

항공 우주 응용을 위한 임베디드 네트워크: 스페이스와이어

수년 전 항공 우주 시스템을 위한 임베디드 네트워크의 대안으로 스페이스와이어(SpaceWire)가 제안되었다. 스페이스와이어는 우주비행체(Spacecraft)의 온보드 데이터 처리(On-board data handling)을 위해 HIC(Heterogeneous InterConnect) IEEE 1355 표준을 바탕으로 1999년에 만들어졌다. 스페이스와이어는 점 대 점(Point-to-point) 방식의 양방향 통신을 전이중(Full-duplex) 방식으로 지원하여 주며, 10m 정도의 거리에서 2M~400Mbps의 직렬 통신을 가능하게 해준다.

■ 유 상 문
(군산대학교 전자정보공학부)

1. 서론

임베디드 시스템은 현재와 같은 관심과 각광을 받기 오래 전부터 인공 위성이나 우주탐사선 같은 항공 우주 개발 분야에 적용되어 왔다. 항공 우주 응용을 목적으로 개발되는 대부분의 시스템은 특화된 기능을 담당하는 임베디드 시스템이 네트워크 또는 버스 형태로 연결되어 구성된다.

인공위성의 경우를 예로 들면, 인공 위성은 크게 전력 서브시스템(Subsystem), 자세 제어 서브시스템, 통신 서브시스템, 명령 및 데이터 처리 서브시스템, 탑재체 서브시스템 등으로 나눌 수 있는데[1], 각 서브 시스템이 하나 또는 그 이상의 임베디드 시스템으로 구현된다. 위성의 성공적 임무 완수를 위해서는 각 서브 시스템을 구성하는 임베디드 시스템 사이에 지속적으로 원활한 정보 교환이 필요하며, 각 서브 시스템 간에도 정보의 교환이 필요하다.

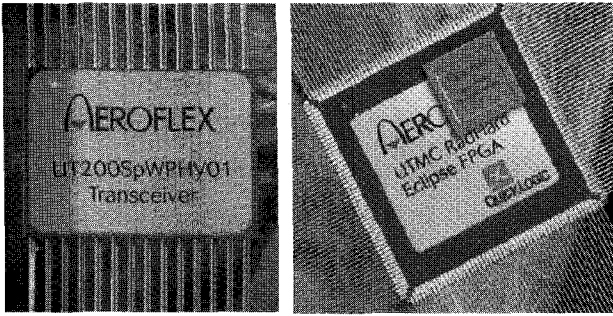
인공 위성에 적용되는 버스나 네트워크는 높은 신뢰도가 요구되기 때문에 1973년 미국에서 군사용 항공 전자 시스템에 적용하기 위해 개발된 MIL-STD-1553[2] 버스가 주로 채용되어 왔다. 국내의 경우 다목적 실용위성인 KOMPSAT(아리랑 위성) 시리즈에 사용되고 있으며 대부분의 상용 위성에도 적용되는 것으

로 알려져 있다. 하지만 MIL-STD-1553 버스는 소비 전력이 크고, 구현에 필요한 부품의 크기와 무게가 소형화 추세를 견고 있는 위성 분야에 맞지 않는다. 더욱이 최대 전송 속도가 1[Mbps] 정도이기 때문에 고속의 정보 전송이 요구되는 경우에는 적합하지 않다.

수년 전 항공 우주 시스템을 위한 임베디드 네트워크의 대안으로 스페이스와이어(SpaceWire)[3]가 제안되었다. 스페이스와이어는 우주비행체(Spacecraft)의 온보드 데이터 처리(On-board data handling)을 위해 HIC(Heterogeneous InterConnect) IEEE 1355 표준[4]을 바탕으로 1999년에 만들어졌다. 스페이스와이어는 점 대 점(Point-to-point) 방식의 양방향 통신을 전이중(Full-duplex) 방식으로 지원하여 주며, 10m 정도의 거리에서 2M~400Mbps의 직렬 통신을 가능하게 해준다.

물리 계층에서는 LVDS(Low Voltage Differential Signaling)[5]를 적용하여 송신기의 소비 전력이 상당히 적으며, 최대 전송 속도는 전송 신호의 스큐(Skew)와 지터(Jitter) 그리고 링크 인터페이스(Link interface)를 구현하는 반도체 기술에 의해 결정된다. 그리고 네트워크 구성이 용이하며 가변 크기의 패킷을 지원한다.

스페이스와이어는 2003년에 유럽의 ESA(European Space Agency) 표준 (ECSS-E-50-12A)으로 채택되었으며 ESA,



(a) 트랜시버 (b) 프로토콜 처리기

그림 1. Aeroflex사의 스페이스와이어 상용 부품

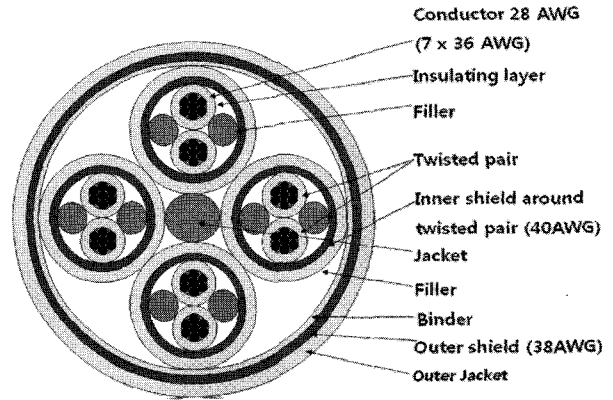


그림 2. 스페이스와이어 케이블 구조

NASA(National Aeronautics and Space Administration) 그리고 JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)의 우주개발 프로그램에도 적용되었다. 국내의 경우에는 한국항공우주연구원 주도로 개발되는 KOMPSAT(아리랑 위성) 버스의 새로운 OBC(On-Board Computer)의 내부 데이터 통신에 점 대 점 방식으로 스페이스와이어가 채용되었다 [6].

상용 부품으로는 각각 200Mbps와 85Mbps까지 지원하는 물리 계층의 트랜시버(Transceiver)와 프로토콜 처리기(Protocol handler)가 있으며[7] (그림 1), 관련 IP(Intellectual Property)도 구입할 수 있다[8].

스페이스와이어 표준은 물리 계층(Physical level), 신호 계층(Signal level), 부호 계층(Character level), 교환 계층(Exchange level), 패킷 계층(Packet level) 그리고 네트워크 계층(Network level)을 정의하고 있으며, 본 고에서는 스페이스와이어 표준에서 계층별로 규정하고 있는 주요 내용을 간략히 소개한다.

2. 스페이스와이어의 주요 사양

2.1 물리 계층(Physical level)

물리 계층은 케이블, 커넥터, 케이블 조립, PCB 등에 대한 관한 사항을 규정한다. 스페이스와이어 케이블은 신호 계층에 정의된 LVDS Data-Strobe 인코딩 전송을 위하여 그림 2와 같은 4가닥의 Twisted pair 전선이 하나의 케이블을 구성하고 있다.

표준에는 케이블과 PCB나 백플레인(Backplane)에 구현되는 전송선로에 대해, 요구되는 물리적, 전기적 특성이 명시되어 있으며, D 타입의 9핀 커넥터와 핀 할당이 규정되어 있다. 커넥터와 케이블을 이용한 링크인터페이스의 물리적 구성은 그림 3과 같다.

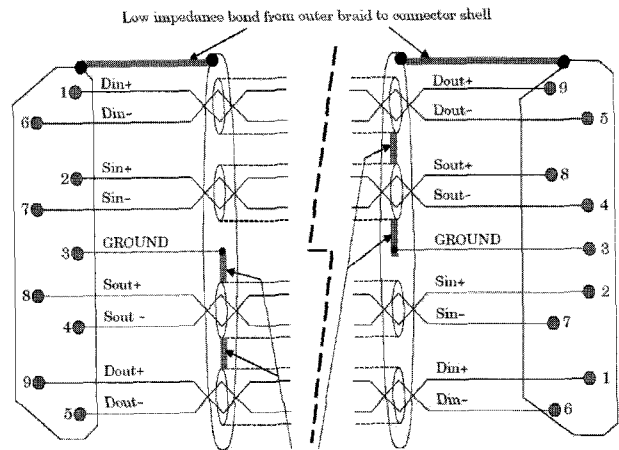
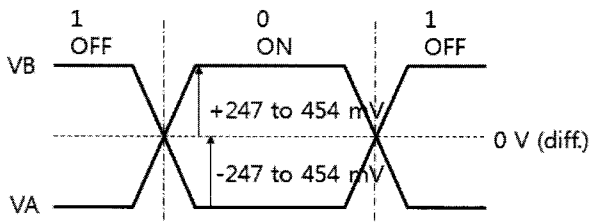


그림 3. 스페이스와이어 커넥터 및 연결 구성

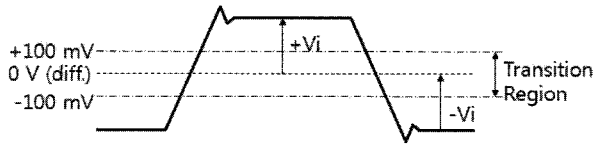
2.2 신호 계층(Signal level)

신호 계층은 그림 4와 같이 ANSI/TIA/EIA-664에 정의되어 있는 전기적 특성을 갖는 LVDS를 사용한다. 그리고 정보의 전송을 위해 그림 5와 같은 Data-Strobe 인코딩(Encoding)을 사용하는데, Data 신호에 전송 정보가 실리며 '1'을 전송할 때 가 '1', '0'을 전송할 때 '0'이 된다. Strobe 신호는 Data 신호의 값이 변하지 않을 때, 즉 연속된 '1' 또는 '0'을 전송할 때 값이 반전된다. 수신 측에서는 Data 신호와 Strobe 신호에 대해 배타적 논리합(XOR) 연산을 적용하여 전송 클럭을 복원하여 사용할 수 있다.

연결 설정 시 10Mbps의 초기 전송 속도로 동작하도록 규정하고 있으며, 설정된 전송률은 링크 연결이 구성된 다음부터 변경이 가능하다. 최저 전송률은 2Mbps이며 이것은 연결 해제 타임아웃(timeout)이 1/850[ns](=1.18Mbps)이기 때문에 정해진 사항이다. 원칙적인 최대 전송률은 정해져 있지 않으며 전송 신호의 지터(jitter)나 스큐(skew)에 의해서 결정되게 된다. 그리고 전이



(a) 송신측 출력



(b) 수신측 입력

그림 4. LVDS 신호

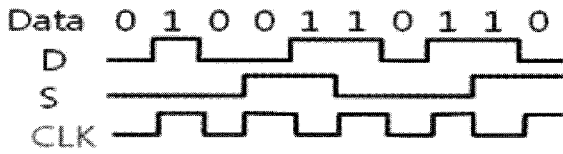


그림 5. Data-Strobe (DS) 인코딩

중 통신 시 각 전송 방향에 대해 서로 다른 전송률이 적용될 수 있다.

2.3 부호 계층(Character level)

부호 계층은 IEEE 1355 표준[2]에 시간 코드(Time code)를 추가하여 구성되었으며, 정보 전달을 위한 8-bit 데이터 부호(그림 6)와 링크 제어를 위한 제어 부호와 제어 코드 그리고 시간 정보를 전달하는 6-bit 시간 코드(그림 7)를 규정한다. 부호와 코드 송수신에는 오류 검출을 위한 홀수 패리티가 적용된다.

제어부호는 흐름제어와 패킷(packet) 구성 등을 위해 사용되며, 연결이 설정되고 난 후 데이터 부호나 제어부호가 전송되지 않을 때에는 NULL 제어 코드가 전송되어 링크를 활성상태로 유지하여야 한다. 일정 시간 동안 NULL 제어 코드가 수신되지 않으면 연결이 해제된 것으로 간주된다.

시간코드는 스페이스와이어 네트워크에 접속된 노드(node) 간에 시간 동기화를 위한 것으로 데이터 부호에 우선하여 전송되며, 임의 시점에 오직 하나의 노드로부터 시간코드가 배포되어야 한다.

2.4 교환 계층(Exchange level)

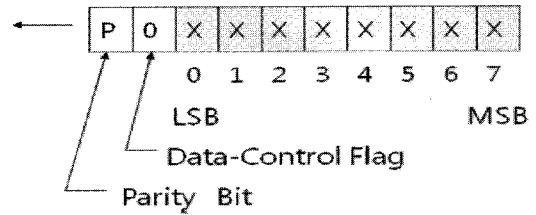


그림 6. 스페이스와이어 데이터 부호

제어 부호

P	1	0	0	FCT : Flow Control Token
P	1	0	1	EOP : Normal End of Packet
P	1	1	0	EOP : Exceptional End of Packet
P	1	1	1	ESC : Escape

제어 코드

P	1	1	1	P	1	0	0	NULL=ESC+FCT
---	---	---	---	---	---	---	---	--------------

시간 코드

P	1	1	1	1	0	T0	T1	T2	T3	T4	T5	0	0
---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	---	---

그림 7. 스페이스와이어 제어 부호 및 제어 코드

교환 계층은 통신 주체 상호간 연결을 설정하고 데이터의 흐름을 담당한다. 정해진 상태 천이도에 따라 초기 연결 설정을 하고, 연결을 유지한 상태에서 흐름 제어를 통하여 통신하도록 규정하고 있다.

흐름 제어는 그림 7의 FCT(Flow Control Token)를 주고 받으며 이루어지는데 수신 측은 56개의 데이터 부호, EOP(Normal End of Packet) 또는 EEP(Exceptional End of Packet)를 수용할 수 있는 버퍼(buffer)를 갖고 있어야 하며 버퍼의 상태에 따라 FCT를 전송한다. FCT를 수신한 송신 측은 FCT가 수신될 때마다 8개의 데이터 부호, EOP 또는 EEP를 전송한다.

스페이스와이어의 부호 계층과 교환 계층을 구현하는 스페이스와이어 링크 인터페이스의 개략적인 블록도는 그림 8과 같다. 수신부(Receiver)와 송신부(Transmitter)는 부호 계층에 정의된 내용의 실현을 담당하며, 송신 FIFO(Transmit FIFO)와 수신 FIFO(Receiver FIFO)는 흐름 제어와 송수신 부호의 일시적 저장을 담당한다. 그리고 State Machine은 그림 9에 정의된 상태도에 따라 동작하며 교환 계층의 핵심 부분의 실현을 담당한다.

스페이스와이어 링크 인터페이스는 초기화 시 'ErrorReset' 상태에 놓이게 되며 수신부와 송신부 및 흐름 제어를 초기화한다. 그리고 6.4[μsec] 이후 'ErrorWait' 상태로 옮겨간다. 'ErrorWait' 상태에서부터 수신부가 동작하며 12.8[μsec] 이후에 'Ready' 상태로 이동한다. 'Ready' 상태에서 상대방으로부

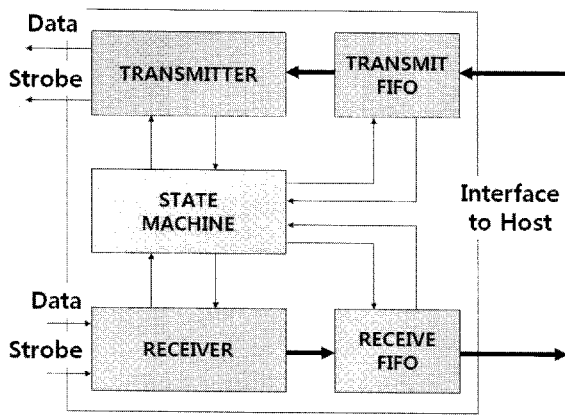


그림 8. 스페이스와이어 링크 인터페이스 블록도

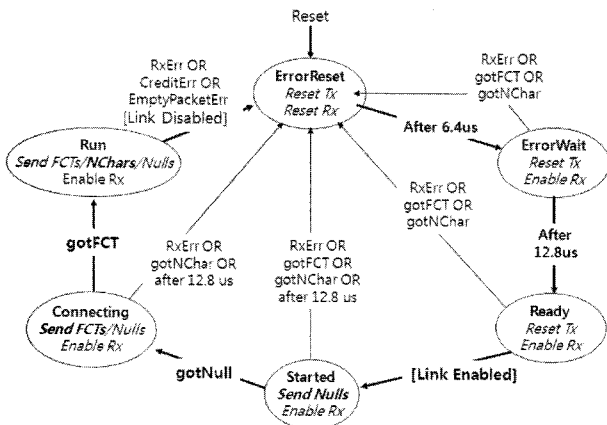


그림 9. 스페이스와이어 링크 인터페이스를 위한 상태도

터 그림 7에 정의된 NULL을 수신하거나, 호스트(Host)의 동작 명령을 받거나 하여 Enable되면 'Started' 상태로 이동하고, 이때 송신부는 NULL을 전송하기 시작한다. 'Started' 상태에서 NULL을 수신하면 'Connecting' 상태로 이동하고 이 상태에서 송신부는 흐름 제어를 위한 FCT와 연결 유지를 위한 NULL을 송신한다. 'Connecting' 상태에서 상대방으로부터의 FCT가 수신되면 'Run' 상태로 이동하며 이 상태에서 흐름 제어를 통한 실제 데이터 송수신이 일어나게 된다. 정상적으로 연결 설정이 완성되는 과정의 한 예가 그림 10에 나타나 있다

'Started' 와 'Connecting' 상태에서 각각 NULL과 FCT가 12.8[μsec] 이내에 수신되지 않거나 기대하지 않던 제어 부호나 제어코드가 수신되면 'ErrorReset' 상태로 돌아가 연결 설정을 초기화한다. 그리고 'Run' 상태에서 호스트에 의해 Disable되면 'ErrorReset' 로 이동하여 연결 설정을 초기화한다.

또 수신부가 동작하도록 정의되어 있는 상태에서 흐름 제어

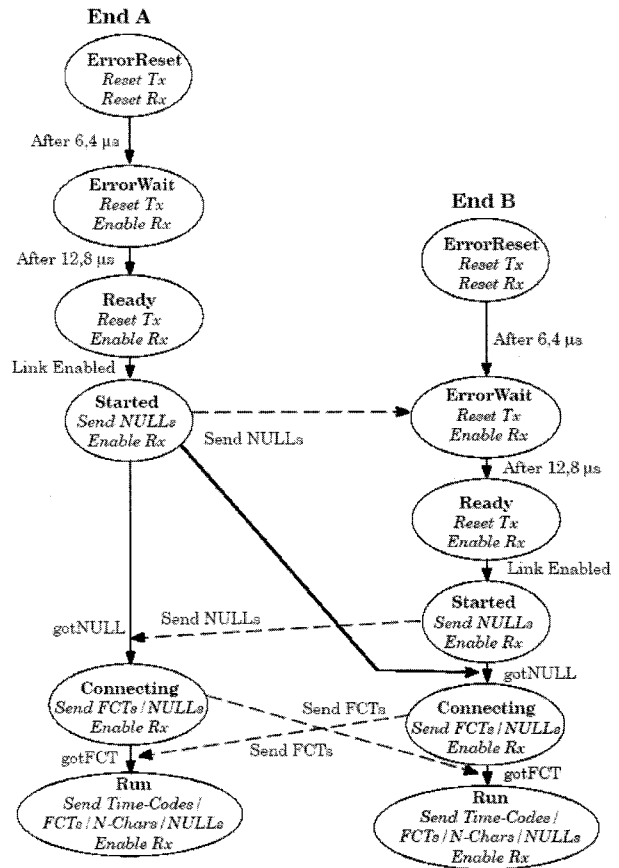


그림 10. 스페이스와이어 연결 설정 과정의 예

오류, 패리티 오류, 제어 코드 오류 또는 연결 해제 오류 등이 발생하면 'ErrorReset' 상태로 이동하여 연결 설정을 초기화하며, 연결 해제 오류는 850[nsec] 동안 Data와 Strobe 입력 신호에서 천이기가 나타나지 않으면 발생된다. 연결 해제 오류의 판단 기준 시간 850[nsec] 때문에 최저 전송률이 2[Mbps]로 설정된 것이다.

2.5 패킷 계층(Packet level)

패킷 계층은 스페이스와이어 네트워크에서 정보 전달에 필요한 패킷의 구성 형태에 대해 규정하는데, 패킷은 목적지 주소(Destination address), 패킷 데이터(Cargo) 그리고 패킷의 끝을 알리는 패킷 종료 마커(End of packet marker)로 구성되며, 패킷 종료 마커는 그림 7의 EOP나 EEP 중 하나가 된다.

목적지 주소는 하나 이상의 데이터 부호로 이루어지며 각 데이터 부호는 네트워크 계층에서 해석되어 사용되는 주소의 의미이다. 목적지 주소에 따라서 스페이스와이어 네트워크를 통한 전송 경로가 정해지게 된다.

패킷 데이터는 하나 이상의 데이터 부호로 이루어지며 목적

지에 전송되어야 할 정보를 담고 있다. 패킷의 전송 과정에서 오류가 발생하면 패킷 데이터 부분에 데이터 부호가 없을 수도 있으며 이것은 교환 계층에 의해 무시되어 처리된다.

패킷이 오류 없이 전송되면 패킷 종료 마커가 EOP로 전송되며 그렇지 않고 오류가 발생되어 패킷이 손상되면 손상된 부분에 EEP가 삽입되어 패킷 종료 마커는 EEP가 된다. 이것은 네트워크 계층에 의해 이루어진다.

2.6 네트워크 계층(Network level)

스페이스와이어 네트워크는 그림 11처럼 다수의 노드(Node), 링크 그리고 라우터(Router)로 구성된다. 네트워크 계층은 네트워크의 구성과 주소 지정(Addressing) 방식에 대해 규정한다. 그리고 네트워크 계층에서의 오류와 이를 극복할 수 있는 프로토콜이 정의되어 있다.

라우터는 앞서 서술한 물리 계층부터 패킷 계층까지 정의된 규정에 따라 노드와 패킷을 주고 받게 되며, 최대 32개의 물리적 포트(port)를 제공하여야 하고 웜홀 라우팅(Wormhole routing)을 지원해야 한다.

스페이스와이어 네트워크의 전송 단위인 각 패킷은 목적 노드의 주소를 저장하고 있는 헤더(Header)를 갖는데 이것은 패킷 계층에서 정의된 목적지 주소를 지정하는 하나 이상의 데이터 부호 중에서 가장 먼저 전송되는 데이터 부호이다. 패킷의 헤더가 라우터의 입력 포트(port)로 수신되면 헤더에 저장되어 있는

목적지 주소를 해독하여 보낼 출력 포트를 결정한다(그림 12의 a). 그리고 선택된 출력 포트가 사용 가능하면 입.출력 포트 사이에 연결을 설정하고 패킷을 출력 포트로 보낸다(그림 12의 b). 만일 사용하고자 하는 출력 포트가 사용 중이라면 출력 포트가 사용 가능해질 때까지 기다리게 된다. 전송 중인 패킷의 종료 마커가 출력 포트를 통과하게 되면 내부의 입.출력 포트간 연결 설정을 해제한다(그림 12의 c). 그림 12에서 검은색으로 표현된 것이 헤더이며 회색으로 표현된 것이 패킷 데이터와 종료 마커이다.

패킷이 라우터를 거칠 때마다 헤더가 삭제될 수 있다. 그림 13은 패킷이 라우터를 거치면서 검은색으로 표현된 헤더가 삭제되는 경우를 보여준다. 네트워크의 규모가 커져 하나 이상의 라우터를 거쳐서 수신 노드에게 패킷이 전달되는 경우에는 패킷이 라우터를 통과할 때마다 헤더가 삭제될 수도 있다. 헤더의 삭제 여부를 결정하는 정보는 라우터가 갖고 있어야 한다.

헤더가 삭제된 패킷을 수신하는 노드 측에서는 수신 패킷의 첫번째 데이터 부호(그림의 회색 부분)를 헤더로 인식하고 이 부분에 저장된 정보를 가상의 주소(Virtual address)로 사용할 수도 있다. 가상의 주소는 패킷이 수신된 노드를 사용하는 다수의 응용 프로그램 중 특정 응용 프로그램으로 패킷의 내용을 전달할 때 사용할 수 있다.

스페이스와이어 네트워크에 접속되어 있는 노드에 네트워크에서 중복되지 않는 논리 주소(Logical address)를 할당하고 패킷의 헤더가 논리 주소를 포함하도록 하는 방법도 있다. 이 방법의 경우 동일 논리 주소 체계를 사용하는 네트워크에 최대 223개의 노드가 접속될 수 있으며 이때에는 라우터가 헤더를 삭제하지 않아야 하며 라우터마다 라우팅 테이블(routing table)을 보유하고 있어야 한다.

라우터는 처리할 수 없는 주소 정보를 갖는 헤더가 수신되거나, 패킷의 처리 도중에 입력 포트에서 흐름 제어 오류, 패리티 오류, 제어 코드 오류 또는 연결 해제 오류 등이 발생하면 패킷의 전송을 중지하고 출력 포트에 EEP를 출력하여 패킷을 조기 종료시킨다. 그리고 입력 포트에 EEP나 EOP가 수신될 때까지 입력되는 데이터 부호를 무시한다.

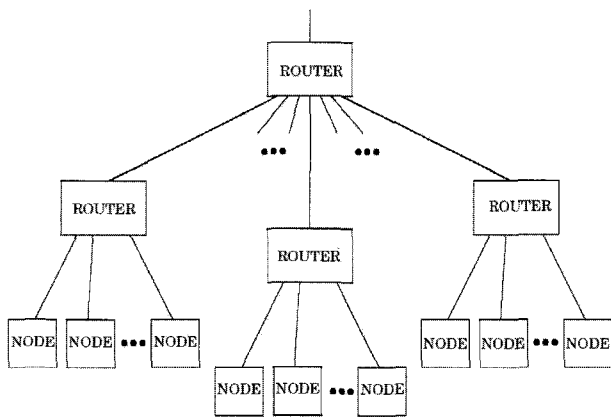


그림 11. 스페이스와이어 네트워크의 구성 예



그림 12. 웜홀 라우팅

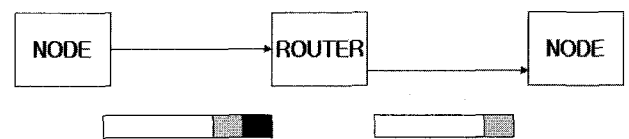


그림 13. 헤더 삭제와 가상 주소

3. 결론

스페이스와이어는 저전력 고속 통신이 가능하며 기능이 복잡하지 않아 FPGA(Field Programmable Gate Array)나 CPLD(Complex Programmable Logic Device) 같은 부품을 이용하여 구현할 수 있다. 따라서 피코(Pico)급, 나노(Nano)급, 소형급 등의 인공 위성에 적용하기 적합한 것으로 판단된다.

반도체 기술의 지속적인 발달과 위성의 크기에 따른 발사 비용 부담 때문에 위성의 소형화가 요구되는 현실에 적합한 해결책이라 할 수 있다. 향후 항공 우주 분야를 떠나 고신뢰성이 요구되는 타 분야에 응용될 수 있을 것으로 기대되며, 스페이스와이어의 다른 분야에 대한 적용이 활발히 진행 중이다.

현재 국내 우주 개발에 적용을 목표로 스페이스와이어 관련 기술 개발이 진행 중이며 일부는 현재 개발이 진행중인 과학기술위성 3호에 실험 탑재되어 그 성능이 검증될 예정이다.

참고문헌

[1] J. R. Wertz, W. J. Larson, Space Mission Analysis and Design, Space Technology Library, 1999.
 [2] Department of Defense of USA, MIL-STD-1553B, 1978.
 [3] European Space Agency, SpaceWire-Links, nodes, routers and networks, ECSS-E-50-12A 2003.

[4] IEEE Standard for Heterogeneous Interconnect (HIC), IEEE Standard 1355-1995.
 [5] IEEE Standard for Low-Voltage Differential Signals (LVDS) for Scalable Coherent Interface (SCI), IEEE Standard 1596.3.
 [6] D.-Y. Kim, K.-H. Kwon, J.-W. Choi, J.-I. Lee and H.-J. Kim "Design of a New On-Board Computer for the New KOMPSAT Bus," Proc. IEEE Aerospace Conference 2005, Vol.5, No. 12, Mar. 2005, pp.1-12.
 [7] <http://www.aeroflex.com/spacewire>.
 [8] <http://www.gaisler.com>.

저 자 약 력



유 상 문

- 1992년 금오공과대학교 전자공학과 졸업.
- 1995년 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사.
- 2006년 동 대학원 전자전산학과 박사.
- 1995년~2000년 LG전자(주).
- 2000년~2004년 한국과학기술원 인공위성연구센터.
- 2006년~현재 군산대학교 전자정보공학부 전임강사.
- 관심분야 : 임베디드 제어 시스템, 실시간 제어 시스템, 결합허용 시스템, 스페이스와이어.