한국수소 및 신에너지학회 논문집(2005.9), 제16권 제3호
*Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society* (2005.9), Vol. 16, No. 3, pp. 253~261

# 3차원 디지털 스페클 토모그래피를 이용한 수소 유동의 밀도 분포 분석

안성수*, 고한서†
*성균관대학교 대학원 기계설계학과
성균관대학교 기계공학부

# Analysis of Density Distribution for Hydrogen Flow Using Three-dimensional Digital Speckle Tomography

S. S. Ahn and H. S. Ko
**Graduate School, Department of Mechanical Design, Sungkyunkwan University*
*†School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.*
*300 Chunchundong, Janganku, Suwon, Gyeonggi-do, 440-746, Korea*

## ABSTRACT

석유 연료 고갈 해결 및 온실 효과 가스 배출 저감을 위한 방안으로 제시되는 수소는 다양한 에너지 저장체로 사용되어 질 수 있으나 안전성에 대한 연구가 요구되어진다. 따라서, 일반적인 저장 형태인 고압 저장 탱크에서 누출이 되었을 경우 분사되는 수소의 거동에 대한 연구가 이루어져야하며 이를 바탕으로 한 보완책이 제시되어야 한다. 이번 연구에서는 누설 시 확산되는 수소의 밀도를 실제 거동과 유사한 3차원 컴퓨터 영상장으로 합성한 후 ART(algebraic reconstruction technique) 및 MART(multiplicative ART)를 기반으로 한 3차원 디지털 스페클 토모그래피 기법을 개발하여 재건하고 분석하였다.

**주요기술용어** : Hydrogen flow(수소 유동), Tomography(토모그래피), Computer synthesized phantom(컴퓨터 합성 영상장), ART(Algebraic Reconstruction Technique)

## 1. 서 론

온실 효과의 감소 및 에너지 효율의 증대라는 점에서 수소는 가장 중요한 미래 에너지다. 그러나 지속적인 에너지 공급원으로 수소를 이용하기 위해서는 저장 유형에 따른 안전성의 확보가 대단히 중요시된다. 수소는 가연성이 큰 기체이며 공기 또는 산소와 혼합된 경우에는 넓은 농도 범위에서 가연성 혼합물을 형성하므로 폭발(Explosion) 위험을 내재하게 된다. 그러나, 매우 가벼운 기체이므로 외부 공간으로 누출 시에는 매우 빠른 속도로 확산되어 위험 가능성이 적지만, 실내 공간의 경우 확산된 수소는 천정에서 수

† Corresponding author: hanseoko@yurim.skku.ac.kr

소 증기 층을 형성하여 점화가 일어나면 폭발하는 경우가 발생할 수 있다[1].

누출 시 수소 가스 거동을 정확히 해석하여 구체적이고 정확한 대처를 할 수 있는 안전 시스템의 설치에 기반이 되는 데이터를 얻기 위해 본 연구에서는 수소 가스 누출 사고의 단계 중 첫 번째인 누설이 일어났을 때 수소 가스 거동과 유사한 컴퓨터 합성장을 제작한 뒤, 3차원 디지털 스페클 토모그래피 기법을 개발하여 수소 유동의 3차원 밀도 분포를 분석하였다.

토모그래피(tomography) 계산법은 지난 수년간 개발되어 왔다. 처음에는 의학적으로 이미지 합성에 적용하기 위해 여과 역 투사 기법(filtered back projection technique)과 같은 수학적인 전환법이 개발되었고 그 후 Fourier 영역법과 동시에 역 투사 기법(back projection technique)[2]이 계산에 이용되었으며 계속해서 다양한 전환 기법과 그와 관계된 여과 함수(filtered function)[3]가 개발되었다. Fourier 영역법은 단면의 토모그래피(tomography) 방법으로 비교적 효과적이나 Fourier 전환을 위해 상당히 많은 수의 투사 광선과 각도를 필요로 하며[4], 실제 실험의 경우 실용적인 측면에서 정확한 결과를 얻기가 어려운 경우가 있다. 이 어려움을 극복하기 위해 제한된 각도에서의 토모그래피(tomography) 방법이 개발되어 왔고 그 중에서 가장 많이 쓰이는 방법이 algebraic reconstruction technique (ART)[5] 방법이다.

토모그래피(tomography) 방법은 레이저를 이용하여 열 유동을 비침투적으로 측정하고 그 투사 데이터를 이용하여 정량적으로 밀도를 계산할 때 효과적인 도구이다[6]. 수소 확산의 투사 데이터는 디지털 스페클 시스템 (digital speckle system)[7]을 이용하면 입사 광선에 대한 수직 방향의 굴절률을 입사 광선 방향으로 적분한 것으로 표현되어진다. Gladstone-Dale 관계식[7]을 이용하면 굴절각 $\alpha$를 밀도장 구배의 광선 방향 적분으로 얻을 수 있다.

$$\Psi_{SP}(s,\Theta)\cong\alpha=G\int\frac{\partial\rho}{\partial s}dt \tag{1}$$

여기서 $\Psi_{SP}$는 디지털 스페클 분석법의 투사데이터, $\alpha$는 입사 광선의 굴절각, $\rho$는 밀도장, $s$는 입사 광선에 수직, $t$는 입사 광선에 평행한 축이고 $G$는 Gladstone-Dale 상수이다.

Mach-Zehnder 간섭계의 투사 데이터인 $\Psi_{IF}$는 측정 유동장을 지나지 않는 기준 광선과 지나는 변형 광선 사이의 길이의 차이에 의해 결정된다. 기준 광선으로부터의 기준 fringe와 교란된 fringe의 차이는 밀도장의 광선 방향 적분으로 표현된다[9].

$$\Psi_{IF}=\frac{1}{\lambda}\int(n-n_{ref})dt=\frac{G}{\lambda}\int(\rho-\rho_{ref})dt \tag{2}$$

여기서 $\lambda$와 $n$은 레이저의 파장 길이와 굴절률을 나타낸다. 따라서 Mach-Zehnder 간섭계는 움직인 fringe가 밀도 자체의 적분에 의해 결정되고, 반면에 디지털 스페클 시스템의 굴절각은 밀도 구배의 광선 방향 적분에 의해 표현된다는 차이가 나타난다. 식 (1)과 식 (2)를 결합하면 디지털 스페클 시스템과 간섭계 사이의 관계를 나타낼 수 있다[11].

$$\Psi_{IF}=\frac{1}{\lambda}\int\Psi_{SP}ds \tag{3}$$

식 (3)은 디지털 스페클에서 $s$방향으로의 광선 굴절각 $\Psi_{SP}$의 적분은 간섭계의 fringe 이동량 $\Psi_{IF}$와 같음을 보여준다. 그러므로 fringe 이동량과 같은 Mach-Zehnder 간섭계로부터의 결과들은 굴절각과 같은 디지털 스페클에서의 결과들과 비교될 수 있다.

식 (1)과 식 (2)의 굴절각 $\Psi_{SP}$와 fringe 이동량 $\Psi_{IF}$는 토모그래피 변환법[10]에 의해 비대칭 모양의 실제 밀도장 $\rho(x,y)$으로 재건될 수 있다. 본 연구에서는 토모그래피 방법 중 하나인 algebraic reconstruction technique (ART)과 multiplicative algebraic reconstruction technique (MART)[11]이

확산되는 수소의 비대칭 밀도장을 계산하기 위해 시행되고 비교되었다. 식 (1)의 투사 데이터와 밀도장과의 관계는 대수적이지 않기 때문에 비대수적인 디지털 스페클 데이터들은 식 (3)에 의해 대수적인 간섭계 데이터로 변환되어서 ART나 MART에 의해 계산될 수 있도록 투사면에서 수치적으로 적분되어야 한다. 본 연구에서는 두 가지 토모그래피 기법을 이용하여 제한된 각도에서 3차원 수소 확산에 대한 비대칭 밀도장을 재건하고, 정확성을 비교하였다.

## 2. 토모그래피 재건 알고리즘

3차원 밀도장은 계산된 변수들에 의해서 기초함수의 연속으로 표시될 수 있으며, 토모그래피는 각각의 기초함수가 하나의 변수 (통상 고정된 간격에 대한 높이)에 의해 정의되는 선형적인 경우에 결과를 구하기 위한 최적화 작업을 수행한다. 각각의 기초함수의 위치는 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{f}(x,y,z)=\sum_{i=1}^{JKL}O_i b(x-x_i,y-y_i,z-z_i) \qquad (4)$$

여기서 $\hat{f}$는 재건될 장을 나타내는 함수이고, $b$는 고정된 위치인 $(x_i,y_i,z_i)$에 위치한 기초함수의 일반형이며 $O_i$는 $(x_i,y_i,z_i)$에 중심을 둔 i번째 기초함수의 높이 상수이다. $(x_i,y_i,z_i)$는 $x$ 방향으로 같은 간격을 갖는 J개의 점들과 y 방향의 K개의 점들, 그리고 z 방향의 L개의 점들을 포함하는 3차원 육면체 배열을 형성한다. Cubic B-spline 함수와 같은 부드러운 기초 함수를 사용하면 square-pixel 기초 함수보다 적은 수의 미지상수를 가지고도 상대적으로 부드럽고 정확한 재건을 할 수 있다. 이들 미지상수들의 최적화된 해는 계산 중간 과정의 목표함수 $\hat{f}$의 가상 투사 데이터 $\Psi$와 실제장 $f$의 투사 데이터 $\Psi$의 편차를 최소화함으로써 구해야 한다. 3차원 기초 함수는 x, y, z 세 방향 기초함수의 곱, 즉 $b(x-x_i,y-y_i,z-z_i)$ $=b_x(x-x_i)\times b_y(y-y_i)\times b_z(z-z_i)$이다. 투영 데이터 $\Psi_{PQZR}$는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Psi_{PQZR}\sum_{j=1}^{JKL}O_j\int b(x-x_i,y-y_i,z-z_i)\,dt \qquad (5)$$

여기서 $PQZR=1,2,3,\cdots,PQZR$ 은 한 평면에서 투사 데이터의 각도수가 $P$, 상하로 다른 각도를 주었을 때 투사 각도수가 $Q$, $z$ 방향 평면의 수가 $Z$, 그리고 한 각도에서 광선의 수가 $R$일 때 전체 광선의 총수이다.

ART 알고리즘은 기본적으로 결과 벡터 $O$를 얻기 위한 토모그래피 재건에 적용되는 선형 방정식 시스템의 반복적인 해법이다. ART는 측정된 투사 데이터와 계산된 가상의 투사 데이터와의 편차의 피드백 정보를 사용하여 결과 상수 벡터 $O$를 다음과 같은 대수적 갱신을 통해 반복적으로 최적화한다.

$$O^{q+1}=O^q+\frac{\Psi_i-\langle w_i,O^q\rangle}{\left(\sum_{j=1}^{JKL}w_{i,j}\right)^2}w_i,\quad \sum_{j=1}^{JKL}w_{i,j}\neq 0 \qquad (6)$$

여기서 $\langle x,y\rangle$는 $x$와 $y$의 내적을 나타내고 $q$는 반복횟수를 가리키며 $w_i$는 투사 행렬의 i번째 열을, $w_{ij}$는 투사 행렬의 i번째 열과 j번째 행 요소를, 그리고 $\Psi_i$는 그에 해당하는 측정된 광선의 투사 데이터를 나타낸다. 이 알고리즘은 수렴에 도달할 때까지 각각의 광선에 기초한 반복을 수행한다.

MART는 가상 투사 데이터 $\Psi$와 측정된 투사 데이터 $\Psi$의 편차가 결과 상수들에 분배되는 방법에 있어서만 ART와 다르다. MART는 다음과 같이 곱셈 수정 벡터 $C$의 요소 $C_i$를 사용한다.

$$O_i^{q+1}=C_i^qO_i^q$$

$$C_i^q=\begin{cases}1-0.5W_i^q\left(1-\dfrac{\Psi_i}{\Psi_i}\right) & \text{for } \Psi_i\neq 0\\ 1, & \text{otherwise}\end{cases} \qquad (7)$$

여기서 $q$는 $q$번째 반복을 그리고 $W_i$는 가중

요소를 나타낸다. MART를 사용하는 장점중의 하나는 음수가 아닌 스칼라를 재건하는 데 있어서 음수가 아닌 결과 데이터를 보장한다는 것이다.

이 알고리즘들의 갱신은 원칙적으로 간섭계와 같이 필드의 값들을 직접 적분해서 투사 데이터를 얻는 대수적인 투사 데이터 값들에 대해서만 가능하다. 따라서 디지털 스페클과 같이 장의 기울기를 적분한 투사 데이터 $\Psi_{SP}$는 식 (3)에 의해 간섭계의 투사 데이터 $\Psi_{IF}$로 변환한 후 ART나 MART를 사용하면 밀도나 온도장과 같은 결과를 재건할 수 있다.

## 3. 컴퓨터 합성 영상과 재건 오차

3차원 수소 확산의 거동을 재건하기 위해 컴퓨터 합성 영상장을 제작하였다. 3차원 기초 함수를 기반으로, 폭과 높이를 조절하는 인자를 이용하여 실제 거동과의 유사성을 높였으며 다음과 같이 표현되어진다.

$$P(x,y,z)=\begin{cases}\dfrac{H(2B-d_{i,j,k})^3-4(B-2d_{i,j,k})^3}{4B^3}, & d_{i,j,k}<B\\ \dfrac{H((2B-d_{i,j,k})^3)}{4B^3}, & B\le d_{i,j,k}\le 2B\\ 0, & d_{i,j,k}>2B\end{cases}$$

$$d_{i,j,k}=\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_j)^2+(z-z_k)^2} \quad (8)$$

여기서 $d_{i,j,k}$는 기초 함수를 3차원으로 나타내기 위해서 이용한 변수이며, 높이의 변화는 선형적으로 표현하였고, 폭의 변화는 로그함수를 이용하여 나타내었다. 수소 기체의 밀도가 대기보다 작으나 수소 내부 구역에서는 1이고, 수소 밖 대기에서는 0으로 표준화하여 계산하였다.

Fig. 1 에서와 같이 식 (8)은 실내 공간에서 수소가 저장 용기로부터 누설되었을 때, 상부에서 공기와 혼합층을 형성하기 직전까지를 나타내었으며 그 때의 실내 공간의 3차원 밀도 분포를 재건하였다. 이 밀도장 영상에 대해 상대 밀도값은 0에서 1사이로 정규화시켰다.

3차원 수소 거동 영상장의 제작 후, 프로젝션값을 영상장으로부터 계산하였으며 계산된 프로젝션값으로부터 두 가지 토모그래피 기법인 ART와 MART를 이용하여 밀도를 재건하여 두 기법에 대한 정확성을 검증하였다.

본 연구에서는 기준 영상 함수 $f$와 재건되는 결과 함수 $\tilde{f}$의 비교를 위해 평균 오차를 사용하였다.

$$\Phi_{avg}=\frac{\sum_{i=1}^{JKL}|f(x_i,y_i,z_i)-\tilde{f}(x_i,y_i,z_i)|}{JKL} \quad (9)$$

여기서 $JKL$은 결과 함수를 재건하기 위해 사용하는 기초함수의 총수이다. 이 오차는 실제장 또는 기준 합성 영상과 재건장 (결과 함수)간의 비교에 기초해서 계산될 수 있다. 실제 실험에서는 실제장을 모르기 때문에 재건의 질은 오직 계산된 가상의 투사 데이터 $\tilde{\Psi}$와 측정된 투사 데이터 $\Psi$의 비교, 분석을 통하여 평가되어질 수 있다.

## 4. 결과 및 고찰

토모그래피를 이용한 비침투적 재건 방법인 ART와 MART에 의해 비대칭 수소 확산 거동의

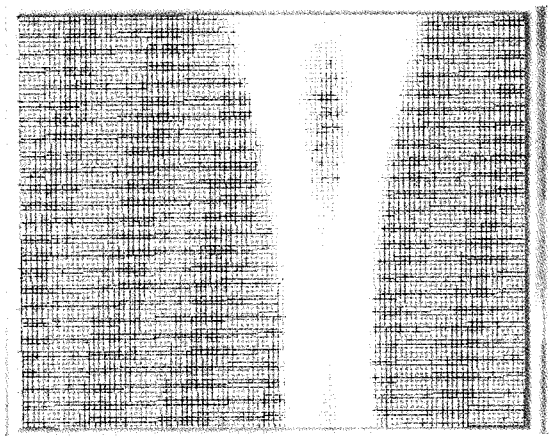


Fig. 1. Computer synthesized phantom field for three-dimensional diffusion of hydrogen flow.

3차원 영상장이 재건되었다. 디지털 스페클 투사 데이터를 식 (3)에 의해 간섭계 투사 데이터로 변환시킬 수 있으므로 간섭계 투사 데이터를 이용하여 밀도장을 계산하였다. 즉, 3차원 수소 거동을 컴퓨터 합성 영상장으로부터 각 프로젝션 당 50개와 80개(R=50, 80)를 계산하고 그 광선들로부터 ART와 MART에 의해 밀도 분포를 재건하였는데, 이 때 재건장은 20×20×20 cubic B-spline 기초함수 (N=8000)로 표현되었다. 즉, z축 방향으로 20개의 재건장을 계산하였지만, 3차원 밀도장을 2차원 지면상에 나타낼 수가 없기 때문에 밀도의 변화가 두드러지는 3개의 층(bottom, middle, top)을 추출하여 나타내었다. 재건 계산은 180°로부터 한 평면에 대해 동일한 간격 각도로 나누어진 3개와 5개 (P=3, 5)의 투사 데이터 각도를 이용하여 수행하였다.

## 4.1 각도의 수에 따른 재건 결과 비교

Fig. 2 와 3에서 보이는 것과 같이 ART와 MART의 재건 결과를 크게 P=3 과 P=5로 나누어서 정리하였다. 총 광선의 개수를 결정하는데 있어 가장 큰 변수로 작용하는 한 평면 당 투사각의 개수를 나타내는 P의 값에 따른 결과는 총 광선의 개수가 같더라도 전반적으로 P=5일 경우 더 작은 오차를 보여주었다.

비대칭 장을 재건하는 데 있어서 그 장이 아무리 단순한 형태이더라도 최소로 요구될 것이라고 예상되는 3개의 투사 데이터 각도 하에서 MART의 결과가 ART의 결과보다 더 좋은 재건을 보여주고 있다. 곱셈 재건 방식인 MART의 분배 방식이 대기와 수소같이 두 개의 밀도 값만을 갖는 유동에 대해 장점을 보여주고 있기 때문이다.

경사각과 z 방향 평면 개수를 달리할 경우, 동일한 광선의 개수로 재건이 이루어졌음에도 불구하고 확연히 다른 재건 결과를 제공하고 있다. 먼저, Fig. 2 (e) 와 (h)에서 보이는 것처럼 ART 기법을 적용하고, 나머지 두 변수(P=3, R=80)값은 동일하게 하였으나 상하로의 경사각을 주지 않고 높이에 따른 z축 방향의 프로젝션 데이터를 더 많이 준 (Q=1, z=30) (e)에서 보다 부정확한 재건 결과가 나타났다. 이러한 결과는 MART에서도 비슷한 추이를 나타내었는데 Fig. 2 (k) 와 (n)를 비교하였을 때도 경사각을 적용한 (n)의 경우가 보다 매끄러운 편심 밀도 분포를 보이며 주위 노이즈가 거의 나타내지 않고 있다. 이것은 이번 해석에 적용된 합성 밀도장이 z방향으로의 밀도 분포가 급격히 변하여 경사 투영 데이터가 있을 경우, 안정적이고 정확한 재건에 도움이 되었으나 xy 평면과 평행한 방향으로의 투영 데이터만을 이용하여 적용한 경우 z방향으로의 상관도가 감소하여 약간의 오차가 발생한 것으로 판단된다. 즉, 3차원 재건 방법에서 추가된 변수 중 경사각의 개수 Q는 단순히 높이를 달리하여 결과들을 합치는 것과 달리 상하로 다른 투사 데이터의 경사각 (수평면으로부터 +60°, 0°, -60°)을 주어서 정확하고 광범위한 계산을 가능하게 한다는 장점을 제공한다. 하지만 MART의 경우 Fig. 2 (l) 과 (o)에서 확인할 수 있듯이, 하단부와 상단부의 재건에 있어 상하 경사각을 주지 않고 평면의 데이터의 개수를 증가시킨 경우가 상하 경사각을 준 경우와 거의 비슷한 오차를 나타내고 있다. 따라서 계산상으로는 투사 각도가 늘어날수록 결과가 좋아지기는 하지만 실제 공학 실험에서 많은 투사 각도를 만드는 것은 공간적으로 또는 경제적으로 어려움이 따를 수 있고 계산 시간도 많이 길어지므로 적은 수의 투사 데이터로 보다 정확한 결과들을 얻어내는 것이 토모그래피 연구의 목적이다.

평면각의 개수를 증가시켜 계산한 결과인 Fig. 3 (P=5)에서는 전체적으로는 동일한 광선의 개수를 적용시켰지만 각도의 개수는 증가되었으므로 P=3인 경우와는 다른 재건 결과를 보여주고 있다. 먼저, ART (Q=3, Z=6)에서 계산되어진 Fig. 3 (g), (h)와 (i)를 보면, 이번 연구 결과 전체에서 가장 큰 오차를 보이고 있다. 경사각도 주었고, 평면각도의 개수가 5개임에도 불구하고 재건 결과

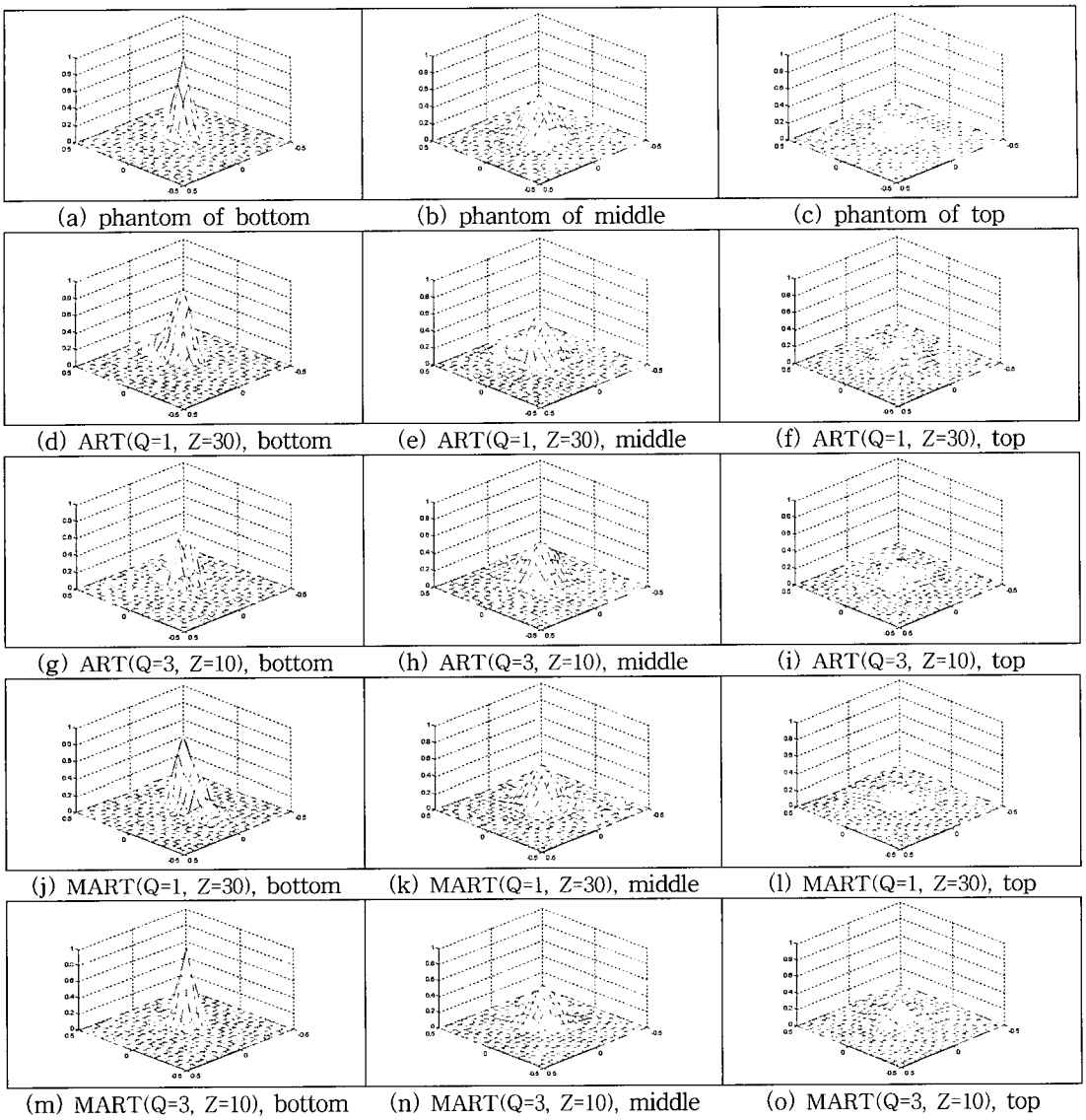



Fig. 2. Reconstructed fields of three-dimensional hydrogen diffusion using ART and MART under 3 projections (P=3, R=80)

가 좋지 않은 이유는 z방향 평면의 개수 (z=6)가 적었기 때문이다. 이는 투영 데이터를 결정하는 어느 한 인자라도 최소 기준에 미치지 못할 경우 예측하지 못한 결과가 나올 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 제한된 경우의 실험 조건 하에서는 적절한 변수의 수치 결정이 결과에 큰 영향을 미치게 된다.

## 4.2 반복에 따른 오차 검증

Table 1은 3차원 재건 결과에 대한 계산 결과를 제시한다. 재건 정확도의 다양한 측정법으로서 평균 오차는 컴퓨터 합성 영상장과 같이 이미 알고 있는 기준장과 토모그래피에 의해 재건된 장을 비교할 때 중요하다. 실제로 실험을 하는 경우에는 실제장이 알려져 있지 않기 때문에 가상 투

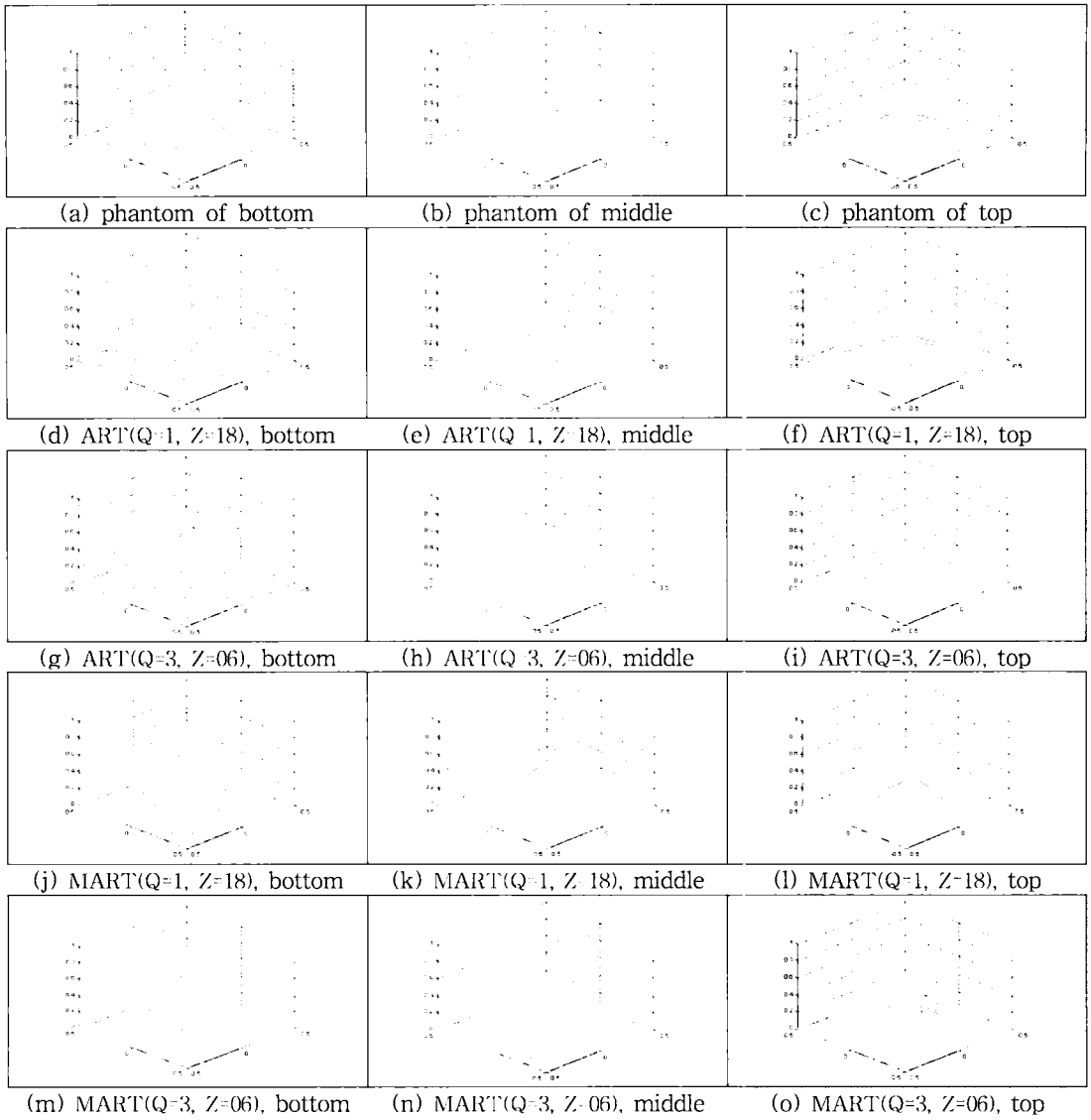



Fig. 3. Reconstructed fields of three-dimensional hydrogen diffusion using ART and MART under 5 projections (P=5, R=80)

사 데이터 $\hat{\psi}$와 측정된 투사 데이터 $\psi$의 비교를 통해서만 재건 정확도를 판단할 수 있다. Table 1에서도 확인할 수 있듯이 투사 각도를 달리하여도 (P=3, 5) ART는 어느 정도 오차를 갖고 있는 것에 비해, MART의 경우는 5% 이내의 오차를 나타내었다. 같은 개수의 광선으로 재건을 하였을 경우 같은 토모그래피 기법을 사용하였더라도 상하의 경사각이 3개 있는 경우가 높이를 바꾼 수평 평행광선이 3배 더 많은 경우보다 대부분의 경우에 더 작은 오차들을 보여준다. 또한, 상하의 경사각이 존재하는 경우(Q=3)가 최소 오차에 더욱 빨리 수렴하고, 더 작은 오차 값을 보여준다. 그러므로 3차원 수소 거동의 재건에서는 한 평면에서 더 많은 투사 각도를 주어야 결과가 좋아지는 것은

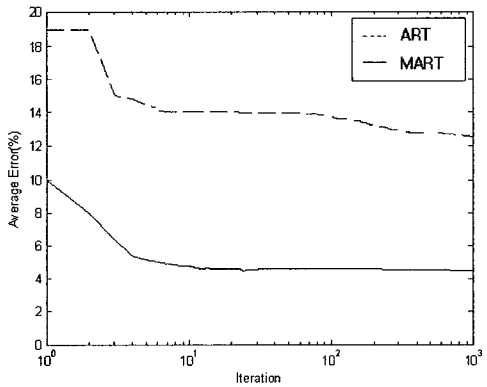
Table 1. Comparison of reconstruction errors between ART and MART for three-dimensional hydrogen density distributions.

| | Number of angled projections in one plane (P) Number of ray sums per each projection (R) | Number of zenith angles (Q) | Number of planes in z-direction(Z) | $\psi_{avg}(\%)$ | $\psi_{rms}(\%)$ | $\psi_{abs}(\%)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ART | P = 3, R = 80 | 1 | 30 | 12.85 | 24.32 | 10.98 |
| | | 3 | 10 | 11.47 | 28.54 | 10.47 |
| MART | | 1 | 30 | 4.21 | 2.63 | 4.11 |
| | | 3 | 10 | 1.29 | 0.87 | 1.65 |
| ART | P = 5, R = 80 | 1 | 18 | 13.79 | 20.29 | 15.79 |
| | | 3 | 6 | 18.74 | 29.61 | 8.42 |
| MART | | 1 | 18 | 2.51 | 0.12 | 0.94 |
| | | 3 | 6 | 0.87 | 1.96 | 2.33 |

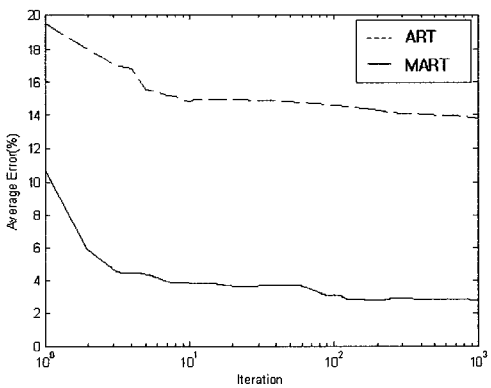
물론이고 수평으로부터 상하로 다른 경사각을 주는 경우가 더 좋은 결과들을 보여준다는 것을 알 수 있다.

토모그래피의 반복횟수가 최적 반복 단계를 넘어서면 영상은 점진적 오차의 누적으로 인해 오히려 결과가 나빠질 수가 있으므로 컴퓨터 합성 영상장과 재건된 장 사이의 차이가 최소에 도달할 때 계산이 중단되어져야 한다. 오차의 반복 계산을 통하여 MART가 ART보다 오차가 더 작으며 또한 더 빠르게 최소 오차에 도달하는 것을 볼 수 있다 (FIG. 4). 그리고 모든 경우의 광선의 수는 동일하므로 P=3, 5인 경우 비교해 보았을 때, ART는 각도수와 관계없이 오랜 시간에 걸쳐 최소 오차에 수렴하였고, MART에서는 P=5 일 때보다 안정적인 오차값과 수렴도를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 3차원 수소 확산과 같은 경우의 재건에서 MART가 ART보다 더 나은 정확도와 더 빠른 계산 시간을 보여주며, 다른 각도의 투영 데이터가 많을 경우 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

실제 대부분의 공학 실험에서는 적은 각도의 투영 데이터를 이용하여 재건을 하고 있으며, 수소와 공기로 이루어진 밀도장의 경우 각도의 개수를 증가시키며 상하로도 투사각을 주었을 경우 적은 오차 내에서 재건되어짐을 알 수 있다.




(a) P=3, Q=1, Z=30, R=80




(b) P=5, Q=1, Z=18, R=80

Fig. 4. Average error versus iteration of ART and MART reconstructions for three-dimensional hydrogen flows

## 5. 결 론

이번 연구에서는 밀폐된 공간에서 수소가 누설되었을 경우의 거동을 컴퓨터 합성 영상장으로 제작한 후 algebraic reconstruction technique (ART)과 multiplicative algebraic reconstruction technique (MART)을 이용한 3차원 디지털 스페클 토모그래피 기법을 개발하여 확산에 따른 수소의 밀도 분포를 비침투적으로 재건하였다. 3차원 컴퓨터 합성 영상장으로부터 ART와 MART를 이용하여 재건을 수행하고 그 정확도와 효율성을 분석하였다. 총 광선의 개수가 같은 경우임에도 불구하고, 적절한 투사 행렬의 결정 및 변수 값들의 조절이 계산되어진 결과값들의 오차에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. ART와의 비교에서 MART는 보다 정확한 결과들을 보여주었으며 또한 최소 오차에 도달하기 위한 반복 횟수에서도 더 빠른 수렴을 보여주었다. 그리고 3차원 재건에서는 평면에 대한 투사각뿐만 아니라 상하로도 투사각을 경사 있게 제공하는 경우에 보다 정확하고 빠른 수렴을 보여 주었다. 실제 실험에서 레이저로 상하의 투사각을 설치하기가 어려운 경우에는 같은 평면 투사각으로부터 높이에 따른 변화를 주고, 투영 데이터를 대칭시키는 등의 변환된 3차원 토모그래피를 이용한다면 허용할 수 있는 오차 범위 내의 결과들을 얻을 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2005년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (R08-2003-000-10030-0).

## 참 고 문 헌

1) D.Schmidt, U.Krause, U.Schmidtchen : "Numerical simulation of hydrogen gas releases between buildings", Int. J. Hydrogen Energy, Vol 24, 1999, pp. 479-488.

2) H. H. Barret and W. Swindell : "Analog Reconstruction Methods for Transaxial Tomography", Proc. IEEE, Vol. 65, No. 1, 1977, pp. 89-107.

3) R. M. Lewitt : "Reconstruction Algorithms: Transform Methods", Proc. IEEE, Vol. 71, No. 3, 1983, pp. 390-408.

4) R. Rangayyan, A. P. Dhawan, and R. Gordon : "Algorithms for Limited-View Computed Tomography: an Annotated Bibliography and a Challenge", Appl. Opt., Vol. 24, No.3, 1985, pp. 4000-4012

5) R. Gordon : "A Tutorial on ART", IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. NS-21, 1974, pp. 78-92

6) A. C. Kak and M. Slaney : "Principles of Computerized Tomographic Imaging", IEEE Press, New York, 1987, pp. 49-112

7) H. S. Ko, K. Okamoto, and H. Madarame, "Reconstruction of Transient Three-dimensional Density Distributions Using Digital Speckle Tomography", Meas. Sci. Tech., Vol. 12, No. 8, 2001, pp. 1219-1226.

8) J. R. Partington : "Physico-Chemical Optics", Vol. IV, An Advanced Treatise on Physical Chemistry, Longmans Green, London, 1953, pp. 27-31.

9) C. M. Vest : "Holographic Interferometry", John Wiley & Sons, New York, 1979, pp. 64-103.

10) H. S. Ko and K. D. Kihm : "An Extended Algebraic Reconstruction Technique (ART) for Density-Gradient Projections : Laser Speckle Photographic Tomography", Exper. Fluids, Vol. 27, No. 6, 1999, pp. 542-550.

11) D. Verhoeven, "Limited-data Computed Tomography Algorithms for the Physical Sciences", Appl. Opt., Vol. 32, No. 20, 1993, pp. 3736-3754.

12) N. A. Fomin, "Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements", Springer, Berlin, 1998, pp. 105-146.

13) K. M. Hanson and G. W. Wecksung, "Local Basis Function Approach to Computed Tomography", Appl. Opt., Vol. 24, No. 23, 1985, pp. 4028-4039.