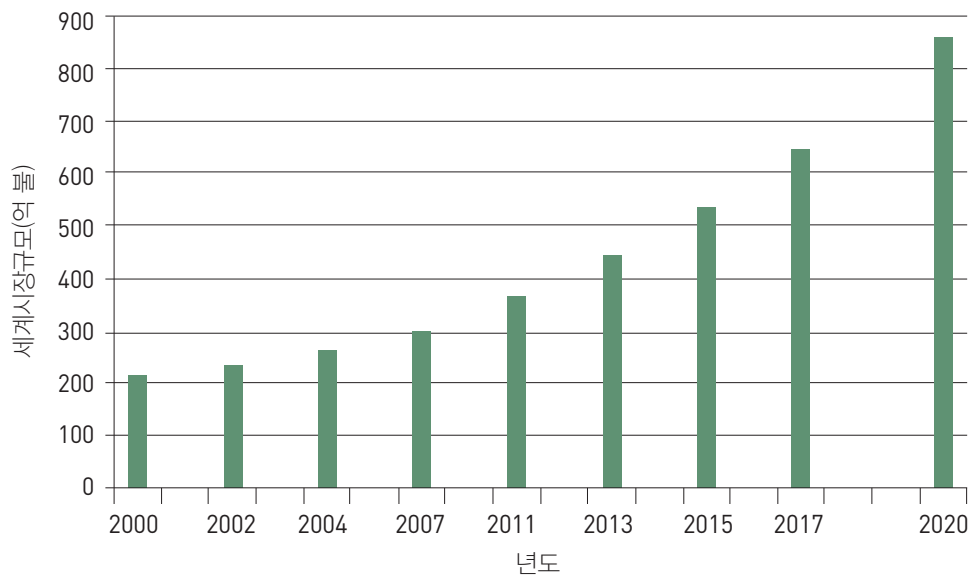
4. 친환경 가공기술의 시장 동향 및 전망

■ 시장 규모 전망

▶ 세계시장규모

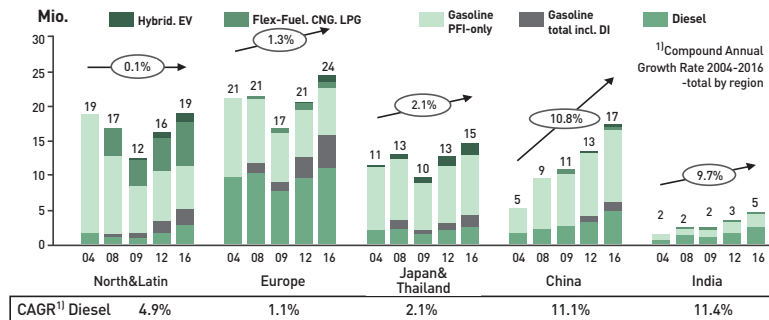
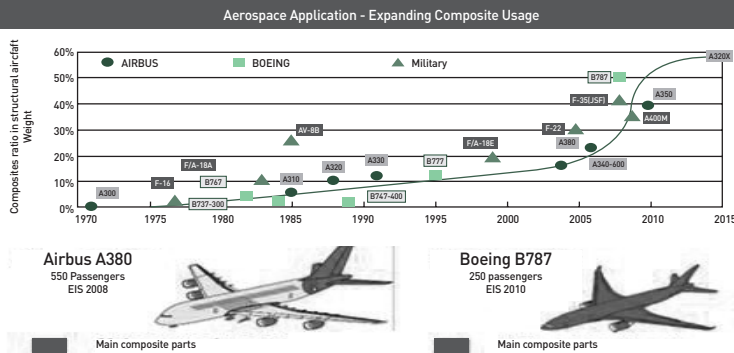
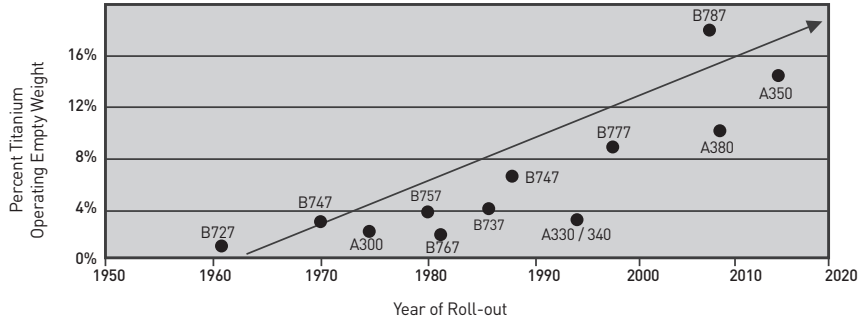
- 2011년 세계 절삭공구시장은 360억 불로 추정되며 최근 난삭재 및 신소재의 개발로 매년 10%의 성장률을 보이며 2020년 약 850억 불 규모가 될 전망이다
- 특히, 난삭재 가공에 적용되는 초경합금 및 다이아몬드 공구는 비중이 전체시장의 약 70% 정도를 차지하는 것으로 분석됨

[그림 1-25] 절삭공구의 세계시장 규모



- 또한 항공/우주 및 자동차 등 첨단 분야의 핵심 소재인 티타늄, CFRP, CGI 등의 사용량이 급격히 증가하고 있어 난삭재 시장은 더욱 성장할 전망이다

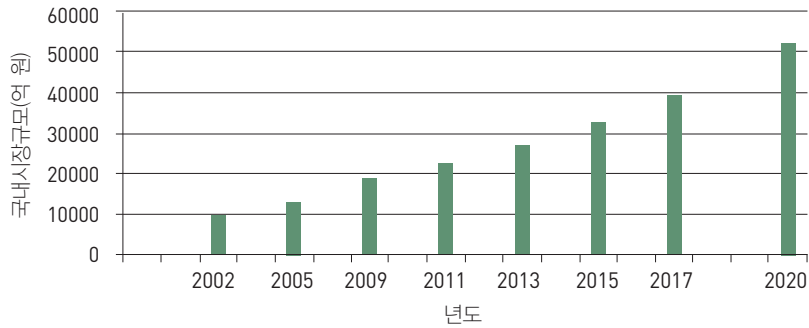
[그림 1-26] 난삭재 사용비중 증가



▶ 국내시장규모

- 국내 철삭공구 시장은 2.2조 원(2011)이며 꾸준히 시장이 확대되고 있으나 세계 철삭공구시장의 약 4.8%에 불과하며 세계시장 점유율은 3%로 세계 10위권 밖에 머무르고 있음
- 또한 국내 공구업체는 공구 원자재의 해외수입 의존도가 매우 높고 영세하여 주로 초경 엔드밀과 코팅공구에 집중하고 있어 해외 선진국과의 격차가 있음
- 또한, 원천기술 부족으로 글로벌 트렌드에 발빠르게 대응하지 못하고 있음(신소재 및 난삭재 가공기술)

[그림 1-27] 절삭공구의 국내시장 규모



5. 기술개발 발전 방향 및 정책적 시사점

■ SWOT 분석 및 극복방안

▶ SWOT 분석

[표 1-7] SWOT 분석

Strengths(강점)	Weakness(약점)
<ul style="list-style-type: none"> - 자동차산업의 우수한 경쟁력 - 공작기계 산업의 경쟁력 	<ul style="list-style-type: none"> - 열악한 항공/우주산업 경쟁력 [고부가가치 부품 제조기술 부족] - 공구산업의 주요 기술인 소재관련 원천기술 부족
Opportunities(기회)	Threats(위협)
<ul style="list-style-type: none"> - 난삭재 부품의 폭발적 증가 	<ul style="list-style-type: none"> - 가공연구 인프라 감소(인력) - 중국의 우월한 기계가공 인프라 [선진기술 도입의 속도차]

▶ 난삭재 가공 기술 개발의 취약 원인 및 극복 방안

- 난삭재 가공기술개발이 취약한 이유는 난삭재를 필요로 하는 항공/우주분야의 미성숙에 따른 고부가가치 부품 개발의 요구가 부족한 것이 한 원인
- 또한, 원천기술개발이 아닌 반복적인 시행착오를 통한 절삭공구/공작기계 개발에 따른 원천기술축적 및 활용이 부족하고, 가공공정 부문의 연구인력이 부족한 것도 한 원인

- 이의 해결을 위해서는, 항공/우주분야와 같은 최첨단분야에 있어 산·학·연이 연계하여 산업의 수요를 창출하고, 소재, 공정과 같은 원천기술개발에 노력할 필요가 있음

■ 정책적 시사점

- ▶ 정밀 가공·소성 등 기반공정기술, 메카트로닉스 등 기계분야의 공통기반 원천기술 혁신을 위한 진흥전략을 추진
 - 주력산업과 신성장산업 분야에서는 소재의 경량화, 고강성화(복합재) 등을 요구하고 있는 바, 이러한 첨단소재의 가공공정기술에 대한 지원 및 원천 기술 확보 필요
 - 대외의존도가 높은 핵심 소재·부품 분야를 중심으로 공정기술을 확보하지 못하면 향후 장비도 해외에 의존하여야 하므로, 공정기술과 장비기술 간 상호 보완이 필요
- ▶ 친환경기술 개발로 가공 생산성 확보 및 가공기술의 친환경화
 - 공구수명 및 가공품질의 향상뿐만 아니라 그린 제조 환경의 구축으로 제조 생산성을 확보하여 제조업의 글로벌 경쟁력 키워야 함
- ▶ 대학 연구기반 확대를 위한 기초연구 프로그램의 병행 추진
 - 최근의 국가지원 과제는 제품개발에 초점을 맞추고 있어 생산의 근간이 되는 공정 원천기술에 대한 지원이 열악하여, 기업에서 요구하는 공정기술과 관련된 인력의 공급에 차질이 우려
 - 직접적인 제품 판매와 직결되지 않지만 다양한 제품, 장비 및 공구 등의 개발 기초가 되는 공정기술의 지속적인 발전 및 원활한 인력 공급을 위하여 연구 및 교육기관을 대상으로 지속적인 지원 필요
 - 대학을 통한 인력양성과 더불어 전문가DB 활용 ‘상시 멘토링 시스템’, ‘산업체 기술인력 재교육’ 등의 프로그램을 통해 “교육 ↔ R&D ↔ 고용”의 긴밀한 양방향적 산·학·연 연계를 강화할 수 있는 방안을 모색
 - 기업의 R&D 참여를 위한 산·학·연 공동연구, 기술선진국과의 공동 R&D 및 인력교류 등 Open Innovation 정착
- ▶ 공통 기반기술과 연관 산업의 연계 강화
 - 산·학·연 연계 프로그램과 연구 인프라 구축으로 글로벌 경쟁에 공동 대응하여 경쟁력 확보 필요
 - 첨단산업에 사용되는 신소재에 대한 공정기술의 지속적 개발 및 데이터 축적 등을 통하여 미래 산업 발전 대비
 - 산업별 소재, 공구, 공정 및 품질 관리 기술을 특화하여 제품 개발 지원

[참고문헌]

1. Transitioning to sustainable production, Franci Pusavec, Peter Krajnik, Janez Kopac, 2010, Journal of Cleaner Production
2. 난삭재에 대한 친환경 절삭가공 기술, 2011년 1월호, Engineering Information
3. 초저온 냉각방식을 적용한 최신 기계가공, 나덕주, 2011년 5월, Machinery Industry
4. 친환경 난삭재 절삭가공기술, 이춘만, 2012, 기계저널 제52권
5. 난삭재와 신소재의 절삭가공기술, 2000년 2월호, Engineering Information
6. 난삭재 가공용 절삭공구, 정현갑, 2007년 4월, Machinery Industry
7. MAG사, www.mag-ias.com
8. Evaluation of Principal wear mechanism of cemented carbides and ceramics used for machining titanium alloys, Dearley&Gearson, 1986, Materials Science and Technology
9. Delamination During Drilling in Composite laminates, Hocheng&Dharan, 1990, Journal of Engineering for Industry
10. Tool Wear in Drilling Composite/titanium stacks using carbide and Polycrystalline diamond Tools, Kim et al., 2011, Wear
11. The Use of PCD Tools for Machining Fiber Reinforce Materials, Klocke&Wurtz, 1998, Preceedings of ECCM-8
12. Use of ultra-hard coatings in drilling CFRP, Wang et al., 2011, Proceedings of NAMRI/SME

[국내·외 주요 기술개발 현황]

연구기관명	프로젝트명	개요	연구기간
아메코(주)	레이저 복합가공기 개발	Laser assisted 가공을 위한 CNC 공작기계 개발	2005-2009
프리시전 다이아몬드	건식가공용 정밀 다이아몬드 코팅공구 개발	다이아몬드 코팅공구 개발	2002-2004
(주)우송테크	3차원 형상 나노입자 다이아몬드막 고속합성 및 공구개발	나노입자 다이아몬드 코팅 공구 개발	2002-2005
이화다이아몬드공업(주)	고기능 다이아몬드 공구 개발	다이아몬드 공구개발	2003-2008
서울대학교	TiC계 밀링용 나노공구 소재 개발	TiC 코팅 밀링 공구 개발	2002-2010
(주)나노테크	난삭재(인코넬) 가공용 공구재료 개발	인코넬 가공용 초경 공구 개발(분말야금)	2009-2012
챔프다디아(주)	적외선 광학계 렌즈용 난삭재 가공공구개발	Zirconium 등 난삭재 선삭을 위한 특수공구(연삭)	2007-2010
요업세라믹기술원	난삭재 SiC 세라믹 Glass렌즈 코아의 나노가공 기술 개발	SiC세라믹 경면연삭 기술 개발	2006-2008