

레이저 간섭계를 이용한 초음파 변환기의 방사 컨덕턴스 결정

조문제^o, 황철호, 정완섭, 서상준
한국표준과학연구원, 대전 305-606

Radiation Conductance Determination of Ultrasonic Transducer using Laser Interferometry

M. J. Jho, C. H. Hwang, W. S. Cheung, S. J. Suh

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon 305-606

요 약

초음파 변환기의 방사 컨덕턴스를 결정하기 위해서는 변환기로부터 방사된 음향파워와 입력전압의 정밀측정을 요구하게 된다. 음향파워는 초음파를 거의 완전 반사시킬 수 있는 표적을 사용하여 변환기로부터 방사된 음압에 의해 표적에 가해진 힘을 수동맞춤과 레이저 간섭계로 측정하여 구하였으며, 입력전압은 열 변환기와 전압계를 한 시스템으로 하여 정밀 측정하였다. 방사 컨덕턴스의 최대 측정오차는 $\pm 4 \times$ 이내로 평가되었다.

I. 서 론

초음파 변환기의 중요한 음향특성 중에 하나는 변환기에 인가되는 입력전압의 제공에 대한 변환기로부터 방출되는 음향파워의 비로 주어지는 방사 컨덕턴스이다. 따라서 방사 컨덕턴스를 정확히 결정하기 위해서는 음향파워와 입력전압의 정밀측정을 요구하게 된다. 음향파워의 측정은 측정용 표적에 가해진 방사 힘을 측정하여 결정하는 방법^[1], 고정된 라이트로폰을 사용하여 초음파 음장 내를 주사하여 결정하는 방법^[2], 풍의 외절을 이용하는 방법^[3], 열량계를 이용하는 방법^[4] 등이 있다. 이들 중에서 방사 힘을 측정하여 음향파워를 결정하는 방법은 근거리 음장과 원거리 음장에 무관하게 임의의 위치에서 측정할 수 있을 뿐만 아니라 발생원으로부터 방사된 초음파가 통과하는 평면상의 여러 위치에서의 음압을 측정하여 격분할 필요가 없으며, 측정장비를 고정하거나 조정하기에 매우 용이하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 초음파를 거의 완전 반사시킬 수 있는 표적을 사용하여 초음파 변환기로부터 방사된 음압에 의해 표적에 가해진 힘을 레이저 간섭계와 수동맞춤으로 측정하여 이로부터 음향파워를 측정할 수 있는 시스템을 구성하였다. 또한 이때 초음파 변환기에 가해지는 정현신호의 전압은 열변환기와 전압계를 한 시스템으로 구성하여 정밀 측정하였다. 이와같이 측정된 음향파워와 입력전압으로부터 의도중에 사용되고 있는 주파수 대역인 0.5 MHz에서 15 MHz 영역에서의 초음파 변환기의 방사 컨덕턴스 결정을 위한 정밀 측정기법을 제시하고자 한다.

II. 방사 컨덕턴스 측정원리

방사 컨덕턴스(G)는 초음파 변환기의 선형성을 나타내는 중요한 양으로서, 변환기에 가해지는 입력전압(V_{eff})의 제공에 대한 음향파워(P)의 비로 정의되며, 단위는 일반적으로 Siemen($S = Watt/V_{eff}^2$)을 사용한다.

$$G = \frac{W}{V_{eff}^2} \quad (1)$$

방사 컨덕턴스는 식 (1)에 나타난 바와 같이 입력전압과 음향파워를 측정하여 결정하게 되는데, 입력전압은 열 변환기와 전압계를 한 시스템으로 구성하여 정밀 측정할 수 있다. 변환기로부터 방사된 음향파워는 방사 힘 측정기법을 이용한다. 두 매질의 경계면 상에 초음파가 가해져서 두 매질의 에너지 밀도가 달라지게 되면 에너지 밀도가 감소하는 방향으로 경계면 상에 힘이 가해지게 되는데, 이때 가해지는 힘을 방사 힘이라 한다. 두 매질의 경계면 상에 가해지는 단위 면적당의 힘은 두 매질 사이의 음향 에너지밀도의 차와 같다. 따라서 방사 힘은 동일한 크기의 음압이 가해지더라도 경계면 상의 반사계수에 따라 달라지게 된다. 초음파 에너지가 경계면 상에서 전부 반사된다면 음향파워는 경계면 상에 가해진 시간 평균된 힘과 전파속도의 합수로 주어지며, 식 (2)와 같이 구할 수 있다^[5].

$$W = \frac{Fc}{2\cos^2\theta} = \frac{mgc}{2\cos^2\theta} \quad (2)$$

여기서 F 는 음의 전파방향과 동일한 방향의 방사 힘 성분, m 은 힘에 비례하는 동가질량, g 는 중력가속도, c 는 음파속도를 나타내며 23°C 순수한 물의 경우 1491 m/sec 이다. θ 는 경계면에 대한 법선방향과 파의 진행방향 사이의 각도를 나타내며, 만약 θ 가 45°라면 초음파 파워는 $W = mgc$ 로 주어진다.

Figure 1은 방사 컨덕턴스 측정기법의 원리를 보여준다. 그림에 나타난 바와 같이 경계면 상에서 초음파 에너지를 완전 반사시키기 위해 초음파의 진행 경로상에 반사용 표적을 위치시킨다. 초음파 변환기는 뒷쪽에서 아래쪽을 향하여 초음파를 방사할 수

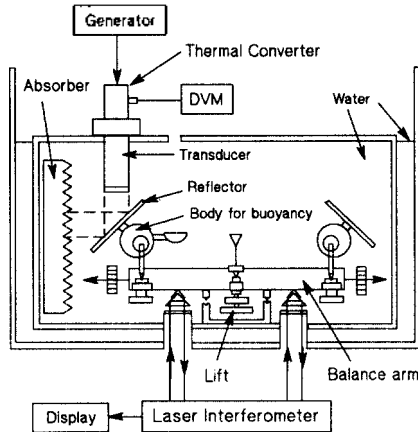


Figure 1. Radiation conductance measurement using equal-arm balance and laser interferometer.

있도록 수조 윗부분에 고정되어 있으며, 표적은 수동맞저울의 양팔 끝부분에 놓여진다. 초음파 변환기로부터 방사된 빛은 표적에 의해 차단되며, 이때 표적에 힘이 가해지게 된다. 이 힘에 비례하는 등가질량은 수동맞저울과 레이저 간섭계에 의해 측정된다. 음향파위는 이와같이 측정된 등가질량을 식 (2)에 대입하여 구하게 된다. 초음파 변환기에 가해지는 입력전압은 그림에 나타난 바와 같이 열 변환기와 전압계에 의해 정밀 측정된다. 초음파 변환기의 방사 권역턴스는 상기와 같이 측정된 등가질량과 입력전압을 식 (1)에 대입하여 구할 수 있다.

III. 측정장치 및 방법

Figure 2는 방사 권역턴스 측정장치를 도해적으로 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 수동 맞저울과 표적 모두 물속에 내장되어 있으며, 수조는 온도 및 대기압의 변화에 따른 표적 및 저울의 부력 변동량을 최소화하기 위해 이중으로 제작하였다. 수조 윗 부분은 물 표면에서의 증발을 막기 위해 아크릴 판에 의해 밀폐하였으며, 반사용 표적을 포함한 수동 맞저울은 물에서의 온도구배에 따른 부력변동량을 상쇄시키기 위해 완전 대칭으로 설계 제작하였다. 초음파 변환기는 윗쪽에서 아래쪽을 향하여 초음파를 방사할 수 있도록 설치하였으며, 반사용 표적은 수동 맞저울의 팔(arm) 끝에 달려있는 사파이어로 된 바늘베어링(needle bearing) 위에 놓여진다. 반사용 표적으로부터 반사된 초음파는 수조 벽면에서 계산되어 표적이거나 초음파 음장의 요란을 초래하므로 수조 왼쪽 측벽에 흡음재를 설치하였다.

그림에 나타난 바와 같이 측정장치는 크게 초음파 변환기에 신호를 가해주는 구동부와 변환기로부터 방사된 방사 힘을 측정할 수 있는 계측부로 구성되어 있다. 구동부는 신호 발생기로부터 나온 신호의 주파수를 측정하기 위한 주파수 계수기와 변환기에 인가되는 전압을 측정하기 위한 열 변환기와 전압계로 이루어

1993년도 한국음향학회 학술논문발표회 논문집(제 12권 1(m)호)

진다. 신호 발생기로부터 나온 정현신호는 초음파 변환기에 인가되며, 초음파 변환기는 수조 내에서 표적을 향하여 연직방향으로 초음파를 방사한다. 초음파 변환기에서 방사된 빛은 수동 맞저울에 달려있는 반사용 표적에 부딪치며, 이때 표적에 가해진 방사 힘에 의해 저울대가 기울어진다. 저울대의 기울어진 양은 저울에 부착되어 있는 직각 프리즘과 수조 밑에 있는 평 분광기 등으로 구성된 Michelson 간섭계에 의해 측정된다. 수동 맞저울과 레이저 간섭계로 이루어진 계측부는 정밀 고정된 1 mm 직경을 가진 기준분동(약 3.5 mg)에 의해 단위 질량당 간섭무늬의 이동수로 고정된다. 따라서 식 (2)의 등가질량 m 은 기준분동에 의해 측정된 저울대의 기울어진 값에 대한 초음파 방사에 의해 기울어진 측정값의 비로서 주어지며, 이로부터 초음파 파워를 구할 수 있다.

수동 맞저울은 측정장치의 정밀도에 직접적인 영향을 미치는 중요한 장치이다. 저울대는 직경 12 mm, 두께 1 mm, 길이 183 mm 인 PVC 파이프로 제작하였다. 저울대 중앙에는 지점날(knife wedge)을 장착시키기 위해 길이 44 mm, 폭 5 mm인 PVC 판이 부착되어 있다. 지점날은 직경 0.4 mm, 날끝의 각도가 52°, 길이가 2 mm인 사파이어를 사용하였으며, 지점날을 직경 2 mm 나사에 삽입하여 중심으로부터 동일한 거리에 나사 결합시킬 수 있도록 하였다.

레이저 간섭계는 Michelson 간섭계로 He-Ne 레이저, 광학 분할기, 광 다이오드, 반사 프리즘, 직각 프리즘, 렌즈, 광 변조기 등으로 구성된다. 본 연구에서 구성한 Michelson 간섭계는 수동 맞저울의 중심에서부터 같은 거리에 두 개의 프리즘을 사용함으로써 감도를 두배 향상시켰으며, 이와같은 간섭계 구성의 가장 큰 잇점은 물속에서 간섭계의 광로정에 따른 온도와 압력 변화에 따른 위상변화의 보상이다. 즉, 물속에서 두 광파의 광로길이를 같게함으로써 물의 온도와 압력변화에 따른 광로변화를 무시할 수 있다. 위상변화는 일반적으로 간섭 무늬의 이동 갯수를 세는 방법으로 측정하는데 이때 한개의 광 다이오드를 사용하면 간섭무늬의 이동 갯수를 세는 것에 불과하고 간섭무늬의 대칭성 때문에 광 경로차의 중간방향을 알 수가 없다. 따라서 본 연구에서 구성한 간섭계에서는 두개의 광 다이오드를 90°의 위상차를 갖는 간섭무늬의 위치에 놓아 수동 맞저울의 운동방향에 따라 변하는 위상이동의 방향을 결정하도록 하였다. 이 경우에 광 다이오드로 받은 두 신호는 간섭무늬의 이동방향에 따라 회전하는 회전장(rotation field)으로 합성할 수 있다. 사용된 광 검출기는 두개의 광 다이오드가 내장되어 있으며, 두 쌍의 광 다이오드에서 얻어진 네개 신호의 위상차는 각각 90°이다. 네개의 신호에 의해 형성된 회전장은 간섭무늬를 세는데 필요한 초기정보이다. 초음파 방사에 의한 저울대의 운동변위는 양방향 계수기를 거쳐 궁극적으로 기록기 또는 컴퓨터에 입력된다. 간섭계와 연결된 양방향 계수기는 시험신호를 1/16까지 측정할 수 있기 때문에 물 속에서 He-Ne 레이저 파장의 1/16(0.040 μm)까지 측정할 수 있으며, 이 변위의 단위를 IS(interferometer step)라고 부르기로 한다.

레이저 간섭계를 이용한 초음파 변환기의 방사 권덕턴스 측정

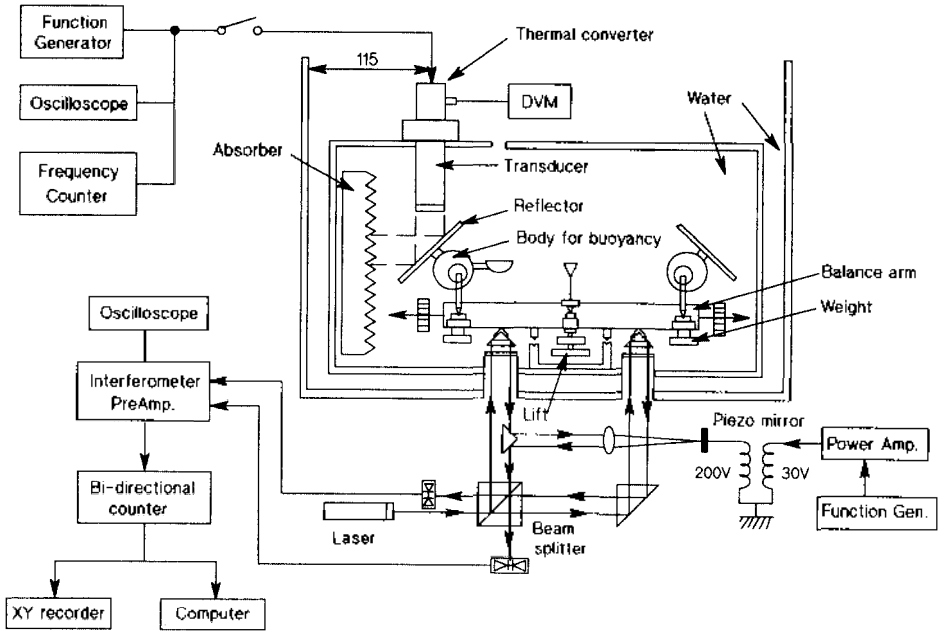


Figure 2. Experimental setup of the radiation conductance measuring system

IV. 결과 및 논의

초음파 변환기의 방사 권덕턴스 측정은 19.9°C에서 23°C 사이의 온도에서 행하였으며, 세종류의 Quartz 압전형 초음파 변환기 (1 MHz, 5 MHz, 10 MHz)를 이용하여 측정장치의 성능을 분석하였다. 측정 정밀도를 향상시키기 위해 측정에 사용된 물은 18 MΩ의 비저항치를 갖는 초순수 제조장치로 만들었으며, 물탱크 내에 히터를 설치하여 3시간 정도 끓이면서 진공펌프를 이용하여 물속에 녹아있는 가스와 기포를 제거하였다. 또한 대기중에서 자연적으로 용해되는 가스의 영향을 최소화하기 위해 12시간 주기로 물을 교환하여 실험하였다.

1. 수동 및저울의 특성분석

수동 및저울의 감도 및 진동주기는 정밀 교정된 1 mm 강구를 사용하여 측정하였다. 측정에 사용된 강구는 공기 중에서 4.164 ± 0.004 mg이며, 물속에서는 3.629 ± 0.004 mg 이다. 3.629 mg의 강구에 의해 야기된 힘파 밀각이 45° 인 방사용 표적으로 주어지는 등가 초음파 파워는 온도 19°C 에서 약 52.6 mW로 주어진다.

Figure 3은 물 속에 설치된 저울에 강구를 떨어뜨려 일정한 시간이 경과한 후 기는 영구자석 봉을 사용하여 강구를 제거했을 때 레이저 간섭계로 측정한 저울의 운동 변위를 보여준다. 저울은 순간적으로 최고치에 도달한 후 감쇠진동을 하며, 약 250초 이후에 평행점에 도달하게 된다. 저울의 진동주기는 약 20초로 공진 주파수는 0.05 Hz로 측정되었다. 저울에 강구를 올려놓기

전과 후의 IS의 갯수의 차이는 50,900으로 저울의 감도는 초음파 파워 1 mW 당 968 IS 즉 1 mW 당 38.7 μm로 주어진다.

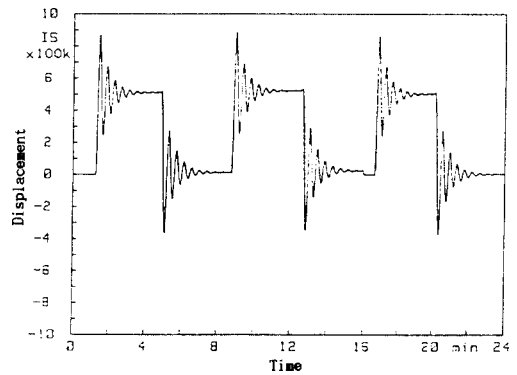


Figure 3. Calibration of equal-arm balance with 1mm steel ball.

2. 측정장치의 정밀도

방사 권덕턴스는 앞서 논술했 바와 같이 초음파 변환기에 가해지는 입력전압과 용량파위에 의해 결정된다. 입력전압을 변화시키면서 측정한 용량파위로부터 산출된 세종류 초음파 변환기의 방사 권덕턴스는 Table 1과 같다. 표에 나타난 바와 같이 1 MHz 변환기의 방사 권덕턴스는 약 3.54 μS, 5 MHz 변환기는 118.27 μS, 10 MHz 변환기는 504.64 μS으로 분석되었으며, 입력전압에

다른 방사 컨덕턴스의 상대오차는 세종류의 변환기 모두 1% 이내로 나타났다.

Table 1. Radiation conductances of three transducers.

초음파 변환기	공진주파수 (MHz)	입력전압 (Veff)	음향파워 (mW)	방사컨덕턴스 (μm)	상대오차 (%)
1 MHz	0.9947	24.358	2.10	3.5389	0.58
		49.094	8.55	3.5479	
		73.605	19.23	3.5601	
		88.857	27.87	3.5295	
5 MHz	4.9854	18.123	38.73	117.93	0.79
		25.073	74.58	118.64	
		31.359	116.44	118.41	
		37.672	167.59	118.09	
10 MHz	10.1445	3.190	5.13	503.78	0.24
		6.775	23.16	504.40	
		13.505	92.06	504.75	
		17.040	146.81	505.61	

방사 컨덕턴스 결정에 영향을 미치는 오차요인으로는 음향파워와 입력전압의 측정오차이다. 입력전압의 측정오차는 열 변환기와 전압계를 한 시스템으로 하여 분석한 결과 $\pm 1\%$ 이내로 평가되었다. 음향파워 측정의 오차요인으로는 크게 측정환경에 의한 오차와 수동 맞저울의 기계적 오차 및 레이저 간섭계의 간섭무늬수 측정방법의 오차 등으로 분류할 수 있다. 측정환경에 따른 오차는 외부로부터의 진동이나 공기유동, 온도변화, 대기압 변화 등으로 인해 측정조건이 시간에 따라 변화하기 때문에 발생된다. 0.1 mW와 1 mW 초음파 파워를 발생시켜 측정할 수동 맞저울의 운동변위는 Figure 4와 같다. 측정에는 1 MHz 초음파 변환기를 사용하였으며, 물의 온도는 19.3 °C이다. 그림에 나타난 바와 같이 0.1 mW의 곡선은 1 mW 곡선에 비해 평형점 위치에서의 형태가 매우 불규칙하며, 측정환경으로 인한 영향으로 시간이 지남에 따라 평형위치가 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 초음파 방사 전파 후의 저울의 운동변위를 정밀하게 측정하는 것이 어렵기 때문에 측정파워가 작을수록 오차는 커지게 된다.

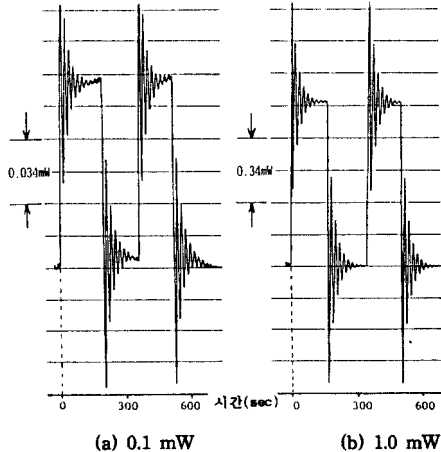


Figure 4. Temporal shapes of equal-arm balance from ultrasonic power.

1993년도 한국용량학의 학술논문발표회 논문집(제 12권 1(a)호)

수동 맞저울의 기계적 오차는 양팔 길이의 오차, 편심오차, 날과 날받이의 접촉상태와 유식장치의 불량 등으로 나눌 수 있다. 레이저 간섭계의 간섭무늬 수를 측정하여 저울의 운동 변위를 결정하는 과정에서 발생할 수 있는 오차는 풍과의 진행방향이 운동 속과 일치하지 않을 때 발생하는 풍 측정별 오차와 간섭무늬 수를 측정할 때 발생하는 오차가 있다. 간섭무늬 수를 측정할 때 발생하는 오차는 피전장을 몇개로 나누어 측정하느냐에 달려 있다. 본 연구에서는 피전장(한주기)을 16 등분하여 측정하기 때문에 He-Ne 레이저 파장의 $1/16(0.040 \mu\text{m})$ 의 분해능을 갖는다. 수동 맞저울의 감도는 $38.7 \mu\text{m}/\text{mW}$ 이므로 10 μW 음향파워 측정시 발생할 수 있는 오차는 $\pm 10\%$ 이며, 100 μW 파워에 대해서는 $\pm 1.0\%$ 로 감소한다. 간섭무늬 수의 측정오차를 줄이기 위해서는 저울의 감도를 증가시키거나, 간섭계의 분해능을 향상시켜야 한다. 저울의 감도는 감도조정 나사를 조정함으로써 보완할 수 있으며, 간섭계의 분해능은 보다 정밀한 양방향 계수기에 의해 향상시킬 수 있다.

음향파워의 재현성 여부는 다음 세가지 경우에 대해 반복 측정함으로써 확인하였다.

- (a) 임의의 초음파 음장하에서 인위적인 충격을 측정장치에 가한 다음 수분 후에 재 측정했을 때 충격적 상태와의 차이
- (b) 온도에 따른 변화.
- (c) 변환기를 제거하였다가 다시 원 위치시켰을 때의 변화.

상기와 같은 세가지 경우에 대해 각기 열번씩 측정된 결과 약 50 μW 음향파워에 대해 $\pm 9.14\%$, 100 μW 에 대해 $\pm 2.17\%$, 1 mW 이상의 파워에 대해 $\pm 0.98\%$ 의 표준편차를 얻었다. 이와 같은 오차를 유발시키는 원인은 크게 기계적인 요인과 전기적인 요인 및 광학적인 요인으로 나눌 수 있다. 기계적인 요인으로는 외부환경 영향에 따른 표적의 부러변화와 수동 맞저울의 기계적 오차 및 수막현상에 기인한 점착력(adhesive force)을 들 수 있다. 전기적인 요인으로는 측정장치의 시스템 오차와 초음파 변환기에 인가되는 전압을 전 상태와 같은 전압으로 조정하는 문제 등으로 나눌 수 있다. 광학적 요인으로는 간섭무늬 수의 측정방법에 따른 오차이다.

방사 컨덕턴스 결정에 있어서 이제까지 논술한 오차 이외에도 불규칙하게 발생하는 오차 요인들이 있을 것으로 판단되지만, 이들에 의한 오차를 무시한다면 방사 컨덕턴스의 최대 측정오차는 $\pm 4\%$ 이내로 평가되었다.

V. 결론

본 논문에서는 초음파를 거의 완전 만사시킬 수 있는 표적을 사용하여 초음파 음장하에서 표적에 가해진 방사 힘에 비례하는 동가질량을 수동맞저울과 레이저 간섭계로 측정하여 음향파워를 구하고, 이때 변환기에 가해진 입력전압을 열 변환기와 전압계로 측정하여, 이로부터 방사컨덕턴스를 결정하는 정밀 측정방법을 제시하였다.

본 연구결과는 다음과 같이 요약 평가될 수 있다.

레이저 간섭계를 이용한 초음파 변환기의 방사 인덕턴스 결정

- 1) 수동 맞저울의 진동 주기는 약 20초이며, 감도는 968 IS/mW (38.7 $\mu\text{m/mW}$)로 측정되었다.
- 2) 체현성 실험결과, 0.1 mW 용량과위에 대해 $\pm 2.17\%$, 1mW 이상의 파워에 대해 $\pm 0.98\%$ 의 표준편차를 얻었다.
- 3) 입력전압의 측정오차는 $\pm 1\%$ 이내이며, 방사 인덕턴스 최대 측정오차는 $\pm 4\%$ 이내로 평가되었다.

위에서 기술한 오차 이외에도 불규칙하게 발생하는 오차 요인 등이 있을 것으로 판단되며 평면파 가정에 의한 오차는 방사 힘 측정 방법의 근본적인 한계로 주어진다. 측정 시스템의 불확실도와 계통오차는 수동 맞저울의 특수한 구조로 인해 분석하지 못하였으나, 앞으로 적절한 방침을 수립해서 보완하는 과정에서 해결을 시도할 것이다.

이제까지 논술한 측정장치 내에서 유발할 수 있는 오차 이외에도 많은 오차 발생원이 있을 것으로 생각된다. 측정장치의 정밀도를 유지하고 정확한 오차 발생원에 대한 평가를 위해서는 다른 원리에 의한 측정방법과의 비교를 통해 모색하는 것이 바람직하다고 생각되며, 앞으로 이에 대한 연구를 계속 수행할 것이다.

참고문헌

- [1] Herrey, M.J., J. Acoust. Soc. Am., Vol. 27, No. 5, 891(1996)
- [2] Herman, B.A., G.R. Harris, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 72, No. 6, 1357 (1982).
- [3] Haran, M.E., H.F. Stewart, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 57, No. 6, 1436 (1975).
- [4] Zieniuk, J., R.C. Chivers, Ultrasonic, Vol. 14, 161 (1976).
- [5] Gooberman, G.L., Ultrasonics, Hart Publishing Company, 45 (1968).