

분산제어 설비를 이용한 Fan Stall Warning System 설계

노용기* 조현섭** 장성환*

*원광대학교 전기공학과 **청운대학교 디지털방송공학과

Fan Stall Warning System Design Using the DCS Logic

Yong-Gi Roh* Hyeon-Seob Cho** Sung-Whan Jang*

*Dept of Electrical Engineering Wonkwang University

**Dept of Digital Broadcast Engineering Chungwoon University

Abstract - 500[MW]급 대용량 보일러 튜브계통의 송풍기 맥동 감시 장치는 송풍기 이상 발생시 송풍기를 보호하기 위하여 정지시키는 기능을 한다. 그러나 송풍기 맥동 감시 장치의 빈번한 고장으로 신뢰성이 저하되고 운전에 영향을 미치므로 이것을 DCS 로직으로 구성하여 신뢰성을 향상시켰다.

1. 서 론

최근 건설되는 표준석탄화력(500[MW]) 발전소의 보일러 튜브계통에는 연소용 공기공급과 연소가스 배출용 송풍기로 축류형이 채용되고 있다. 축류형 송풍기는 저압(약 400mmAq), 대유량(약 20,000 m³/min) 송풍기로 고속운전이 가능하며 기체는 축방향으로 유입되어 축방향으로 유출한다. 최근 항공산업의 발달로 효율(약 90%)은 원심형보다 좋으며 날개사이를 흐르는 유체에 무리한 만곡이 없기 때문에 고속운전, 대유량에 적합하다[1]. 특히 풍량조절은 유압식으로 동익의 각도를 제어하므로 부분 부하에서도 효율의 저하가 적은 특성을 보이거나, 원심형 송풍기에 비하여 설계점 이외의 풍량에서는 효율이 갑자기 떨어지는 결점이 있다[2].

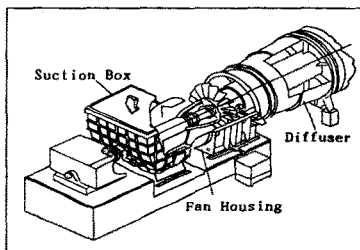
2. 축류형 송풍기 운전특성

2.1 축류형 송풍기

축류형 송풍기의 작용은 Impeller의 양력 작용에 의한 것으로 그 날개 형상이나 작용이 Propeller와 비슷하다. 특징으로는 다른 송풍기에 비해 고속운전이 가능하며 크기를 작게 할 수 있고 또 원심형과 같은 와류실이 없어도 축방향으로 송풍할 수 있으므로 관로 도중에도 간단히 설치할 수 있다. 축류형 송풍기가 원심형과 같은 풍압을 얻으려면 약 2배의 원주 속도가 필요하다[3]. 따라서 회전체에 따르는 소음도 그만큼 증가되므로 주로 저압, 대유량에 사용된다.

<그림 1>은 보일러용 축류형 송풍기의 외형이다.

축류형 송풍기는 일찍이 유럽에서 채용되었는데 현재에도 대형 송풍기가 제작되고 있다. 보일러가 대용량화됨에 따라 압입송풍기의 구동동력이 비약적으로 증가하므로 크기가 작아 설치면적이 적게 들고 동력의 소비가 적어 500[MW]이상의 대용량 보일러에 채용된다. 축류형 송풍기의 풍압특성곡선에는 변곡부가 있어 운전상 불안정한 영역이 있으므로 운전에 유의해야 한다.



<그림 1> 보일러용 축류형 송풍기

2.2 맥동 발생시 현상

첫째, 송풍기 내부가 공기흐름의 맥동에 의하여 부하가 크게 변동하므로 맥동 발생시 전동기 전류가 크게 변동한다.

둘째, 송풍기 Housing 진동이 발생하나 Brg 진동 감시설비에는 큰 변화가 나타나지 않으며 송풍기 맥동 발생여부를 확인하기 위하여 현장에서 직접적으로 확인하거나 송풍기 Housing에 별도로 진동 감시설비의 신설이 필요하다.

셋째, 송풍기 맥동 발생시 전동기 전류와 함께 풍량 및 풍압이 매우 불안정한 모습을 보이므로 송풍기 맥동을 확인하기 위하여 송풍기 입출구에 풍압 및 풍량 감시설비 신설이 필요하다. 기존의 맥동 감시 장치는 송풍기 입출구 압력을 측정하여 장치 자체에서 계산용으로만 사용하고 압력은 알 수 없으나, 이번 현장기술 개발과제에서 맥동을 계산하기 위하여 송풍기 입출구에 압력 전송기를 신설하여 압력

을 측정하므로 압력 감시뿐만 아니라 계산용으로 사용하므로 감시의 2중 효과가 있다.

넷째, 맥동이 발생한 송풍기의 부하 감소로 정상적인 송풍기의 역할을 수행하지 못하므로 공기량 또는 노내압력 유지하기 위하여 상대 송풍기의 피치 날개 개도가 증가하고, 풍량 증가에 따라 전기집진기가 부분정지 되는 현상이 발생한다.

다섯째, 맥동 발생에 의해 풍량 및 유속이 감소하여 공기예열기에서 열교환이 충분히 이루어지므로 공기예열기 출구 온도가 강하하는 반면 상대면 송풍기의 풍량 및 유속은 증가하여 공기예열기에서 열교환 시간이 짧으므로 공기예열기 출구 온도는 증가한다.

여섯째, 맥동 발생측 송풍기 풍량이 적은 상태에서 흔들리므로 노내압이 변동한다.

① 맥동 발생시 공통현상

- 송풍기 전동기 전류 변동
- ID 송풍기 A 피치 날개 개도 100% Open 및 Rundown Active로 출력 감소

- 노내 압력 변동

- GAH Outlet Temp 변동
- 가스 유속 증가로 전기집진기 부분정지

② 맥동 발생시 상황

<표 1> 맥동 발생시 상황

구 분	내 용	정 격
Generator Output	500MW → 520MW	500MW
Furnace Pressure	-5mmH ₂ O → +40mmH ₂ O	-12mmH ₂ O
IDF A,B Pitch Blade Position	69% → 100%	65%
FDF A,B Pitch Blade Position	60% → 74%	62%
IDF A Motor Current	210→260→140→240A	143A
IDF B Motor Current	180A → 295A	143A
AH A Gas Outlet Temp	150℃ → 169℃	120℃
AH A Gas Outlet Temp	130℃ → 95℃	120℃

③ 원인분석

- 맥동 발생으로 풍량이 감소하여(맥동 경보 장치의 고장으로 맥동 발생당시 풍량은 알 수 없었으며 풍량이 감소한 상태에서 Hunting 함) 공기예열기에서 열교환이 충분히 이루어져 공기예열기 출구 온도가 강하한 반면 상대면(B) 송풍기의 풍량은 증가하여 공기예열기 출구 온도증가

- 맥동 발생으로 풍량이 흔들리므로 노내압 변동

- ID 송풍기 B(상대 송풍기) 피치 날개 개도증가 (개도가 100%까지 증가하여 Position Rundown되면서 Air Flow 감소, 연료량감소와 함께 출력강하)

- FD 송풍기 A, B 맥동 경보 Alarm 반복취명

- 맥동 발생 원인을 보면 전기집진기 #B 두 개의 입구중 한쪽이 Ash에 의하여 막힌 상태로 운전중 출력을 500[MW]에서 525[MW]로 증가시켰을 경우 맥동이 발생하여 ID 송풍기 B 전동기 전류 흔들림, 상대 ID 송풍기 A 개도 증가, 노내압 증가 등의 현상이 나타난다.

3. 시스템 개발개요

3.1 시스템 개발의 필요성

신규 석탄 화력에서 운용되고 있는 보일러의 축류형 송풍기는 정상운전중 공기 예열기의 막힘이나 튜브계통의 댐퍼 닫힘 등에 의하여 튜브 단면적이 감소 할 경우 송풍기가 비정상적으로 운전되면서 날개가 파손될 위험에 이르게 된다. 축류형 송풍기에는 이러한 비정

상 운전을 방지하기 위하여 맥동 감시 장치가 설치되어 있으나 계측기의 빈번한 고장으로 인하여 정상 운전중 송풍기의 불시정지를 초래하므로, 발전소 현장에서는 오동작을 방지하기 위하여 송풍기 맥동 보호기능을 제거하여 운전하고 있는 실정이다.

3.2 현황 및 문제점

송풍기 맥동 감시 장치는 삼천포3~6호기를 비롯하여 보일러 본체에 총 72대가 설치되어 있으며, 탈황설비의 송압 송풍기에 28대 등 총 100대가 설치되어 있다. 송풍기 맥동 감시 장치는 블랙박스 형태로써 국내 정비기술로는 유지정비가 곤란하다. 빈번한 고장에 따른 제작사(외국) 반출 수리로 비용이 증가하고 소요기간의 장기화로 고장발생 기간동안 송풍기를 보호할 수 없다. 고장발생을 대비하여 예비품을 확보해야하며 이에 따른 재고증가와 고가의 외자재 도입이 불가피하다.

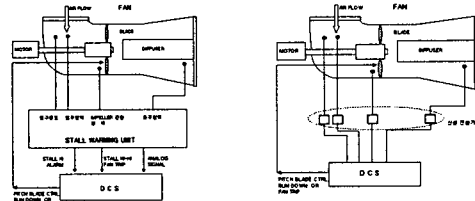
3.3. 현장기술개발 내용 및 범위

기존의 블랙박스형 장치를 분석하여 분산제어 설비의 프로그램으로 개발하였으며, 현장 압력측정용 전송기를 신설하여 송풍기의 운전상태를 감시할 수 있도록 하였고, 현장시험을 통하여 맥동 발생시 경보발령 및 유량 자동조절기능을 확인하였다.

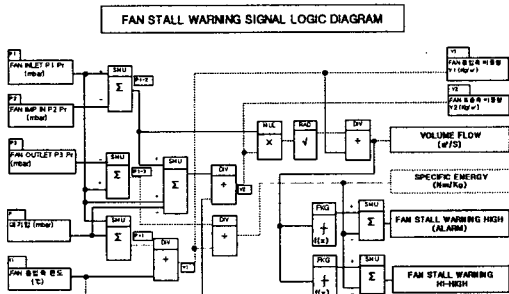
4. 맥동 경보 시스템 개발내용

4.1. 시스템 구성

풍량 및 풍압을 산출하기 위해 기존의 장치를 제거하고 현장의 압력과 온도를 측정하여 DCS로 전송하고 DCS Logic에 의하여 감시, 제어되도록 개발되었다.



〈그림 4〉 기존 장치 구성도 및 개발 시스템 구성도



〈그림 5〉 송풍기 맥동 경보 신호 로직 다이어그램

4.2 맥동 산출공식

맥동 산출은 송풍기 특성에 따른 풍량 대비 비에너지량의 불균형 상태를 검출하여 맥동 발생 여부를 감시하기 위한 것으로 풍량과 비에너지 산출 공식이다.

① 입력

500[MW] IDF 운전 Data를 기준으로 계산하면 다음과 같다.

- P : 대기압 = 1015.6 mbar
- P₁ : 송풍기 입구측 압력 = -32.04 mbar
- 절대압 환산 : -32.04mbar + 1015.6 mbar = 983.56mbar
- P₂ : 송풍기 흡입측 압력 = -47.81 mbar
- 절대압 환산 : -47.81mbar + 1015.6 mbar = 967.79mbar
- P₃ : 송풍기 토출측 압력 = 1.28 mbar
- 절대압 환산 : 1.28 mbar + 1015.6 mbar = 1016.88mbar
- t₁ : 송풍기 입구측 온도 = 117℃
- 4P₁₋₂ : 입구측과 흡입측 차압 = 15.77 mbar
- 983.56mbar - 967.79mbar = 15.77 mbar
- 4P₁₋₃ : 입구측과 토출측 차압 = 33.32 mbar
- ID 송풍기 면적
- A₁ : 송풍기 입구측 단면적 = 12.0 m²
- A₂ : 송풍기 흡입측 단면적 = 5.32 m²
- A₃ : 송풍기 토출측 단면적 = 10.98 m²
- FD 송풍기 단면적
- A₁ : 송풍기 입구측 단면적 = 7.645 m²

- A₂ : 송풍기 흡입측 단면적 = 3.270 m²
- A₃ : 송풍기 토출측 단면적 = 6.867 m²
- R : 가스정수 = 282 Nm/kg.K
- ρ: 유량계수 = 1.10447

$$\rho = 0.99 * \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{A_2}{A_1})^2}} = 0.99 * \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{5.32}{12})^2}}$$

= 1.10447

② 비중량 계산

- r₁ : 송풍기 입구측 비중량 = 0.89 kg/m³

$$\frac{P_1 * 100}{R(A_1 + 273.15)} = \frac{983.56 * 100}{282(117 + 273.15)} = 0.89 \text{ kg/m}^3$$

- r₂ : 송풍기 흡입측 비중량 = 0.89 kg/m³

$$r_2 = \frac{(P_1 - P_1 - 2) * 100}{R(A_1 + 273.15)} = \frac{(983.56 - 15.77) * 100}{282(117 + 273.15)}$$

$$= 0.92 \text{ kg/m}^3$$

③ 풍량

- q : 유량 = 317.28kg/s

$$q = \rho * A_2 * \sqrt{200 * P_1 - 2 * r_2}$$

$$= 1.10447 * 5.32 * \sqrt{200 * 15.77 * 0.89} = 317.28 \text{ kg/s}$$

- V : 풍량 = 354.91 m³/s

$$V = \frac{q}{r_1} = \frac{317.28}{0.89} = 354.91 \text{ m}^3/\text{s}$$

④ 비에너지(풍압)

- Y : 비에너지 = 3729.55 Nm/kg

$$Y = P_{1-3} * 10.2 * (\frac{9.81}{r_1}) = 33.32 * 10.2 * (\frac{9.81}{0.89})$$

$$= 3729.55 \text{ Nm/kg}$$

5. 맥동 경보 장치 시험결과

5.1 개요 및 시험조건

표준 석탄화력에 설치하여 운영중인 축류형 송풍기 맥동 경보 장치의 문제점을 개선, 보완하기 위하여 현장기술개발과제인 “축류형 송풍기 맥동 경보 장치의 개발을 완료하고 시제품 성능을 확인하기 위하여 다음과 시험을 실시하였다. 첫째, IDF A Inlet Damper와 FDF A Outlet Damper를 각각 수동조작으로 송풍기 맥동을 발생시켜 날개 자동 조절 상태 및 경보취명 확인 및 기존 맥동 경보 장치와 변화율이 비교하였다. 둘째, 보일러를 정상운전 상태에서 시험할 경우, 송풍기 피치 날개에 미칠 영향을 고려하여 보일러 소화후 FD 송풍기, ID 송풍기를 각각 2대씩 운전하고 PA 송풍기는 정지상태에서 시험하였다.

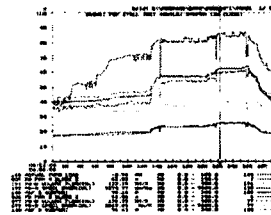
셋째, 정상운전시의 조건과 유사하게 맞추기 위하여 FD 송풍기 및 ID 송풍기 피치 날개 개도는 40%이상 Open 상태에서 자동 운전하여 시험하였다. 넷째, FD 송풍기, ID 송풍기 개도는 맥동 발생시 자동 Rundown 되도록 하기 위하여 자동 상태로 놓고 Air Flow Control Mode를 수동으로 조작하였다.

5.2 시험방법과 결과분석

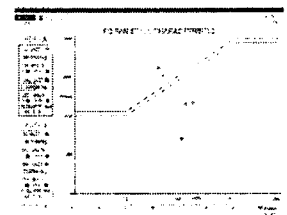
시험은 각각 FD 송풍기 A, ID 송풍기 A를 대상으로 하였다. FD 송풍기는 Outlet Damper를 Manual로 10%까지 Step Close 하여 맥동 발생시켰으며, ID 송풍기는 Inlet Damper를 Manual로 12%까지 Step Close 하여 맥동 발생시켰다.

① FD 송풍기 맥동 시험결과 분석

〈그림6〉은 보일러 정지중 인위적으로 맥동을 발생시키기 위하여 시험한 결과이며 FD 송풍기 피치 날개 개도 40%에서 자동운전 중 송풍기 출구 댐퍼를 단계적으로 닫았을 때 운전 상태를 보여주고 있다.



〈그림 6〉 FD 송풍기 맥동 발생 시 운전상황

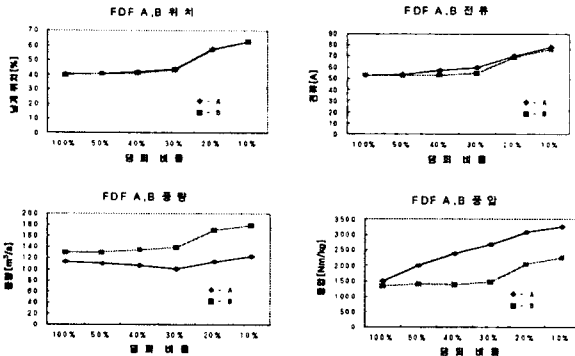


〈그림 7〉 FD 송풍기 맥동 시험 시 곡선

송풍기 피치 날개는 Air Flow(Set : 60%)를 제어하기 위하여 댐퍼를 닫을 때마다 상승하였으며 댐퍼개도 15%~20% 사이에서 전류 상승과 함께 날개개도 및 풍압, 풍량이 상승하고 이후 순간적으로 불안정한 모습을 나타내었다. 즉, 댐퍼개도 15% - 20% 사이에서 1차적으로 맥동 이 발생하였으며 이후 댐퍼개도 10%가 되기까지 발생 정도는 약했지만 맥동이 2회 추가 발생하였고 계속적으로 불안정

한 운전상태 보였다.

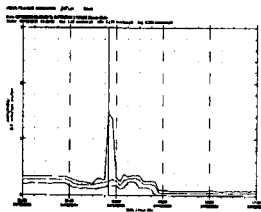
<그림8>에서 보는 바와 같이 FD 송풍기 출구 댐퍼를 단계적으로 닫았을 때 댐퍼개도 20%부터 전동기 전류와 풍압, 풍량이 상승하였는데 이는 FD 송풍기 출구 댐퍼 20%에서 맥동이 발생하여 이후 10%로 닫을 때까지 운전 변수가 높게 유지되어 상태가 불안정하게 운전되었음을 증명하였다.



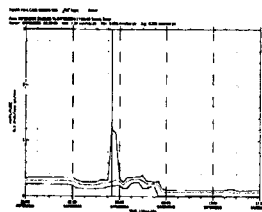
<그림 8> FD 송풍기 맥동 시험시 운전자료(◆:A형, ■:B형)

② FD 송풍기 진동분석

FD 송풍기의 경우 맥동 시험시 댐퍼개도 20%에서부터 소음이 증가하며 송풍기 Bearing Casing 진동을 측정하였다. 정확한 시험을 위하여 송풍기 Housing에 진동 Probe를 설치하고 시험해야 하나 송풍기 Bearing Casing 진동으로 만족해야 했다.



<그림 9> FD 송풍기 Brg Casing 진동, Hor.

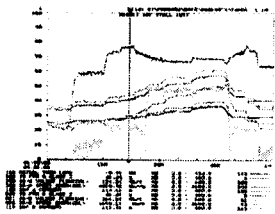


<그림 10> FD 송풍기 Brg Casing 진동, Ver.

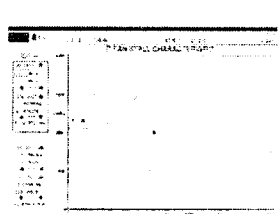
③ ID 송풍기 맥동 시험결과 분석

<그림11>는 보일러 정지중 인위적으로 맥동을 발생시키기 위하여 ID 송풍기 입구 댐퍼를 단계적으로 닫았을 때 운전 상태를 보여주고 있다.

송풍기 피쳐 날개는 Air Flow(Set : 60%)를 제어하기 위하여 댐퍼를 닫을 때마다 상승하였으며 댐퍼 개도 15% - 20% 사이에서 전동기 전류 상승과 함께 날개개도 및 풍압, 풍량이 상승하고 이후 순간적으로 불안정한 모습을 나타내었다. 즉, 댐퍼개도 15% - 20% 사이에서 1차적으로 맥동이 발생하였으며 이후 댐퍼개도 10%가 되기까지 발생정도는 약했지만 맥동이 2회 추가 발생하였고 계속적으로 불안정한 운전상태 보였다.

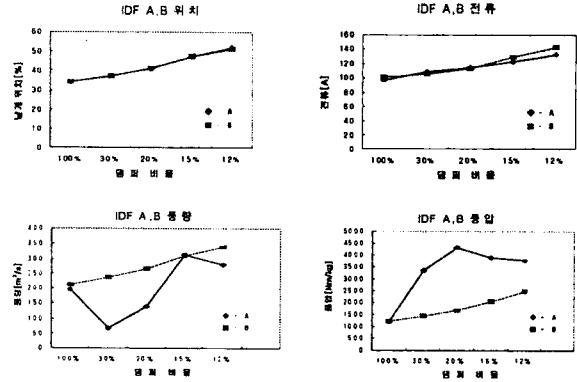


<그림 11> ID 송풍기 맥동 발생시 운전상황



<그림 12> 맥동 발생시 곡선

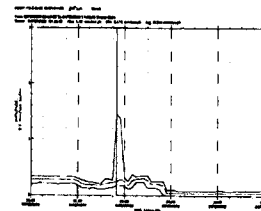
<그림13>에서 보는 바와 같이 ID 송풍기 출구 댐퍼를 단계적으로 닫았을 때 댐퍼개도 20%에서 전동기 전류는 완만하게 증가하였으나 풍압이 급상승 한 것을 볼 수 있으며 풍압은 풍량과 정비례하지 않는 모습이였다. 일반적으로 풍압과 풍량은 반비례하여 나타나지만 맥동 발생시에는 맥동현상으로 풍압과 풍량이 혼들려 반비례하지 않는 것으로 보인다. 이후 풍압이 포화를 이룰 때 풍량은 댐퍼개도 15%에서 급상승하는 것을 볼 수 있다.



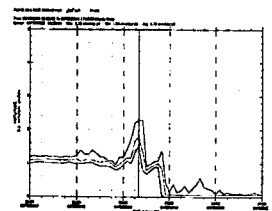
<그림 13> ID 송풍기 맥동 시험시 운전자료(◆:A형, ■:B형)

④ ID 송풍기 진동분석

ID 송풍기의 경우에도 FD 송풍기와 마찬가지로 맥동 시험시 댐퍼개도 20%에서부터 소음 증가는 없었으나 송풍기 Bearing Casing 진동은 소폭 증가하였다.



<그림 14> ID 송풍기 Brg 진동, Hor.



<그림 15> ID 송풍기 Brg 진동, Ver.

6. 결 론

축류형 송풍기 맥동 경보 시스템은 국내에서는 처음 시도한 연구로써 국내 기술로 해결하기 어려운 블랙박스형 설비를 분산제어 시스템의 논리 제어회로로 개발한 내용입니다. 화력발전소 현장에서는 운전 기간동안 맥동 경보 장치의 빈번한 고장으로 출력감발이 잦았으며 출력감발의 부담을 줄이기 위하여 송풍기 맥동 경보 장치의 자동조정 기능을 제거하여 운영하였다. 따라서 송풍기에 맥동이 발생하면 운전원이 종합적인 상황을 판단하기가 곤란하고 조치시간 지연으로 설비에 위험이 따른다. 급변에 개발한 맥동 경보 시스템은 기존의 맥동 경보 장치 대체에 목적이 있었지만 계측기의 오동작시 발전 설비를 미치는 영향을 고려하여 계측기가 오동작하면 자체에서 운전변수를 비교, 판단하는 기능을 삽입하여 출력감발의 원인을 제거한 동시에 맥동발생시 송풍기가 안정영역에서 운전되도록 회로를 구성하였으며 현장적용시험을 통하여 신뢰성을 입증하였다. 또한 기존 설비는 대당 1,900만원으로 신규 개발품 1,000만원과 비교하여 고가이고, 한개 호기 교체 시 3,400만원의 절감효과가 있으며, 출력감발 발생시 연간 1회, 3시간 기준으로 2,187만원을 절감하여 경제적으로도 큰 이익을 가져왔다.

[참 고 문 헌]

- [1] 최덕철 "축류형 송풍기 운전특성", 기술회보, 35권, 1999.
- [2] 태안화력 "Stall 발생보고서", 1997.
- [3] 보령화력 "Stall 발생보고서", 1993.
- [4] Howard Kaufman, Izhak Bar-Kana and Kenneth Sobel, "Direct Adaptive Control Algorithms, Springer-Verlag, 1994.
- [5] B. C. Kuo, Automatic Control Systems, Prentice-Hall, 1991.
- [6] C. Canudas De Wit, N. Fixot, "Robot Control. Via Robust State Estimated Feedback," IEEE Trans, Automatic Control. Vol.36, No.12, pp.1497-1501, DEC, 1991.
- [7] Robert H. Bishop, Modern control Systems Analysis and Design Using MATLAB, Addison-Wesley Publishing Company.
- [8] Peter Norten, "C++ Programming", 1993.
- [9] S. R. Ahuja, et al., "The Rapport Multimedia Conferencing System; A Software Overview", Proc. of 2nd IEEE Conference on Computer Workstations, pp.52-58, March, 1988.
- [10] W. Reirhard et al., "CSCW Tools: Concepts and Architecture", IEEE Computer, Vol. 27, No. 5, pp.28-36, May, 1994.