

## 가정용 연료전지 시스템 내부 수소 누출 시 센서 응답 특성에 관한 연구

김영두\*, 신동훈\*<sup>†</sup>, 정태용\*, 남진현\*, 김영규\*\*, 이정운\*\*

\*국민대학교 기계공학과, \*\*한국가스안전공사

## An Experimental Study on the Sensor Response at Hydrogen Leakage in a Residential Fuel Cell System

YOUNGDOO KIM\*, DONGHOON SHIN\*<sup>†</sup>, TAEYONG CHUNG\*,  
JINHYUN NAM\*, YOUNGGYU KIM\*\*, JUNGWOON LEE\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Kookmin Univ., Seoul 136-702, Korea

\*\*Korea Gas Safety Corporation, 322-1 Daeya-Dong, Shihung-Shi, Gyeonggi-Do, Korea

### ABSTRACT

Hydrogen is the primary fuel in fuel cell systems. Because of high inflammation and explosion possibility of hydrogen, fuel cell systems require safety measures to prevent hydrogen hazard upon leakage. In this study, a model enclosure was made by referring to a commercial residential fuel cell system and hydrogen leakage experiments and computational simulations were conducted therein. Hydrogen was injected into the cavity through leakage holes located at the bottom while its flow rate was precisely controlled using MFC. The transient sensor signals from hydrogen sensors installed inside the enclosure were recorded and analyzed. The hydrogen sensor signals showed different delay times depending on their position relative to a leakage point, which indicated that hydrogen generally moves upward and accumulates at the upper region of a closed cavity. The inflammable regions with hydrogen concentration over 4% LEL were observed to locate near the leakage hole initially, and broaden towards the upper cavity region afterward. The simulation result showed that detection time at the hydrogen sensor was similar to the pattern of experimental results. However, the maximum concentration of hydrogen had a gap between experiment and simulation at detect point due to measurement errors and reaction rate.

**KEY WORDS** : Hydrogen(수소), Hydrogen leakage(수소 누출), Hydrogen safety(수소 안전), Hydrogen sensor(수소 센서)

### 1. 서 론

현재 동력이나 열에너지를 얻기 위해 주로 사용

되는 화석연료는 연료의 고갈과 연소 후 배출되는 오염물질에 의한 지구 온난화 현상이라는 큰 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점의 대책으로 대체에너지와 관련된 연구 개발이 활기를 띠고 있으며 청정에너지원에 대한 관심이 높아지고 있다<sup>1,2)</sup>. 수소

<sup>†</sup>Corresponding author : d.shin@kookmin.ac.kr

[ 접수일 : 2009.7.31 수정일 : 2009.10.9 게재확정일 : 2009.10.23 ]

는 재생 가능한 에너지원이며 동시에 연료로 사용될 때 배출되는 오염물질이 없어 청정에너지원으로 각광받고 있다.

하지만 수소는 물리적 특성상 누출이 쉽고 가연범위가 매우 넓으며 또한 화염의 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스이기 때문에 취급에 있어 세심한 주의가 요구된다<sup>3)</sup>. 연료전지는 수소를 이용하여 전기를 생산하는 발전 시스템<sup>4)</sup>으로 운전 중 수소누출과 폭발의 위험을 항상 수반하고 있다. 따라서 안전성의 확보를 위한 기본적인 방법으로 수소이용 시스템 내부에서 수소 농도 모니터링의 중요성이 부각된다.

본 연구에서는 가정용 연료전지의 안전성 확보를 위한 기초 자료의 축적을 위해 육면체의 챔버 내에서 수소가 누출되었을 때의 확산 특성을 실험적으로 평가하였다. 일반적인 상용 가정용 연료전지 모듈의 크기를 고려하여 챔버를 제작하였으며 누출유량과 누출위치를 변화시키면서 수소센서를 이용하여 각 위치에서의 수소 농도의 변화를 측정하였다. 이렇게 얻어진 실험결과를 통해 누출된 수소의 확산 및 유동 특성을 파악하였으며, CFD 해석 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

## 2. 수소 누출 실험

### 2.1 챔버

수소 누출실험을 위한 육면체 챔버의 치수는 850×350×990mm로 상용화를 위해 개발 중인 연료전지 모듈의 크기를 고려하여 제작하였다. 혼합 가스 누출을 위한 구멍은 챔버의 바닥에서 15mm 위쪽에 떨어져있으며 수소를 누출시키기 위해 직경 3mm

의 구멍을 뚫고 내경 2mm의 관을 삽입하였다. 내부는 연료전지 시스템 내부 환경과 동일 하도록 상온, 상압을 유지하였다.

### 2.2 센서

실험에 사용된 수소센서는 전기화학식 수소 센서로서(4HYT, SensoriC) 양극과 음극에서 산화환원 반응을 통하여 전류를 발생시킨다. 감지부의 크기는 직경 20mm, 높이 16mm이며 PCB 보드와 일체형으로 구성되어 있다. 측정 범위는 0~4%(vol)이고 농도에 따른 전압 신호를 0%일 때 40mV, 4%일 때 200mV로 비례적으로 출력한다. 검출 농도에 90% 도달하는 응답 시간  $T_{90}$ 은 90sec 이내이고 검출 방식은 대기 확산식이다.

### 2.3 실험 조건

수소 가스의 유동 형태를 파악하기 위하여 수소 센서의 설치 위치를 변화시키며 실험을 수행하였

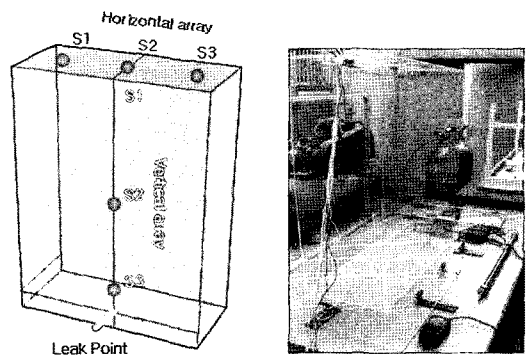


Fig. 1 Experimental device and outline.

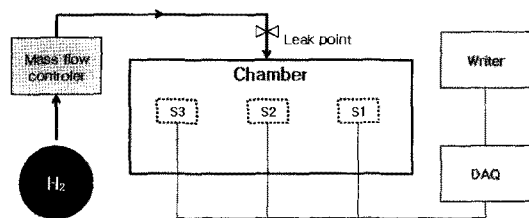


Fig. 2 Experimental process diagram.

Table 1 Experimental condition

Case	Sensor array	H <sub>2</sub> flowrate (cc/s)
1	H	10
2	V	10
3	V	30

H : Horizontal array  
V : Vertical array

다. 수소 센서의 위치는 수평 배열일 때 챔버 상단면의 중앙과 양쪽 가장 자리로부터 안쪽으로 70mm 떨어진 곳에 수평 방향으로 부착한 경우와 수직 배열일 때 챔버 측면의 바닥에서부터 250mm, 550mm, 990mm의 위치에 수직 방향으로 부착한 두 가지 경우로 구분하였다. 이것을 Fig. 1에 나타내었다. 또한 농도 신호의 분포 및 크기를 비교하기 위하여 누출 유량이 10cc/s와 30cc/s인 두 가지 경우를 사용하였으며 다음과 같은 실험 조건을 Table 1에 나타내었다.

### 2.4 실험 방법

챔버 내 일정량의 수소를 누출시키기 위해서는 유량의 정확한 제어가 필요하다. 봄베에서 챔버까지 이르는 관로의 중간에 MFC를 설치하였으며 설정한 유량 값에 도달 할 때까지 수소 가스는 대기중으로 배출시켰다. 누출유량은 봄베에서 누출 관 사이에 설치된 MFC(C100M, sierra)를 통하여 cc/s 단위로 제어되었다. 센서 신호의 측정 시작 이후 15sec 후에 수소 가스를 챔버 안에 유입 시켰으며 120sec 간 누출 시킨 후 중단시켰다. 3가지 실험 모두의 경우에 같은 방법을 사용하였다. 그 신호는 DAQ 장비를 사용하여 컴퓨터로 기록하였다. 실험장치의 구성도를 Fig. 2에 나타내었다.

### 2.5 전산해석 방법

해석 도구는 상용 CFD 코드인 fluent 6.2를 이용하였다. 챔버 내부의 수소 확산 및 유동은 standard k-ε의 난류 모델을 적용하여 해석 하였다. 초기 챔버 내부는 공기로 가득 차있는 상태이며 설정된 지점에서 100% 농도의 수소 가스를 챔버 내부로 주입 시켰다. 해석 모델의 크기 및 누출 위치는 실험과 동일한 상태로 설정하고 수행하였다. 실험과 전산해석의 결과 비교를 위해 해석 모델내부에 실험 장치의 센서 설치 위치와 동일한 측정 지점을 설정하였다. 측정 지점에서 수소 가스의 도달 시간 및 농도는 자동으로 기록하였다.

## 3. 결 과

### 3.1 누출 실험 센서 배열에 따른 응답 시간

Table 1의 실험 조건에 나타난 case 1의 실험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 챔버의 가운데 아래에서 수소를 누출 시킨 경우, 수소 누출 후 S2에서 32sec, S1, S3에서 35sec로 동시에 신호가 감지된 후 일정 시간이 지난 후에 챔버의 양 옆 구석에서 농도가 높게 측정되는 것을 확인하였다. 10cc/s의 유량으로 2min동안 누출 시켰을 때 전체 체적 280ℓ에서 S1과 S3는 1% 내외의 수소 농도를, S2에서는 0.7%의 농도를 유지하였다.

수소는 공기보다 가벼운 기체로서 누출 시 위로 상승하게 된다. 챔버 내 수소 누출 시 높이에 따른 수소 농도의 특성을 확인하기 위하여 수직으로 센서를 배열한 조건에서 case 2의 실험을 진행하였으며 위험 영역의 변화를 확인하기 위하여 동일한 실험조건하에 누출 되는 유량을 변화시키고 결과를 관찰하였다. 센서의 위치는 챔버의 중앙 하단면에서부터 250mm 위쪽에 S3, 550mm 위쪽에 S2, 상단면의 중앙에 S1을 위치 시켰으며 시간에 따른 높이 별 농도를 측정하였다. Fig. 4의 유량이 10cc/s인 경우 누출 지점에서 가장 가까이에 위치한 S3가 처음 반응하는 시간은 2.5sec가 걸렸다. 그 후 S2와 S3는 급격한 상승과 하락을 반복하는 불규칙

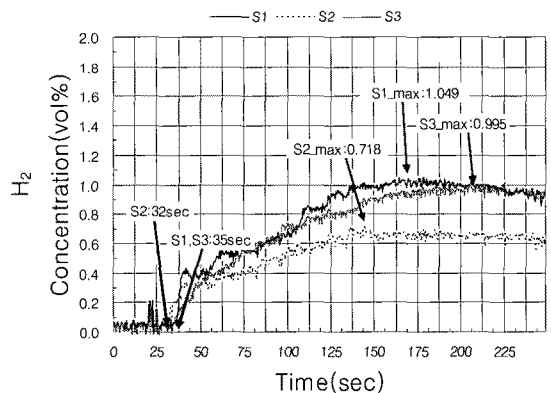


Fig. 3 Measured hydrogen concentration of case 1 (horizontal array, flow rate : 10cc/s).

한 응답특성을 보여 누출 지점 주변의 유동이 불안정함을 나타내었다. 또한 110sec 지점에서는 폭발 한계인 4%를 넘어서는 불규칙한 경향을 보여, 누출 초기가 위험함을 보였다. 그 이후 40sec가 지나고 나서 챔버 내의 농도 분포는 안정되는 양상을 보였으며 상단부에서 최대 농도는 1.581%이었다.

Fig. 5의 유량이 증가한 경우 S3와 처음 반응하는 시간은 17sec 이었다. 상단 면에 부착된 S1까지 도달하는 시간은 유량이 22sec로 5sec가 단축되었다. 수소 폭발 한계 4%에 도달하는 시간은 120sec 이었다. Case 3의 경우 챔버 내 농도 분포가 안정

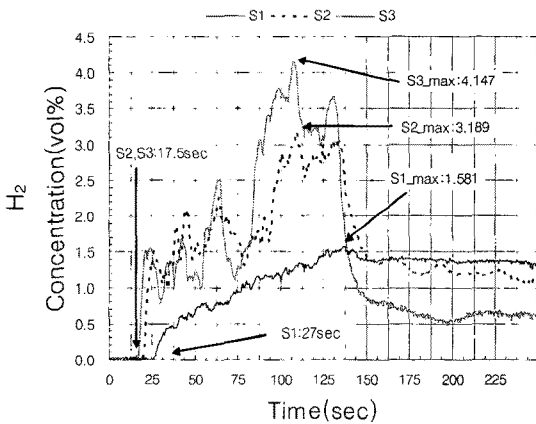


Fig. 4 Measured hydrogen concentration of case 2 (vertical array, flow rate : 10cc/s).

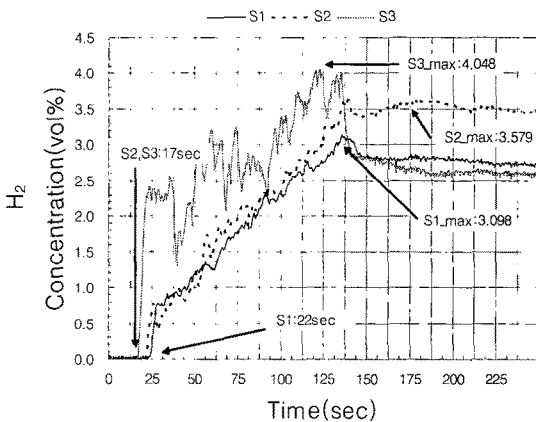


Fig. 5 Measured hydrogen concentration of case 3 (vertical array, flow rate : 30cc/s).

된 후 S2에서 더 높은 농도를 나타내었는데 이것은 혼합 가스가 제거된 이후 센서 초기상태로 회복하는데 오랜 시간이 걸리는 것으로 전기화학식 수소 센서의 응답 신호 특성 때문인 것으로 사료되었다.

### 3.2 전산해석 결과

Case 1의 경우 누출된 수소 가스는 S2에서 먼저 검지되고 S1, S3의 순서로 확산되었다. 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 135sec의 수소 누출 중단 시점에 수소 가스 수직 상승에 따른 유동의 영향으로 챔버 상단 면 중간의 수소 농도는 양 옆 구석에 비하여 낮은 수치를 나타내었으나 26sec 후 챔버 내부 유동이 안정됨에 따라 상단 면 전체에 고르게 분포 되었다. 챔버 내부 측정 지점에서 농도 변화 양상은 실험의 결과와 유사하였다 그러나 측정지점에서 최대 농도는 실험의 결과보다 높게 나타났다. 이것은 이상적인 값을 나타내는 전산해석의 결과와 실험 진행 중 발생 가능한 측정 오차 및 센서 감지부에서 화학 반응을 저조로 인한 지시 농도 감소의 차이에서 기인한 것으로 사료된다.

Case 2의 실험에 관한 전산해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 수소 가스 누출 후 첫 반응까지 걸리는 시간은 17sec로 실험 결과와 0.5sec의 차이가 있었다. 누출 위치에서 가장 근접한 S3는 누출 10sec 후 폭발 하한치인 4%를 넘었고 누출 중지 후 농도 수치는 급격히 감소하였다. 상단 면에 위치한 S1에서의 최대 농도 값은 2.87%로 측정되었으며 누출

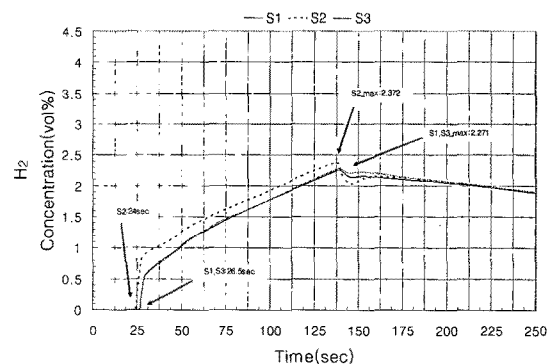


Fig. 6 Calculated hydrogen concentration of case 1.

중지 후 감소하여 챔버 내부 유동이 안정된 후 2% 부근의 농도 값을 나타내었다. 각 측정 지점에서 농도 값의 변화는 실제 실험 데이터의 불규칙한 양상보다 이상적인 변화율을 보였으며 급격한 농도 변화가 일어나는 시간은 실험과 유사하였다.

누출 유량에 따른 영향을 확인하기 위하여 전산 해석 case 3에 대한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

누출 유량의 증가는 누출 속도를 증가시켜 S3의 측정 지점에서 떨어진 곳에서 상단 유동을 형성하므로 벽면에서의 수소 농도는 2% 이내로 낮게 나타났다. 이것은 수소 가스의 누출 유량에 따라 폭발 하한 4%인 위험영역이 변화될 수 있음을 나타내었다. 수소 가스가 상단 면에 도달하는 시간은 10sec

가 걸렸고 이후 상단 면에서 농도는 선형적으로 증가하였으며 최대 4.967%를 나타내었다. 챔버 내부 수소 가스 유동이 안정된 후 상단 면에서부터 하단 면으로 높이에 따라 수소 농도 신호의 크기가 낮아져 수소는 상부에 적층되는 양상을 보였다.

### 3.3 실험과 시뮬레이션 비교

실험 결과의 타당성을 입증하기 위한 방법으로 실험과 시뮬레이션에서의 센서 위치별 감지 시간을 비교하였다. Case 1에 대한 실험과 전산해석 결과의 비교를 Fig. 9에 나타내었다. 전산해석과 실

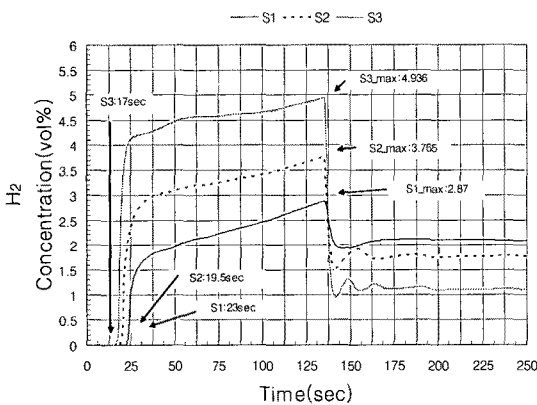


Fig. 7 Calculated hydrogen concentration of case 2.

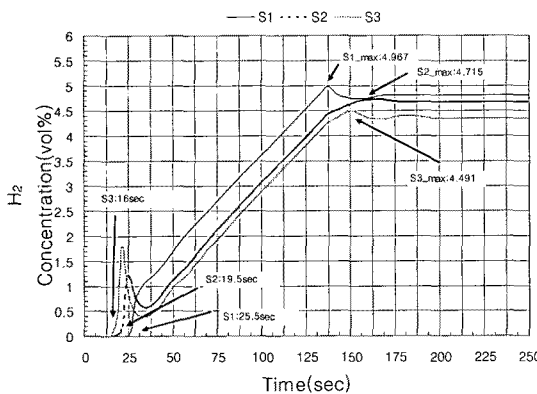


Fig. 8 Calculated hydrogen concentration of case 3.

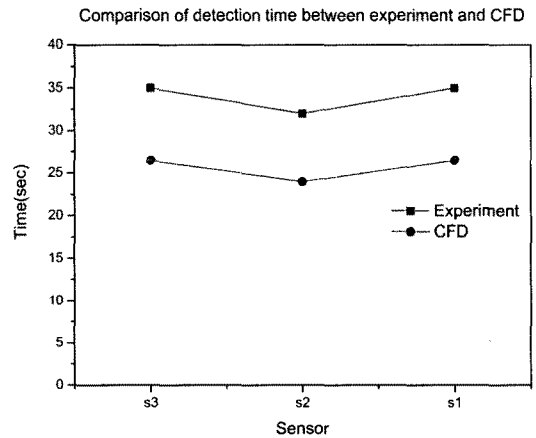


Fig. 9 Comparison of detection times for case 1.

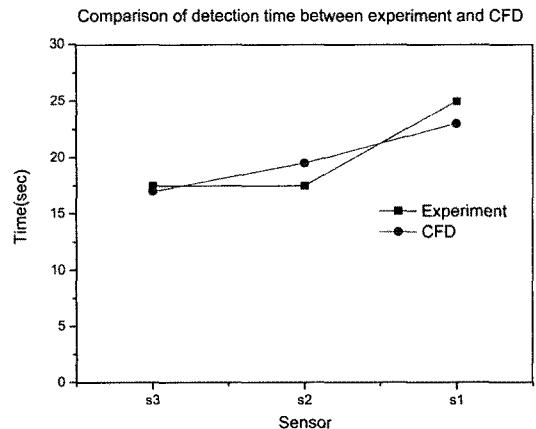


Fig. 10 Comparison of detection times for case 2.

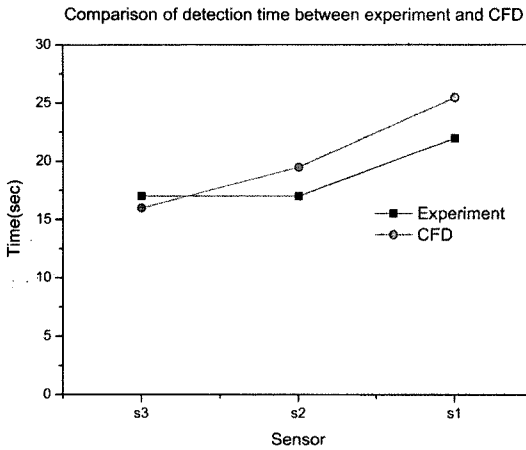


Fig. 11 Comparison of detection times for case 3.

험 각각의 측정 지점에서 수소 가스가 검출된 시간은 센서 위치에 따라 추이나 경향은 비슷한 양상을 나타내었다. Fig. 10, Fig. 11의 경우 실험과 전산해석 결과가 대부분 경향이 일치하는 것으로 나타났다. 실험과 전산해석 결과 비교는 각 센서에서 수소를 감지하는 시간이 유사함으로 타당성을 입증하였고 확장된 모델의 전산해석에 이용될 수 있는 것으로 판단되었다.

#### 4. 결 론

본 실험은 가정용 연료전지 시스템에서 수소 사용 시 누출과 폭발의 위험성을 줄이고자 실물 규격의 챔버를 제작하고 실제 수소를 누출 시켜 센서의 농도 신호 크기를 확인하였다. 또한 전산해석과의 비교를 통해 확장된 모델의 해석에 용이함을 추구하였다.

- 1) 수소는 누출 시 수직으로 상승하며 구조물에 부딪혀 측면으로 확산되었다.
- 2) 수소는 밀폐된 공간 안에서 높이에 따라 상부에 적층됨을 확인하였다.
- 3) 1%농도의 수소 가스를 10cc/s로 누출 시킬 경우 누출 지점에 근접한 영역은 4%를 넘는 농도 신호 크기로 폭발 위험성이 있었다.

- 4) 혼합 가스 누출 양의 증가는 센서와 반응 시간을 단축시키고 수소 제트의 변화로 상이한 유동장을 형성하였다. 이것을 통해 수소 센서의 위치 선정이 중요함을 알 수 있다.
- 5) 전산해석상의 수소 가스 검출 시간은 실험과 유사하며 시간에 따른 수소 확산 패턴은 일치하였다.
- 6) 수소 누출 시 초기근접 부위 및 수소가 적층되는 상부는 폭발의 위험성이 있으므로 향후 연료 전지 시스템의 환기와 수소 안전에 대해 연구를 진행할 필요성이 대두되었다.

## 후 기

본 연구는 2009년도 국민대학교 교내 연구 지원비와 산업자원부 신재생에너지기술개발사업의 일환(2006-N-HY12-P-01)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) S. Dunn, "Hydrogen future : toward a sustainable energy systems", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 27, No. 3, 2002, pp. 235-264.
- 2) J. J. Winebrake, B. P. Creswick, "The future of hydrogen fueling systems for transportation: an application of perspective-based scenario analysis using the hierachy process", Technol. Forecast Soc. Change, Vol. 70, No. 4, 2003, pp. 359-384.
- 3) J. Hord, "Is hydrogen a safe fuel?", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 2, 1978, pp. 157-176.
- 4) J. Larminie, A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, 2nd ed., Wiley, Chichester, 2003.
- 5) International Organization for Standardization, ISO/TR 15916, "Technical Report", New York 10036, 2004.