한국가시화정보학회지, 제7권, 제1호, (2009) 29~34
<일반논문> (투고일: 2009.04.24/수정일: 2009.06.10/심사완료일: 2009.07.21)

180도 원형 곡관에서 유동소음에 대한 실험적 연구

장태현† · 이상배*

An Experimental Study on flow Noise in a 180 Degree Circular Tube

Tae-Hyun Chang and Sang Bae Lee

Abstract. During the past three or four decades, the characteristics of turbulent flow have been studied extensively because of their scientific and academic importance. This research deals with the periodic flow oscillation without swirling flow in a 180 degree circular tube using hot wire anemometry, microphone and accelerometer. The frequency regions are observed through the structured oscillation from spectrum. This work carried out to measure the sound level for each Reynolds number, 6×10^4, 8×10^4 and 1×10^5 respectively at the test tube without swirl flow.

Key Words: flow noise(유동소음), microphone(마이크로폰), flow oscillation(유동의 떨림)

1. 서 론

유동방향으로 곡률이 존재하는 특이한 기하학적 형상을 가진 곡관내의 유체유동은 곡관입구에서부터 3차원적으로 강한 유동이 발생하여 곡관 후류 부분에까지 존속하게 된다. 이러한 유동의 구조는 마찰계수 및 Nusselt 수와 같이, 국소유동변수의 변화에 관한 지식은 설계자가 산업적 기계요소를 설계함에 있어 최적화적 관점에서 중요한 의미를 부여한다. 에너지 이용 측면을 매우 중요하며 많은 연구가 되어왔다.

따라서 대류 열전달을 향상시킬 수 있는 방법들이 여러 방면으로 제시 되었는데, 예를 들면, 인공조도의 활용, 열전달 면에 나선형 표면의 제작 또는 와이어 코일을 만들거나 핀을 이용한 것들은 전열 면을 증가시킴으로서 열전달 향상을 도모할 수 있었다. 그러나 180도 곡관에서 유체유동은 직관에서 보다 매우 복잡하여 층류유동에서 조차 그 예측은 쉽지 않았다. 내부유동에서 최초의 연구는 Thomson[1]에 의해서 이루어졌다.

그는 굽은 강에서의 물의 흐름에 대한 굴곡 개수로 유동에 관심이 있었고, 원심력과 경계층 지역에서 천천히 움직이는 유체사이의 상호작용이 2차유동을 유도한다는 현상을 이론화하였다. Eustice[2]는 광범위한 유동가시화작업을 시행하여 굴곡률이 다른 여러 유리관을 통하여 넓은 Reynolds 수의 범위로 실험하였다. Eustice[2]의 실험 결과를 이용하여 Dean(3)은 곡관내의 유동을 해석적으로 연구하였다.

Ito[4]는 Eustice[2]와 Dean[3]의 연구결과를 비교하였고, 나아가 실험적인 측면을 고려하였다. Agrawal et al[5]은 곡률비 7, 20의 두 원형 관에서 층류유동에 대한 연구를 수행하였고, 곡관을 가로지르는 많은 유적선을 따라 속도를 측정하였다. LDA(Laser Doppler Anemometry)를 이용한 실험은 Mullin et al[6], Humphrey et al[7], Enavet et al[8]에 의해서 연구가 이루어져 원형단면이나 사각단면 곡관에서의 속도분포 자료가 제시되었다.

Iacovides[9]는 곡률비 6.75의 원형단면 곡관에서 피토관을 이용하여 실험하였고, 수치해석 결과와 비교하였다. 유동장내의 유속측정은 LDA혹은 피토관 그리고 열선풍속계가 사용되었고, 이에 대한 연구로는, Sudow[10]는 곡률비 2.0의 사각닥트로 된 90도 곡관에서 평균속도에서 방향성분을 측정하였다. 최근에 와서 입자영상 유속계의 등장으로 Chang et al[11]은 90도 곡관에서 물의 속도 성분을 PIV 기법으로 계측하였다. 그러나 180도 곡관에서의 연구 결과는 드물고 더욱이

†한국과학기술정보연구원 전문연구위원
E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr
*대구공업대학 자동차과

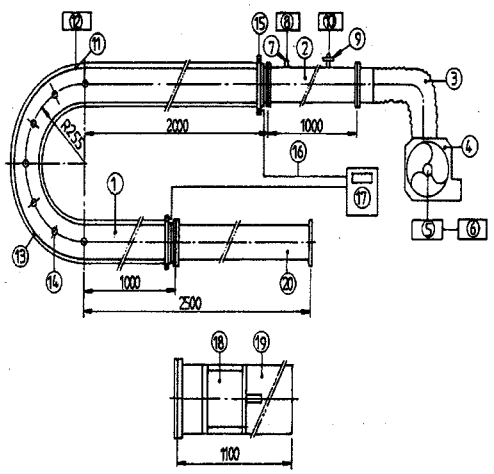
유동 소음에 관한 결과는 더욱 드물다. 이상의 경우와 같이 대부분이 직관이나 확대 관에서의 연구이었고, 곡관에서 선회유동의 떨림에 관한 연구는 드물다. 본 연구에서는 원형 단면을 갖는 180도 곡관의 전후에서 열선풍속계와 마이크로폰과 가속계를 이용하여 비 선회유동에 의한 주기적 떨림 현상을 주파수 응답을 통하여 스펙트럼(spectrum)으로 나타내고 구조적 진동을 발생시킬 수 있는 주파수 영역을 관찰하였다.

2. 실험장치

2.1 전체적인 실험장치

본 연구에 사용된 전체적인 실험 장치는 Fig. 1과 같다. 시험관 내경은 54.5 mm, 두께3 mm인 스테인리스(SUS 304)를 고주파 밴딩 방법을 이용하여 굽힘 반경 Rb=255 mm로 제작하였다. 따라서 180도 곡관부의 곡률비(Rc=Rb/r)는 9.4이다. 비 선회유도인 경우는 충분히 발달된 유동(fully developed flow)을 얻기 위하여 상류 부분을 50D를 추가 연결하였다.

시험관 출구에는 ϕ50×L1000 mm의 관을 부착하여 multi-pitot tube와 경사 마노미터를 사용하여 Reynolds 수를 계측하도록 제작하였다. 이관은 유연한 호스(flexible hose)로 흡입 팬까지 연결하여 공기가 계속적



1) Test tube (φ54.5)
2) Steel tube
3) Flexible hose
4) Turbo fan
5) Motor (220V×10HP)
6) R.P.M. controller
7) Pitot tube
8) Electronic manometer
9) Multi-pitot tube
10) Inclined manometer
11) Thermocouple (K-type)
12) Thermometer(HR2500)
13) Insulation
14) Measureing hole(φ3)
15) Copper connector
16) Lead wire(φ30)
17) Voltage regulator(20kW)
18) Swirl generator
19) Swirl chamber
20) Stainless tube (φ54.5)

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

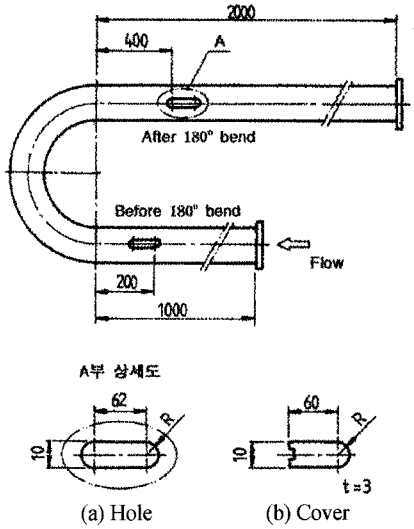


Fig. 2. Locations of measuring hole at noise experimental rig

으로 순환할 수 있도록 하였다. 흡입 팬은 220 V×10 HP로 최대회전수 3600 rpm이다. 유동 공기량의 변화는 흡입 팬의 회전수 조절기를(rpm controller)을 사용하였다.

2.2 소음 실험 장치

소음 실험 장치는 유체실험 장치를 이용하여 곡관입구 200 mm 전의 상류 부분과 곡관 출구 400 mm 뒤 후류 부분의 두 곳에 마이크로폰이나 열선풍속계를 설치할 수 있도록 가공하였다.

구멍의 크기는 밀링머신에서 직경 10 mm 엔드밀을 사용하여 길이 방향으로 62 mm로 가공하였으며 시험관에 있어서 구멍의 배치도는 Fig. 2에 나타내고 마이크로폰은 관내에 설치한 후에는 덮게 로 구멍을 가려 공기의 누설을 방지하였다.

마이크로폰이 장착된 증폭기의 전체길이는 149 mm이고 유동방향에 대하여 시험관내에서의 위치는 이송장치를 이용하여 Fig. 3과 같이 관 중앙을 중심으로 0, 5, 10, 15, 20 mm로 이송 할 수 있도록 하였다. 마이크로폰을 고정시키고, 부착하도록 하는 홀더는 직접 제작하였다.

2.3 마이크로폰

유동의 소음을 계측하기 위하여 사용한 마이크로 폰의 직경은 ϕ3.175 mm의 콘덴서 형(B&K사, Type4138)로서 초음파 고 음압 계측용이고 주파수범위는 6.5~

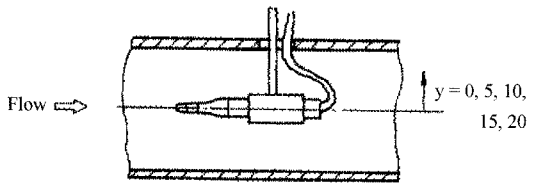


Fig. 3. Installation of microphone in the test tube

140×10^3 Hz이며 마이크로 폰의 공칭 감도는 -60 dB ref. 1 V/Pa 이다. 관내의 유동장에 마이크로폰을 설치하기 위하여 전면에 노우즈콘(nose cone), 후면에 전치증폭기(preamplifier)를 각각 부착시켜 그 출력을 전원공급기(power supply)의 입력으로 연결하였다.

따라서 출력 S(volt)와 압력 E(pascal)의 관계식은 다음과 같다.

$$E(Pa)\times e(V/Pa) = S(V) \quad (1)$$

여기서 e(V/Pa)는 마이크로폰의 보정계수 혹은 감도이다.

일반적으로 소음수준(sound level)을 나타낼 때 데시벨(decibel, dB) 혹은 데시벨 볼트(dBV)를 사용하고, 보정계수를 구하는 법과 함께 기술해 보면 다음과 같다. 식(2)은 양변을 데시벨의 기준음압 pa=20 μPa로 나누고 20log를 취하면 다음과 같다.

$$20\log\frac{E}{p_0}+20\log e(V/p_a)=20\log S(V)-\log P_0 \quad (2)$$

이를 고쳐 써보면

$$E\ (dBref.20\ \mu Pa) + e(dBref.1\ V/Pa) = S(dBV) + 94 \quad (3)$$

여기서 E는 기준 음 20 μPa에 대한 압력으로서 음압레벨(sound pressure level, SPL)이라고 하며 일반적으로 데시벨(dB)이라고 한다. 보정계수 e를 구하기 위해 본 연구에서 사용한 음압 발생기(sound generator) ((B&K사 Type4231)는 1 kHz에서 1 Pa의 음압을 제공함으로 식(1)에 의하여

$$e = 0.583\ (mV/Pa) \quad (4)$$

혹은 식(3)에서

$$e = -64.7(dB\ ref.\ 1V/PA) \quad (5)$$

이다. 그러므로 식(3)에 의해서 얻어진 데이터는 E(dBref.20 μPa)와 S(dB)는 "158.7"만큼 차이가 나므로 데시벨로 환산하면 "158.7" 만큼 더하여 읽었다.

3. 결과 고찰

소음은 압력의 변동성분(pressure fluctuation)으로서 음압이라고도 하며 인간이 들을 수 있는 음(sound or noise)과 듣지 못하는 음(pseudo sound)으로 구분할 수 있다. 그리고 유체 내에서 이러한 음이 진행해나가는 속도에 따라서 초음속, 음속 그리고 아음속으로 나누어진다.

$$C = \omega/k \quad (6)$$

여기서, ω는 주파수(frequency)이고, κ(=2π/λ)는 파수(wave number), λ는 파장(wave length)을 나타낸다. 또한, 음압과 주파수 응답의 스펙트럼과의 관계는 다음식으로 나타낼 수 있다.

p'_{RMS} =

$$\sqrt{P'^2}=\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau}P'^2(t)dt^{0.5}=2\int_0^{\infty}S_p(\omega)d\omega^{0.5} \quad (7)$$

특히 유동장 내부에서 발생되는 소음은 아음속 영역이 큰 비중을 차지하고 이영역의 소음은 전파(propagation) 가 되지 않고 주 유동에 따라 전달(convection)되어 감으로 음압레벨은 상당히 낮지만 구조물의 진동을 유발할 수 있음으로 설계상에서 고려되어야 할 부분이다.

3.1 유동의 떨림

마이크로 폰을 이용하여 시험관 내에서 발생하는 소음(noise)을 측정하면 여러 요인에 의한 복합적인 현상이 발생하게 된다. 시험 장치에서 발생되는 소음은 송풍기에서 나타나는 실험장치 구조물의 진동(structure vibration) 에 의한 소음, 주위의 소음 그리고 유동 진동에 의한 소음으로 분류될 수 있다. 여기서 실험에 필요한 부분은 유동 진동에 의한 소음 만이다.

주위의 소음은 마이크로 폰을 시험관에 두고 측정하여 파형을 분석하고 송풍기에 의한 시험관 진동 즉 마이크로폰의 흔들림에 의한 파형은 가속도계를 컨넥트 위에 설치하여 파형을 측정하면 마이크로폰의 결과에서와 같은 특성이 나타나는데 바로 이들의 특성으로 간주하고 제외하면 유동에 의한 소음만이 남게 된다.

유동의 주기적 떨림만을 측정하기 위해서는 열선풍속계로 파형을 측정하여 분석하였다. 이러한 전반적인 측정에 의해서 필요한 실험 결과를 구할 수 있었다.

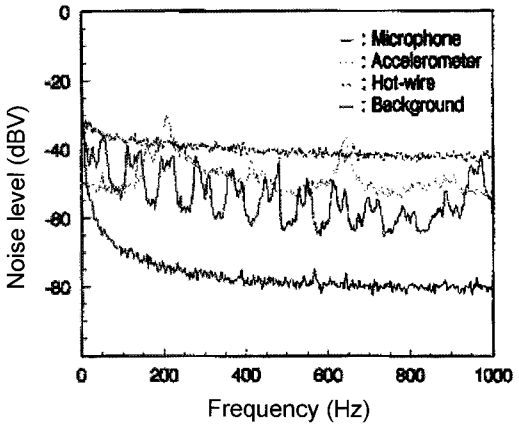


Fig. 4. Background noise spectra

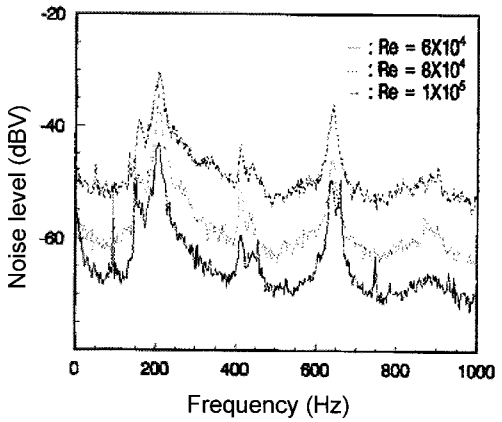


Fig. 5. Response of vibration measured by using acceleromoter for y/r=0.37 without swirl

Fig. 4는 마이크로폰을 이용하여 시험관의 외부에서 배경소음을 측정한 것으로 주파수의 함수로서 도시하였다. 여기서 주위 소음의 수준(level)은 Re 수가 증가함에 따라 증가하는 현상을 보이고 있음을 관찰할 수 있고, 특정 주파수에 의존성이 없음을 볼 수 있었다.

Fig. 5는 비 선회유동의 경우로 마이크로폰 케넥터(connector) 위에 설치된 가속도계의 진동특성에 대한 주파수응답으로서 각 Re 수의 경우 모두 200 Hz, 400, 640 Hz에서 특성이 쉽게 관찰되며 이 현상은 구조물의 구조진동으로 보이고 배경소음(background sound)의 경우와 마찬가지로 Re 수가 증가함에 따라 진동수준도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 비 선회유동의 경우로서, Re = 8×10^4인 경우 곡관부의 상류지점에서 소음 수준을 반경방향의 거

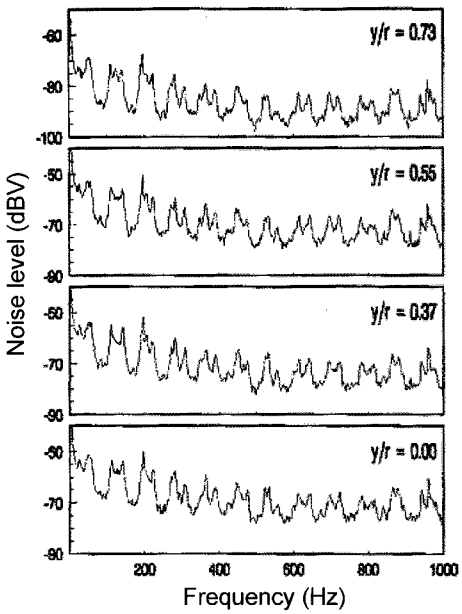


Fig. 6. Flow noise measured by using microphone before 180° bend without swirl for Re=8×10^4

리에 따라서 주파수 함수로 표시한 것으로 관 전체에서 일정한 주기적 소음이 존재함을 볼 수 있었다.

여기에서 나타나는 소음 수준은 전 주파수 대역에 걸 쳐 배경소음에 의해서 약 20~30 dB 정도 높은 값을 보이고 있다.

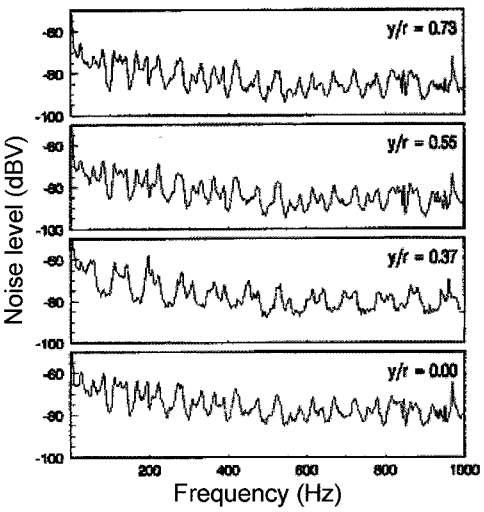


Fig. 7. Flow noise measured by using microphone after 180° bend without swirl for Re=8×10^4

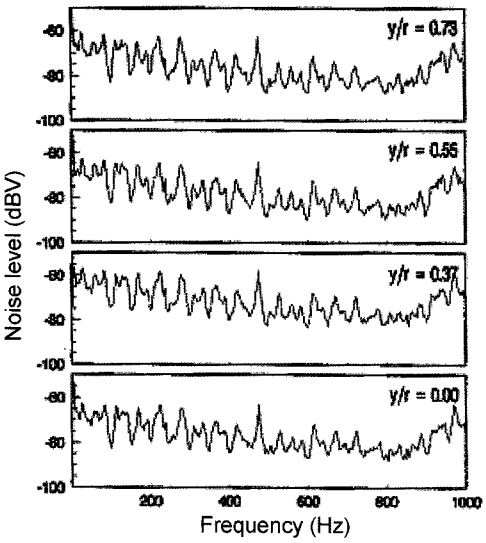


Fig. 8. Flow noise measured by using microphone after 180° bend without swirl for Re=1×10^5

송풍기 출구의 개방으로 인하여 발생되는 주기성에 가까운 여러 피크들은 관내부에 존재하는 음향학적 소음에서 기인된다고 생각된다. 이는 Stahl et al의 실험과의 거의 일치함을 볼 수 있었으며 실험의 신뢰도를 향상 시킬 수 있었다.

Fig. 7은 Re = 8×10^4이고 비 선회유동의 경우 곡관을 지난 하류 400 mm 지점에서 소음 수준을 표시한 것으로 상류부분에서 측정한 Fig. 6과 거의 비슷한 수준의 소음을 보이고 있다. Fig. 8의 Re = 1×10^5 인 경우는 높은 Re 수의 영향으로 인해 주파수 460 Hz 부근에서 특이한 소음 형태가 나타나고 있다.

4. 결 론

1. 배경소음은 각 Re 수에 따라 주파수의 함수로서 도시하였다. 주위 소음의 수준(level)은 Re 수가 증가함에 따라 증가하는 현상을 보이고 있음을 관찰할 수 있고, 특정 주파수에 의존성이 없음을 볼 수 있었다.

2. 가속도계의 진동특성에 대한 주파수응답으로서 각 Re 수의 경우 모두 200 Hz, 400 Hz, 640 Hz에서 특성이 쉽게 관찰되며 이 현상은 구조물의 구조진동으로 보이고 배경소음(background sound)의 경우와 마찬가지로 Re 수가 증가함에 따라 진동수준도 증가함을 알 수 있다.

후 기

본 논문 자료는 교육과학기술부의 기금사업으로 한국과학기술정보연구원 고경력 과학기술인을 활용한 기술정보분석사업의 성과를 발표합니다.

참고문헌

1) Thomson J., 1876, "On the winding of river in alluvial planic, with remarkables on the flow of water round bend in pipe", Proc. K. Soc. London Ser. A25, pp. 5-8.
2) Ellustice, I.,1911, "Flow of water in curved pipe", Proc. K. Soc. London Ser. vol.85A25, pp. 119-131.
3) Dean, W. R., 1928, "The streamline motion of fluid in a curved pipe", Philos Mag, vol. 30, pp. 673-693.
4) Ito, H., 1960, "Pressure losses in smooth pipe bends", J. of basic engineering pp. 131-139.
5) Agrawal, Y., 1987, Talbot L., and Gong, K., "Laser anemometer study of flow devcelopment in curved circular pipes", J. fluid Mech., vol. 85, pp. 497-518.
6) Mullin, T. and Greated C. A., 1980, "Oscillatory Flow in a Curved Pipe, Part 1: The Developing Flow Case", J. Fluid Mech. Vol. 98, Part 2, pp. 383 -395.
7) Humphrey J. A. C., 1981, Whitelaw J. H. and Yee G., "Turbulent flow in a squre duct with strong curvature", J. Fluid Mechan., Vol. 103, pp. 443-457.
8) Enayet M. M., and Yianneskis, M., 1982, "Measurement of turbulent developing flow in a moderaterly curved square duct", Int. J. Heat & Flow, Vol. 3, No.4, pp. 221-224.
9) Iacovides H. 1986, "Momentum and heat transfer in flow through 180° bend of circular section", Ph.D Thesis, University of Manchester.
10) Sudo K., Sumida, M., and Yamaane, 1991, "Secondary motion of fully developed oscillatory flow in a curved pipe", J. Fluid Mech., Vol. 237, pp. 198-289.
11) Tae-Hyun Chang and H. S. Lee, 2003, "An experimental study on swirling flow in a 90 degree circular tube by using particle image velocimetry", J. of Visualization, Vol. 6, No. 4, pp. 343-352.
12) Vonnegut B., 1954, "A vortex whiltle", J. Acoust. Soc. Smer., Vol.26, pp. 18-25.
13) Chanaud R. C., 1965, "Observation of oscillatory motion in swirling flows", J. of fluid mechanics,

ASME, Vol.21, pp.111-127.

14) Cassidy J. J.,and Falvey H. J., 1970, "Observations of unsteady flow arising after vortex breakdown", JFM, Vol. 41, pp. 727-736.

15) Lebovich S., 1978, "The structure of vortex breakdown", Ann. Rev. Fluid Mech, Vol. 10, pp. 221-246.

16) Garg A. K., and Leibovish S., 1979, "Spectral characteristics of vortex breakdown flow field", Phys. fluids, Vol. 22, pp. 2053-2064.

17) Batch Thien Vu, 1983, "Experimental study of turbulent swirling flows", PhD. Thesis, Cornel University.

18) Stahl B., and Michalke, 1985, "On noise generated by turblence in a pipe downstream of a discountinous area enlargement", Aero and Hydro-Acostics JUTAM Symposium Lyon, pp. 385-392,