



백색 LED 증착용 MOCVD 장치에서 유도가열을 이용한 기판의 온도 균일도 향상에 관한 연구

홍광기^a, 양원균^a, 주정훈^{a*}, 이승호^b, 이태완^b

^a군산대학교 공과대학 신소재공학과, 플라즈마 소재응용센터, ^b주성 엔지니어링

Study of Temperature Uniformity Improvement of Inductive Heating in MOCVD Systems to Deposit White LED

Kwangki Hong^a, Wonkyun Yang^a, Junghoon Joo^{a*}, Seungho Lee^b, Tae-Wan Lee^b

^aDepartment of Materials Science and Engineering, Plasma Materials Research Center,
 Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

^bJUSUNG Engineering Co., Gyeonggi-do, Gwangju 464-892, Korea

(Received September 10, 2010 ; revised December 23, 2010 ; accepted December 30, 2010)

Abstract

Deposition temperature uniformity of GaN based MQW (multiple quantum well) layers is an important key which affects the wavelength uniformity of white LEDs. Temperature uniformity was assessed by infrared images for both cases of a static and a rotating susceptor. Rotating the susceptor at 2.5 rpm over the induction heater gave 4.3% of temperature non-uniformity. Temperature distribution of the graphite susceptor over the induction heater was numerically modelled and agreed with experimental results.

Keywords: Induction heating, Substrate temperature uniformity, Substrate rotating, CFD-ACE+, Numerical modeling

1. 서 론

고휘도 고효율 백색 LED(light emitting diode)가 차세대 조명광원으로 급부상하고 있다. 백색 LED를 생산하기 위한 공정에서 MOCVD(유기금속화학 증착) 장비를 이용한 에피공정은 에피층과 기판의 격자상수의 열팽창계수차이로 인하여 생성되는 에피결함의 제거를 위함이고, 기판과 GaN 박막층 사이에 완충작용을 해줄 수 있는 버퍼층(Buffer layer) 위에 InGaN/GaN MQW(Multi Quantum Well) 공정을 하여 고휘도 고효율 백색 LED를 구현할 수 있다. 이 공정에서 기판의 온도가 불균일해지면 wafer 좌장 균일도가 불균일해지므로 백색 LED의

yield가 낮아진다¹⁾. 또한 GaN 박막 증착 시 온도를 900~1,100°C로 변화시켜 성장시킨 결과에서 성장 온도에 따라 성장 과정이 크게 다르다는 결과도 보고되었다²⁾. Keller 등은 1000°C에서 1030°C로 3%만 온도를 상승시켜도 광학적인 면에서 아주 강한 영향을 받는다고 보고하였다³⁾. 그러나 균일한 온도 분포를 갖는 히터 설계는 어려운 점이 많이 있다. 반지름 방향으로 $\pm 1\sim 2^\circ\text{C}$ 의 온도 균일도를 갖는 장비들은 2개 이상의 히터 블럭을 사용하는 복잡한 구조로 설계되기도 하고^{4,5)}, 유도가열을 사용하는 장비에서는 코일과 흑연 서셉터 사이 간격을 개별적으로 조절할 수 있게 설계되기도 한다. 기판의 균일한 온도 분포는 양산용 백색 LED의 중요한 요소로 떠오르고 있고, 균일한 기판 온도를 갖기 위한 조건으로 기판과 induction heater의 간격, 가스

*Corresponding author. E-mail : jhjoo@kunsan.ac.kr

의 흐름, 기관의 회전, 유도가열코일의 디자인 등이 장비의 설계 요소이다. 이중 기관의 회전은 불균일한 기관 온도를 향상시키는데 중요한 요소이다. MOCVD의 온도 균일도를 향상시키기 위해 5 rpm 이상의 회전 속도를 주어야 한다고 보고되었다⁶⁾. 이때 생기는 진동 문제는 증착되는 박막의 결함을 일으킬 수 있기 때문에 낮은 회전속도 균일한 온도 분포를 갖는 장비의 설계가 필요하다. 또한 유도가열은 1831년 페러데이에 의해 전자기 유도현상이 발견된 이래, 산업전반에 걸쳐 아주 폭 넓게 사용되고 있다. 유도가열은 유도코일에 흐르는 고주파의 교류 전류에 의해 자속이 생기고, 지속적으로 방향과 크기가 변화하게 된다. 그러면 각 코일에는 피가열체 내부로 쇄교하는 자속의 시간당 변화율에 해당하는 만큼의 기전력이 발생하고 이로 인하여 폐회로인 코일에 전류(와전류)가 생성되어, 전류가 흐르는 저항체에 저항열이 발생하는 원리이다. 유도가열은 외부 열원이 없어도 되고, 적은 열손실로 기존의 가열방법에 비해 효율이 높고, 신속한 응답성을 가지고 있으며, 출력 온도제어의 용이성 및 배출 가스등의 오염이 없다는 장점이 있기 때문에, MOCVD 장치에서 고온의 균일한 온도를 얻는데 적합한 가열원이다. 여러 장점에도 불구하고 여러 가지 설계의 어려움이 있다. 그 이유는 전자기와 열 현상이 결합되어 있기 때문에 이를 해석하기에는 많은 어려움이 따르기 때문이다. 현재는 실험에 의한 시행착오(trial and error) 과정을 거치며 경험에 의존하고 많은 설계비용과 시간을 요구하여 체계적이고 경제적이 못하다^{7,8)}. 따라서 컴퓨터 수치해석의 기법은 유도 가열 기기의 해석과 설계는 시간과 설계비용의 절감을 가져다 줄 것으로 예상된다.

본 논문에서는 유도가열히터와 이용하여 제작된 소형 유도가열 장치에서 서셉터로 사용되는 흑연 서셉터의 회전에 의한 온도 균일도 향상에 대하여 고찰하였고, 상용화 전산 유체 역학 코드인 CFD-ACE+의 모델링 결과와 비교 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 유도 가열 히터를 이용한 기관 회전에 의한 온도 변화 측정

본 실험에서 흑연 서셉터의 가열원은 유도가열히터(Viewtong, VT-180C2)를 사용하여 진행되었다. 실험에서 사용된 유도가열히터의 코일 형상은 그림 1(a)의 사진에 나타내었다. 유도가열 히터의 구리코일의 직경은 2.1 mm이고 30턴으로 되어 있다. 유도

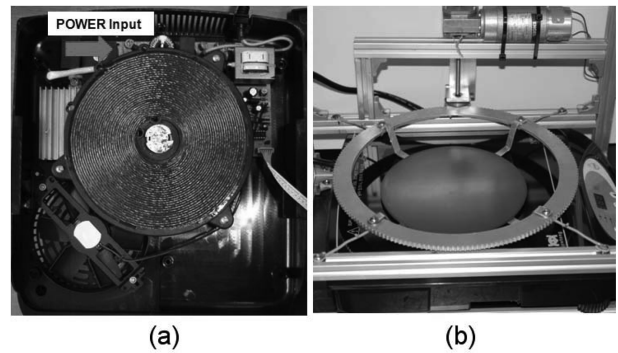


Fig. 1. (a) Image of induction heater coil, (b) substrate rotating equipment.

가열 코일의 저손실을 위해 큰 선경의 wire 대신 작은 선경의 wire를 여러 가닥 twist하는 Litz wire를 사용하였다⁹⁾. 작동 전력은 1.8 kW이고 주파수 25 kHz이다. 유도가열히터의 냉각방식은 fan을 이용한 공랭식이며 흑연 서셉터 회전을 위하여 사용된 모터는 ENGEL사의 GNM2636을 사용하여 그림 1(b)와 같은 소형 유도가열 장치를 제작하였고, MOCVD를 이용한 증착 공정 시 대류 현상에 의한 온도 분포를 고려하기 위하여 금속판(SUS 316, 0.1 t)을 사용하여 가로 25 cm, 세로 30 cm, 높이 2 cm 형태의 사각 챔버벽을 제작하였다. 흑연 서셉터는 표면이 SIC로 코팅된 직경 170 mm, 두께 3 mm 흑연 서셉터를 사용하였다. 가열된 흑연 서셉터 표면의 온도를 2차원적으로 평가하기 위하여 사용된 적외선 열화상 카메라(Fluke, TI-10)는 -20~250°C의 측정 범위를 가지며 7.5~14 μm의 적외선 스펙트럼 대역을 측정할 수 있다¹⁰⁾. 측정된 적외선 이미지를 SMART VIEW 2.1 프로그램을 이용하여 평균 온도 및 표준 편차를 계산 했다. 측정은 대기압에서 했고, 온도는 상온에서 부터 가열하여 측정했다. 유도가열 히터와 흑연 서셉터 사이의 간격은 3 mm에서 회전에 의한 흑연 서셉터의 온도 균일도를 평가했다. 온도는 회전 속도 0 rpm, 2.5 rpm, 5 rpm, 7.5 rpm, 10 rpm, 12.5 rpm에서 측정되었고, 흑연 서셉터의 맴돌이 전류를 발생시키는 자기장은 가우스미터를 이용하여 흑연 서셉터 중심으로부터 10 mm 간격으로 측정되었다.

2.2 유도 가열 수치 해석

본 연구에서 사용된 수치해석 프로그램은 ESI SOFT사에서 나온 상용 전산 유체 역학 프로그램인 CFD-ACE+2008V이다. 그림 2는 본 연구에서 사용된 유도 가열에 대한 수치해석을 위한 3차원 모델의 개략도이다. 치수는 본 연구에 사용된 유도가열 장치와 같게 했으며, 흑연 서셉터의 크기도 실험에

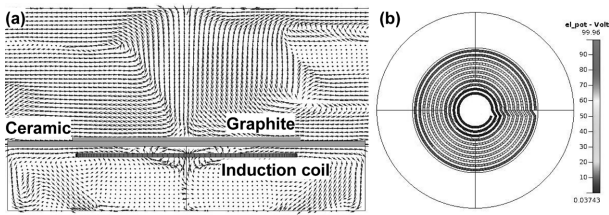


Fig. 2. (a) The profile of 3D model with magnetic vector potential by induction coils, (b) the electrical potential of induction coils by 100 V and 25 kHz.

사용된 반지름 88 mm로 모델링 했다. 그림 2(a)는 유도 가열 코일 위에 세라믹 판이 있고, 그 위에 바로 흑연 서셉터가 놓여 있는 것을 나타내며, 유도 가열 코일에 의한 자기장 벡터를 화살 표시로 나타내었다. 또한, 그림 2(b)에서는 11 turn의 유도 가열 코일에 걸린 electrical potential을 나타내며, 본 모델에서 직류 전류 전도식에 의해 실제 전력 인가 쪽에 100 V를 25 kHz로 인가했다. 압력은 상압인 1 atm으로 했으며 공기의 viscosity는 온도의 함수인 sutherland law를 사용했고 가열에 의한 유동계산은 중력에 의한 대류만 고려했다. 온도 계산시 경계 조건은 영향을 받지 않는 곳까지 공간영역을 선택하여 isothermal 300 K로 설정하였다. 온도 계산시 radiation도 함께 고려되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유도 가열 히터를 이용한 기판 회전에 의한 온도 균일도 측정 결과

그림 3은 열화상 카메라를 이용하여 유도 가열 히터와 흑연 서셉터의 간격이 3 mm일 때 회전에 의한 온도 분포 측정 결과를 보여준다. 전력이 들어

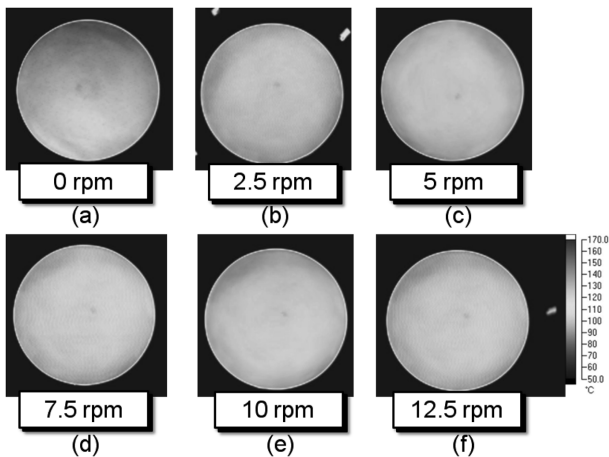


Fig. 3. 2D- IR image about graphite surface temperature used thermal imaging camera of the graphite susceptor by rotating speeds.

오는 쪽의 디자인은 비대칭적으로 위치하고 있어서 흑연 서셉터 위쪽은 170°C의 높은 온도 분포를 보이고 반대쪽의 온도는 125°C로 45°C 온도 차이가 발생되었다. 유도 가열 히터 설계 시 전력입력단의 위치 또한 고려해야 할 사항이란 것을 의미한다. 그림 4는 회전속도가 0 rpm, 2.5 rpm, 5 rpm, 7.5 rpm, 10 rpm, 12.5 rpm일 때 흑연 서셉터의 온도 불균일도를 측정한 결과이다. 각각의 불균일도는 10.5%, 4.3%, 4.4%, 4.6%, 4.5%, 4.5%이었고, 이때의 전체적인 흑연 서셉터의 온도 평균은 $133 \pm 2^\circ\text{C}$ 이었다. 기판의 회전 효과는 반응이 일어나는 기판 표면에서 반경방향으로 빠른 유동을 발생시켜 반응 표면에서의 압력을 감소시킨다고 보고 되었다¹¹⁾. 대기압의 영역에서는 기체의 양이 $10^{19} \#/\text{cm}^3$ 정도로 많기 때문에 기체의 충돌에 의한 열전달이 기체의 밀도를 감소시키고, 기체의 유동을 만

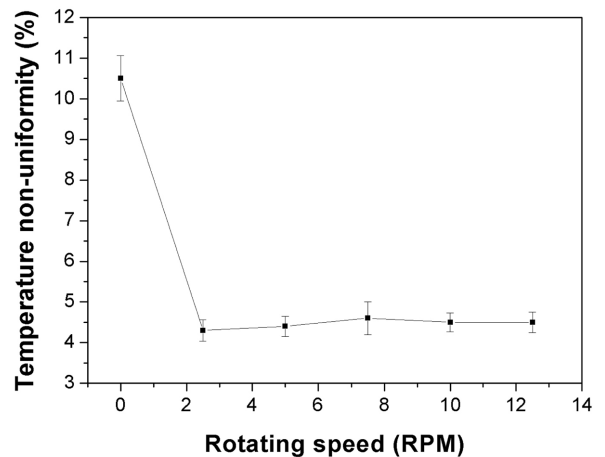


Fig. 4. Temperature non-uniformity of the graphite susceptor by rotating speeds.

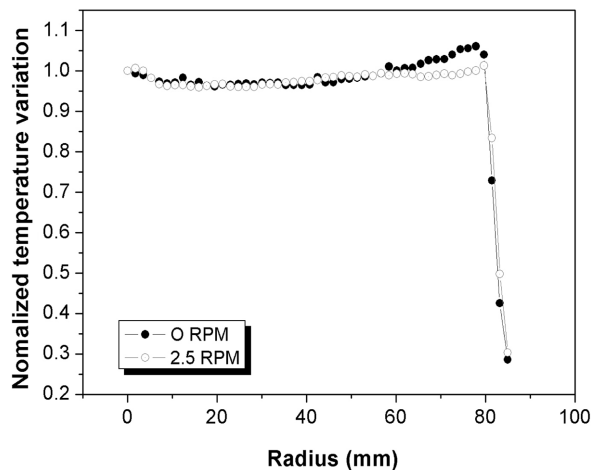


Fig. 5. Normalized temperature variation vs substrate radius in 0 rpm and 2.5 rpm of the substrate rotation.

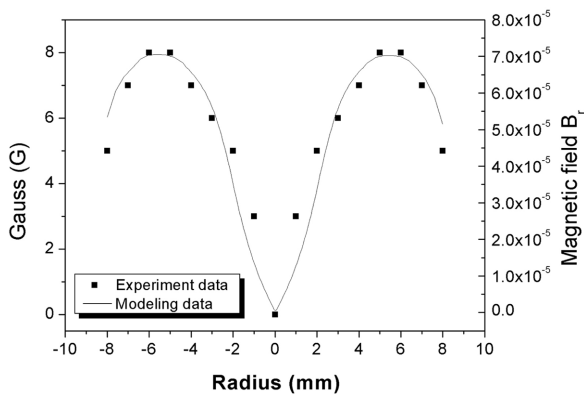


Fig. 6. Measured result vs. modeling result of magnetic field (B_r) on graphite susceptor surface.

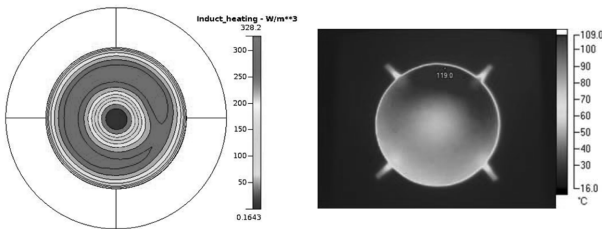


Fig. 7. (a) Power density distributions of 3D model with induction heating by CFD-ACE+, (b) experiment result measured by thermal image camera as a static.

든다. 그리고 그 효과가 흑연 서셉터 표면에서 대류 현상을 발생시킨다. 그림 5는 회전을 시작하면서 흑연 서셉터 모서리 부분의 온도저하현상이 생기게 되어 회전하지 않을 때 보다 균일해지는 온도 분포를 보여준다. 2.5 rpm의 기관 회전 속도에서 이미 균일도가 향상되었기 때문에 그 이상의 회전 속도는 의미 없게 됨을 알 수 있었다. 그림 6은 흑연 서셉터 반경방향으로 자기장을 측정할 결과와 모델링 결과가 흑연 서셉터 중심에서 55 mm 떨어진 곳에 가장 높게 분포하는 결과를 보여준다. 유도 코일에 쇄교하는 전체 자속의 시간변화율에 해당하는 만큼의 기전력이 발생하고 이로 인하여 폐회로인 코일에 와전류가 생성되어, 전류가 흐르는 흑연 서셉터에 저항열이 되는데⁷⁾, 흑연 서셉터 중심에서 55 mm 떨어진 곳에서 가장 자기장이 높게 분포하므로 이 부분에서 가장 열이 크게 발생하는 위치임을 알 수 있었고, 그림 7(a)의 온도분포를 나타내는 수치해석 결과와 그림 7(b)의 온도분포를 나타내는 실험결과에서도 2차원적 온도분포는 도넛 모양으로 가열됨을 알 수 있었다.

3.2 유도 가열 수치 해석 결과

본 회전 실험에 대한 내용을 모델링하기 위해서

는 전체 domain이 아닌 기관 domain만 회전 시켜야 한다. 그러나 본 연구 사용된 CFD-ACE+는 유동과 열 모듈에서만 회전이 가능하기 때문에 실험 결과와의 비교는 흑연 서셉터가 정지 상태 일 때의 결과만 비교할 수 있었다. 실험에서는 중심으로부터 55 mm 떨어진 곳의 온도가 가장 높게 측정되었고, 계산된 결과의 같은 위치에서 온도와 전력 밀도가 가장 높았으며, 측정된 온도 분포와 8% 차이로 상당히 일치했다. 전력밀도의 분포는 eddy current의 분포와 9%의 차이를 보였다. Eddy current는 흑연 서셉터의 저항열을 발생시키는 요소인데, 이 eddy current를 생성하는 것은 유도 가열 코일의 유도 전기장으로부터 발생된 magnetic field이다. 측정된 Magnetic field B_r 성분과 magnetic field B_z 성분은 모델링과 각각 15%, 20%의 차이를 나타낸다. eddy current의 분포는 B_r 경향을 따라가기 때문에 실제로 측정된 Magnetic field B_r 값으로 유도 가열 히터를 이용한 흑연 서셉터의 온도 분포를 예측할 수 있었다. 흑연 서셉터 중심으로부터 55 mm 떨어진 곳의 온도는 가장 높고 흑연 서셉터 중심은 낮은 온도 분포이기 때문에 기체 밀도차이에 의한 대류 현상이 생기게 된다. 대류현상에 의해 흑연 서셉터 모서리 부분으로부터 중심으로 기체의 유동이 생기게 됨을 알 수 있었다. 그림 7(a)는 흑연 서셉터 정지 상태에서의 전력 밀도 계산 결과를 나타낸다. 흑연 서셉터 내부에 흡수되는 전력 밀도 분포는 흑연 서셉터 중심으로부터 55 mm되는 곳에서 300 W/m^3 로 가장 높은 전력 밀도를 나타냈고, 그림 7(b)는 실험으로 측정된 온도 분포를 보여준다. 흑연 서셉터의 균일한 온도 분포를 갖기 위해서는 magnetic field B_r 이 균일하게 분포되어야 한다. 이에 따른 방법으로 유도 가열 코일과 흑연 서셉터의 거리를 개별적으로 조절하는 방법이나 병렬 코일을 사용하여 코일에 흐르는 전류를 배분하는 방법을 사용하기도 한다. 본 연구에 사용된 코드에서는 회전에 의한 효과를 볼 수 없기 때문에 정지 상태에서 계산한 기관의 온도 분포를 반지름에 따라서 적분하여 평균을 구했다. 이것으로 회전 시에 얻을 수 있는 온도 균일도를 유속 변화를 배제한 상태에서 예측해 볼 수 있었다. 그렇기 때문에 회전 수에 따른 변화는 이 결과로 알 수가 없다. 하지만, 비대칭적인 유도 코일의 전력 입력단과 출력단에 의한 온도 불균일도가 각도에 따라 9.9%에서 11.0%까지 변화하지만 적분을 통한 평균값을 통해 약간의 회전을 효과로 주어 전체적으로 10.1% 정도의 균일도를 보였다. 실험 결과에서 2.5 rpm으로 회전시키면 4.3%까지 온도 균일도가 향상되는데, 이것으로 미루어 회전

에 의한 기관 표면에서의 유속 상승이 상당히 많은 역할을 하고 있다고 생각할 수 있다.

4. 결 론

유도가열원을 사용하여 기관의 회전에 따른 온도 균일도를 살펴보았다. 증착되는 박막의 결함을 줄이기 위해 기관은 적은 진동을 갖는 저속 회전이 필요하다. 본 연구에서는 2.5 rpm으로 회전할 때 평균온도 133°C에서 4.3%의 균일도 향상을 확인하였다. 그리고 2.5 rpm 이상 회전 속도는 온도 균일도의 변화에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 수치 모델에서는 정지 상태에서의 온도 불균일도는 전력밀도, eddy current, magnetic field B_r 에 영향을 받음을 확인하였다. 전력 밀도는 흑연 서셉터의 온도 분포와 8%의 차이를 보였고, eddy current와 9%의 차이를 나타냄으로써 상당히 일치했다. eddy current를 발생시키는 magnetic field B_r 의 균일도의 향상이 흑연 서셉터의 온도 균일도를 향상시킬 수 있다. 회전 효과는 불균일한 자기장 분포에 의해서 생성되는 흑연 서셉터의 온도 불균일도를 해결해 주고, 가스의 유동을 발생시켜 흑연 서셉터의 온도 균일도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술 평가관리원의 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음

(10034355, 고품위 백색 LED 양산용 고생산성 MOCVD 장비 개발).

참고문헌

1. K. Chang, M. S. Kwon, S. I. Cho, J. Korean Vac. Soc., 12(4) (2005) 222.
2. H. Y. Shin, S. H. Jung, J. B. Yoo, S. J. Suh, C. W. Yang, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 36(2) (2003) 135.
3. B. P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, W.-N. Jiang, Y.-F. Wu, H. Masui, X. Wu, B. Heying, J. S. Speck, U. K. Mishra, S. P. Denbaars, J. Electron. Mat., 24(11) (1995) 1707.
4. E. Woelk, H. Beneking, J. Crystal Growth, 93 (1988) 216.
5. B. P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, W.-N. Jiang, Y.-F. Wu, H. Masui, X. Wu, B. Heying, J. S. Speck, U. K. Mishra, S. P. Denbaars, J. Electron. Mat., 24(11) (1995) 1707.
6. 경원테크 user conference (2009) 202.
7. I. G. Kwak, J. K. Byun, K. Choi, S. Y. Hahn, Trans. KIEE, 49B(5) (2000) 327.
8. Y. S. Yang, K. Y. Bae, H. Y. Shin, J. of KWJS, 26(4) (2008) 367.
9. 유승희, 박병욱, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 (2002) 1037.
10. W. K. Yang, J. H. Joo, Y. W. Kim, B. J. Lee, J. Korean Vac. Soc., 19(1) (2010) 46.
11. 백재상, 부진호, 한전건, 김윤제, 춘계학술대회 논문집 (2007) 76.