최근의 기계제작기술 현황과 향후 동향

The Trend and Future of Manufacturing Technology

金 政 斗*
Kim, Jeong Du

1. 개 요

각국의 기계제작기술은 기술수준, 생산능력 등 그 나라 경제의 국제경쟁력을 평가하는 척도가 되고 있다. 또한 최근의 우리나라 경제의 중추적인 역할을 하는 자동차, 반도체, 전기, 전자공업의 생산성 향상과 품질의 정밀성을 위하여서는 고정도 기계제작기계의 보급이 확대될 전망이고, 국내 정밀 공작기계 산업의 성장도 크게 발전할 것으로 기대된다.

금년 9월 9일부터 9월 16일까지 미국의 시카고에서 "Manufacturing 92"란 주제로 제작기술관련 회의와 더불어 IMTS(International Manufacturing Technology Show) '92가 개최되어 최근의 기계제작 기술 관련기계 및 기기들에 관한 전시회가 동시에 개최되었다. 전문기술회의에는 기계가공(Machining), 소성가공(Forming and Fabricating), 자동화(Automation), 로보트(Robots/Vision) 및 환경(Environmental/Wast Management) 분야 등 기계제작기술과 관련된 광범위한 분야에 대한 회의가 각 분과별로 개최되었다. IMTS'92는 1927년부터 개최된 것으로 당시에는 International Machine Tool Show로 공작기계 전문 전시회로 그동안 개최되었으며, 2년전인 1990년부터 International Manufacturing Technology Show로 전시회 명칭을 바꾸어 공작기계 관련 전시 분야를 다양하게 구성하고 있으며, 2년에 한번씩 개최되는 유럽의 EMO, 일본의 JIMTOF와 함께 세계 3대 공작기계 관련 전시회로 알려져 있다. IMTS'92에는 80여개 국가로부터 1800여 업체의 기계제작기계(공작기계, 소성가공기계등) 및 관련 기기업체가 참가하여 그 규모가 방대하였다.

본 고에서는 공작기계와 관련한 전문학술회의 및 IMTS'92를 중심으로 한 최근 기계제작기술의 고속화, 정밀화 및 자동화 현황과 전망 등에 대하여 설명하기로 한다.

2. 공작기계의 高速化, 精密化 및 自動化 기술

2.1 고속화 배경

공작기계에 있어서 고정도화와 고속화는 그 시대에 따라 정의를 수치적으로 표현하기는 극히 어려운 일이나, 고속절삭과 고속연삭은 공작기계 성능, 공구, 피삭재간의 절삭속도를 결정하는 중요한 요인으로 인식되고 있다. 고속절삭에 관하여 지금까지 Von Turkovich, Schultz등이 정량적인 정의로서, 알루미늄등의 연질금속 절삭에서는 절삭속도 3000~5000 m/min, 강(鋼)이나 주철(鑄鐵)의 절삭에서는 1000m/min가 고속절삭의 범위라고 발표한 바 있다.[1) 2)]

공작기계의 고속화 배경은 첫째, 생산성 향상, 정도, 다듬질면, 절삭력, 절삭온도, 칩처리 등을 위한 가공특성향상을 위한 고속절삭, 둘

*機械製作 技術士, 工學博士 KAIST 精密工學科 教授(精密加工 및 工作機械 硏究室)

째, 금속제거율 향상 및 가공시간 단축을 위한 고능률절삭, 셋째, 채터(chatter) 및 진동방지를 위한 고 주축회전수절삭등 3가지로 요약된다. 고속절삭이 생산성 향상에 직결되고 있음은 물론, 항공기용 부품재료에 사용되는 알루미늄합금등의 고속절삭은 그 대표적인 예이다.

절삭속도의 고속화가 가공특성에 미치는 영향에 대하여, 지금까지 여러 주장들이 검토가 행하여 졌으나, 그 중에서도 역사적으로 근거라 할 수 있는 1931년 C. Salomon이 고속절삭에 관한 특허청구를 행한것으로, 특정공구와 피삭재의 상대적 특성에 따라 임계절삭속도 이상의 속도에서는, 절삭속도의 증가에 따라서 절삭온도가 낮아진다는 것을 예언한 바 있다. 이것에 관하여 그후 많은 실험결과를 통하여 의논이 행하여 졌으며, Salomon의 예언에 반하는 실험결과[3]도 공표된바 있으며, 최근에는 부정적 견해가 강한면도 있다.

그러나 고속절삭에서는 특정의 절삭속도 범위내에서, 절삭속도의 증가에 따라 절삭력이 낮아지고[4) 5)] 다듬질면 거칠기가 향상된다[6]고 보고된바 있으며, 고속절삭으로의 기대는 높다. 또 실용적 관점으로는, 일예로 엔드밀에 의한 포켓(pocket) 가공에 있어서, 고속절삭을 행할 경우 절삭날당의 절삭깊이량이 감소하여 절삭저항이 적어지게 되며, 공구나 피삭재의 탄성변형에 의한 가공정도의 열화가 방지되고 고속절삭에 있어서 칩이 비산되어 칩처리가 용이하게 되고[7] 절삭열의 대부분이 칩과같이 제거됨으로서 피삭재나 공작기계의 열변형 관점으로 볼때도 유리하다.

2.2 Milling 및 Grinding용 고속주축

금번 Manufacturing '92 회의 및 IMTS에 선보인 고속주축은 밀링, 드릴링 및 연삭용이며 밀링가공용 절삭속도 적용범위는 다음과 같고 실제 적용사례는 표 1과 같다.

FRP	: 2500~3500 m/min
Al alloy	: 2000~4500 m/min
Copper alloy	: 3000~5500 m/min
Steel	: 600~800 m/min
Grey cast iron	: 750~4500 m/min

IMTS'92에 전시된 고속가공용 머시닝 센터의 최고 주축회전수가 주축의 용량에 따라 10,000 rpm에서 60,000 rpm 범위까지 가능하였으며, 주축의 치수는 대부분이 40번과 50번 등이었다. 이상의 내용을 토대로 볼때 분명한 것은 주축의 고속, 고마력화는 향후의 중요한 과제로 부각되고 있다.

현재 실용화되고 있는 고속 주축의 베어링은 Angular Contact Ball Bearing으로 원심력의 저감과 내마멸성의 향상을 도모키위한 세라믹 전동체를 사용하여 Oil · Air 윤활 냉각법을 채용하고 있다.

고속주축용 베어링으로는 이것외에 공기정압베어링, 자기베어링등이 있으며, 이 베어링과 여타 공작기계용 주축베어링의 특성을 비교하면 표2에 나타난 바와 같다. 공기 정압베어링은 정압베어링이 있는 높은 회전정도를 요구하는 초정밀 주축이나 직경이 적은 고속회전을 목적으로하는 특수한 주축에 이용되고 있다.

주축의 위치편차를 센서로 검출하여, 전자석에 주축을 비접촉으로 중립위치에 설정하는 자기베어링 분야가 광범위하게 응용되고 있다. 자기베어링은 비접촉형이므로 특히 고속회전에 적절하고, 제어장치가 복잡하므로 전자손실에 의한 발열을 제거할 필요가 있다. 연삭용 고속 베어링의 주축회전수는 규격에 따라 9,000~180,000 rpm과 주축동력 0.4~26 kw 용이 있으며, 정적강성 Radial Stiffness 6~350 N/μm, Axial Stiffness 6~138 N/μm 범위가 생산되고 있다.

그림 1은 16×50형 아아버를 갖는 HS 120-42000/10 spindle 연삭아아버의 Radial 변형일예를 나타낸 것이다.

2.3 자유곡면의 금형가공기계

현재까지 금형가공에는 종래의 밀링 또는 copy machine과 같이 모델에 의거하여 copy 가공하는것과 모델과 게이지를 CNC 정보에

표 1 고속가공 실제적용사례

재료	피삭재	가공형태	회전수 (rpm)	공구직경 (mm)	절삭속도 Vc(m/min)	가공형식
Cast Iron	Blank Castings	Slotting, Groove Milling	24000	12	905	HSM
		Deburring	20000	6	377	conv.
Aluminum	Plates	Face Milling	6000	160	3016	HSM Case 1
	Casting	Groove Milling	45000	3.5	495	conv.
		Routing	36000	40	4524	HSM
		Deburring	30000	12	1131	HSM
	Sheets	Routing	60000	20	3770	HSM Case2
		Slot Milling	60000	4	754	conv. Case3
	Plates for Aircraft Industry	Milling of Fin Structures	24000	50	3770	HSM
	Extruded Profiles	Slot Milling	35000	8	880	conv.
Plastics	Plates blocks	Slot Milling	80000	2.4	603	conv.
	Optical Frames	Contour Routing	20000	8	503	conv.
Fibre Reinforced Plastics	PCBs	Drilling	100000	0.3	94	conv.
	Fibre Reinforced Plastic	Slot Milling	40000	5	628	conv.
	Fibre Glass	Slot Milling	60000	8	1508	
Non Ferrous	Graphite	Slot Milling	54000	6	1017	
	Copper	Routing	40000	30	3770	HSM8

※ HSM : High Speed Machining
conv. : Conventional Machining

표 2 각종 공작기계용 베어링의 특성비교

항목 \ 베어링의 종류	동압베어링	정압유체베어링	정압공기베어링	자기베어링
고속회전성	×	△	○	●
회전정도	○	●	●	○
부하용량	○	●	△	○
강성	○	●	△	○
감쇄성	●	●	△	○
발열	×	△	●	×
수명	○	●	●	●
보수	○	○	△	△

●: 극히 좋음 ○: 좋음 △: 보통 ×: 나쁨.

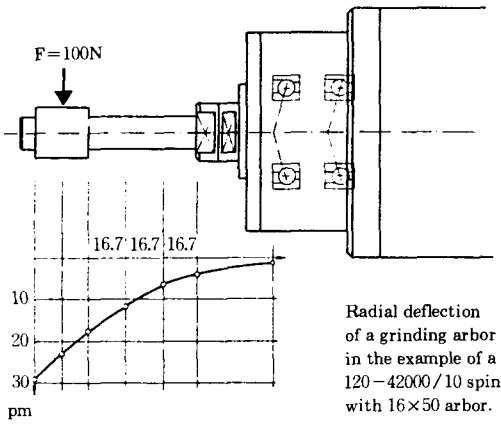


그림1 연삭용 아아버의 레이디얼 변형량(GMN, 독일)

변환시켜 가공하는 경우 또는 자동프로그램에 의하여 도면에서 직접 CNC data를 작성해서 가공하는 경우가 있다. 따라서 이것과 대응한 copy milling, CNC copy milling 또는 자동프로그래밍과 머시닝 센터의 발전등을 볼 수 있다.

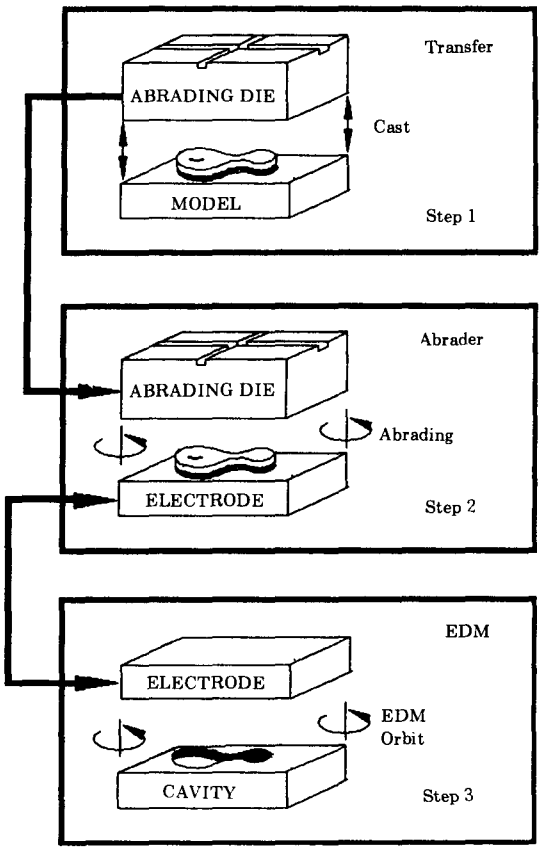
Machining Center는 주축의 고속화 경향과 함께 5축 가공용으로 보편화 되었으며, 특히 금번 시카고 전시회에 소개된 신제품은 Hausermann에서 개발한 EDM 방식의 Abrading + EDMing으로 그림 2는 금형제작과정을 나타내고 있다.

2.4 초지립 연삭 및 드레싱 기법

최근 전자산업 및 우주항공분야에 널리 사용되는 재료인 실리콘 웨이퍼, 페라이트, 복합 재료 및 세라믹 등 경취재료로 난삭재의 정밀가공을 목적으로 CBN, 다이아몬드지석을 이용한 경면연삭에 대한 관심이 높아지고 있다. 표 3은 연삭가공시의 적용입도와 표면거칠기를

표 3. 적용입도와 표면거칠기의 관계

(입도)	(가공면 거칠기 R_{max})
조립 #60~#80	~4.0μm
조립 #100~#200	3.0~1.0μm
조립 #325~#800	0.8~0.4μm



Step 1 : An abrasive-filled epoxy mixture is cast over the electrode model(male) to form a female abrading die
Step 2 : The abrasive-filled epoxy abrading die from step 1 and the graphite electrode are securely mounted in the Abrader
Step 3 : CNC/EDM with orbital capacity are used to EDM the cavity to size by orbiting with the same motion used to abrade the electrode undersize in step 2.

그림2 Abrading/EDMing에 의한 금형 제작 과정. (Hausermann, 미국)

적용입도
- 미립
  - #1000~#2000……200~80nm
  - #4000~#6000……60~40nm
  - #8000~#10000… 30~20nm
- 초미립
  - #20000~#30000…20~10nm
  - #60000……100A~
  - #120000……80A~
- 초미분 #3000000(50A)……적용가능?

나타낸 것으로서 경면을 얻기위하여서는 입도 #1000 이하의 지석을 이용하여야 200nm 정

도의 표면거칠기가 가능하고 경면의 범주내에 포함된다고 볼수 있다. 입도 #1000이하의 지석으로 연삭가공을할 경우 종래의 개념상으로 loading과 grazing의 발생으로 인하여 연삭가공이 불가능한 가공법이나, 그간 에어베어링 또는 유압베어링 주축 시스템에 의한 고정도 연삭기능이 개발되었고 CBN, 다이아몬드 입자등 초미립(superabrasive) 연삭용 지석등이 출현함에 따라 경면 연삭이 가능케 되었다. 특히 최근에 와서 연삭가공시의 연속드레싱 방법이 개발되어 경취재료에 대한 경면연삭의 발전에 지대한 공헌을 발휘하고 있다. 경면가공법의 발달은 비단 연삭가공 뿐 아니라 절삭분야에서도 실용화 되고 있으나 표4에서 나타낸 바와 같이 절삭에 의한 경면은 알루미늄, 동, 프라스틱등의 연성재료에 주로 적용되고 있으며, 실리콘 웨이퍼, 유리, 페라이트, 세라믹등의 경취재료용 경면가공은 연삭에 의존되고 있다.

현재까지 알려진 드레싱 기법은 MEEC (Mechanical Grinding Electrolysis Electrical Discharge Combine), EDM 및 Elid 방식 등이 있으며, 이중 Elid 방식이 가장 효과적인 것으로 분석되고 있다.

Elid(Electrolytic Inprocess Dressing)는 주철 또는 금속본드 지석의 드레싱을 간단하고 효과적으로 운영할 수 있으며, 입도 #4000 이상의 초미소 입자생성은 물론 경면 연삭을 용이하게 실현시킬수 있다는 것이 특징이다. 이 방식은 전기 분해에 의한 +극의 요출을 이용하는 드레싱법으로서 특히 주철본드 지석에 효과가 현저히 나타나는 것으로 분석되고 있다.

그림 3은 Elid 연삭드레싱 원리를 설명하고 있는 것으로서 지석과 전극사이를 0.1mm 간격으로하고 지석과 대응하는 상태로 전극을 설치한 다음 펄스형의 DC-power를 사용하면 금속본드의 금속이 이온(Ion)이 되며 요출하게 된다. 여기에서 금속부분만이 요출되기 때

표 4 최신 경면가공기술의 동향

고	* 절삭가공 → 초정밀 절삭 → 다이아몬드 turning (single point 바이트)	연성재(비철)	
운	* 연삭가공 → 초정밀 연삭 → Elid 경면 연삭법 (메탈본드 초지립 지석)	(경취재, 연성재료)	
동	* 연마가공 → chemical polishing → polishing (연질공구)	(경취재등료)	
전			
사			
성			
저	(가공분야)	(방법 통칭/공구)	(실현 방식/대상)

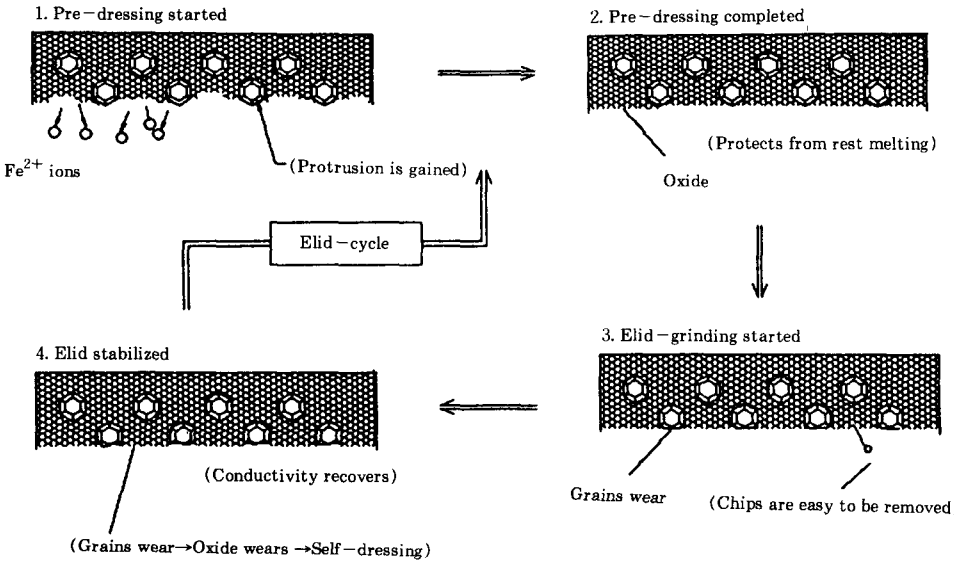


그림3 Elid 연속드레싱의 원리

문에 입자가 돌출하게 됨으로서 드레싱의 효과가 얻어진다.

드레싱 중에는 적절한 새로운 입자의 돌출이 항상 존재하기 때문에 효과가 있으며, 전해액에 의하여 연삭칩을 제거하여 주고, 칩이 입자 사이에서 방해(clog) 하는것을 방지한다. 이때 전해작용은 어디까지나 지석에만 일어나고 피삭재에는 일어나지 않는다. 그림 4는 Elid 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

연속 드레싱에 적합한 지석은 주철분과 다이아몬드의 소결에 의한 주철화이버 본드 다이아몬드 지석으로 주철 화이버 매트릭스가 보강된 강인한 지석으로 알려져 있으며, 난삭재료의 고능률 연삭에 유효하여 효과를 인정받고 있다. 연삭가공에 대한 불균형 지석은 5㎛정도의 진동을 유발시켜 가공면에 나쁜 영향을 미치게 됨은 물론 지석의 수명에도 문제를 야기시키게 된다. Schmitt사에서는 0.2㎛ 이내의 진동 밸런싱 시스템을 개발하고, 2개의 weight를 전기 모터에 의하여 정밀기어 궤도를 따라 움직임으로서, 연삭지석의 편심을 최소화시키고, 불균형과 진동은 센서에 의하여 감지되고 그 신호는 제어기에 전달되는데 제어기는 주축회전에 의하여 신호를 필터링하고 제어기는 진동 진폭을 줄이는 방향으로 밸런스 헤드의 두 추를 작동시키게 된다.

그림 5는 독일 Euchner사의 공구 수명 감지 시스템으로 AE(Acoustic Emission)센서를 이용한 방식을 채용하고 있다. 현재까지 실용화된 시스템은 절삭력, 연삭력 또는 전류의 크기 등을 이용한 방식등이 소개되었으며, AE방식에 대하여 연구실 단위에서 많은 연구결과들이

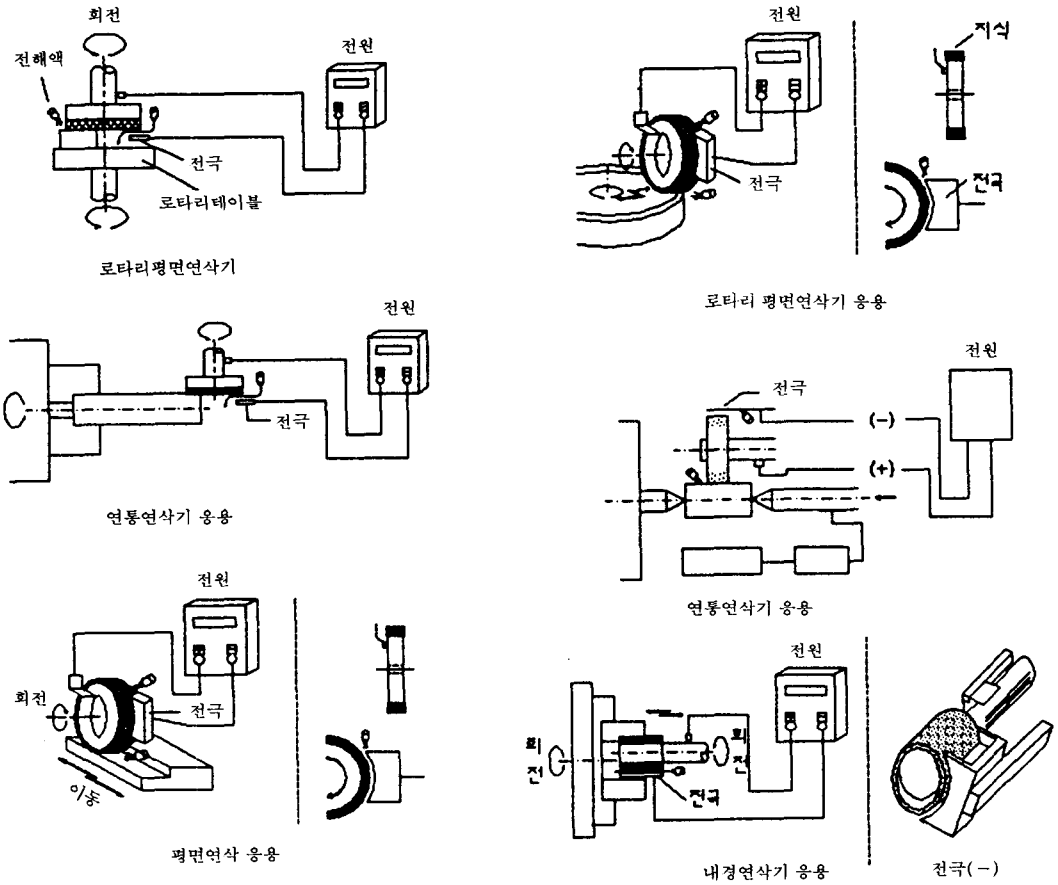


그림4 Elid 장치의 개략도

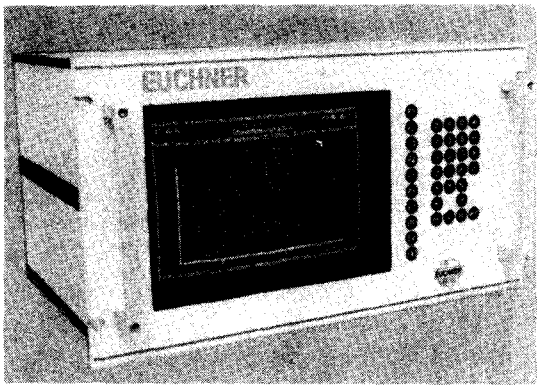


그림5 공구수명감지 시스템(Euchner, 독일)

소개된 바 있다.

이 방식은 Real-time 시그널방식으로 절삭시 AE 영역의 공차 범위를 갖으며 한계공차 영역 이상에 도달하면 공구를 원점으로 보내고 교환을 하게된다.

3. 향후동향 및 결론

21세기를 대비한 기계제작 기술은 컴퓨터를 중심으로 고부가가치 및 생산성을 위하여 고속화, 정밀화의 가속화가 이미 진행중에 있으며, 5000m/min 이상의 고속화와 Sub nm단위의 초정밀 가공 및 공구수명검출과 관련된 자동화 관련 기술의 발전이 예상된다.

최근 국내의 G7연구 관련 자료에서 지적한 바와같이 현재 우리나라의 가공 정밀도는 20μm/100mm 정도로 선진국의 0.5μm/100mm에 비하여 상당한 격차를 갖고 있으며, 기계제작기술의 핵심기계인 공작기계는 고급, 중급, 저급으로 분류할때 저급수준정도이며, 공작기계 부품의 국산화율이 50%~60% 수준인 것으로 평가되고 있는것이 현실이며, 선진국과 비교할때 초보단계로서 이의 종합적인 대책이 요망된다.

금번 IMTS'92에 한국은 대우, 두산, 화천, 기아, 세일등 6개 공작기계 제작회사의 참여로 우리나라 공작기계의 대외 선전에 노력을 기울이고 있으나, 미국이외의 독일이 72개업체, 일본 50여개 업체이며 대만 20개 업체, 중국 15개 업체등이 참여함으로서 전시회 참가수가 적었으며, 우리의 보다 적극적인 개발과 수출을 위한 대외 선전 노력이 절실히 요망된다.

더욱이 최근 우리와 국교를 맺은 중국의 Shanghai Machinery사등은 공작기계는 물론 Vernier Calipers, Micrometer, Dial Indicator등 기초측정기구등의 자국 생산품을 소개하므로서, 이 분야에 대한 우리나라의 전량 수입에 의존하는 것에 대하여 대조적인 느낌을 받았으며, 측정기등 기초 기반공업에 대한 육성 정책이 요망된다.

참고문헌

1. B.F. von Turkovich, Influence of Very High Cutting Speed on Chip Formation Mechanics, Proc. 7th MAMRC, (1979)241
2. H. Schultz et al., Hochgeschwindigkeits Zerspanung, Werkstatt U. Betrieb, 114, 8 (1981) 527.
3. J.F. McGee, An Assessment of High-Speed Machining, SME Tech. Paper, MR 78-648 (1978) 1.
4. K. Tuffentsammer and G.Icks, Lathe Criteria for the Turning at Ultra-high Cutting Speed, Proc. 10th NAMRC, (1982) 377.
5. D.G. Flom, Implementation of High-Speed Machining, High Speed Machining, ASME, (1984) 445.
6. H. Schultz, High Speed Milling of Aluminium Alloys, High Speed Machining, SME, (1984) 241.