

가스터빈 산업에서의 CNC 기반기술 응용현황 및 전망[§]

강 신 호*†

* 한전 KPS(주), GT 정비기술센터

Application Status and Prospects of CNC-Based Technologies in Gas Turbine Industry

Sin Ho Kang*†

* Gas Turbine Technology Service Center, KEPCO Plant Service & Engineering Co.

(Received June 7, 2010 ; Revised November 24, 2010 ; Accepted November 30, 2010)

Key Words : Gas Turbine(가스터빈), CNC based Technology(CNC 기반기술), Adaptive Machining (적응형 가공)

초록: 가스터빈 회전익이나 고정익 에어포일이 지닌 3 차원 곡면형상의 복잡성은 제조산업뿐만 아니라 재생정비 공정조차 어렵게 만드는 요인이다. CNC 기반기술을 이용한 공작기계와 공정 관련 프로그램들은 1990 년대부터 발달하기 시작한 컴퓨터 기술 덕분에 급속히 개발되면서 가스터빈 분야로 그 응용범위를 넓혀 나가고 있다. 특히 적응형 기능을 겸비한 5 축 동기 제어형 생산장비들은 유연한 공정능력과 손실된 부위의 형상 정보를 결정하는데 탁월한 성능을 보이고 있다. 8 축 동기제어가 가능하도록 구비된 로봇형 공정시스템은 매우 강력한 공정절차 표준화를 이룰 수 있게 할 뿐만 아니라 높은 생산성도 가져다 준다. 이 논문에서는 가스터빈 산업에서 CNC 기반기술의 응용현황을 검토하고, 부품 제조산업과 재생정비 산업의 공정비교와 개발사례를 통해 향후 전망을 제시한다.

Abstract: The three-dimensional complex curvature of the airfoil complicates the manufacture and repair of gas-turbine components. As a result of the developments in computer technology since the early 1990s, CNC-based technologies for machine tools and related programs have been increasingly applied in the gas turbine industry. In particular, five-axis simultaneous machines with adaptive functions have proven its excellent flexibility and productivity due to the capability in determining the 3D data from the unknown curvature. A well-organized robot system with eight-axis simultaneous control can lead to powerful standardization and high productivity. We summarize and review CNC technologies and their applications in the gas turbine industry, with a discussion of the manufacture and repair of gas turbine parts.

1. 서 론

가스터빈은 항공기 엔진이나 발전용으로 널리 쓰이고 있는 동력발생장치이다. 외부로부터의 연료공급과 압축기에 대한 초기 구동력만 주어지면 연속적인 운전이 가능한 내연기관의 하나이며, 중량 대비 출력이 크기 때문에 소형에서부터 대형 프레임에 이르기까지 다양한 모델의 가스터빈이 상업적으로 활용되고 있다. 현재 가스터빈의 주요

용도는 항공기 엔진, 선박용 엔진과 같은 동력추진용과 전기생산을 위한 발전용으로 나뉘어진다. 대규모 아파트 단지나 경기장 같은 곳의 수요에 따른 전력수급, 또 연소가스의 폐열을 이용한 지역난방, 또는 화재진압용 설비 등 유연한 운용성이 가스터빈의 장점이다. 특히 복합사이클을 이용한 발전소는 전국적으로 분포되어 전력수요에 따른 첨두부하형으로 운전되고 있다. 과거 디젤이나 초저유황 중유(LSWR)를 사용했을 때보다 청정연료인 천연가스(LNG)를 사용함으로써 환경친화적인 기대치와 효과는 높아지고 있으나, 연소온도 상승으로 인해 질소산화물(NOx)의 발생이 증가하는 등 해결해야 하는 문제는 여전히 남아있다.

대용량급 가스터빈에 대한 국내외적 수요의 증

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 에너지 및 동력공학부문 춘계학술대회 (2010. 5. 28., 한국과학기술회관) 발표논문임.

† Corresponding Author, shkang@kps.co.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

가 추세가 두드러진 만큼, 국내에서도 독자적인 모델을 보유하고 제조할 수 있어야 한다는 목소리가 높다. 설계능력 측면을 짚어본다면, 국내의 가스터빈 설계기술 수준은 이제 걸음마를 익힌 단계이다. 비록 1.2MW~5MW 급의 소형 가스터빈을 국내업체가 주도하여 개발했거나 개발 중이며, 일부 군수용 항공기 엔진부품을 생산 중이지만,⁽¹⁾ 중대형급의 가스터빈을 독자적으로 설계할 수 있는 능력은 아직 미지수다. 가스터빈의 설계기술 및 성능해석 등 필요한 요소기술과 프로그램의 확보도 필수적이지만⁽²⁾, 통합적이고도 체계적인 R&D 를 유도하고 지원하는 여건은 여전히 어렵다.

국내외적으로 가스터빈에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있고, 풍부한 경험과 노하우를 바탕으로 세계시장으로의 진출이 활발한 현실을 감안한다면, 독자적인 가스터빈 설계 및 제조기술 개발의 필요성은 너무나 타당하다. 최근 들어 UAE 원전 수주와 함께 원자력 발전 기술에 대한 관심과 수요가 절정에 달해 있지만, 가스터빈의 역할 또한 분명히 있는 한 가스터빈 기술의 자립은 늦춰질 수 없는 중대과제이다. 따라서 현재의 상업적 수요에만 부응하는 단편적 R&D 활동에 의존할 것이 아니라, 통합적이고도 장기적인 안목에서의 가스터빈 기술 인프라를 구축하는 일이 무엇보다 중요한 일이라 생각된다.

본 논문에서는 향후 국내에서 활발하게 전개될 가스터빈 부품의 제조 시스템에 필요한 CNC 기반 기술들의 적용현황과 발전추이를 검토하고자 한다. 특히 표준화가 용이하지 못한 제조나 재생정비 산업에서 CNC 기반기술 공정들의 활용예를 위주로 분석하였으며, 해외 주요 가스터빈 제작사들의 전략을 참고로 하여 향후 개발 및 응용 방향을 제시하고자 한다.

2. 고온부품 제조

2.1 가스터빈 고온부품 제조산업의 특징

국내 발전용 가스터빈 중 2000 년대에 들어서 설치되었거나 성능개선(uprate)된 발전소 설비들은 단일사이클 용량 160MW 이상의 F 급 가스터빈이 주종을 이룬다. 이들 가스터빈들은 터빈 전단 고정익 출구에서 측정되는 터빈입구온도(TIT)가 대략 1350℃에 달하므로, 고온부품 제조 시에 적용된 요소기술들의 수준도 다르다. 터빈부품 중에서 가장 높은 온도에 노출되는 전단 고정익과 회전익에는 대개 일방향 응고나 단결정 소재를, 후속단

에는 다결정 소재를 사용한다. 또한 복잡한 냉각 기법이 적용된 전단의 회전익과 고정익은 에어포일 내부에 미로형 냉각유로를 지니고 있다. 이러한 3 차원 곡면형상의 에어포일과 냉각유로는 진공에서의 인베스트먼트 주조법(investment casting)에 의해 만들어진다.

주조과정에서 분리된 부위는 용접이나 브레이징으로 합쳐지고, 끼워맞춤 부위는 기계가공으로 정밀공차를 유지하게 된다. 또한 운전환경으로부터 모재를 보호하기 위해 열차폐 코팅(thermal barrier coating)이나 내산 내식용 코팅을 적용하고 있다. 주요 부품들 별로 적용된 제조방법과 적용기술들을 Table 1 과 2 에서 보여주고 있다.

Table 1 Typical manufacturing strategies for major combustor parts

Part Name	Area	Process	Applicable Technologies	Control
Can Type Combustion Liner	Can Body	Forging+Welding	Press/Roller Forming GTAW, PAW, Spot Welding	
	Body Inner Surface	TBC Coating	VPS + APS Coating	CNC
	Body Outer Surface - Ribs/Fins	Machining	Turning, ECM	CNC
	Holes (Dilution/Cooling)	Forging, Machining	Punching, EDM, LBD	CNC
	Spring Seal	Forging	Press forming	
	Spring Seal Outer Surface	Anti-Wear Coating	APS Coating	CNC
	Collars, Tubes	Forging, Casting	Press Forming Centrifugal Casting	
Can Type Combustor Transition	Transition Body	Forging + Welding	Press Forming + Welding/Brazing	
		Partially Cast Parts	Investment Casting + Welding	
	Body Inner Surface	TBC Coating Anti Wear Coating	VPS + APS Coating APS Coating	CNC
	Seal Chanel Seal Slots	Casting + Welding	Investment Casting + Weld Joining to Body Wear Strip Brazing	
	Cooling Holes	Machining	EDM, Mechanical Drilling	CNC
	Fins	Machining	Milling, ECM	CNC
Sub Parts	Forging, Machining + Welding	Press Forming/Machine Tools + GTAW Welding	CNC	

Table 2 Typical manufacturing strategies for turbine blades and vanes

Part Name	Area	Process	Applicable Technologies	Control
Cooled Blades	Blade Body	Casting	Investment Casting + Ceramic Core	
	Airfoil Surface	Coating	VPS + APS Coating, Diffusion Coating	CNC
	Tip Cap	Welding	EBW, LBW Brazing	CNC
	Tip Height	Machining	Grinding	
	Dovetail	Machining	Creep Feed Grinder	CNC
	Cooling Hole	Machining	EDM, ECM, LBD	CNC
	Shank Face	Machining Casting	Creep Feed Grinder Investment Casting	CNC CNC
Uncooled Blades	Blade Body	Casting Forging	Investment Casting Press forming + Machining	CNC
	Shroud-Contact, Rail	Casting	Grinding, Grinding	
	Dovetail	Casting, Forging	Creep Feed Grinder Machining Center	CNC
	Shank	Machining	Creep Feed Grinder	CNC
	Vanes (Cooled, Uncooled)	Body (Airfoil+ Side Wall)	Casting	Investment Casting+ Ceramic Core
		Welding	Partially Weld Joining	
	Airfoil Surface	Coating	VPS + APS Coating, Diffusion Coating	CNC
	Cooling Hole	Machining	EDM, ECM, LBD	CNC
	Hook Fit	Machining	Machining Center, VBM	CNC CNC
	Seal Slots	Machining	EDM	CNC
	Side Wall-Face	Machining	EDM, Machining Center	CNC CNC

※ CNC(Computer Numerical Control), GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), PAW(Plasma Arc Welding), TBC(Thermal Barrier coating), VPS(Vacuum Plasma Spray), APS(Air Plasma Spray), ECM(Electrochemical Machining), EDM(Electrical Discharge Machining), LBD(Laser Beam Drilling), EBW(Electron Beam Welding), LBW(Laser Beam Welding)

2.2 CNC 기반 공정기술의 현황

2.2.1 가스터빈 제조산업에서의 CNC 현황

앞 절의 Table 1 과 Table 2 에서 보듯, 고온부품 제조과정에서 CNC 를 기반으로 하는 공정기술들의 적용은 이미 보편화되어 있다. 정밀주조법을 통하여 복잡한 3 차원 날개형상이 완성되는 과정을 제외하고, 정밀하게 끼워 맞추어지는 더브테일이나 팁 부위 등 정밀한 치수를 갖는 부위의 가공은 대부분 CNC 기반의 장비들을 이용하여 마무리 되는 것이 일반적이다. 이 때 정밀주조의 경우나 단조재를 프레스 성형하는 경우에 CNC 기반 기술과의 관련이 없는 것처럼 보이지만, 사전 준비

작업 중 모형과 금형이 이미 CAD(Computer Aided Design)와 CAM(Computer Aided Manufacturing) 호환 체계하에서 신속하게 설계되고 제작 완료된 뒤이다.

컴퓨터 기술의 발달로 인해 설계 및 측정 관련 소프트웨어의 진화 또한 눈부실 정도이다. 다재다능해진 CAM 프로그램에다 센서기술의 접목은 CNC 가공시스템 내에서 삼차원 입체를 스캐닝하고 이를 토대로 공구경로를 만들어 가공을 실행시킬 수 있게 하며⁽³⁾, 가공된 부품 및 공구의 정밀도 검사까지도 실행할 수 있게 함으로써 설계실, 측정실, 가공실의 기능을 통합시킨 것과 같은 효과를 누릴 수 있게 한다. 이는 최근의 CNC 기반 가공기술의 동향이 제품의 실사 및 응용 생산기술의 자동화에 초점을 둔 것과⁽⁴⁾ 일맥상통하는 결과이다.

과거의 NC 형 가공장비의 경우 오퍼레이터가 NC 명령어에 익숙하거나 누군가는 가공프로그램을 작성해주어야 가공이 가능했었다면, 지금은 내장 또는 외장된 workstation 급 PC 를 통해 모델링 데이터와 NC 프로그램을 다스림으로써, 오퍼레이터에 요구되는 숙련 정도가 낮아지는 효과를 가져왔다. 한편으로는 일련의 공정 라인상에 있는 CNC 장비들에 대한 제어가 쉬워짐으로써, 가공절차나 적용 프로그램에 대한 표준화가 가능해졌다는 점도 빼놓을 수 없는 이점이다. 그 결과 유명 가스터빈 제작사의 부품 가공공장에서와 같이, 유사한 공정에 있는 장비의 CNC 데이터와 프로그램의 생성, 치공구의 검교정 및 공정표준화를 일원화하려는 시도⁽⁵⁾는 배울 만하다

2.2.2 가스터빈 재생정비에서의 CNC 현황

가스터빈 부품의 재생정비 공정은, 다소 범위는 다르지만 제조 시에 동원되는 대부분의 공정 능력을 요구한다는 점에서 무게를 갖는다. 다만 기본적으로 이미 제조가 완료된 부품이 있어야만 재생정비 행위를 실현할 수 있다는 점이 근본적인 차이이다.

대상부품이 운전에 투입된 이력을 지니고 있는가 하는 점에서도 구별이 된다. 한번도 사용하지 않은 회전익이나 고정익을 재생정비하는 경우는 없기 때문이다. 다만 성능개선을 위한 디자인 측면에서의 개조작업(modification)을 제품 출시 이후에 적용하는 경우는 예외이겠지만, 대부분은 일정 기간 사용된 부품에 재생정비 공정이 적용된다.

재생정비 공정에서는 초합금 소재를 진공 주조

한다든지, 날개나 더브테일 부위를 처음의 모양으로 다시 가공을 한다든지 하는 일은 일어나지 않는다. 재생정비는 손상된 부품을 성능과 수명에 지장이 없도록 복원시키는 것을 주목적으로 하기 때문에, 제조공정과 는 적용범위와 세부기준에서 차이가 있다. Fig. 1 은 제조와 재생정비의 공정범위를 도식적으로 비교하여 보여준다.

결과적으로 재생정비 공정은 유연해야 하며, 제조공정처럼 정형화 될 수 없는 경우가 많다. 또 CNC 기반의 가공장비나 프로그램을 이용한 공정 진행은 제조과정처럼 쉽지가 않은데, 이는 다음과 같은 이유들 때문이다.

- (1) 부품이 운전환경에 노출되는 동안 변형되는 경향을 갖는다. 그러므로 설계 당시의 모델링 데이터가 맞지 않게 될 뿐만 아니라, 운전된 같은 부품끼리도 똑같지가 않다.
- (2) 부분적으로 원형이 손실되어 있거나, 결함을 제거하는 과정에서도 원형이나 치수의 손상이 불가피하게 일어난다. 따라서 손상된 부위의 형상이나 치수정보를 확보하는 일은 언제나 먼저 진행되어야 한다.
- (3) 부품에 발생하는 손상 유형이 다양하고, 그마저도 운전특성이나 이력에 따라서도 다르게 나타난다.

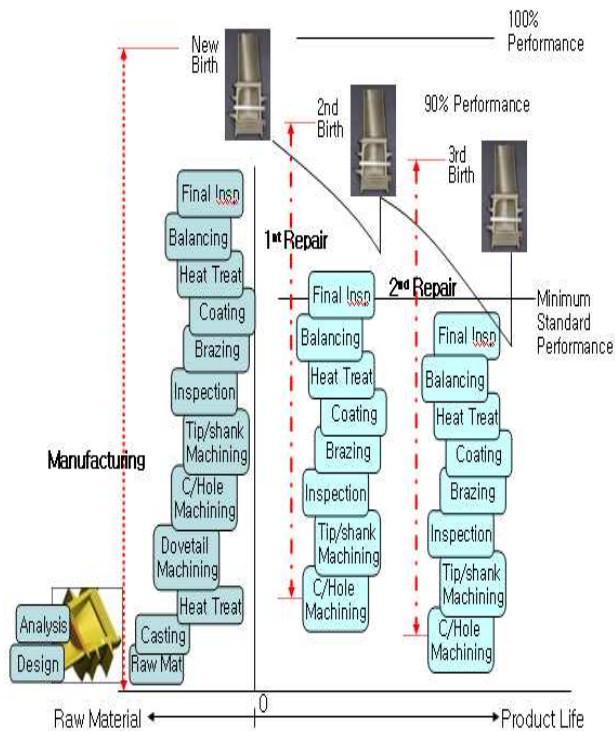


Fig. 1 Diagram showing difference between manufacturing and repair in terms of the process applied and product life

(4) 재질적 변화가 불가피하며 응력을 지니고 있으므로, 드러나지 않은 결함이 내재되어 있을 수 있다.

이러한 특징 때문에 그 동안 재생공정에서는 제조공정과 같이 CNC 기반기술을 활용한 가공장비나 컴퓨터 프로그램에 의존한 공정을 추진하기가 쉽지 않았으며, 숙련된 기술자의 수가공에 의존하는 경향이 높을 수 밖에 없었다.

2.3 CNC 기반 Adaptive Machining Process

최근의 CAM 용 컴퓨터 프로그램의 발달과 센서 기술은 정형화할 수 있어야만 가능했던 CNC 기반의 자동화 공정을 재생정비 공정에서도 가능하게 해준다. 이때에 필요한 것은 손상되었거나 복원과정 중에 용접이나 브레이징으로 덮여 원형을 유지하지 못하는 부분의 형상정보를 찾아내어 NC 코드화는 일인데, 이는 다음과 같은 두 가지 방식으로 해결이 가능하다.

2.3.1 적응형 기계가공(Adaptive Machining)

적응형 기계가공 방식은 이미 손상된 부위에 대한 정비방법을 결정하고 공정을 진행한 후에 감춰진 형상을 복원하기 위한 과정이다⁽⁶⁾.

- (1) Digitizing : CNC 가공장비 내에 용접정비된 부품을 장착하고 접촉식 또는 비접촉식 센서로 스캐닝한다.
- (2) Modeling : 스캐닝 데이터를 분석한 외장형 컴퓨터의 CAM 프로그램이 용접된 부위의 원형을 예측한다.
- (3) 예측된 NC 데이터로 공구경로를 생성한다.
- (4) CNC 머시닝센터는 외장 컴퓨터가 전송한 이 명령을 통해 자동으로 가공프로세스를 수행한다.

Fig. 2 는 용접된 블레이드 팁부위를 적응형 기계가공 방식을 이용하여 원래의 형상으로 가공한 예를 보여주고 있다

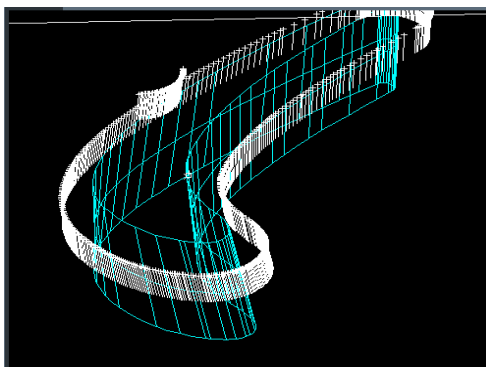
2.3.2 적응형 복원정비(Adaptive Restoration)

적응형 복원정비방식⁽⁷⁻⁸⁾은 부품 검사단계에서부터 공정방법의 결정에 이르기까지의 전 과정을 CNC 기반기술에 의존하여 진행한다는 점에서 앞의 경우와는 다르다. 적응형 복원정비는 다음과 같은 절차로 진행된다.

- (1) Digitizing : 부품을 3 차원 측정기, 3D 스캐너 등의 역설계 장비를 이용하여 스캐닝한다.
- (2) Reverse Engineering : 스캐닝한 모델 데이터를 참고모델과 비교하여 복원할 형상데이터를 만든다.
- (3) Modeling : 손상부위를 포함한 원래의 형상



(a)



(b)



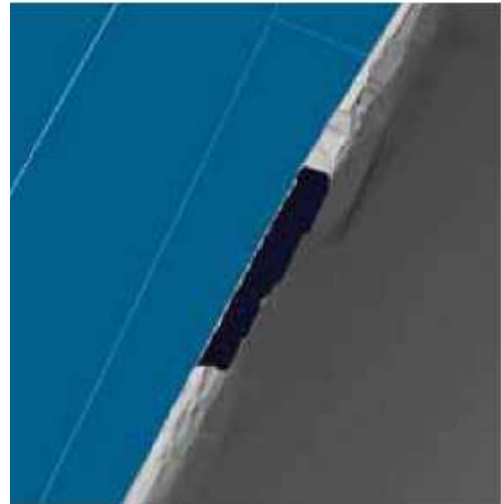
(c)

Fig. 2 Examples of Adaptive Machining Process: (a) Digitizing with a touch sensor, (b) Calculation of tool path by CAM program linked with CNC machining center, and (c) Machined blades

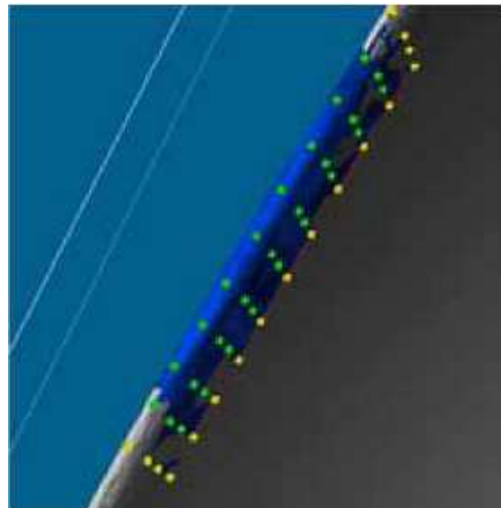
데이터를 창출한다.

(4) 정비프로세스가 결정한 형상데이터를, 이후에 결정될 정비공정 별로 NC 코드화 한 뒤, 레이저 용접, 기계가공, 또는 검사 등에 활용한다.

Fig. 3에서는 적응형 복원정비 방식에서 손상된 부위를 digitizing 후, 원형데이터를 polygonal modeling 방식으로 컴퓨터 상에서 시뮬레이션 한 예이며, 이의 결과를 이용하여 정비방법과 공정을 결정한다.



(a)



(b)

Fig. 3 Examples of Adaptive Restoration Process: (a) Digitizing damaged airfoil including unscanned edge, and (b) Restoration with polygon mesh (Source: Gao, J. et al)⁽⁸⁾

2.4 Multi-Axis Robot System 의 활용

CNC 시스템을 이용한 기계가공 공정뿐만 아니라 다관절 로봇 시스템 또한 특수공정에 활용하는 사례는 그 동안 많이 보고되어 왔다. 특히 자동차 조립라인이라든지, 핵연료 장전과 같이 원자력 분야 등에 로봇을 이용하는 사례는 많으며, 가스터빈 분야에서도 코팅용 로봇시스템의 활용은 상업적으로 매우 활성화되어 있다.

다관절 로봇을 활용하여 회전익이나 고정익의 에어포일에 코팅층을 입히는 공정은 이미 오래된 일이다. 이때 에어포일의 복잡한 곡면을 그리드로 나누고 일정한 간격의 절점들을 연결한 다음, 코팅건의 경로로 인식시키는 프로그래밍 과정이 필

요하다. 다만 최대 6 개의 로봇 관절과 팔이 모두 직렬로 연결되어있는 것이 일반 CNC 시스템과 구별된다. 따라서 프로그램시의 언어와 논리도 다를 수 밖에 없다.

가스터빈 제작기술을 보유한 선진국이 아닌 나라나 기업에서는 대형의 터빈날개 에어포일에 대한 코팅기술이나 경험의 기회조차 접하기가 힘들다. 최근의 대용량급 가스터빈의 고온부 부품들에는 고기능성 코팅을 적용하면서, 고온에 노출될 수 있는 부위는 어디든 코팅층이 입혀지도록 세밀한 프로그램을 만든다. 이를 위해서 로봇과 턴테이블을 동기제어가 가능한 시스템으로 구성함으로써 8 축 이상으로 구성된 로봇시스템을 표준화시키는 추세가 두드러진다.

표준화된 레이아웃의 다축 로봇시스템을 이용할 때 다음과 같은 장점을 기대할 수 있다.

(1) 코팅설비, 오퍼레이터, 코팅 프로그램간의 호환이 가능해진다. 이를 통해 생산량을 분산시키고 공정 유연성을 확보할 수 있다.

(2) 코팅용 고정구와 마스크(masking) 등의 설계와 제작, 활용 등 하드웨어 측면에서만뿐만 아니라 코팅 프로그램의 측면에서도 효과적인 표준화가 가능해진다.

(3) 로봇의 검교정이나 코팅공정의 품질관리가 용이해진다.

3. 결 론

가스터빈 부품을 제조하거나 재생정비하는 산업 분야에서는 대상부품이 지닌 3 차원 형상의 복잡성 때문에, CNC 기술을 활용한 설계 및 제조관련 기술의 이용이 필수적이면서도 어려움이 따른다. 고온부품의 제조 시에는 모델 데이터와 CAM 프로그램을 활용하여 CNC 기반기술로 제조공정을 구축하기가 용이하나, 재생정비 시에는 다양한 형상과 공정상의 변수로 인하여 정형화된 CNC 프로그램 대신 적응형 프로그램의 개발과 활용이 불가피해진다. 지금까지 검토한 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 각종 제조공정에서 CNC 기반 공정과 가공장비의 활용은 필수적이며, 이를 통해 통합된 생산 및 품질관리를 실현하고 있는 추세가 두드러진다. 최근의 CNC 기술은 다재다능함을 요구하는 산업적 수요에 충분히 부응한다.

(2) 가스터빈 고온부품의 재생정비 산업에서도 적응형 시스템을 이용하여 기계가공을 실현하거나 복원정비 공정을 구축하는 등 다양한 개발시도와 성공사례가 보고되고 있다.

(3) 강력한 공정절차 표준화와 높은 수준의 품질 및 생산성 향상을 도모하기 위해서는 CNC 체계로 구동되는 로봇시스템 등 하드웨어 측면뿐만 아니라 프로그램과 같은 소프트웨어 측면에서 표준화의 중요성이 새롭게 대두되고 있다.

후 기

이 논문은 2010 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제 일환으로 작성되었습니다. 지원에 감사 드립니다. (과제번호: 2009T100100616)

참고문헌

- (1) Chen, S. B., 2006, "Development and Manufacturing Technologies for Gas Turbine in Samsung Techwin," *Journal of the KSME*, Vol. 46, No. 10, pp. 57~64.
- (2) Kim, S. Y., Oh, J.S. and Park, M. R., 2000, "Design and Evaluation Technologies for Gas Turbine," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 3, No. 3, pp. 50~54.
- (3) De Silva, A.K.M., and McGeough, J. A., 2000, "Computer Application in Unconventional Machining," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 107, pp. 276~282.
- (4) Seong, D. J., 2007, "The Trend of CNC Technology and Development Strategy of Industry," *Journal of the KSPE*, Vol. 24, No. 1, pp. 20~26.
- (5) GE, Internal Report. 2006.
- (6) Walton, P., 2005, "GT2005-68743 Adaptive Machining of Gas Turbine Components," *Trans of ASME Turbo Expo*, pp. 195~200.
- (7) Yilmaz, O., Gindy, N. and Gao, O. J., 2010, "A Repair and Overhaul Methodology for Aeroengine Components," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 26, No. 2, pp. 190~201.
- (8) Gao, J., Chen, X., Zheng, D., Yilmaz, O. and Gindy, N., 2006, "Adaptive Restoration of Complex Geometry Parts Through Reverse Engineering Application," *Advances in Engineering Software*, Vol. 37, No. 9, pp. 592~600.