

ISO 10767-1에 기초한 유압 펌프의 유량 맥동 측정 및 정밀도 평가 Measurement of Hydraulic Pump Flow Ripple Characteristics Based on the ISO 10767-1 and the Evaluation of the Measuring Accuracy

김지웅 · 강만곤 · 이일영

J. W. Kim, M. G. Kang and I. Y. Lee

Key Words : Hydraulic Pump(유압 펌프), Fluid-Borne Vibration(유체 전파 진동), Flow Ripple(유량 맥동), Source Impedance(내부 임피던스)

Abstract: The source flow ripple and the source impedance in hydraulic pump are characteristic values showing fluid-borne vibration characteristics decisively. We cannot measure these two characteristic values directly, but can measure them by some indirect methods. One representative indirect measuring method is ISO 10767-1. The authors constructed a hardware and a software for the measuring method based on ISO 10767-1. Through the error evaluation of the measured results, accuracy of the measuring method using ISO 10767-1 was examined in detail.

기호 설명

* 주파수 영역 변수

P_x : 위치 x 에서의 압력

Q_s : 유압 펌프의 유량 맥동

R_s : 관로 입구 끝에서의 파동 반사율

R_T : 관로 출구 끝에서의 파동 반사율

Z_C : 관로의 특성 임피던스

Z_L : 관로 입구 끝에서의 특성 임피던스

Z_S : 유압 펌프의 내부 임피던스

Z_T : 관로 출구 끝에서의 특성 임피던스

β : 관로의 파동 전파 계수

$\xi(\omega)$: 식 (3)

* 시간 영역

c : 관로 내 음속

$P_x(t)$: 위치 x 에서의 압력

$Q_s(t)$: 유압 펌프의 유량 맥동

* 물리 정수

r_0 : 관로 반지름

1. 서론

유압 장치 소음의 주요 원인 중의 하나는 유압 펌프의 송출 유량 맥동에 기인하여 발생하는 배관 내의 압력 맥동(유체 전파 진동 또는 유체 전파 소음이라 불림)이라는 사실이 잘 알려져 있다. 따라서 압력 맥동을 저감한 저소음형 유압 장치 설계를 위해서는 유압 맥동의 기진원인 유압 펌프의 유체 전파 진동 특성과 유체 진동의 전달 통로인 배관 요소들에서의 맥동 전달 특성을 명확히 파악하는 것이 중요하다. 이 가운데서 유압 펌프의 유체 전파 진동 특성을 결정짓는 펌프 고유의 특성치는, (1) 펌프의 유량 맥동, (2) 펌프의 내부 임피던스이다. 이들은 둘 다 직접 측정하는 것이 불가능한 양이며, 관로 내의 압력 맥동을 측정함으로써 간접적으로 측정하는 방법들이 여러 연구자들에 의하여 제안되었다¹⁻⁸⁾. 이들 연구 성과 중 Edge 및 Johnston의 연구 성과가 1996~1999년 사이에 ISO 규격 (ISO 10767-1, 2, 3 : 1은 펌프에 대한 정밀 측정법, 2는 펌프에 대한 단순 측정법, 3은 유압 모터에 대한 측정법)으로 채택 되었으며⁸⁾, 이들 규격은 2002년도에 국내의 KS 규격 (KS B ISO 10767-1, 2, 3)으로도 수용 되었다.

위에서 기술한 ISO 규격들 가운데서 핵심이 되는

접수일 : 2007년 7월 26일

이일영(책임저자): 부경대학교 기계공학부

E-mail : iylee@pknu.ac.kr, TEL : 051-620-1612

김지웅: 부경대학교 대학원 기계공학부

강만곤: 대동공업(주) 기술연구소

유압 펌프의 유량 맥동 정밀 측정법(ISO 10767-1)은 측정법 및 측정 결과의 연산과정이 복잡하여 그 적용이 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 ISO 10767-1에 기초한 유압 펌프의 유량 맥동 측정 시스템을 구성하고, 측정 결과를 도출한 후에 그 정밀도를 평가한다.

2. 유압 펌프의 유량 맥동 특성의 수학 모델 및 종래의 대표적 측정법

2.1 기초방정식

유압 펌프는 내부 임피던스(Z_s)를 분로(分路) 임피던스 형태로 갖는 유량원으로 간주할 수 있음이 알려져 있다. 이는 전기 회로의 노턴(Norton) 모델을 전용한 것이며⁷⁾, 유압 펌프·단일 관로·부하 밸브로 구성된 유압 회로는 임피던스 표시로서 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

관로내 유체를 통하여 전달되는 파동이 점성 파동 방정식을 만족시키는 것으로 생각하고, 관로의 상류 끝($x=0$) 및 하류 끝($x=l$)에서의 임피던스를 예에서의 압력 맥동 P_x 는 주파수 영역에서 다음 식으로 표시된다.

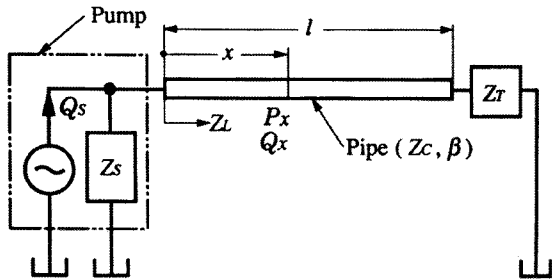


Fig. 1 Impedance representation of a simple hydraulic circuit

$$P_x = \left(\frac{Q_s \cdot Z_s \cdot Z_L}{Z_s + Z_L} \right) \cdot \left\{ \cos(\beta x) - j \frac{Z_C}{Z_L} \sin(\beta x) \right\} \quad (1)$$

여기서,

$$Z_L = Z_C \cdot \frac{Z_T \cdot \cos(\beta l) + j \cdot Z_C \cdot \sin(\beta l)}{Z_C \cdot \cos(\beta l) + j \cdot Z_T \cdot \sin(\beta l)} \quad (2)$$

$$\xi(\omega) \square 1 + \left(\frac{v}{r_o^2 \omega} \right)^{0.5} + \left(\frac{v}{r_o^2 \omega} \right) + \frac{7}{8} \cdot \left(\frac{v}{r_o^2 \omega} \right)^{1.5} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \xi(\omega) \quad (4)$$

또한 P_x 는 관로의 상류 끝 및 하류 끝에서의 파동 반사율 R_s, R_T 를 사용하여 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$P_x = \frac{Q_s \cdot Z_s \cdot Z_C}{Z_s + Z_C} \cdot \left\{ \frac{e^{-j\beta x} + R_T \cdot e^{-j\beta(2l-x)}}{1 - R_s \cdot R_T \cdot e^{-j2\beta l}} \right\} \quad (5)$$

$$R_s = \frac{Z_s - Z_C}{Z_s + Z_C} \quad (6)$$

여기서,

$$R_T = \frac{Z_T - Z_C}{Z_T + Z_C} \quad (7)$$

식 (1) 및 (5)의 { } 내는 정재파(standing wave)의 영향을 나타내는 항이다.

2.2 유압 펌프의 유량 맥동, 내부 임피던스 측정법

유압 펌프의 유량 맥동 Q_s 와 내부 임피던스 Z_s 를 실험적으로 구하는 방법들로는, (1) 두 개의 서로 다른 기지의 관로 끝 임피던스를 이용하는 방법^{1,2)}, (2) 유압 트론본법⁴⁾, (3) 2차 맥동원법^{5,6)}, (4) 2압력 2시스템(2P2S)법⁷⁾이 알려져 있으며, 이 가운데서 (3) 2차 맥동원법^{5,6)}이 ISO 10767-1 규격으로 채택된 방법이다.

2.3 2차 맥동원법[ISO 10767-1]의 요약

Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 관로의 우측 끝에 별도의 맥동원, 즉 2차 맥동원(유압 펌프 또는 특수 제작한 맥동 발생 장치)을 설치하고, 이것에 의하여 발생하는 위치 x_1 및 x_2 에서의 압력 맥동을 P_{x1}, P_{x2} 라고 하면 식 (5)로부터 다음 식이

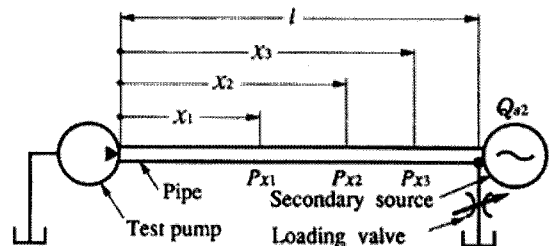


Fig. 2 Hydraulic circuit for the "secondary source" method

얻어진다.

$$\frac{P_{x_2}}{P_{x_1}} = \frac{e^{-j\beta(l-x_2)} + R_S e^{-j\beta(l+x_2)}}{e^{-j\beta(l-x_1)} + R_S e^{-j\beta(l+x_1)}} \quad (8)$$

따라서, P_{x_1} , P_{x_2} 를 측정하면 식 (8)로부터 R_S 가 구해지고, 이어서 식 (6)으로부터 Z_S 가 구해진다.

한편, 측정 대상 펌프(1차 맥동원)의 유량 맥동에 의하여 발생하는 위치 x_1 및 x_2 에서의 압력 맥동 P_{x_1} , P_{x_2} 를 측정하면 식 (5)로부터 얻어지는 아래 식 (8')에 의하여 R_T 가 구해지고, 이어서 식 (7)로부터 관로 우측 끝(2차 맥동원 방향 끝)의 임피던스 Z_T 가 구해진다.

$$\frac{P_{x_2}}{P_{x_1}} = \frac{e^{-j\beta x_2} + R_T e^{-j\beta(2l-x_2)}}{e^{-j\beta x_1} + R_T e^{-j\beta(2l-x_1)}} \quad (8')$$

또한, 측정 대상 펌프만을 구동하면서 임의의 위치에서 압력 맥동을 측정하면 식 (5)로부터 측정 대상 펌프의 유량 맥동 Q_s 를 구할 수 있다.

3. 측정 시스템 및 측정방법

3.1 측정 시스템 구성상의 유의점

Fig. 2에 나타난 간략화한 관로계를 실제로 구성하려 할 때는 릴리프 밸브 등이 추가되어야 하며, 실제 측정 시스템의 관로 구성 예가 ISO 10767-1에 제시되어 있다(Fig. 3).

Fig. 3과 같이 유압 회로를 구성했을 때, 관로 오른쪽 끝에서의 특성치인 Z_T 및 R_T 측정을 위한 점 A는 진직(眞直) 단순 관로상의 한 위치에 가상의 밸브가 있다고 가정함으로써 들 수 있으며,이렇게 함으로써 부하밸브, 릴리프 밸브, 2차 맥동원 직전의 볼 밸브에서의 파동 반사율은 생각할 필요가 없어진다.

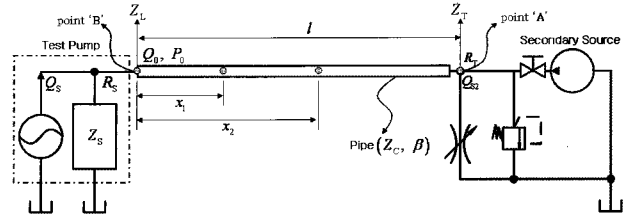


Fig. 3 Hydraulic circuit shown in ISO 10767-1 for the “secondary source” method

3.2 측정 시스템의 제작

2차 맥동원법 실현을 위하여 저자들이 제작한 시스템의 구성도를 Fig. 4에 나타내었다.

측정 대상 유압 펌프(펌프 ①) 및 2차 맥동원 (펌프 ②)용으로는 모두 V사의 가변 용량형 사판식 피스톤 펌프(행정용적: 13.8cm³/rev)를 사용 하였으며, 펌프에 부착된 레귤레이터에 의하여 압력 설정이 가능하기 때문에 별도의 릴리프 밸브 를 설치하지는 않았다.

압력 변환기로는 압전식(piezoelectric type, resonant freq. 500 kHz, linearity ±1% FS)을, 구동용 전동기로는 DC 서보 모터(7.5 kW, 0~4000 rpm)를 사용하였다. 측정된 압력 데이터 는 A/D 변환기를 거쳐서 PC에 저장하였다.

Fig. 5는 시스템 주요 구성 요소의 사진을 나타 낸 것이다.

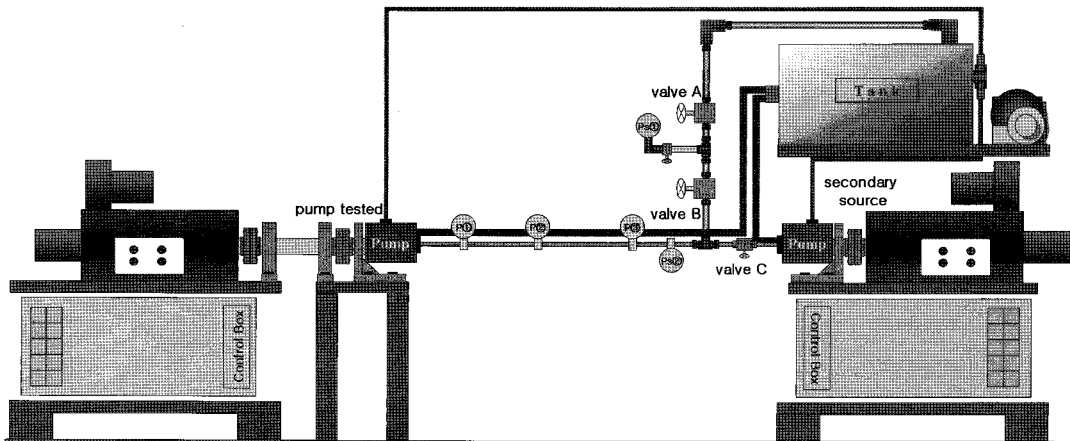


Fig. 4 Composition of the system for realizing the “secondary source” method

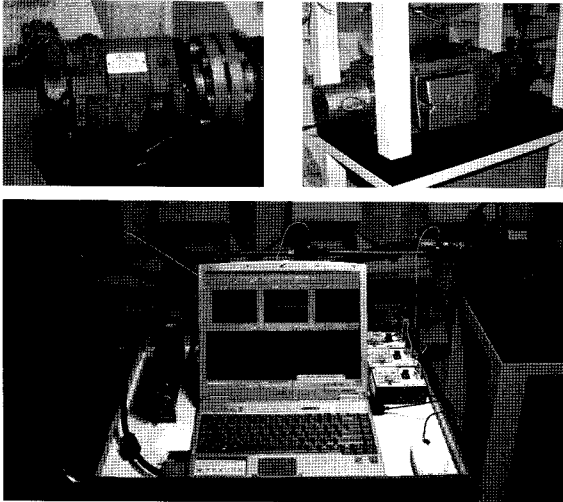


Fig. 5 Photo. of the test system components (pump tested, secondary pump & motor, and data acquisition system)

3.3 측정 방법

측정은 크게 나누어, (1) 측정 대상 펌프와 2차 맥동원을 모두 구동시킨 상태에서의 측정, (2) 측정 대상 펌프만을 구동시킨 상태에서의 측정 으로 구분된다.

(1)의 측정은 측정 대상 펌프의 내부 임피던스 Z_s 를 구하는 것이 목적이므로, 측정된 압력 맥동의 주파수 계열 신호(P_{x1} , P_{x2})로부터 펌프 ②의 신호만을 분리(펌프 ①이 생성한 신호를 배제)할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 펌프 ① 및 ②가 생성한 조화 성분들(harmonic components)의 주파수가 겹치지 않도록 두 펌프의 회전속도를 결정해야 한다.

측정 대상 펌프(펌프 ①)만을 구동시켰을 때의 압력 계측치(시간 영역, 주파수 영역 데이터)의 예를 Fig. 6에 나타내었다.

3.4 측정 결과 연산용 프로그램

측정된 압력 맥동 신호의 FFT, 식 (8), (8'), (6), (7), (5)의 연산, 그리고 연산결과 데이터의 IFFT에는 MATLAB을 사용하여 구성한 프로그램을 사용하였다.

4. 측정 결과 및 고찰

4.1 펌프의 내부 임피던스(Z_s)

측정 대상 펌프(펌프 ①)와 2차 맥동원(펌프 ②)을 동시에 구동시켰을 때의 압력 맥동 측정 데이터들을

2.3절에서 설명한 절차에 따라 연산함으로써 측정 대상 펌프(펌프 ①)의 Z_s 를 구하였고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

그림에서 '*'표시는 실험치를, 실선은 실험치를 근사식으로 표시했을 때의 계산결과를 나타 내며, 구해진 근사식은 아래와 같다.

$$Z_s = \frac{K_0}{s} \cdot \left(\frac{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}{\omega_n^2} \right), \quad s = j\omega \quad (9)$$

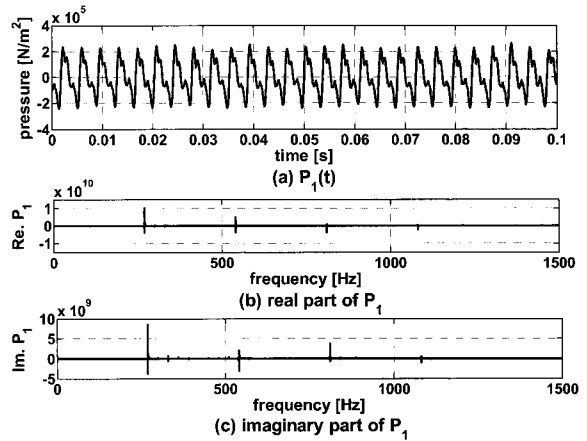


Fig. 6 Measured $P_1(t)$, real part of P_1 , imaginary part of P_1

여기서 K_0 , ζ 및 ω_n 은 모두 상수들이다.

Fig. 7의 결과는 선행 연구자들의 결과^{5,8)}와 유사한 경향을 보였으며, Z_s 가 성공적으로 계측되었음을 보여주는 결과이다.

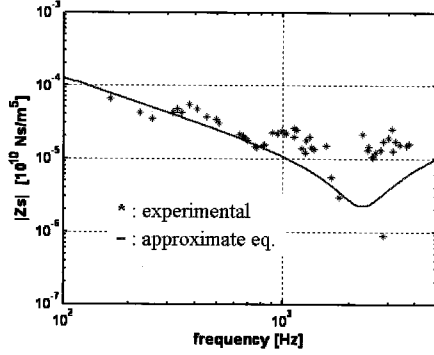
4.2 펌프의 유량 맥동(Q_s)

측정 대상 펌프(펌프 ①)만을 사용한 측정에서 얻은 맥동 압력 측정치와 R_T , Z_T 및 4.1절에서 구한 Z_s 등을 식 (5)에 적용함으로써 Q_s 를 구하였으며, 그 예(시간영역 데이터)를 Fig. 8에 나타내었다.

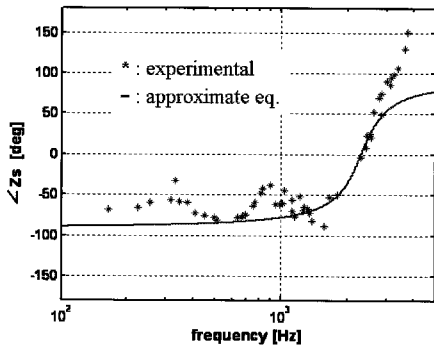
4.3 유량 맥동 측정치의 신뢰성 검증

4.2절에서 구한 Q_s (ISO 10767-1에 의한 펌프 유량 맥동 측정치)는 관로상의 압력 맥동 측정치로부터 간접적으로 측정된 결과이다. Q_s 측정치의 신뢰성은 일반적으로, 측정된 Q_s 와 유압 관로의 전달 특성식

을 사용하여 연산한 관로 상 제3의 위치에서의 압력 맥동(계산치)과 그 위치에서 실측한 압력 맥동 데이터를 비교함으로써 수행된다.



(a)



(b)

Fig. 7 Source impedance Z_s

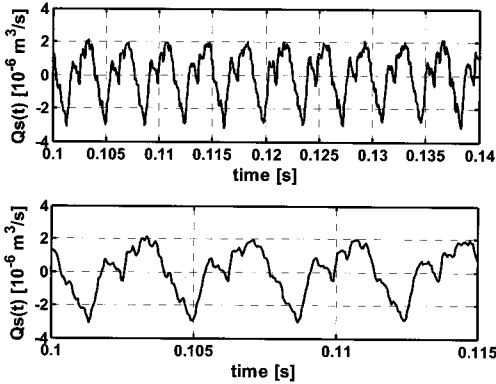
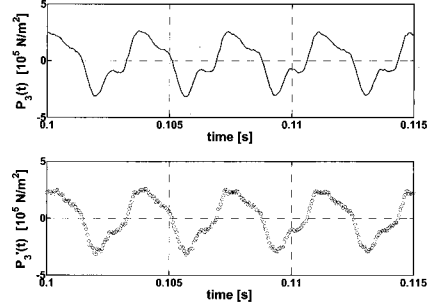


Fig. 8 Source flow ripple $Q_s(t)$

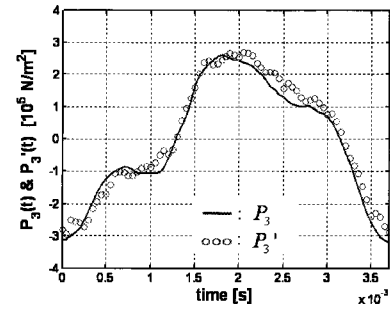
본 연구에서는 관로를 따라 0.84 m만큼 떨어진 위치에서 실제 측정된 압력 파형 $P_3(t)$ 와 위의 측정결과로부터 얻어진 Q_s 및 유압 관로의 전달 특성식으로부터 연산한 압력 파형 $P_3'(t)$ 를 비교함으로써 본

측정의 신뢰성을 검증한다.

$P_3(t)$ 와 $P_3'(t)$ 를 Fig. 9(a)에 나타내었으며, 두 개의 압력 파형의 한 주기 데이터를 동일한 그림상에 나타낸 것이 Fig. 9(b)이다.



(a) $P_3(t)$ & $P_3'(t)$



(b) $P_3(t)$ & $P_3'(t)$

Fig. 9 Measured and calculated pressure ripple for evaluating accuracy of Q_s

$$Er = \frac{\int_0^T |P_3(t) - P_3'(t)| dt}{\int_0^T |P_3(t)| dt} \times 100(\%) \quad (10)$$

$P_3(t)$ 와 $P_3'(t)$ 사이의 오차는 식 (10)(1주기 동안의 압력 맥동 상대오차)를 사용하여 평가 하였다. 계산결과 $Er = 16.292 (\%)$ 이며, 이 결과로부터 본 연구에서 간접 측정된 Q_s 데이터의 신뢰성이 비교적 높음을 확인하였다.

5. 결론

유압 시스템의 진동 및 소음을 저감시키기 위한 유압 시스템 설계를 위해서는 유압 펌프의 유체 전달 파 진동 특성을 정확하게 파악하는 것이 중요하다.

유압 펌프의 유체 전파 진동 특성을 결정짓는 펌프 고유의 특성 값으로는 펌프의 내부 임피던스와 펌프의 유량 맥동이 있다.

본 연구자들은 ISO 10767-1에 기초하여 측정 시스템의 하드웨어 및 측정결과 연산에 필요한 프로그램을 개발하였다. 개발한 측정 시스템 하드웨어 및 소프트웨어를 사용하여 측정 대상 펌프의 내부 임피던스와 유량 맥동을 산출하였다. 측정에서 얻어진 유량 맥동 데이터의 신뢰성은 관로상 제3의 위치에서 측정된 압력 맥동 데이터와 Q_s 및 유압 관로 전달 특성식으로부터 연산한 압력 맥동 데이터를 비교하는 과정을 통하여 검증 하였다.

이상의 과정을 통하여, 유압 펌프 고유의 특성치인 펌프의 내부 임피던스 및 유량 맥동이 비교적 정밀하게 측정되었음을 확인하였다.

본 연구에서 개발한 측정 시스템은 향후 유압 펌프 및 유압 모터의 메이커, 유압 시스템 메이커 등이 수행하는 진동·소음 저감 설계, 시험 및 평가 과정에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) Davidson, L. C. , “The Internal Impedance of Positive Displacement Pumps(Experimental Determination and Effect on System Noise)”, Proceedings of the 32nd National conference on Fluid Power, pp. 99~100, 1976.
- 2) O’Neal, D. L. and Maroney, G. E. , “Measuring Pump Fluid borne Noise Generation Potential,” The BFPR Journal, Vol. 1978-11, pp. 99~100, 1978.
- 3) Szerlag, S. F., “Rating pump fluid-borne noise,”SAE Trans. 750830, pp. 1~16, 197 5.
- 4) Edge, K. A. and Wing, T. J., “The measurement of the fluid-borne pressure ripple characteristics of hydraulic components,”Proc. Instn. Mech. Engrs, Part B, Vol. 197, pp. 247~254, 1983.
- 5) Edge, K. A. and Johnston, D. N., “The “secondary source” method for the measurement of pump pressure ripple characteristics, Part 1 : description of method,”Proc. Instn. Mech. Engrs, Part A, Vol. 204, pp. 33~40, 1990.
- 6) Edge, K. A. and Johnston, D. N., “The “secondary source” method for the measurement of pump pressure ripple characteristics, Part 2 : experimental re-sults,”Proc. Instn. Mech. Engrs, Part A, Vol. 204, pp. 41~46, 1990.
- 7) 小嶋英一, “油壓ポンプの流體傳ば振動特性の新しい測定法(第1報, 測定法の原理),” 油壓 と空氣壓, Vol. 24, No. 1, pp. 113~118, 1993.
- 8) ISO 10767 : Determination of pressure ripple levels generated in systems and components, Part 1, 2, 3.