

항공용 가스터빈 엔진의 분산제어기술 발전 동향

정치훈* · 박익수* · 김중희* · 민성기*

A Survey of Distributed Engine Control Technology for Aircraft Gas Turbine Engine

Chihoon Jung* · Iksoo Park* · JungHoe Lee* · Seongki Min*

ABSTRACT

Gas turbine engine control was originated from a single hydro-mechanical governor for fuel metering and changed to 1970s' DEEC and then today's centralized FADEC. In order to attain the goal of improvement of control performance, application of PHM technology, and reduction of system weight, it is necessary to make a transition to distributed engine control. This paper describes the concept and roadmap of distributed control, collaborative efforts of government and industry for successful development of the system, and technical challenges for the system.

초 록

가스터빈 엔진 제어기는 과거의 유압기계식 조절기에서 유래하였고 1970년대의 DEEC를 거쳐 현대의 중앙집중식 FADEC에 이르고 있다. 제어성능의 향상, PHM 기술의 접목, 무게 절감의 목표를 달성하기 위해서는 분산엔진제어 시스템으로의 이행이 필요하다. 본 논문에서는 분산제어시스템의 개념 및 기술 발전 동향, 시스템의 성공적인 개발을 위한 정부-기업 간의 노력, 그리고 향후 극복해야 할 과제에 대하여 기술하였다.

Key Words: Gas Turbine Engine(가스터빈 엔진), Distributed Engine Control(분산 엔진 제어), DEECWG, High Temperature Electronics(고온 전자 소자), HTE, Deep Trek project(딥 트렉 프로젝트), Silicon-On-Insulator(실리콘-온-인슐레이터), SOI,

1. 서 론

과거의 엔진 제어기는 단순히 엔진으로의 공급 연료량을 제어하기 위한 유압기계식 조절기

(Hydro-mechanical governor)에 불과하였다. 하지만 엔진 기술이 진보하고 시스템 복잡도가 증가함에 따라 구동기와 같은 추가적인 제어요소가 발생하였고, 이는 제어기가 비대해지고 생산 비용이 고가로 치솟는 등 부정적인 결과들을 초래하였다. 1970년대에 반도체 공학의 진보에 힘입어 탄생한 디지털 전자식 제어기(Digital

* 국방과학연구소 제4기술연구본부

† 교신저자, E-mail: rednoah@add.re.kr

Electronic Engine Control, DEEC)는 부피/무게의 측면에서 상당한 이점을 지니고 있었으며, 엔진 제어 성능 또한 비약적으로 향상시킴으로써 점차 유압식 제어기를 대체해갔다. 이러한 전자식 제어기는 1980년대 이후 작동 변수 전체를 제어하는 FADEC(Full Authority Digital Engine Control)으로 발전하여 엔진의 작동을 완전히 자동화하기에 이르게 된다. 한편, FADEC은 프로세서, 신호처리기, 파워서플라이 등 핵심 전자부품을 모두 포함하고 있으므로 특수제작된 외함에 탑재하여 고온/고진동의 환경으로부터 격리시켜야 했다. 이러한 중앙집중식(Centralized) 엔진 제어는 현재에 이르러서도 계속 사용되고 있는 방식이나, 최근 들어서는 엔진 성능 향상을 위한 적응제어(Adaptive control) 기법의 확산, PHM(Prognosis and Health Management) 기술의 적용 및 센서/구동기의 증가 등으로 인해 FADEC의 부담이 크게 늘어난 상황이다. 이는 결국 FADEC의 무게 및 제작비용 증가로 이어졌고, 고도의 커스터마이징(Customize) 설계방식은 시스템 유지보수(Maintenance)와 구식화(Obsolescence)에 따른 추가적인 관리비용을 발생시키고 있다. 이러한 중앙집중식 제어의 한계를 극복하기 위한 방안으로 최근 분산엔진제어(Distributed Engine Control) 방식이 각광받고 있으며, 엔진 무게 및 획득/관리 비용 감소, 첨단 기술 적용을 통한 엔진 성능 향상 등의 긍정적 효과가 기대되고 있다[1].

본 논문에서는 항공용 가스터빈 엔진의 분산제어기술의 개념 및 기술 발전 동향을 기술하였으며, 시스템의 성공적인 개발을 위한 정부-기업 간의 노력, 그리고 향후 극복해야 할 과제에 대하여 다루었다.

2. 본 론

2.1 과거의 노력, 그리고 한계

1990년대에 DoD(Department of Defense)와 NASA(National Aeronautics and Space Administration)는 HITEC(High Temperature Electro-

nic Components) 프로그램을 통해 200 °C의 고온에서 작동 가능한 지능형 구동기의 개발에 성공하였지만, 고가의 커스터마이징 전자 소자 생산방식은 제품의 상용화를 어렵게 만들었다. 이후 GE와 BAE Systems는 AFRL(Air Force Research Laboratory)의 후원에 힘입어 재사용 가능한 표준형 모듈인 'Flexible FADEC'을 개발하였고, Honeywell는 Dual-Use Science and Technology 프로그램의 지원으로 기존의 bulk-silicon 소자를 적용한 1세대 분산엔진제어 시스템인 'MAC(Modular Aerospace Control) FADEC'을 제작완료하였으며, 또한 Hamilton Sundstrand와 Pratt&Whitney는 'Common FADEC' 연구를 통해 교체가능한 제어기 부품을 개발하였다. 이후 AFRL은 이러한 일련의 결과물들을 통합함으로써 표준형 'Universal FADEC'을 제작하기에 이르렀으나, 기술 소유권 문제와 기업투자의 부재라는 난관에 맞닥뜨림으로써 결국 기술의 상용화 및 제품의 시장 진입에는 실패하였다[2].

2.2 DECWG 발족

2006년, 2.1장에서 언급된 난관을 극복하기 위한 노력의 일환으로 DECWG(Distributed Engine Control Working Group)가 발족되었다. DoD, NASA, 항공기 엔진 제조사, FADEC 개발사 등으로 구성된 DECWG는 분산제어시스템의 성공적 개발을 위한 보다 현실적이고 구체적인 방안들을 모색하였고, 이를 경쟁에 의한 독자적인 연구개발이 아닌 구성원들 간의 협동연구와 공동출자를 통해 실현해나가기로 합의하였다.

DECWG는 HTE(High Temperature Electronic) 소자 및 상용 통신 프로토콜의 개발, H/W와 S/W 인증절차의 개정, 그리고 진단시스템 구축의 4가지 분야를 분산제어시스템의 성공적 배치를 위해 최우선적으로 해결해야할 선-경쟁적(Pre-Competitive) 과제로 지정하였다. 또한 DECWG는 분산엔진제어의 개념과 발전 방향을 정립하는 한편, 정부 및 기업들에게 선택과 집중이 필요한 연구/투자 분야를 제시해 왔으며, 각종 학술대회에 참여하여 선행연구결과를 발표하

고 시제품을 시연하는 등 연구결과를 공유하는 데에도 많은 노력을 기울이고 있다[4].

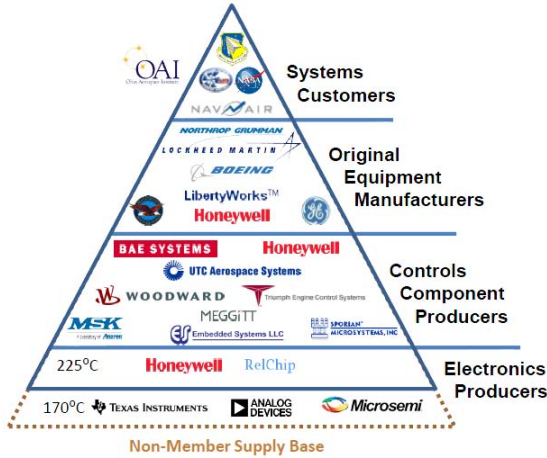


Fig 1. DECWG membership[3].



Fig. 2. Demonstration of Smart Node developed and integrated by DECWG members at 2009 AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibitors[4].

2.3 분산엔진제어의 개념 및 발전 방향

기존의 중앙집중식 방식은 FADEC에서 디지털 신호처리, 입출력 신호의 A/D, D/A 변환 및 전력분배가 모두 수행되는 구조이다. FADEC과 CE(Control Element, 센서/구동기) 간 일대일 아날로그 연결 방식으로 인해 CE별 인터페이스가 상이한데, 이는 케이블과 커넥터, 그리고 유지보수 비용 증가의 주된 원인으로 작용하고 있다.

한편, 분산제어형 방식은 FADEC의 구조를 로직연산을 담당하는 CLP(Control Law Processor)와 데이터 중계를 담당하는 DC(Data

Concentrator)로 분리 설계하여, DC는 CE와 인접하게 설치하고, CLP는 엔진부의 가혹한 환경으로부터 원거리에 위치시키는 구조이다. CE에는 별도의 프로세서가 탑재됨으로써 데이터 획득, 고장 진단, 폐루프(Closed-loop) 제어 등이 가능해진다. 이 때, DC와 CE는 고온/고진동의 환경에 노출되므로 열적 제어장치에 기인한 무게증가를 최소화하기 위해서 HTE 기술의 적용이 반드시 필요하다. CLP, DC 및 제어요소 간 연결은 일대일 아날로그 방식이 아닌 디지털 통신 네트워크를 통해 이루어지므로 케이블 부피 및 무게의 측면에서 상당부분 절감이 이루어질 것으로 예상되고 있다[5].

분산제어방식은 인터페이스의 통일화/단순화를 통하여 빠른 구성품 개발 및 시스템 종합 환경을 제공하고, 이를 통해 높은 하드웨어적 신뢰성을 확보할 수 있다. 그리고 시스템 특성상 인증 절차에 소요되는 시간과 비용을 절약할 수 있으며, 보다 진보된 전력공급 방식인 parasitic power, 무선 통신 기술 등을 비교적 쉽게 적용할 수 있는 기반 구조로 되어있다.

이러한 분산제어방식으로서의 전환은 상당한 수준의 기술과 투자를 요하는 과제이므로, 시스템을 단기간에 구축하는 것은 현실적으로 불가능하며, DECWG가 제시한 바와 같이 Core I/O 단계, Networked 제어 단계, 그리고 완전 분산형 단계로 순차적 개발 적용해 가는 것이 바람직하다[5].

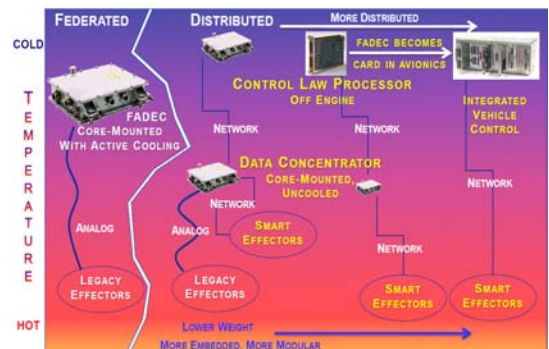


Fig. 3. The Evolution of Distributed Engine Control Architecture[5].

2.3.1 Core I/O 단계

최초의 Core I/O 단계는 향후 5년 개발과제로서 ‘무게 절감’이 주 목표이다. FADEC을 CLP와 DC의 두 가지 요소로 분리하고, 둘을 디지털 통신 네트워크로 연결하는 방식이다. CLP는 디지털 데이터 신호처리만을 전담함으로써 기존의 중앙집중식 대비 50% 축소된 기능을 수행하고, DC는 입출력 신호 변환 및 전력 공급 기능을 함께 수행한다. 한편, DC와 CE 간 연결은 여전히 일대일 아날로그 방식으로, 케이블 길이를 최소화하기 위해 DC는 엔진 코어부에 설치된다. 고온/고진동의 환경에 위치한 DC는 최대 170 °C의 환경에서도 능동냉각 없이 운용 가능할 것으로 예상된다.

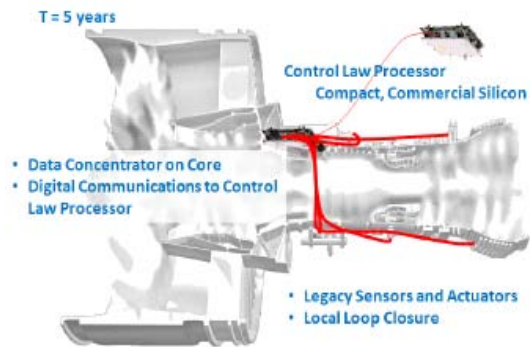


Fig. 4. Core I/O architecture[5].

2.3.2 Networked 제어 단계

향후 10년 개발과제인 Networked 제어 단계의 목표는 ‘규격화(Modularity) 및 추가 무게 절감’이다. CLP는 고도의 커스터마이징 제작 형태에서 탈피하여 규격화 되며, 이로 인해 빠르게 진보하는 산업용 프로세서 기술을 보다 쉽게 흡수할 수 있게 될 것이다. DC는 기존의 입출력 신호 변환 기능을 CE로 이전하고, 전력 분배 및 네트워크 간 데이터 흐름을 통제하는 중계기로서의 역할을 수행한다. 그리고 CE는 DC의 입출력 변환 기능을 보유함으로써 DC-CE 및 CE-CE 간 인터페이스는 모두 디지털/규격화 된다. 이는 케이블 및 커넥터의 추가적인 무게 절감이 가능하며, 전력 인터페이스의 단순화로 인하여 DC의

구조 역시 비교적 단순하게 개선될 수 있음을 의미한다. 한편, CE는 Core I/O 단계 대비 복잡도가 향상될 것이지만, Embedded 소자 기술의 발전이 이루어진다면 무게 측면에서 손실을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 CE에 탑재될 HTE는 최대 300 °C의 환경에서 운용 가능한 수준에 이르게 될 것이다.

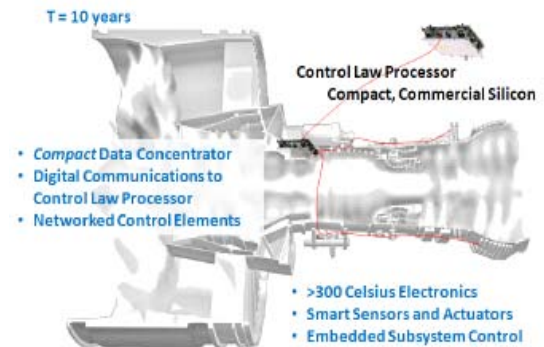


Fig. 5. Networked Control Architecture[5].

2.3.2 완전 분산형 단계

최종 종착지인 완전 분산형 단계의 목표는 ‘궁극적인 무게 절감, 유비쿼터스(Ubiquitous) 시스템의 구축’이다. 본 단계에서는 개별 프로세서가 탑재된 지능형(Smart) CE의 개발로 CLP와 CE가 직접 디지털 통신을 수행하게 되고, Parasitic 전력 공급 기술의 적용으로 DC의 전력 분배 기능이 더 이상 불필요하게 되므로 DC를 완전히 제거할 수 있게 된다. 이는 추가적인 무게 절감이 가능하다는 것을 의미한다. 또한 무선 통신이 적용된 유비쿼터스 시스템이 구축됨으로써 케이블이 차지하는 무게와 부피를 상당부분 감소시킬 수 있게 될 것이고, 최대 500 °C에서 작동가능한 HTE 및 고속 통신모듈이 개발적용 될 것으로 예상된다.

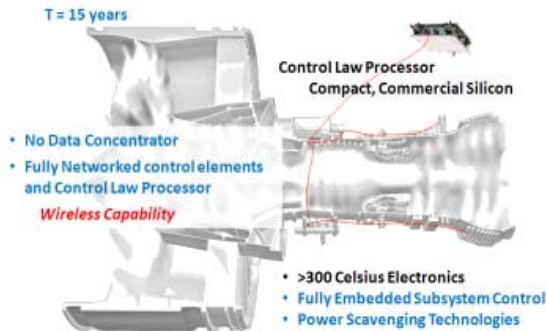


Fig. 6. Fully Distributed Architecture[5].

2.4 분산엔진제어 실현을 위한 극복 과제

앞서 언급한 바와 같이 분산엔진제어 시스템의 성공적인 구현을 위해서 반드시 극복해야 할 난관들이 존재하며, 이는 정부나 기업의 독단적인 노력이 아닌 구성원들 간의 공동연구/투자로 풀어나가는 것이 바람직하다. 향후 기술적 극복 분야 중 최우선으로 해결되어야 할 과제는 상용 통신 프로토콜 및 HTE의 개발이다.

2.4.1 상용 통신 프로토콜의 개발

중앙집중식 제어방식에서 데이터의 전송 및 동기화는 하나의 FADEC에 의해 통제되는 반면, 분산제어 방식에서는 다수의 프로세서가 각각 독립적으로 프로세스를 수행하므로 데이터 전송/동기화는 상당한 난제이다. 디지털 통신 네트워크는 이러한 독립 프로세스들의 페루프 제어를 원활하게 수행할 수 있도록 높은 대역폭과 낮은 지연 속도(Latency)를 가져야 하며, 동시에 안전 우선(Safety-critical) 기능을 보유한 강건한 시스템이어야 한다. 하지만 안타깝게도 현재 이를 모두 만족하는 통신 프로토콜은 존재하지 않는 것으로 알려져 있다[1].

NASA는 새로운 상용 통신 프로토콜의 개발에 앞서 현존하는 모든 프로토콜에 대한 비교 연구를 수행, 분산제어시스템의 낮은 지연 속도 요구조건에 부합할 것으로 판단되는 11개 후보를 도출하였다[6]. 이후 Yedavalli는 안전우선 기능에 초점을 맞추어 6개의 프로토콜을 후보로 제시하였으며, 이들 중 시간트리거

(Time-triggered) 방식인 TTP/C 및 TTEthernet이 가장 이상적인 프로토콜이라고 주장한 바 있다[7]. 한편, 최근 자동차 업계에서 분산제어 목적으로 개발적용한 Flexray가 매력적인 프로토콜로서 각광받고 있으나, 아직까지 항공우주 분야에 적용된 사례가 없으므로 추후 심도 있는 적합성 연구가 필요할 것으로 판단된다.

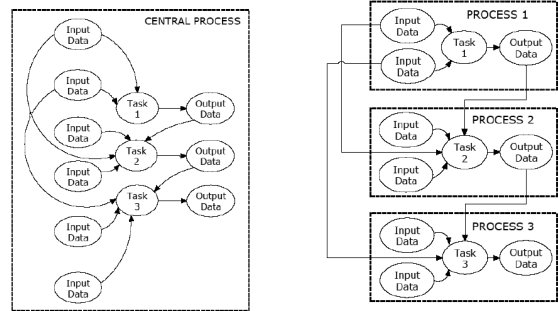


Fig. 7. Data Flow in Centralized(Left) and Distributed(Right) Control Process[1].

Sr No	Characteristic	ARINC 825	TTEthernet	TTP/C	Flexray	AFDX	ARINC 629
1	Maximum Data Rate	1Mbps	100Mbps	25Mbps	10Mbps	100Mbps	2Mbps
2	Time Triggered Messages	No	Yes	Yes	Yes	No	No
3	Event triggered Messages	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes
4	Derived from	CAN	Ethernet (IEEE 802.3)	None	Byteflight and TTP/C	Ethernet (IEEE 802.3)	ARINC 429
5	Bus Access Method	Based on CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance) Technique	Based on TDMA (Time Division Multiple Access) Technique	Based on TDMA (Time Division Multiple Access) Technique	Time Triggered	Based on CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance) Technique	Time Triggered
7	Topologies	Bus, Star, point-to-point	Packet-Switched Network	Bus, Star	point-to-point, Star	Packet-switched Network	point-to-point, Bus
8	Clock Synchronization	Yes, implemented at software level	Yes, implemented at software level	Yes, implemented at hardware level by node controller	Yes, implemented at hardware level	Yes, implemented at software level	Yes, implemented at software level
9	Fault Hypothesis	Yes, implemented at software level	Yes, implemented at hardware level by Bus Guardian	Yes, implemented at hardware level by Bus Guardian	Yes, implemented at hardware level	Yes, implemented at software level	Yes, implemented at software level
10	Type of Data Transmission supported	Asynchronous	Synchronous	Synchronous	Asynchronous as well as Synchronous	Asynchronous	Asynchronous
11	Application	Aerospace	Aerospace	Aerospace	Automobile	Aerospace	Aerospace

Fig. 8. Communication Protocols Comparison Matrix[6].

2.4.2 고온 전자 소자(HTE)의 개발

현재의 중앙집중식 FADEC의 작동 온도 조건은 Bulk CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 소자의 최대 접합 온도(Junction

temperature)인 125 °C로 제한된다. 그런데 분산 제어방식에서 DC 및 지능형 CE는 엔진 고온부에 위치해야하므로 Bulk CMOS를 사용하는 것은 능동 냉각(Active cooling) 없이는 불가능하며, 이러한 냉각방식은 엔진 무게를 증가시키는 방향으로 작용하기 때문에 바람직하지 못하다. 결국 분산제어시스템의 성공적인 구축을 위해서는 열적 성능을 보장할 수 있는 HTE의 개발이 필수적으로 요구된다.

Bulk CMOS를 대체할 소자로서 SOI(Silicon-On-Insulator) CMOS가 오랜 기간 연구되어 왔다. SOI는 Drain 단자와 실리콘 기판 사이에 얇은 SiO₂ 절연막을 입힘으로써 온도에 비례하여 증가하는 누설 전류(Leakage current)를 대폭 감소시키는 기술이다[8].

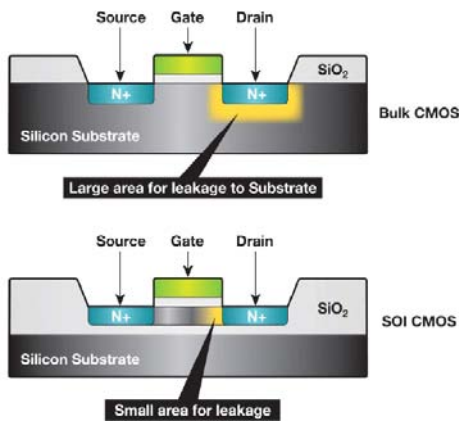


Fig. 9. Comparison of Leakage-current paths of bulk CMOS and SOI CMOS[8].

정부와 항공우주 업계는 SOI CMOS 개발을 위한 투자 및 연구를 수행해 왔지만 고가의 커스터마이즈 제작방식으로 인해 뚜렷한 성공은 거두지 못한 상태였다. 2005년, 이러한 기술적 한계를 극복하기 위한 노력으로 NETL(National Energy Technology Laboratory)의 산하조직인 SNCG(Strategic Center for Natural Gas)에 의하여 Deep Trek 프로젝트가 착수되었다. 본 프로젝트는 하향공(Downhole) 원유 및 가스 업계의 소요제기를 통해 시작되었으며, 주 목적은 >

20,000 ft 깊이에서의 에너지 자원 개발을 위해 필수적으로 요구되는 HTE 기술의 개발 및 제품의 상용화였다[9]. Honeywell International는 본 프로젝트를 통해 225 °C에서 최대 5년까지 운영 가능한 SOI CMOS 제품의 개발 및 상용화에 성공하였다. 그 뿐만 아니라 Honeywell은 다수의 집적회로(IC)와 능동/수동소자, 메모리, 그리고 ASIC(Application Specific Integrated Circuit)을 하나의 모듈로 융합시킨 MCM(Multichip Module)을 개발함으로써 제품의 크기, 무게 및 전력소모를 감소시키는데 기여하였다[10]. 이러한 Deep Trek 프로젝트의 성공은 북미/유럽 기업들의 투자를 불러일으키는 계기가 되었고, 이후 다양한 분야의 업계에서도 본격적으로 HTE에 대한 연구개발을 착수하기에 이르렀다.

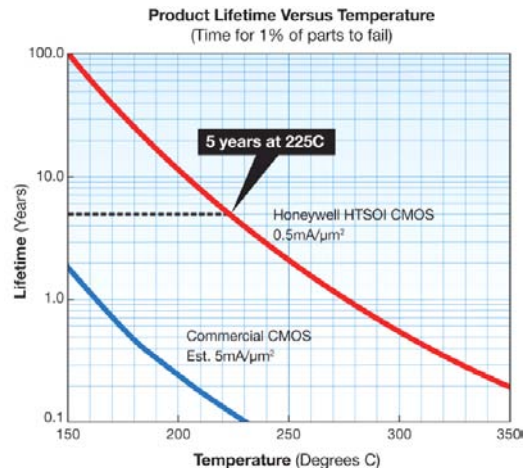


Fig. 10. Product Lifetime vs. Temperature(Red: SOI CMOS, Blue: Bulk CMOS)[8].

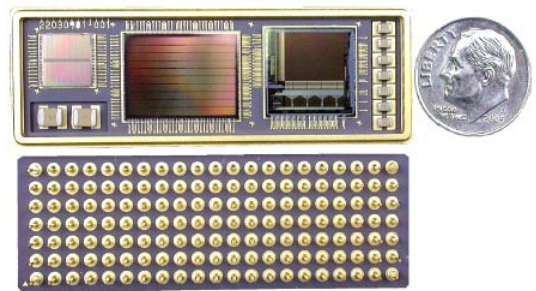


Fig. 11. High Temperature Multi-chip Module[10].

Organization	Passives	Actives	ICs	ASICs	Temp Range (°C)
Analog Devices			X		-250
Arkansas Power Electronics		X	X		-250
Caddock	X				-300
CISSOID		X	X		-250
Cree	X	X	X		300-500
Frequency Management	X				-400
Honeywell	X		X	X	-250
Kemet	X				-260
Presidio	X				-250
Raytheon			X		-250
Riedon	X				-300
Texas Instruments		X	X		-250
TRS Technologies	X				-450
TI Semiconductor			X		-200
Vanguard Electronics	X				-250
Vectron International	X				-250
Vislay	X				-250

Fig. 12. High Temperature Electronics Developers[11].

SOI CMOS의 한계 조건인 225 °C는 엔진 고온부의 지능형 CE 등에 적용하기에는 불안정할 것으로 판단된다. 비록 아직 미성숙 단계이나, SiC(Silicon Carbide) 기술이 500 °C 이상의 극고온 환경에서 작동 가능한 HTE 소자로서 각광받고 있다. Nuedeck은 6H-SiC JFET (Junction Field Effect Transistor) 기술을 적용하여 500 °C에서 5000 시간 이상 작동 가능한 소자의 개발에 성공한 바 있으며[12], NASA Glenn Research center는 WBS(Wide Bandgap Semiconductor) 소자 개발을 수행하는 등 SiC HTE 기술개발을 위한 다양한 노력을 기울이고 있다[13].

3. 결 론

과거의 유압기계식 조절기에서 시작된 가스터빈 엔진 제어기는 1970년대의 DEEC를 거쳐 현대의 중앙집중식 FADEC에 이르고 있다. 제어성능의 향상, PHM 기술의 접목, 무게 절감의 목표를 달성하기 위해서는 분산엔진제어 시스템으로의 이행이 필요하며, 이는 상당한 수준의 기술과 투자를 요하는 과제이므로 Core I/O 단계 -> Networked 제어 단계 -> 완전 분산형 단계로 순차적 개발 적용해 나가는 것이 바람직할 것이다. 또한 분산제어시스템의 구축은 개개인의 독단적인 노력이 아닌 정부-기업 간 공동출자와 협동연구를 통해 이루어져야 한다. 시스템의 성공적인 구축을 위해 풀어야할 최우선 과제는 상용

디지털 통신 프로토콜 및 HTE의 개발이며, DECWG는 이를 구성원간의 선-경쟁적 연구를 통해 수행해나가고 있다.

참 고 문 헌

1. Cully, D.E., Thomas, R., and Saus, J., "Concepts for Distributed Engine Control," *43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Cincinnati, OH, U.S.A., AIAA-2007-5709, Jul. 2007.
2. Behbahani, A., Wood, B., Benson, D., Berner, A., Hegwood, B., Dejager, J., Rhoden, W., Ohme, B., Sloat, J., and Harmon, C., "Technology Requirements and Development for Affordable High-Temperature Distributed Engine Controls," *58th International Instrumentation Symposium*, San Diego, California, U.S.A., Jun. 2012.
3. Wood, B., "Distributed Engine Control Working Group - Presentation to Propulsion Controls and Diagnostics Working Group," *PCD Workshop*, Sep. 2015
4. Behbahani, A., Tulpule, B., "Perspective for Distributed Intelligent Engine Controls of the Future," *46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Nashville, TN, U.S.A., AIAA-2010-6631, 2010.
5. Culley, D., "Transition in Gas Turbine Control System Architecture: Modular, Distributed, and Embedded," NASA/TM-2010-216806, Sep. 2010.
6. Gwaltney D.A., Briscoe, J. M., "Comparison of Communication Architectures for Spacecraft Modular Avionics Systems," NASA/TM-2006-214431, Jun. 2006.
7. Yedavalli, R.K., Willett, M., and Behbahani, A., "The Role of Various Real-time

- Communication Data Bus for Open System Distributed Engine Control Architectures for the Future," *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, San Diego, California, U.S.A., AIAA-2011-6145, Jul. 2011.
8. Romanko, T., "Extreme Design: Developing integrated circuits for -55 degC to +250 degC," World Wide Web location <http://www.honeywell.com/hightemp>
 9. Mallison, E.R., Rogers, J.D., and Ohme, B., "High Temperature SOI CMOS Electronics Development - The Deep Trek Project," World Wide Web location <http://www.honeywell.com/hightemp>
 10. "High Temperature Electronics - Extraordinary performance in high temperature applications," World Wide Web location <http://www.honeywell.com/hightemp>
 11. Usrey, M.W., Liu, Y., Schaible, B.R., Harsh, K.F., and Behbahani, A.R., "High-Temperature Sensor and Electronics Packaging Technologies for Distributed Engine Controls," *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Cleveland, OH, U.S.A., AIAA-2014-3533, Jul. 2014.
 12. Nuedeck, P.G., Spry, D.J., Chen, L.Y., Chang, C.W., Beheim, G.M., Okojie, R.S., Evans, L.J., Meredith, R., Ferrier, T., Krasowski, M.J., and Prokop, N.F., "6H-SiC Transistor Integrated Circuits Demonstrating Prolonged Operation at 500 °C," *IMAPS HITEC 2008*, pp. 000095-000102, 2008.
 13. Nuedeck, P.G., Okojie, R.S., "High-Temperature electronics-A Role for Wide Bandgap Semiconductors?," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 90, No. 6, pp. 1065-1076, Jun. 2002.