21303 管内を伝播する衝撃波強さの測定

Measurement of Strength of Shock wave Propagating in Tube

○ 准 鳥海 津太 (元都立高専)
非 山崎 敬則 (小山高専)

正 遠藤 正樹 (都立高専)
正 岩本 順二郎 (東電大)

Shinta TORIUMI, Graduated from Tokyo Metro. College of Tech., 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo
Masaki ENDO, Tokyo Metropolitan College of Technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo
Takanori YAMAZAKI, Oyama National College of Technology, 771 Nakakuki Oaza Oyama Tochigi
Junjiro IWAMOTO, Tokyo Denki University, 2-2 Kanda-Nishikicho, Chiyoda-ku, Tokyo

In this paper, Mach number of shock wave propagating in a pipe is estimated by techniques using an average velocity of shock, a pressure history, etc., and these results are compared to each other. Mach number obtained from average velocity of the shock propagating between two stations along the pipe is underestimated. In order to get the pressure jump across the shock, the pressure history using a pressure transducer is in general filtered, so that the shock wave is smeared out and it is difficult to evaluate a local Mach number at a certain station. A dynamic characteristic of the pressure transducer is examined and a step response of pressure is utilized to obtain the local Mach number.

Keywords: Shock Wave, Pipe Flow, Pressure Wave, Flow Measurements, Filter, Shock Mach Number, Dynamic Characteristic, Shock Tube

1. 序 論

管内を伝ばする衝撃波の強さは、一般的に伝ば速度によって見積られる。伝ば速度の測定方法には、任意の二点間を衝撃波が通過する時間を求め、衝撃波の速度を算出する二点間計測⁽¹⁾と、圧力変換器から測定された圧力履歴にローパスフィルタを施し、衝撃波通過前後の圧力比を求め、衝撃波マッハ数を算出する方法が挙げられる。しかし、二点間計測で得られる衝撃波伝ば速度は任意の二点間の平均値であり、また、ローパスフィルタを施した圧力履歴からは、衝撃波通過直後の瞬間的な圧力履歴を読み取るのは困難である。そこで本研究で圧力変換器の動特性を考慮した局所的な衝撃波マッハ数の測定を試みた。

2. 実験装置および実験方法

本研究で使用する実験装置の概略図を図1に示す。図1の中の衝撃波管は内径50mmの円管で、内部に内径25mmの測定用の円管(以下、測定管)を衝撃波管とは触れないように二重に設置されている。衝撃波管は隔膜を隔て、長さ約500mmの高圧側と長さ約1mの低圧側に分かれている。低圧側は大気解放で、その中の測定管は上流の管端が隔膜から100mm程度下流になるように設置されている。この設置方法は破膜時の機械的振動が圧力変換器に影響しないようにするためである。測定管の両端は大気解放になっており、上流の管端は衝撃波到達時の衝撃を抑えるために、外側の角を切り落としてある。測定管の下流側には下流の管端から上流に向けて300mm毎に圧力測定孔が設けてあり、上流側から順にT, A, B, Cとする。各測定孔には、豊田工機製の半導体小型圧力変換器(PMS-5)が取り付けられており、圧力変換器の一次共振周波数はカタログ値で40kHz以上である。圧力測定孔の直径は6mmで、そこに直径5mmの圧力変換器が取り付けられており、受圧面が管の内壁に沿うように設置されている。隔膜には、厚さ1mmのアセテートフィルムと厚さ0.024mmの普通セロファンを使用する。コンプレッサで圧縮された空気は、高圧タンクを通り、途中の玉型弁(VALUE 2)で流量を調整され衝撃波管へと

Fig. 1 Experimental Apparatus

流入する。衝撃波管の高圧側の圧力をマノメータで確認し、任意の初期圧力 p_h に達したとき、ニードルで破膜する。破膜により発生した衝撃波が、衝撃波管から測定管へと伝ばしていき、圧力測定孔 T を通過すると、それをトリガ信号としてすべての測定孔で測定を開始する。測定された電気信号は100kHz(-3dB)のローパスフィルタを内蔵するDCアンプによって増幅され、サンプリング周期0.1μsのA/D変換ボードを介してパソコンに取り込まれる。取り込まれたデータは各圧力変換器の静的な検定結果をもとに圧力へと換算される。測定点AからCまで衝撃波が伝ばするのに要する時間 t_{AC} は点AおよびCで測定された圧力履歴より算出する。点AC間の距離 x_{AC} および、測定管内の初期温度における音速 c を用いると、点AC間を伝ばする衝撃波の強さに相当する平均衝撃波マッハ数 M_{AC} は式(1)となる。

$$M_{AC} = \frac{x_{AC}}{t_{AC} \cdot c} \quad (1)$$

3. 結果および考察

点AC間の中間点Bでの測定結果の一例を図2に示す。図において横軸は時間、縦軸は無次元圧力である。また、図中の p_1 は大気圧 p_a に等しい。図に示した振動を伴った圧力履歴が圧力変換器の実測波形で、太線がその実測波形を25kHzのローパスフィルタに通した後の圧力履歴である。

Fig. 2 Pressure History (Nonfiltered vs Filtered)

Fig. 3 Mach Number M_{BF} vs M_{AC}

このローパスフィルタ後の圧力比 p_2/p_1 から式 (2) で求めた衝撃波マッハ数を M_{BF} とする。

$$M_{BF} = \sqrt{\frac{\kappa+1}{2\kappa} \frac{p_2}{p_1} + \frac{\kappa-1}{2\kappa}} \quad (2)$$

ここで κ は比熱比で 1.4 である。図 2 に見られるように、衝撃波到達後の圧力 p_2 には Δp 程度の変動が含まれている。マッハ数に換算すると $\Delta M = 0.0034 \sim 0.015$ となるが、点 B における局所的な真の衝撃波マッハ数には、点 AC 間の平均値をとる M_{AC} よりも M_{BF} が近いと考えるので、本研究では M_{BF} を基準に考察を行う。

各初期圧力をもとに M_{BF} と M_{AC} の比較を行った。その結果を図 3 に示す。この図より M_{AC} が M_{BF} よりも低い値になっていることがわかる。これは測定孔 AC 間での衝撃波の減衰に起因すると考えられる。無次元の初期圧力 3.9 付近ではマッハ数で 0.025 程度の著しい差が見られる。

圧力変換器の動特性を一次共振だけに着目し、バネ-マス-ダンパ系のモデルであると仮定すると、圧力変換器の実測波形の振幅は、圧力変換器を衝撃波が通過した前後の圧力 $p_1 \rightarrow p_2$ のステップ高さに比例するので、式 (2) より式 (3) の関係が得られる。

$$\frac{p_2'}{p_a} = 1 + \frac{2\kappa}{\kappa+1} (M_{BF}^2 - 1)\alpha \quad (3)$$

ここで、 α は比例定数であり、圧力変換器固有の値である。この仮定の上で、測定孔 B における振幅の最初の山と谷、二番目の山の値 p_2' を調べた。 M_{BF} に対する p_2' の分布を図 4 に示す。図中の実線は式 (3) を最小二乗法で各測定値に適用した結果である。この結果より M_{BF} と p_2' の振幅とが式 (3) の関係にあり、また、式 (3) の関係において α を求められ

Fig. 4 Characteristic from Pressure History at Point B

Fig. 5 Mach Number $M_{B\alpha}$ vs M_{AC}

ば振動を伴う実測波形から、衝撃波マッハ数を求められることがわかる。今回求められた二番目の山の α と、点 B の実測波形における二番目の山の値を式 (3) に代入し、衝撃波マッハ数 $M_{B\alpha}$ を求め、二点間計測による M_{AC} と比較した。その結果を図 5 に示す。図より二点間計測の M_{AC} よりも、今回提案した一点の実測波形による算出法 $M_{B\alpha}$ の方が高精度であることがわかる。よって、本方法を用いれば、衝撃波の背後に圧縮波や膨張波を伴うような複雑な流れ場であっても衝撃波強さの測定が可能であると考えられる。

4. 結 論

- (1) 測定孔 AC 間の二点間計測での衝撃波マッハ数は、測定孔 B の圧力比から求めた衝撃波マッハ数よりも小さい値となる。それは測定孔 AC 間の衝撃波の減衰に起因する。
- (2) 式 (3) における α を求めることで、一点における実測波形からでも衝撃波マッハ数を求めることが可能である。
- (3) (2) の測定方法はローパスフィルタを用いないため、複雑な流れ場での測定にも応用できると考える。

参 考 文 献

- (1) T. Minota, et al., "Shock/Vortex interaction in a flow field behind a shock wave emitted from a shock-tube", Proceedings of 2nd International Workshop on Shock-Vortex interaction, (1998).