

발사체 에비오닉스 개발 동향

김주년^a · 임유철^{b,*}

Avionics System Design Trend for The Launch Vehicle

Joo Nyun Kim^a · You-Chol Lim^{b,*}^aLaunch System Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea^bElectronics Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea*Corresponding author. E-mail: yylim1002@kari.re.kr

ABSTRACT

Low cost launch vehicle for next-generation is underway in advanced space countries such as the United States, Europe, Japan and China. This paper surveys the latest technological trends in avionics system, including ground management system. In the case of on-board equipment, to make short the development period and reduce the cost, the equipment is standardized and modularized for each functions to flexibly respond to changes in system requirements. In addition, a network is applied to all inter-equipment interfaces and a powerful self-diagnostic function is included in the equipment to realize automation/simplification of the interface with the ground system, and it is confirmed that an efficient launcher system is realized.

초 록

미국, 유럽, 일본, 중국 등 우주 선진국에서 효율성 및 저비용을 목표로 차세대 상업용 발사체를 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문은 지상운용시스템을 포함한 발사체 에비오닉스 시스템에 대한 최근 기술동향들을 조사하고 소개하는 것이다. 탑재장치의 경우 개발 기간을 단축하고 비용을 절감하기 위해 기능별로 장치를 표준화하고 시스템 요구조건 변경에 유연하게 대응하도록 모듈화를 진행한다. 또한 모든 장치간 인터페이스에 통신망을 적용하고 강력한 자가진단 기능을 탑재장치에 포함시킴으로써 지상시스템과의 인터페이스에 자동화·단순화를 실현하여 효율적인 발사체시스템을 구축하고 있음을 확인한다.

Key Words: Launch Vehicle(발사체), Avionics(에비오닉스), On-board Unit(탑재장치), Ground Support Equipment(지상지원장비), Self-diagnosis(자가진단), COTS(상용제품)

1. 서 론

Received 4 December 2019 / Revised 28 April 2020 / Accepted 3 May 2020

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2019년도 추계학술대회(2019. 11. 27-29, 해운대 그랜드호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

소형 및 큐브위성을 포함한 다양한 용도의 위성발사 수요가 점점 증가되고 각국의 위성발사 시스템간에 경쟁도 치열해짐에 따라 발사체에

새로운 개념의 에비오닉스 시스템이 제안되고 있다. 일본의 차세대 고체 로켓 발사체인 엡실론 발사체의 개발은 2013년 행성 망원경 위성 SPRINT-A를 탑재하고 첫 발사에 성공했다. JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)는 우주 활동 수준을 높이기 위해 표준화된 소형 인공위성과 엡실론의 고효율 발사 시스템이 결합된 이점을 높이 평가하고 있다. 엡실론의 주된 목적은 소형 위성들에게 “소형, 저비용, 빠르고 신뢰할 수 있는” 관점에서 최적화된 발사를 제공하는 것이라고 언급했다[1]. 우주산업에 있어서 더 저렴하며 잦은 빈도로 신속하게 위성발사를 수행하는 것은 피할 수 없는 현실임에 따라 미국, 러시아, 유럽도 저비용을 목표로 한 차세대 상업용 발사체를 개발하기 위한 새로운 프로그램을 마련하고 있다. 스페이스X는 발사체 재사용 기술을 개발해 발사비용을 절반으로 줄이는 것을 실현했으며 아리안스페이스도 차세대 발사체 아리안6의 발사비용을 아리안5 대비 40%까지 줄인다는 계획을 갖고 있다. 이처럼 신형 발사체는 저비용과 발사준비시간 단축을 목표로 하고 있는데, 에비오닉스 시스템도 이러한 목표를 달성하는데 있어 매우 중요한 역할을 한다. 참고로 500 kg이하 소형위성 발사체 기준으로 세계 시장에서 경쟁력을 갖추기 위해 대략 3000만 달러 이하로 발사비용이 책정되어야 한다.

이러한 우주산업의 추세에 맞추어 발사체 에비오닉스 시스템에도 변화가 필요하다. 최근 문헌들을 통해 소개된 발사체 에비오닉스 동향들을 조사한 결과 다음과 같은 공통적인 특징을 확인할 수 있다. 전자탑재장치는 상용부품을 활용하여 소형화, 모듈화로 설계[2-4]되고 있으며, 탑재장치간 인터페이스는 표준화된 통신망[5,6]을 적용하여 빠르고 많은 정보를 주고받도록 한다. 발사체의 상태는 탑재장치 자체에서 지능적이고 자율적으로 체크[1,5,7]하도록 하며 지상 설비와의 인터페이스는 놀라울 정도로 단순화하여 발사 시설과 운용을 최소화[1,5]하는 방향으로 접근하고 있다. 본 논문에서는 이러한 특징을 바탕으로 탑재장치의 표준화, 탑재장치의 지능화, 지상운용시스템의 단순화 3가지로 구분하여 정

리하고 결론을 맺도록 한다.

2. 탑재장치의 표준화

발사체 에비오닉스 시스템은 온보드 탑재시스템과 지상 운용시스템으로 구성된다. 일반적으로 온보드 탑재시스템은 전력 시스템, 제어 시스템, 원격 측정 및 비행종단 시스템을 포함하며, 지상 운용시스템에는 케비닛 단위의 전원 장치, 데이터 처리 장치, 관제 콘솔을 포함한 제어 및 인터페이스 장치 등과 같은 많은 터미널 장비가 포함된다. 발사체 에비오닉스 시스템의 효율성을 높이기 위해, 설계 개념 및 모든 지상 장치가 하나의 기준을 따르도록 하는 표준화 작업이 필요하다.

2.1 유연성을 고려한 장치 모듈화

에비오닉스 온보드 탑재시스템의 경우 앞에서 언급했듯이 기능별로 전력, 제어, 원격측정, 비행종단의 서브시스템으로 구분되며 각각의 서브시스템은 다시 다수의 유닛으로 구성되어 단별 또는 섹션별로 위치하게 된다. 그런데 개별 유닛으로 볼 때 제어 및 신호처리부, 전원부, 통신부 등 공통적으로 유사한 부분들이 존재하며 이러한 영역을 모듈화하고 표준화함으로써 장치간 신뢰성 편차를 최소화하고 에비오닉스 구성에 유연성을 증가시킬 수 있다. 이렇게 되면 다양한 발사 프로그램에 따라 새롭게 시스템을 개발하지 않고 기존 시스템의 조합을 변경함으로써 운용이 가능하게 된다. 또한 소자의 단종 또는 추가되는 요구조건에 부합하기 위해 장치의 업그레이드가 필요한 경우 개별 장치별로 진행할 필요가 없이 표준화된 모듈 관점으로 접근할 수 있으므로 개발비용과 검증기간을 집중하여 최소화할 수 있게 되며 이는 곧 비용절감의 효과를 가져다준다.

표준화를 위해서는 모듈간 전기적 인터페이스 방법 및 모듈의 물리적 형상 등이 규격화하여 정립되어야 한다. Fig. 1은 참고문헌[2]에 수록된 그림으로 에비오닉스 장치의 모듈화를 통해 다

양한 발사프로그램을 운용할 수 있음을 이해하기 쉽게 도식화하여 보여준다. 즉 발사체 A와 B에는 제어, 전원, 통신모듈을 모두 사용하여 장치를 구성하고, 통신망이 불필요한 발사체 C에서는 통신모듈을 빼고 장치를 구성한다는 예시이다. 물론 모든 장치들이 제어, 전원, 통신 모듈로만 구성되는 것은 아니며 별도의 특화된 모듈도 필요할 수 있으며 경우에 따라 특화모듈로 가져간다. 하지만 이러한 경우도 모듈간 상호 호환이 가능하도록 인터페이스 및 형상은 표준화를 준수하여 설계되어야 한다.

참고로 모듈화의 물리적 레벨은 보드(PWB: Printed Wiring Board)단위로 하고 기능상으로는 MPU모듈, A/D & D/A 변화모듈, 전원공급모듈, BUS인터페이스 모듈로 구성하는 것이 가장 최적화된 방안으로 알려져 있다[2].

2.2 상용부품 활용 및 고장허용 설계

발사체의 에비오닉스 장치는 전자파, 고온, 저온, 진동, 충격 등 열악한 환경 조건에서도 건전성이 보장되어야 한다. 이러한 이유로 에비오닉스에 사용되는 주요 구성품들은 일반적으로 군

용 등급 이상의 전용 센서 및 소자가 선정되어 설계 제작되었다. 하지만 이는 곧 개발비용의 증가를 가져오며 소자 대체성 및 수급 일정 등 10년 이상 장기간 적용시 많은 제약이 따르게 된다. 최근에는 상용부품 성능이 비약적으로 발전하고 있는 관계로 큐브(나노)위성 등을 통하여 우주환경에서도 상용부품들이 사용가능함이 검증되고 있다. 나노 위성 같은 경우는 크기, 무게 및 비용 등의 제약으로 인하여 상용부품(COTS: Commercial Off the Shelf)의 사용은 필수적이다. Fig. 2는 참고문헌[3]에서 언급된 나노위성에 사용된 상용부품 사례를 보여준다.

물론 Fig. 2의 부품들이 성능관점에서 당장 발사체의 에비오닉스 시스템으로 적용가능하지는 않다. 또한 상용부품의 성능이 증가한다 하더라도 신뢰성 측면에서 상용부품을 우주환경에서 활용하기 위해서는 추가적인 기술적 노하우가 뒷받침되어야 한다. 앞서서도 언급하였듯이 발사체의 에비오닉스는 열악한 환경에서 오동작이 없어야 하며 이는 곧 장치의 높은 신뢰성이 보장되어야 한다. 따라서 상용부품을 이용하면서 장치의 신뢰성을 유지하기 위해서는 최소 단일 소자 고장이 시스템의 주요기능에 영향을 주지 않는 고장허용(fault tolerance)기법이 설계에 반영되어야 한다. 일반적인 고장허용 기법은 고장감지, 고장진단, 고장복구의 3단계를 거치게 되는데 이러한 단계적 기법을 모두 구현하기 위해서는 3장에서 다루는 탑재장치의 지능화가 요구된다.

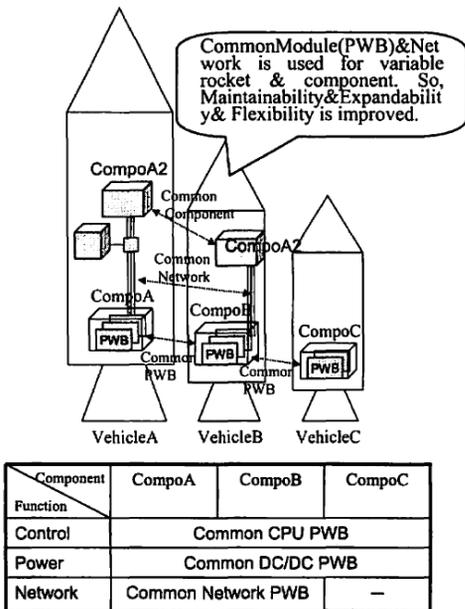


Fig. 1 Future avionics system base on module and Network[2].

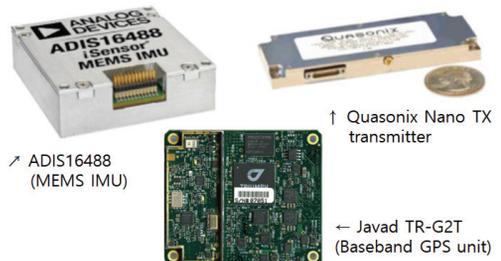


Fig. 2 COTS components for nano-satellite[3].

3. 탑재장치의 지능화

탑재장치의 지능화란 발사체의 온보드에서 스스로 자가진단 즉 자동점검을 수행한다는 의미이다. 발사체 자동점검 시스템은 “언제, 어디서나, 빠르고 쉽게” 발사체를 점검하는 것이 목적이며 “온보드 에비오닉스 및 지상 지원 장비(GSE: Ground Support Equipment)에 의한 지능형 자동 점검 기능을 가지는 시스템”으로 정의된다[7]. 자동점검 시스템의 설계를 위해서는 운전자, 온보드, GSE에 대한 적절한 기능을 배분하는 것이 중요하며 자동점검 시스템의 장단점을 정리하면 Table 1과 같다. 장점으로는 자동화되어 사람에 의해 판단되지 않으므로 휴먼에러를 예방할 수 있으며 실시간으로 점검이 수행되므로 체크시간이 단축되고, 점검을 위해 필요했던 많은 지상장비와 운용인원이 간소화 되어 운용 공간 및 비용 측면에 많은 이점을 가져준다. 하지만 단점으로 복잡한 알고리즘과 검증된 판단 기준이 필요하고 자가 점검을 위한 별도의 탑재장비가 늘어날 수도 있기 때문에 비용 상승 및 중량 증가가 발생할 수도 있다.

자동점검 시스템에서 각 장비는 표준화된 네트워크에 의해 연결되어 있으며, 네트워크를 통해 많은 데이터를 교류함으로써 발사체를 점검하게 된다.

Table 1. The merits and demerits of autonomous check-out system[7].

Autonomous Check-out System	
Merits	<ul style="list-style-type: none"> ○Prevention of the human error ○Shortening of check time ○Personnel cost reduction ○Simple interface with GSE
Demerits	<ul style="list-style-type: none"> ○Complex software logic ○Require certification of auto-check algorithm ○Weight and cost increase by adding auto-check onboard equipment

자동점검의 기본 목적은 에비오닉스 온보드 장치 자체의 BIT(Built In Test) 적용범위를 늘리고 장치의 오류 및 고장을 탐지하는 것이다. 이는 장치의 임계값별 판단결과인 단순 BIT 정보뿐만 아니라 장치와 장치간의 인터페이스 점검, 초기 전원 인가 단계부터 어떤 오작동을 감지하기 위해 동적 데이터 평가를 수행하면서 기능점검, 고장 감지, 격리 및 복구하는 것까지 포함된다. 에비오닉스 장치를 포함한 인터페이스 점검은 탑재용 진단 장치에서 수행되며 경우에 따라서는 개별 장치에서 진단된 결과를 취합하여 처리하도록 구성된다. 복잡하게 변화되는 동적 데이터를 평가하기 위해서 GSE에서는 취득한 데이터를 축적된 데이터베이스와 비교분석하여 정상유무를 진단한다. GSE의 자동 평가를 수행할 수 없을 경우에는 전문진단 엔지니어가 개입하여 최종 판단하게 되며 전문진단 엔지니어는 발사운용기간 동안 발사장 근처에서 상시 대기하는 것이 아니라 멀리 떨어진 곳에 원격으로 처리할 수 있도록 네트워크가 구축된다.

참고로 일본의 엠실론 발사체[1]의 경우 동역학적 진단을 위해 인공지능 기술을 활용함으로써 단순한 임계값의 조합에 근거한 판단과 비교하여 개선된 진단 알고리즘을 구축하였으며, 탑재용 자동 점검 장치도 Fig. 3과 같이 ROSE(Responsive Operation Support Equipment)로 명칭되는 장치를 새롭게 개발하고, ROSE-Master와 ROSE-Slave로 온보드 점검시스템을 구성하였다. ROSE-Master의 주된 기능은 ROSE-Slave를 통해 얻은 데이터를 바탕으로 자동 점검을 수행

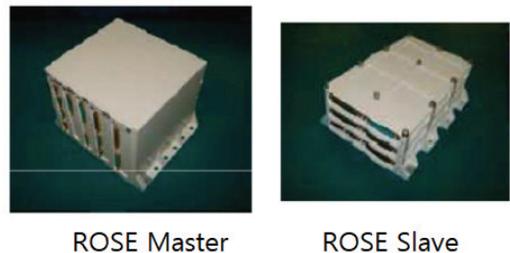


Fig. 3 Intelligent check-out onboard unit for the epsilon launch vehicle[1].

하고, 관련 정보를 지상 지원 장비인 발사 제어 시스템에 전송하는 것이다. ROSE-Slave의 주요 업무는 온보드 구성요소로부터 필요한 데이터를 수집하여 ROSE-Master로 전송하며 탑재 배터리의 충전도 관여하도록 한다.

4. 지상 운용시스템의 단순화

기존 발사체 지상운용 시스템은 많은 인력과 시간 그리고 대규모 GSE가 요구된다. 하지만 발사체 에비오닉스의 온보드 장치가 자동으로 점검 및 진단을 수행하도록 지능화되어 설계됨에 따라 전기적 인터페이스 관점에서 발사체와 GSE는 고속통신망을 통해 간결하게 연결되는 것이 최근의 추세다. 또한 탑재장치의 지능화로 인하여 많은 자동점검 기능 및 장치들이 발사체 내부에 탑재되기 때문에, 기존의 발사운용에 필요한 캐비닛 수준의 GSE 관련 많은 장비들이 모두 제거될 수 있고 장비 운용시간과 운용인원들이 줄어들게 된다. 게다가 모든 장비는 보안이 보장된 고속 네트워크를 통해 연결되어 있어 노트북 컴퓨터를 포함한 휴대용 장치를 사용하여 공간적 제약에 구애받지 않고 발사 운용 및 제어를 수행할 수 있게 된다. 이는 궁극적으로 발사장과 무관한 발사 제어 시스템을 갖추는 것을 의미한다. 즉 차세대 발사 시스템에서는 개선과 단순화를 통해 짧은 준비기간으로 발사가 가능하도록 함으로써 운용비용을 크게 절감하는 것을 목표로 하고 있다.

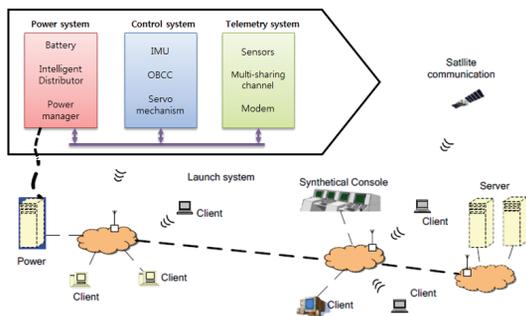


Fig. 4 The functional module of new launch vehicle[5].

발사체의 비행중단시스템도 탑재장치내에서 안전비행 유무를 자율적으로 실시간에 판단하고 비정상시 자동폭파를 수행하도록 지능화됨에 따라 비행안전통제를 위한 지상시스템 역시 불필요하게 된다. 마찬가지로 발사체의 지능을 더욱 강화해서 고가의 지상 추적시설에 의존하지 않고 탑재장치의 정보들을 활용하여 신뢰도 높은 추적망을 구축할 수도 있게 된다. 더 나아가 Fig. 4와 같이 클라우드 네트워크를 지상운용 시스템[5]에 도입함으로써 제어시스템과 원격측정 시스템 등의 각종 지상장비는 클라우드 네트워크에 접속되는 표준단말기로 통합하는 것도 목표로 제시되고 있다.

Fig. 5는 엡실론 발사체를 위해 구축된 에비오닉스 분야 지상운용시스템의 구성을 보여준다. 지능화된 탑재장치와 네트워크를 이용한 인터페이스로 인하여 기존 100여명이 담당하던 발사관제업무가 5명 이하로 줄었으며 인터넷만 연결되어 있으면 노트북만으로 원격제어가 가능한 모바일 관제를 도입하였다. 그 결과 이전 고체연료 로켓인 M-V보다 발사비용을 1/2, 지상발사준비 시간을 1/4로 줄였다고 보고되었다[8].

1988년 미국의회 기술평가국 자료[9]에 의하면 탑재장치 자가진단 기능(BIT equipment)과 지상운용 자동화(Automated data management system)를 개발하여 발사체에 적용하면 내부수익률(Internal rate of return)이 각각 140%(순이익: \$2,617M)와 115%(순이익: \$1,898M)로 투자대비 가장 큰 효과를 볼 수 있다는 분석결과를



Fig. 5 Autonomous check-out ground system for the epsilon launch vehicle[1].

Table 2와 같이 확인할 수 있다. 또한 보잉항공우주사의 추가 분석결과에 의하면 \$248,000M 발사비용의 Shuttle & Titan-IV 기준으로 탑재장치 자가진단, 지상운용 자동화, 전문가시스템 등을 적용함으로써 9%(\$22,000M)비용절감 효과를 예상하였다.

Table 2. Estimated Economic Benefits of Developing Technologies to Facilitate Ground Operations[9].

Technology	IRR	NB
Built-in test equipment	140.0	\$2,617M
Automated data management system	115.0	\$1,898M
Automated test and inspection	61.0	\$1,454M
Accelerated load calculations	19.5	\$247M
Thermal protection system	16.0	\$218M
Fault-tolerant computers	15.5	\$106M
Automated launch vehicle and payload handling	15.0	\$830M
Database management system	13.5	\$5,413M
Computer-aided software development	12.5	\$2,225M
Expert systems	11.5	\$5,775M
Autonomous and adaptive guidance, navigation, and control system	6.0	\$716M

IRR : Internal rate of return

NB : Net benefit (undiscounted)

NOTE : Not endorsed by OTA; sensitive to architecture and mission model

SOURCE : Boeing Aerospace Co.

5. 결 론

최근 소형위성의 발사수요가 증가되면서 소형 발사체에 대한 다양한 변화가 진행되고 있다. 변화의 주된 초점은 저비용, 고효율의 발사체계시스템을 구축하는 것이다. 그러한 흐름에 편승하여 발사체 에비오닉스 분야도 많은 변화가 감지되고 있다. 이를 실현한 대표적인 사례가 일본의

엡실론 발사체이다. 본 논문에서 엡실론 발사체를 포함한 발사체 에비오닉스 시스템에 대한 최근 기술동향들을 조사한 결과 발사기간을 단축하고 비용을 절감하기 위해 기능별로 장치를 표준화하며 시스템 요구조건 변경에 유연하게 대응하도록 모듈화를 진행하고 있었다. 또한 강력한 자가진단 기능을 온보드장치에 탑재하여 지상시스템과의 인터페이스를 자동화하고 단순화함으로써 지상시스템 및 운용인력이 최소화된 효율적인 발사체계시스템이 구현되고 있음을 확인하였다. 이러한 에비오닉스 시스템의 변화 추세는 소형발사체의 범위를 넘어 재사용 로켓을 포함한 대형발사체에도 확대 적용될 것으로 기대된다.

참고로 현재 한국항공우주연구원에서 한국형 발사체 사업과 병행하여 소형발사체 연구를 준비하기 시작하였다. 소형발사체의 경우 외국 민간업체와의 경쟁력(20k\$/kg~30k\$/kg)을 확보하기 위해 비용과 효율성에 최대 주안점을 두고 에비오닉스를 포함한 예비설계를 진행하고 있다.

References

- Morita, Y., Imoto, T., Tokudome, S. and Ohtsuka, H., "First Launch in Months: Japan's Epsilon Launcher and Its Evolution," *Trans. JSASS Aerospace Tech.*, Vol. 12, No. 29, pp. Tg_21-Tg_28, 2014.
- Kawase, M., Tamura, M., Sunami, K., Izumi, T. and Morita, Y. "The Avionics System Design Concepts for The Advanced Solid Rocket," *Journal of Space Technology and Science*, Vol. 24, No. 1, pp. 13-16, 2008.
- Austin, W., Jordi, P.S. and Marco, V. "Low-Cost, Low Mass Avionics System for a Dedicated Nano-Satellite Launch Vehicle," *IEEE Aerospace Conference*, 2015, pp. 1-8.
- Austin, W., Jordi, P.S. and Marco, V. "Avionics and Launch Opportunities for An European Microlauncher, <https://www.>

- researchgate.net/publication/32856407IAA-AAS-CU-17-01-01, 2017.
5. Qi, G., Duan, R., Sun, H., Zhou, H., Xiang, Z. and Ii, W., "Next Generation Avionics System of Future Launch Vehicle," *Joint International Mechanical, Electronics and Information Technology Conference*, pp. 1215-1219, 2015.
 6. Polonowski, R. and Clavier, R., "Ariane Launchers Digital Engineering: stakes and challenges," *8th Mediterranean Conference on Embedded Computing*, 2019.
 7. Imoto, T., Miho, K., Arakawa, S., Kato, K., Nohara, M. and Otsuka, H., "The Autonomous Check-out System Concept Design for The Advanced Solid Rocket," *Journal of Space Technology and Science*, Vol. 24, No. 1, pp. 23-25, 2008.
 8. <https://blog.naver.com/hdatasc/221112674885>, "위성발사체 엡실론의 의미와 과제", 2017.
 9. U. S. Congress, Office of Technology Assessment, "Reducing Launch Operations Costs: New Technologies and Practices", Sep. 1988.