

# 유압 펌프와 모터의 소음 및 압력/유량 맥동의 계측을 위한 ISO 규격 해설 Review on ISO standards for Measuring Noise & Flow/Pressure Ripple in Hydraulic Pumps and Motors

강만곤 · 최세령

M. G. Kang and S. R. Choi

## 1. 서 언

유압 장치에서 발생하는 소음의 기진원은 유압펌프 및 모터이며, 발생 소음은 공기 중으로 전파되는 공기 전파 소음(air-borne noise), 유압 펌프 및 모터에 연결되어 있는 구조물로 전파되는 고체 전파 소음(structure-borne noise), 그리고 관로 내의 유체를 타고 전파되는 유체 전파 소음(fluid-borne noise) 등으로 구분된다. 특히 유압 시스템에서 발생하는 전체 소음에서 유체 전파 소음의 비중이 크며, 이는 펌프에서 관로를 통하여 전파하는 유량/압력 맥동에 기인하는 것으로 알려져 있다.

유압 펌프의 압력 맥동을 저감한 저소음형 유압 장치를 설계하기 위해서는 압력 맥동의 기진원인 유압 펌프의 유체 전파 소음 특성과 유체 전파 소음의 전달 통로인 배관 요소들에서의 맥동 전달 특성을 명확히 파악하는 것이 중요하다.

유압 펌프에서 발생하는 유체 전파 소음 특성을 측정하는 방법으로 소음 레벨(음압 레벨), 음향 인텐시티 및 음향 파워 레벨을 측정한다. 이 중에서 소음 레벨의 측정이 가장 널리 사용되지만, 향후에는 음향 파워 레벨의 사용이 요구되고 있다(유압 시스템은 구조 상 소음원 이외에 주변 장치들에서 발생하는 소음이 복합적으로 작용한다.).

유압 펌프 및 모터의 소음 레벨의 측정법은 ISO 4412-1~3로 규정되어있으며, 음향 인텐시티를 이용한 유압 펌프의 음향 파워 레벨 결정법은 ISO 16902-1로 규정되어 있다.

유압 펌프의 맥동 전달 특성을 결정짓는 고유치로는 펌프의 내부 임피던스와 유량 맥동이 있다. 그러나 이 두가지 파라미터는 직접 측정이 불가능하며, 관로 내의 압력 맥동을 측정함으로써 간접적으로 연산하는 방법들이 여러 연구자들에게 제안되었다<sup>1)</sup>. 이들 측정법 중에서 Edge 및 Johnstorn의 “2차 맥동원(secondary source)”법이 ISO 규격으로 채택되었으며(ISO 10767 Part 1, 2, 3 : 1은 유압 펌프에 대한 정밀 측정법, 2는 유압 펌프에 대한 단순 측정법, 3은 유압 모터에 대한 정밀 측정법), 이들 규격은 2002년도에 국내의 KS 규격(KS B ISO 10767-1, 2, 3)으로도 채택되었다. 그러나 ISO 10767에 기초한 유압 펌프 및 모터의 유량 맥동 정밀 측정법(ISO 10767-1)은 측정 결과의 연산 과정이 복잡하여, 산업 현장에서의 적용이 매우 어려운 것으로 알려져 있다.

이에 본 해설에서는 음향 파워 레벨의 측정법, 유압 펌프 및 모터에서의 소음 레벨 측정법 그리고 ISO 10767에 기초한 유압 펌프의 압력/유량 맥동의 측정 방법에 대해서 소개하고자 한다.

## 2. 음향 파워 레벨의 측정법

음원은 음향 파워를 방사하며, 이에 음압이 발생한다. 따라서 음향 파워는 원인이며 음압은 그 결과가 된다. 우리는 음압을 측정하고, 이를 사람의 감각에 맞추어 보정한 값을 소음 측정의 기준치(소음 레벨)로 사용하였다<sup>1)</sup>. 하지만 이러한 소음 레벨은 측정 위치와 환경에 의존적이기 때문에 측정값의 정밀도가 떨어질 수 있다. 음향 파워 레벨은 음원으로부터 단위시간당의 방사되는 소음 에너지이며, 음원이 가지는 고유한 값으로 주변 환경의 영향을 받지 않는다. 따라서 음향 파워 레벨을 측정함으로써 여러 가

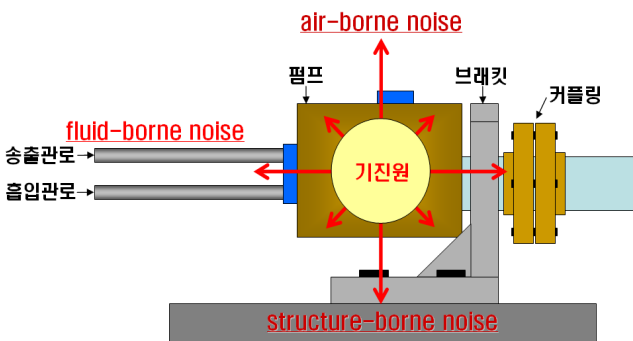


그림 1 유압 펌프에서의 소음 발생 구조

지 피측정물의 음향 출력을 정량적으로 직접 비교하는 것이 가능하다<sup>2)</sup>.

### 2.1 소음 관련 용어<sup>3)</sup>

음압(sound pressure)이란 음의 존재에 의한 정압에 중첩되는 변동 압력으로써, 단위는 파스칼[Pa]을 사용한다. 음압 레벨(sound pressure level)  $L_p$ 은 실효 음압  $p(p_{rms})$ 를 간단히  $p$ 로 표시함)의 제곱을 기준 음압  $p_0$ 의 제곱으로 나눈 값의 상용 로그의 10배로서 식 (1)로 나타낸다. 단위는 데시벨 [dB]을 사용한다<sup>3)</sup>.

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2}, p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \quad (1)$$

기계장치에서 일반적으로 말하는 소음 레벨(sound level)은 사람의 감각에 맞추어 보정한 음압 레벨로 보통 A가중 음압 레벨  $L_{pA}$ 을 사용하며, 단위는 dB(A)을 사용한다<sup>3)</sup>.

음향 파워(sound power,  $W$ )란, 단위 시간에 음원으로부터 방사되는 음향 에너지(sound energy)를 말하며 단위는 와트[W]를 사용한다<sup>3)</sup>.

$$W = \frac{1}{T} \oint_s \left( \int_0^T \frac{p^2}{\rho c} dt \right) ds \quad (2)$$

여기서, 음향 파워는 음원 자체가 가지는 에너지를 말하기 때문에 주위에 환경에 무관하며 음원의 시끄러움을 나타내는 고유의 수단이 될 수 있다. 음향 파워 레벨(sound power level)  $L_W$ 은 측정 대상 음원이 방사하는 음향 파워  $W$ 를 기준 음향 파워  $W_0$ 로 나눈 값의 상용로그의 10배로서, 식 (3)로 나타낸다. 단위는 데시벨[dB]을 사용한다<sup>3)</sup>.

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0}, W_0 = 10^{-12} \text{ W} \quad (3)$$

음향 인텐시티(sound intensity,  $I$ )란, 한점에서 단위 면적을 통과하는 에너지의 유동율이다<sup>4)</sup>.

$$I = \frac{W}{S} [\text{W/m}^2] \quad (4)$$

음향 인텐시티 레벨(sound intensity level)  $L_I$ 는 식(5)로 나타낸다.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}, I_0 = 10^{-12} [\text{W/m}^2] \quad (5)$$

자유 음장에서 음향 인텐시티와 음압은 식 (6)의 관계를 가진다.

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (6)$$

\*  $\rho c$ : 공기의 특성 임피던스

식 (6)을 식 (5)에 대입하면 음향 인텐시티 레벨이 음압 레벨로 된다. 따라서 자유 음장에서는 음향 인텐시티 레벨의 측정은 필요하지 않게 된다. 하지만 실제로 소음이 자유 음장에서만 측정하는 것이 아니므로 음압 레벨과 음향 인텐시티 레벨의 사이에는 차이가 존재하게 된다. 이 차이가 중요한 양으로 반향지수(reactivity index), 혹은 음압-인텐시티 지수라고 부른다<sup>3)</sup>.

### 2.2 음향 파워 레벨 측정법의 종류

그림 2와 같이, 음향 파워 레벨의 측정 방법은 음압법과 음향 인텐시티법으로 구분된다. 음압법은 측정하는 환경에 따라서, 무향실 내에서 측정하는 자유 음장법(측정하는 실내의 벽, 천정, 바닥으로부터 음의 반사가 없는 경우), 반무향실에서 측정하는 반자유 음장법(측정하는 실내의 바닥에서는 음의 반사가 있는 경우) 및 잔향실 내에서 측정하는 확산 음장법으로 구분된다.

음향 인텐시티법은 음향 인텐시티를 측정하는 방법에 따라서 이산점과 스캐닝에 의한 방법으로 구분된다.

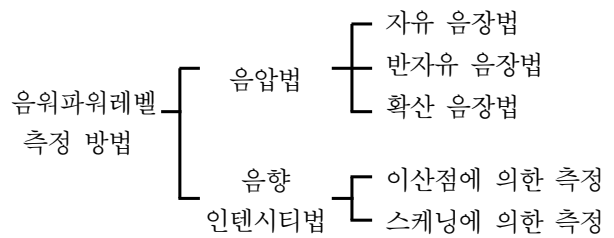


그림 2 음향 파워 레벨 측정법의 종류

음압 측정에 의한 음향 파워 레벨의 측정법은 ISO 3740 시리즈의 7규격이 제정되었다. 종래에 음압 측정에 바탕을 두는 방법과는 별도로, 음향 인텐시티를 측정하는 방법이 개발되어 국제적으로 ISO 9614의 2개 규격이 제정되었다. 위에 ISO 3740 시리즈는 정밀도와 측정 환경 등에 의해 구분되어 있고, 실제 운용에는 대상 음원의 종류, 측정 시설, 측정 결과의 용도 등에 따라서 적용하는 방법을 선정할 수 있다.

KS에 소음 관련 규격은 ISO 규격에 준하여 작성되었다. 현재 KS규격은 국제 규격과의 정합화를 가장 중요한 전제로 작성되며, 대응하는 ISO 규격을 번역하여 기술적인 내용을 변경하지 않고, 사용하는 것을 기본 방침으로 하고 있다. 따라서 표1의 ISO 규격에 상응하는 KS 규격으로, KS A ISO 3741~3747과 KS A ISO 9614-1,2의 규격이 제정 되어있다.

표2 에서는 각종 기계류나 설비에 의한 작업 위치나 기타 규정된 위치에서 방사 음압 레벨의 산출을 위한 기본 규격을 나타내었다. 표2의 규격은 공기 전달음에만 적용되며, 소음 시험 준비에 사용된다. 또한 소음 시험 규격이 없는 소음 시험에도 사용될 수 있다. ISO 11200은 ISO 11201~11204의 방사 소음의 규격 선정을 위한 규격이다.

2.3 음압법에 의한 음향 파워레벨 측정법<sup>3)</sup>

자유 음장, 반자유 음장에서는, 음원을 둘러싸는 폐공간을 설정하여 음압레벨( $L_p$ )를 측정하고 음향 파워 레벨( $L_w$ )를 계산한다. 자유 음장이란 경계면에서 영향이 없는 균질하고 등방인 매질 중의 음장이

다. 실제로는 대상 주파수 범위에 걸쳐 경계면에서의 반사를 무시할 수 있는 음장을 말하며, 자유 음장을 얻을 수 있는 측정실은 무향실이다. 반자유 음장이란 무한대로 단단한 평면 위의 반공간상에서의 균질의 등방성인 매질중의 음장이다<sup>3)</sup>.

ISO 3745에서 자유음장, 반자유 음장에서 음압법에 의한 음향 파워 레벨의 측정법을 규정한다. 소음 레벨은 A 특성으로 가중된 음압 레벨을 측정하며, 소음 레벨의 측정 방법은 그림 3의 4가지 방법 중 하나를 사용한다.

마이크로폰을 통해 측정된 소음 레벨을 식 (7)에 대입하면, 평균 음압 레벨을 구할 수 있다(단,  $L_{p_i}$ 는  $i$  번째 측정점에서 얻어진 음압 레벨이고,  $N$ 은 측정점의 총수이다).

$$L_P = 10\log_{10}\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N 10^{L_{p_i}/10}\right] \quad (7)$$

식(7)로 계산된 평균 음압 레벨을 이용하여, 음향 파워 레벨을 식 (8)로 계산한다.

$$L_W = L_P + 10\log_{10}\left(\frac{S_1}{S_0}\right) + C \quad (8)$$

표 1 음향 파워 레벨의 측정을 위한 ISO 규격

측정원리	규격번호	명칭	정밀도	측정환경	마이크로폰위치
음압법	KS A ISO 3741	음향-음압법에 의한 소음원의 음향 파워 레벨 측정방법 -잔향실에서의 정밀 측정 방법	정밀 (등급1)	잔향실	고정점, 연속이동
	KS A ISO 3743-1	음향-음압법에 의한 소음원의 음향 파워 레벨 측정방법-잔향음장에서 이동할 수 있는 소형 소음원의 실용 측정방법- 제1부: 딱딱한 벽을 가진 시험실에서의 비교법	공학 (등급2)	딱딱한 벽의방	고정점, 연속이동
	KS A ISO 3743-2	음향-음압법에 의한 소음원의 음향 파워 레벨 측정방법-장향음장에서 이동할 수 있는 소형 소음원의 실용 측정방법- 제2부: 특수 잔향시험실에서의 측정방법	공학 (등급2)	특수한 잔향실	고정점, 연속이동
	KS A ISO 3744	음향-음압법에 의한 소음원의 음향 파워 레벨 측정 방법-반사면상 준자유 음장에서의 실용 측정방법	공학 (등급2)	반무향실, 커다란방, 옥외	반구면상, 직육면체상
	KS A ISO 3745	음향-음압법에 의한 소음원의 음향 파워 레벨 측정 방법-무향실 및 반무향실에서의 정밀 측정방법	정밀 (등급1)	무향실, 반무향실	구면상, 반구면상
	KS A ISO 3746	음향-음압법에 의한 소음원의 음향 파워 레벨 측정 방법-반사면상의 둘러싸는 측정면을 이용한 간이 측정방법	조사 (등급3)	임의	직육면체상
	KS A ISO 3747	음향-음압법에 의한 소음원의 파워 레벨 측정방법-설치 장소에서의 비교법	조사 (등급3)	딱딱한 벽의 방	고정점, 연속이동
음향 강도법	KS A ISO 9614-1	음향-음향세기에 의한 소음원의 음향파워 레벨 측정방법-제1부: 이산점에 의한 측정	등급 1,2 및3	임의	고정점
	KS A ISO 9614-2	음향-음향세기에 의한 소음원의 음향파워 레벨 측정방법-제2부: 스캐닝에 의한 측정	등급 1,2 및3	임의	연속이동

표 2 소음 방사 음압 레벨을 측정하기 위한 ISO 규격

측정원리	규격번호	명칭	정밀도	측정환경	마이크로폰위치
소음 방사 음압 레벨	KS I ISO 11201	음향 - 기계 및 설비류에서 방사되는 소음, 작업 위치 및 그 외 지정 위치에서의 방사 음압 레벨 측정 방법 - 반사면상 준자유 음장에서의 실용 측정 방법	공학 (등급2)	옥내, 옥외	작업 위치, 규정된 위치
	KS I ISO 11202	음향 - 기계 설비류의 소음 - 음압 레벨 측정 - 간이 측정법	조사 (등급3)	옥내, 옥외	작업 위치, 규정된 위치
	KS I ISO 11203	음향 - 기계 설비류의 소음 - 음향 파워 레벨로부터 음압 레벨 산출	등급 2및3	규격 참조	작업 위치, 규정된 위치
	KS I ISO 11204	음향 - 기계류와 장비에 의해 방사되는 소음 - 작업장과 다른 지정된 위치에서의 방사음압 레벨의 측정 - 환경수정계수 요구법	등급 2및3	옥내, 옥외	작업 위치, 규정된 위치

여기서, 측정 표면적  $S_1$ 은 구면에서  $4\pi r^2$ (반구면에서는  $2\pi r^2$ )이며,  $S_0$ 는 기준 면적으로  $1m^2$ 이다.  $C$ 는 온도에 대한 보정항으로 식 (9)로 나타난다.

$$C = -25 \log_{10} \left[ \frac{427}{400} \sqrt{\frac{273}{273 + \theta} \frac{p}{p_0}} \right] \quad (9)$$

여기서  $\theta$ : 온도 ( $^{\circ}C$ ),  $p_0 = 1.013 \times 10^5 Pa$ 이다.

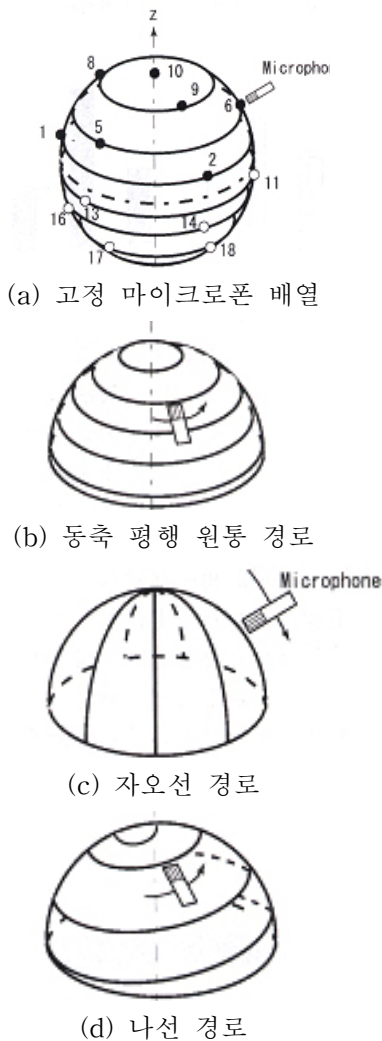
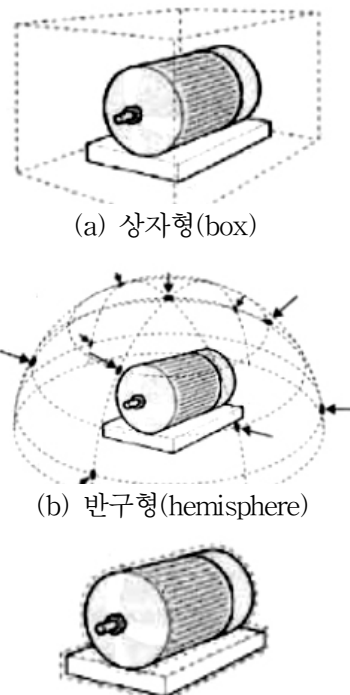


그림 3 자유 음장 및 반자유 음장에서 음향 파워 레벨의 측정 위치

#### 2.4 음향 인텐시티법<sup>4)</sup>

음향 인텐시티는 탐침자(probe)를 사용하며, 방향성을 가진 벡터량으로 음원의 위치를 찾아내는 데 매우 유용하게 사용된다.

음향 인텐시티를 측정할 때 소음원 및 배경 소음의 크기는 제한되지 않으며, 소음원의 범위는 측정면의 설정에 따라 결정된다(그림 4 참고). 하지만 발생음은 정상(定常) 신호이어야 한다<sup>4)</sup>.



(c) 물체의 모양에 맞추는 형상(conformal)

그림 4 음향 인텐시티의 측정면 설정

음향 인텐시티는 측정 대상의 표면에 수직한 방향으로 측정되는 인텐시티 값을 측정 공간내에서 평균하고, 그 값에 표면적을 곱하여 음향 파워레벨을 측정한다.

$$W = I \times S \quad (10)$$

음향 인텐시티 측정방법은 이산점에 의한 방법과 스캐닝에 의한 방법 두 가지로 나뉘어진다.

이산점에 의한 측정 방법은 평면을 작은 부분으로 나누고 각 부분의 인텐시티를 측정하여 평균 값을 구한다. 표면상의 스캐닝 방법은 적절히 평균 시간을 길게하여 표면에 페인트를 칠하듯이 탐침자를 표면 위에서 움직여 평균하는 방법이다. 스캐닝 방법이 수학적으로 연속적인 공간에 대하여 더 좋은 근사법이므로 정확한 경우가 많다. 이에 비해 이산점에 의한 방법은 측정이 간편하고 재현성이 뛰어난 장점을 가지므로 상황에 맞게 선택하여 사용한다.

음향 인텐시티는 압소음의 영향을 받지 않는 데, 이것은 각 소음원에 대하여 각각의 표면 공간을 설정하여 음향 인텐시티를 측정할 수 있기 때문이다. 이를 통해 압소음보다 10 dB 낮은 음원에 대하여도 1 dB 정도의 오차로 음향 파워를 측정 가능하다.

### 3. 펌프 및 모터의 소음 레벨 측정법

#### 3.1 소음 레벨 측정법<sup>5,6)</sup>

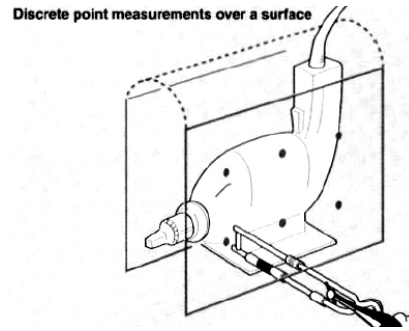
ISO 4412-1,2의 규격은 유압 펌프 및 모터가 방사하는 정상적인 소음 레벨을 측정하는 방법에 대하여 규정한다. 또한 ISO 4412는 소음원(펌프 및 모터)을 중심으로 반구면에서 측정한 것에 기초를 둔다.

ISO 4412는 ISO 3744 및 3745와 연계하여 적용하여야 하는 데, 일반적인 경우 ISO 3744의 환경 요구레벨을 만족시키는 반사면 상에서 이루어져야 하며, 정밀 측정의 경우 ISO 3745의 기준을 만족시켜야 한다.

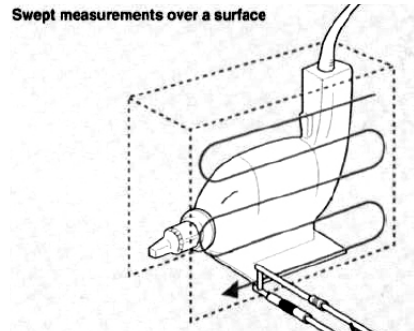
##### 3.1.1 측정 조건<sup>5,6)</sup>

ISO 4412는 무향실이나 반무향실에서의 측정을 기준으로 한다. 측정 장소는 바닥면 이외의 것으로부터 음의 반사가 없어야 한다.

배경 소음 레벨은 소음원 보다 10 dB 이상 적은 것이 바람직하다. 여기서 배경 소음은 소음원에 소음 커버를 씌우고, 소음원(펌프 및 모터)을 제외한 모든 주변 장치에서 발생하는 소음 레벨을 측정한다. 소음 커버는 소음원 자체만을 덮어야 하며, 배경 소음에 영향을 줄 수 있는 유압 라인을 덮어서는 안된다.



(a) 이산점에 의한 측정방법



(b) 스캐닝에 의한 측정방법

그림 5 음향 인텐시티의 측정 방법

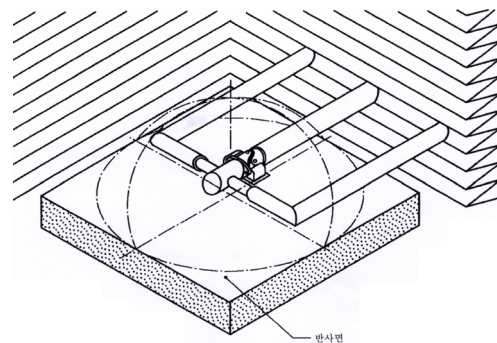


그림 6 반구상의 측정면을 갖는 유압 펌프의 소음 시험 형태

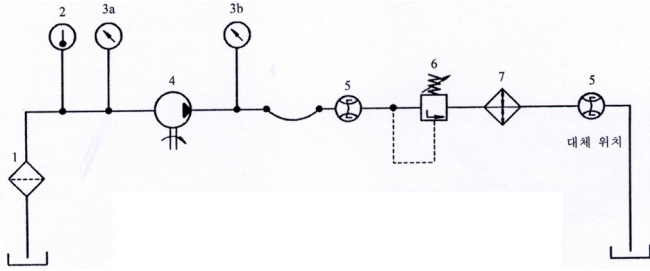
그림 6은 ISO 4412-1에 따른 유압 펌프의 소음 시험 형태를 나타낸다. 소음원을 제외한 주변장치(펌프 구동용 전동기, 모터 피구동 부하 등)는 원칙적으로 실외에 설치한다.

소음의 측정은 원칙적으로 정격 운전조건에서 실시한다. 정격운전 조건이란 제조자가 설계의 기준으로 하는 조건을 말하며, 일반적으로 압력 및 회전 속도로 표시한다. 실험 시 기류의 온도는 25 ~ 50 °C의 범위로 한다.

##### 3.1.2 유압회로

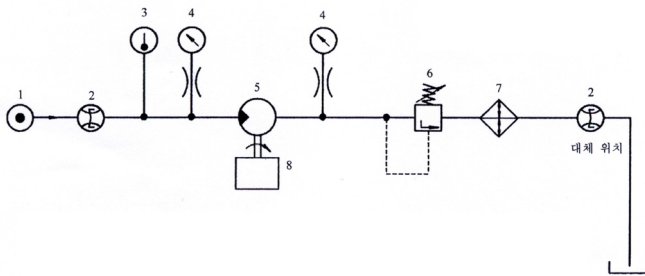
시험용 유압 회로는 정상부하에서의 형식시험에





1 필터
2 온도 센서
3a 압력 센서
3b 스너버(snubber) 압력 센서
3 시험용 펌프
5 유량계
6 압력 조절 밸브
7 온도 조절기

(a) 유압 펌프의 시험 회로(ISO 4412-1)



1 필터
2 온도 센서
3 압력 센서
4 스너버(snubber) 압력 센서
5 시험용 모터
6 유량계
7 압력 조절 밸브
8 온도 조절기

(b) 유압 모터의 시험 회로(ISO 4412-2)

그림 7 소음 시험용 유압 회로<sup>5,6)</sup>

사용하는 회로에 준하는 것으로 하고 소음 시험의 전후에 시험 대상 펌프의 성능변화의 유무를 검정할 수 있는 것이 바람직하다. 부하밸브로서는 자유 가동 부분이 없는 가변 스토틀 밸브를 사용하는 것이 바람직하나 작동이 안정되면 릴리프 밸브와 같은 자동 밸브를 사용하여도 좋다(그림 7 참고).

### 3.1.3 측정 방법

마이크로폰은 일반적으로 10개의 지점을 반구형으로 사용한다(ISO 3744, 그림 3 (a) 참고). 소음계의 주파수 보정회로는 A특성, 시간 보정회로는 느린 동특성(slow)을 사용하여 측정한다. 측정된 소음 레벨을 식 (11)을 사용해 평균하여 평균 소음 레벨을 구할 수 있다.

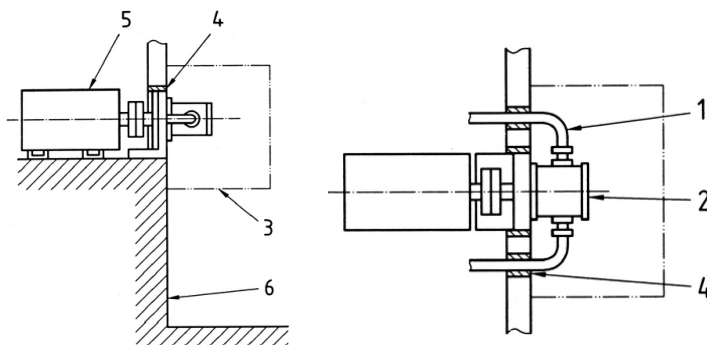
$$\overline{L_{PA}} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{pi}/10} \right] \quad (11)$$

음향 파워 레벨은 식 (8)에 식 (11)의 평균 음압 레벨과 식 (9)의 온도 보정값을 대입하여 구할 수 있다.

유압 펌프의 밴드 음압 레벨을 분석함으로써 소음의 주파수 성분별 구분이 가능하다. 밴드 음압 레벨은 평탄 특성이나 C특성의 주파수 보정회로를 사용하여 측정한다.

### 3.2 음향 인텐시티 측정법(ISO 16902-1)<sup>7)</sup>

ISO 16902-1은 음향 인텐시티를 사용한 펌프의 음향 파워 레벨의 결정법에 대해서 규정한다. 먼저 탐



1 배관
2 시험 펌프
3 측정 표면
4 연한 고무 실(seal)
5 원동기
6 반사 평면

그림 8 원동기용 견고한 지지대와 반사평면을 통과하는 관을 갖는 펌프 마운팅 면의 반사 평면<sup>7)</sup>

침자의 측정면을 결정하는 것이 중요하며, 측정면은 기하학적 형상을 단순화시켜 가능한 배관이 측정면을 통과시키지 않도록 한다<sup>7)</sup>.

펌프의 마운팅은 마운팅으로부터 방사된 소음이 가능한 낮도록 구성되는 것이 바람직하다. 이는 수동적인 방법에 의해 구성된다(예를 들면, 높은 감쇠 특성의 재료를 이용한다). ISO 16902-1에서는 5가지 상황에 대하여 마운팅 조건과, 측정면의 설정을 그림으로 설명하고 있다(그림 8 참고). 이 규격은 유압 펌프 장치의 설치 및 마운팅의 시험 규칙을 중요하게 설명하고 있으며, 측정 방법은 ISO 9614-1, 2의 규격을 연계하여 적용하여야 한다.

#### 4. 압력/유량 맥동의 계측

##### 4.1 ISO 10767 측정법

ISO 10767-1은 유압 펌프의 정밀 맥동 측정법으로 시험 펌프에 연결되는 유압 회로와는 무관한 펌프의 내부 유량( $Q_s$ )과 펌프 내부 임피던스( $Z_s$ )의 정밀 측정이 가능해서, 펌프의 맥동 특성을 완전하게 기술할 수 있다. 또한,  $Q_s$  및  $Z_s$ 의 정보는 유압 회로내의 임의의 위치에서 압력 및 유량 맥동의 시뮬레이션에 활용할 수 있다. 그러나 연산 과정이 복잡하고 계측 엔지니어의 기술 수준 및 숙련도에 따라서 큰 계측 오차가 발생 할 수 있는 것이 문제점이다.

이에 반해 ISO 10767-2의 단순 압력 맥동 측정법은 그 측정법이 비교적 간단하고 유압 펌프 상호간의 맥동 특성 비교에 활용이 가능하다. 하지만 펌프가 가지는 맥동 특성의 고유값을 알 수 없기 때문에 임의의 위치에서의 압력 및 유량 맥동의 예측에 활용은 불가능하다.

ISO 10767-3의 유압 모터의 맥동 측정법은 기본적으로 ISO 10767-1에 사용된 2차 맥동원법을 따른다. 따라서 ISO 10767-3은 ISO 10767-1과 비교할 때, 측정 장치의 구성을 제외하고는 모두 동일하다.

##### 4.2 유압 펌프의 정밀 맥동 측정법(ISO 10767-1)<sup>8)</sup>

###### 4.2.1 계측법의 원리<sup>1, 8)</sup>

ISO 10767-1의 유압 회로를 그림 9에 나타내었다. 2차 맥동원법에는 시험 펌프 이외에 관로의 우측 끝에 별도의 맥동원(유압 펌프 또는 특수 제작한 맥동 발생 장치)을 설치하고, 이것에 의하여 발생하는 위치  $x_1$  및  $x_2$ 에서의 압력 맥동( $P_{x1}$ ,  $P_{x2}$ )을 식 (12)로 나타낸다.

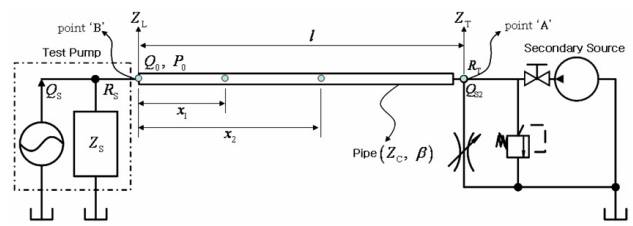


그림 9 2차 맥동원법에 대한 ISO 10767-1의 유압 회로

$$\frac{P_{x2}}{P_{x1}} = \frac{e^{-j\lambda(l-x_2)} + R_S \cdot e^{-j\lambda(l+x_2)}}{e^{-j\lambda(l-x_1)} + R_S \cdot e^{-j\lambda(l+x_1)}} \quad (12)$$

따라서,  $P_{x1}$ ,  $P_{x2}$ 를 측정하면 식 (12)로부터 관로 상류측 끝 파동반사율( $R_S$ )가 구해지고, 이어서 식 (13)으로부터 펌프의 내부 임피던스( $Z_S$ )가 구해진다.

$$R_S = \frac{Z_S - Z_C}{Z_S + Z_C} \quad (13)$$

한편, 시험 대상 펌프(1차 맥동원)의 유량 맥동에 의하여 발생하는 위치  $x_1$  및  $x_2$ 에서의 압력 맥동  $P_{x1}$ ,  $P_{x2}$ 를 측정하면 식 (12')를 통해 관로의 하류 끝 파동반사율( $R_T$ )를 구할 수 있다.

$$\frac{P_{x2}}{P_{x1}} = \frac{e^{-j\lambda x_2} + R_T e^{-j\lambda(2l_1 - x_2)}}{e^{-j\lambda x_1} + R_T e^{-j\lambda(2l_1 - x_1)}} \quad (12')$$

시험 대상 펌프만을 구동하면서 임의의 위치에서 압력 맥동을 측정하고, 위에서 구한  $R_S$ ,  $R_T$ ,  $Z_S$ 를 식 (14)에 대입하면, 펌프에 유량 맥동( $Q_S$ )를 구할 수 있다.

$$Q_S = \frac{P_x \cdot (Z_S + Z_C)}{Z_S \cdot Z_C} \left\{ \frac{1 - R_S \cdot R_T e^{-j2\lambda l}}{e^{-j\lambda x} + R_T e^{-j\lambda(2l - x)}} \right\} \quad (14)$$

###### 4.2.2 측정 장치의 구성 및 제작상의 유의점

그림 10은 ISO 10767-1의 규격에서 제시한 측정 시스템의 관로 구성을 나타낸다. 그림 10과 같이 유압 회로를 구성하였을 때, 관로 오른쪽 끝에서의 특성치인  $R_T$  계측을 위한 점 A는 진직(眞直) 단순 관로상의 한 위치에 있다고 가정할 수 있으며, 이렇게 함으로써 부하 밸브, 릴리프 밸브, 2차 맥동원 직전의 볼 밸브에서의 파동 반사율은 생각할 필요가 없어진다.

회로상의 관로 안지름은 유압 펌프 토출구의 안지름과 10% 이상 차이를 가지면 안되며, 또한 유압 펌

프의 토출구와 관로를 연결하기 위한 연결 금구의 길이는 관로 안지름의 2배를 초과해서는 안된다. 이 때 사용되는 관로는 균일하고 강성이 있는 진직(眞直) 금속관으로 하고, 관로의 안지름은 펌프 토출구 지름의 80~120%로 한다.

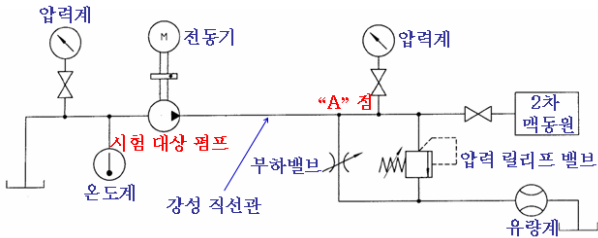


그림 10 ISO 10767-1의 유압 회로도

압력 변환기는 그림 11과 같이 관로 길이에 따라 설치한다. 이 때 압력 변환기의 다이어프램이 관 내부 벽에서  $\pm 0.5$  mm 이내로 인접하도록 부착해야 한다. 여기서 사용되는 압력 변환기와 압력 맥동의 계측 장비는 펌프 회전수에 대한 10개의 조화 주파수(harmonic frequency) 성분의 진폭과 위상을 측정할 수 있어야 한다. 이 때 두 개 또는 세 개의 압력 변환기로부터 압력 맥동이 동시에 측정되어야 하며, 기준 이상의 정확성과 분해능(진폭  $\pm 1\%$  이내, 위상  $\pm 1\%$  이내, 주파수  $\pm 0.5\%$  이내)을 가지고 있어야 한다.

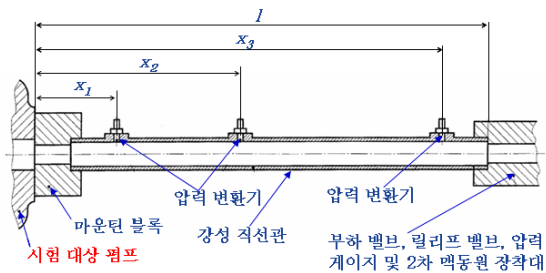


그림 11 ISO 10767-1의 관로 구성<sup>1,8)</sup>

#### 4.2.3 측정 방법 및 측정 결과의 예<sup>1,8)</sup>

측정은 크게 나누어, (1) 시험 대상 펌프(펌프 ①)와 2차 맥동원(펌프 ②)을 모두 구동 시킨 상태에서의 측정, (2) 시험 대상 펌프만을 구동시킨 상태에서의 측정으로 구분된다.

(1)의 측정은 시험 대상 펌프의 내부 임피던스( $Z_S$ )를 구하는 것이 목적이므로, 계측된 압력 맥동( $P_{x1}$ ,  $P_{x2}$ )의 주파수 계열 신호로부터 펌프 ②의 신호만을 분리(펌프 ①이 생성한 신호를 배제)할 수 있

어야 한다. 이를 위해서는 펌프 ①, ②에 의해 생성한 조화 성분들(harmonic components)의 주파수가 겹치지 않도록 두 펌프의 회전 속도를 결정해야 한다.

펌프 ①만을 구동 시켰을 때의 압력 계측치의 예를 그림 12에 나타내었다.

펌프 ①과 ②를 동시에 구동시켰을 때의 압력 맥동 측정 데이터들을 4.2.1절에서 설명한 절차에 따라 연산함으로써 시험 대상 펌프의  $Z_S$ 를 구할 수 있으며, 계측 예를 그림 13에 나타내었다.

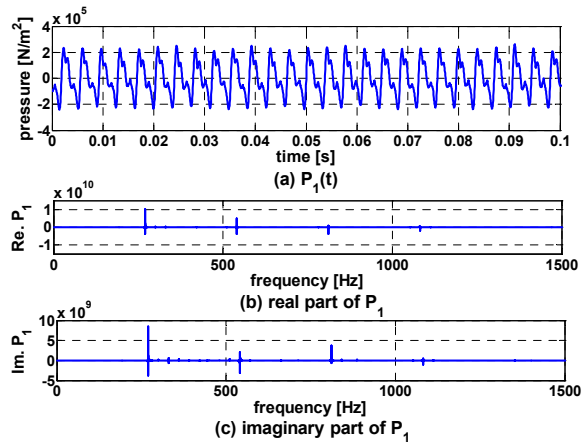
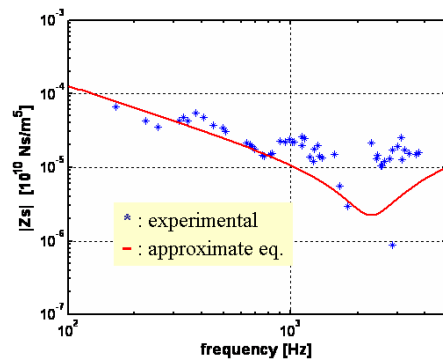
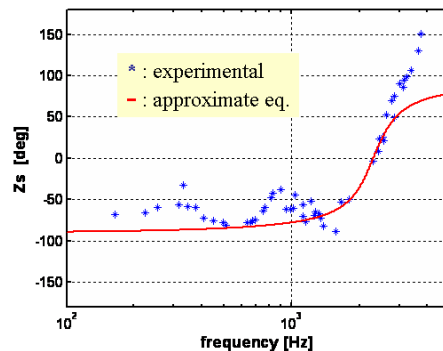


그림 12 측정된  $P_1(t)$ ,  $P_1$ 의 실수값 및 허수값<sup>1)</sup>



(a)  $Z_S$ 의 크기



(b)  $Z_S$ 의 위상

그림 13 유압 펌프의 내부 임피던스( $Z_S$ )<sup>1)</sup>



그림에서 ‘\*’ 표시는 실험치를, 실선은 실험치를 통해 구한 근사식을 표시하였다.

펌프 ①만을 사용한 측정에서 얻은 압력 맥동 측정치와 앞에서 계산된  $R_S$ ,  $R_T$  및  $Z_S$  등을 식(14)에 적용함으로써  $Q_S$ 를 구하였으며, 시간-압력 데이터를 그림 14에 나타내었다.

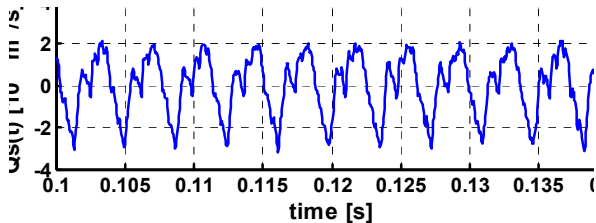


그림 14 유압 펌프의 내부 유량 맥동( $Q_S$ )<sup>1)</sup>

#### 4.2.4 유량 맥동 측정치의 신뢰성 검증

4.2.3절에서 계산된  $Q_S$ 는 관로상의 압력 맥동 측정치로부터 간접적으로 측정된 결과이다.  $Q_S$  측정치의 신뢰성은, 일반적으로 측정된  $Q_S$ 와 유압 관로의 전달 특성식을 사용하여 연산한 관로상 제3의 위치에서의 압력 맥동(계산치,  $P_{x,3}$ )과 그 위치에서 실측한 압력 맥동 데이터( $P_{x,3}$ )를 비교함으로써 검증할 수 있다.

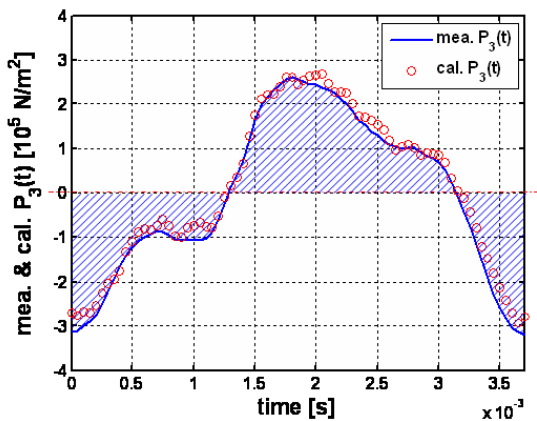


그림 15  $Q_S$ 로 계산한  $P_3$ 와 실측한  $P_3$  비교<sup>1)</sup>

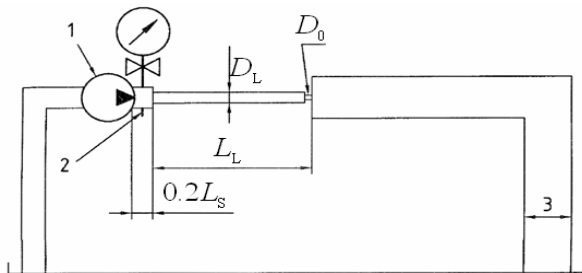


그림 16 ISO 10767-2의 시험 장치 구성<sup>9)</sup>

### 4.3 유압 펌프의 단순 맥동 측정법(ISO 10767-2)<sup>9)</sup>

#### 4.3.1 측정법의 원리

ISO 10767-2의 측정법은 단순 압력 맥동의 측정법으로 펌프에 특별한 시험 회로를 연결함으로써 펌프가 가지는 고유한 압력 맥동을 측정할 수 있다. 그림 16은 ISO 10767-2의 시험 장치 구성을 나타낸다. 이 규격은 짧고 작은 지름의 강관과 오리피스가 펌프 출력 포트에 직렬로 연결된다. 시험 관로와 끝단 오리피스의 종합적인 임피던스( $Z_E$ , 시험관로 입구에서의 임피던스)가 시험 펌프의 내부 임피던스( $Z_S$ )에 비하여 매우 크도록 설계하면, 시험 회로와는 독립적으로 시험 펌프의 특성에 따라 발생하는 압력 맥동을 측정하는 것이 가능하다.

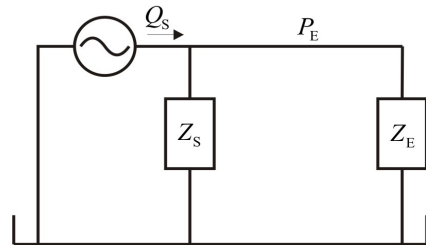


그림 17 전송 관로를 포함한 회로의 임피던스 표시

그림 17에서 펌프 토출구의 압력 맥동( $P_E$ )은 식 (15)로 표현된다.

$$P_E = \frac{Q_S Z_S Z_E}{Z_S + Z_E} \quad (15)$$

여기서  $Q_S Z_S$ 는  $Z_E$ 가 무한히 높은 경우(출구 포트를 막을 때에 상당)라면 펌프 출력 포트에서 발생하는 압력 리플이 아래의 식으로 얻어진다.

$$P_E = Q_S Z_S \simeq P_B \quad (16)$$

식 (16)을 식 (15)에 대입하면 식 (17)이 된다.

$$\frac{P_E}{P_B} = \frac{Z_E}{Z_E + Z_S} \quad (17)$$

따라서, 압력 맥동비( $P_E/P_B$ )는 오직 펌프 토출구 임피던스와 펌프 내부 임피던스의 값에 의해서 결정된다.

그림 18은 ISO 10767-2의 방법으로 설계하였을 때,  $P_E$ 와  $P_B$ 의 압력비를 나타낸 것이다. 그림에서  $Z_E$ 가  $Z_S$ 에 비해 매우 큰 경우에( $Z_E \rightarrow \infty$ ) 압력 맥동비는 “1”이 된다. 따라서 펌프 출구 포트에서 측정된 압력  $P_E$ 는 거의 이론적인 폐쇄 압력 (theoretical blocked pressure)  $P_B$ 와 같게 된다. 따라서 펌프 토출구의 압력 맥동( $P_E$ )을 측정하면 부하 장치와는 무관하게 펌프의 고유한 압력 맥동을 측정할 수 있다.

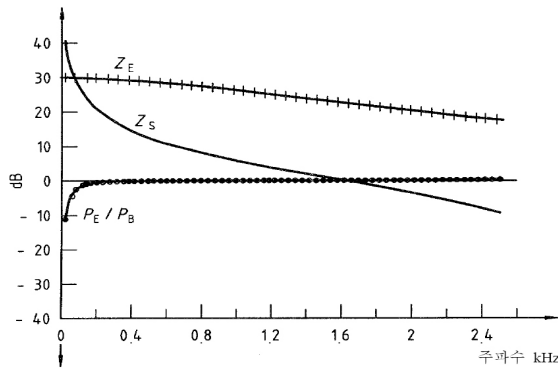
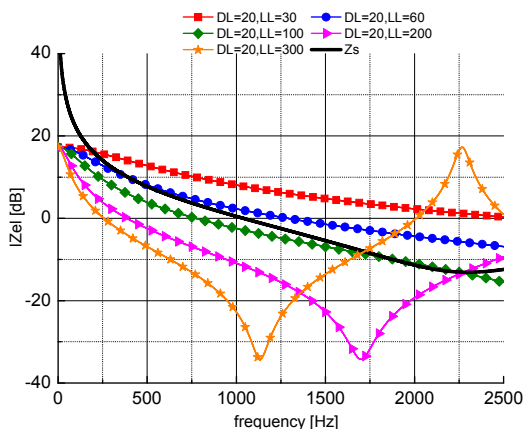


그림 18 펌프 토출구와 닫힌 압력 리플의 측정값 비교( $D_L = 0.28 D_S, L_L = 1.0 L_S$ )<sup>9)</sup>

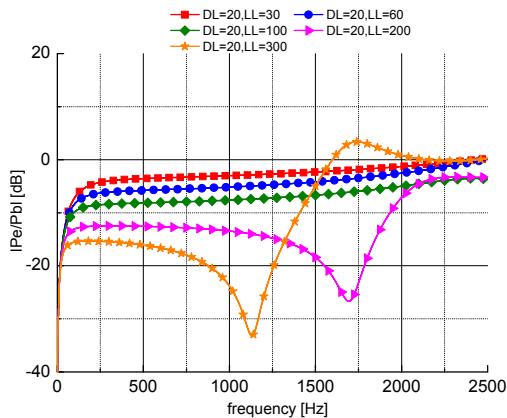
### 4.3.2 측정 장치의 구성 및 제작상의 유의점

ISO 10767-2의 규격에는 펌프의 출구 포트를 모양을 원기둥으로 가정한다. 따라서 출구 포트의 체적( $V_S$ )을 계측하고, 원기둥의 지름( $D_S$ )를 가정하면 식 (18)로 출구포트의 길이( $L_S$ )을 계산할 수 있다.

$$L_S = \frac{V_S}{A} = \frac{4V_S}{\pi D_S^2} \quad (18)$$



(a) 출구 관로 입구에서의 임피던스( $Z_E$ )



(b) 압력 맥동 비( $P_E/P_B$ )

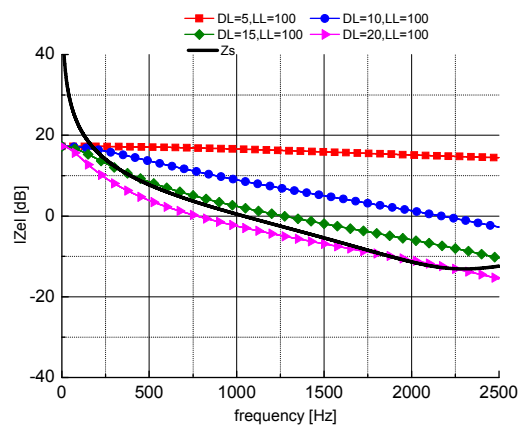
그림 19 출구 배관의 길이( $L_L$ )에 따른 압력 맥동

여기서 문제점은 출구 포트의 직경( $D_S$ ) 값을 가정에 따라서 출구 관로의 길이( $L_S$ )가 실제 펌프의 토출구 길이와는 달라질 수 있다는 것이다.

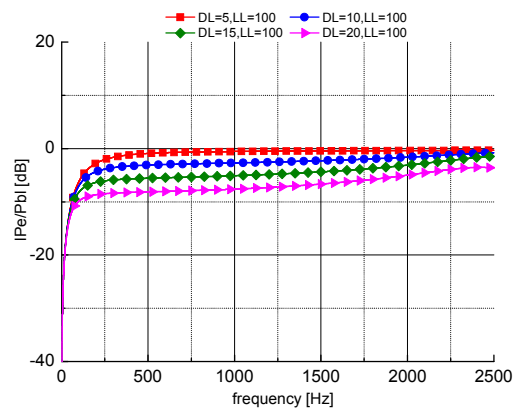
그림 19의 시험 장치를 구성하기 위해서는 출구 관로의 직경( $D_L$ ), 길이( $L_L$ ) 및 출구 배관 하류의 오리피스 직경( $D_o$ )을 ISO 10767-2의 규격에 따라서 설계한다.

그림 19와 20은  $L_L$ 과  $D_L$ 의 변화에 따른  $Z_E$ 의 변화를 시뮬레이션한 결과이다. 그림 19의 시뮬레이션 결과를 보면, 시험용 배관을 더 짧게 설계하면  $Z_E$ 와  $Z_S$ 를 평행하게 만드는 것을 알 수 있다. 만약, 시험 관로의 길이가 펌프의 토출구 길이와 동일하다면,  $Z_E$ 와  $Z_S$ 는 거의 동일한 임계주파수를 가지고 평행이 된다. 그러면  $Z_E \gg Z_S$ 인 모든 경우에 대해서 식 (17)이 성립한다. 따라서  $P_E \approx P_B$ 가 되고, 펌프의 고유한 압력 맥동을 계측할 수 있다.

그림 20은  $L_L \approx L_S$ 일 때,  $D_L$ 의 변화에 따른  $Z_E$ 의 변화를 시뮬레이션한 결과이다. 출구 배관의 안지름  $D_L$ 이 펌프 토출구의 직경  $D_S$  보다 작으면  $Z_E$



(a) 시험 관로 입구에서의 임피던스( $Z_E$ )



(b) 압력 맥동 비( $P_E/P_B$ )

그림 20 출구 배관의 직경( $D_L$ )에 따른 압력 맥동

가 커진다. 따라서, 출구 배관을 설계함에 있어서, 시험용 배관의 길이는 짧고( $L_L \approx L_S$ ), 직경은 펌프 토출구의 직경보다 작은 것이( $D_L < D_S$ ) 바람직하다.

#### 4.4 ISO 10767-3의 측정 방법<sup>10)</sup>

유압 모터의 내부 임피던스 및 유량 맥동 측정을 위한 ISO 10767-3의 수학적 모델은 기본적으로 2차 맥동원법을 따른다. 따라서 ISO 10767-3은 ISO 10767-1에 대하여 그 측정 장치의 구성을 제외하고는 모두 동일하다. 그림 21에서 나타낸 바와 같이 ISO 10767-3의 장치구성은 시험 대상 펌프를 대신하여 모터를 설치한다. 이 때 시험 대상 모터의 회전 속도를 조절하기 위하여 별도의 부하장치가 필요하다. 또한 그림 21에서 유압 펌프가 2차 맥동원으로 적합하지 않을 경우 별도의 2차 맥동원 장치를 설치해야 한다.

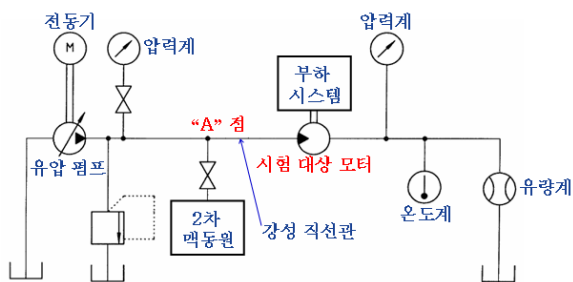


그림 21 ISO 10767-3의 유압 회로도

## 5. 결 언

유압 펌프 및 모터에서는 유체 전파 소음의 비중이 크며, 펌프에서 관로를 통해서 전파되는 유량/압력 맥동에 기인하는 것으로 알려져 있다.

본 해설에서는 유압 펌프의 소음 특성의 측정법(음향 파워 레벨)과 유량/압력 맥동의 측정법에 대한 ISO 규격들을 간단히 소개하였다.

향후에 유압 펌프 및 모터의 저소음 및 맥동 저감 기술 개발에 본 기술해설이 도움이 되기를 기대한다.

## 참고 문헌

- 1) 이일영, 김지웅, 강만곤, "ISO 10767-1에 기초한 유압 펌프의 유량 맥동 측정 및 정밀도 평가", 유공압시스템학회 논문집, 제4권 3호, pp. 22~27, 2007.
- 2) "음향 인텐시티", 브뤼엘 앤드 케아

- 3) ISO 3745: Acoustics-Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure-Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms
- 4) ISO 9614-1: Acoustics-Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity- Part1: Measurement at discrete points
- 5) ISO 4412-1: Hydraulic fluid power - Test code for determination of airborne noise levels - Part 1: Pumps
- 6) ISO 4412-2: Hydraulic fluid power - Test code for determination of airborne noise levels - Part 1: Motors
- 7) ISO 16902-1: Hydraulic fluid power - Test code for the determination of sound power levels of pumps using sound intensity techniques: Engineering method-Part 1: Pumps
- 8) ISO 10767-1: Determination of pressure ripple levels generated in systems and components, Part 1 : Precision method for pumps
- 9) ISO 10767-2: Determination of pressure ripple levels generated in systems and components, Part 2 : Simplified method for pumps
- 10) ISO 10767-3: Determination of pressure ripple levels generated in systems and components, Part 3 : Method for motors

### [저자 소개]



강만곤 (책임저자)

E-mail: ezekiel2@nate.com

Tel: 051-629-6153

1980년 3월 15일생

2005년 부경대학교 기계공학부 졸업. 2007

년 부경대학교 지능기계공학 석사 과정 졸업.

2007~2009 대동공업(주) 기술연구소,

2009~현재 (주)효성에바라 기술연구소 재직

### [저자 소개]



최세령

E-mail: allsunday@hanmail.net

Tel: 051-629-6153

1983년 9월 27일생

2008년 부경대학교 기계공학부 졸업. 2008

~현재 부경대학교 대학원 메카트로닉스공

학과 재학중