

정렬불량 진단을 위한 유전알고리즘 기반 특징분석

Feature Analysis based on Genetic Algorithm for Diagnosis of Misalignment

하 정 민* · 안 병 현* · 유 현 탁* · 최 병 근†

Jeongmin Ha, Byunghyun Ahn, Hyeontak Yu and Byeongkeun Choi

(Received December 7, 2016 ; Revised February 23, 2017 ; Accepted February 23, 2017)

Key Words : Genetic Algorithms(유전 알고리즘), Misalignment(정렬 불량), Features Analysis(특징 분석), Frequency Analysis(주파수 분석)

ABSTRACT

An compressor that is combined with the rotor and pneumatic technology has been researching for the performance of pressure. However, the control of operations, an accurate diagnosis and the maintenance of compressor system are limited though the simple structure of compressor and compression are advantaged to reduce the energy. In this paper, the characteristic of the compressor operating under the normal or abnormal condition is realized. and the efficient diagnosis method is proposed through feature based analysis. Also, by using the GA (genetic algorithm) and SVM (support vector machine) of machine learning, the performance of feature analysis is conducted. Different misalignment mode of learning data for compressor is evaluated using the fault simulator. Therefore, feature based analysis is conducted considering misalignment mode of the compressor and the possibility of a diagnosis of misalignment is evaluated.

1. 서 론

압축기(compressor)는 공기를 대기압 이상으로 압축하여 압축공기를 만드는 기계로서 모든 산업분야에 사용되고 있으며, 또한 성능 향상을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 성능 향상을 위한 압축률을 높이는 기술은 많이 개발 되어 왔지만 압축기의 정확한 제어나 시스템 진단 및 유지 보수에 대한 한계가 있으며, 압축기의 회전체 진단에 관련된 연구도 미흡한 상태이다⁽¹⁾.

현재 산업체에서 주로 사용하는 진단 방법은 예방 정비(preventive maintenance)이며, 설비 자체의 권고치 혹은 운영 조건에 따라 분기, 연간 단위의

시간으로 장비 관리가 이루어지며, 설비 고장을 줄이고 수명을 연장 할 수 있지만 설비의 상태와는 무관하게 유지 보수를 일정에 따라 수행하기 때문에 낭비의 요소가 존재한다. 또한 예방 정비는 진동의 경향(trend)관리를 통해 이루어지며, 이상이 발생하였을 시에 FFT spectrum, bode plot 및 orbit plot 등을 분석하여 이상 상태를 파악 할 수 있다^(2,3). 하지만 이상 진동 신호의 발생 원인은 다양하고, 이에 대하여 복합적으로 나타날 수 있으며, 정렬불량(misalignment)의 유형에 따른 결함은 진동 신호의 주파수 분석 등에 의해 명확히 나타나지 않을 수 있기 때문에 정확한 진단을 내리기 어렵다⁽⁴⁾.

정비 기술의 발달은 설비진단과 자산관리의 융합적인 개념이라는 인식 변화에 따라 급속도로 연구

† Corresponding Author; Member, Gyeongsang National University
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr

* Member, Gyeongsang National University

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

및 개발이 이루어지고 있는 실정이며, 설비의 조기 변화 등을 감지하는 예지 정비는 상태 기반 정비(conditioning based maintenance)이며, 효과적인 구현을 위하여 적절한 투자가 필요하다. 또한 미국의 federal energy management program(FEMP)에 따라, 예방 정비에 비해 8%~12%의 정비비용 절감을 기대할 수 있다.

이렇듯 설비진단의 한계를 극복하기 위하여 설비를 파손시킬 수 있는 변화를 감지하는 예지 정비(predictive maintenance)에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있으며, 특히 진동 신호의 특징 개체 등을 이용한 진단에 관련된 연구가 활발하게 이루어지고 있는 실정이다.

따라서 이 논문에서는 lab-scale 회전체 모의시험 장치에 다양한 축 정렬불량 유형(parallel, angular 및 parallel + angular)을 모사하고, 열적 팽창 등으로 인하여 발생하게 된 정렬불량 상태(thermal misalignment)에서 압축기 진동 신호의 각 특징 개체들을 활용⁽⁵⁾하여 GA를 기반으로 특징을 선택(genetic algorithm-based feature selection)하고⁽⁶⁾, 상태 유형별로 특징들 간의 상관관계를 분석하였다. 또한 설비 건전도(health index)의 개발을 위한 기초자료 확보를 목적으로 기계 학습 알고리즘 중에 하나인 support vector machine(SVM)⁽⁷⁾를 사용하여 정렬불량의 발생 원인별 상태(열적 팽창 및 불평평의 원인으로 발생하는 정렬불량 상태)분류 가능성을 평가하였다.

2. 데이터 취득 및 적용 알고리즘

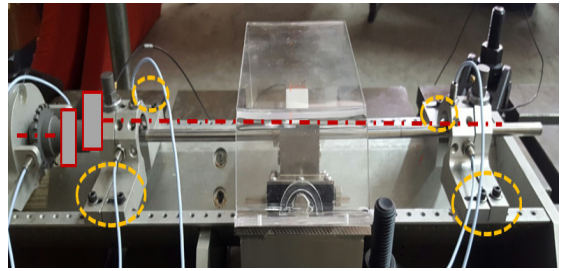
2.1 데이터 취득

(1) 실험 기반 데이터

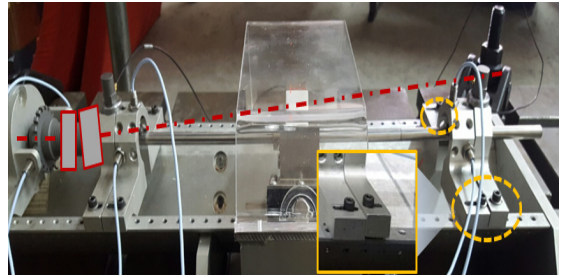
압축기의 정상(normal) 및 이상상태(faulty)에 대한 데이터 분석 및 분류에 앞서, 회전체 실험 장비인 RK-4 Rotor kit을 사용하여 정렬불량의 유형별로 주파수 분석 및 특징 분류 성능을 평가하였다.

정렬불량의 유형은 Fig. 1과 같이 정상상태, parallel, angular 및 parallel + angular로 구분하였고, 운전은 1600 r/min로 구동 시켰으며, 정렬 불량 상태의 구현은 최대 편각 허용 값 이상의 정렬불량 상태를 재현하여 실험하였다.

진동 신호의 취득 및 주파수 분석은 PULSE



(a) Parallel misalignment



(b) Angular misalignment

Fig. 1 Misalignment test rotor-kit system

Table 1 Specifications of vibration analyzer

Analyzer	Maker	Vibration measurement condition
PULSE 3560C	B&K	<ul style="list-style-type: none"> • Unit : mm/s • Signal detection : rms • Measurement range : 10 Hz ~ 10 kHz • Unit : mm/s • Signal detection : p(0-peak) • No. of lines : 6400 • Window type : Hanning • No. of averaging : 7 • Average types : Frequency domain

3560C(B&K)를 사용하였으며, 특징 분석은 행렬을 기반으로 데이터의 수치해석이 가능한 공학용 소프트웨어(Matlab. Mathworks)를 사용하였다. 실험 장비의 구동축, 피구동축 베어링부에 수직, 수평 방향으로 총 4개의 변위 센서를 설치하였다.

(2) 압축기 데이터

압축기에 대하여 정렬불량의 유형별로 발생하는 특성을 파악하고, 주파수 분석 및 특징 개체들을 비교·분석하여 정렬불량에 의한 진단(분류) 가능성을 평가하고자, Fig. 2와 같이 사업장 내의 압축기에 대하여 운전 시, 데이터를 측정하였다.

측정은 실험 기반 데이터 취득방법과 동일하게 Pulse 3560C를 이용하여 약 2분간 1 Hz ~ 25 kHz

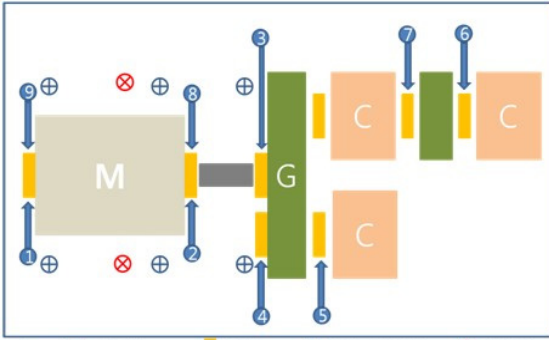


Fig. 2 Structure of compressor(M: motor, G: generator, C: compressor)

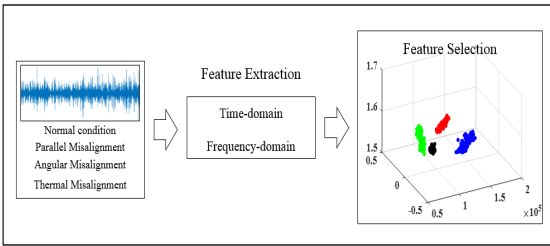


Fig. 3 Feature analysis

대역의 raw signal 상태로 저장한 데이터를 특징분석에 사용하였으며, 주파수 분석은 1 Hz ~ 800 Hz, 1600 line, averaging 7회로 지정하였다. 또한 측정 은 총 2회 실시하였으며, 열적 팽창 등으로 인한 정렬불량 상태를 포함한 데이터에 대하여 주파수 및 특징을 분석하였다.

2.2 적용 알고리즘

기존 진단방법의 한계를 인식하고, 신호처리를 통한 기기의 특징 추출 및 통계관리를 바탕으로 진단 하는 것이 보다 효과적임을 평가하였으며, 과정은 Fig. 3에서와 같이 센서로부터 취득된 각 상태에 대한 방대한 양의 시간 및 주파수 영역의 특징 정보 중에서 필요로 하는 유용한 특징 정보만을 추출하고, 분류하여 성능을 평가하였다.

취득된 정상 및 결함 상태에 따른 데이터로 (training data)부터 선별된 특징들을 추출한 후 추출 된 특징들을 SVM(support vector machine)을 이용하여 학습한 후 새로 취득된 데이터(unknown signal)로 부터 추출된 특징들을 SVM 학습결과를 통해 정상과 비정상 상태를 분류하고 그 성능을 평가하였다.

3. 결과 분석

3.1 주파수 분석 결과

(1) 실험 데이터 분석

회전체 실험 장비인 RK-4 Rotor kit을 이용한 실험에 대한 주파수 분석(FFT analysis)결과, Fig. 4와 같이 나타났다.

1×(운전성분)의 진폭은 정상상태의 경우, 6.0 μm/s로 매우 낮았으며, 정렬불량 상태 인가 시는 parallel-20.3 μm/s(1×), angular-21.2 μm/s(1×), parallel + angular-20.6 μm/s(1×)로 정상상태 대비 약 3배의 진폭 변화를 보이는 것으로 분석되었다. 하지만 각 정렬 불량 유형별 차이는 그 값이 매우 미소하기 때문에 주파수 분석을 통한 유형별 분류는 어려울 것으로 판단된다.

(2) 압축기 데이터 분석

기간차이를 두고 압축기에 대한 진동 신호 취득 데이터를 활용하여 주파수 분석을 한 결과, Fig. 5와 같이 나타났다. (a)의 결과는 1×(운전성분) 약 537 μm/s로써 이는 ISO 10816-3의 그룹 3의 기준에 의거하였을 시, 매우 양호한 상태 인 것으로 확인되었다. 기간차를 두고 2차 측정한 분석결과(b)는 구동에 따른 열적 팽창 및 불평형 등의 작용으로 인한 정렬불량 상태로 판단되어지며, 1×의 진폭은 기존의 정상상태 대비하여 약 3.5배 증가한 1790 μm/s(1.8 mm/s)로써 규격에 의한 위험 단계 수준에는 못 미치더라도 향후, 진동 문제를 야기할 수 있는 단계로 판단된다. 이렇듯 고장모드(정렬불량)는 일반적인 주파수 분석으로 검출 가능하나, 어느 요인으로 인해 정렬불량이 발생하게 되었는지 규명하는데 한계가 존재하였다.

3.2 특징 분석 결과

주파수 분석을 통한 정렬불량의 각 요인 및 유형에 대한 주파수분석의 경우, 정상 및 고장데이터의 정의가 불명확하였으며, 진동신호의 특징을 추출 및 선택함으로써 각 상태별로 분류 가능성을 평가하였다.

진동신호의 특징 분석에 활용된 특징은 시간영역 및 주파수 영역에 대하여 총 19개의 특징 값을 사용하였으며, 이의 특징 값 중에서 각 정렬불량 상태를

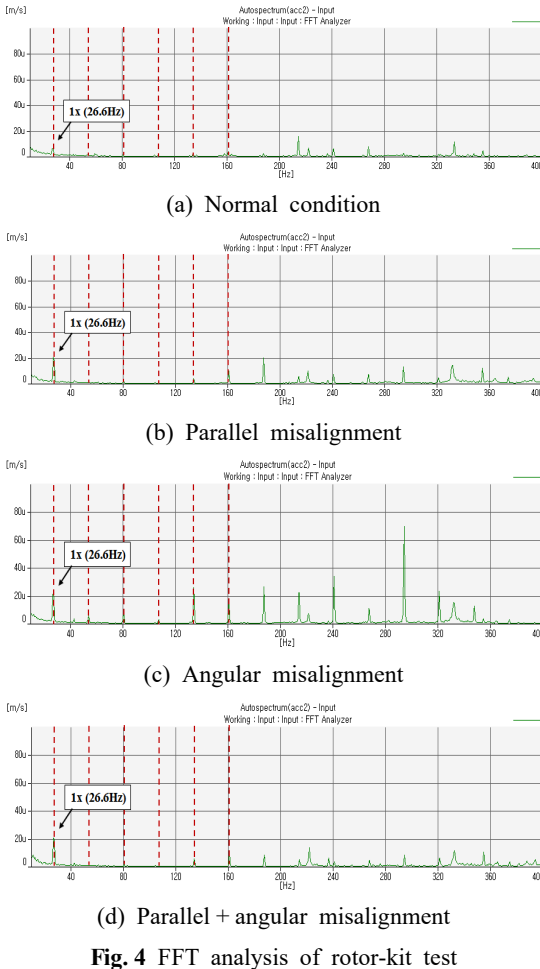


Fig. 4 FFT analysis of rotor-kit test

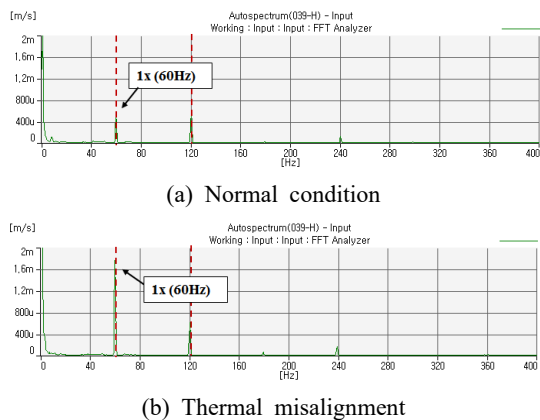


Fig. 5 FFT analysis of compressor

표현하는 유용한 정보들만을 선택하기 위하여 유전 알고리즘을 활용하였다.

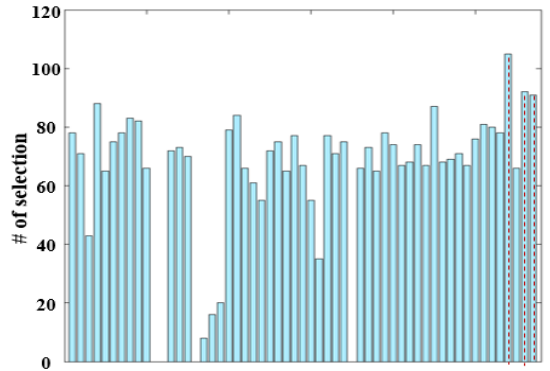


Fig. 6 Histogram of features using genetic algorithm

Fig. 6은 회전체 실험 장비 구동 시, 각각의 센서에서 취득된 정상 및 이상상태(정렬불량 유형)의 데이터(raw signal)를 이용하여 시간 및 주파수영역의 특징들에 대하여 유전알고리즘을 통해 각 특징별로 선택되어진 회수를 히스토그램(histogram)으로 표현한 그래프이며, X축은 특징 19개에 대한 각 데이터별 특징개체 57개를 나타내며, 이에 따라 회수된 특징 정보 수를 Y축에 나타내었다. 그 결과, 57개의 특징 개체 중, 시간영역에서 첨도율(kurtosis factor)과 주파수영역의 실효치(RMS frequency), 중심 주파수를 기반으로 다른 성분의 주파수들 사이의 분산을 나타낸 값(root variance frequency)이 정렬불량에 대한 가장 유용한 정보를 많이 포함하고 있는 것으로 분석되었다.

GA기반 특징 선택 방법을 적용하여 위의 유용한 정보를 포함한 특징을 Fig. 7과 같이 정상 상태 및 정렬불량의 각 유형에 따른 특징 분포와 거리를 3차원 그래프에 나타내었다. 3.1절의 주파수 분석을 통하여 정렬불량의 유형에 따른 분류는 운전성분(1x)의 진폭 차이가 매우 미소하여 분류 가능성이 낮은 것에 대비하여 GA기반 특징 선택 시, 정상 및 정렬불량 유형에 따라 특징 분산율이 높은 것으로 분석되었다.

압축기에서 열적 팽창 등으로 인하여 발생한 정렬불량 상태와 실험을 통해 평가된 각 정렬불량 시의 특징 분산 및 분포 경향을 비교하여 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 정렬불량 유형별로 특징들 간의 상관관계를 분석한 결과, 시간영역의 특징인 왜도(skewness)의 경우, 정렬불량에 대한 유용한 정보는 많이 포함하고 있으나, 유형에 따른 변별성은 낮은

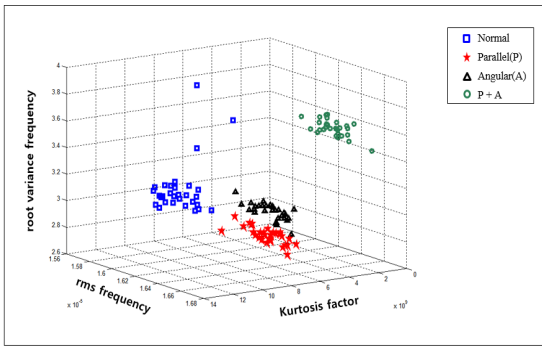


Fig. 7 Features selection using genetic algorithm(rotor kit test)

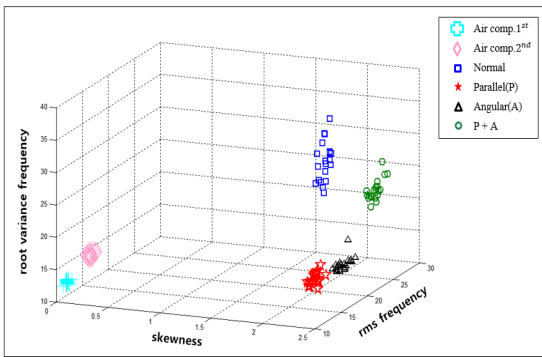


Fig. 8 Features selection using genetic algorithm (compressor)

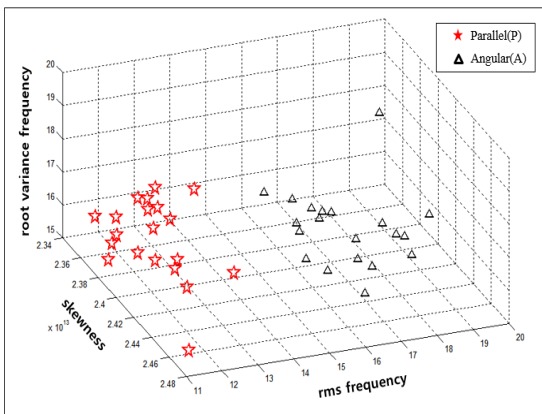


Fig. 9 Features selection using genetic algorithm (zoom-in)

것으로 분석되었다. 이에 반해 주파수 영역 특징 개체는 정렬불량의 유형에 대한 변별성이 시간 영역에 대비하여 높은 것으로 분석되었다. 특히 RMS fre-

quency 및 root variance frequency는 정렬불량의 유형별 특징 분산율이 매우 높은 것으로 사료된다.

따라서 향후, 설비 진단을 목적으로 정렬불량에 대한 특징 분석프로그램 개발 시, 주파수 영역의 특징을 활용할 경우에 조기 진단 및 이상 상태 원인 파악에 크게 기여할 것으로 사료된다.

4. 결 론

이 논문에서는 설비 건전도(health index)의 개발을 위한 기초자료 확보를 목적으로, 설비의 대표적 결함 유형인 정렬불량 상태에 대하여 시험하였으며, 정렬불량의 발생 원인별 상태(열적 팽창 및 불평평의 원인으로 발생하는 정렬불량 상태)분류 가능성을 평가하였다.

압축기에서 열적 팽창 등으로 인하여 발생한 정렬불량 상태와 실험을 통해 평가된 각 정렬불량의 유형별로 특징 분산 및 분포 경향을 비교하였다. 정렬불량 유형별로 특징들 간의 상관관계를 분석한 결과, 주파수 영역 특징 개체는 정렬불량에 대한 정보가 시간 영역에 대비하여 높은 것으로 분석되었다. 특히 RMS frequency 및 root variance frequency는 정렬불량의 유형별 특징 분산율이 매우 높은 것으로 사료된다.

따라서 향후, 설비 진단을 목적으로 유전 알고리즘 기반 특징분석 기법으로 정렬불량에 대한 특징 분석프로그램 개발 시, 주파수 영역의 특징을 활용할 경우에 조기 진단 및 이상 상태 원인 파악에 크게 기여할 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 “산업통산자원부 전력산업융합 원천기술개발(201301010170D)”의 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

(1) Kim, Y. K., Lee, D. S., Lee, B. C. and Lee, H., 2000, Noise and Vibration Characteristics of an A/C Compressor Base, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 1423~1428.

(2) Muszynska, A., 1984, Partial Lateral Rotor to Stator Rubs, ImechEC281/84, pp. 327~335.

(3) Choi, Y. S., 2000, Experimental Investigation of Partial Rotor Rub, KSME International Journal, Vol. 14, No. 11, pp. 1250~1256.

(4) Heo, J. W., Chung, J. T. and Choi, K. Y., 2002, Vibration Analysis of a Flexible Spinning Disk Considering the Effect of Misalignment, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 26, No. 5, pp. 952~959.

(5) Ahn, B. H., Kim, Y. H., Lee, J. M., Lee, J. H., Choi, B. K., 2014, Signal Processing Technology for Rotating Machinery Fault Signal Diagnosis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 7, pp. 555~561.

(6) Huang, C. L. and Wang, C. J., 2006, A GA-based Feature Selection and Parameters Optimization for Support Vector Machines, Expert Systems with Applications, Vol. 31, No. 2, pp. 231~240.

(7) Widodo, A. and Yang, B. S., 2007, Support Vector Machine in Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, No. 6, pp. 2560~2574.



Jeong-min Ha is unified master's and doctor's course degrees at the Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research are dynamic analysis of the shaft through FEM analysis and measurement for diagnosis.



Byung-Hyun Ahn is unified doctor's course degrees at the Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research are dynamic analysis of the shaft through FEM analysis and measurement for diagnosis.



Hyeon-Tak Yu is unified master's and doctor's course degrees at the Department of Energy Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research are dynamic analysis of the shaft through FEM analysis and measurement for diagnosis.



Byeong-Keun Choi is a Professor at the Department of Energy Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. He received his Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pukyong National University, Korea, in 1999. Dr. Choi worked at Arizona State University as an Academic Professional from 1999 to 2002. Dr. Choi's research interests include vibration analysis and optimum design of rotating machinery, machine diagnosis and prognosis and acoustic emission. He is listed in Who's Who in the World, among others.