

INLET S-DUCT 내부흐름의 전압력 편차에 대한 실험 연구

김 무 도, 정 상 영, 김 요 섭
대전기계학

Experimental Study of Total Pressure
Distortion in Inlet S-Ducts

Moo Do Kim, Sang Young Jung, Yo Sub Kim
ADD

Abstract

An experimental study has been conducted to investigate the suction performance of a designed inlet. Total pressure distortion in the inlet S-duct was measured and the effect of lip thickness and throat area was analyzed. The volume flow rate of air into the turbojet engine was controlled to observe the effect of engine RPM to the total pressure distortion. The pressure data from 36 air tubes were obtained using scanivalve, pressure transducer, and visicoder system.

1. 서론

무인항공기의 비행시 공기항력을 감소시키기 위하여 제트 엔진을 동체 내부에 장착할 경우에는 흔히 S형 공기흡입관을 엔진 전방에 부착하게 된다. S형 공기흡입관을 제작하기 위해서는 면적분포, 중심선의 굴곡변화, 목면적, 입술(lip)의 형상, 각 단면의 형상등을 설계하여야 한다. 목면적의 선정에 있어서는 순항시의 최적 목면적으로 설계하면 유출항력(spillage drag)은 최소가 되지만 지상 이륙시 최대 추력을 내기에는 너무 목면적이 좁아서 엔진의 꺼짐이 일어날수가 있다. 그러나 순항시 최적 목면적의 1.4배 이상으로 목면적을 설계하면 유출항력(spillage drag)이 크게 증가하는 경향이 있으므로 주의를 요한다(1). Micro-Turbo 회사의 설계에서는 설계기준점을 $M=0.8$ 로 잡았으나 지상흡입 성능은 고려하지 않고 있다(2). 초음속항공기의 경우 이륙시의 지상 흡입 유량의 보충을 위해 흡입관 후 반부에 보조흡입문을 설치하는 경우도 있다(3). Spillage drag은 Additive drag으로 불리기도 하며 참고문헌 4에 계산방법이 소개되어 있으나 lip suction data는 모호한 점이 많으므로 정확한 수치는 풍동실험에 의해 얻어져야 할 것이다. 입술의 설계에 있어서는 주로 타원형을 사용하며

형상 및 두께의 변화에 따라 흡입시의 최대 표면 마하수가 변화하며 이는 흐름박리에 영향을 미친다(5). Contraction Ratio 수치도 입술 표면 마하수와 유출항력에 큰 영향을 미친다. 여기서 설계된 공기흡입관은 참고문헌 6, 7에 소개된 S형 흡입관과 유사한 개념으로 설계되었으며, 비점성류 공력해석 프로그램 INLET(8)과 경계층 점성류 해석 프로그램 BLAYER(9)를 이용하여 벽면박리를 최소화 하는 곡면을 반복 계산법으로 최적 설계 하였다(10). 본 실험의 목적은 이론적으로 설계된 흡입구(Inlet)형상을 기준으로 하여 흡입구 목면적과 입술 두께를 약간씩 변화시키면서 지상정지 상태에서의 공기흡입 성능을 측정하는데에 있다. 흡입성능은 엔진 압축기 전면에서의 전압력 손실의 분포를 측정함으로써 판단할 수가 있다(11). 흡입관의 면적과 굴곡상태가 흡입성능을 저하시키는 방향으로 설계되었을 경우 측정된 전압력은 심한 편차와 손실(distortion and loss)을 보일 것이다. 전압력 손실이 허용한계를 넘을 경우 엔진 stall이 일어나게 된다.

2. 실험내용

(1) 실험모델 (Inlet S-duct)

엔진공기흡입관은 6개의 서로 다른 형상을 제작하여 흡입 성능을 서로 비교하기로 하였다. 6개의 형상에 대한 주요 제원을 표 1에 나타내었다. 단반경과 장반경은 목(throat)에서의 타원의 형상을 표시한다. 흡입관은 복합재료로 제작되었으며 그림 1에서 보는 바와 같이 각 단면에서의 장축은 일정하고 단축은 연속적으로 증가하고 있다. Duct No. 2는 이론 설계에 의한 기준 모델이며 다른 형상들은 면적이 약간씩 달라지거나 입술의 두께가 변한 것들이다. 면적의 감소와 입술두께 변화를 볼때 Duct No. 1에서 Duct No.6으로 갈수록 전압력 편차가 커질것이 예상된다. 흡입관의중양선에 수직하게 자른 흡입관 단면은 모두 타원이며 이러한 타원의 면적은 서서히 연속적으로 변화도록 설계되어 있다.

(2) 측정용 베이크 (Rake)

엔진 압축기 전면에서의 전압 및 정압의 분포를 측정하기

워해서는 측정용 레이크의 제작이 필요하다. 레이크는 가능한 한 얇은 날개 (Airfoil) 모양으로 설계되었으며 6개의 날개로 이루어져 있다. 각 날개 전단부에는 6개씩의 전압관 (potot tube)이 그림 2에서 보는 바와 같이 허브 (Hub) 와 바깥벽면 사이에 등간격으로 설치되어 있다.

(3) 엔진 및 각종 계기

이 실험에 이용된 엔진은 정상최대 추력 309 lbf 을 낼 수 있는 원심형 NPT 101 터보제트엔진이다. 그림 3에서 S형 흡입관의 후방에 엔진이 장착되어 있으며 오른쪽에 세워져 있는 작은 기구는 Scani-valve 이다. 스캐니밸브의 내부에는 압력변환기 (pressure transducer) 가 장치되어 있으며 압력변환기의 최대측정치는 5 psid 이다. 전압관에 연결된 비닐튜브들은 레이크를 통하여 흡입관 바깥으로 나와서 scani-valve 에 연결된다. Scani-valve 는 짧은 시간간격으로 (여기서는 1초 간격으로 회전시켰음) 36개의 전압관 압력들을 고대로 읽어 들이는 장치이다. 이러한 측정치들은 그림 4의 visicoder 장치에 의해 감광지에 기록된다. Visicoder 는 동시에 여러가지 측정치들을 기록해 낼 수가 있다. 여기서는 전압측정치, 엔진회전수 (RPM), 엔진배출가스온도등을 동시에 출력하였다. 그림 5에 보여준 계기판은 엔진시동장치, 엔진회전수 (RPM), 조절장치등을 가지고 있다. 이번 실험에서는 최저회전수 (idle RPM)와 최대회전수 (max. RPM)를 포함한 6가지의 엔진 회전수에 대하여 실험하였다. 표 2에서는 계기판의 표시전압과 엔진회전속도의 관계를 보여주고 있다.

(4) 목 (throat) 에서의 마하수를 고려한 흡입관 선정

정상 정지상태의 엔진이 최대유량의 공기를 흡입할때 목면적에 따른 마하수를 계산하여 표 3에 나타내었다. 목면적 84.1 cm² 의 경우, 흡입유량이 클 경우 초음속이 되므로 이는 불가능한 설계이다. 목면적 151.38의 경우는 목면적이 압축기 전면 면적과 거의 동일한 경우로서 흐름의 확산 (diffusion) 이 별로 일어나지 않으므로 목면적의 최대설계치라고 볼 수가 있다.

따라서 목면적의 변화는 100.92 cm² 이상의 4가지 경우도 하기로 하였다. 입술두께는 수축비 (contraction ratio) 를 고려하여 2.433 cm와 1.473cm의 2가지 경우를 시험 하기로 하였다 (표 1).

(5) 전압력 편차 (total pressure distortion) 의 허용한계

Micro-Turbo 회사로부터 특용엔진에 대한 자료 (2) 에 의하면 엔진 작동시 허용할 수 있는 전압력 편차계수 (distortion factor) 는 0.74로 되어 있다. 이를 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$D.F. = \frac{P_{t,bell} - P_{t,min}}{Q_{bell}} = 0.74$$

정상정지 상태에서 작동할 경우에는 $P_{t,bell}$ 은 대기압

에 해당되며 Q_{bell} (bell-mouth dynamic pressure) 은 압축기 전방에서의 동압에 해당된다. 변화하는 압축기 전방 마하수에 대하여 전압력 편차 허용한계를 $\Delta p/p_o$ 의 값으로 나타내면 다음과 같다.

$$M=0.2 : \Delta p/p_o = 0.02035 \quad \Delta p = 0.299 \text{ psid}$$

$$M=0.3 : \Delta p/p_o = 0.04477 \quad \Delta p = 0.658 \text{ psid}$$

$$M=0.4 : \Delta p/p_o = 0.07726 \quad \Delta p = 1.136 \text{ psid}$$

정상 정지 흡입시 압축기 전방의 최대 마하수는 0.399이며 이 경우에 있어서 정압 (static pressure) 은 전압 (total pressure) 의 90% 정도가 된다. 즉 압력변환기 (pressure transducer) 가 측정할 최대 압력차는 전압의 경우 대기압의 7.726% 이며 정압의 경우 대기압의 10% 이다.

3. 결과 및 검토

이 실험을 위해서는 많은 장비와 인원이 요구되었으며 특히 엔진실험실과 공동실험실과 씨스팀실의 도움으로 모델이 제작되고 실험장치가 준비되었다. 전압 분포를 측정하는데에는 6가지의 흡입관을 고대로 장착하면서 6번의 엔진작동을 수행하였으며 엔진작동중에는 6가지의 엔진회전수 (표 2)에 대해 수치를 획득하였다. 정압분포의 측정에도 동일한 횟수의 작업을 하였다. 스캐니밸브 (scani-valve) 의 작동이 불완전하여 출력의 진동이 심했으므로 원인을 조사한 결과 밸브의 압력변환기 부착 부분에 이물질에 의한 밀착 불량으로 판명되었다. 이를 고정한 후 실험을 반복하여 정확한 결과를 얻을 수가 있었다. 지면관계상 모든 실험결과를 수록할 수가 없으므로 대표적인 결과만을 검토하기로 한다.

그림 6에서는 제 2번 흡입관 (표 1)에 대해서 4.8V와 5.2V (표 2)때의 정압을 나타낸 것이다. 4.8V의 경우에는 0.7 psid 정도의 차압 (대기압으로 부터)을 나타내고 있으며 5.2V의 경우에는 0.9 psid 정도의 차압을 나타내고 있다. 제 2번 흡입관에 대하여 각 엔진회전수에 따른 정압 측정치와 이들을 마하수로 환산한 것을 표 4에 나타내었다. 정압의 경우에는 6개의 레이크 날개에서 측정된 수치가 서로 유사하며 각 레이크 (Rake) 날개마다 꽂힌 6개의 정압탐침 (그림 1, 2) 사이에서도 서로 그 값이 동일하다. 정압측정시에는 스캐니 밸브 (scani-valve) 를 자동 (Auto) 으로 작동시켰으므로 탐침 1개당 1/30씩 측정 (scan) 하게 된다. 탐침 6개 (레이크 날개 1개)를 측정 (scan) 한 후에는 스캐니밸브상에 2 구멍을 비워두었기 때문에 2/3초 간은 대기압으로 돌아가게 된다. 그림 6에서 밸브상에 비워둔 2개의 구멍을 지날때 압력이 완전히 대기압으로 돌아오지 않고 약 0.1 psid 이하의 오차를 보이는 것은 압력변환기등의 계기오차인것으로 보인다. 반복 측정을 해본 결과 레이크의 위치에 따라서 0.05 psid 정도의 비정상 (unsteady)요동이 있을 수 있음을 관찰하였다.

전압 (total pressure) 분포의 측정을 위해서는 전압 탐침 (pitot tube) 을 제작하여 36개 (각 레이크 날개마다 6개씩)를 장치하였다. 전압측정시에는 측정치의 시간에 대한 진동이 있었기 때문에 자동측정 (Auto-scan) 을 못하고

스캐니 벨브를 초 간격으로 수동으로 작동하였다. 그림 7은 제 1번 흡입관의 경우 5.94V (최대엔진회전수 상태)에서의 전압측정결과이다. 가로 한눈금(약 1.5 cm)이 초간 한개의 전압탐침의 압력을 나타내며 세로 한눈금은 대기압으로부터의 절대압력차로서 0.1 psid 를 나타낸다. 각 레이크에서 6개의 탐침을 지나면 2개의 대기압관을 지나며 각 레이크에서 제 1번 탐침이 가장 바깥벽면에 근접해 있으므로 항상 큰 압력차를 보인다. 이것은 벽면 부근에 발생하는 흐름의 바리 때문일 것이다. 그림 7의 경우에는 제 5번과 6번 레이크 날개의 출력이 나타내지 않았다. 스캐니벨브의 작동 결함으로 출력이 나타나지 않았기 때문이다. 제 1번 흡입관의 경우에는 벽면부근을 제외하고는 전압차가 매우 적은 것을 알수가 있다.

그림 8은 제2번 흡입관에 대한 최대엔진회전수의 경우 전압분포를 보여 주고 있다. 역시 벽면 부근을 제외하고는 전압차가 적음을 관찰할수가 있다. 그림 9에서 제 3번 흡입관의 경우는 입술이 얇은 경우이다. 레이크 제3번과 4번, 6번의 경우 상당히 중앙부분으로 전압차가 전파된것을 볼수가 있다. 그러나 그 값은 0.2 psid 정도로서 최대허용한계인 1.136 psid에는 훨씬 못미치는 것을 알수 있다. 그림 10은 제 4번 흡입관($A_{th}=117.74$, thick lip, 표 1 참조)의 경우로서 제 3번 레이크 날개에서는 약 0.3 psid 정도의 전압차가 네번째 탐침까지 퍼져 나온것을 볼수가 있다. 제 5번 흡입관은 제 4번 흡입관보다 입술(lip)이 얇아진 경우로서 그림 11에서 보는 바와 같이 0.4 psid 정도의 전압차를 보여 주고 있다. 다른 관에 비해서 목면적이 가장 작은 제 6번 흡입관의 경우에는 입술이 두꺼운 영향때문인지 전압편차가 관의 중앙부분으로 크게 전파되고 있지는 않으나 벽면 부근에서의 전압차는 매우 크며, 특히 제 1번과 5번, 6번 레이크 날개가 심한 것을 볼수가 있다. 제 1번 레이크의 경우 첫번 탐침에서는 최대 0.8 psid 의 전압편차가 측정된 것을 알수 있다.

이상에서 본 바와 같이 흡입성능은 전압편차의 측정으로 어느 정도 판단할수가 있으며 특히 순항시에는 전압편차가 적어야 항속거리를 최대로 할수가 있다. 참고문헌 11에는 엔진성능에 미치는 전압편차의 영향이 설명되어 있으며 전압편차가 있는 경우에도 정압은 일정한 값을 가질수 있음을 말해 주고 있다. 여기서는 지상정지 흡입실험에 있어서 최대엔진 회전수의 경우만을 제시하였으나 실제 실험은 최저엔진 회전에서 부터 6가지의 경우를 모두 수행하였으며 그 결과를 분석하였다. 일반적으로 엔진회전수가 적어질수록 전압편차는 현저히 감소된다.

4. 결론

본 실험의 결과 제 6번 흡입관까지도 충분히 지상정지흡입상태에서 최대엔진회전수를 날수 있음을 알수 있었다. 또한 목면적과 입술두께의 전압편차에 대한 영향을 관찰할수가 있었다. S형 엔진 공기 흡입관의 설계에 있어서 지상 흡입성능을 염려하여 지나치게 설계점 마하수를 순항속도보다 낮추어 잡음으로서 목면적이 필요 이상으로 커질 수가 있다.

이러한 경우에는 순항시에 유출항력(spillage drag)이 증가하여 항속거리를 단축하게 하는 요인이 된다. 따라서 금번의 지상흡입 성능 실험은 무인기 설계에 있어서 엔진공기 흡입관의 목면적의 최소허용치를 판단하는데에 중요한 자료를 제공할수 있게 되었다. 만약 엔진의 형상이나 특성이 달라지거나 크기(scale)가 달라질 경우에는 여기 제시된 자료가 그대로 적용될수는 없을 것이다. 최적 설계된 흡입관은 순항조건에서는 전압편차가 최소화 되어야 하며 이를 위해서는 벽면 바리를 최대한 억제하는 설계가 되어야 할 것이다.

References

- Hawkins, J.E., "YF-16 Inlet Design and Performance," Journal of Aircraft, Vol.13, June 1976, pp. 436-441.
- Betremieux, F., "TRI 60-2 S-Shaped Duct Air Intake Integration Design Considerations," Micro-Turbo Company, England, Tech. Note 928/85/111, Aug. 10, 1985.
- Imfeld, W.F., "Development Program for the F-15 Inlet," Journal of Aircraft, Vol.13, April 1976, pp. 286-291.
- Nicolai, L.M., "Fundamentals of Aircraft Design," University of Dayton, 1975, pp. 16:1-17:23.
- Luidens, R.W., Stockman, N.Q., and Diedrich, J. H., "An Approach to Optimum Subsonic Inlet Design," NASA TM-79051, N79-12020, March 1979.
- Brunner, D.W. and Marshall, F.L., "Development of the Integrated Propulsion System for the ACM-86A Air Launched Cruise Missile," AIAA Paper 76-916, AIAA Aircraft Systems and Technology Meeting, Dallas Texas, Sep. 1976.
- Gunnarson, D.W. and McArdle, J.C., "Inlet and Duct for the QSRA Boundary-Layer Control System," Journal of Aircraft, Vol.16, May 1979, pp.303-308.
- COSMIC Program LEW-13278, "Computer Programs for Calculating 2-Dimensional Potential Flow in and about Propulsion System Inlets," The University of Georgia, 1980.
- COSMIC Program LEW-11097, "Fortran Program for Calculating Compressible Laminar and Turbulent Boundary Layers in Arbitrary Pressure Gradients," The University of Georgia, 1978.
- "86 Research Report of Aerodynamic Analysis and Wind-Tunnel Test Technology," AESD-501-87153, ADD, 1986.
- Seddon, J. and Goldsmith, E.L., "Intake Aerodynamics," AIAA Education Series, Air Force In-

stitute of Technology, WPAFB, Ohio, 1985.

표 1. 6개 흡입관의 주요 제원 비교

Duct No.	목면적 (cm ²)	단반경 (cm)	장반경 (cm)	입출두께 (cm)
1	151.38	5.810	8.294	2.433
2	132.39	5.081	8.294	2.433
3	132.39	5.081	8.294	1.473
4	117.74	4.519	8.294	2.433
5	117.74	4.519	8.294	1.473
6	100.92	3.873	8.294	2.433

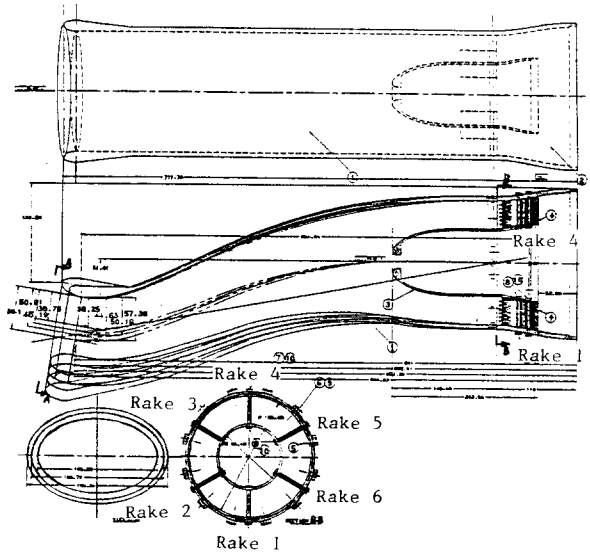


그림 1. S형 공기흡입관의 형상

표 2. 압력계 표시전압과 엔진회전속도 (RPM)의 관계

표시전압(V)	엔진 RPM	비 고
4.0	27,000	Idle
4.4	29,700	
4.8	32,400	
5.2	35,100	
5.6	37,800	
6.0	40,500	Max.

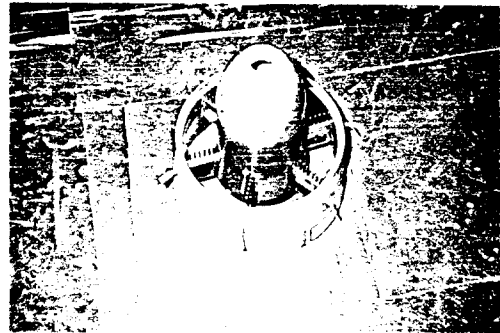


그림 2. 6개의 레이크 날개를 가진 측정 장치

표 3. 목면적 (A_{th}) 과 흡입유량 (\dot{m})에 따른 목(throat) 마하수의 변화

\dot{m} (lbm/s) A_{th} (cm ²)	2.85	3.2	3.6	4.05	4.55	5.05
84.1	.406	.472	.559	.687	1.003	1.075
100.92	.327	.375	.434	.508	.607	.749
117.74	.276	.313	.359	.414	.482	.560
134.56	.238	.270	.308	.352	.405	.463
151.38	.210	.238	.270	.308	.352	.399

표 4. 제2번 흡입관의 정압측정치와 환산된 마하수

표시전압(V)	정압측정치(차압)	1- P/P ₀	마하수
4.0	0.4	0.9728	0.223
4.4	0.52	0.9646	0.255
4.8	0.7	0.9524	0.298
5.2	0.9	0.9388	0.340
5.6	1.2	0.9184	0.395
6.0	1.5	0.8980	0.442

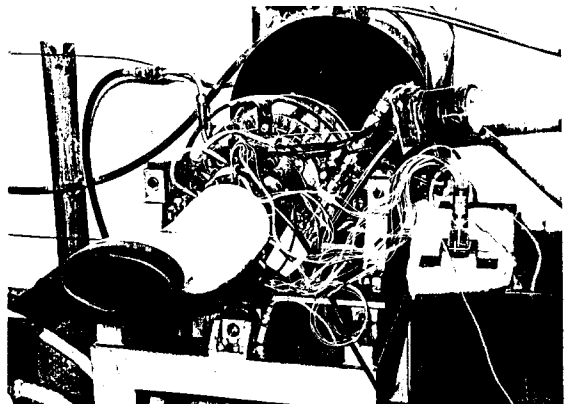


그림 3. 실험장치 전체 형상

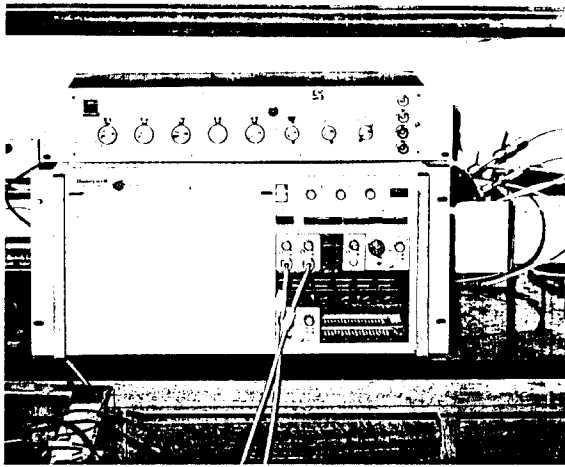


그림 4. Visicoder 기록계

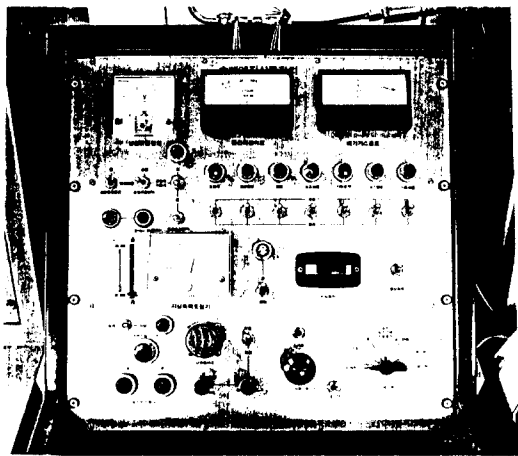


그림 5. 터보 제트 엔진의 제어판 (Control Panel)

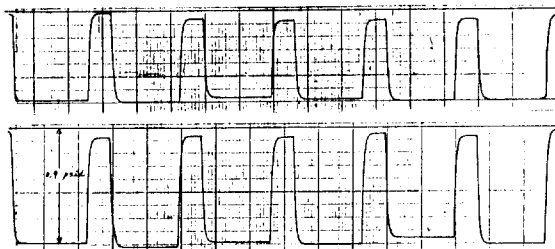


그림 6. 정압 (Static Pressure) 측정결과
(제 2번 흡입관, 4.8V와 5.2V)

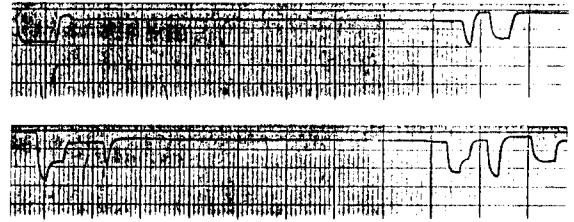


그림 7. 전압편차분포 (제 1번 흡입관, Max. RPM)

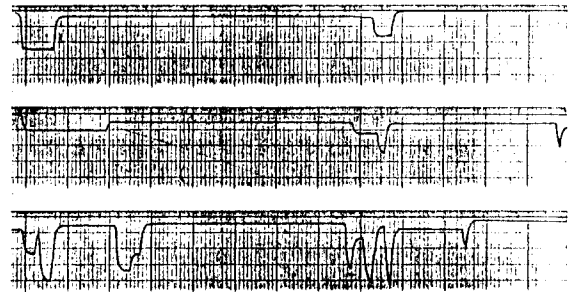


그림 8. 전압편차분포 (제 2번 흡입관, Max. RPM)

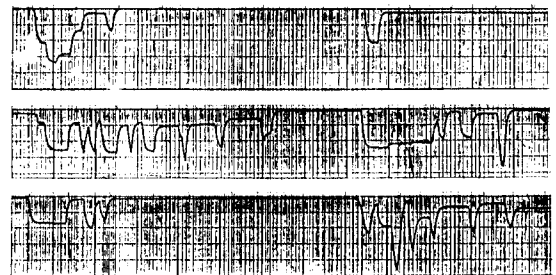


그림 9. 전압편차분포 (제 3번 흡입관, Max. RPM)

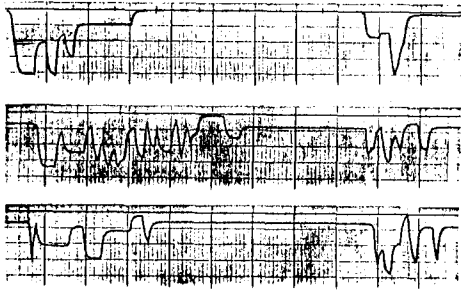


그림 10. 전압표차본포 (제 4번 흡입관, Max. RPM)



그림 11. 전압표차본포 (제 5번 흡입관, Max. RPM)

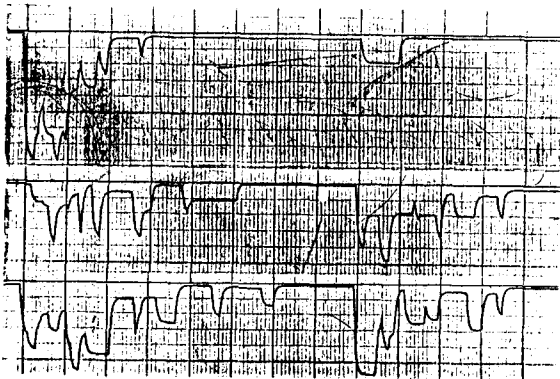


그림 12. 전압표차본포 (제 6번 흡입관, Max. RPM)