

## Wide-bandwidth SQUID Current Amplifier and Control Electronics for X-ray Microcalorimeter

Jin-Mok Kim\*, Yong-Ho Lee, Hyukchan Kwon, Kiwoong Kim and Yong-Ki Park

*Biomagnetism Research Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea*

Received 29 August 2003

### X-선 미소열량계 신호 검출을 위한 광대역 SQUID 전류증폭기와 조절 회로

김진목\*, 이용호, 권혁찬, 김기웅, 박용기

#### Abstract

Wide-bandwidth SQUID current amplifier and its control electronics have been constructed for detecting pulse outputs of a superconducting microcalorimeter. The current amplifier made of a double relaxation oscillation SQUID (DROS) has a bandwidth of 1.2 MHz and typical white noise level of about  $6 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ . To increase the dynamic range of the current amplifier, the flux-locked loop (FLL) has additional circuits to reset the integrator and to count reset numbers which present the number of passed flux quanta. In this system, dynamic range covers from  $-65 \text{ mA}$  to  $+65 \text{ mA}$ . SQUID electronics are controlled by software to get the optimum FLL condition, and to control the current to bias the transition edge sensor (TES). The electronics are shielded from the outside electromagnetic noises by using an aluminum case of  $66 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , and consist of 2 separate printed-circuit-boards for the current amplifier and the control electronics, respectively. The SQUID current amplifier and its control electronics will be used in TESs for detecting photons such as UV and X-ray with high energy resolution.

*Keywords* : SQUID, SQUID current amplifier, flux-locked loop, superconducting microcalorimeter, TES

#### I. 서론

높은 에너지 분해능을 갖는 미소열량계 (microcalorimeter)나 초전도 터널접합(superconducting tunnel junction, STJ)검출기와 같은 초전도 입자 검출기는 물질의 성분분석이나 X-선(X-ray) 천문학 등에 널리 응용되고 있으며,

검출기의 출력을 정밀하게 측정하기 위한 전류 증폭기가 활발히 연구되고 있다 [1,2].

미소열량계는 온도 변화에 따라 저항을 측정하며 특히 초전도 transition-edge sensor (TES)는 초전도 전이온도에서 매우 급격한 저항-온도 변화 특성을 가지므로 온도변화에 따른 저항 변화를 정밀하게 측정할 수 있다. TES는 전압 인가방식에서 전류 변화가 1 ms보다 작은 펄스 신호를 발생시키므로 이를 측정하기 위해 슬로우(slew rate)이 높은 초전도양자간섭장치

\*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5237  
e-mail : jmkim@kriss.re.kr

(superconducting quantum interference device, SQUID)를 이용한 전류증폭기가 필요하고 TES 신호를 충분히 증폭하기 위해 대역폭 1 MHz 이상, 전류 잡음  $10 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  이하의 특성을 요구한다[3]. SQUID 전류증폭기의 동적 특성은 SQUID가 갖는 자속-전압 전달 계수와 변조신호의 크기가 중요하게 작용하므로 일반 SQUID보다 약 10 배 정도 큰 Double Relaxation Oscillation SQUIDs (DROS)를 선택하면 신호 검출과 증폭 회로를 간단히 제작할 수 있는 장점이 있다[4,5]. X-선 검출을 위한 미소열량계는 에너지를 가지는 광자의 유입에 따라 온도나 저항 변화를 일으키는 TES, TES에서 나타난 온도나 저항 변화를 전류로 전환하기 위한 정전압공급원, 미세한 전류변화를 검출하는 전류증폭기 등으로 구성되고 전류 증폭기 출력은 신호처리를 거쳐 에너지 분포로 표시한다. 본 논문에서는 X-선 미소열량계에서 중요한 요소인 정전압공급원과, SQUID 전류 증폭기를 설계 제작하고 특성을 알아보았다.

## II. 설계와 제작

TES를 정전압  $V_b$ 에 연결하여 동작시킬 경우 외부에서 입자나 광자가 TES에 들어와 TES가 평형 상태 온도  $T_0$ 에서  $T$ 로 증가할 때 저항  $R$ 이 증가하며 이때 TES의 전력  $P_b = V_b^2/R$ 과 TES에 흐르는 전류는 급격히 감소한다. 한편 TES는 온도 싱크에 의해 온도  $T_0$ 로 되돌아가고 전력도 원래의 평형상태로 돌아가게 되어 TES는 열에너지에 순간적으로 반응하지만 다시 원래의 상태로 복귀하는 되먹임 작용을 한다. 이런 electrothermal feedback에서 TES의 전류 바뀜을 측정하면 TES로 들어온 광자 에너지를 측정할 수 있다.

초전도 TES는 열적 시간 상수  $\tau (= C/G)$ 가  $10 - 100 \mu\text{s}$ , 전류 반응도가  $10 \mu\text{A}/(10-100 \mu\text{s})$ 을 가지므로 전류 변화를 검출하는 SQUID 전류 증폭기의 측정 감도는 대역폭 약 1 MHz, 슬루율  $0.1 - 1 \text{ A/s}$ 를 요구한다. 여기서  $C$ 는 TES 장치의 비열,  $G$ 는 TES와 heatsink 사이의 thermal conductance이다. TES는 펄스 높이에 따른 X-선 에너지가  $1 \text{ keV}/\mu\text{A}$ 으로  $5 \text{ eV}$ 의 에너지 분해능

을 가지기 위해,  $5 \text{ nA}$  전류 감도를 갖거나 전류 잡음으로  $5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  보다 작은 값을 갖는다. 그러므로 TES를 움직이는 정전압원은 이보다 작은 잡음을 가져야 한다.

### A. TES 정전압 회로

TES에 필요한 바이어스 전압은 수  $\mu\text{V}$ 이며 이를 연산증폭기나 트랜지스터 같은 전자 소자로 직접 회로를 구성할 경우 잡음이 커서 부적합하기 때문에, TES에 전압 바이어스를 효과적으로 유지하기 위해 전류와 shunt 저항을 써서 필요한 전압을 생성한다. 입력전압잡음  $3.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} @ 10 \text{ Hz}$  또는  $90 \text{ nV}_{\text{pp}} @ 0.1 - 10 \text{ Hz}$  과 입력전류잡음  $1.7 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}} @ 10 \text{ Hz}$  을 갖는 연산증폭기 OP227을 써서 안정된 전류를 만들고, shunt 저항  $10 \text{ m}\Omega$ 에 전류를 흘려 전압을 만든다. Shunt 저항은  $4.2 \text{ K}$  이하 저온에서 동작하여 잡음을 억제하며 발생하는 잡음은 거의 무시된다. OP227로 구성된 전류발생 회로는  $10 \text{ k}\Omega$ 으로 연결된 차동증폭기와 되먹임 회로로 구성되며 입력전압  $V_{\text{in}}$ 가  $2.5 \text{ V}$ 까지 움직일 때 출력 저항  $25 \text{ k}\Omega$ 에서 최대  $1 \text{ mA}$ 까지 전류가

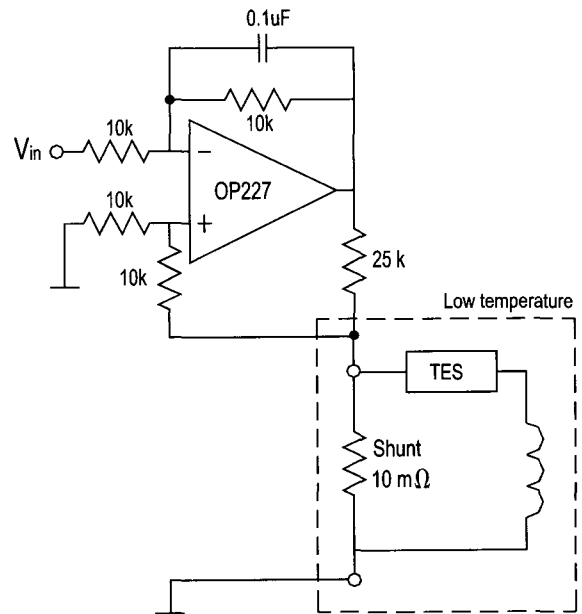


Fig. 1. Current source using OP227 to generate the constant voltage supply for TES.

흐른다. OP227의 입력전압잡음은 저항 10 kΩ과 10 mΩ으로 나누어져 10 mΩ에서 0.1 pV<sub>p-p</sub>@ 0.1 - 10 Hz으로 나타나며 입력전류잡음의 영향에 따른 영향은 1.7 pA@ 10 Hz를 가지며 전압으로 표시하면 17 fV/√Hz @ 10 Hz로 무시될 정도이다. 한편 OP227의 출력에서 발생하는 잡음은 저항 25 kΩ과 10 mΩ으로 나누어져 10 mΩ에서 0.04 pV<sub>p-p</sub>@ 0.1 - 10 Hz로 나타난다. 그러므로 10 mΩ에서 발생하는 전압잡음은 모두 0.13 pV<sub>p-p</sub>@ 0.1 - 10 Hz로, TES 저항이 100 mΩ일 때 전류잡음은 1.3 pA<sub>p-p</sub>@ 0.1 - 10 Hz 또는 50 fA/√Hz @ 10 Hz로 나타나므로 본 전류 공급회로로 충분히 TES를 동작할 수 있다. Fig. 1에서 전압공급회로를 보이고 있으며 shunt 저항 10 mΩ, TES, 자속 생성 코일은 저온에서 동작한다.

### B. DROS 전류 증폭기

TES에 흐르는 전류를 검출하는 전류증폭기는 DROS와 이를 구동하는 FLL 회로로 구성된다. DROS는 히스테릭 dc SQUID(신호 스쿼드), 이력 접합(기준 접합), 그리고 코일과 저항이 서로 연결되어 구성된다[4]. 전류증폭을 위한 DROS의 간단한 회로를 Fig. 2에서 보이고 있으며 DROS 센서의 특성은 Table 1에서 나타냈다[5].

TES 전류신호는 직접 입력코일로 흐르게 하여 신호를 측정하나, 입력코일에 미분계 픽업 코일을 연결하고 외부 자장을 인가하여 DROS가 반응하게 하여 특성을 측정하였다. DROS는 유리섬유로 만들어진 헬륨 듀어에 넣어 4.2 K

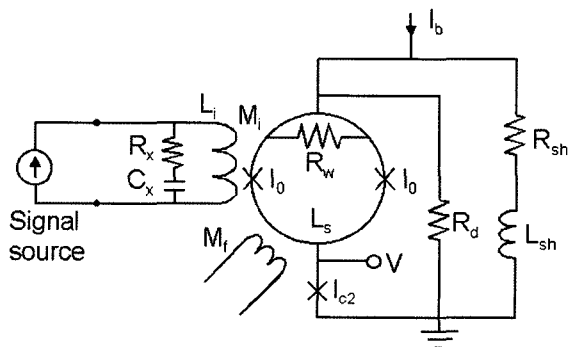


Fig. 2. Schematic circuit diagram of the DROS current amplifier.

Table 1. Parameters of the DROS amplifier.

Signal SQUID			
Junction size			$2 \times (4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m})$
Critical current	$2I_0$		27 $\mu\text{A}$
SQUID hole size			$100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$
SQUID inductance	$L_s$		110 pH
$\beta_L (=2I_0L_s/\Phi_0)$			1.4
$\beta_c^* (=2\pi \cdot 2I_0R_{sh}C_{sq}/\Phi_0)$			0.4
Damping resistance			3 $\Omega$
Mutual inductance			
with feedback coil	$M_f$		68 pH
Reference junction			
Junction size			$5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$
Critical current	$I_{c2}$		21 $\mu\text{A}$
Relaxation Circuit			
Shunt resistance	$R_{sh}$		1.7 $\Omega$
Shunt inductance $L_{sh}$			1 nH
Damping resistance	$R_d$		54 $\Omega$
Input coil			
Number of turns			$2 \times 17$ turns
Linewidth			4 $\mu\text{m}$
Inductance	$L_i$		112 nH
Mutual inductance			
with SQUID	$M_i$		3.2 nH
Damping resistance	$R_x$		10.5 $\Omega$
Damping capacitance	$C_x$		130 pF
Current sensitivity	$I/\Phi$		0.65 $\mu\text{A}/\Phi_0$

에서 작동하고 1 Hz에서 60 dB, 100 Hz에서 90 dB의 차폐율을 가진 자기차폐실 안에서 전류 증폭기의 특성을 측정한다. DROS의 기준임계 전류는 약 20  $\mu\text{A}$ 이고 최대 변조전압은 약 100  $\mu\text{V}$ 이다. 최대 자속-전압 전달계수는  $1 \text{ mV}/\Phi_0$ 로 일반적인 dc SQUID보다 10 배정도 큰 값을 갖는다[5].

### C. FLL 회로

상온에서 동작하는 전단증폭기는 2개의 AD797이 병렬로 연결되고 이득은 24이다. 저잡음 광대역 연산증폭기로 구성된 전단증폭기는 백색영역에서 1 nV/√Hz의 잡음을 갖고 대역

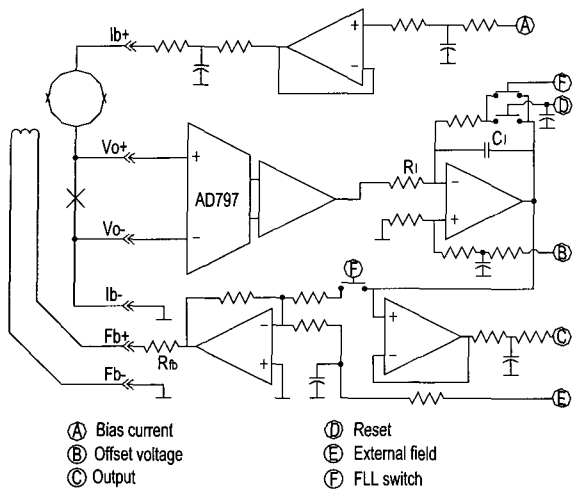


Fig. 3. Circuit diagram of the flux-locked loop electronics.

폭은 5.6 MHz이다. 전단증폭기가 갖는 전압잡음의 1/f 코너 주파수는 6 Hz이고 1 Hz에서 6 nV/√Hz를 갖는다.

1차 적분기는 55 V/μs 슬루율과 550 ns의 빠른 정착시간을 가진 OPA 627로 구성된다. OPA 627은 1배 이득에서 다른 소자의 도움 없이 16 MHz까지 안정하게 증폭하고 빠르게 동작하는 특성을 갖고 적분기 오프셋은 OPA627의 비반전 입력단자를 통해 조절된다. Fig. 3에서 적분기의 시간상수는  $R_1C_1(100 \times 270 \text{ pF}) = 27 \text{ ns}$  이다.

한 회전 코일로 제작한 되먹임 코일은 SQUID와 함께 제작되고, SQUID와 코일 사이의 상호인덕턴스는 68 pH이다. 되먹임 저항은 3.3 kΩ으로 되먹임 회로의 동작 범위는 ±100 Φ<sub>0</sub> 또는 ±65 μA를 갖는다.

동작 범위를 늘리기 위해 적분기 자동 리셋 방법을 채용했다. 적분기의 출력이 일정한 크기에 다다를 때마다 적분기를 리셋하고 리셋한 회수를 12 bit 업/다운 카운터를 써서 세면 리셋이 끝난 뒤 적분기 출력을 더하여 실제 반응한 신호의 크기를 알 수 있다. 이때 리셋한 수는 적분기에서 일정한 크기로 지나간 자속 또는 전류를 나타낸다. 적분기에서 자속이 ±50 Φ<sub>0</sub> 또는 전류가 ± 32.5 μA에 도달할 때 적분기는 리셋되고 펄스를 발생하며 펄스 수는 12 bit 업/다운 카운터에서 최대 ± 2048개를 셀 수 있다. 샘플 펄스 수가 1 개일 때 32.5 μA이며 2048

개이면 65 mA까지 측정되고 -2048개이면 -65 mA까지 측정하므로 동작범위는 -65 mA에서 +65 mA까지 측정된다.

한편 샘플 펄스 수는 12 bit D/A 변환기를 써서 아날로그 전압  $V_{\text{reset}}$ 으로 바꾸어 컴퓨터로 전송된다. 샘플 펄스 수가 1개일 때 리셋 전압  $V_{\text{reset}}$ 은 2.44 mV, +2048일 때 5 V를 나타낸다. 컴퓨터에서 적분기의 출력  $V_{\text{out}}$ 과 리셋 전압  $V_{\text{reset}}$ 이 더하여 최종출력은  $[V_{\text{out}}/5 + (1000 \times V_{\text{reset}}/2.44)] \times 32.5 \mu\text{A}$ 으로 표시된다.

DROS 신호를 측정하는 FLL회로는 상온에서 동작하며 인터페이스 회로를 통해 컴퓨터에서 조절되고 출력이 수집된다.

D. 인터페이스

FLL 회로에 필요한 전압 또는 전류를 조절하거나 적분기의 동작을 바꾸는 역할을 하며 컴퓨터에서 조절한다. FLL회로에서 조절 부분은 인가전류, 적분기 오프셋, 되먹임 자속, 출력 오프셋 조절이며 스위치는 전원공급기, 적분기, 히터 동작에서 사용된다.

컴퓨터에 장착된 데이터수집장치에 있는 3개의 디지털 신호를 써서 각 채널을 선택하고 FLL에서 필요한 조절 신호를 조정 한다. Fig. 4는 동작 순서도이다. 디지털 신호는 데이터(Dt), 클럭(Ck), 선택신호(Cs)로 구성되며 Cs가 0일 때 채널을 선택하며 Cs가 1일 때 인터페이스 출력을 조절한다.

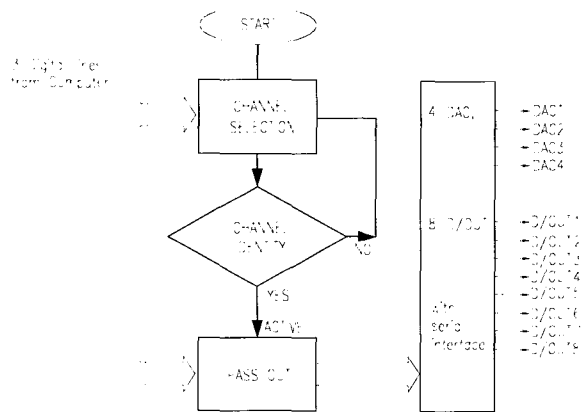


Fig. 4. Flow diagram of interface circuit with 3 digital lines to control FLL.

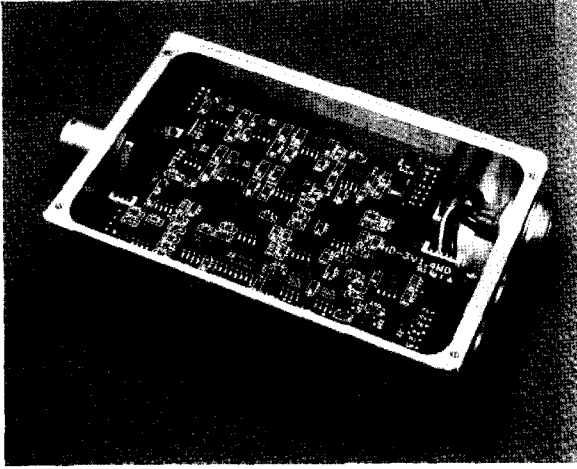


Fig. 5. Photograph of the electronics system assembled with FLL, current source, and interface circuit boards in the shielded case (66 mm x 25 mm x 100 mm).

분별기, 스위치, 펄스 발생기로 구성된 채널 선택기는 8 bit 딥 스위치와 결합하여 최대 256 채널을 선택할 수 있으며 선택된 채널만 인터페이스 회로가 활성화되어 FLL 조절 신호를 발생시킨다.  $C_s$ 가 0인 상태에서  $D_t$ 와  $C_k$ 를 이용하여 채널 선택기에 신호를 보내 채널을 선택하고  $C_s$ 가 0에서 1로 바뀔 때 선택된 채널의 인터페이스 회로에 2개의 디지털 신호  $D_t$ ,  $C_k$ 가 연결된다.  $C_s$ 가 1일 때 인터페이스 조절에 필요한 정보가  $D_t$ ,  $C_k$  신호로 전달되고 인터페이스 회로에서 FLL에 필요한 출력을 만든다.  $C_s$ 가 1에서 0로 바뀔 때 인터페이스 출력이 FLL회로로 전달된다. 인터페이스 회로는 4개의 D/A 출력을 갖고 8개의 스위치를 조정한다. 인가전류를 조절하기 위한 인터페이스 출력은 0 ~ 2.5 V 범위에서 분해능 0.6 mV로 조절하며 실제 SQUID에 인가될 때는 전류로 변환하여 0 ~ 125  $\mu$ A 범위에서 분해능 0.1  $\mu$ A로 조절된다. 적분기 오프셋과 출력 오프셋 전압은 -2.5 ~ +2.5 V 범위에서 분해능 1.2 mV로 조절한다. 되먹임 자속조절에 필요한 인터페이스 출력의 범위는 -0.25 ~ +0.25 V 이고 분해능 0.12 mV로 조절하며 되먹임 전류로 환산하면 -7.6 ~ +7.6  $\mu$ A 범위에서 분해능 0.037  $\mu$ A로 조절하고 자속으로 환산하면 -2.5 ~ +2.5  $\Phi_0$  범위에서, 분해능 1.2 m $\Phi_0$ 로 조절된다. 인터페이스 회로의 스위치 신호는 8개를 조정할 수 있으며 이 중 전원공급기

릴레이, FLL회로의 적분기, 적분기 리셋, 히터 등의 ON/OFF 동작을 위해 4개가 사용된다.

정전압공급원, 인터페이스, 리셋 카운터 회로는 60 mm x 90 mm PCB 기판에, FLL과 리셋 회로는 60 mm x 80 mm PCB 기판에 따로 제작되며 두 개의 기판은 하나의 알루미늄 차폐 박스 안에 있어 외부 잡음에서 보호된다. 제작되어 조립된 알루미늄 차폐 박스를 Fig. 5에 보였다.

### III. 측정과 특성

#### A. 전류 증폭기 잡음

FLL 상태에서 DROS 전류 증폭기의 잡음 스펙트럼을 Fig. 6에서 보였다. 백색영역에서 자속 잡음은  $\Phi_n = 10 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$  이하이고 60 Hz에서 2 kHz 사이에서 외부 환경에서 나타나는 피크들이 측정된다. 입력코일과 DROS의 상호 인덕턴스  $M_i = 3.2 \text{ nH}$ 을 써서 등가 입력전류잡음으로 나타내면 6.3 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 로 표시된다.

#### B. 대역폭

DROS의 특성이 자속-전압 전달 계수  $V_\Phi = 1 \text{ mV}/\Phi_0$ , 백색영역 잡음  $\Phi_n = 10 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ , 직선자속영역  $\delta\Phi = 0.05 \Phi_0$ , 되먹임코일의 상호인덕턴스  $M_i = 68 \text{ pH}$  일 때, FLL 상태에서 자속 0.1  $\Phi_0$ 을 주파수에 따라 검출코일에서 반응하게 하여 출력을 측정했다. Fig. 7에서 -3dB 대역폭은 1.2

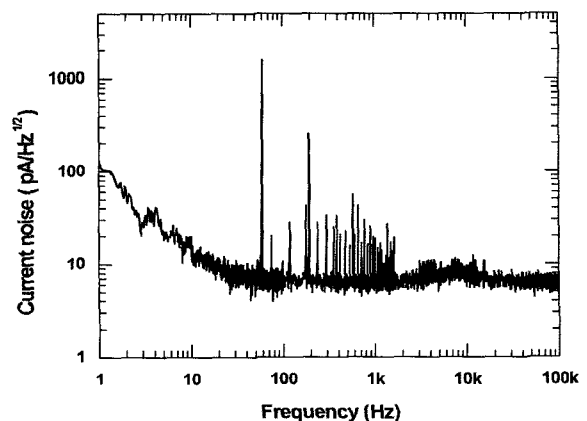


Fig. 6. Equivalent current noise spectrum of the DROS system

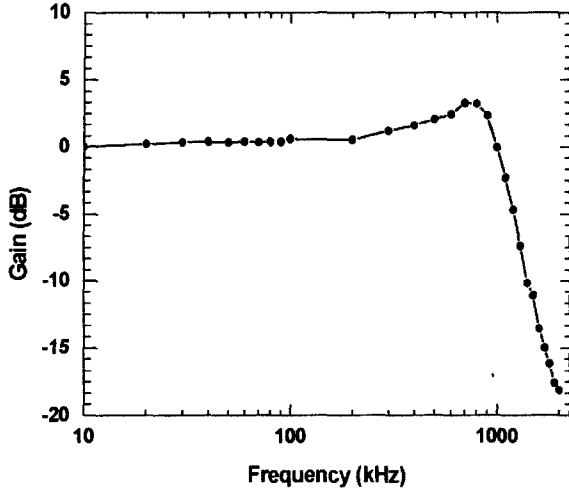


Fig. 7. Frequency response of the current amplifier gain in the flux-locked loop mode, when a magnetic signal of  $0.1 \Phi_0$  was applied to the pickup coil.

MHz로 나타나며, 각 매개변수에 따른 계산 값 1.5 MHz보다 작은 값을 갖는다[6,7]. 이는 FLL 상태에서 자속-전압 전달 계수가 작아지고 잡음이 SQUID에 영향을 주어 측정된 대역폭이 계산 값보다 작게 나타난다[6,8].

### C. 슬루율(Slew rate)

슬루율을 측정하기 위해 검출코일에 자속을 인가하여 출력을 측정했다. 10 kHz 외부자속을 넣을 때  $16 \Phi_0$ 까지 반응을 하며 1 MHz 자속을 넣을 때  $0.2 \Phi_0$ 까지 반응을 한다. 그러므로 10 kHz에서 슬루율은  $1.6 \times 10^5 \Phi_0/s$ 이고 1 MHz에서  $2.0 \times 10^5 \Phi_0/s$ 이다. Fig. 8은 100 kHz,  $0.1 \Phi_0$  사각파 자속을 코일에 넣을 때 전류 증폭기의 출력을 표시한다. 100 kHz 계단파에 대한 출력의 슬루율은  $1.3 \times 10^5 \Phi_0/s$ 을 나타낸다. 이론적 슬루율  $\Phi_{max}$ 는  $\Phi_{max} = \pi \delta \Phi B$ 로 표시되며, 여기서  $\delta \Phi$ 는 직선자속영역값, B는 시스템 대역폭(= 1.5 MHz)으로 계산값은  $\Phi_{max} = 2.3 \times 10^5 \Phi_0/s$ 으로 나타난다. 측정된 반응율이 계산값보다 작는데 이는 FLL 상태에서 자속-전압 전달 계수가 작아져 생기는 결과로 생각된다[8].

최대 전류 슬루율  $i_{max}$ 은 최대 자속 슬루율  $\Phi_{max}$ 와, SQUID와 입력코일의 상호인덕턴스  $M_i$ 으로 결정되며  $i_{max} = \Phi_{max}/M_i$ 로 나타난다.  $\Phi_{max}$ 가  $2.0 \times 10^5 \Phi_0/s$ 이고  $M_i$ 가 3.2 nH이므로  $i_{max}$

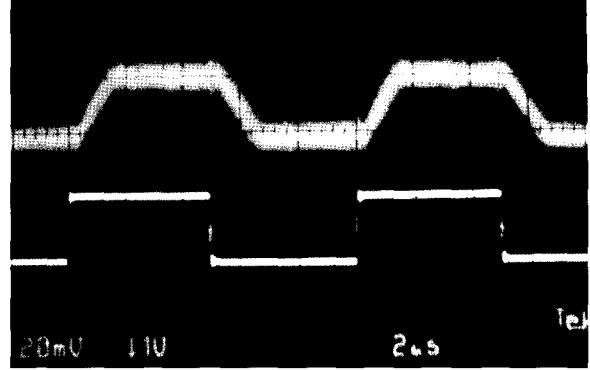


Fig. 8. Response of the SQUID output to a square-wave input signal. The upper curve is the FLL output voltage, and the lower curve is the input signal. The amplitudes of the signals are both  $0.2 \Phi_0$ , and the horizontal time axis is 2  $\mu s/div$ .

은  $(2 \times 10^5 \Phi_0/s)/(3.2 \text{ nH}) = 125 \text{ mA/s}$ 이다. TES를 충분히 동작시키기 위해 1 A/s의 전류 슬루율을 필요로 하며 이를 위해 시스템의 대역폭을 좀 더 증가할 필요가 있다. DROS는 큰 자속-전압 전달 계수를 가지고 있으나 큰 전달 계수를 갖는 곳에 FLL 상태를 만들기 위해 자속을 조절할 때 외부 잡음으로 인해 조절에 어려움이 따르므로 최적 자속 고정점을 찾고 여기에서 FLL을 구성하는 새로운 방법이 필요하다.

## IV. 결론

초전도 TES를 동작하기 위하여 10 m $\Omega$  shunt 저항을 써서 0.13 pV<sub>p-p</sub>@ 0.1 - 10 Hz 전압잡음을 갖는 정전압공급원을 만들고, TES 저항이 100 m $\Omega$ 일 때 전류잡음이 1.3 pA<sub>p-p</sub>@ 0.1 - 10 Hz 이하로 하여 TES가 5 eV 에너지 분해능을 갖도록 했다. TES에서 반응하는 전류를 측정하기 위해 DROS를 이용한 전류증폭기를 제작했고 전류잡음은 6.3 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , 3dB 대역폭은 1.2 MHz, 반응율은 100 mA/s로 측정되었다. 또한 정전압공급원과 전류증폭기 회로의 조절을 원격 제어하기 위해 인터페이스 회로를 함께 구성하여 모든 조정을 컴퓨터에서 수행하고 측정 결과도 컴퓨터에서 수집하게 하였다. 정전압공급원, 전류증폭기, 인터페이스 회로는 66 mm  $\times$  25 mm  $\times$  100 mm 크기의 알루미늄 차폐 박스 안에 있고

이 박스는 컴퓨터와 직접 연결된다. 제작된 시스템은 소프트 X-선 영역의 미소열량계로는 충분히 사용 가능하나 슬루율은 약 10배정도 높일 필요가 있다.

## References

- [1] T. Morooka, K. Tanaka and K. Chinone, "High-Current resolution broad-band SQUID amplifier suitable for TES calorimeter", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 12, pp. 1866-1871, 2002.
- [2] F. P. Hirayama, N. Kasai and M. Koyanagi, "Design of series SQUID array suppressing Josephson oscillation interference between element-SQUIDs", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 9, pp. 2923-2926, 1999.
- [3] K. D. Irwin, "An application of electrothermal feedback for high resolution cryogenic particle detection", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, pp. 1998-2000, 1995.
- [4] D. J. Adelerhof, H. Nijstad, F. Flokstra and H. Rogalla, "(Double) relaxation oscillation SQUIDs with high flux-to-voltage transfer: Simulations and experiments", *J. Appl. Phys.*, vol. 76, pp. 3875-3886, 1994.
- [5] Y. H. Lee, H. C. Kwon, J. M. Kim, Y. K. Park and J. C. Park, "Double relaxation oscillation SQUID with reference junction for biomagnetic multi-channel applications", *Appl. Supercond.*, vol. 5, pp. 413-418, 1998.
- [6] A. W. Hamster, M. J. van Duuren, G. C. S. Brons, J. Flokstra and H. Rogalla, "A 1-MHz low noise preamplifier based on double relaxation oscillation SQUIDs", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 9, pp. 2915-2918, 1999.
- [7] M.J. van Duuren, "Advanced Relaxation Oscillation SQUIDs", PhD Thesis, University of Twente, The Netherlands, 1998.
- [8] D. Drung, H. Matz and H. Koch, "A 5-MHz bandwidth SQUID magnetometer with additional positive feedback", *Rev. Sci. Instru.*, vol. 66, pp. 3008-3015, 1995.