광섬유 센서 기술

朴 漢 奎
延世大學校 電子工學科 敎授(工博)

Ⅰ. 序 論

광통신 분야에 많은 공헌을 해온 광섬유는 통신용이 아닌 계측용 센서로서 응용하고자 많은 연구가 이루어져 왔다.

1976년 Kinsley에 의해 처음으로 광섬유와 관련된 전기적 위상 변이 효과가 발표된 이후 현재까지 약 60여 가지의 광섬유 센서가 개발 되었다.

광섬유 속을 진행하는 빛은 여러 가지 외부 요인(압력, 온도, 자기장, 응력 등)에 의해 직접 변조될 수 있기 때문에 광섬유는 그 자체가 transducer로서 사용될 수 있다. 광섬유 센서는 기존의 계측 방법들에 비해 감도가 좋고 구조적 다양성을 가지며 transducer가 유전체이고 전기적 잡음, 고압, 고온 등의 영향을 받지 않으므로 그 응용분야는 다양하다. 또한, 광섬유 자체가 전송로로서 손실이 적어 원격 측정 및 고속·대용량 계측 제어 시스템이 가능하고 빛의 코히어런트 성질을 이용하여 비접촉 고감도 센서를 구성할 수 있다. 센서에 대한 전기적인 바이어스가 불필요하므로 기존 계측용 센서보다 가격이 저렴하다는 장점을 갖는다.

따라서 여기서는 여러 가지 측정방식에 의한 각종 광섬유 센서의 종류와 동작 원리, 특성 및 그 응용분야에 대해 설명하고자 한다.

Ⅱ. 광섬유 센서의 종류 및 특성

일반적으로 광섬유 센서는 변조 형태에 따라

1) Intensity modulation을 이용한 센서
2) 간섭현상(phase modulation)을 이용한 센서
3) 빛의 편광을 이용한 센서

등으로 나눌 수 있다.

Intensity modulation을 이용한 센서는 물리적인 변형을 광섬유에 직접 작용시키거나 광섬유에 부착시킨 소자에 작용하게 하여 광섬유 속을 진행하는 빛의 세기를 직접 변조시키는 방식으로 구성이 간단하며 주로 다중 모드 광섬유가 사용된다.

간섭계(interferometer)를 이용한 센서는 기준부(reference arm)와 감지부(sensing arm)로서 간섭계를 구성하여 이들 사이의 외부 요인에 의한 위상차를 측정하여 정보를 얻는 방식이다. 외부場(field)의 종류에 따라 적합한 간섭계를 구성해야 하며, 주로 Fabry-Perot간섭계, Sagnac간섭계, Mach-Zehnder간섭계 등을 이용하고 주로 단일 모드 광섬유를 사용하며, 시스템이 복잡한 반면 감도가 높고 응용 분야가 넓기 때문에 가장 많이 연구되고 있는 방식이다.

그리고, 빛의 편광을 이용한 센서는 광섬유속을 진행하는 빛의 외부 場(자기장등)에 의해 편광 상태가

표 1. 광섬유 센서의 특성

	기본특성	주요특징	센서분야
재료 (석영)	(a) 화학적 안정성	내수성, 내화성	고온, 저온영역, 우주, 해양 생체내 센서
	(b) 절연성	비접지	고전압기기용 센서
	(c) 자료풍부	경제성	전자계내 센서
			네트워크
광섬유	(a) 가는 직경	경량	미소 센서 분야
		소형화	센서어레이, 매트릭스
	(b) 저손실	원격측정	지능로보트
			고감도 센서
빛	(a) 코히어런트	비 접촉	고감도 센서
		간섭, 편광	성분분석 센서
	(b) 스펙트럼	분광	
		파장 다중화	
	(c) 화상	패턴	화상 모니터
			병렬 영상처리
	(d) 펄스	시간 다중화	시분할 반사 관측센서
전송로	(a) 정보전송	대용량, 고속	컴퓨터 제어 시스템
			고속·대용량 계측제어
	(b) 전송로	전송로 센서	분포형 센서

변하는 것을 측정하여 상대적인 외부 場의 세기를 감지하는 방식이다. 광섬유 센서의 특성은 표 1과 같다.

2. Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 압력 및 온도 측정

Mach-Zehnder 간섭계는 Mach와 Zehnder에 의해 고안된 것으로 그림 1과 같은 구조를 가지며 주로 물질의 굴절율을 측정하는데 이용 되었다.

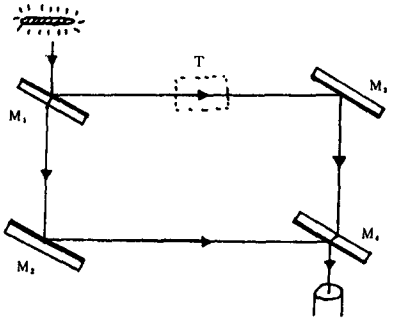


그림 1. Mach-Zehnder 간섭계의 원리

그림 1에서와 같이 한쪽 빔에 굴절율 n, 두께 T를 갖는 물질을 넣었을 경우, 빛이 물질내를 통과한 후의 경로차와 n=1인 공기를 통과한 빛 사이에 간섭을 일으키며 물질의 굴절율 변화에 따라 간섭 무늬 패턴이 이동하게 된다. 이들 파라미터를 측정하므로서 물질의 굴절율을 측정할 수 있다. 이와같은 Mach-Zehnder간섭계의 원리를 이용하여 압력(또는 온도)을 측정하는 장치의 개략도가 그림 2에 나타나 있다.

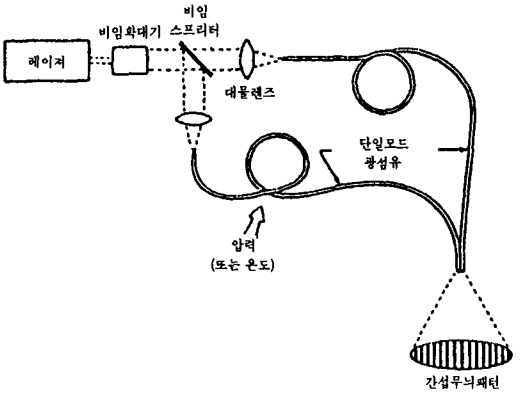


그림 2. Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 압력 및 온도 측정

이는 두 빔의 경로를 단일 모드 광섬유로 대치하고 광경로의 변화를 주는 물질을 사용하는 대신에 한 쪽의 광섬유에 압력(또는 온도)를 가해 간섭 무늬의 이동을 일으키는 원리를 이용한 것이다. 이 센서는 압력(또는 온도)에 대한 광섬유의 감도를 높여 줄 수 있기 때문에 미세한 압력(또는 온도)까지도 측정이 가능하다. 또한 이러한 방식 이외에도 온도 측정을 위한 새로운 방식이 많이 제시되고 있다.[2]

2. 음향 센서 및 Hydrophone

최근 몇 년간 광섬유를 이용한 음향 센서 및 수중 음파 탐지를 위한 hydrophone에 대한 많은 연구가 이루어졌다.[3][4] 특히 전력을 필요로 하지 않는 수동 소자로서 센서에 대한 mechanism 개발에 역점을 두었으며 그 방식으로는 크게 다음의 두 가지로 분류할 수 있다.

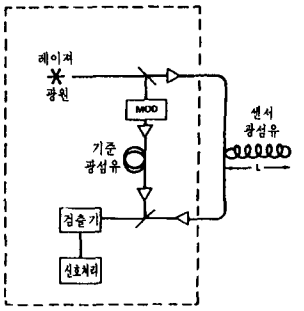
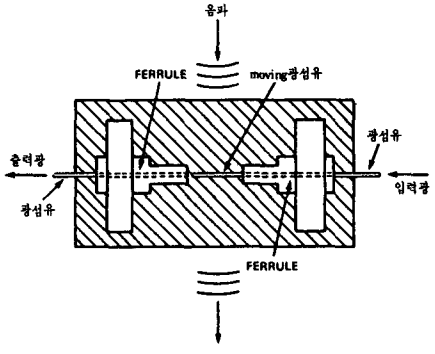


그림 3. 광섬유를 이용한 음파 측정

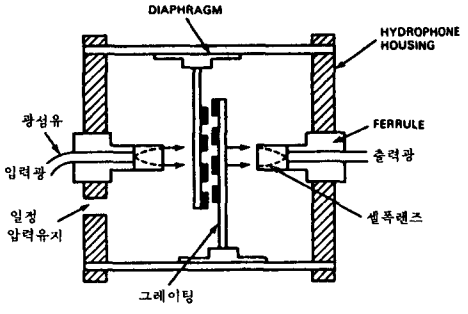
첫째, 그림 3과 같이 음파가 광섬유에 photoelastic 효과를 일으켜 빛의 위상을 변화시키는 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하는 방법이 제안되었다. 음파를 감지하는 감지부의 형태를 선형 배열, 평면 배열, 코일 형태로 제작하여, 음파의 방향성을 찾을 수 있는 이점이 있다. 그러나 음파에 대한 위상 변화는 광섬유의 코팅 물질과 두께에 매우 민감하기 때문에 광섬유의 코아와 크래드 뿐만 아니라 코팅 물질에 대한 특성과 제작 과정이 어려운 문제로 남아 있다. ITT등에서는 상업적으로 플라스틱 코팅(상품명 Hytrel)을 하여 매우 높은 감도를 갖는 광섬유를 제작하여 상용중에 있다. 그러나 이러한 방식은 온도등 주위 영향에 따른 위상 잡음을 줄여야 하며 광 검출기의 감도를 높여야 하는 문제점들이 있다. 간섭계를 이용한 센서에서의 복조방식으로는 FM판별기, homodyne, synthetic heterodyne 방식 등이 많이 이용되고 있다.

둘째, intensity modulation 방식

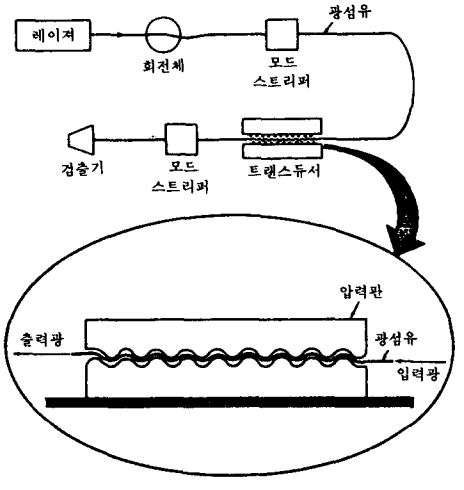
이 방식은 위상 변조 방식에서 나타나는 위상 잡음을 제거하기 위하여 제안된 것으로 그림 4와 같은 여러 형태로 디자인하여 사용할 수 있다.[8]



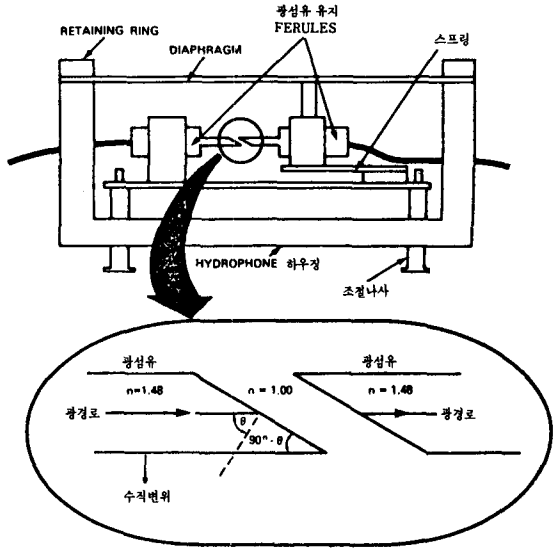
(a) Moving 광섬유 이용



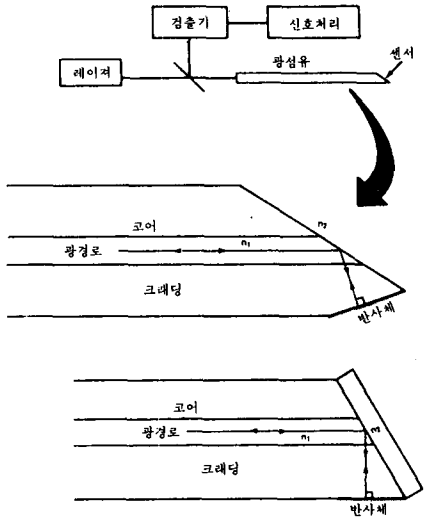
(b) Schlieren 혹은 그레이팅 이용



(c) Microbend loss이용



(d) FTIR (frustrated total internal reflection) 센서



(e) NTIR (near total internal reflection) 센서

그림 4. Intensity modulation을 이용한 광섬유 hydrophone의 예

음파의 압력에 의해 schlieren이나 moving 광섬유를 사용하여 광섬유에 다시 coupling되는 광량이 음파에 의해 변조된다. 간섭계를 이용한 위상 변조방식과는 달리 여러 형태로 디자인하여 사용할 수 있고 다중 모드 광섬유를 사용하는 장점이 있으나 구성이 어려운 문제점이 남아 있다.

3. 광섬유 Gyroscope

1913년 Sagnac은 ring 레이저 장치를 이용하여 회전량을 측정하였다.

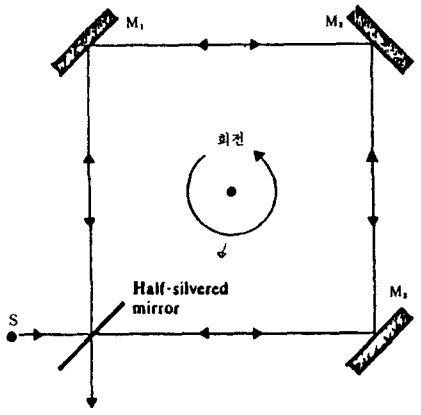


그림 5. Sagnac의 실험

그림 5와 같이 half mirror에 의해 분리된 빛이 서로 반대 방향으로 입사된 후 수직한 축에 대해 회전시키면 상대성 광학이론(relativistic optics)에 의해 CW (clock wave)와 CCW (counter clock wave)가 도달하는 경로 시간이 다르게 되며 이는 각속도에 비례하여 간섭 무늬 이동이 생기게 된다. 일반적인 광섬유 gyroscope의 구성은 그림 6과 같다.[6]

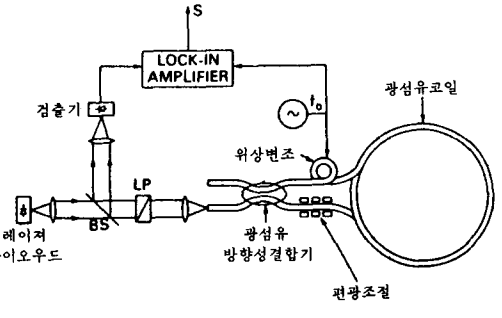


그림 6. 일반적인 광섬유 gyroscope의 일례

이외에도 nonreciprocal phase bias를 준다든지 phase nulling 등 여러 형태의 gyro 구조를 취하므로써 감도를 높일 수 있다.

선박, 항공기등에서 문제가 되었던 회전량의 정밀도가 광섬유 gyroscope의 출현으로 1deg/h 정도로 상당히 개선되었으며, 군사적으로는 군함, 잠수함이나 비행선, 유도 미사일의 회전량과 궤도 계산 등 정밀도를 주는데 이용되었으며, 산업적으로는 회전체의 회전량을 측정하는데 유용하나, 최대 회전 속도의 제한으로 곡률 반경이 큰 회전체로 제한된다. 또한 시스템의 집적화로 기계적인 안정성과 소형화가 가능하게 되었다. 컴퓨터의 신호처리로 실시간 처리는 물론 궤도의 누적 계산도 가능하므로 군사적으로 많은 각광을 받고 있다. 최근에는 집적화된 gyro 칩에 대한 연구가 발표된 바 있고[7] 감도를 0.1deg/h까지 줄이려는 연구가 NRL, AEG Telefunken, M. I. T., Stanford Univ. 등에서 활발히 진행중에 있다.

4. 자기장 및 전류 측정

일반적으로 전류 측정시 고전압인 경우 전류의 대소에 관계없이 측정 장치를 고압 회로로부터 절연시켜야 하므로 전력 계통 또는 산업용 전력 설비에서 현재 사용되는 변류기(current transformer)는 그만큼 절연의 강화, 중량의 증대, 높은 제작비 등의 문제점이 있으며 철심을 사용하는 변류기의 포화 현상을 피할 수 없다. 따라서 최근 이러한 문제를 해결하기 위해 광섬유를 이용한 전류 측정 시스템의 연구가 활발히 진행되어 현재 magneto-optic 전류 센서는 세 가지 방식 즉,

1) Magnetic 물질을 이용한 전류 측정[8]
2) 단일 모드 광섬유를 이용한 전류 측정[9]
3) Magneto strictive 물질을 이용한 magnetic 측정 방식[10] 등이 제안되고 있다.

첫째 방식으로는 magneto-optic 효과를 갖는 물질(YIG, flint glass등)로 센서 부분을 구성하면 편광 상태가 외부 자장에 의해 물질내에서 변하게 되며 검출기에서 편광 상태를 분석하므로써 외부장의 세기를 알아낼 수 있다(그림 7).

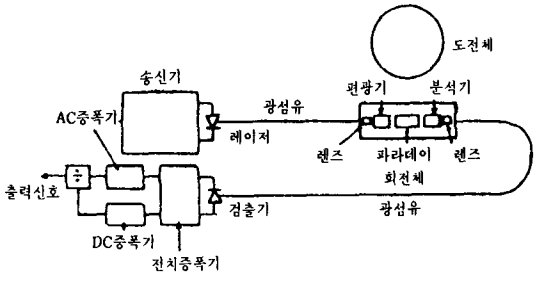


그림 7. Magnetic 물질을 이용한 자장 측정

두번째 방식으로는 그림 8과 같이 광섬유를 통과하는 빛과 평행한 방향으로 자장을 걸어주면 파라데이 효

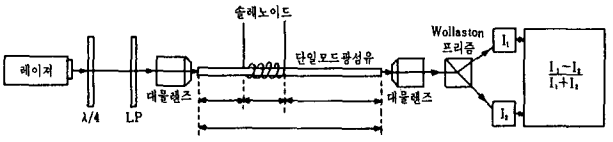


그림 8. 단일 모드 광섬유를 이용한 전류 측정

과에 의해 편광 방향이 회전하게 되며, Wollaston 프리즘과 검출단에서 장의 세기 및 상대적인 전류를 측정할 수 있다.

그러나 광섬유가 비틀림, 구부림등의 스트레스와 온도 변화에 따라 복굴절 현상을 일으키므로 실제 회전되어 나온 빛은 복굴절에 대한 위상차와 파라데이 효과에 의한 편광 회전이 복합된 타원편광 형태로 나타나며 Wollaston 프리즘에 의하여 타원의 두방향 성분이 공간적으로 분리되어 광검출기로 검출된다. 이 방식은 센서 부분을 특수한 물질을 사용하지 않고 광섬유를 이용하므로 제작이 용이한 반면 외부 영향에 따른 복굴절 현상과 온도 변화가 측정에 큰 영향을 준

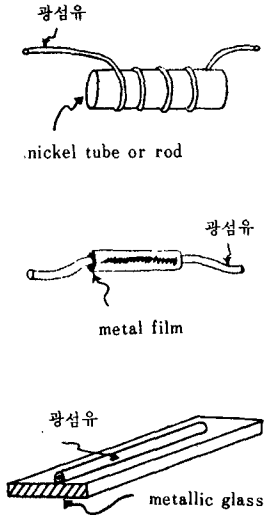


그림 9. Magnetostrictive 물질의 구성

다. 편광 변화를 이용한 다른 센서와 마찬가지로 광섬유 내의 편광 상태를 유지해 주기 위한 여러 형태의 광섬유에 대한 연구가 진행되고 있다.

세번째 방식으로는 magnetostrictive 물질을 이용한 방식으로서, Mach-Zehnder 간섭계의 감지부에 magnetostriction을 일으키도록 ferromagnetic 물질을 그림 9와 같이 구성하면 자장에 의해 물리적인 변형이 일어나 광섬유내에서 빛의 위상 변화가 일어나게 되며 앞에서의 설명과 마찬가지로 기준광과의 간섭 현상에 의해 장의 세기를 측정할 수 있다.

Fe, Co, Ni과 그들의 합금으로 magnetostrictive 물질을 적절히 구성해줌으로써 파라데이 방식보다 감도가 좋고 적은 양의 장까지 감지할 수 있는 이점이 있다. 그러나 온도와 압력에 대한 보상과 Barkhausen 잡음을 줄여야 하고 적절한 바이어스 장을 걸어 주어야 하며 loading효과를 고려해야 하는 문제들이 개선되어야 한다.

Ⅲ. 結　　論

이 외에도 광섬유를 이용한 다른 센서로서는 가속계, 방사량 측정계, 변위 측정계, 유압계, 토오크 측정계 등 수십가지에 이르고 있으며, 특히 LDV(laser doppler velocimeter)를 이용하여 물체의 속도 및 입자의 크기를 측정하는 방식은 환경공해 분야에서 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 경량, 소형이면서 출력이 큰 Ga-Al-As 반도체 다이오드를 사용함으로써 시스템을 간소화 할 수 있으나 amplitude noise, coherence length, 위상 잡음에 대한 특성이 좀 더 개선되어야 할 연구 과제이며 무엇보다도 광섬유의 코팅 기술의 향상과 외부 잡음에 대한 보완 및 광학부품의 저렴화가 이루어져야 하며 광에 대한 다른 각도에서의 인식이 필요하다.

이상에서 밝힌 바와 같이 광섬유를 통신용이 아닌 계측용으로 이용하므로써 기존의 계측기보다 감도가 높고 다양한 형태로서 소형화 및 집적화를 꾀할 수 있고 원격 측정이 가능하여 앞으로 새시대의 첨단 기술로서 각광을 받게 될 것이다.

參 考 文 獻

[1] T.G. Giallorenzi et al., "Optical fiber sensor technology," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, no. 4,, pp. 626 April 1982.

[2] K. Kyuma, S. Tai, T. Sauada, and M. Nunoshita, "Fiber optical instrument for temperature measurement," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, no. 4, pp. 676 April 1982.

[3] J.A. Bucaro, H.D. Dardy, and E. Carome, "Fiber optic hydrophone," *J. Acoust.*

Soc. Amer., vol. 62, pp. 1302, 1977.
[4] J.H. Cole, R.L. Johnson, and P.B. Bhuta," Fiber optic detection of sound," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 62, pp. 1136, 1977.
[5] P. Shajenko, "Fiber optic acoustic array," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 59, pp. 592, 1976.
[6] G. Schiffner, "Optical fiber gyroscope utilizing the sagnac effect," *Siemens Res. Rep.*, vol. 9, pp. 16, 1980.
[7] O.G. Ramer, M.D. Nelson, *Integrated Optic Gyrochip.* Conf. O.F.C., pp.42 Jan. 1984.
[8] G.A. Massey, D.C. Erickson, and R.A. Kadlec, "Electromagnetic field components: their measurement using linear electrooptic and magnetooptic effects," Appl. Opt., vol. 14, no. 11, Nov. 1975.
[9] A.M. Smith, "Polarization and magneto-optic properties of single mode optical fiber," *Appl. Opt.*, vol. 17, pp. 52, 1978.
[10] A. Yariv, H. winsor, "Proposal for detection of magnetostrictive peturbation of optical fibers," *Opt. Lett.*, vol. 5, pp. 87, 1980. *

알아둡시다

유선통신과 무선통신

그날, 그 시각에 어김없이 연락이 취해졌더라면 아마 이렇게는 되지 않았을 텐데……. 우리는 짧지 않은 한 평생에 이렇게 아쉽게 회상되는 일들이 한 두 가지가 아니다.

통신의 최종적인 모습은 시간과 장소를 초월하여 누구와도 하고 싶은 때에 얘기를 나눌 수 있고, 정보를 교환할 수 있는 체제라야만 한다고 말할 수 있다. 그와같은 체제가 완성되면 다른 사람이 끝까지 자기를 추적해 올 것이다. 그렇게 되면 자기만의 오붓한 시간이란 전혀 가져 볼 수가 없지 않느냐고 걱정하는 사람도 있을 것 같다.

현재 외국의 주요 도시에서 실용화되어 있는 포키트벨(pocket bell)조차도 편리하다기 보다는 도리어 번거롭다고 생각하는 사람도 있다. 그러나 그것은 사용자의 입장에서 말하는 문제이지, 기술자는 예나 지금이나 어쨌든간에 통신이 가능한 체제가 만들어져야만 한다고 요구하고 있다.

전파통신의 목적은 뭐니뭐니해도 이동체, 즉 자동차, 기차, 선박, 항공기 심지어는 인공위성에 이르기까지 통신의 목표이다. 일조 유사시에 정부의 고관들과 연락조차 취할수 없는 그따위 통신 시스템이라면 그 나라는 결코 현대국가라고 말할 수 없다. 또 재해 때의 긴급통신이나 비상통신도 잊어서는 안된다. 홍수로 통신이 딱 두절되고 연락이 불가능한 사태가 된다면 얼마나 답답하고 불안할까.

전파통신방식이 완성되었을 때, 청년 마르코니는 이탈리아 정부에 그가 만든 무선장치를 팔러 갔었다. 그때 당국자들은 육상에서의 통신은 무선이 아닌 유선전화·전신으로도 충분하다고 완곡히 거절하면서 도리어 선박통신을 생각해 보는 것이 어떻겠느냐고 하며 영국으로 건너가 보라고 권고 했다.

태풍, 홍수, 지진 따위와 같은 긴급사태에서는 유선전화는 쓸모가 없다. 현대는 정부가 아닌 지방 자치단체가 전용 무선전화를 도입하기에 급급한 시대이다. 일반에게 개방되어 있는 전화등의 일반 통신회선에서는 사고로 인한 통신두절이 아니더라도 긴급한 때에는 일반의 통신이용이 증가하기 마련이다. 일반이 이용하는 통신에 끼어들어 자치단체가 필요로 하는 통신연락을 취한다는 따위는 도저히 생각조차 할 수 없는 일이다.

그렇지만 무엇이건 죄다 무선으로만 해결하려는 것도 생각할 문제이다. 죄다 무선으로만 이용하게 된다면 이번에는 상호간의 전파가 간섭하여 혼신을 일으키거나 또는 중요한 통신내용을 전파로 도청 당하거나 하는 사태가 일어나지 않는다고 단언할 수는 없다.

현재는 불필요한 무선통신을 유선통신으로 전환하고 있는 시기이기도 하다. 최근의 광섬유(fiber optics)통신의 눈부신 발전은 유선통신에 새로운 희망을 던져주었다.

인간의 수송이라는 문제를 두고 생각해 보자. 항공기와 철도는 이 문제에 있어서 늘 경쟁해 왔다. 정보의 전송량이라는 목적에서 생각한다면 이 관계는 마치 소용량을 전송하는 무선통신과 대용량을 전송하는 유선통신의 관계에 대응시켜 생각할 수 있다. 철도는 선로를 부설하는 데에 막대한 돈이 들기는 하나 대량의 것을 한꺼번에 수송할 수 있다. 한편 항공기는 발·착용 비행장의 건설만 하면 되고, 비용도 철도를 건설하는 만큼은 들지 않지만 그 대신 소량 밖에는 수송하지 못한다.

광섬유통신은 이를테면 고정 지점간을 위한 철도의 초고속 열차라고 하겠다.

무선통신과 유선통신 사이에는 조화가 필요하다. 한쪽에만 의존한다는 것에는 문제가 있다.