

수중에서 진동하는 구조물로부터 방사되는 음에 기인한 레이저 도플러 진동측정기 광선의 위상변화에 대한 분석

Analysis of the Phase Change of a Laser Beam in a Laser Doppler Vibrometer Due To the Sound Field Radiated From Structures Vibrating Underwater

길 현 권*, Jacek Jarzynski**
(Hyun-Gwon Kil*, Jacek Jarzynski**)

*수원대학교 기계공학과, **Naval Research Laboratory
(접수일자: 2008년 3월 7일; 수정일자: 2008년 4월 21일; 채택일자: 2008년 5월 8일)

레이저 도플러 진동 측정기를 사용하여 수중 구조물의 진동을 측정하는 경우, 구조물의 표면으로부터 레이저 광선이 겪는 위상 변화를 감지함으로써 진동을 측정하게 된다. 이 경우 레이저 광선은 진동하는 구조물 표면으로부터 방사되는 방사 음장을 통과하게 되며, 이러한 방사 음장에 의한 굴절률 변화에 의하여서도 레이저 광선은 위상 변화를 겪게 된다. 구조물의 진동을 측정하기 위하여서는 표면 진동 자체에 의한 레이저 광선의 위상 변화만을 감지하여야 하지만, 방사 음장의 굴절률 변화에 의한 레이저 광선의 위상 변화가 추가로 발생하여 진동 측정값에 오차를 발생 시키게 된다. 이러한 오차는 공기 중에서는 무시할 수 있을 정도로 작은 값이지만, 특히 수중에서는 구조물의 진동 측정값에 상당한 오차를 발생시킬 수 있게 된다. 본 논문에서는 수중에서의 방사 음장에 의한 레이저 광선의 위상 변화를 분석하였다. 예로써 수중에서 진동하는 무한 원통형 구조물로부터 방사 음장에 의한 레이저 광선의 위상 변화를 예측하고 분석하였다.

핵심용어: 레이저 도플러 진동측정기, 수중 음장, 수중 구조물 진동, 위상변화

투고분야: 구조음향 및 진동 분야 (11.3)

In measurements of the vibration of structures underwater with a laser Doppler vibrometer, the surface vibration is measured by means of detecting the phase change of the laser beam due to the structural vibration. The laser beam passes through the sound field radiated from the vibrating structures underwater. It experiences an additional phase change due to the change in refractive index in the radiated sound field. This phase change due to the sound field may cause the error in surface vibration measurements. In this paper, this phase change due to the radiated sound field has been analyzed. The numerical simulation has been performed to evaluate the phase change in sound field radiated from an infinite cylindrical structure vibrating underwater.

Keywords: Laser Doppler vibrometer, Sound field underwater, Vibration of structures underwater, Phase change

ASK subject classification: Structural Acoustics and Vibration (11.3)

I. 서론

레이저 도플러 진동 측정기 [1]는 공기 중에서 진동하는 구조물의 진동을 측정하기 위하여 효과적으로 사용되고 있다. 이러한 레이저 도플러 진동 측정기를 사용하는 방법의 경우, 비접촉식 방법으로 진동센서를 붙이지 않

기 때문에 질량 부과 효과가 없으며, 또한 면외 진동 (진동체 표면에 수직인 방향의 진동) 및 면내 진동 (진동체 표면과 수평인 방향의 진동)을 고려한 3차원 진동 성분들을 모두 측정 할 수 있는 장점을 가지고 있다 [2]. 특히 수중에서는 주파수 영역에 따라서 면내 파동에 의한 소음방사 효과가 면외 파동에 의한 효과보다 원거리장에서 보다 크게 나타날 수 있기 때문에 [3], 효과적으로 면외 및 면내 파동을 분리하기 위해서 면외 진동뿐 아니라 면내 진동을 포함한 3차원 진동성분을 측정할 필요가 있게

책임저자: 길 현 권 (hgkil@suwon.ac.kr)
445-743, 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산2-2
수원대학교 기계공학과
(전화: 031-220-2298; 팩스: 031-220-2494)

된다. 이러한 장점들을 이용하고자 레이저 도플러 진동 측정기를 이용하여 수중에서 진동하는 구조물의 진동을 측정하기 위한 시도도 이루어져 왔다 [4]. 이 경우에는 광섬유를 이용하여 레이저 탐침을 수중에 위치시켜 진동을 측정할 수 있는 방법을 적용하게 된다. 이러한 레이저 도플러 진동 측정기를 이용하여 수중 진동을 측정하는 방법은 수중 진동체의 소음 방사 현상을 파악하기 위하여 필요하며 진동 측정을 통한 파동 분리, 수중 운동체 표면 코팅의 진동 저감 효과 파악 등 다양한 적용을 고려할 수 있다.

레이저 도플러 진동 측정 방법에서는 구조물의 표면으로부터 방사되는 레이저 광선이 겪는 위상 변화를 감지함으로써 진동을 측정하게 된다 [1,2]. 이 경우 입사 및 반사되는 레이저 광선은 방사되는 방사 음장을 통과하게 되며, 이러한 방사 음장은 매질의 굴절률 변화를 발생시킨다 [5]. 이러한 굴절률 변화에 의하여서도 레이저 광선은 위상 변화를 겪게 된다. 구조물의 진동 측정을 하기 위하여서는 표면 진동 자체에 의한 레이저 광선의 위상 변화만을 감지하여야 하지만, 방사 음장 변화에 의한 위상 변화가 추가로 발생하여 진동 측정값에 오차를 발생 시키게 된다. 이러한 오차는 공기 중에서는 무시할 수 있을 정도로 작은 값이지만, 특히 수중에서는 구조물의 진동 측정값에 상당한 오차를 발생시킬 수가 있게 된다. 본 논문에서는 수중에서의 방사 음장에 의한 레이저 광선의 위상 변화를 분석하였다. 예로써 수중에서 진동하는 무한 원통형 구조물로부터 방사되는 방사 음장에 의한 레이저 광선의 위상 변화를 예측하고 분석하였다.

II. 방사 음장에 의한 레이저 광선의 위상 변화

레이저 진동 측정기를 이용하여 수중 구조물의 진동을 측정하기 위해서는 레이저 광학 시스템은 공기 중에 위치시키고, 광섬유에 연결된 레이저 탐침만을 수중에 위치시키게 된다. 그리고 구조물 표면의 면외 진동을 측정하기 위하여 탐침으로부터 레이저 광선이 진동체 표면을 향하여 입사하게 되며, 표면으로부터 반사된 레이저 광선을 다시 탐침으로 받아 들여 레이저 광선이 겪는 위상 변화를 감지함으로써 진동을 측정하게 된다. 이 경우 레이저 광선은 진동하는 구조물 표면으로부터 방사되는 방사 음장을 통과하게 되며, 이러한 방사 음장은 매질인 물의 굴절률의 변화를 가져온다. 그러므로 방사 음장을 지나는 레이저 광선은 구조물 표면 진동에 의한 위상 변화

뿐만 아니라 굴절률 변화에 의한 추가적인 위상변화를 겪게 된다 [5]. 이러한 위상차는 해당 광선의 방사 음장 통과 거리와 방사 음장의 주파수에 따라 결정되게 된다. 방사 음장의 굴절률 변화에 의한 레이저 광선의 위상변화는 다음과 같이 표시될 수 있다 [5].

$$\Delta\phi_a = \frac{2\pi}{\lambda_o} \int [n(r,\theta,z,t) - n_o] ds \quad (1)$$

여기서 원통좌표계(r,θ,z,t)가 사용되며, n_o 와 λ_o 는 정적 상태에서 매질의 굴절률과 레이저 광선의 파장을 각각 나타낸다. $n(r,\theta,z,t)$ 는 방사 음장 상태에서 주어진 시간 t 와 위치에서 매질의 굴절률을 나타낸다. s 는 레이저 광선의 음장 통과 경로를 나타낸다.

선형 음장을 고려하면, 굴절률 변화 n 는 미소 밀도 변화 ρ' 와 미소 음압 변화 p' 을 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} n(r,\theta,z,t) - n_o &= \left(\frac{\partial n}{\partial \rho}\right) \rho'(r,\theta,z,t) \\ &= \left(\frac{\partial n}{\partial \rho}\right) \rho_o \kappa p'(r,\theta,z,t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 κ 는 단열압축률을 나타내며, 정적 상태에서 매질의 밀도 ρ_o 와 음속 c 에 대하여 $\kappa = 1/(\rho_o c^2)$ 인 관계로 표시된다. 그리고 선형음장에서 $\kappa p' \ll 1$ 인 관계를 갖으며 $\partial n/\partial \rho$ 는 정적상태인 밀도 ρ_o 에서의 값을 고려할 수 있다. 그러므로 음장의 굴절률 변화에 의한 레이저 광선의 위상변화는 다음과 같이 표시할 수 있다 [5].

$$\Delta\phi_a = \frac{2\pi}{\lambda_o} \int \left(\frac{\partial n}{\partial \rho}\right) \rho_o \kappa p'(r,\theta,z,t) ds \quad (3)$$

그리고 매질의 굴절률 변화와 밀도의 관계를 나타내는 Lorentz-Lorentz 식 [6]을 고려하면 $\partial n/\partial \rho$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial n}{\partial \rho} = \frac{1}{6\rho_o} \frac{(n_o^2 - 1)(n_o^2 + 2)}{n_o} \quad (4)$$

방사 음장에 의한 레이저 광선의 위상 변화의 크기를 파악하기 위하여 그림 1과 같은 수치 해석 모델을 고려한다. 수중에 놓인 반지름 a 인 무한 원통형 구조물이 진동수 ω 에서 표면 변위 $w = W_o e^{-i\omega t}$ 로 진동하는 경우이다. 이 경우 레이저 진동 측정기의 탐침이 원통형 구조물 표면의 면외 진동을 측정하기 위하여 표면으로부터 거리 d 만큼 떨어져 위치하고 있다. 그리고 탐침으로부터 레이

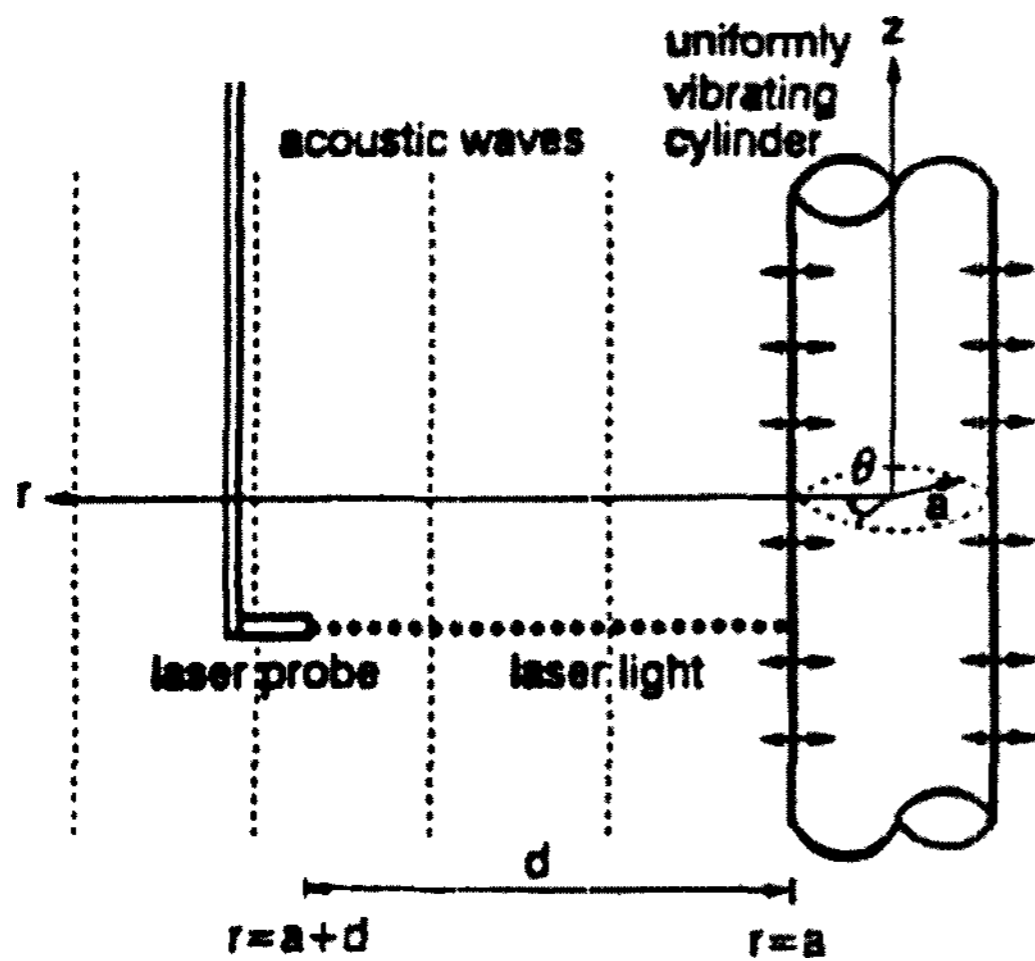


그림 1. 반지름 a 인 무한 원통형 구조물 표면의 수중 면외 진동을 측정하기 위하여 거리 d 만큼 떨어져 놓인 레이저 탐침
 Fig. 1. Laser probe that is located at a distance d from an infinite cylindrical structure with radius a in order to measure its surface out-of-plane vibration underwater.

저 광선이 진동체 표면을 향하여 입사하게 되며 표면으로부터 반사된 레이저 광선을 다시 탐침으로 감지하게 된다. 이 경우 원통형 구조물의 진동에 의하여 소음이 방사되며, 방사 음장이 형성된다. 이 경우 레이저 광선은 진동에 의한 위상 변화뿐만 아니라 총 길이 $2d$ 만큼 이동하며 겪는 방사 음장의 굴절률 변화에 의한 추가적인 위상 변화를 겪게 된다. 원통형 구조물의 진동에 의한 방사 음장의 음압은 다음과 같이 표시된다 [7].

$$p' = AH_0(kr)e^{-i\omega t} \quad (5)$$

여기서 $H_0(kr)$ 은 차수 0의 Hankel 함수이며, k 는 해당 주파수에서의 파수를 나타낸다. 그리고 다음과 같은 경계조건 즉 원통형 구조물 표면의 반지름 방향 속도는 인접한 유체입자의 해당 방향 속도와 같아야 한다는 조건을 고려할 수 있는데, 원통형 구조물 표면 ($r = a$)에서 가속도를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial r} \quad (6)$$

그러므로 상수 A 는 식 (5)과 (6)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A = -\frac{k\rho_0 c^2 W_0}{H_1(ka)} \quad (7)$$

따라서 음장의 굴절률 변화에 의한 광선의 위상변화는 식 (3)-(7)로부터 다음과 같은 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\Delta\phi_a = -\frac{2\pi W_0(n_o^2 - 1)(n_o^2 + 2)}{3\lambda_o n_o} \frac{\int_{ka}^{k(a+d)} H_0(q) dq}{H_1(ka)} e^{-i\omega t} \quad (8)$$

여기서 $q = kr$ 이다. 그리고 원통형 구조물 표면의 면외 진동 자체에 의한 광선의 위상 변화는 다음과 같다 [2].

$$\Delta\phi_v = \frac{4\pi n_o W_0}{\lambda_o} e^{-i\omega t} \quad (9)$$

그러므로 원통형 구조물 표면의 진동 자체에 의한 레이저 광선의 위상 변화 ($\Delta\phi_v$)에 대한 음장의 굴절률 변화에 의한 레이저 광선의 위상변화 ($\Delta\phi_a$)의 비인 R_ϕ 는 다음과 같이 표현된다.

$$R_\phi = \frac{\Delta\phi_a}{\Delta\phi_v} = -\frac{(n_o^2 - 1)(n_o^2 + 2)}{6n_o^2} \frac{\int_{ka}^{k(a+d)} H_0(q) dq}{H_1(ka)} \quad (10)$$

여기서 위상변화 R_ϕ 는 방사 음장의 주파수와 진동체 표면과 레이저 탐침 사이의 거리 d 의 함수로 주어진다.

III. 계산 결과 및 고찰

본 연구에서는 그림 1과 같이 수중에서 진동하는 무한 원통형 구조물 표면에 수직인 방향의 면외 변위를 측정하기 위하여 레이저 도플러 진동측정 방법을 사용하는 경우를 고려하였다. 원통형 구조물의 반지름은 $0.35m$ 이며, 레이저 탐침은 원통실린더 표면으로부터 거리 d m 떨어져서 위치하고 있다. 이 경우 레이저 탐침은 레이저 광선을 입사 시키며, 산란되어 반사되는 레이저 광선을 감지하게 된다. 이 경우 반사되는 레이저 광선은 진동 자체에 의한 위상 변화뿐만 아니라 방사 음장의 굴절률 변화에 의하여서도 위상 변화를 겪게 된다. 원통형 구조물 표면의 진동 자체에 의한 레이저 광선의 위상변화 ($\Delta\phi_v$)에 대한 음장의 굴절률 변화에 의한 레이저 광선의 위상변화 ($\Delta\phi_a$)비인 R_ϕ 는 식 (10)에서와 같이 주파수와 거리 d 에 의존한다.

그림 2는 주파수 100, 500, 1000, 5000 Hz 에서 거리 d 에 대한 위상변화비 R_ϕ 값을 보여준다. 일정 주파수에서는 거리에 따라 위상변화비가 요동하며 점차 줄어드는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 위상변화비는 주파수 100 Hz에서 거리 $d = 5.97m$ 에서 최대 0.08의 값을 갖으며 최대값은 주파수 증가와 함께 증가하게 되는데, 500, 1000, 5000 Hz에서는 거리 $d = 1.3,$

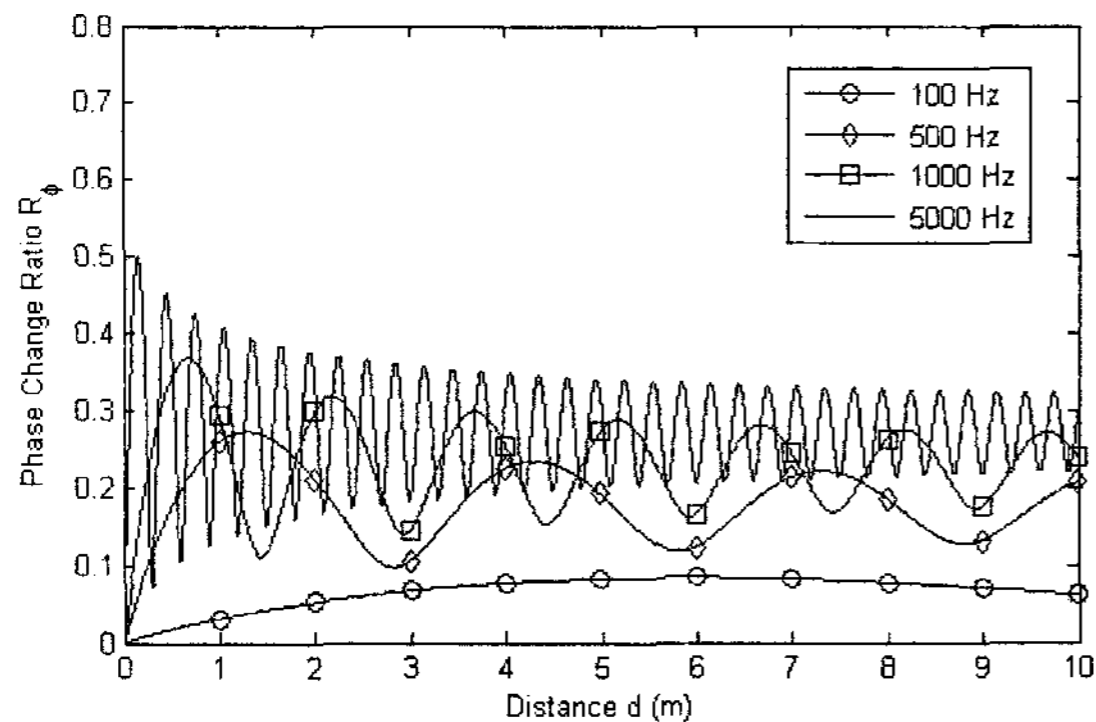


그림 2. 구조물 표면의 진동 자체에 의한 레이저 광선의 위상 변화에 대한 방사 음장에 의한 레이저 광선의 위상변화비 R_ϕ (주파수 100, 500, 1000, 5000 Hz)

Fig. 2. Ratio R_ϕ of the phase change of the laser beam due to the sound radiated field to that due to the structural vibration. (frequency 100, 500, 1000, 5000 Hz).

0.67, 0.14 m 에서 각각 0.27, 0.37, 0.5의 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 거리 d 가 증가할수록 이러한 위상변화비는 감소하지만 수렴하여 1000 Hz와 5000 Hz에서 평균값으로 0.23과 0.3의 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 점들은 방사 음장 변화에 의한 위상 변화 $\Delta\phi_a$ 가 진동체 표면 진동 자체에 의한 레이저 광선 위상 변화 $\Delta\phi_v$ 에 비하여 무시할 수 없을 정도의 값을 가짐을 의미한다. 또한 이러한 점은 방사 음장 변화에 의한 위상 변화 $\Delta\phi_a$ 가 진동 측정값에 상당한 오차를 발생 시킬 수 있음을 의미한다. 즉 수중진동체 진동을 측정하기 위해서는 진동체 표면 진동 자체에 의한 레이저 광선의 위상 변화 $\Delta\phi_v$ 만을 감지하여야 하지만, 레이저 광선의 전체 위상 변화 값에는 추가로 방사 음장 변화에 의한 상당한 정도의 위상 변화 $\Delta\phi_a (= R_\phi \Delta\phi_v)$ 가 포함되게 되기 때문이다.

레이저 진동 측정기를 사용하여 수중 구조물의 진동을 측정하려는 경우, 방사 음장에 기인한 위상변화에 때문에 발생하는 진동 측정값의 오차를 줄일 필요가 있다. 이러한 점을 고려한다면, 그림 2에서 위상변화비 R_ϕ 가 상당히 작은 값을 갖도록 하기 위해서, 레이저 탐침을 수중 진동체 표면에 매우 가까이 ($d \ll 1$) 위치시킬 수 있다. 그러나 이 경우 진동체로부터 방사되는 음이 탐침 자체를 진동 시키고 또한 방사 음이 탐침 몸체에 의하여 반사되어 다시 진동체를 진동 시키는 효과를 줄이기 위하여 탐침의 크기를 매우 작게 설계하여야 한다. 이러한 수중에서의 레이저 탐침 설계에 대한 연구는 향후 연구과제로 고려될 수 있으리라 사료된다.

IV. 결론

본 논문에서는 수중에서 적용되는 레이저 도플러 진동 측정 방법에서 방사 음장의 굴절률 변화에 의하여 레이저 광선이 겪는 위상변화를 분석하였다. 적용 수치 예로써 수중에서 진동하는 무한 원통실린더의 표면에 수직인 방향의 면외 변위를 측정하기 위하여 레이저 도플러 진동 측정 방법을 사용하는 경우를 고려하였다. 이러한 분석을 통하여 진동 측정을 하기 위하여서는 진동체 표면 진동 자체에 의한 레이저 광선의 위상변화만을 감지하여야 하지만, 방사 음장에서의 굴절률 변화에 의한 레이저 광선의 위상 변화가 진동 측정값에 무시할 수 없을 정도의 상당한 오차를 발생 시킬 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 처음 보고되는 이러한 연구 결과는 수중 진동 측정을 수행할 경우 고려하기 위하여 제시되며, 향후 수행될 실험 연구와 함께 레이저 탐침 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사 및 추모의 글

본 논문의 공동저자인 Dr. Jarzynski께서는 Georgia Institute of Technology에서 2001년 5월 정년 은퇴 후 Naval Research Laboratory에서 근무 중 2008년 1월 20일 소천 하셨습니다. 본 논문의 저자(길현권)는 박사과정 지도교수님이신 Dr. Jarzynski께서 항상 연구인로서의 자세를 일깨워주셨음에 감사를 드리며, 삼가 교수님의 명복을 빕니다.

참고 문헌

1. T.E. McDevitt and A.D. Stuart, "A Two-Channel Laser Doppler Vibrometer Technique For Characterizing the Dynamic Properties of Elastomeric Materials," *Journal of Acoustical Society of America* 85(1), 450-453, 1989.
2. H.-G. Kil, J. Jarzynski and Y. H. Berthelot, "Wave Decomposition of the Vibrations of a Cylindrical Shell with an Automated Scanning Laser Vibrometer," *Journal of Acoustical Society of America*, 104(6), 3161-3168, 1998.
3. M.C. Junger, "Shipboard Noise: Sources, Transmission and Control," *Noise Control Eng. J.*, 34(1), 3-8, 1990.
4. J.F. Vignola and B.H. Houston, "The Design of a Three Dimensional Laser Vibrometer," Winter Annual Meeting of American Society of Mechanical Engineers, 1993-WA/NCA-10, 1993.
5. J. Langhammer, S. Graciet, I. Vik, M. Espeland and O. J. Lokberg, "Holographic Studies of the Bubble Generated By a Sismic Airgun," *Journal of Acoustical Society of America*,

97(1), 362-369, 1995.

6. C.M. Vest, *Holographic Interferometry*, Wiley, new York, 1979.

7. P.M. Morse and K.U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, Princeton Uni. Press, pp.357-359, 1968.

저자 약력

•길 현 권 (Hyun-Gwon Kil)

음향학회지 제17권 제6호 참조

•Jacek Jarzynski



1957: Imperial College (영국), 물리학과 (학사)

1961: Imperial College (영국), 대학원 물리학과 (박사)

1963~1985: Naval Research Laboratory (미국) 책임연구원

1986~2001: Georgia Institute of Technology (미국) 교수 (2001.5 정년 은퇴)

2002~2008.1: Naval Research Laboratory (미국) 수석연구원 및 Catholic University 교수 겸임

2008.1.20: 소천