

광계산 기술

申 相 永

韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

I. 서 론

광계산이 다음 세대 기술로서 기존의 전산기술보다 더 주목받는 이유는 여러가지가 있다. 광계산은 기존 컴퓨터의 전기신호와와는 달리 빛으로 코딩된 정보를 처리한다. 광신호처리는 빛의 속도로서 전기신호보다 더 빠른 계산속도의 가능성을 제시할 뿐만 아니라 무엇보다도 빛의 고유한 성질인 병렬성에 그 매력이 있기 때문이다. 전기회로에서의 막대한 연결선들은 실제적으로 가능한 병렬처리의 양을 제한할 뿐만 아니라 전자회로 컴퓨터의 속도를 제한한다. 전기회로에서는 상호결합으로 연결선들 간의 최소간격이 있어야 하지만 광연결에서는 문제가 되지 않으므로 얼마든지 연결선을 가깝게 할 수 있고 심지어 3차원 공간상에서 광신호들을 서로 교차하여도 상관없다. 또한 전기신호에서 시상수 문제로 인한 동기의 흐트러짐을 해결할 수 있다. 산술계산면에 있어서 아날로그 곱셈이나 덧셈을 쉽게 할 수 있고 기존 전산기술로는 어려운 Fourier 변환이나 convolution 같은 수학계산도 렌즈를 사용함으로써 쉽게 구현할 수 있다. 이 상에서 열거한 것과 같이 광학기술은 전기회로 기술에 비해 여러가지 장점이 많이 있지만 광신호는 전기신호(전류)보다 신호조작의 융통성이 떨어지는 단점도 있다.

현재 전자계산기에 실용화된 광 기술은 CD(compact disk) ROM, MOD(magneto-optical disk) 등 광기억소자가 있고^[1-3], 광계산 기술로서 실용화된 것은 synthetic aperture radar의 광정보처리기술, 광 상관기, 집적광학을 이용한 RF spectrum analyzer를 들 수 있겠다. 그러나 광계산은 인공지능, 상호연결, 패턴인식, 로봇틱스, SDI 등 여러 분야에서 많은 응용

이 기대되고 있으며, 광학기술의 이용은 점점 확대될 전망이다.

여기서는 광계산에서 요구되는 광계산 소자, 광 디지털 계산, 광 아날로그 계산, 광 신경회로망의 연구동향에 대하여 기술하려 한다.

II. 광계산 소자

광계산 기술은 전기적 신호를 사용하는 기존 전자계산 기술과는 아주 다르다. 따라서 광계산에서 요구하는 소자도 기존의 컴퓨터와는 다른 소자들을 필요로 한다. 광계산에 응용 가능한 요소로서 음향광학(AO) 변조기 및 편향기, 공간 광변조기(spatial light modulator), LD array, CCD, 광검출기 array, 광쌍안정소자, 비선형 결정, 홀로그램 광소자(HOE), 집적광학소자 등을 들 수 있다.

음향 광학 변조기 및 편향기는 1차원 광변조기이다. 이는 행렬-벡터 곱셈, RF spectrum analysis등 광계산에서 사용되며, 현재 이 기술은 잘 개발되어 있으며 계속적인 응용연구가 활발히 이루어지고 있다.^[4] 공간 광변조기(SLM)는 2차원 array 형태로 빛을 변조하는 소자이다. 이렇게 2차원적으로 빛을 변조함으로써 빛의 병렬처리 능력을 이용하는 데 필수적인 소자라 할 수 있다. 1970년대 후반부터 Hughes Research Lab에서 액정밸브(LCLV) SLM을 제공하고 있다. 그림 1에 Hughes LCLV의 구조를 나타내었다. LCLV는 현재 그 분해능과 속도는 광계산에서 요구하는 정도에 못미치고 있다. 최근에 강유전체 액정(ferroelectric liquid crystal)을 이용하고 광센서로서 비정질 Si를 이용한 SLM이 빠른 동작속도로 주목을 받고 있다.^[6] 이러한 LCLV 외에도 여러

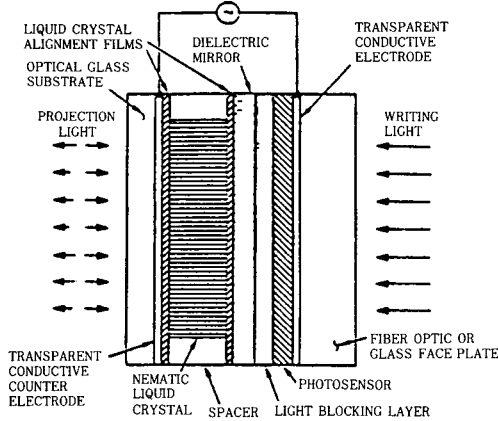


그림 1. Hughes LCLV의 구조

가지 형태의 SLM 이 연구되고 있다. Microchannel SLM (MSLM), deformable mirror device (DMD), silicon on PLZT (Si/PLZT) 광변조기, 자기 광학 공간 광변조기 (MOSLM) 등이 그 예이다. 특히 MOSLM은 상품 SIGHT-MOD로 대표되는 48×48 과 128×128 의 화소 array를 갖는 것이 이용 가능하다. 이는 $10^4 : 1$ 의 contrast ratio를 가지나 10~20%의 낮은 throughput을 가지고, 수 KHz의 frame rate를 갖는다.^[1]

1989년 AT & T Bell Lab에서 마이크로 레이저라 불리는 CD array에 관한 연구 결과를 발표하였다.^[2] 이는 Si-doped n^+ -GaAs 기판위에 MBE (molecular beam epitaxy) single quantum 방법으로 well 구조를 만들고, 여기에 1, 1.5, 2, 3, 4, $5 \mu\text{m}$ 직경의 마이크로 레이저를 ion-beam etching을 통해 전표면에 형성하였다. 이런 방법으로 100만 개 이상의 마이크로 레이저를 하나의 chip 상에 형성하는데 성공하였다. 이를 그림 2에 나타내었다. 이러한 결과는 신호처리, 패턴 인식, 광계산의 영역에서 앞으로 많은 응용이 기대되는 기술이다.

광계산의 출력소자로서 CCD는 여러가지 형태의 광계산에서 중요하다. 1-D array는 6,000개까지의 화소를 갖고 $15,000 : 1$ 정도의 동작범위, 수 ms 이하의 동작속도를 갖는다. 2-D Si CCD는 $2,048 \times 2,048$ 화소, $10^4 : 1$ 의 동작범위, 0.1초 정도의 동작속도를 갖는다. 그러나 광계산에서는 고속 detector array가 요구되는데 76개까지의 요소를 갖고 70MHz 대역폭의 array가 이용 가능하지만 이는 더욱 연구 개발

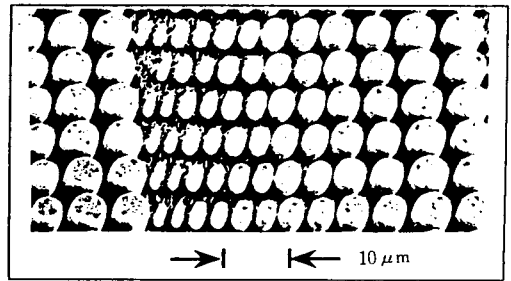


그림 2. 마이크로 레이저 array chip의 일부분 사진

되어야 할 분야이다.^[3]

광 쌍안정소자는 하나의 입력에 대하여 두 개의 안정한 출력상태를 보이며, 이러한 소자의 비선형 특성을 이용하여 기존 컴퓨터의 디지털 논리 게이트와 같은 작용을 수행하는데 사용되어질 수 있는 광논리 소자로서의 이용이 기대되고 있다. 광 쌍안정성은 단순 반도체나 복합 반도체, 분자 및 금속 증기, 액정 등을 포함하여 20여가지 이상의 물질에서 관측되었으며, GaAs와 GaAlAs 같은 밴드갭이 다른 두 반도체를 교대로 붙인 필름으로 이루어진 광초격자와 같은 광 쌍안정소자도 개발되었다.^[4]

다음은 비선형 결정인 BaTiO_3 , BSO, LiNbO_3 , 등 광굴절 물질을 들 수 있다. 이들의 위상공액 광학적 성질(실시간 홀로그래피)을 이용한 광 영상처리 기술과 함께 또한 이들의 체적 홀로그램 성질을 이용한 광연결로 광 신경회로망을 구현하는 연구도 진행되고 있다.^[5] 홀로그램 광소자 (HOE)는 렌즈, 거울 등을 흉내낼 뿐만아니라 몇몇 경우에 있어서 그들의 성능을 증가한다. 최근에는 컴퓨터 생성 홀로그램 (CGH)이 많은 발전을 가져왔다.^[6]

광계산을 위하여 구성요소들 간의 연결을 위한 기술 또한 중요한 역할을 한다. Caltech의 Carver Mead는 반도체 VLSI의 이론적인 잠재력이 하나의 웨이퍼상에 10억 개 정도의 능동소자를 연결할 수 있음을 지적했다. 이러한 엄청난 집적능력에 비해 현재의 전기적 방법으로는 상응하는 통신 대역폭이 이에 미치지 못한다. 광연결은 이러한 문제를 해결할 잠재력을 가지고 있다. 광연결의 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 그 첫째는 “굴절율 도파” 연결도 구현하는 것이다. 또 하나의 방법은 “자유공간” 연결이라고 불리는 것으로 홀로그램 광소자 (HOE)에 의한 “imaging” 연결과 단순한 광의 투사 등을 포함한다. 현

재의 Si을 이용한 전자공학에서 광연결의 응용은 chip 간의 빠른 속도의 통신과 chip 수준에서 일정한 동기 clock의 제공 가능성 등을 들 수 있다.

지난 수년간 많은 집적광학 소자가 광신호처리, 광정보처리, 광계산 등을 위하여 제안되고 구현되었다. 이러한 소자는 아날로그 영역에서 correlation, convolution, Fourier 변환, 스펙트럼 분석, 비선형 함수 생성, 격자여과(lattice filtering), 가중 파장 다중화, 행렬-벡터 곱셈, 행렬 삼각화 등을, 그리고 하이브리드 영역에서 A-D 변환, D-A 변환, 아날로그 convolution에 의한 디지털 곱셈 등을, 디지털 영역에서 Boolean 논리 연산, 2진 덧셈 등을 수행하는 것이다.^[5,10]

최근에 이루어진 주요한 기술 중의 하나가 전자빔에 의해 제작된 마스크와 전자빔 직접 기록에 의한 여러가지 submicron 선폭의 격자의 제작이다. 이러한 격자는 입출력 결합기, 렌즈, 광분할기, 거울, chirped interdigital transducers 등 여러가지 유용한 요소들을 형성하는데 사용된다. 이러한 기술을 이용한 예로 그림 3에 나타낸 광 디스크 pickup 소자를 들 수 있다. 이 소자는 광도파로 평면내에서의 처리기능과 광도파로 평면 밖에서의 처리기능을 결합하였다는 점에서 광처리와 광계산에서 큰 의미를 갖는다. 이 밖에도 집적광학을 이용한 synthetic aperture radar (SAR)processor 등이 있고, GaAs 등 III-V 족 반도체를 이용하여 전기회로와 광학적 처리를 하나의 기판상에서 결합하려는 노력으로 OEIC(optoelectronic integrated circuit)의 연구도 행해지고 있다.^[4]

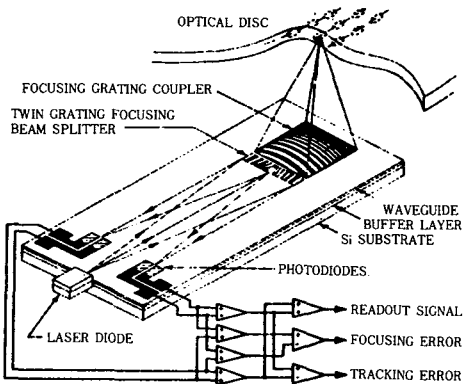


그림 3. 집적광학으로 구현된 광 디스크 pickup 소자

Ⅲ. 광 디지털 계산

광 디지털 계산의 기본적 개념은 기존의 전자회로 컴퓨터의 구조는 그대로 유지하면서 정보의 매개체로서 광자를 사용하는 것이다. 이렇게 할 경우 각 구성소자들의 성능이 크게 향상된다면 속도 및 용량(capacity)면에서 계산능력이 향상된다. 광 디지털 계산의 근간을 이루는 것은 광 쌍안정소자로서 이를 광 디지털 논리 게이트로 사용하여 계산을 수행할 수 있다. 또한 Boolean 논리를 일반화한 알고리즘으로 디지털 입력, 디지털 출력을 사용하며, 내부계산은 아날로그로 하는 threshold logic을 이용하여 광 곱셈-덧셈기를 구현하는 예도 제시된 바 있다. 앞에서 설명한 두 가지 경우 모두 빛의 고유한 성질인 병렬성 및 광연결간의 비간섭성의 장점을 이용한 것으로, threshold logic의 경우는(아날로그 가중치 및 threshold가 충분한 error tolerance가 있으면) 논리 레벨의 수, 소자 수 및 상호연결 수를 상당히 줄일 수 있으므로 특히 바람직하다고 할 수 있다.^[11] 그리고 동기적이고 shift-invariance를 가진 optical cellular processor를 사용하여 Boolean 논리, 2진 연산, cellular 논리를 구현함으로써 광학의 병렬성을 이용하는 또 다른 방법으로서 symbolic substitution도 있다.^[11]

또한 이것과는 좀 다른 구조인 shadow-casting 이나 truth-table look-up 같은 디지털 논리를 광학적으로 구현할 수 있는 방법도 개발되어졌으며, multiple valued logic을 광계산에 이용하는 연구도 행해지고 있다.^[4]

Ⅳ. 광 아날로그 계산

광 아날로그 계산은 불연속적인 디지털 데이터가 아닌 연속된 아날로그 데이터를 다루는 것으로서, 렌즈의 Fourier 변환 성질을 이용하여 빛의 공간상 분포로 표현된 2차원 광정보 또는 데이터를 고속 처리하는데 바탕을 두고 있다.

광 아날로그 계산의 실제적 응용분야로서 먼저 광 상관기(optical correlator)로서 패턴인식 등에 있어서 중요한 도구로서, 미사일의 유도 및 추적 등 군사적 목적으로 응용되고 있다. 광 상관기는 matched filter의 진폭을 단위값으로 고정하고 그 위상정보만을 이용하는 phase-only filter의 개발로 실제 응용 도구로서 많은 사람들의 관심을 받게 되었다. 그림 4에 보인 것은 VanderLugt에 의해 제안된 원래의 광 상관기이며 그림 5에 matched filter와 phase-only filter의 상관

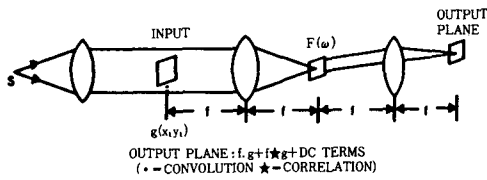


그림 4. VanderLugt에 의해 제안된 광 상관기

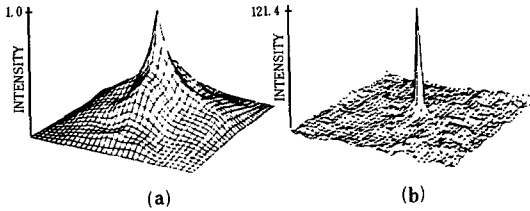


그림 5. (a) Matched filter 및 (b) Phase-only filter의 상관(correlation) peak의 비교

기로서의 특성 비교를 보이고 있다. 여기서 phase-only filter가 더 좋은 peak 특성을 보임을 알 수 있다.^[12] Phase-only filter는 위상정보만을 기록하는 공간 광변조기의 개발로 실시간 영상처리가 가능한 장점을 가지고 있으며, 특히 2진 위상(binary phase)을 이용한 필터는 2진 모드로 동작하는 SLM에의 응용이 용이하고, matched filter보다 디지털 저장공간이 16배 정도 덜 사용될 수 있다는 커다란 이점을 가지고 있다. 따라서 현재 많은 연구 그룹들이 이 새로운 기술을 여러가지 특별한 응용에 이용하기 위한 연구 개발 프로그램을 착수했다.

광 상관기 외에도 광 아날로그 계산의 응용분야로는 compact spectrum analyzer, synthetic aperture radar의 데이터로부터 2차원 map의 회복 등이 있으며, Fourier 변환으로 인한 convolution을 곱셈을 수행하는데 사용한 기술도 있다.^[13]

또한 렌즈의 이러한 성질을 이용하여 선형대수 방정식, 미분방정식의 해를 구할 수도 있으며, 특히 행렬-벡터 및 행렬-행렬 계산의 광구현은 대수 광처리 의 핵심 분야로서, 그 동작에 있어서 광학의 고속 처리면을 고려할 때 중요한 요소인 병렬성을 지니고 있으므로 특히 많은 연구가 이루어지고 있다.^[4]

V. 광 신경회로망

신경회로망은 전기적이든 광학적이든 기존의 정보처리 개념과는 동떨어진 것으로서 새로운 계산 개념을 가지고 있다. 이것은 패턴인식이나 음성인식과 같이 직관적 판단을 하는 뇌의 기능을 모방한 것으로서, 기존의 컴퓨터보다 인간의 인지기능을 더 효율적이고 빠르게 수행할 수 있다.^[11] 이러한 신경회로망을 구현하는 방법 중의 하나로서 광학기술은 신경회로망의 개념과 꼭 들어 맞는다. 왜냐하면 신경회로망의 근본적인 동작의 잇점은 병렬성에 있으며, 병렬성은 빛의 고유한 성질로서 광학기술로써 얼마든지 이용 가능하기 때문이다. 특히 신경회로망에서 소자들간의 아주 많은 밀집된 연결을 구현하는 데 있어서 광학 기술이 더욱 매력적인 기술로 인식되어지고 있다.^[14] 현재 연구되고 있는 광신경회로망은 행렬-벡터 곱셈을 기초로 하고 있으며, 따라서 광 행렬-벡터 곱셈기가 기본구조로 쓰이는 사례가 많다. 광 행렬-벡터 곱셈기를 사용하여 Hopfield 신경회로 모델을 전기광학적으로 구현한 예를 그림 6에 보였다.^[15]

이와는 좀 다른 구조로서, 광홀로그래피가 근본적으로 연상기억과 같은 개념이라는 것이 알려짐으로써, 여러가지 홀로그래픽 광연상 시스템이 제시되었

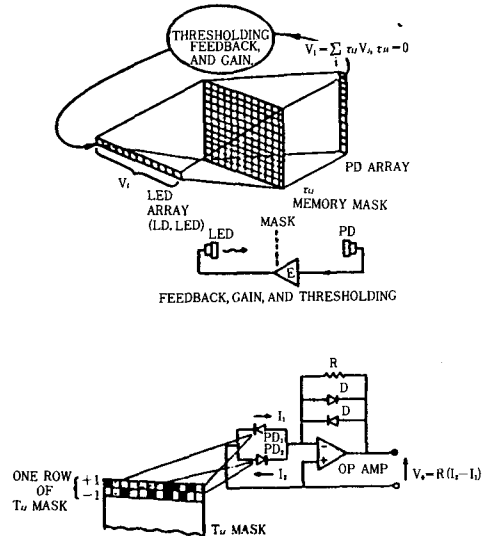



그림 6. 광 행렬-벡터 곱셈기를 이용한 Hopfield 모델의 전기광학적 구현

다. 대표적인 것으로는 한 쌍의 Fourier 변환 홀로그램과 pinhole array로 구성된 VanderLugt 상관기 및 thresholding 소자를 이용한 광연상 기억시스템과 angular multiplexing 홀로그램과 위상공액거울을 이용한 광연상 기억시스템 등이 구현된 바 있고, 홀로그램에 기록된 입력에 의해 결정되는 안정된 여러개의 고유한 모드 패턴을 지니는 홀로그래픽 광공진기를 이용한 광연상 기억시스템도 있다. 또한 기억 저장 능력이 그다지 좋지 못한 평면 홀로그램을 대신하여, 더 많은 기억용량과 동적인 상호연결이 가능한 체적 홀로그램을 이용한 적응 연상 기억시스템의 구현도 연구되고 있다.^[6]

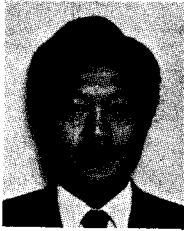
VI. 결 론

앞의 여러 논의에서 설명한 바와 같이 광학기술은 기존의 전자회로 컴퓨터로는 얻기 힘든 여러가지 장점이 있다. 그러나 모든 면에서 광학기술이 전자기술보다 우수하다고는 할 수 없는 실정이다. 그러나 그럼에도 불구하고 광학기술은 고도의 병렬성을 이용한 밀집된 상호연결을 쉽게 구현할 수 있는 점을 비롯하여, 이미 언급한 바와 같이 전자회로에서 찾기 힘든 여러가지 장점으로 인하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 광 신경회로망은 광학기술의 최대 장점인 병렬성을 충분히 이용할 수 있는 분야로 다른 기술보다 실제적인 응용이 더 기대되고 있다. 현재 광학기술은 일차적으로 광기억 장치와 처리기들간을 연결하는 전기신호 데이터 버스를 대신하여 광섬유를 사용하거나 보오드간의 연결등 주로 상호연결에 중점을 두고 있으나, 앞으로의 실제적 응용에 기대되는 컴퓨터는 기존 컴퓨터의 전기적 스위치는 논리회로를 담당하고 광학이 강점을 갖는 부분적 계산기능은 광 정보처리가 담당하는 형태의 hybrid 컴퓨터 개발이 중심이 될 것으로 보인다.^[7] 또한 특수한 목적에 응용되는 처리기는 모두 광학적으로 구현함으로써 에너지 효율면에서 더욱 바람직한 all-optical computing의 연구가 활발할 것으로 보인다.

參 考 文 獻

- [1] W.T. Cathey, K. Wagner, and W.J. Miceli, *Proc. IEEE*, vol. 77, no. 10, pp. 1558-1572, Oct. 1989.
- [2] T. Fujiwara, *Laser Focus World*, vol. 25, no. 11, pp. 109-116, Nov. 1989.
- [3] J. Lindmayer, P. Goldsmith, and C. Wrigley, *Laser Focus World*, vol. 25, no. 11, pp. 119-127, Nov. 1989.
- [4] *Optical Computing: The Next Frontier in Computing*, vol. I, Technical Insights, Inc., Fort Lee, NJ, 1986.
- [5] A.R. Tanguay, Jr., *Optics News*, vol. 14, no. 2, pp. 23-26, Feb. 1988.
- [6] R.A. Rice, W. Li, and G. Moddel, *Technical Digest of Optical Computing*, Salt Lake City, Utah, Feb. 27-Mar. 1, 1989, Paper MF1.
- [7] C.Y. Ozberkmens, *Optics News*, vol. 15, no. 10, p. 30, Oct. 1989.
- [8] P. Gunter, *Photorefractive Materials and Their Applications*, Springer-Verlag, 1989.
- [9] H.J. Caulfield, *Computers in Physics*, vol. 2, no. 2, Mar./Apr. 1988.
- [10] T.E. Batchman, and E.A. Parrish, Jr. ed., *Computer*, vol. 20, no. 12, Dec. 1987.
- [11] *Optics News*, vol. 12, no. 4, pp. 5-28, Apr. 1986.
- [12] H.J. Caulfield, *Photonics Spectra*, pp. 117-121, Dec. 1987.
- [13] *IEEE Spectrum*, vol. 25, no. 3, pp. 36-41, Mar. 1988.
- [14] *IEEE Spectrum*, vol. 23, no. 8, pp. 34-57, Aug. 1986.
- [15] 신상영, 이수영, 장주석, 전기학회지, vol. 38, no. 2, pp. 53-65, Feb. 1989.
- [16] 김은수, 컴퓨터기술, vol. 6, no. 1, pp. 77-85, June 1989. 

筆者紹介



申 相 永

1946年 9月 14日生

1968年 2月 서울대학교 전기공학과 졸업

1971年 9月~1975年 8月 Polytechnic Institute of New York 연구조교,
M. S. 및 Ph. D.

1975年 8月~1978年 1月 Polytechnic Institute of New York 연구원

1978年 2月~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수

주관심분야 : 파동의 전파 및 산란, 광통신, 광 정보처리 등

*** 전자공학회지 제16권 제 6 호 (1989. 12.) 의
'우리나라 유선방송의 실태와 국내 CATV 업계 환경 개선 방안' 기술해설 내용중 p. 78의
일부 내용을 다음과 같이 정정합니다.**

CATV에 공급되는 프로그램은 기존방송보다 독특하고 매력적인 프로그램이 편성되어야만 추가적인 경제적 부담에도 불구하고 현재의 가입자를 계속 확보하고, 신규가입자를 늘릴 수 있게 된다. 그런데 우리나라의 프로그램 제작현황을 살펴보면 질은 어떻든 간에 프로그램의 절대수 마저 부족한 형편이다. CATV에 프로그램을 제공할 수 있는 기존 영화산업이 부진할 뿐 아니라 방송용 프로그램을 전문으로 제작하는 독립프로덕션 제도도 아직 초보적인 단계에 있다. 따라서 CATV 망이 더욱 확장되고 본격적인 종합유선방송이 도입될 경우 채널의 전문화는 이루어지겠지만 이 채널들을 채워줄 전문화된 프로그램의 확보가 상당히 어렵게 될 것이다. 그렇게 되면 프로그램의 부족을 해결하기 위해 손쉬운 외국 프로그램의 도입이 불가피해질 것이며, 이는 바로 문화적 종속현상을 초래하게 될 것이다. 따라서 현재 비디오

프로덕션, 영화산업등과 같은 국내의 프로그램 공급 체계가 아직 경제적 측면에서 취약한 형편이므로 종합유선방송이 도입되면 양질의 전문화된 프로그램을 지속적으로 제공하기가 어렵게 될 것이다. 따라서 종합유선방송의 도입과 더불어 프로그램의 제작과 공급분야에 대한 대책이 시급히 강구되어야 한다.

V. 결 론

CATV 사업은 전후방 파급효과가 크고 국민의 다양한 정보수요에 대한 욕구가 더욱 증대될 것이며 사회생활 구조의 급격한 변화로 주거환경이 밀집화, 고층화 되어감에 따라 기존 지상방송과의 직접 수신은 점점 어려워지고 있다. 따라서 CATV 사업을 원활하게 추진시키기 위해서는 케이블의 건설 및 소유, 유선방송시설을 운영하는 사업, 프로그램을 가입자에게 서비스하는 방송사업, 각종 프로그램을 제작,