油を作用流体とする層流形比例素子の特性

村尾卓爾*・愛島義昭*・片山 徹*
David N. WORMLEY**, 富田幸雄***・関 二郎****

Characteristics of Laminar Proportional Amplifier Operated with Hydraulic Oil

Takuji MURAO*, Yoshiaki KOKOSHIMA*, Tohru KATAYAMA*
David N. WORMLEY**, Yukio TOMITA*** and Jiro SEKI****

1. ま え が き

層流形比例素子 *Laminar proportional amplifier* (以後 LPA と呼ぶ) については既に多くの研究があり、我が国でも試作の報告^{1,2)}がある。ここでは作用流体として油圧油を用いた場合の Harry Diamond Laboratories 製の LPA の特性について報告する。油を使用した場合の LPA の一般的な特性については、比較的低い周波数の入力信号の場合に、Kelley ら³⁾ 及び Lee ら⁴⁾ の報告がある。今回は比較的小さなアスペクト比の素子の特性を入力周波数が高い領域まで調査した結果を報告する。入出力特性、出力特性、周波数特性、ゲイン、圧力回復率を調べた結果、粘性が大きな作用流体の場合にも小さなアスペクト比の素子が実用となりうる事が明らかとなった。また、Drzewiecki⁵⁾ による LPA 特性解析用プログラム (以後 CAD プログラムと呼ぶ) を素子特性の推計手段として援用し、計算値を特性の予測値として実測値と比較する。なお、CAD プログラムを使用するに際して、Interpretive structural modeling 法 (ISM

法) を用いてプログラムの構造を解析し、構成因子となる素子の形状・寸法及び油の物性値と特性の関係を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試素子

供試 LPA の見取図を Fig. 1 に示す。型式は標準的な 3.1.1.8 である。主要寸法を図中に示す。板厚 0.1 mm の鋼板製であり、Brass 被覆である。主ノズル中心軸を基準にして左右の対称性がやや不正確である。2 ないし 3 枚重ねて使用した。個体差は検討していない。

2.2 作用油、ノズルの流量係数、及びその他

作用油は JIS 規格 #22 である。供給圧 P_s は 2000 KPa ~ 6900 KPa の間で約 1000 KPa おきに設定し、主として 2900 KPa で種々の特性を調べた。油温としては、供給タンク内の温度と素子からタンクへ帰還する場所の温度の平均値を採用した。

主ノズルと制御ノズルの流量係数 C_d の実測値は CAD プログラムによる見積りより約 10% 大きく、低アスペクト比の影響が予想より小さい。なお、レイ

Fig. 1 Laminar proportional amplifier
 $b_s=0.53$ $B_c=0.57$ $B_t=0.60$ $B_o=0.66$
 $X_{sp}=4.15$ $X_1=0.61$ $X_o=7.1$ $X_c=5.1$
(mm)

† 第 19 回フルイデックスシンポジウムで発表
(昭 59.10)

* 愛媛大学工学部 松山市文京町 3

*** 東京理科大学理工学部 野田市山崎東亀山 2641

**** 東京都立工業高等専門学校 東京都品川区東大井 1-10-4

* Faculty of Engineering, Ehime University, Matsuyama, Ehime

** Massachusetts Institute of Technology, MA, U. S. A.

*** Faculty of Science and Technology, Science University of Tokyo, Noda

**** Tokyo Metropolitan Technical College, Shinagawa-ku, Tokyo

(Received June 17, 1985)

(Revised October 2, 1985)

Key Words: fluidics, laminar proportional amplifier, dynamic characteristics, hydraulic oil, interpretive structural modeling

Fig. 2 Minimum edge diagram

Fig. 3 Transfer characteristics

ノルズ数 N_R を $N_R = (b_s/v)\sqrt{(2/\rho)(P_s - P_j)}$ と定義する。ここで、 b_s : 主ノズル幅、 P_s : 供給圧、 P_j : ノズル出口附近の圧力、 σ : アスペクト比、 ρ : 油の密度、

ν : 動粘度である。

入力信号源としてはノズルフラップ弁を用いた。

3. 素子特性の検討

3.1 素子特性の推計

素子特性検討の補助手段として CAD プログラムを利用するに際し、素子の特性に影響する因子間の関係を調べるため、ISM 法を用いて CAD プログラムの構造を調査した。設計変数のうち主なもののみを選び階層構造図にして Fig. 2 に示す。粘性及び温度はゲイン、位相遅れ、及び入出力インピーダンス等すべての素子特性に影響することがわかる。この手法を拡張すれば、使用条件、目的に合致した素子の最適形状を決定することが容易になると予想される。

3.2 素子の特性

(1) 入出力特性 左右制御圧入力の圧力差 ΔP_c に対して求めた入出力特性の一例を Fig. 3 に示す。素子形状の非対称性のため左右出力が等しくなる時の入力圧差は零ではない。そこで出力

圧力ではなく左右出力の圧力差 ΔP_o で圧力ゲイン G_p を定義する。図に示した $P_s = 2900 \text{ KPa}$ 、 $\sigma = 0.4$ の場合には実測値は計算値よりも大きな値を示す。

(2) 出力特性 出力特性の一例を Fig. 4 に示す。計算値は噴流が素子中央に位置する状態の出力特性を示す。 $\Delta P_c = 0$ の実験値が得られなかったため計算値と正確に比較することはできないが、ほぼ同じ傾向を示す。ここで $\Delta P_o' / P_s = (\Delta P_o - \Delta P_{co}) / P_s$ であり、 ΔP_{co} は $\Delta P_o = 0$ における ΔP_o である。 $P_s = 2900 \text{ KPa}$ 、 $\sigma = 0.4$ の場合、実測によれば $\Delta P_o' / P_s = 0.038$ の状態で最も大きな出力を得ることができた。

(3) 周波数特性 $P_s = 2900 \text{ KPa}$ 、 $\sigma = 0.4$ の場合を例にとり周波数特性を Fig. 5 に示す。今回の場合に素子の帯域幅を定義することは難しいが、位相遅れが 45° になる状態を基準にすれば約 700 Hz である。従来、油を使った場合でも 200 Hz くらいまではゲインが減衰しないことが確かめられていた^{3,4)}が、今回の条件下では圧力ゲインは約 1 KHz まではほとんど減衰しないことが明らかになった。この図から明ら

Fig. 4 Output characteristics

Fig. 5 Dynamic characteristics

かなように、ゲインの減衰よりも位相遅れの方がLPAの使用範囲を制限する要因と考えられる。参考のために位相遅れについて Kirshner⁶⁾ の噴流偏向モデルを適用した計算を行った。計算の過程は省略するが結果を Fig. 5 の図中に示す。しかし、この値よりもCADプログラムによる値の方が実験値とよく合致する。

(4) アスペクト比及び油温の影響 アスペクト比を小さくすることは層流範囲を広げ、ノイズの低減に効果がある一方、圧力回復率 P_r が減少することが予想される。 $\sigma=0.4$ と 0.6 の二つの場合のゲインと圧力回復率を Fig. 6 に示す。回復圧力は出力口を全閉にした状態で求めた。 σ が小さくても比較的高い P_r , G_p を示す。しかし、測定精度が十分でなく、 G_p の σ や N_R に対する傾向を明確にすることはできなかった。作動油の粘性は温度に依存する。Manion⁷⁾ は層流範囲を $800 < N_R < 4500$ と推測している。実測によれば $N_R < 1500$ では出力は得られない。ベントベーンに衝突した流れが逆流し主流を妨害するためと考えられる。温度にすれば約 30°C 以上の油温が必要である。また、 $P_s=3900\text{ KPa}$ では試算によれば約 65°C で層流範囲を超える。常温近くでも供給圧が 6900 KPa ではノイズが大きく層流域の上限に近いと

Fig. 6 Gain and pressure recovery

考えられる。実験範囲における SN 比は測定しなかったが観察によれば問題にならない程度のものであった。なお、エッジトーンが生じる周波数を Kirshner⁶⁾ にならない見積ったところ、約 30 KHz の値であった。今回の実験範囲では無視しうる。

4. む す び

作動流体として油圧油を用いた場合の H.D.L. 製 LPA の特性を実験的に調査した。特にアスペクト比が小さい素子の入出力特性、出力特性、周波数特性、ゲイン、及び圧力回復率を調べた。(1) アスペクト比が 0.4 の場合、供給圧は 2000 KPa 以上が必要である。常温で供給圧が 7000 KPa より大きい範囲では主流は層流域を超える。(2) ゲイン、圧力回復率ともに低アスペクト比の影響は予想より小さく、低アスペクト比素子は実用となりうる。(3) 周波数特性の帯域幅は、位相遅れが 45° になる状態を基準にすれば約 700 Hz である。位相遅れが 45° となる周波数はゲインが 3 dB 減少する周波数よりも小さく、従って位相遅れが周波数特性の帯域幅の決定にとって支配的要因となる。

参 考 文 献

- 1) 佐藤, 畑中: 層流形比例素子の動特性, 計測自動制御学会論文集, Vol. 20, No. 12, 1156/1160 (1984)
- 2) 斉藤, 酒井: 周波数特性に優れ, 高利得の純流体素子の開発, 日本機械学会論文集, 46-403, 446/447 (1980)
- 3) L. R. Kelly, W. A. Boothe: Hydraulic Fluidics, ASME Trans., DSC, 95, 161/166 (1973)
- 4) D. Lee, D. N. Wormley: A Fluidic, Hydraulic Servovalve, ASME Trans. DSC, Vol. 103, No. 4, 331/337 (1981)
- 5) T. M. Drzewiecki: Fluidics 38, HDL-TR-1758, (1976)
- 6) J. M. Kirshner and S. Katz: Design Theory of Fluidic Components, 192/207, Academic Press (1975)
- 7) F. M. Manion and T. M. Drzewiecki: Analytic Design of Laminar Proportional Amplifiers, HDL Fluidic State-of-the-Art Symposium, 1, 149/233 (1974)