

# 광파이버 누수센싱 시스템 개발에 관한 연구 A Study on the Development of Optical-Fiber Water Leakage Sensing System

김 영 복\*†  
Y. B. Kim\*†

(접수일 : 2012년 08월 23일, 수정일 : 2012년 09월 25일, 채택확정 : 2012년 09월 27일)

**Key Words** : Environmental Monitoring(환경모니터링), Optical Fiber(광파이버), Fiber Bragg Grating(FBG), Hetero-core(헤테로코어), Water Leakage(누수), Multi-Point(다점계측)

**Abstract** : A multi purpose environmental monitoring system has been developed as a commercially available standard using the techniques which are FBG(Fiber Bragg Grating), Hetero-core spliced fiber optic sensor and etc, for the purposes of monitoring large scaled structures and preserving natural environments. The monitoring system has been tested and evaluated in a possible outdoor condition in view of the full scaled operation at actual sites to be monitored. Additionally, the developed systems in the previous works conveniently provided us with various options of sensor modules intended for monitoring such physical quantities as displacement, distortion, pressure, binary states, and liquid adhesion. In this paper, we extend the previous results to a water leakage detection problem and develop a sensing system as a result. By the experimental study, it is verified that multi-point leakage detection is possible using single line optical fiber.

## 1. 서 론

최근 건축물이나 구조물의 노후화 및 자연재해에 따른 붕괴 등이 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 예를 들어 지진이나 태풍 등에 의해 발생하는 건물의 파괴 및 산사태 등은 우리 사회에 커다란 경제적 손실을 가져올 뿐 만 아니라 인간에게도 심각한 피해를 주게 된다. 이러한 문제를 사전에 예방하기 위한 환경모니터링 시스템은 이제 우리 사회에 필요불가결한 요소가 되었다. 지금까지는 전기식 스트레인 게이지 등 전기식센서가 건설현장주위 등의 환경모니터링을 위해 사용되어져 왔지만 수년 또는 수십년의 장기간에 걸친 환경모니터링에는 금속부식 및 전력손실 등의 이유로 적합하지 않다. 이와 달리 광파이버센서는 내부식성은 말할 것도 없고 전자기장에 대해서도 거의 영향을 받지 않을 뿐 만 아니라 가볍고 신호의 왜곡이 적다는 이점이 있다. 또한 광파이

버선 자체를 센서 망으로 이용하면 원격 및 다점으로 분포계측이 가능하며 센싱신호로 전력을 사용하지 않기 때문에 케이블 및 에너지 절약에도 기여하게 된다<sup>1-8)</sup>. 그러나 현재까지 개발된 광파이버센서는 기본적으로 전달되는 신호가 미약하고 신호분석이 복잡하다. 따라서 신호를 획득하고 분석하기 위한 고가의 데이터로거가 필수적이며, 이것이 보편화가 어려운 주된 요인이다.

본 논문에서는 이러한 광파이버센서와는 달리 센싱부 가공이 수월할 뿐 만 아니라 신호처리가 지극히 용이한 헤테로코어(Hetero-core)형 광파이버센서를 누수검출을 위한 목적으로 활용하고자 한다. 현재 누수검출용으로 개발되어 상용화되어 있는 누수검출센서 또한 전기저항식 센서가 대부분이다. 이 방식은 누수가 예상되는 부위에 코일을 감아 두고 누수에 의해 액체가 코일에 접촉하게 되면 전기 저항값이 변하게 되는 특성을 이용한 것이다. 이것은 전기를

\*† 김영복(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과  
E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197

\*† Y. B. Kim(corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, PuKyong National University.  
E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197

이용한 방식이므로 누전 및 주위환경변화에 취약하고 사고발생우려가 높다. 이에 반에 광파이버를 이용하면 우선 전기저항식 센서가 갖는 단점을 거의 해결할 수 있다. 즉, 전선을 통해 전기신호가 흐르는 것이 아니라 광파이버를 통해 광신호가 전달되는 방식이기 때문이다. 그 외 단선으로 다점 센싱이 가능한 것 등 이상적인 모니터링시스템 구축이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 이러한 장점을 이용한 누수검지 센싱시스템 기본 모듈을 구성하고 실험을 통해 그 유용성을 검증하도록 한다.

## 2. 연구배경

우리나라에 누수탐사라는 용어를 쓰이기 시작한 시점이 1980년도 초반으로써 그리 길지 않은 역사를 가지고 있다.

과거나 현재나 누수가 발생하면 Fig. 1과 같이 적당히 파헤쳐 보수하는 것이 일반적이다. 즉, 결과에 대처하는 수준이며 큰 사고로 이어지는 것을 사전에 예방하는 차원이 아니다. 이러한 문제점을 인식하여 유선 및 무선네트워크기술을 이용한 원격모니터링시스템 구축에 대한 기술개발이 최근 확대되고 있는 추세이다. 그 대표적인 것이 서론과 Fig. 2에 나타난 것과 같이 전기저항식 센서를 특정부위(이음새 부위 등 취약부)에 설치하고 이것을 네트워크시스템과 연동하여 원격으로 관리하는 시스템이다<sup>9)</sup>.

전기신호를 이용하는 것이 유리한 면도 있으나, 습한 환경, 대부분의 배관이 전도성 재질인 점으로 인한 누전위험이 반드시 수반된다는 것이다. 이러한 문제를 방지하기 위해 Fig. 2와 같이 누수가 아닌 일반적인 습한조건으로부터 격리하기 위해 방수테이핑을 하는 등 복잡한 과정을 거치게 되고 결국 유지관리를 위한 비용증가가 불가피하게 된다. 보다 큰 단점은 수 킬로미터 이상에 이르는 배관라인을 따라 센서를 매설해야 하므로 센싱시스템을 구축하기 위한 센서라인이 길어지게 된다. 센서라인이 길어지게 되면 그 길이에 따라 저항값이 커지게 되며 이것은 결국 센싱신호가 감쇠하여 정확한 누수여부를 판단하기 어렵게 된다는 것이다.

반면 광파이버의 가장 큰 장점은 전기저항식에 비해 센서라인의 길이에 따른 신호세기변화가 거의 없다는 것이다. 즉, 수 킬로미터에 이르는 센싱라인을 구축하였다 하더라도 신호왜곡없이 센싱이 가능하며 전자장의 영향을 거의 받지 않는다.



Fig. 1 View of leakage problem treatment

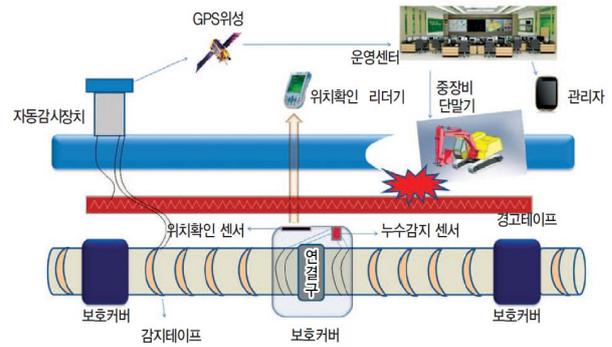


Fig. 2 Electric resistance type leakage detector

따라서 본 논문에서는 이러한 광파이버센서의 장점을 이용한 누수검출시스템을 구축하는 문제를 다룬다.

### 2.1 센싱 원리

누수검지를 위한 광파이버 센서의 센싱부를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 보호용 피복을 제거한 광파이버 표면에 금속(금, 은 등)박막을 형성한다. 이때 금속박막을 형성하는 광파이버 코팅부의 코어(core)직경이 신호전달용 광파이버 코어직경보다 작은 것을 절단하여 삽입한다. 이와 같이 코어부 직경이 다르다는 특성에 기인하여 우리는 헤테로코어(Hetero-core) 센서라 부른다. 이런 상태에서 빛이 입사되면 코어부에서는 입사된 빛의 전반사에 의해 Evanescent 파와, 금속박막 표면의 자유전자 이동에 의해 발생하는 Surface Plasmon과 사이에 공진이 일어난다. 결국 공진에 의해 센싱부에 입사되는 빛이

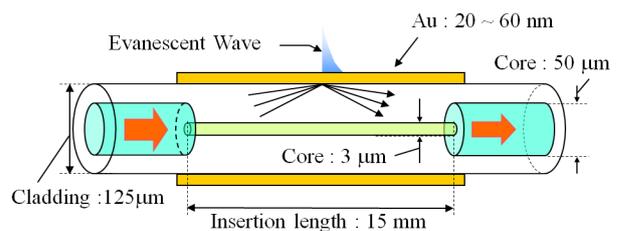


Fig. 3 Terminated optical fiber sensing element

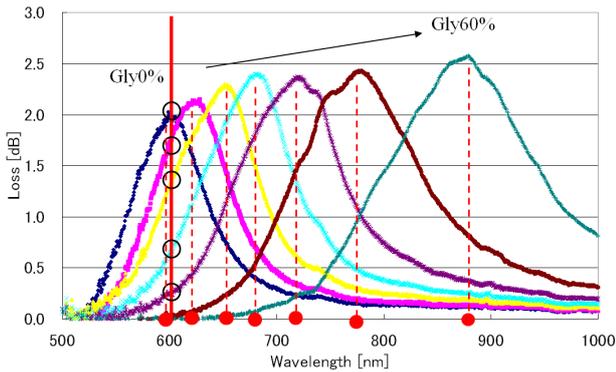


Fig. 4 Characteristics of a Hetero-core sensor

감쇠하는 현상이 발생하는데 이것을 Surface Plasmon Resonance(SPR)이라 한다.

예를 들어 같은 물질로 박막을 형성하였다 하더라도, 박막표면적 및 입사되는 빛의 파장변화에 따라 서로 다른 공진특성이 달라지게 된다.

이러한 특성은 Fig. 4로 설명이 가능하다. Fig. 4는 코어부 표면에 Au/Cr로 코팅한 센서특성을 나타낸다. 센서부에 접촉되는 물질은 글리세린(Gly) 수용액으로 농도는 0~60%이다. 입사파의 파장이 변함에 따라 공진모드가 다르게 나타나는데, 글리세린 수용액 농도가 높아짐에 따라 공진파장이 이동하는 경향을 파악할 수 있다. 이러한 특징은 이물질의 단순한 검출뿐만 아니라 정량적인 분석이 가능함을 말해준다. 따라서 이 특성을 이용하면 누수현상 뿐만 아니라 오염물질의 종류, 탁도 등의 판별도 가능하게 된다.

### 3. 실험준비(시스템 구성)

지금부터는 2장에서 설명한 SPR특성을 이용하여 다점(multi-point) 누수검지시스템을 구성한다. 3개의 센서로 센싱부를 구성하며 이것은 하나의 광파이버 라인으로 직렬 연결된다. 센싱라인을 통해 전달되는 광원은 파장 625[nm]로 LED 광원발생장치에 의해 만들어진다. 센싱라인으로 입사된 광원은 출력단에서 광량을 검출할 수 있는 Optical Power Meter(데이터 로거)로 계측되며, 입사된 광량과 광량검출기에서 검출된 광량을 계산하여 전달경로를 통해 감소된 광량(광누설량)을 계측한다. 이때 센서부가 하나의 라인으로 직렬연결되어 있기 때문에 다점계측의 경우에는 약간의 궁리가 필요하다. 즉, 누수가 발생한 위치가 복수인 경우, 그 위치를 정확히 파악하기 위해서는 센서부에서 발생하는 광누설량이 각각 달라야 한다. 그래서 본 논문에서는 2진 조합형태로 센싱라인

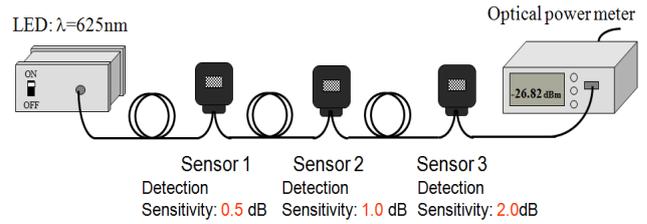


Fig. 5 A multi-point optical fiber sensing system

Table 1 Detecting process (\* : water leakage)

Case	Leakage position			Total optical loss[dB]	Leakage positions (sensor No)
	sensor 1	sensor 2	sensor 3		
1	*			0.5	No. 1
2		*		1.0	No. 2
3			*	2.0	No. 3
4	*	*		1.5	No. 1,2
5	*		*	2.5	No. 1,3
6		*	*	3.0	No. 2,3
7	*	*	*	3.5	No. 1,2,3

전체의 광누설량으로부터 누수위치를 찾는 방법을 고려하고 있다.

예를 들어 3개의 센서로 구성된 Fig. 5의 경우를 고려하자. 여기서 각 센싱부에 누수가 독립적으로 검출되었을 때 각각의 광누설량이 0.5[dB], 1.0[dB], 2.0[dB]라고 한다. 그러면 Table 1과 같이 전체누설량을 검출하는 것으로부터 어느 부위에 누수가 발생한 것인지를 정확히 파악할 수 있다.

본 논문에서는 위와 같은 유사한 조합을 만들기 위해 앞서 설명한 것과 같이 광파이버 코어부(Fig. 3 참조) 직경을 달리하여 삽입함으로써 이와 같은 센싱특성을 얻을 수 있음을 확인한다. 단, 본 논문에서 실험에 이용하는 센서부는 광파이버 코어부 지름이 각각 5[μm], 7.5[μm], 10[μm]인 것을 사용하여 표면을 코팅처리하였다.

### 4. 실험 및 특성 분석

3장에서 기술한 것과 같이 본 논문에서 이용하는 센서는 코어직경이 각각 다른 3개의 센서로 센싱부를 구성하고, 전체 누수검지시스템을 Fig. 6과 같이 구축하였다. Fig. 5 및 Fig. 6에서 앰프부는 광원을 발생시키고 광누설량을 동시에 측정할 수 있도록 구성된 데이터 취득장치이다. 특히 센싱부에서 발생하는 광누설량을 모니터링 시스템에서 쉽게 처리할 수

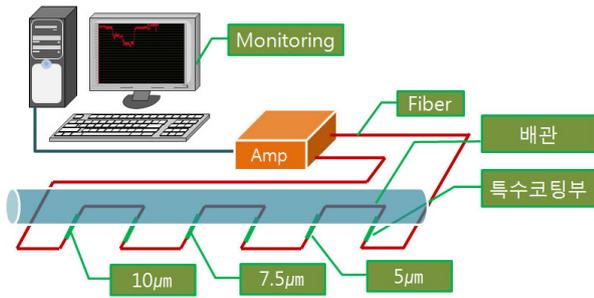


Fig. 6 Schematics of the sensing system

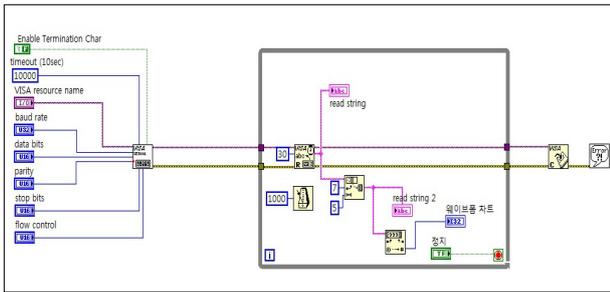
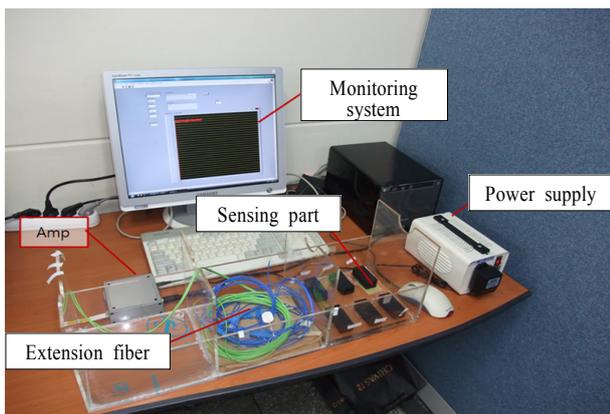
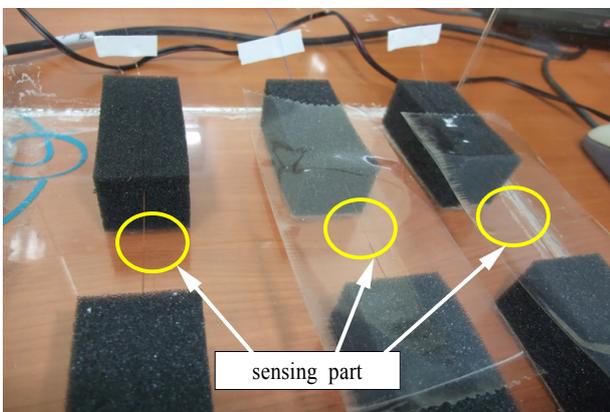


Fig. 7 LabView block diagram for data acquisition



(a) sensing and monitoring system



(b) sensing module

Fig. 8 Sensing system for experiment

있도록 전압신호[mV]로 변환되도록 만들어 졌다. 그리고 실시간 모니터링은 Fig. 7과 같이 LabView로 프로그래밍하여 디스플레이 및 데이터 저장이 가능하도록 구성하였다. 이러한 준비아래 실험장치를 구성하였으며 이것은 Fig. 8에 나타내었다.

먼저 센서 각각의 특성을 분석하기 위해 3개의 센서에 독립적으로 누수현상을 만들었다. 즉, 각각의 센서에 분무기로 물을 분사하여 수분접촉에 따른 광누설량을 측정하였으며 이것을 Table 2에 나타내었다. 각각 10회에 걸쳐 물분사와 건조하는 과정을 반복적으로 수행하였다. 출력값은 센서 각각에 물을 분사하여 수분에 노출시킨 상태와 건조상태에서의 값

Table 2 Individual sensitivity test results

Try numbers	Optical loss [mV]			
	normal condition (dry)	5µm (A)	7.5µm (B)	10µm (C)
1	197	189	178	165
2	197	189	174	168
3	199	189	178	166
4	197	189	177	164
5	199	186	176	164
6	195	190	179	167
7	195	189	173	166
8	199	188	174	163
9	197	186	175	165
10	198	189	176	168
Average	197.30	188.40	176.00	165.60
Difference		8.90	21.30	31.70

Table 3 Sensitivity test results for sensor combination

Try number	Combination of Leakage positions and optical loss [mV]			
	A+B	A+C	B+C	A+B+C
1	166	158	153	141
2	172	161	156	145
3	168	162	156	143
4	167	161	152	141
5	165	160	153	146
6	168	159	154	139
7	165	159	152	137
8	164	162	151	139
9	168	161	150	140
10	169	161	151	138
Average	167.20	160.40	152.80	140.90
Difference	30.1	36.9	44.5	56.4

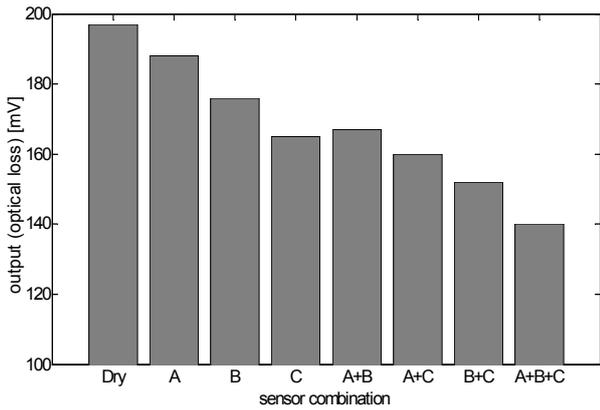


Fig. 9 A bar graph to evaluate sensitivity property

을 취득한 것이다. 표에서 nominal 조건이란 물을 어느 곳에도 분사하지 않았을 때 데이터 취득장치에 나타나는 값을 말한다. 10회에 걸쳐 수행한 테스트 결과를 평균하여 정리한 결과를 보면 각각의 누수 위치를 판별할 수 있는 충분한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

이것을 기초로 하여 다음으로 두 위치 이상에서 누수가 발생한 경우를 모의하였다. 이것은 Table 2와 같이 그 조합을 구성할 수 있으며, 3개의 센서로 이루어진 센싱시스템에서 발생하는 모든 누수현상을 고려한 조합이다. 이해를 돕기 위해 Table 3을 Fig. 9와 같이 막대그래프로 나타내었다. 막대그래프에서 X축 첫 번째 값은 건조(dry)상태, 즉 센서부에 수분이 닿지 않은 정상상태에서의 출력값을 나타낸 것이며, 이후는 Table 1과 같이 3개의 센서로 조합할 수 있는 모든 경우를 고려한 실험결과이다. 즉, Table 2와 Table 3을 그래프로 나타낸 것이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 출력값이 전반적으로 단조감소(누설량은 증가)하는 경향을 나타내고 있다. 특히 3번 센서(C)에만 누수현상이 발생한 경우가 1번(A)과 2번(B)에서 동시에 누수가 발생한 경우보다 광누설량이 많은 경향을 보이고 있다. 이것은 센서부 가공상의 문제에 기인한 것으로 판단된다. 컴퓨터로 데이터를 처리하는 경우에는 별 문제가 없을 수 있으나 수십개의 센서로 센싱시스템을 구축해야 할 경우를 고려하면 보다 다양한 센싱모듈을 확보하거나 센싱부 가공정도를 향상시키는 등의 문제해결 방안을 모색해야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 광파이버센서를 이용하여 지하에

매설된 배관의 누수검출시스템 개발에 관한 기초연구를 수행하였다. 이 기술은 전기저항식 센서가 갖는 단점:

- 누전에 의한 전력손실 및 신호왜곡
- 장거리 원격모니터링 시스템구축을 위해서는 신호증폭을 통한 센싱신호의 재가공이 필요
- 전자장 등 외부 전기신호에 의한 영향이 큼을 근원적으로 보완할수 있는 기술이다.

따라서 저전력으로 원거리 원격모니터링시스템구축이 지극히 용이하고, 외부환경에 의한 영향을 거의 받지 않는다. 결국 저비용으로도 다점계측시스템 구축이 가능하므로, 현재의 무선네트워크시스템을 활용하면 보다 효율적인 모니터링시스템 구축이 가능한 기술임이 틀림없다. 향후 센서부 가공정도 개선 및 다양한 데이터 분석을 통해 장거리 및 다점 센싱시스템구축에 필요한 신뢰성확보에 노력할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2011년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양플랜트 거주용 부선의 계류위치 제어시스템 개발)

## 참고문헌

1. A. Wang, M. F. Gunther, K. A. Murphy and R. O. Claus, 1992, "Fiber-Optic Liquid-Level Sensor", Sensors and Actuators A, 94, pp. 69-75.
2. P. Raatikainen, I. Kassamakov, R. Kassamakov and M. Luukkala, 1997, "Fiber-Optic Liquid-Level Sensor", Sensors and Actuators A, pp. 93-97.
3. I. B. Kwon, M. Y. Choi and M. S. Kim, 1999, "Strain Sensitivity of Fiber Optic Bragg Grating Sensor", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, No. 3, pp. 237-242.
4. W. H. Park, 1998, "Development of Optical Fiber Grating Sensor System for Civil Engineering Structures", Korea Institute Of Science and Technology, pp. 1-60.
5. W. J. Lee, D. K. Kim and W. J. Lee, 2001, "Measurement of Bored-Precast Pile Load

- Transfer Using Fiber Bragg Grating Sensor”,  
Journal of the Korean Society of Civil  
Engineers, Vo. 21, No. C, pp. 311-319.
6. C. Vazquez, A. B. Gonzalo, S. Vargas and J.  
Montalvo, 2004, “Multi-Sensor System Using  
Plastic Optical Fibers for Intrinsically Safe Level  
Measurements”, Sensors and Actuators A, No.  
116, pp. 22-32.
  7. M. Iga, A. Seki, Y. Kubata and K. Watanabe,  
2003, “Acidity Measurements Based on a  
Hetero-Core Structured Fiber Sensor”, Sensors  
and Actuators, B96, pp. 234-238.
  8. K. S. Kim, H. Kim and S. R. Ahn, 2008, “The  
Applications of Fiber Optic Sensor for Safety  
Management Network on Civil Engineering”,  
The Magazine of the Korean Society of Civil  
Engineers, Vol. 56, No. 6, pp. 25-30.
  9. Gas News, 2012, [http://www.gasnews.com/  
news/articleView.html?idxno=57285](http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=57285).