

마이크로파 레플렉토메터리를 이용한 KSTAR 플라즈마 밀도분포 재구성에 관한 연구

論 文

54C-8-5

Study on the Reconstruction of KSTAR Plasma Density Profiles Using Microwave Reflectometry

盧永秀[†]
(Young-Su Roh)

Abstract - Microwave diagnostics have been widely utilized to measure the important parameters of high temperature and high density plasmas. Reflectometry is known as a promising microwave diagnostic which has a number of merits to measure electron density profiles. In the KSTAR device, X-mode FM reflectometry is planned to measure the plasma density profiles. FM reflectometry is required to extract phase information on raw mixer IF signals, thereby obtaining time-of-flight of reflectometry signals. It is known that the data analysis method is crucial to determine the performance of FM reflectometry. In fact, there are several analysis programs which have been utilized in various FM systems. Since each program was developed for a specific device, however, it is difficult to directly apply it to a different reactor like the KSTAR device. It is necessary, therefore, to develop a data analysis program for the KSTAR FM reflectometry. In this paper, complex digital demodulation (CDM) and wavelet transformation are examined in terms of the performance of density profile reconstruction. For the comparison of both methods, FM reflectometry signals are generated on the basis of assumed profiles and the interaction of the X-mode wave and the plasma. In order to see how well both methods work under various conditions, three types of profiles are assumed and noise effects are included. As a result, both methods work well under the condition of gentle density gradient and small noise level. As density gradient becomes steeper and noise level gets higher, the reconstruction performance of wavelet is better than that of CDM.

Key Words : Reflectometry, Plasma, Density Profile Measurement, CDM, Wavelet

1. 서 론

핵융합로인 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)[1] 장치는 현재 한국기초과학지원연구원에서 제작 중이며 이 장치에는 플라즈마의 물리현상을 규명하기 위하여 다수의 첨단 진단장치들이 포함되어 있다. 마이크로파를 이용한 진단법들은 플라즈마 밀도의 분포 및 요동 측정에 필수적인 것으로 알려져 있으며 KSTAR에서도 레플렉토메터리(reflectometry)는 플라즈마의 밀도분포를 측정하는데 이용될 계획이다. 마이크로파 레플렉토메터리에서는 플라즈마에 입사되는 넓은 주파수 범위의 마이크로파가 컷오프(cutoff) 층들에서 반사되어 되돌아 나올 때, 마이크로파의 위상 또는 시간지연을 측정함으로써 플라즈마의 밀도분포를 구할 수가 있다.[2] 레플렉토메터리는 측정되는 변수에 따라 위상측정법과 시간지연측정법으로 분류될 수 있는데 KSTAR에서는 위상측정법의 하나인 FM(Frequency Modulation) 레플렉토메터리가 채택되어 이미 장치의 공학적 설계는 이미 완료된 상태이다.[3] 시간지연측정법과 비교하면 FM 레플렉토메터리는 장치 면에서 비교적 간단하지만

신호의 분석방법은 복잡하므로 정확한 신호분석이 FM 레플렉토메터리의 성능을 결정하는데 중요한 역할을 한다.

FM 레플렉토메터리의 신호분석법에는 여러 가지가 존재하며 보통 특정의 레플렉토메터리는 장치의 환경에 적합한 분석법을 개발하여 사용되어왔다. 따라서 최적의 KSTAR 레플렉토메터리의 밀도분포 재구성 알고리즘을 개발하기 위해서는 KSTAR의 환경에 가장 알맞은 신호해석법을 선택하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 이미 많은 플라즈마 발생장치들에서 성능이 입증된 CDM(Complex Demodulation Method)[4]과 웨이브레트(Wavelet) 분석법[5]을 이용하여 밀도분포 재구성하고 양자의 성능을 비교함으로써 최적의 분석법을 결정한다. 신호분석법의 성능을 평가하기 위해서 예상되는 KSTAR 플라즈마의 특성과 밀도분포에 기초하여 레플렉토메터리의 신호를 모의하고 이 신호에 신호분석법들을 적용하여 밀도분포를 재구성하고 재구성된 밀도분포와 가정된 밀도분포를 비교한다. 그리고 실제 상황에서 존재할 수 있는 잡음신호를 첨가하여 이것이 밀도분포 재구성에 미치는 효과를 조사한다.

2. 본 문

2.1 진단용 레플렉토메터리 신호 모의

신호분석법을 적용하기 위해서는 플라즈마 장치로부터 취득된 레플렉토메터리의 원 신호가 필요하다. 그러나 이런 데

[†] 교신저자, 正會員 : 崇實大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

E-mail : yroh@ssu.ac.kr

接受日字 : 2005年 4月 19日

最終完了 : 2005年 7月 7日

이터를 구하는 것은 현실적으로 매우 어렵고 KSTAR의 경우 현재 장치가 제작 중이므로 신호분석법의 성능을 조사하기 위해서는 FM 레플렉토메트리 마이크로파 신호의 모의가 불가피하다. 그림 1은 이 신호를 모의하기 위하여 가정한 FM 레플렉토메트리 장치의 개략도이다. 마이크로파 발생장치에서 발생한 신호는 디렉셔널 커플러(Directional Coupler)에 의하여 진단파와 기준파로 분류된다. 진단파는 도파관과 혼(Horn)을 통해 플라즈마에 입사되고 기준파는 믹서의 LO 측에 전달된다. 플라즈마로부터 반사되는 반사파는 다른 혼과 도파관을 통해 믹서의 RF 측으로 전달되어 기준파와 결합되어 믹서(Mixer)의 IF 신호가 되는데 이 신호가 실제 실험에서 취득되는 원 신호이다.

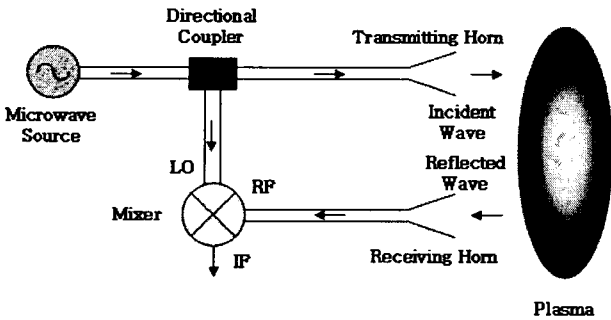


그림 1 FM 레플렉토메트리 장치의 개략도
Fig. 1 Schematic diagram of the FM reflectometry system

KSTAR 레플렉토메트리 시스템은 X 모드로 설계되어 있으므로 플라즈마에 입사되는 마이크로파의 주파수 범위는 라이트핸드 주파수(right-hand frequency)에 의하여 정해진다.

$$f_R = \frac{1}{2} (f_c + \sqrt{f_c^2 + 4f_p^2}) \quad (1)$$

여기서 전자의 사이클로트론 주파수(cyclotron frequency) f_c 와 플라즈마 주파수 f_p 는 식(2)와 같이 자속밀도 B_0 [T], 반경 r_0 [cm] 및 r [cm] 그리고 밀도 n [cm^{-3}]의 함수로 표현된다.

$$f_c \approx 28 \times 10^9 B_0 \frac{r_0}{r} \text{ [Hz]}, f_p \approx 9000 \sqrt{n} \text{ [Hz]} \quad (2)$$

초기 KSTAR 플라즈마의 경우 예상되는 $B_0 = 1.5$ [T], $r_0 = 180$ [cm], $r = 180 \sim 230$ [cm], $n_0 = 2 \times 10^{13}$ [cm^{-3}]을 적용하고 신호의 스위프 시간 (sweep time)은 20[μs]로 가정하면 마이크로파의 주파수 범위를 식(3)과 같이 정의할 수 있다.

$$f(t) = 33 \times (0.5 \times 10^5 t + 1) \text{ [GHz]} \quad (3)$$

기준파와 진단파의 위상차를 모의하기 위하여 두 파의 진행 경로차이(ΔL)를 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta L = 2 \times (L_1 + L_3 + L_4) - L_2 \quad (4)$$

L_1, L_2, L_3, L_4 는 각각 도파관의 길이, 커플러와 믹서 사이의

거리, 도파관의 혼 안테나와 플라즈마 사이의 거리, 그리고 진단파가 플라즈마 내에서 진행하는 경로를 나타낸다. 보통의 경우, L_4 를 제외하면 L_1, L_2, L_3 의 치수들은 정확히 알려져 있으므로 L_4 를 계산하면 ΔL 을 모의할 수 있다. 플라즈마는 진공과 달리 그 특성이 주파수에 따라 변하므로 L_4 를 계산하기 위해서 반드시 입사파의 분산관계(Dispersion Relation)를 고려하여야 한다. X 모드의 분산관계식을 이용하면 굴절률($n(r)$)의 제곱과 L_4 는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{c^2 k^2}{w^2} = \frac{c^2}{v_\phi^2} = 1 - \frac{w_p^2}{w^2} \frac{w^2 - w_h^2}{w^2 - w_h^2} \quad (5)$$

$$w_h^2 = w_p^2 + w_c^2 \quad (6)$$

$$L_4 = \int_{r_0}^r \mu(r') dr' \quad (7)$$

여기서 c 는 진공 중의 빛의 속도, v_ϕ 는 파의 위상속도이다. 진단파가 도달하는 지점은 컷오프 현상이 발생하는 밀도 층의 위치이고 이것은 밀도분포에 따라 다르다. 따라서 L_4 를 계산하기 위해서는 플라즈마의 밀도분포가 주어져야 하는데 여기서는 다음과 같이 밀도분포들의 기울기를 매우 다르게 가정함으로써 다양한 상황에서 발생하는 레플렉토메트리 신호를 모의할 수 있도록 하였다

$$\text{밀도분포 I: } n = n_0 \left(1 - \frac{r - r_0}{a}\right) \quad (8)$$

$$\text{밀도분포 II: } n = n_0 \sqrt{1 - \left(\frac{r - r_0}{a}\right)^2} \quad (9)$$

$$\text{밀도분포 III: } n = n_0 \left(1 - \left(\frac{r - r_0}{a}\right)^2\right)^{0.25} \quad (10)$$

여기서 KSTAR 장치의 장반경 $a = 50$ [cm]이다. 위에서 구한 L_4 를 식(4)에 대입하면 ΔL 을 쉽게 계산할 수 있다. 이 계산을 위하여 편의상 L_1, L_2, L_3 을 각각 200, 450, 30 [cm]로 가정하고 도파관의 분산효과를 무시한다. t 을 기준파가 믹서에 도달하는 시간, t' 을 진단파가 믹서에 도달하는 시간이라고 하면 $t' = t + \Delta L/c$ 이다. 따라서 IF 신호의 t 와 t' 사이에 위상변화 $\Delta\phi$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\phi = 2\pi \int_t^{t'} f(\tau) d\tau \quad (11)$$

$$= 66\pi \times 10^9 \times \frac{\Delta L}{c} \left(\frac{10^5}{4} \left(2t + \frac{\Delta L}{c} \right) + 1 \right)$$

IF 신호에 대한 잡음의 영향을 관찰하기 위하여 신호의 진폭은 $A(t) = 1 + \alpha \times G(n)$ 으로 가정하는데 α 와 $G(n)$ 은 각각 잡음계수와 평균=0, 표준편차=1의 신호를 무작위로 발생하는 함수이다. 이와 같은 잡음성분이 포함된 진폭과 식(11)의 위상변화를 이용하면 그림 2와 3과 같은 IF 신호를 모의할 수 있다.

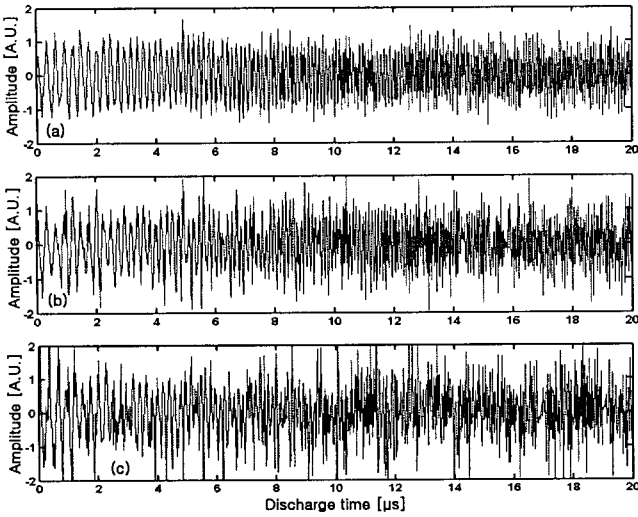


그림 2 밀도분포 I의 경우 믹서 IF 신호 (a) $\alpha = 0.25$ (b) $\alpha = 0.5$ (c) $\alpha = 0.75$

Fig. 2 Mixer IF signals for Density Profile I (a) $\alpha = 0.25$ (b) $\alpha = 0.5$ (c) $\alpha = 0.75$

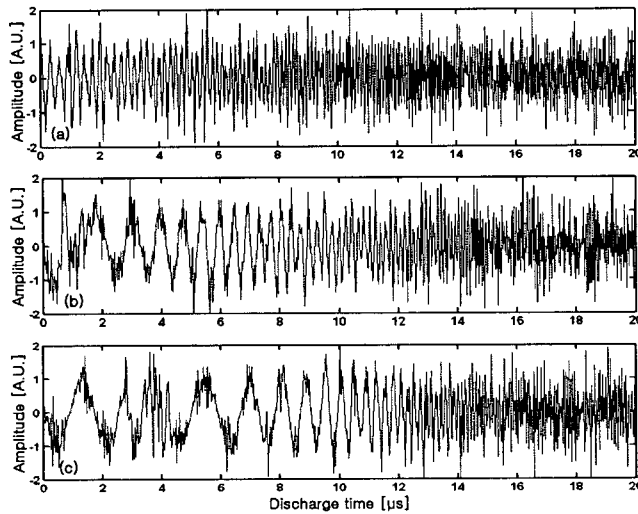


그림 3 잡음지수 $\alpha = 0.5$ 인 경우 믹서 IF 신호 (a) 밀도분포 I (b) 밀도분포 II (c) 밀도분포 III

Fig. 3 Mixer IF signals with $\alpha = 0.5$ (a) Density Profile I (b) Density Profile II (c) Density Profile III

2.2 IF 신호해석에 의한 밀도분포 재구성

밀도분포를 재구성하기 위해서는 믹서의 IF 신호를 분석하여 위상(혹은 주파수)의 정보를 추출하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 많은 신호 분석법들 중에서 레플렉토메터리 신호의 분석에서 이미 성능이 입증된 CDM과 웨이브레트 법을 이용하여 모의된 IF 신호 데이터를 분석한다. CDM과 웨이브레트 법을 이용하여 얻은 분석결과를 논의하기 전에 우선 레플렉토메터리의 측정원리에 대하여 간략히 살펴보고 CDM과 웨이브레트 법에 의한 분석과정을 논의한다.

레플렉토메터리의 측정원리에 대하여 간략히 설명하면 다

음과 같다. 믹서의 IF 신호의 주파수는 다음과 같이 기준파와 진단파의 위상 차이를 주파수에 대하여 미분함으로써 구할 수 있다.

$$f_B(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{1}{2\pi} \frac{\partial\phi}{\partial t} \right) \frac{df}{dt} \quad (12)$$

그리고 신호가 플라즈마 내에서 왕복 비행하는 시간 (지연 시간, $\tau(f)$)은

$$\tau(f) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial\phi}{\partial f} = \frac{f_B(t)}{df/dt} \quad (13)$$

그러므로 실험적으로 $f_B(t)$ 와 df/dt 를 측정하면 $\tau(f)$ 을 구할 수 있고 주파수의 함수인 지연시간으로부터 밀도분포를 재구성할 수 있다.

2.2.1 CDM

주어진 시간 $t_n = n\Delta t$ (Δt 는 샘플링 시간, n 은 정수)에 기록된 IF 신호($s(t_n)$)는 보통 다음과 같이 진폭($A(t_n)$)과 위상($\phi(t_n)$)(혹은 주파수($f(t_n)$))으로 표현될 수 있다.

$$s(t_n) = A(t_n) \cos(\phi(t_n)) = A(t_n) \cos(2\pi f(t_n)t_n) \quad (14)$$

복소수를 이용하여 표현하면,

$$s(t_n) = \frac{1}{2} A(t_n) [e^{j2\pi f(t_n)t_n} + e^{-j2\pi f(t_n)t_n}] \quad (15)$$

만약 주파수 영역에서 식(15)을 f_0 만큼 이동시킨 후 저대역 필터를 통과시키면 다음의 식을 얻는다.

$$q(t_n) = \frac{1}{2} A(t_n) \exp[j2\pi(f(t_n) - f_0)t_n] \quad (16)$$

$$\theta(t_n) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(q(t_n))}{\text{Re}(q(t_n))} \right), \quad A(t_n) = 2|q(t_n)| \quad (17)$$

$$\phi(t_n) = 2\pi f(t_n)t_n = 2\pi f_0(t_n)t_n + \theta(t_n) + 2n\pi \quad (18)$$

CDM에서는 실험적으로 측정되는 식(14)와 같은 신호를 식(15)-(18)의 과정을 수치적으로 계산함으로써 신호의 지연시간을 구하여 밀도분포를 재구성한다.

2.2.2 웨이브레트 분석법

웨이브레트 법은 IF 신호의 순간적인 주파수를 직접 구한다는 점에서 CDM과 다르다. 이 방법에 이용될 수 있는 웨이브레트 함수는 무수히 많은데 여기서는 단조 주파수 파에 의해 변조된 가우시안(Gaussian) 형태의 모레트(morlet) 함수를 사용하는데 이 함수는 수학적으로 식(19)로 표현된다.

$$\Psi_f(t_n) = \sqrt{f} \exp(i2\pi f t_n) \exp\left(-\frac{f^2 t_n^2}{2}\right) \quad (19)$$

웨이브레트 분석의 핵심 과정은 주어진 IF 신호를 식(19)와 같은 웨이브레트 함수로 콘볼브(convolve)하여 신호 주파수의 시간에 대한 의존도를 조사하는 것이다. 임의의 함수 $(g(t))$ 에 대한 이 과정은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$S(f, t) = \int g(\tau) \Psi_f(t-\tau) d\tau \quad (20)$$

식(20)을 이용하여 웨이브레트 스펙트럼 진폭 $(|S(f, t)|)$ 의 최대치를 계산함으로써 주어진 시간 (t) 에서 가장 우세한 신호의 주파수를 정할 수가 있고 결과적으로 이 주파수가 주어진 시간에서의 신호의 주파수가 된다.

2.2.3 밀도분포재구성

위에서 언급한 바와 같이 신호분석법에 의하여 IF 신호의 위상 (혹은 주파수) 정보를 구하고 식 (13)을 이용하여 지연 시간을 계산하면 밀도분포 재구성에 필요한 조건을 만족하는 것처럼 보인다. 여기서 주의할 점은 플라즈마의 밀도분포를 결정하는 것은 오로지 플라즈마 경로(L_4)에 의해 발생한 지연시간이라는 것이다. 그러나 앞에서 구한 지연시간에는 L_4 와 더불어 레플렉토메트리 장치와 관련된 L_1, L_2, L_3 에 의한 지연시간이 혼합되어 있기 때문에 플라즈마에 의한 절대적 지연시간을 구해야만 한다. 이것을 구하기 위하여 L_4 를 제거하고 계산한 지연시간을 식 (4)의 ΔL 에 의한 지연시간에서 뺀다. 일단 플라즈마에 의한 절대적 지연시간이 계산되면 X 모드의 분산관계식에 기초하여 밀도분포를 재구성할 수 있다. 식 (5)에서 볼 수 있듯이 X 모드의 분산관계식은 매우 복잡하여 밀도분포를 해석적으로 구할 수 없으므로 수치적으로 계산해야만 한다. 식(5)을 이용하며 X 모드의 군속도 (Group Velocity)를 계산하면

$$v_g = \frac{dw}{dk} = \frac{c\sqrt{\epsilon}}{1 + \frac{w_p^2 w_c^2}{(w^2 - w_h^2)^2}} \quad (21)$$

군속도가 구해지면 왕복 비행으로 인한 시간지연을 구하는 것은 쉽다. 즉,

$$\tau(w) = 2 \int_{x_0}^x \frac{dx}{v_g} = \frac{2}{c} \int_{x_0}^x \frac{1 + \frac{w_p^2 w_c^2}{(w^2 - w_h^2)^2}}{\sqrt{\epsilon}} dx \quad (22)$$

식 (22)을 수치 적분하여 계산하면 지연시간과 컷오프 층의 위치는 다음과 같이 표현된다. 식(23)으로부터 $x_n(w_n)$ 을 구하면 식(1)과 (2)을 이용하여 $x_n(w_n)$ 에 대응하는 밀도의 크기를 계산할 수 있다.

그림 4, 5, 6은 CDM과 웨이브레트를 이용하여 신호를 분석하고 식(23)을 이용하여 잡음지수를 변화시키면서 재구성한 밀도분포의 여러 가지 예를 나타낸다. 재구성의 성능을

$$x_n(w_n) = x_{n-1} + \frac{1}{4} v_g(w_n, x_{n-1}) \times \left(\tau(w) - \sum_{i=0}^{n-2} (x_{i+1} - x_i) \left(\frac{1}{v_g(w_n, x_i)} + \frac{1}{v_g(w_n, x_{i+1})} \right) \right) \quad (23)$$

조사하기 위하여 최초로 가정된 밀도분포도 함께 도시하였는데 여기서 좌측은 CDM, 우측은 웨이브레트에 의한 결과이고 점선은 가정된 밀도분포, 실선은 재구성된 밀도분포이다. 그림 4는 밀도의 기울기가 완만한 밀도분포 I에 대한 결과인데 잡음지수가 증가할수록 CDM의 밀도분포는 다소 왜곡된다. 여기서 한 가지 밝혀줄 점은 CDM을 적용할 때 신호의 잡음을 제거하기 위한 특별한 필터링 기법을 사용하지 않았다는 것이다. 실제 상황에서는 일반적으로 CDM의 밀도 재구성 성능을 향상시키기 위하여 수치적 필터링을 통해 원 신호에 있는 잡음을 제거한다. 이 점을 고려하면 두 방법에 의한 재구성 결과는 비슷하며 전반적으로 재구성 성능은 양호한 것으로 보인다.

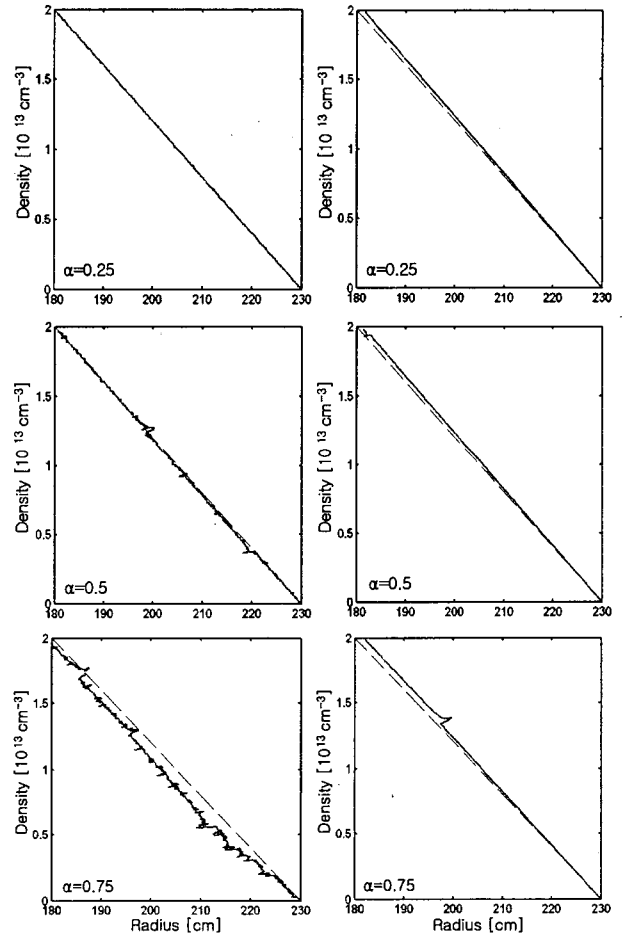


그림 4 밀도분포 I에 대한 CDM과 웨이브레트에 의해 재구성된 밀도분포.

Fig. 4 Reconstructed density profiles for Density Profile I using CDM and wavelet methods.

그림 5는 밀도분포 II에 대하여 재구성한 밀도분포이다. 그림 4와 비교하면 밀도분포의 기울기가 가장자리에서 크다

는 것을 볼 수 있는데 잡음지수가 커질수록 CDM에 의해 재구성된 밀도분포는 가정된 것과 다르다는 것을 알 수 있다. 이와 달리, 웨이브레트의 결과는 몇 지역을 제외하면 가정된 밀도와 거의 일치하므로 웨이브레트의 성능이 우수하다. 밀도의 크기가 보다 급히 변하는 그림 6 (밀도분포 III)의 경우, CDM과 웨이브레트의 성능 차이는 더욱 확연해진다라는 것을 알 수 있다. 결과적으로 잡음지수가 작은 경우에는 CDM과 웨이브레트 모두 가정된 밀도분포와 거의 일치하지만 그러나 잡음지수가 커질수록 웨이브레트가 CDM 보다 우수한 결과를 나타낸다고 말할 수 있다.

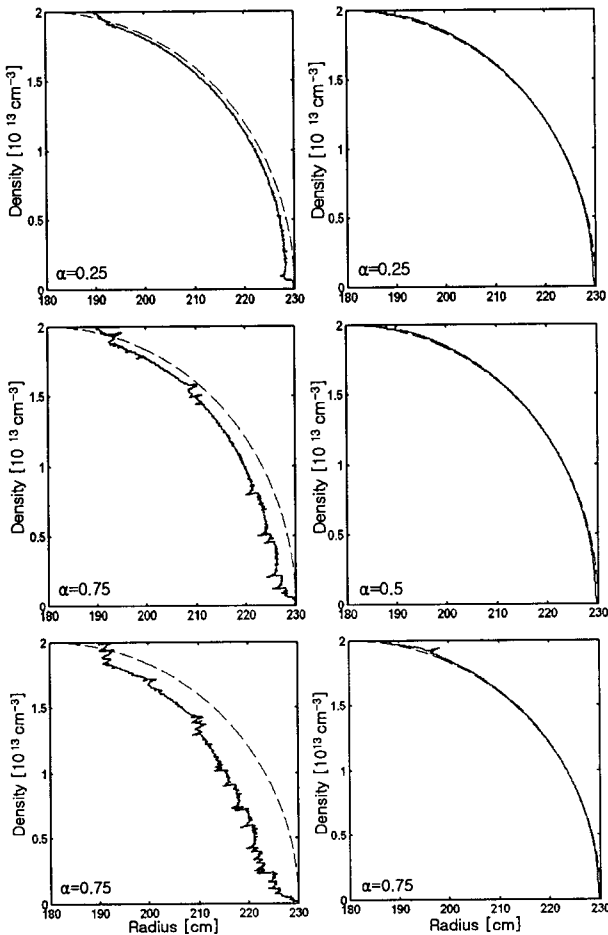


그림 5 밀도분포 II에 대한 CDM과 웨이브레트에 의해 재구성된 밀도분포.

Fig. 5 Reconstructed density profiles for Density Profile II using CDM and wavelet methods.

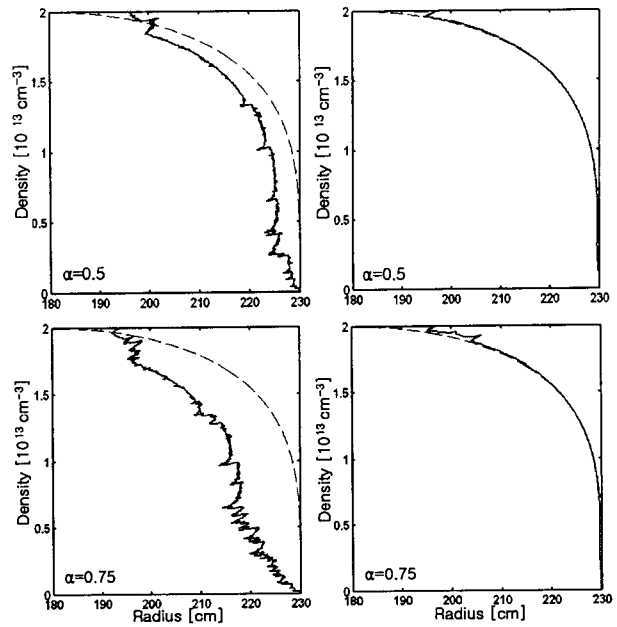
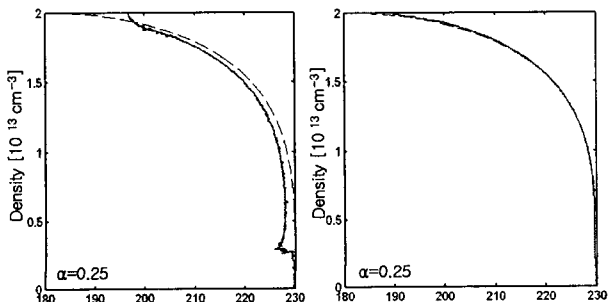


그림 6 밀도분포 III에 대한 CDM과 웨이브레트에 의해 재구성된 밀도분포.

Fig. 6 Reconstructed density profiles for Density Profile III using CDM and wavelet methods

3. 결 론

본 연구에서는 플라즈마로부터 반사된 레플렉토메터리의 신호를 분석하여 밀도분포를 재구성하는 과정에 대하여 논하였다. 레플렉토메터리의 신호를 모의하기 위하여 밀도분포를 가정하고 X 모드의 분산관계식을 이용하였다. 모의된 믹서의 IF 신호를 분석하여 위상의 정보를 취득하기 위하여 CDM과 웨이브레트 법을 이용하였다. 제시된 재구성된 밀도분포에서 보면 잡음지수가 작은 경우에는 CDM과 웨이브레트 모두 가정된 밀도분포와 거의 일치하는 결과를 보여준다. 그러나 잡음지수가 커질수록 웨이브레트가 CDM 보다 우수한 결과를 나타낸다. 따라서 CDM의 성능이 웨이브레트에 비하여 좋지 않은 것처럼 보인다. 이것은 CDM의 경우 신호로부터 도출된 위상을 미분함으로써 주파수 정보를 취득하지만 웨이브레트 법에서는 순간적인 주파수 정보를 직접 구할 수 있기 때문인 것으로 사료된다. 여기서 한 가지 언급할 점은 CDM은 통상적으로 IF의 원 신호를 분석하기 전에 신호처리법을 적용하여 가능한 신호를 분석에 알맞은 형태로 만든다는 것이다. 여기서는 이 과정이 생략되었기 때문에 위의 결과만으로 CDM의 재구성 성능을 논하기는 어렵다. 그러므로 향후 CDM에서 신호처리 과정을 수행한 후 가정된 모든 밀도분포에 대하여 CDM과 웨이브레트 분석법의 성능을 정성적으로 분석할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1] S.G.Lee, et al., "Overview of Korea Superconducting Tokamak Advanced Research diagnostics", Rev. Sci. Instrum. 70, 1397 (1999)
- [2] C. Laviron, et al., "Reflectometry Techniques for Density Profile Measurements on Fusion Plasmas", Plasma Phys. Control. Fusion, 38 905 (1996)
- [3] Y.Roh, et al., "Design of an X-mode swept frequency modulation reflectometer for the measurement of KSTAR density profile measurement", Rev. Sci. Instrum. 75, 3871 (2004)
- [4] K.W. Kim, et al., "Development of a Fast Solid-state High-resolution Density Profile Reflectometer System on the DIII-D Tokamak", Rev. Sci. Instrum., 68(1), 466 (1997)
- [5] L.G.Bruskin, et al., "Measurement of Plasma Density Using Wavelet Analysis of Microwave Reflectometer Signal", Rev. Sci. Instrum. 69 (2), 425 (1998)

저 자 소 개



노 영 수 (盧 永 秀)

1961년 4월 1일생. 1984년 서울대 전기 공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1988년~1996년 한국전기연구원, 연구원. 2001년 미국 캘리포니아주립대(Davis) 응용과학과 졸업(박사)현재 숭실대학교 전기공학과 조교수
Tel : 02-820-0663, Fax : 02-817-7961
E-mail : yroh@ssu.ac.kr