

광전측광용 직류증폭기의 제작 및 실험에 관하여

강 용 희

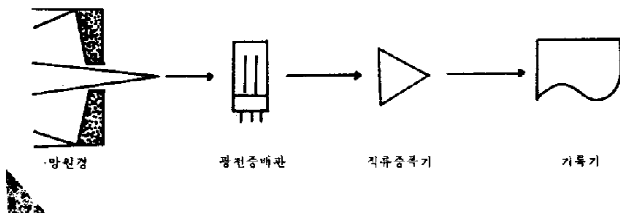
국 립 천 문 대

1. 서 론

천체의 관측방법을 일반적으로 다음의 3가지로 구분할 수 있다. 즉 천체의 1. 측성학적 (photographic) 2. 측광학적 (photometric) 3. 분광학적 (spectroscopic) 연구로 나눌 수 있다.

현재 국립천문대가 보유하고 있는 61cm 망원경으로는 위의 방법 중 1 및 2에 의한 관측이 가능하나 그중에서도 가장 경제적이면서도 우리의 독창적인 연구를 할 수 있는 분야가 천체의 측광학적 연구이다.

이에 필요한 장비 (광전측광기, photoelectric photometer)로는 망원경을 통하여 들어오는 빛을 전류로 전환시키는 광전증배관 (photomultiplier tube) 과 그 전류를 증폭하는 직류증폭기 (DC Amplifier) 및 이를 기록하는 기록기 (pen recorder, printer) 등이 필요하다.



위의 장비 중 직류증폭기의 경우 상품화된 제품은 거의 없고 각관측소마다 망원경의 성능 및 기타 관측조건에 알맞게 자체에서 제작, 사용하기 때문에 본인이 일본 동경천문대에 체재중 설계, 제작한 광전측광용 직류 증폭기를 소개하고자 한다.

2. 직류증폭기의 설계

2-1 증폭기의 종류

별빛은 광전증배관을 통하여 수백만배 증폭된 전류로 바뀌긴 하지만 워낙 약한 빛이기 때문에 0 등성의 경우라도 5×10^{-8} 암페어, 10 등성의 경우 5×10^{-9} 암페어 (61cm 망원경의 경우)에 지나지 않는 약한 전류이므로 이 전류를 기록하기에 알맞는 전류 또는 전압으로 증폭할 필요가 있다.

증폭기의 종류에는 1. 광전계수기 방식 (photon counter) 2. 직류증폭기 방식 3. 직류증폭기 및 전압/주파수 변환기의 절충 방법을 들 수 있다.

광전계수기 방식은 미세한 전류를 시간정수 (time constant)가 매우 작은 증폭장치를 써서 증폭시킴으로써 입력신호를 펄스 (pulse)화 하여 그 펄스를 계수화하는 방법으로, 매우 미약한 별빛의 강도를 측정하기에 알맞는 기재이다. 그러나 별빛의 강도가 클 때는 포화 (saturation) 효과가 나타나기 때문에 ND 필터 또는 beam splitter 등을 사용하여 별빛의 강도를 줄여야 하는 불편한 점이 있다. 즉, 이 방법은 매우 복잡한 광학시스템을 요구하며 어려운 캐리브레이션 작업을 거쳐야 하기 때문에 불편한 점이 있지만 narrow band photometry라든가 편광측광을 위하여는 갖추어져야 할 장비이다.

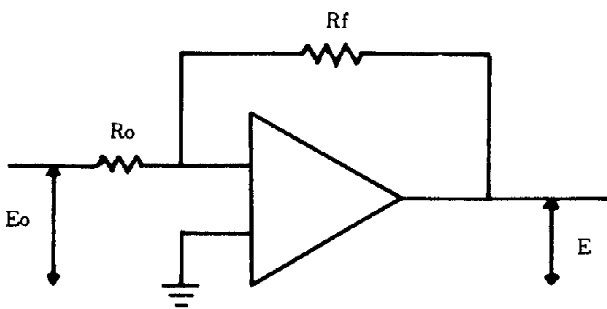
직류증폭기는 현재 대부분의 천문대에서 사용하는 것으로 미세전류를 기록하기에 알맞는 수 $\frac{1}{10}$ ~ 수볼트로 증폭하는 기재이다, 과거에는 진공관을 사용하였기 때문에 상당히 큰 drift가 있었으나 현재에는 양질의 operational amplifier (op amp.)가 등장하여 drift가 거의 없고 직선성도

양호하여 졌으며 가격면에서도 상당히 합리화되어 있다.

금번 제작한 시스템은 직류증폭기 및 전압/주파수 변환기(V/F converter)를 절충 사용한 방법으로, 직류증폭기를 통하여 나온 전압은 전압/주파수 변환기에 의하여 그에 해당하는 펄스로 바뀌어 이것을 계수함으로써 전압의 계수식(digital) 측정이 가능하며 또한 차트레코더에 전압으로도 기록할 수 있기 때문에 결과를 계수 및 아나로그방식으로 동시에 기록할 수 있다는 이점이 있다.

2-2 증폭기의 설계

직류증폭기로 사용된 Op. Amp. 는 일본 Aikoh 전기의 2F/4539(D)를 사용하였는데 이는 일종의 전류/전압 변환기라고 할 수 있다.



즉 일반적으로 Op. Amp. 의 경우 최초의 전위차 E_o 는 OP Amp. 를 통과하여

$$E = \frac{E_o}{R_o} R_f$$

로 바뀌어지기 때문에 광전관으로부터 입력되는 전류 i_o 는

$$i_o = \frac{E_o}{R_o}$$

라고 표현하면 이 전류는 Op. Amp. 를 통과함으로써

$$E = i_o \cdot R_f$$

에 해당하는 전압으로 바뀌어 지게 된다. 따라서 알맞는 저항 R_f 를 선택하여 사용함으로써 증폭도(gain)에 변화를 줄 수 있기 때문에 별빛의 강도에 따라 폭넓게 관측할 수 있게 된다.

Op. Amp. 2F/4539(D)의 경우 온도 drift는 최대저항치 $2 \times 10^9 \Omega$ 을 사용한 경우 일지라도 수 mV에 지나지 않기 때문에 그 안정성 및 직선성이 매우 양호한 Op. Amp. 이다.

소백산 천체관측소의 61cm 망원경의 경우 sky background의 밝기가 10^{-11} 암페어라고 예상할 때 (1P21 광전관, diaphragm 0.5mm, V filter 사용) 최대 12~13등성의 관측이 가능하게 되며, 이에 알맞는 증폭도를 갖기 위하여 저항치를 최대 $2 G\Omega$ 을 사용하였고 각 단계마다 0.5등성의 차이를 갖도록 23개의 저항치를 택하여 직류증폭기를 제작하였다(그림 1 참조). 또한 저항의 오차에 의한 offset 및 온도 drift를 최대한 줄이기 위하여 저항오차(tolerance) 0.1~0.5%, 온도특성 100PPM/°C 이하의 특수저항을 주문, 제작(일본小野化工)하여 사용하였다.

2-3 전압/주파수 변환기

천체의 측광은 그 결과를 분석하는데 상당한 시간이 소요된다. 즉 과거에는 측정 결과가 차트레코더방식으로 나왔기 때문에 이를 분석하는데 수 주 또는 수개월의 시간이 걸리는 것이 보통이었다. 그러나 현재는 V/F(전압/주파수) 변환기를 이용하여 측정결과를 계수방식으로 표시하고 그것을 직접 컴퓨터에 연결하여 환산함으로써 그 자리에서 결과를 알아보고 관측의 유효성을 판단케 됨으로써 시간의 절약은 물론, 다량의 관측이 가능케 되었다. V/F변환기는 위와 같은 이점이 있는 반면 그 자체의 특성으로서 비직선성(nonlinearity)이 나타나는 결점도 갖고 있다. 본 설계에서는 이와같은 비직선성을 줄이기 위하여 0.1~10V의 범위에서 0.1% 이하의 비직선성을 갖는 V/F변환기로 일본 Aikoh 전기의 VF/560(D)를 택하였다. (spec. 참조) 이 V/F 변환기는 10V 이하의 전압을 펄스로 변환시키는 작용을 하며 10V에서 1MHz의 펄스를 발생시킨다. 이렇게 발생된 펄스는 계수기(counter)를 통하여 계수되며, 또한 계수기의 gate time의 조절에 의하여 계수결과의 적분이 가능하기 때문에 대기 및 광전관의 불안정에 의하여 발생하는 각종 관측오차를 최대한 줄일 수 있게 된다.

2-4 증폭도(gain)의 표시

2-2 절에서 언급하였듯이 별빛은 그 밝기에 따라 증폭도를 조절하여 측정하게 되는데, 관측 효과를 극대화하기 위하여 증폭의 단계를 계수화

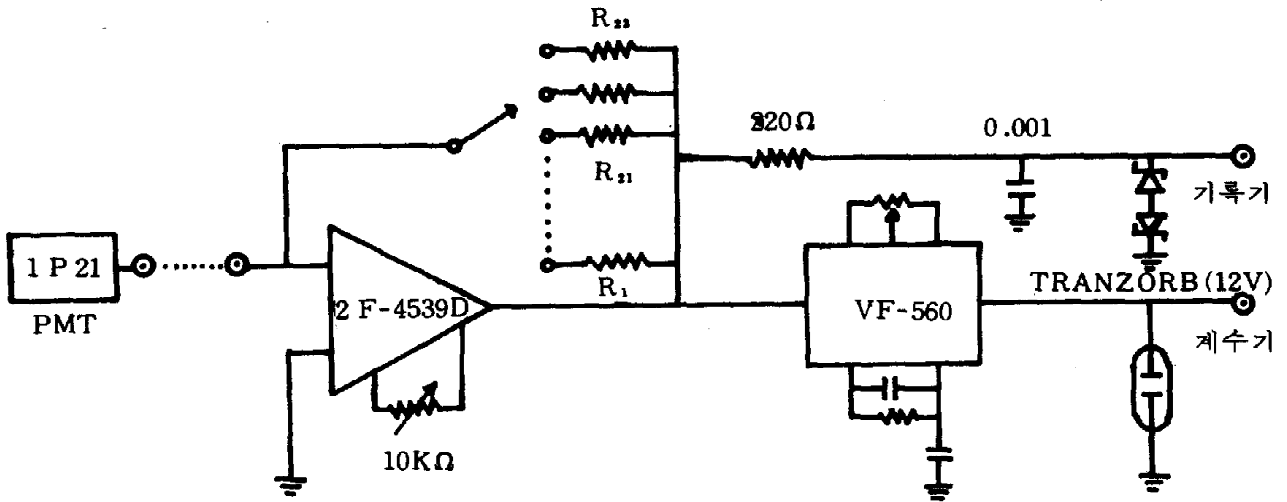


그림 1. OP Amp. 및 V/F 변환기를 사용한 직류 증폭기의 회로

저항* : 0.5% 저항측 허용오차, 온도계수 100PPM/°C 이하 사용

R_{11} : 2 GΩ	R_{13} : 50.24MΩ	R_7 : 1.262MΩ
R_{22} : 1262MΩ	R_{14} : 31.70	R_8 : 796.2KΩ
R_{21} : 796.2	R_{15} : 20.00	R_9 : 502.4
R_{10} : 502.4	R_{16} : 12.62	R_4 : 317.0
R_{20} : 317.0	R_{17} : 7.962	R_5 : 200.0
R_{21} : 200.0	R_{18} : 5.024	R_6 : 126.2
R_{17} : 126.2	R_9 : 3.170	R_1 : 79.62
R_{24} : 79.62	R_8 : 2.000	

*각 단계별로 0.5등급의 차이를 갖도록 저항치 선정

하여 표시하는 것이 필요하다. 이를 위하여 증폭도를 조절하는 로터리스위치를 4 단방식으로 채택하여, 2 단은 증폭도 조절을 위한 저항기 부착에 사용하였고 나머지 2 단은 각각 TTL과 연결하여 증폭도의 계수방식의 표시가 가능케 하였으며, 그 결과를 LED로 표시하고 동시에 Printer로 output 되도록 하였다. (그림 2 참조)

3. 직류증폭기의 실험

3 - 1 증폭도 (gain)비율 실험

직류증폭기의 사용 및 그 결과의 분석이 용이하도록 증폭기의 각 단계별 차이가 1.5849배 즉 등급으로 0.5등이 되도록 저항치를 선정하여 제작하였으나, 저항치의 제작상의 오차 및 온도변화, 전압변동 등에 따른 offset으로 인하여 증폭비율

에 약간의 차이가 나타난다. 증폭비율의 측정 결과는 표 1에 표시하였고, 각 단계별 평균 비율은 0.499 ± 0.003 등급으로 나타났다.

이 결과는 일반적인 천체측광의 경우 0.01 등급의 오차를 갖는다는 점을 고려하면, 단계별 증폭비율을 0.5등으로 보아도 크게 문제시 되지 않는다고 볼 수 있다.

위의 측정은 일본 東京天文台의 표준전압발생기(SVG)와 0.1% 이하의 저항오차를 갖는 1MΩ 및 100MΩ의 저항을 사용하여 측정된 결과이다.

3 - 2 증폭기의 직선성 실험

금번 제작한 증폭기의 V/F 변환기의 경우 제품설계상 0.1%의 비직선성을 갖고 있으나, 이러한 증폭기의 비직선성이 관측에 상당히 큰 오차를 초래하기 때문에 중요시 되고 있다.

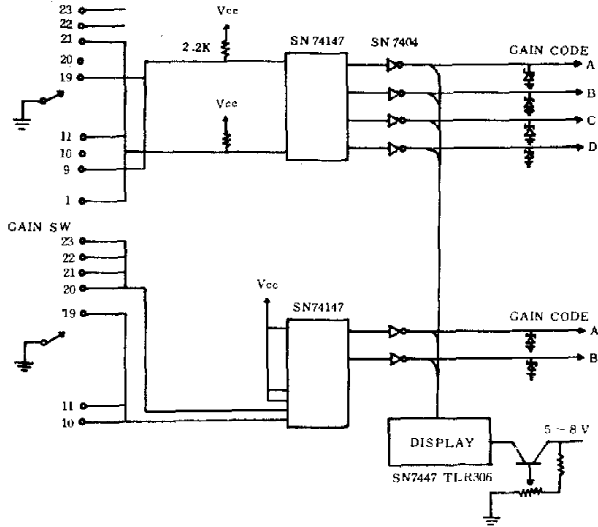


그림 2. 증폭도의 표시회로

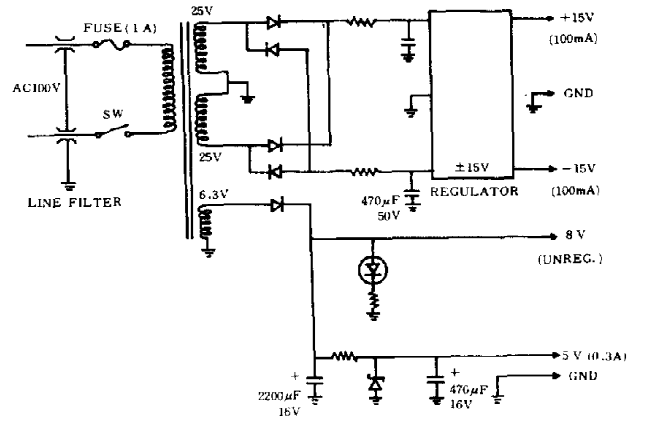


그림 3. POWER SUPPLY

표 1. 증폭비율실험

RATIO	1 회	2 회	3 회	MEAN	SD	MAG.
2/1	1.5876	1.5778	1.5763	1.5806	0.0050	0.4970 ± 0.0035
3/2	1.5868	1.5862	1.5845	1.5858	0.0010	0.5006 ± 0.0007
4/3	1.5887	1.5874	1.5882	1.5881	0.0005	0.5022 ± 0.0003
5/4	1.5853	1.5850	1.5846	1.5850	0.0003	0.5001 ± 0.0002
6/5	1.5786	1.5770	1.5766	1.5774	0.0009	0.4949 ± 0.0005
7/6	1.5863	1.5841	1.5849	1.5851	0.0009	0.5001 ± 0.0007
8/7	1.5893	1.5863	1.5859	1.5872	0.0015	0.5016 ± 0.0010
9/8	1.5784	1.5803	1.5804	1.5797	0.0009	0.4964 ± 0.0006
10/9	1.5842	1.5862	1.5863	1.5856	0.0010	0.5005 ± 0.0007
11/10	1.5897	1.5890	1.5887	1.5891	0.0003	0.5029 ± 0.0002
12/11	1.5761	1.5720	1.5721	1.5734	0.0019	0.4921 ± 0.0013
13/12	1.5871	1.5876	1.5869	1.5872	0.0003	0.5016 ± 0.0001
14/13	1.5856	1.5867	1.5868	1.5864	0.0005	0.5010 ± 0.0004
15/14	1.5820	1.5813	1.583	1.5815	0.0003	0.4977 ± 0.0002
16/15	1.5845	1.5844	1.5829	1.5839	0.0007	0.4993 ± 0.0005
17/16	1.5805	1.5796	1.5802	1.5801	0.0004	0.4967 ± 0.0003
18/17	1.5893	1.5874	1.5876	1.5881	0.0009	0.5022 ± 0.0006
19/18	1.5829	1.5779	1.5791	1.5800	0.0021	0.4966 ± 0.0015
20/19	1.5792	1.5829	1.5829	1.5817	0.0017	0.4978 ± 0.0012
21/20	1.5879	1.5902	1.5875	1.5885	0.0012	0.5025 ± 0.0008
22/21	1.5789	1.5791	1.5797	1.5792	0.0003	0.4961 ± 0.0002
23/22	1.5768	1.5752	1.5782	1.5767	0.0012	0.4944 ± 0.0008

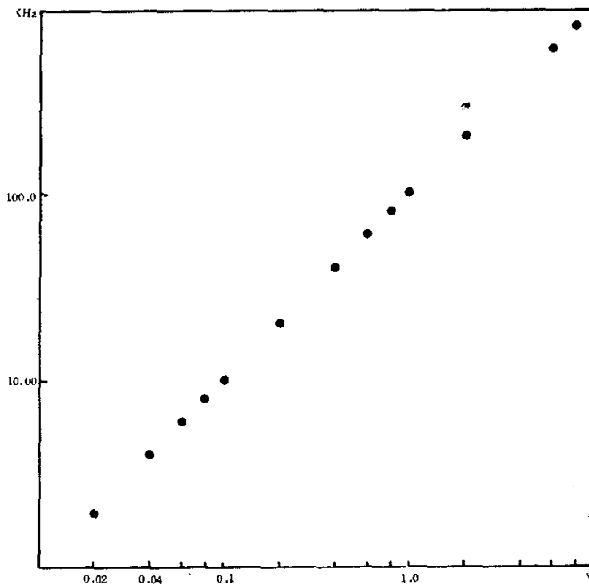


그림 4. 직선성 실험 (GAIN 13)

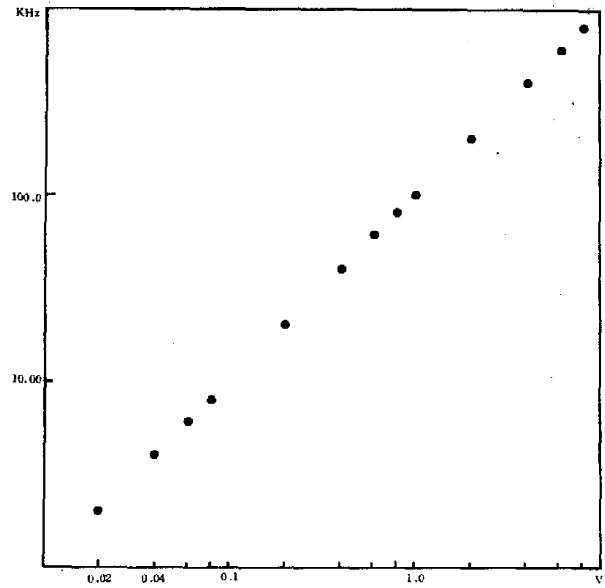


그림 5. 직선성 실험 (GAIN 23)

표 2. 직선성 실험 (증폭도 13, $1V = 5 \times 10^{-8} A$)

I INPUT	1 회 (KHz)	2 회 (KHz)	3 회 (KHz)	MEAN	SD
0.02	2.173	2.010	2.031	2.071	0.017
0.04	4.201	4.038	4.061	4.100	0.072
0.06	6.208	6.120	6.112	6.147	0.043
0.08	8.318	8.163	8.174	8.218	0.071
0.10	10.358	10.226	10.193	10.259	0.071
0.12	12.399	12.278	12.218	12.298	0.075
0.14	14.499	14.354	14.329	14.394	0.075
0.16	16.142	16.412	16.442	16.332	0.135
0.18	18.452	18.497	18.440	18.463	0.025
0.20	20.456	20.550	20.498	20.501	0.038
0.40	41.235	41.169	41.132	41.184	0.049
0.60	61.765	61.801	61.763	61.779	0.022
0.80	82.414	88.424	82.424	82.421	0.005
1.00	103.112	103.111	103.192	103.138	0.038
2.00	206.262	206.268	206.392	206.307	0.060
3.00	309.367	309.417	309.371	309.400	0.023
4.00	412.287	412.578	413.215	412.393	0.137
5.00	515.149	515.209	512.803	515.187	0.027
6.00	617.677	617.841	618.440	617.777	0.072
7.00	719.537	720.129	724.016	720.087	0.366
8.00	820.688	821.769	822.024	821.494	0.579
9.00	911.053	923.548	923.271	922.624	1.117

표 3. 직선성 실험 (증폭도 23, $1V = 5 \times 10^{-10} A$)

INPUT	1회(KHz)	2회	3회	MEAN	SD
0.02	1.970	2.000	1.974	1.960	0.039
0.04	4.033	4.115	4.059	4.069	0.034
0.06	6.084	6.054	6.049	6.062	0.015
0.08	8.126	8.137	8.048	8.104	0.040
0.10	10.168	10.181	10.093	10.147	0.039
0.12	12.267	12.241	12.107	12.205	0.070
0.14	14.471	14.280	14.247	14.333	0.099
0.16	16.542	16.362	16.267	16.390	0.114
0.18	18.597	18.342	18.343	18.427	0.120
0.20	20.549	20.432	20.339	20.439	0.085
0.40	41.192	41.030	40.965	41.062	0.095
0.60	61.875	61.509	61.618	61.667	0.153
0.80	82.548	82.252	82.220	82.278	0.060
1.00	103.361	102.903	102.886	103.050	0.220
2.00	206.159	206.062	205.710	206.160	0.413
3.00	310.159	309.001	308.418	309.193	0.721
4.00	413.239	411.471	411.347	412.019	0.864
5.00	516.418	514.131	513.959	514.836	1.121
6.00	618.941	616.572	616.343	617.285	1.174
7.00	720.914	718.954	718.316	719.395	1.105
8.00	822.078	820.610	819.077	820.588	1.225
9.00	923.608	921.842	920.189	921.880	1.396

표 4. 비직선성 실험

Input Voltage	Error From Linearity (%)	
	gain step 23	gain step 13
0.1 V	1.3961	0.3639
0.2	0.6711	0.4487
0.4	0.2111	- 0.0061
0.6	0.0878	- 0.0111
0.8	0.0186	- 0.0723
1.0	- 0.1839	- 0.1841
2.0	- 0.2139	- 0.1996
3.0	- 0.1982	- 0.1794
4.0	- 0.1386	- 0.1444
5.0	- 0.1011	- 0.0835
6.0	- 0.0147	- 0.0089
7.0	0.0954	0.0929
8.0	0.2926	0.2671
9.0	0.4350	0.4401

V/F 변환기의 직선성실험은 표준전압 발생기를 사용하여 0.01 volt대와 0.1 volt대 및 1 volt대의 전압(주파수)을 각각 3회 측정하여 실시하였다. 또한 증폭도(gain) 별 직선성이 다른 것을 예상하여 gain 13과 gain 23에 대하여 위의 측정을 각각 실시하였다(표 2, 3). 그 결과 0.1 volt 이하에서는 1%대의 비직선성을 나타내고 있으나 0.1 volt 이상의 경우 0.5% 이하의 비직선성을 보여주는 것으로 나타났다(표 4). 또한 증폭도(gain) 별 V/F 직선의 기울기의 차이는 0.001로서 거의 무시될 정도의 차이를 보여 주었다.

실제 천체측광의 경우 빛의 밝기는 절대측정이 아닌 상대측정을 실시하게 되므로 위의 비직선성에 의한 오차는 더욱 축소될 것으로 예상된다.

그림 4와 5는 증폭도 13과 23의 경우의 입력 전압별 출력주파수를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 0.1 volt 이상의 경우에는 직선성이 거의 완벽한 것으로 나타났다.

본 실험의 결과 비직선성의 효과를 최대한으로 줄이기 위하여 5 volt 전 후, 즉 500KHz 전 후의 출력에서 천체를 측광하는 것이 효율적이라는 것을 알 수 있다(표 4 참조). 따라서 앞으로 사용할 기록장치(chart recorder)는 최대 10 volt를 기록할 수 있는 것으로 counter(계수기)는 최대 1 MHz를 계수할 수 있는 것을 택하는 것이 요청되며 실제의 측정은 5 volt (500KHz) 전후에서 행할 것을 제안한다.

4. 결론 및 제안

국립천문대 소백산천체관측소가 보유하고 있는

61cm 반사망원경에 부착 사용될 광전측광용 직류증폭기를 제작하였는바 그 성능을 요약하면 다음과 같다.

1. 증폭기의 종류 : Op. Amp. 및 V/F 변환기를 사용한 직류 증폭기
2. 증폭도의 단계 : 23단계, 단계별 증폭비율 0.499 ± 0.003 등급
3. output (1) 직류전압 : 0 ~ +10V
(2) TTL LEVEL PULSE : 0Hz ~ 1 MHz
4. V/F 변환기의 직선성의 정도
(1) 0.5~10V : 0.5% 이하
(2) 0.5V 이하 : 1% 내외
5. 저항치의 온도드리프트 : $\pm 0.5\text{PA}$ (25°C에서)

위의 성능시험에 의하여 금번 제작한 직류증폭기를 사용하여 0.01등급 이하의 정도로 천체의 측광 연구를 행할 수 있다는 것을 알 수 있다.

끝으로 덧붙여 둘 것은, 천문기기 등 고도의 정밀성을 요구하는 과학실험기기는 우리의 경우 각종 정밀전자부품 등의 국내생산이 거의 없는 실정이기 때문에 국내 제작이 거의 불가능한 것이 현실로서, 앞으로 자연과학 제분야의 발전을 예상할 때 국내업체에서도 과학기기 분야에 특히 힘을 써주어야 할 것으로 생각한다.

금번 증폭기의 설계 및 제작에 도움을 준 東京天文台의 土屋 淳조교수와 三上 씨 및 東京天文台 堂平觀測所 직원 여러분께 감사드립니다.