



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

붕화금속 나노분말이 함유된
연성 방사선 차폐재료 개발

濟州大學校 大學院

에너지공학과

吳 貞 奂

2017 年 2 月

붕화금속 나노분말이 함유된 연성 방사선 차폐재료 개발


指導教授 崔 秀 錫

吳 貞 奐

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2016 年 12 月

洪仁哲의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 朴 在 雨 

委 員 崔 秀 錫 

委 員 李 演 鍵 

濟州大學校 大學院

2016 年 12 月

Development of Soft Radiation Shielding Material Including Metal Boride Nanoparticles

Jeong-Hwan Oh
(Supervised by Professor Sooseok Choi)


A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master
of Engineering

December 2016

This thesis has been examined and approved.



.....
Thesis director, Sooseok Choi, Prof. of Nuclear and Energy Engineering



.....
Jae-Woo Park, Prof. of Nuclear and Energy Engineering



.....
Yeon-Gun Lee, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

Date Dec. 2016.

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
SUMMARY	V
I. 서론	1
II. 나노분말 합성을 위한 RF 열플라즈마 전산해석	4
1. 전산해석 방법	4
1) RF 열플라즈마 모델링을 위한 가정 및 지배방정식	4
2) RF 열플라즈마 전산해석 조건	9
2. RF 열플라즈마 전산해석 결과	10
1) 설계변수에 따른 RF 열플라즈마 전산해석 결과	10
2) 운전조건에 따른 RF 열플라즈마 전산해석 결과	17
III. 나노분말 합성 실험	25
1. 붕화금속 나노분말 합성 방법	25
2. 붕화금속 나노분말 합성 결과	29
IV. 연성재료의 방사선 차폐 실험	34
1. 연성재료의 방사선 차폐실험 방법	34
1) Cs-137에 대한 감마선 차폐 실험	34
2) Co-60에 대한 감마선 차폐 실험	36
2. Cs-137에 대한 연성재료 감마선 차폐 실험 결과	37
3. Co-60에 대한 연성재료 감마선 차폐 실험 결과	42
V. 결론	44

참고문헌	46
감사의 글	50

LIST OF TABLES

Table 2.2.1 Design condition for the numerical simulation of RF thermal plasma	10
Table 2.2.2 Operating condition for the numerical simulation of RF thermal plasma	17
Table 3.1.1 Operating condition for synthesizing metal boride nanoparticles	25
Table 4.2.1 Attenuation coefficients of soft materials including nano and micro powders for Cs-137 γ -ray	41
Table 4.3.1 Attenuation coefficients of metals and soft materials including micro powders for Co-60 γ -ray	43

LIST OF FIGURES

Figure 1.1.1 Available materials for radioactive waste storage containers	3
Figure 2.1.1 Basic structure of RF thermal plasma generator	5
Figure 2.1.2 Computational domain and variables for the numerical simulation of RF thermal plasma	9
Figure 2.2.1 Temperature distribution of RF thermal plasma: (a) temperature distribution with the coil turn number and (b) temperature distribution with the torch radius	12
Figure 2.2.2 Velocity distribution of RF thermal plasma: (a) velocity distribution with the coil turn number and (b) velocity distribution with the torch radius	13
Figure 2.2.3 Temperature profile of RF thermal plasma with the coil turn number: (a) temperature profile at the torch center and (b) temperature profile at the torch exit	14
Figure 2.2.4 Temperature profile of RF thermal plasma with radius length: (a) temperature profile at the torch center and (b) temperature profile at the torch exit	15
Figure 2.2.5 Velocity profile of RF thermal plasma at the torch exit: (a) velocity profile with the coil turn number and (b) velocity profile with the torch radius	16
Figure 2.2.6 Temperature distribution of RF thermal plasma: (a) temperature distribution with the injector length and (b) temperature distribution with the sheath gas	20
Figure 2.2.7 Velocity distribution of RF thermal plasma: (a) velocity distribution with the injector length and (b) velocity distribution with the sheath gas flow rate	21
Figure 2.2.8 Temperature profile of RF thermal plasma with the injector length: (a) temperature profile at the torch center and (b) temperature profile at	

the torch exit	22
Figure 2.2.9 Temperature profile of RF thermal plasma with the sheath gas flow rate: (a) temperature profile at the torch center and (b) temperature profile at the torch exit	23
Figure 2.2.10 Velocity profile of RF thermal plasma at the torch exit : (a) velocity profile with the injector length and (b) velocity profile with the sheath gas flow rate	24
Figure 3.1.1 Schematic diagram for the sunthesis of metal boride nanoparticles	26
Figure 3.1.2 FE-SEM images of raw materials for the synthesis of metal boride nanoparticles: (a) boron powder, (b) nickel powder, (c) titanium powder and (d) tungsten powder	28
Figure 3.2.1 Synthesized nickel boride nanoparticles using RF thermal plasma: (a) FE-SEM image and (b) XRD graph	30
Figure 3.2.2 Synthesized titanium boride nanoparticles using RF thermal plasma: (a) FE-SEM image and (b) XRD graph	31
Figure 3.2.3 Synthesized tungsten boride and boron nanoparticles using RF thermal plasma: (a) FE-SEM image and (b) XRD graph	32
Figure 3.2.4 Size distribution of titanium boride nanoparticles	33
Figure 4.1.1 Measurement device of Cs-137 γ -ray (0.662 MeV) shielding for the soft material	35
Figure 4.1.2 Measurement device of Co-60 γ -ray (1.17 and 1.33 MeV) shielding for the soft material	36
Figure 4.2.1 Transmission rate for soft material including metal powders in micro size	39
Figure 4.2.2 Transmission rate of Cs-137 for soft materials including micro powders	39
Figure 4.2.3 Transmission rate of Cs-137 for soft materials including nano and micro powders	40
Figure 4.2.4 Attenuation coefficients of soft materials including nano and micro	

powders for 0.662 MeV γ -ray from Cs-137	41
Figure 4.3.1 Attenuation coefficients of soft materials including metals and soft materials including micro powders for 1.173 and 1.322 MeV γ -ray from Co-60	43

SUMMARY

This research was conducted to develop a soft material including metal boride nanoparticles for radiation shielding. The optimum conditions for the synthesis of nanoparticles were analyzed by numerical simulation of RF thermal plasma for synthesizing metal nanoparticles. The metal boride nanoparticles were produced by using an RF thermal plasma system. In addition experiment was conducted on the radiation shielding characteristic of soft materials which are hydrogels including nano and micro powders.

In case of the 5 coil turn for the RF plasma torch, the high temperature area over 9,000 K was distributed widely along the torch center and the high temperature area became smaller with increasing the torch radius. In the case of 20 mm for the torch radius, the high temperature area over 9,000 K was distributed widely from an injector to the torch exit. Meanwhile, the velocity of the plasma is higher than other design conditions resulting a relatively short residence time of raw material. The plasma velocity had decreased by increasing the number of coil turn. In plasma numerical simulation results about operation conditions, the high temperature area was shifted from torch center to the torch wall with increasing the injector length. Therefore, it is considered that the increasing of injector length is a bad condition for nanoparticle synthesis. In the case of 30 mm for the injector length, temperature at the torch center is about 6,000 K. On the other hand, it was found that the center temperature was 9,000 K when the injector length is from 10 to 20 mm. The length of injector which is located at the axis of the plasma generation area affects the distribution of plasma temperature while it has small effect on plasma velocity distribution. The high temperature area of 10,000 K is moved to the torch center region with increasing the sheath gas flow rate. At 70 L/min for sheath gas flow rate, the highest temperature area was found. Also, the plasma velocity is naturally increased with increasing the total flow rate.

Raw powders used for synthesizing the metal boride nanoparticles are boron, nickel, titanium, and tungsten. In the case of titanium boride, boron and titanium were mixed at the ratio of 1:5. The RF thermal plasma was operated at 40 kW for plate power, 500 torr for chamber pressure, 10 L/min for powder feeding flow, 60 L/min for central gas flow, 80 L/min for sheath gas flow, 180 L/min for quenching gas. The size of synthesized titanium boride nanoparticles distributed in 20~110 nm with 42 nm for D50 which is a representative value of the particle size.

In order to measure the gamma ray shielding accurately for the soft material, one side of the lead shield was closely adhered to the source and the other side was closely adhered to the sample material. The gamma ray sources were Cs-137(0.662 MeV) and Co-60(1.17 and 1.33 MeV). As the thickness increased by 5 mm for each sample, the transmittance was decreased by 6 ~ 18%. The lowest transmittance of the hydrogel including lead oxide micro powder was 37.97%. The hydrogel including lead oxide micro powder had the highest attenuation coefficient of 0.296 cm^{-1} . Attenuation coefficients of pure hydrogel and hydrogel including iron oxide and tungsten oxide micro powders were measured at 0.216, 0.246 and 0.251 cm^{-1} , respectively for Cs-137 source. In γ -ray shielding experiment with Co-60, the highest attenuation coefficient was 0.181 cm^{-1} with the hydrogel including lead oxide micro powder.

1. 서론

인공 방사성 폐기물은 방사성 핵종을 이용하는 의료, 비파괴검사, 원자력발전 같은 산업 활동 및 각종 연구 활동으로 발생하게 된다. 방사성 폐기물에서 나오는 대표적인 방사선 종류로는 베타선, 알파선, 감마선, 중성자선이 있다[1]. 이러한 방사선을 차폐하기 위해서 방사선의 종류에 따라 차폐 재료를 다르게 사용해야 한다. 베타선과 알파선은 투과율이 낮아 종이나 알루미늄으로도 쉽게 차폐할 수 있지만, 이에 반대로 감마선의 경우에는 원자핵의 높은 에너지 상태에서 발생하는 고 에너지의 전자기파 형태로 원자번호가 높은 금속물질인 납, 철, 텅스텐 화합물 또는 혼합물 같은 밀도가 높은 재료들을 이용하여 차폐해야 한다 [2]. 또한, 중성자선은 정전기적 영향을 받지 않아 이를 차폐하기 위해서 원자핵과 충돌로 에너지를 감쇠시켜야 한다. 그래서 수소원자의 높은 함량을 갖는 물질인 고분자 형태의 폴리에틸렌 또는 감속재 역할로 물을 이용하여 차폐하고 있다 [3-6].

산업 활동 및 연구 활동에서 발생하는 방사성 폐기물을 보관하기 위해서 중량 콘크리트 화합물을 이용하여 폐기물에서 나오는 방사선을 차폐하였지만, 부피가 크고 무거워 운송 부담이 많이 들었다. 그리고 원자력 발전소 등에서 나오는 다양한 방사성 폐기물과 사용 후 핵연료의 수송 및 저장과 관련하여, 외부 진동이나 장시간 지각변동에서 방사성 물질과 이를 차폐하고 있는 다중의 구조체를 안전하게 보호하면서 그 자체로도 우수한 차폐성능을 지니는 연성 방사선 차폐재료의 개발은 매우 중요하다. 현재 연성재료로 널리 사용되는 고밀도 폴리에틸렌 (High Density Polyethylene: HDPE)에 보론과 금속물질을 넣어 중성자, 감마선의 대한 체폐능력을 향상 시켜 사용한다[7]. 고밀도 폴리에틸렌을 사용하는 이유는 수소원자가 많이 들어 있어 중성자를 산란시켜 감속시키는 효과가 있다[7-9]. 그러나 고밀도 폴리에틸렌에 넣을 수 있는 보론과 금속물질에 양이 한계치가 있으며, 첨가량이 증가할수록 인장강도와 신축성이 약해지는 것으로 보고되고 있다 [9-16]. 국내에서는 한국원자력연구원을 중심으로 방사성 물질의 수송 및 사용 후 핵연료 저장용기, 저장고 등에 관하여 차폐재료에 관한 연구가 활발히 진행되

고 있다. 지금까지 개발한 연성 차폐재들은 두께가 얇을 때는 뒤틀 수 있는 능력을 가지고 있지만 방사선 차폐능력을 높이기 위해서 고분자 기반 물질의 두께를 증가시킬 경우 외부 충격을 흡수할 수 있는 재료의 연성이 사라진다[8].

폴리에틸렌에 단점을 보완하여 신축성이 뛰어난 연성 재료를 개발하기 위해서 서울대 재료공학과에서 개발한 하이드로젤로 기존에 개발되어 있던 하이드로젤보다 100배 이상 뛰어난 신축성을 보여주는 물질로 90 %이상 물로 되어있기 때문에 중성자 차폐 재료로 사용 가능 할 것이다[17-20]. 하이드로젤 제작 시 추가적으로 기능성 분말을 함유하여 제작이 가능하다. 그래서 감마선과 중성자 차폐에 효과적인 붕화금속을 하이드로젤에 함유시켜 하이드로젤의 신축성을 유지하는 새로운 개념의 방사선 차폐 연성재료를 개발하는 것이다. 연성 재료는 기본적으로 하이드로 젤을 사용하여 두께가 증가하여도 연성의 특징을 유지하면서, 붕화금속을 이용하므로 금속류의 기존 차폐재와 유사한 차폐능력을 가질 것이다. 이러한 연성 차폐재료의 특징은 사용 후 핵연료를 포함한 방사성 폐기물의 수송 및 저장에 사용되는 용기에서 뛰어난 완충재 역할을 하여, 폐기물 및 저장용기를 파손으로부터 보호하면서 우수한 방사선 차폐능력을 가질 것이다. 이러한 역할을 그림 1.1.1에 나타내었다.

본 연구에서는 하이드로젤에 함유할 붕화금속 나노분말을 합성하기 위한 실험 진행을 앞서 나노분말을 합성하기 위한 최적의 조건을 가지고 있는 플라즈마를 발생시키기 위한 전산해석 분석, 합성한 붕화티타늄 나노분말 합성 및 특성 분석, 다양한 기능성 물질이 함유된 하이드로젤에 대한 방사선 차폐특성 실험을 진행하였다. RF 플라즈마 전산해석은 RF 플라즈마 시스템 설계 및 운전 조건에 따른 변수를 변경하여 플라즈마의 발생 형태와 10,000 K이상에 고온 영역이 토치 중심에 넓게 분포하는지 분석하였다. 나노분말 합성 및 특성 분석은 FE-SEM와 XRD분석을 통해 합성된 나노분말들에 형태와 입자크기 분포를 분석하였다. 그리고 하이드로젤에 다양한 기능성 물질이 함유할 수 있어 감마선 차폐에 효과적인 금속분말 산화철, 산화텅스텐, 산화납을 넣어 시편을 제작하여 방사선 차폐 특성 실험을 진행하였다.

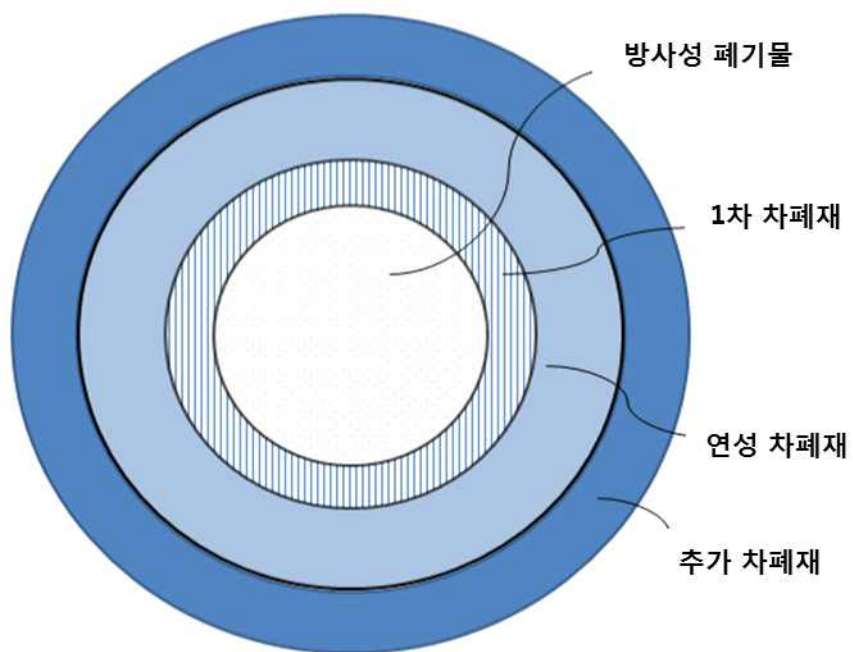


그림 1.1.1 방사성 폐기물 보관용기에 사용가능한 재료

II. 전산해석 방법 및 결과

1. 전산해석 방법

1) RF 열플라즈마 모델링을 위한 가정 및 지배방정식

나노입자 합성을 최적의 RF 플라즈마 시스템 설계 및 운전을 하는데 있어 최적의 합성조건을 만들기 위한 연구로 RF 플라즈마 토치 영역에 설계 및 운전조건에 따른 전산해석이 이루어 졌다. 전산해석은 고성능 클러스터(CPU: 8 Core Intel Xeon E5-2640v3, RAM: 16 GB)와 열플라즈마 해석을 위해 개발된 전산해석 코드인 DCPTUN[21-25]을 수정하고 보완하여 진행하였다.

RF 플라즈마 토치의 특성을 해석하기 위해서 알아야 할 정보인 플라즈마의 온도, 속도, 전류 및 자기장의 분포 등을 계산하기 위해 국소열평형(Local Temperature Equilibrium, LTE)을 가정하고 질량 연속방정식, 운동량 보존식, 에너지 보존식, 전류 연속방정식을 사용하였으며, 암페어 법칙을 이용하여 플라즈마 전류로부터 유기되는 자기장 세기를 구하였다[26]. 유도코일에 인가된 고주파 전류가 Faraday 법칙 및 Ampere 법칙에 따라 플라즈마 내에 유기시키는 와전류에 의한 유도가열을 이용하여 열플라즈마의 형성 및 유지에 필요한 에너지를 공급하는 장치인 고주파 열플라즈마 발생기는 그림 2.1.1과 같이 기본적으로 플라즈마에 에너지를 공급하기 위한 유도코일과 형성된 열플라즈마를 주위 공기와 분리시키고 가두기 위한 가둠관으로 구성되며 가둠관 반지름(R), 코일 감은 수(N), 코일반지름(R_c) 및 코일길이(l) 등과 같은 기하학적 설계변수와 입력전력(P_0), 주파수(f), 플라즈마 기체 유량(Q_t) 등과 같은 운전변수들의 변화에 따라 전기적 에너지 효율 및 플라즈마 온도장, 속도장과 같은 플라즈마 특성이 달라진다.

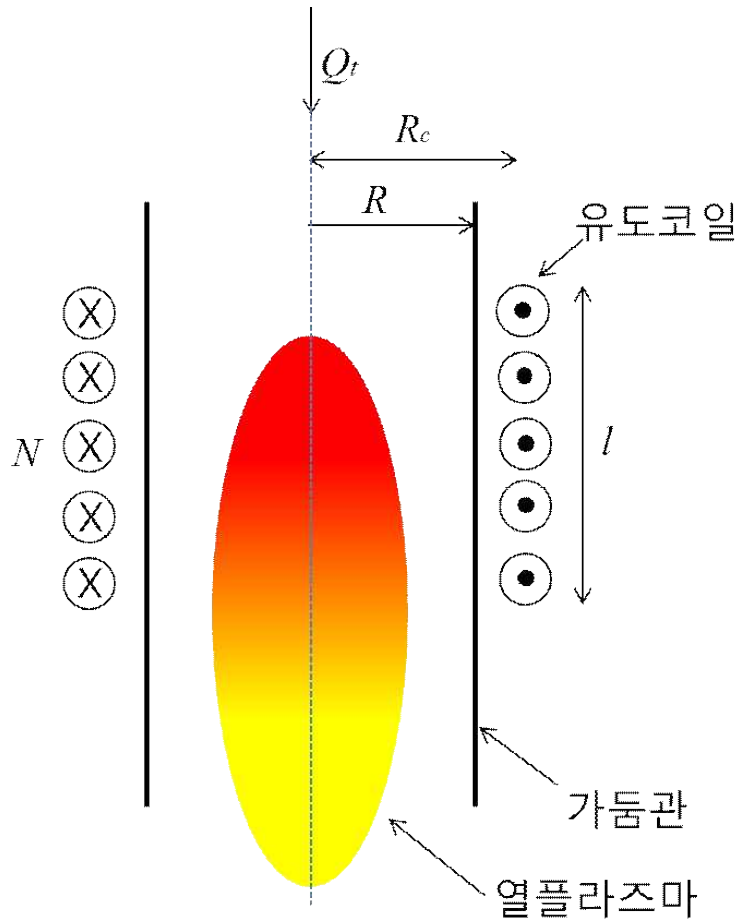


그림 2.1.1 고주파 열플라즈마 발생기의 기본 구조

정상상태 ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$)의 2차원 축대칭 ($\frac{\partial}{\partial \theta} = 0$)인 원통형 좌표계 (r, θ, z)에서 앞서 설명한 보존식은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

① 질량 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v) = 0 \quad \text{식(2.1.1)}$$

여기서 ρ 는 밀도, v 와 u 는 각각 반경방향과 축방향의 플라즈마 유동속도이다.

② 운동량 보존방정식

- 축 (z)방향

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial z} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = - \frac{\partial p}{\partial z} + j_r B_\theta - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad \text{식(2.1.2)}$$

- 반경 (r)방향

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial z} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} = - \frac{\partial p}{\partial r} - j_z B_\theta - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \frac{\rho v_\theta^2}{r} \quad \text{식(2.1.3)}$$

- 회전 (θ)방향

$$\rho u \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \rho v \frac{\partial v_\theta}{\partial r} = - j_r B_z + j_z B_r - \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} \right) - \frac{\rho v v_\theta}{r} \quad \text{식(2.1.4)}$$

여기서 p 는 압력, v_θ 는 회전방향의 플라즈마 속도이고 $B_\theta j_z$, j_r , 는 각각 아크로부터 유기되는 회전방향의 자기장 세기와 축방향 전류밀도, 반경방향 전류밀도이며 B_r, B_z 은 반경방향과 축방향의 외부자기장 세기를 나타낸다. τ_{ij} 는 원통형 좌표계에서 다음과 같이 표현되는 viscous stress tensor이다.

$$\begin{aligned}
\tau_{rr} &= -\mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right) \right] \\
\tau_{zz} &= -\mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right) \right] \\
\tau_{\theta\theta} &= \mu \left[2 \frac{v}{r} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right) \right] \\
\tau_{rz} &= -\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\
\tau_{r\theta} &= -\mu \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) \right] \\
\tau_{z\theta} &= -\mu \frac{\partial v_\theta}{\partial z}
\end{aligned}$$

여기서 μ 는 유효점성계수로 $\mu = \mu_l + \mu_t$ 로 표현되며, μ_t 과 μ_l 는 각각 난류점성계수와 층류점성계수를 나타낸다.

③ 에너지 보존방정식

$$\begin{aligned}
\rho u \frac{\partial h}{\partial z} + \rho v \frac{\partial h}{\partial r} &= \\
\frac{j_z^2 + j_r^2}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e} \left(\frac{j_z}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{j_r}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) - S_R \\
+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\kappa}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\kappa}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + v_r \frac{\partial p}{\partial r} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} & \quad \text{식(2.1.5)}
\end{aligned}$$

여기서 c_p, κ, h 는 각각 비열용량, 열전달 계수, 플라즈마 열함유량을 나타내며, S_R 은 플라즈마의 복사손실율을, e 와 k_B 는 전자의 전하와 Boltzmann 계수를 나타낸다.

④ 질량분율 방정식

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial m_f}{\partial z} + \rho v \frac{\partial m_f}{\partial r} = \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[r \left(\rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_f}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_f}{\partial r} \right] \end{aligned}$$

식(2.1.6)

여기서 m_f 는 각 기체성분의 질량분율을 나타내며, Sc_t 는 난류 Schmidt수를 D 는 확산계수를 나타낸다.

식 (2.1.1~2.1.6)의 수치 해를 얻기 위한 차분화 방법으로는 유한 체적법(FVM)을 적용하였다[27-28].

2) RF 열플라즈마 전산해석 조건

나노입자를 합성하기 최적의 조건을 가지고 있는 플라즈마를 발생시키기 위해 전산해석을 통해서 운전조건 및 설계변수의 따른 변수들을 변경하여 진행하였다. 그림 2.2.1은 RF 열플라즈마 발생기 전산해석을 위해 격자계를 설계하였고, 쉬스가스와 분말주입구 부분의 정확한 해석을 위하여 이 부분에 대한 격자를 비교적 촘촘히 하였다. 방전기체는 알콘으로 하였고, 센트럴 가스(G_{ce}), 쉬스 가스(G_{sh}), 분말 주입구 길이(L_{inj}), 분말 주입구 개수(N_{inj}) 토치 반경(D), 분말공급 속도(G_{ca}), 코일 감은 수(N_c) 변화에 따른 플라즈마의 발생 형태와 10,000 K 이상에 고온 영역이 토치 중심에 넓게 분포하는지 분석하였다.

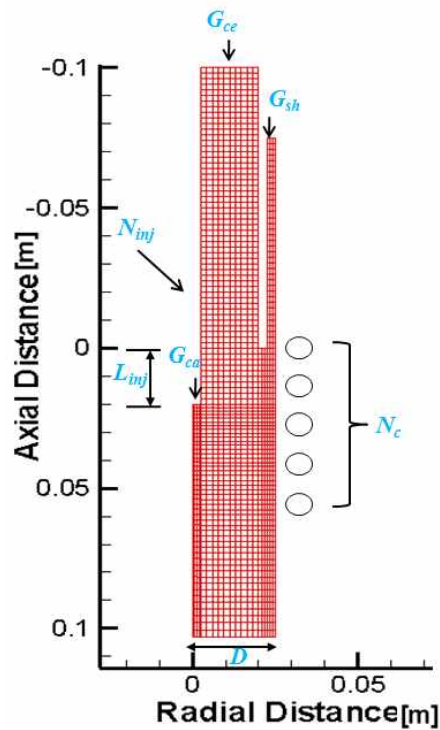


그림 2.1.2 RF 열플라즈마 발생기 전산해석을 위한 격자계 및 변수

2. RF 열플라즈마 전산해석 결과

1) 설계변수에 따른 RF 열플라즈마 전산해석 결과

붕화금속 나노분말을 합성하기 위한 최적의 조건을 가지고 있는 열플라즈마를 발생시키기 위해서 설계변수에 따른 전산해석을 진행하였다. 표 2.2.1 은 전산해석을 진행한 설계변수에 대하여 나타내었다. 센트럴 가스와 쉬스 가스는 동일하게 알곤 20 L/min, 50 L/min으로 고정된 값으로 주입하였고, 토치 반경과 코일 감은 수의 설계변수를 20~35 mm, 4~6 회로 변경하여 전산해석을 진행하였다.

표 2.2.1 RF 열플라즈마 전산해석 설계 조건

설 계 조 건	
입력 전력 (Pow)	25 kW
토치 반경 (D)	20, 25, 35 mm
코일 감은 수 (N_c)	4, 5, 6 회
분말 주입구 길이 (L_{inj})	20 mm
분말 주입구 개수 (N_{inj})	1 개
분말 공급 속도 (G_{ca})	1 L/min
센트럴 가스 (G_{ce})	20 L/min
쉬스 가스 (G_{sh})	50 L/min

그림 2.2.1 ~ 그림 2.2.2은 설계 변수 변화에 따른 전산해석 결과 토치영역에 온도와 속포 분포를 나타내었다. 운전조건을 동일하게 하고 코일 감은 수에 따른 온도 분포를 보면 코일 감은 수 증가에 따른 고온 영역이 토치 중심영역에 넓게 분포하는 것을 그림 2.2.1 (a)에서 확인할 수 있다. 특히, 코일 감은 수가 5회 일 때, 분말주입구 쪽 중앙 부분까지 9,000 K이상의 고온영역이 넓게 분포하는 것을 볼 수 있다. 그림 2.2.1 (b)에서는 토치 반경에 따른 온도 분포를 나타내었는데 토치 반경이 증가할수록 고온영역이 작아지는 것을 확인하였다. 토치 반경이 가장 작은 20 mm일 때 9,000 K이상의 고온 영역이 분말주입구에서부터 토치 출구

까지 넓게 분포하고 있다. 그러나 그림 2.2.2 (b)를 보면 플라즈마의 속도가 다른 조건들에 비해 높은 것을 알 수 있다. 이는 공급되는 분말들이 충분하게 기화시키기 위한 가열시간이 짧아져 나노입자를 합성하는데 어려울 것이다. 그림 2.2.2 (a)에서는 코일 증가에 따른 플라즈마 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 2.2.3 ~ 2.2.4는 RF 열플라즈마 토치 영역에 코일 감은 수와 토치 반경에 따른 변화를 토치 중심 및 출구 영역에 온도 프로파일을 나타내었다. 코일 감은 수 증가에 따라 벽면으로 갈수록 온도가 증가하면서, 벽면까지 고온 영역이 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 그림 2.2.3 (b)에서 토치 중심 영역에 온도는 3가지 조건 모두 비슷한 온도를 띄고 있지만 벽면까지 넓게 분포하는 것은 코일을 5회 감은 조건 이었다. 그림 2.2.4은 토치 반경 변화에 따른 토치영역에 플라즈마 온도 프로파일을 나타낸 것이다. 토치 반경이 20 mm일 때 10,000 K이상의 고온영역이 다른 조건들과 비교해서 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 그림 2.2.4 (b)는 토치 출구에 온도 프로파일로 이 경우에도 20 mm일 때 9,000 K수준의 고온영역이 분포하는 것을 알 수 있다. 그러나 토치 반경이 작아질수록 고온영역이 넓게 분포하지만 반대로 플라즈마 속도는 빠르게 발생한다는 단점이다. 이는 그림 2.2.5 (b) 토치 반경 변화에 따른 속도 프로파일을 보면 알 수 있다. 그리고 코일 감은 수에 변화에 따른 토치 출구영역에 속도 프로파일을 보면, 코일을 감은 수를 증가할수록 플라즈마 속도는 감소하는 경향이 보이지만, 코일 감은 수가 5회일 때가 6회보다 플라즈마 속도가 낮은 결과가 나왔다. 이러한 설계조건에 따른 전산해석 결과 나노입자를 합성하는데 있어 최적의 RF 열플라즈마를 발생시키는 설계조건으로 예상되는 것은 토치 반경 25 mm, 코일 감은 수 5회로 생각된다.

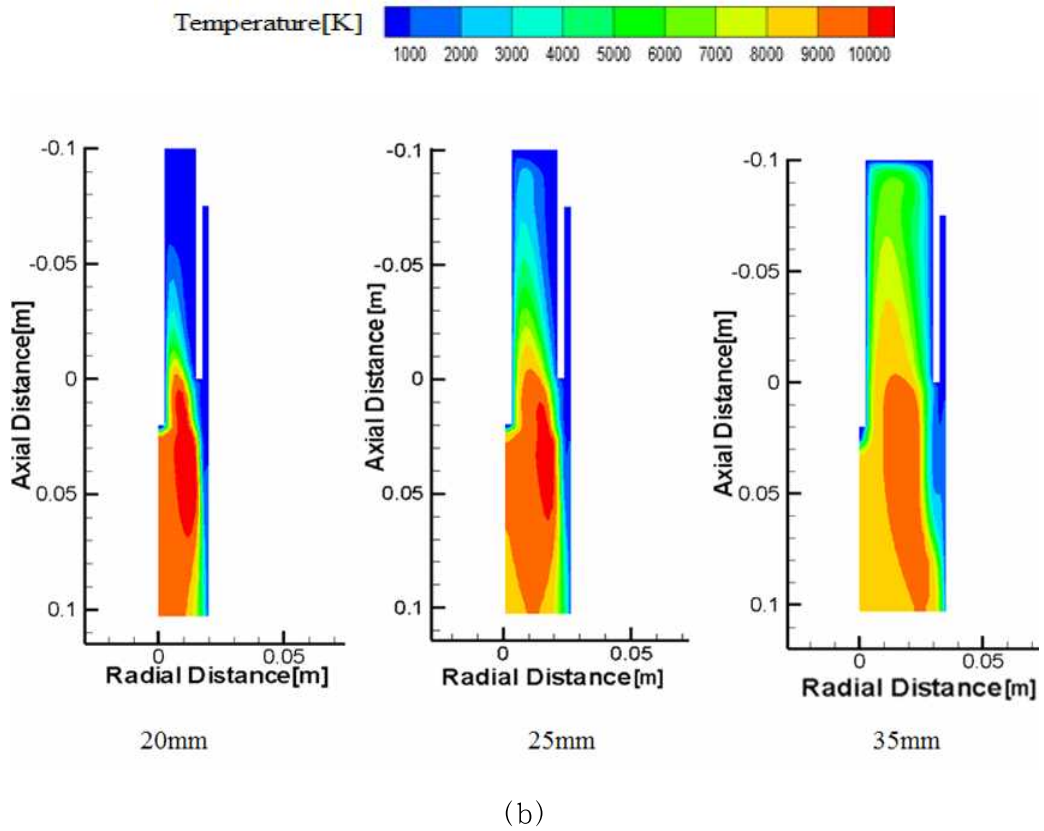
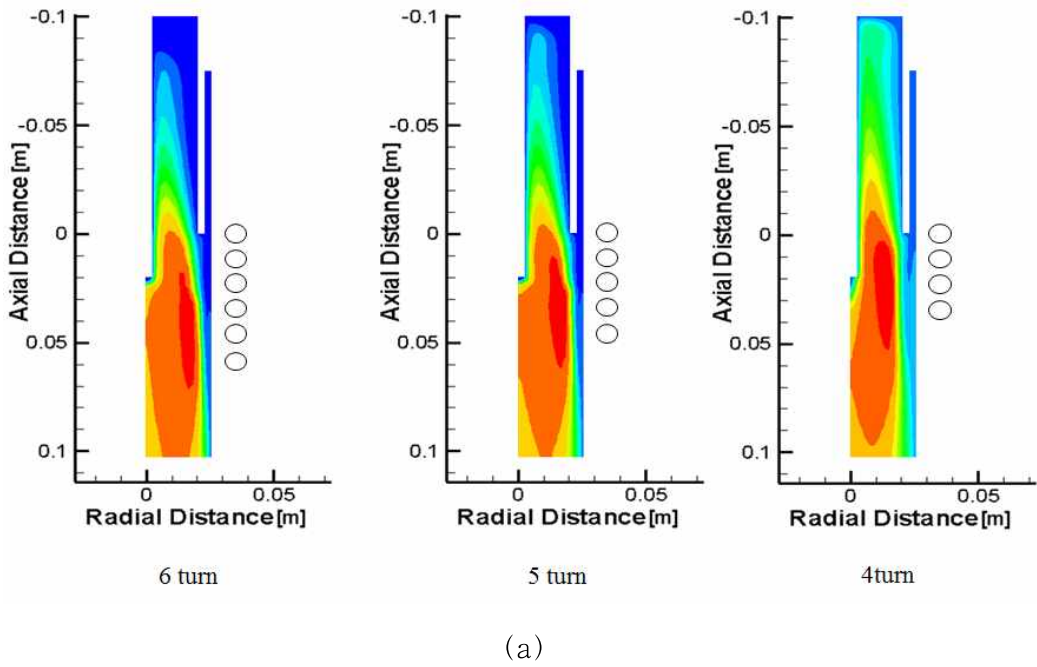
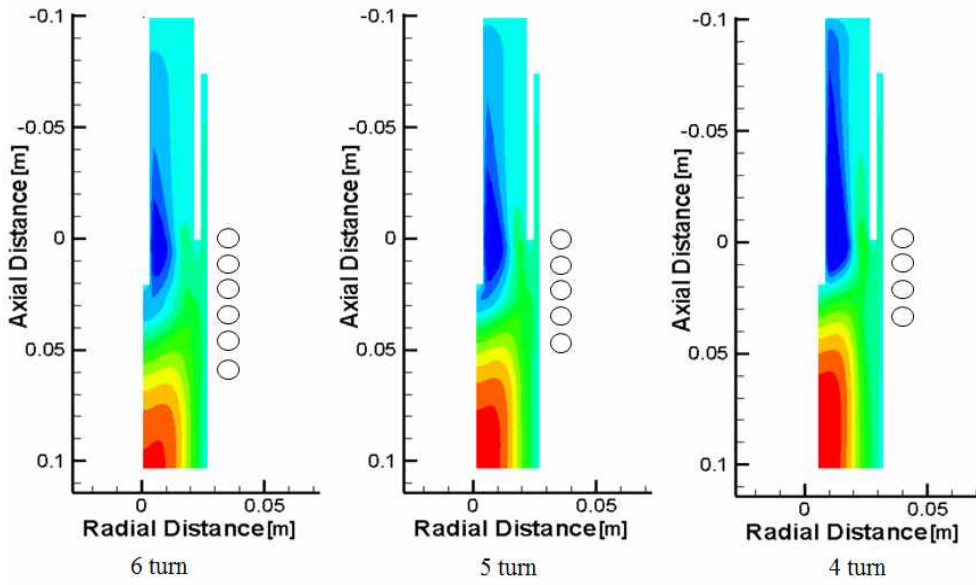
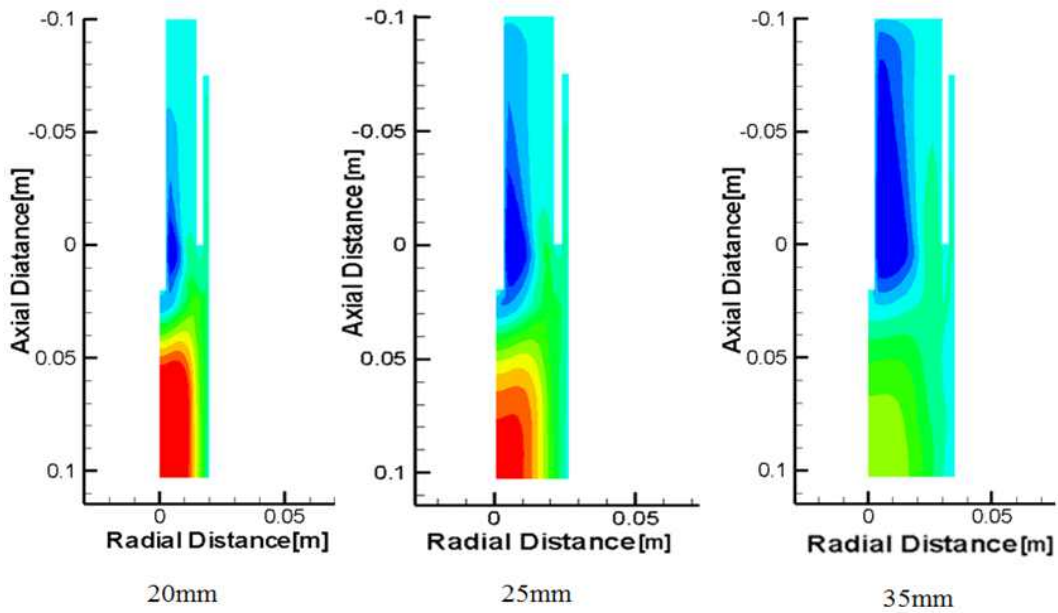
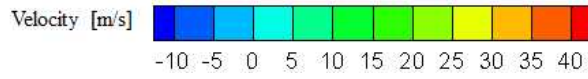


그림 2.2.1 RF 열플라즈마 토치 영역 온도 분포 : (a) 코일 감은 수 변화에 따른 온도 분포, (b) 토치 반경 변화에 따른 온도 분포

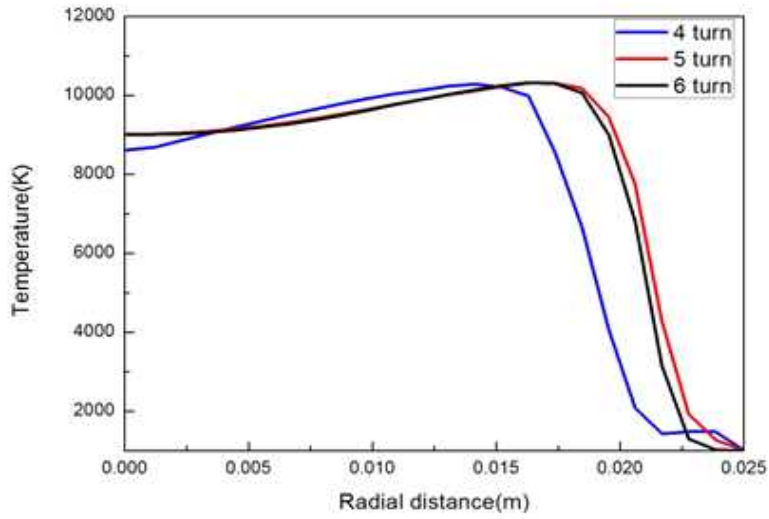


(a)

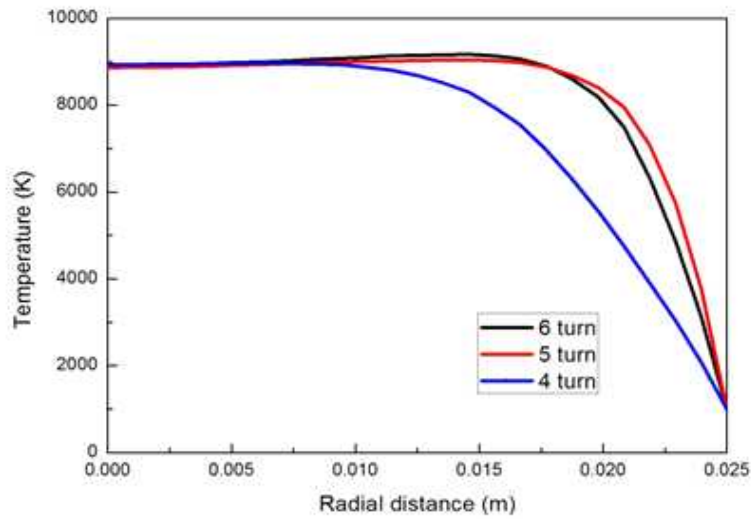


(b)

그림 2.2.2 RF 열플라즈마 토치 영역 속도 분포 : (a) 코일 감은 수 변화에 따른 속도 분포, (b) 토치 반경 변화에 따른 속도 분포

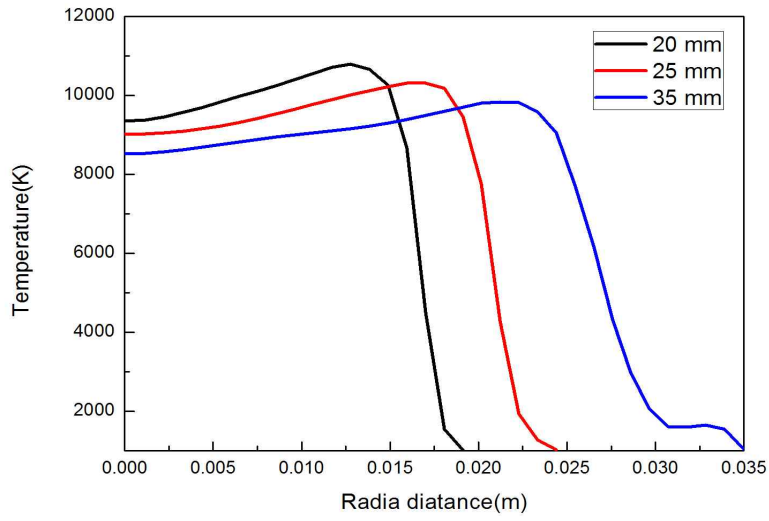


(a)

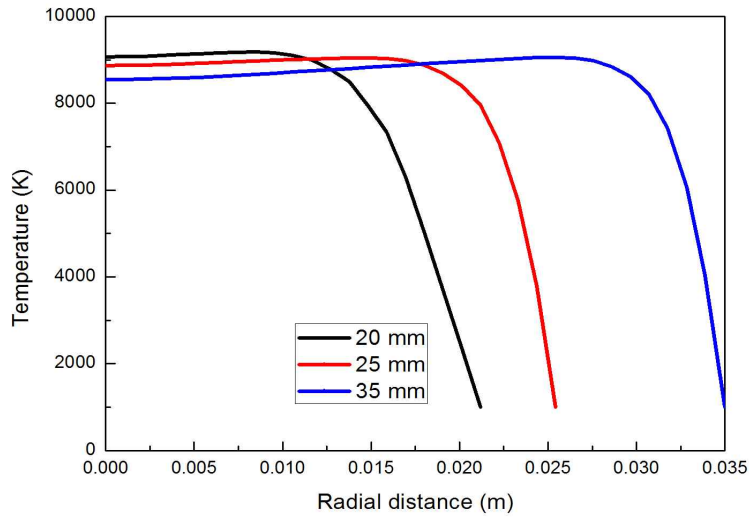


(b)

그림 2.2.3 RF 열플라즈마 토치 영역 온도 프로파일 : (a) 코일 감은 수 변화에 따른 토치 중심영역 온도 프로파일, (b) 토치 출구 영역 온도 프로파일

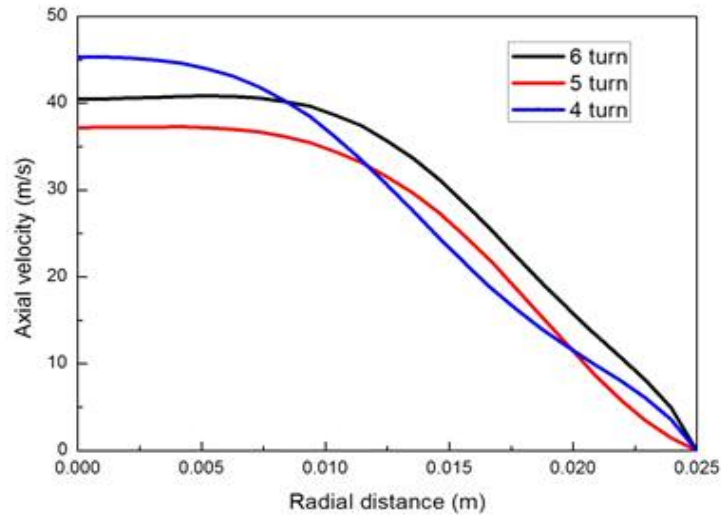


(a)

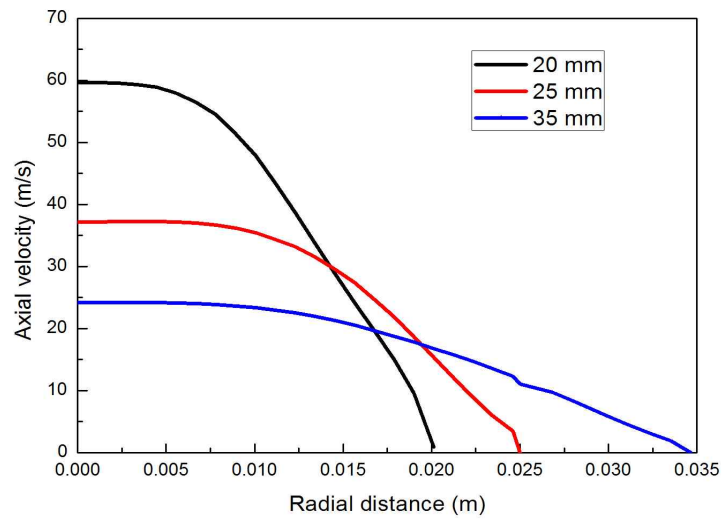


(b)

그림 2.2.4 RF 열플라즈마 토치 영역 온도 프로파일 : (a) 토치 반경 변화에 따른 토치 중심영역 온도 프로파일, (b) 토치 출구영역 온도 프로파일



(a)



(b)

그림 2.2.5 RF 열플라즈마 토치 출구영역 속도 프로파일 : (a) 코일 수 변화에 따른 속도 프로파일, (b) 토치 반경 변화에 따른 속도 프로파일

2) 운전조건에 따른 RF 플라즈마 전산해석 결과

붕화금속 나노분말을 합성하기 위한 최적의 조건을 가지고 있는 열플라즈마를 발생시키기 위해서 운전조건에 따른 전산해석을 진행하였다. 표 2.2.2 은 전산해석을 진행한 운전조건에 대하여 나타내었다. 토치 반경, 코일 감은 수, 센트럴 가스는 25 mm, 5 회, 20 L/min로 고정된 값으로 하였고, 센트럴 가스와 분말 주입구 길이를 30~70 L/min, 10~30 mm 으로 변경하여 플라즈마의 발생 형태와 10,000 K이상에 고온 영역이 토치 중심에 넓게 분포하는지 전산해석을 진행하였다.

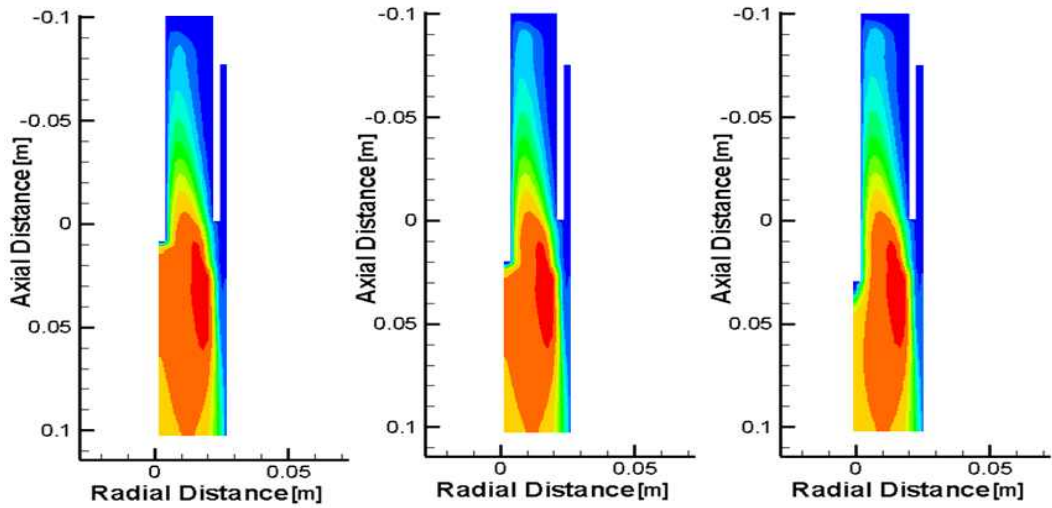
표 2.2.2 RF 열플라즈마 전산해석 운전 조건

운 전 조 건	
입력 전력 (Pow)	25 kW
토치 반경 (D)	25 mm
코일 감은 수 (N_c)	5 회
분말 주입구 길이 (L_{inj})	10, 20, 30 mm
분말 주입구 개수 (N_{inj})	1 개
분말 공급 속도 (G_{ca})	1 L/min
센트럴 가스 (G_{ce})	20 L/min
쉬스 가스 (G_{sh})	30~70 L/min

그림 2.2.6~2.2.7에는 실험에서 사용된 운전변수에 대한 전산해석 결과를 나타내었다. 그림 2.2.6 (a)에서 보는 바와 같이 분말주입기에 길이가 증가할수록 고온 영역이 중심부분에서 바깥쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 분말 주입구의 길이 증가는 나노입자를 합성하기에는 좋은 조건이 아니라 판단된다. 공급되는 분말을 충분히 기화시키기 위해서는 고온영역이 분말주입구 쪽으로 넓게 분포해야 한다. 반대로 플라즈마 속도분포에는 영향을 크게 주지 않는 것을 그림2.2.7 (a)에서 확인할 수 있었다. 플라즈마 속도변화가 거의 없는 것을 색으로 통해 알 수 있다. 그림 2.2.6 (b)는 쉬스가스 유량변화에 따른 온도 분포 변화

를 그래프로 나타낸 것이다. 센트럴가스 유량은 고정하고, 쉬스가스 유량을 증가 시킬수록 10,000 K 고온 영역이 토치 중심부로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 고온영역이 분말주입구에 발생하여 분말들을 기화시키는데 좋은 환경을 제공할 수 있다. 그러나 쉬스가스 유량증가로 인해 플라즈마 속도 또한 같이 증가하는 것을 그림 2.2.7 (b)에서 보여주고 있다. 나노입자 합성시 고온의 영역이 넓게 분포하는 것도 중요하지만, 플라즈마 속도 또한 중요하다. 플라즈마 속도가 증가하면서 분말들을 기화시키기 위한 가열시간이 짧아져 나노입자를 합성하는데 어려울 것이다. 그림 2.2.8는 토치 중심 및 출구 영역에 반지름 따라 온도 분포를 그래프로 나타내었다. 그림 2.2.8 (a)를 보면 분말주입구 길이에 따른 온도 분포가 토치 중심에서 벽으로 갈수록 온도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 분말 주입구가 30 mm때 토치 중앙온도가 6,000 K수준 이지만, 이에 반해 분말 주입구 길이가 10 ~ 20 mm에서는 온도가 9,000 K인 것을 확인하였다. 이는 분말 주입구 길이가 플라즈마 온도 분포에 영향을 주는 것으로 판단되며 나노분말 합성 시 이러한 데이터들을 참고하여 분말 주입구 길이를 설정해야 한다. 그림 2.2.8 (b)는 분말주입구 길이에 따른 토치 출구영역에 온도분포를 나타낸 것이다. 그래프를 보면 토치 중앙에서 벽까지 온도는 9,000 K으로 동일하지만 벽으로 가까워질수록 온도가 떨어지는데 분말주입구 길이가 20 mm일 경우 벽까지 고온영역이 분포하는 것을 확인할 수 있다. 그림 2.2.9은 쉬스가스 유량 변화에 따른 토치 중심 및 출구 영역 온도 분포를 나타낸 그래프이다. 쉬스가스 유량 증가에 따라 토치 벽면 쪽 플라즈마 온도가 낮고, 중심으로부터 벽까지 고온 영역 분포가 넓게 분포하지 않는 것을 그림 2.2.9 (a)에서 확인할 수 있다. 토치 출구 영역에서 쉬스 가스 유량 변화에 따른 온도 분포를 보면, 유량이 70 L/min일 때 제일 높은 고온영역이 만들어 졌다. 그러나 고온 영역이 중심부분에서 벽면까지 넓게 분포하지 못하는 것을 알 수 있었다. 그에 비해 쉬스 가스 유량이 50 L/min 경우 70 L/min 조건 보다 낮은 온도를 보여주지만 벽면까지 고온영역이 넓게 분포하는 것을 그래프에서 확인할 수 있다. 이는 분말들을 충분히 기화시켜 나노입자 합성에 좋은 조건을 마련될 것으로 생각된다. 그림 2.2.10은 분말주입구 길이와 쉬스가스 유량 변화에 따른 토치 출구영역에 속도 분포를 나타낸 것이다. 쉬스가스 유량이 증가할수록 토치 출구영역에 속도가 증가하는 경향을 그림 2.2.10

(b)에서 확인할 수 있다. 이는 공급된 분말을 충분히 기화시키기 위한 가열시간이 짧아져 나노입자를 합성하는데 어려울 것이다.

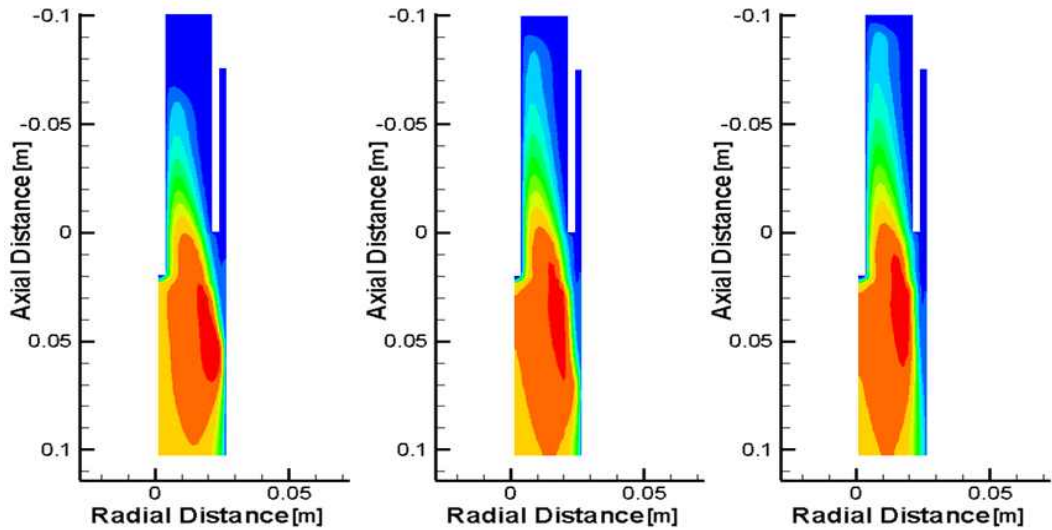
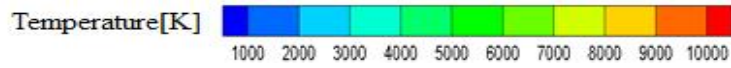


10 mm

20 mm

30 mm

(a)



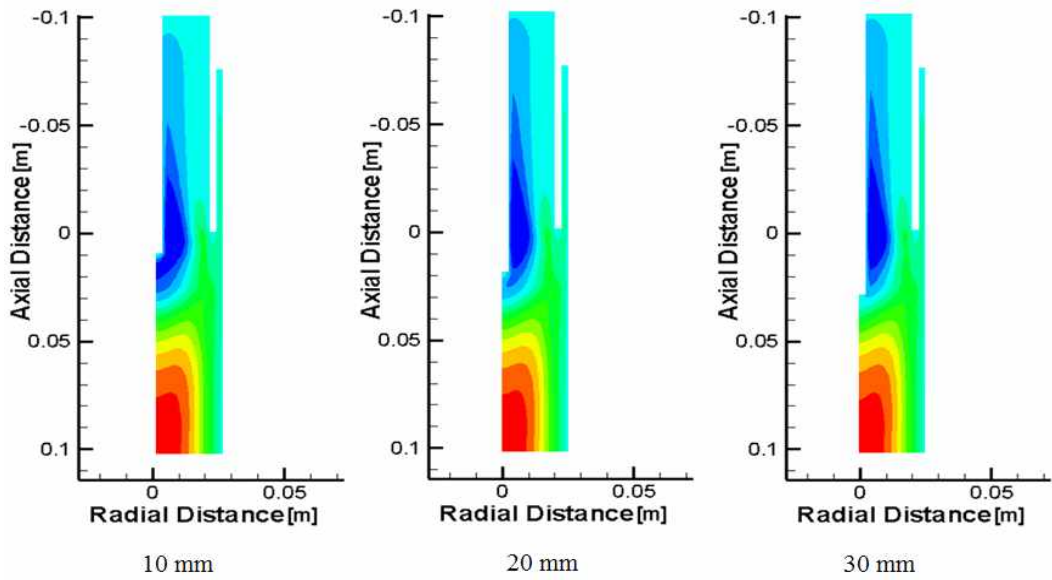
30 L/min

50 L/min

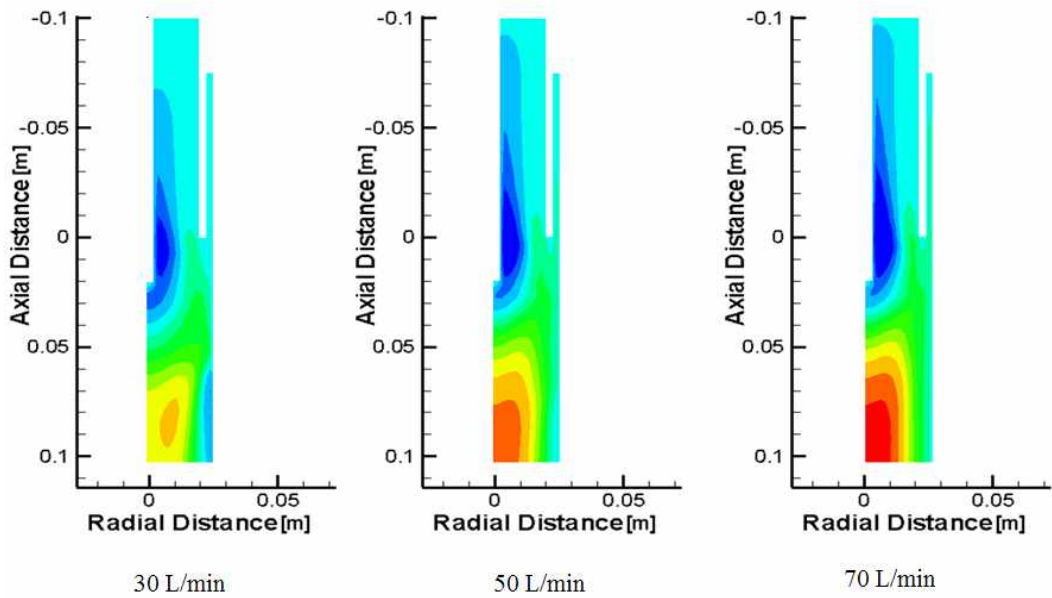
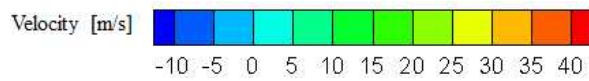
70 L/min

(b)

그림 2.2.6 RF 플라즈마 토치 영역 온도 분포: (a) 분말주입구 길이 변화에 따른 온도 분포, (b) 쉬스가스 유량 변화에 따른 온도 분포

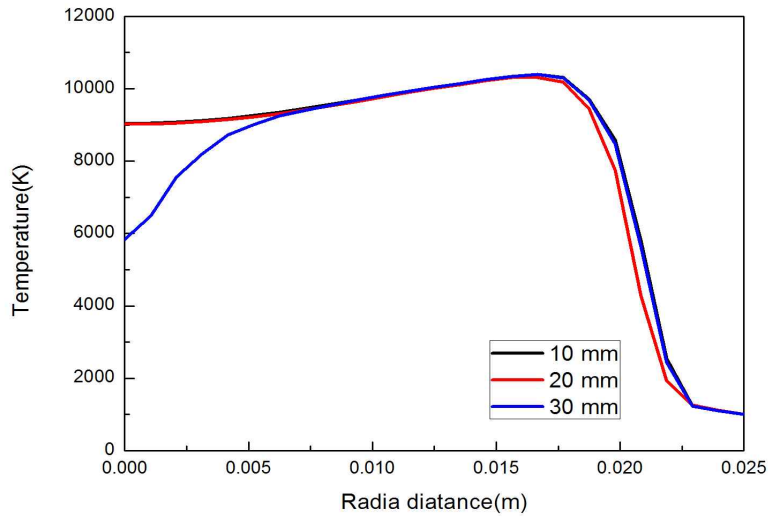


(a)

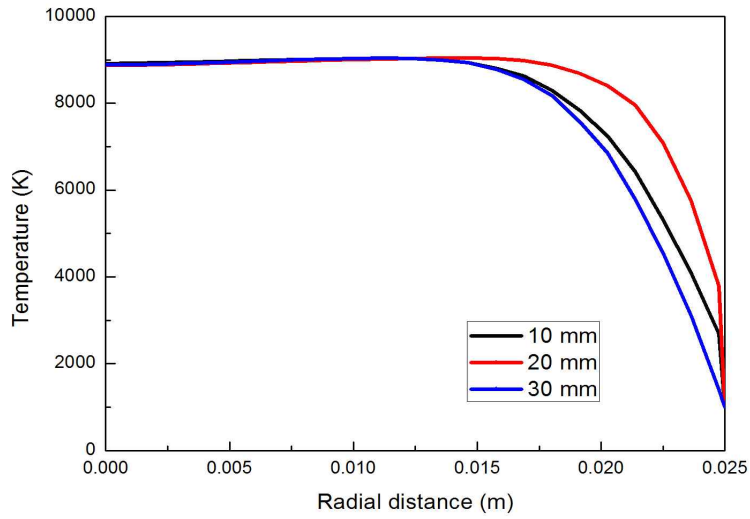


(b)

그림 2.2.7 RF 플라즈마 토치 영역 속도 분포: (a) 분말주입구 길이 변화에 따른 속도 분포, (b) 쉬스가스 유량 변화에 따른 속도 분포

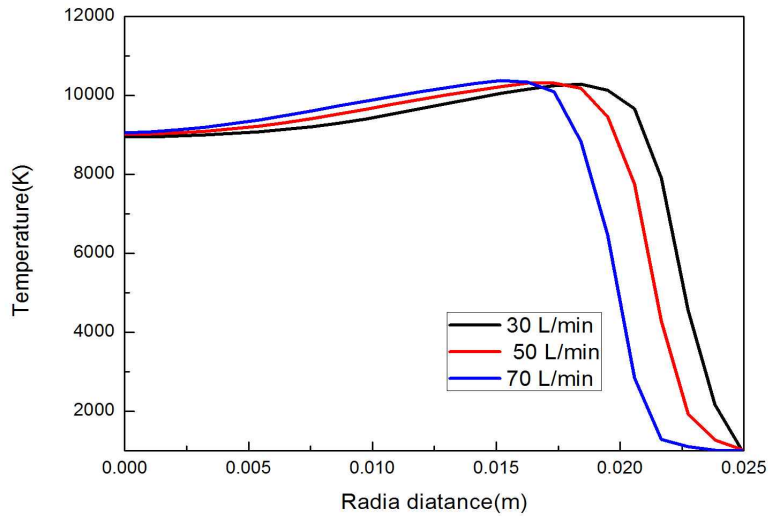


(a)

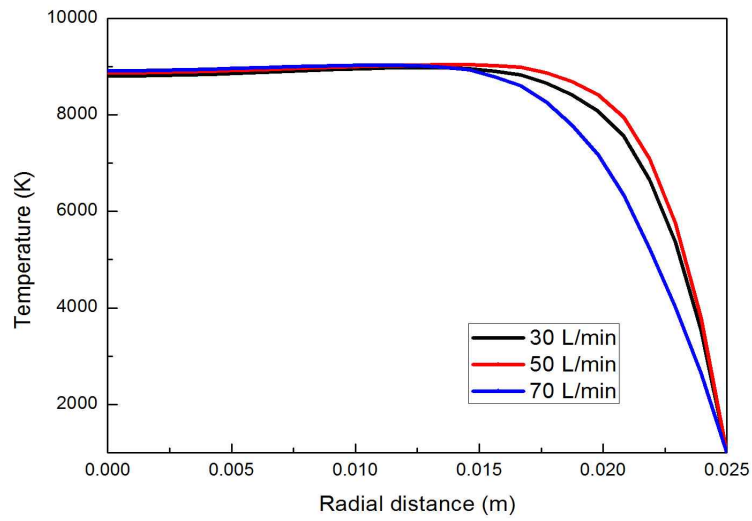


(b)

그림 2.2.8 RF 플라즈마 토치 영역 프로파일 : (a) 분말주입구 길이 변화에 따른 토치 중심 영역 온도 프로파일, (b) 토치 출구 온도 프로파일

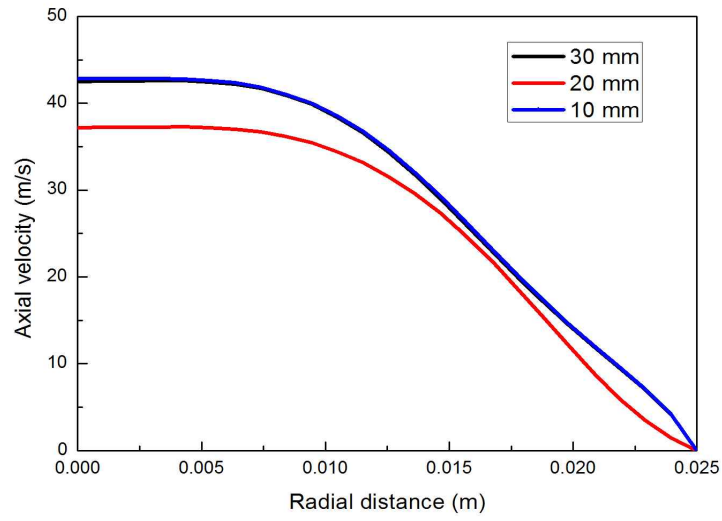


(a)

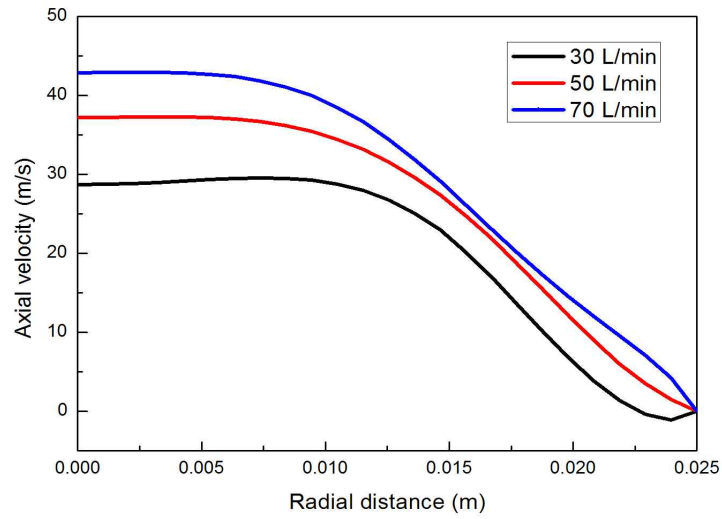


(b)

그림 2.2.9 RF 플라즈마 토치 영역 온도 프로파일 : (a) 쉬스가스 유량 변화에 따른 토치 중심 영역 온도 프로파일, (b) 토치 출구 영역 온도 프로파일



(a)



(b)

그림 2.2.10 RF 플라즈마 토치 출구 영역 속도 프로파일 : (a) 분말주입구 길이 변화에 따른 속도 프로파일, (b) 쉬스가스 유량 변화에 따른 속도 프로파일

III. 나노분말 합성 실험

1. 붕화금속 나노분말 합성 방법

현재 본 열플라즈마 연구실에 구축된 나노분말 합성용 25 kW급 RF 플라즈마 시스템은 나노 분말 수거를 위한 나노 분말 포집기 설치와 같은 시스템을 개선해야 할 부분들이 아직도 남아있다. 그래서 타기관의 RF 플라즈마 시스템을 활용하여 붕화금속 나노분말 합성 실험을 진행했다. 붕화금속 나노분말 합성에 사용된 분말은 보론, 니켈, 티타늄, 텅스텐으로 총 3가지의 금속분말을 이용하였다. 이 중 티타늄 금속분말의 경우 붕화 티타늄 나노분말을 대량 생산하기 위해서 보론, 티타늄 비율을 1 : 5 로 배합하여 공급하였다. 나노분말 합성 시 RF 열플라즈마의 운전 조건은 3종류 동일하게 파워 40 kW, 챔버 내 압력 500 torr, 분말 공급 유량 10 L/min, 센트럴 가스 유량 60 L/min, 쉬스 가스 유량 80 L/min, 퀘칭 가스 유량 120, 60 L/min하여 붕화금속 나노분말 합성 실험을 진행했다. 원료 공급량은 시간당 246 g를 투입 시켰다. 표 3.1.1은 나노분말 합성 시 RF 플라즈마 운전 조건을 나타낸 것이다. 그림 3.1.1~3.1.2는 나노분말 합성 시 사용된 원재료들에 대한 FE-SEM 이미지로 분말 크기가 수십 마이크로 수준의 형태를 가지고 있는 것을 확인 할 수 있다.

표 3.1.1 붕화금속 나노분말을 합성하기 위한 RF 플라즈마 운전 조건

Power (kW)	Pressure (Torr)	G _{ca} (L/min)	G _{ce} (L/min)	G _{sh} (L/min)	Q1 (L/min)	Q2 (L/min)
40	500	10	60	80	120	60

*G_{ca}: 분말공급 유량, G_{ce}: 센트럴 가스 유량, G_{sh}: 쉬스 가스 유량, Q: 퀘칭 가스 유량

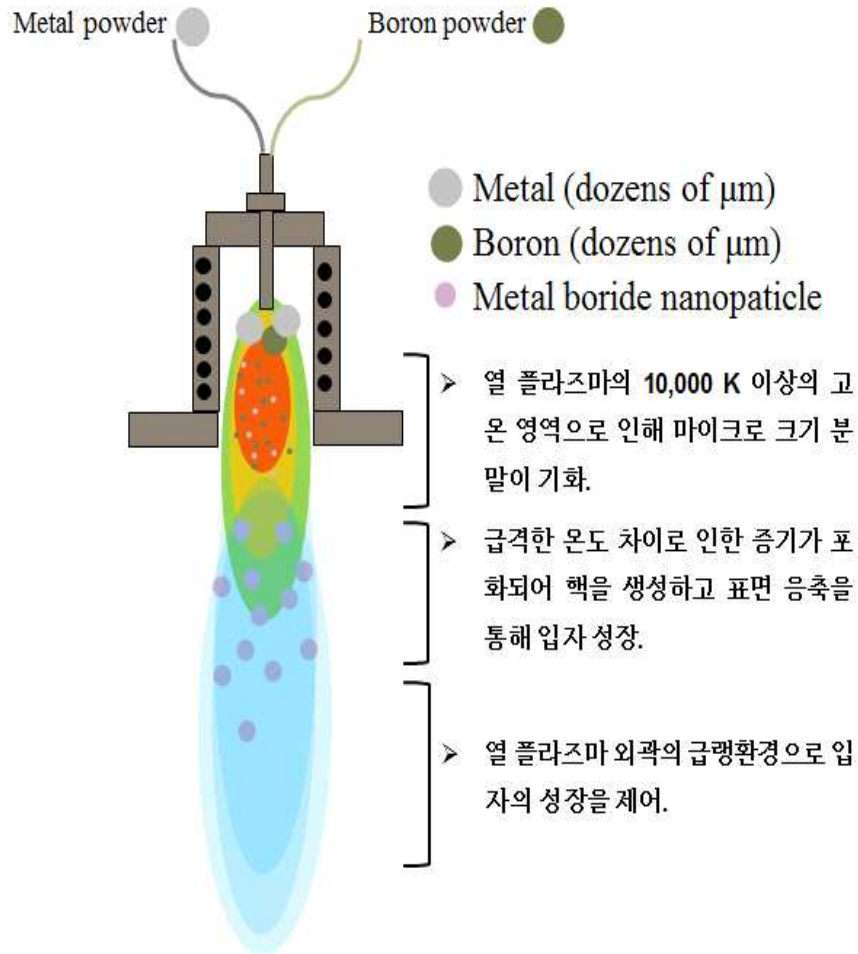
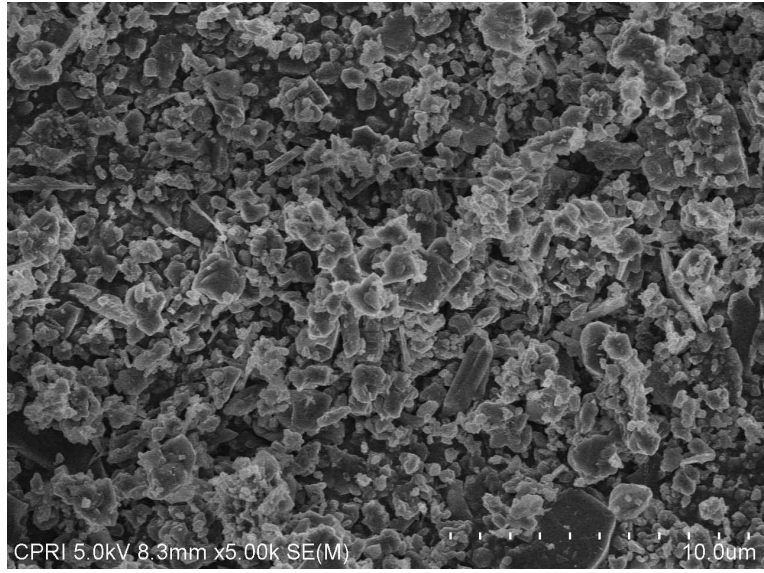
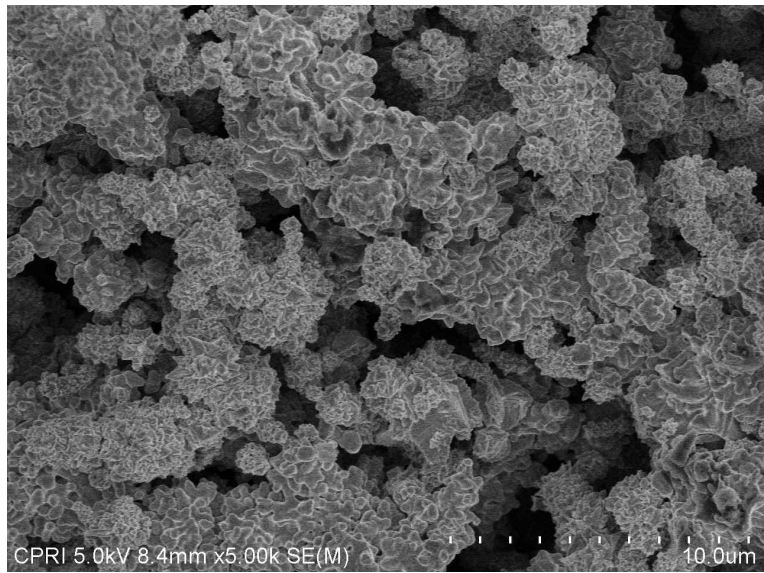


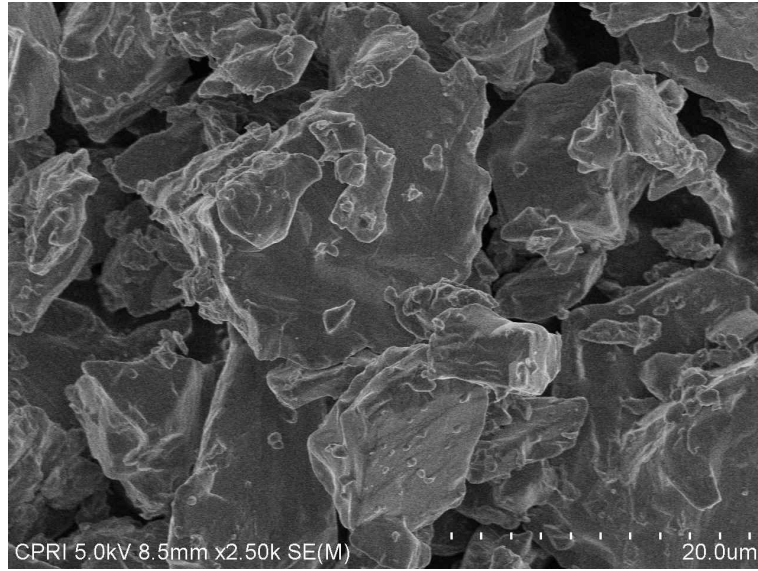
그림 3.1.1 붕화금속 나노분말 합성 개략도



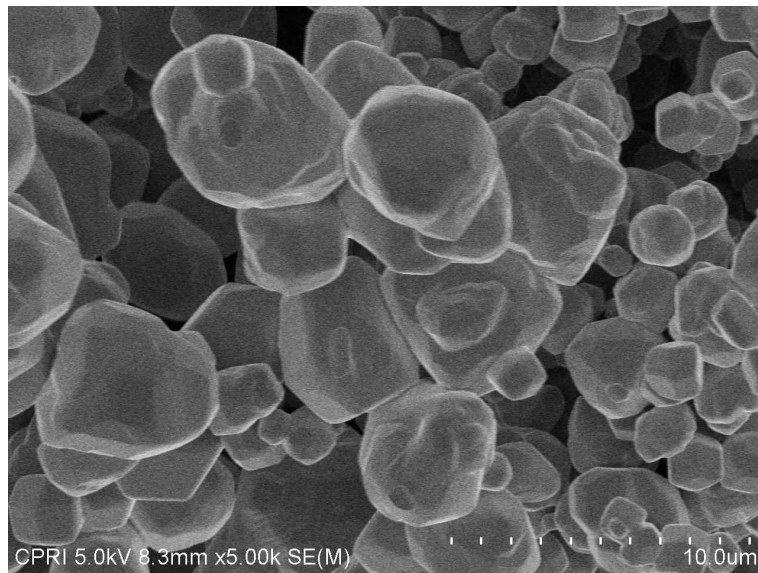
(a)



(b)



(c)

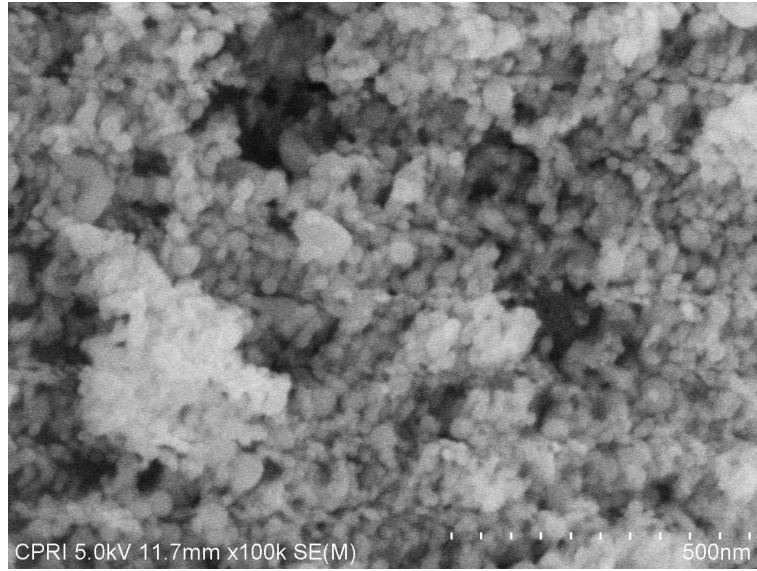


(d)

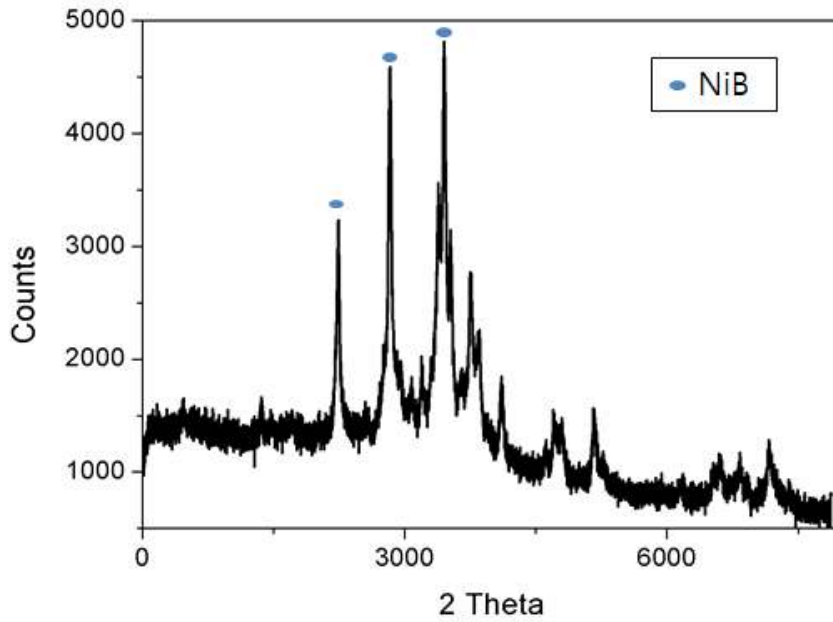
그림 3.1.2 봉화금속 나노분말 합성시 사용된 원재료 분말의 FE-SEM 측정 이미지 : (a) 보론 분말, (b) 니켈 분말, (c) 티타늄 분말, (d) 텅스텐 분말

2. 붕화금속 나노분말 합성 결과

붕화금속 합성실험은 타기관의 RF 플라즈마 시스템을 활용하여 붕화금속 나노분말이 성공적으로 합성되는지 확인하였다. 붕화금속 나노분말 합성에 사용된 분말은 보론, 니켈, 티타늄, 텅스텐으로 총 3가지의 금속분말을 이용하였다. 합성된 붕화티타늄 나노분말은 연성재료에 함유되는 금속분말로 사용되었다. 붕화금속 나노분말 합성결과는 그림 3.2.1 ~ 3.2.3에 FE-SEM 이미지와 XRD 그래프로 나타내었다. FE-SEM 이미지로 보면 알 수 있듯이 텅스텐에 나노분말 합성 실험의 경우 다른 실험과는 확연히 다르게 나노입자 합성이 잘 안된 모습을 확인할 수 있다. 특히, 그림 3.2.2 (b) XRD 그래프를 보면 텅스텐과 보론이 합성되지 않고 수순 텅스텐만 존재하는 것을 할 수 있다. 이는 텅스텐의 기화점이 다른 금속물질에 비해 높기 때문에 니켈, 티타늄보다 합성이 잘 안된 것으로 생각된다. 이는 원재료의 기화점을 충분히 고려하여 분말공급 속도 및 분말주입구 길이를 조절해야 한다. 그리고 텅스텐을 기화시킬 수 있는 정도에 높은 고온영역이 분말공급기가 위치해 있는 반응기 중심영역에 분포해야한다. 이런 경우, 공급되는 분말들이 충분히 열을 전달받아 나노입자가 합성될 것이다. 그림 3.2.4은 붕화티타늄 나노입자 크기 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 붕화티타늄의 나노입자 크기 분포를 보면 30~50 nm수준의 입자들이 많이 분포해 있는 것을 알 수 있으며 입자 크기의 평균 크기를 알려주는 D50일 때 붕화티타늄의 나노입자 크기는 42 nm수준인 것으로 확인하였다.

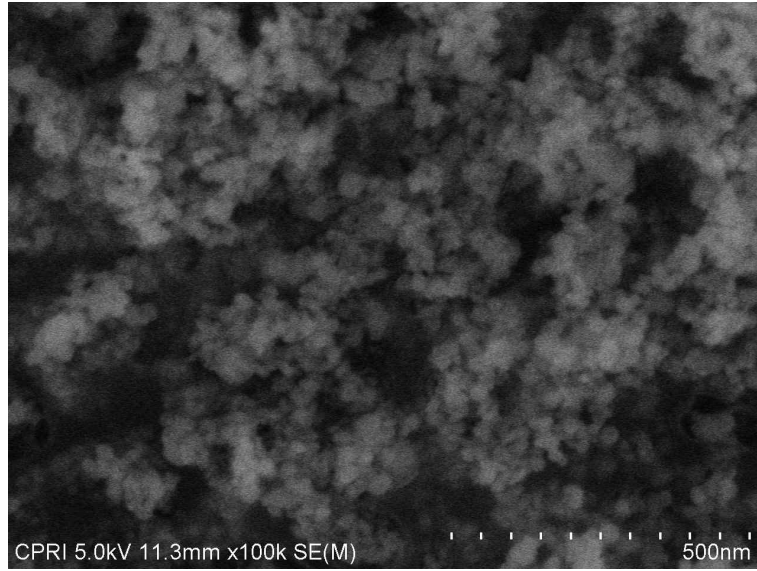


(a)

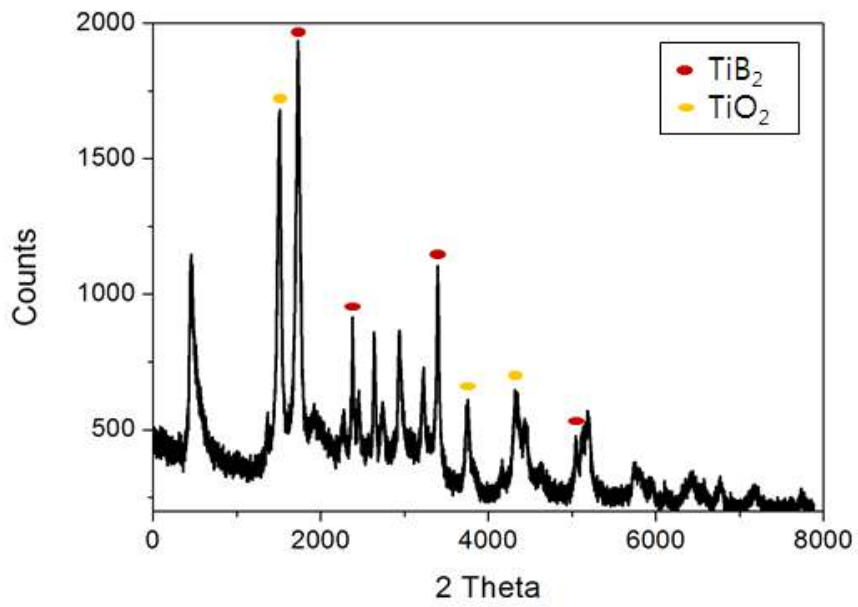


(b)

그림 3.2.1 붕화 니켈 나노물질 합성분말 특성 분석 : (a) FE-SEM 이미지, (b) XRD 그래프

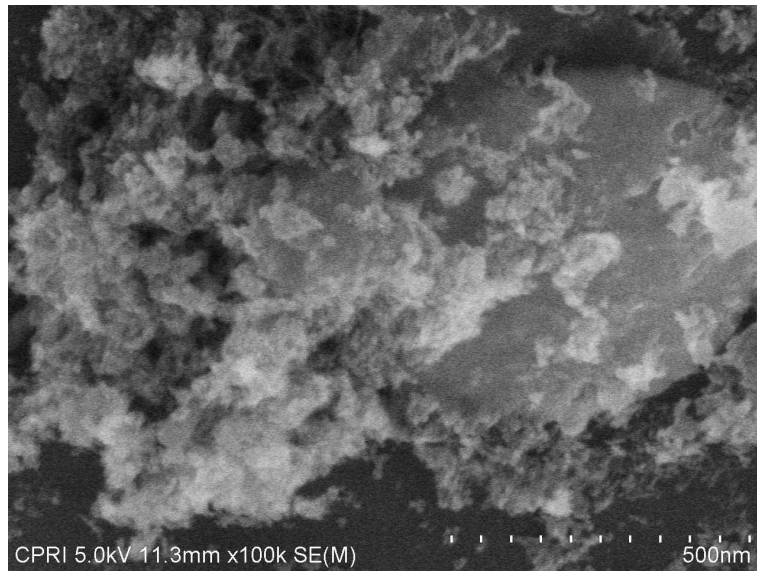


(a)

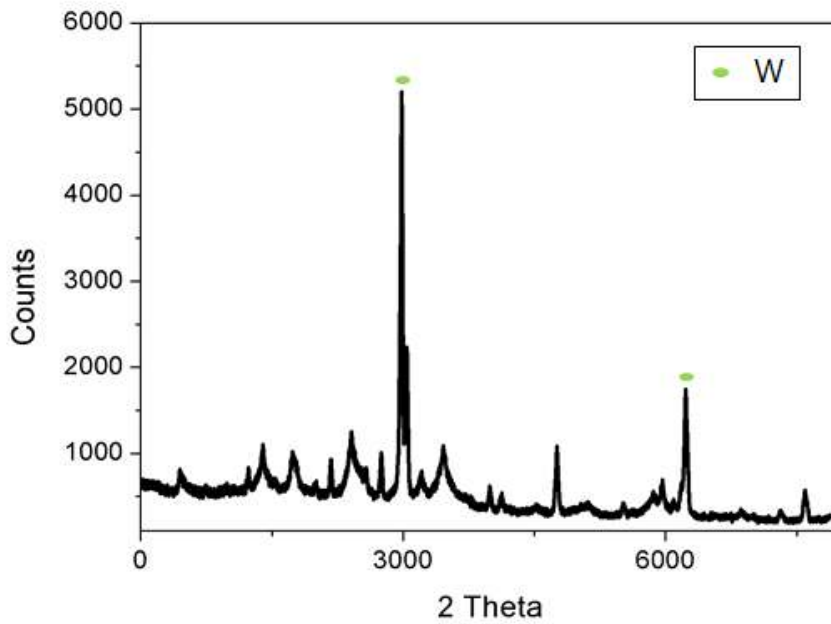


(b)

그림 3.2.2 붕화 티타늄 나노물질 합성분말 특성 분석 : (a) FE-SEM 이미지,
(b) XRD 그래프



(a)



(b)

그림 3.2.3 붕화 텨스텐 나노물질 합성분말 특성 분석 : (a) FE-SEM 이미지,
(b) XRD 그래프

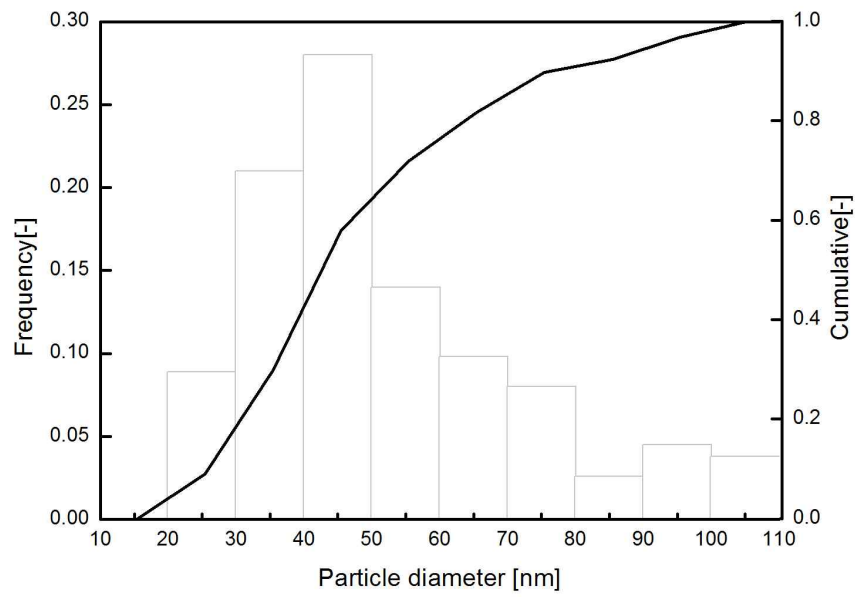


그림 3.2.4 붕화 티타늄 나노입자 크기 분포

IV. 연성재료의 방사선 차폐 실험

1. 방사선 차폐실험 방법

1) Cs-137에 대한 감마선 차폐 실험

연성재료의 차폐 특성 실험을 진행하기 위해서 식 (4.1.1)을 이용하였다. 식 (3.2.1)을 살펴보면 차폐체에 I_0 의 강도를 가진 방사선이 입사한다고 가정할 때, 이 차폐체를 투과한 후의 감마선의 강도는 I 라고 나타낼 수 있다. 이때 D 는 차폐체의 두께이며, μ 는 감쇠계수로 감마선이 물질내의 단위 길이당 상호작용을 일으킬 확률을 나타낸다. 감마선이 물질을 통과하면서 발생하는 감쇠는 지수적으로 일어난다. 감쇠계수는 주어진 시료물질의 두께에 의해 감쇠된 방사선 양을 나타낸다. 광전효과, 콤프턴 효과, 쌍생성은 서로 독립적으로 일어나므로 감쇠계수는 각 과정의 감쇠계수들의 합이라고 할 수 있다. 감쇠계수는 수학적으로 단순한 비례상수이지만 물리적으로 감쇠의 정도를 나타내는 값이다[29-31].

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu D} \quad \text{식(4.1.1)}$$

방사선이 차폐물질을 1차원적으로 투과하는 정량적인 투과율(T)와 감쇠계수를 구하기 위해서 그림 4.1.1과 같이 좁고 긴 형태의 통로가 있는 납 블록을 방사선 선원과 차폐체 사이에 설치하여 실험 장치를 구성하였다. 즉, 방사선의 세기는 방사선이 진행하는 방향과 거리에 따라 변화하므로 일정한 방향으로 충분한 직진성을 가지고 있는 방사선만 차폐체에 입사시켜 정확한 차폐실험을 진행할 수 있도록 하였다. 사용된 납 블록에서 감마선이 지나가는 통로의 내경은 5 mm이고 길이는 25 mm이다. 방사선 차폐 실험에 사용된 계측기로는 Canberra사의 NaI(Tl) 검출기를 사용하여 차폐체에 대한 감마선 투과율을 서로 다른 두께에 대해 반복적으로 측정하여 감쇠계수를 구하였다. 기존의 경우 감쇠계수를 측정할 시에 단

일두께에 대한 투과율을 측정하지만, 본 연구에서는 두께 증가에 따른 투과율을 측정하여 기존에 방법보다 정확한 데이터를 얻을 수 있도록 하였다. 검출기에 인가된 전압은 800 V, 측정시간은 600 초 였으며, Cs-137(0.6 MeV)의 대한 에너지 영역에 대한 계측값만을 이용하여 투과율을 구했다. 그리고 계측값에 대한 정확성을 위해 동일한 조건에서 3번 반복하여 측정된 값을 이용하여 투과율의 평균값을 계산하였다. 계산된 투과율 평균값을 이용하여 차폐체 두께증가에 따른 차폐체의 감쇠계수를 구하였다.

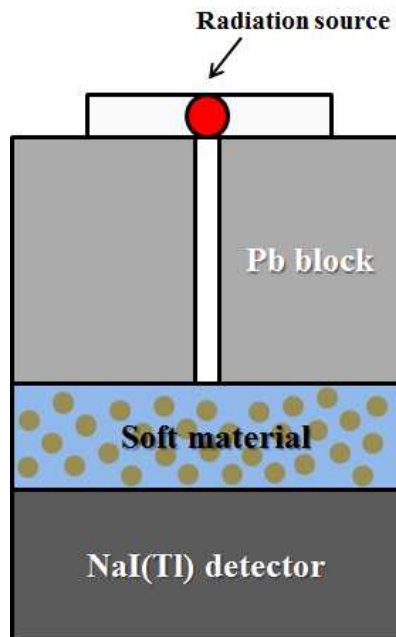


그림. 4.1.1 Cs-137 감마선 차폐 측정 실험장치 개념도

2) Co-60에 대한 감마선 차폐 실험

금속분말을 함유한 연성재료에 대한 Co-60 감마선 차폐 실험을 그림 4.1.2 형태의 실험 장치를 이용하였다. 연성재료와 선원 사이에 납 블록을 두어 최대한 동일한 방향과 충분한 직진성을 가지고 있는 방사선만 차폐체에 입사시켜 정확한 차폐실험을 진행할 수 있도록 하였다. 사용된 납 블록에서 감마선이 지나가는 통로의 내경은 30 mm, 외경은 40mm, 길이는 30 mm이다. 차폐 실험에 사용된 시편은 산화금속인 Fe_2O_3 , WO_3 , PbO_2 가 함유된 연성재료로 지름은 25 mm, 두께는 35 mm로 Cs-137실험과 다르게 한 두께에 대한 차폐실험을 진행하였다. 방사선 차폐 실험에 사용된 측정은 광자극선량계(Optically Stimulated Luminescence: OSL)를 이용하였다. 감마선 조사 시간은 300 s로 하여 6 Gy를 조사하였다. 그리고 계측값에 대한 정확성을 위해 동일한 조건에서 3번 반복하여 측정된 값을 이용하여 투과율의 평균값을 계산하였다. 감쇠계수 도출은 식(4.1.1)를 사용하였다.

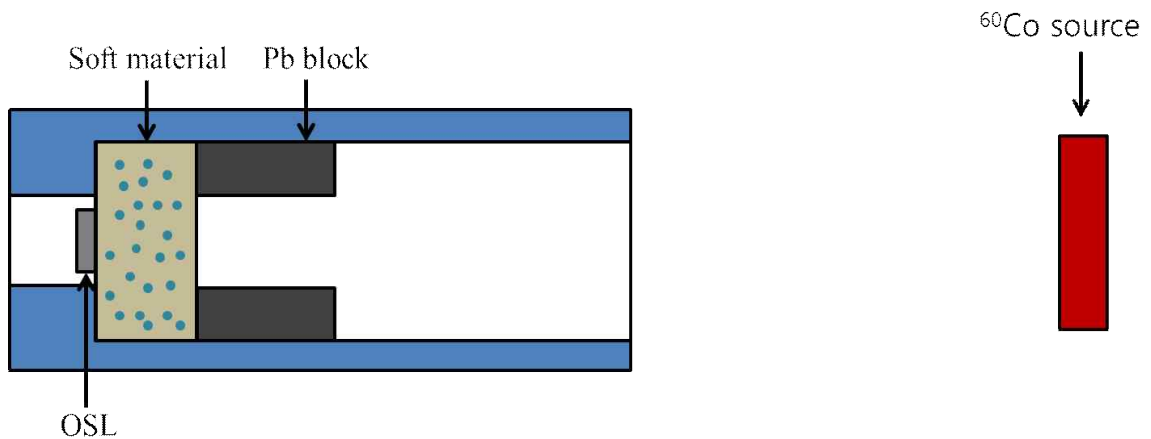


그림 4.1.2 ^{60}Co 감마선 차폐 실험 측정 실험장치 개략도

2. Cs-137에 대한 연성재료 감마선 차폐 실험 결과

하이드로젤에 대한 감마선 차폐 투과율을 정확하게 측정하기 위해서 그림 4.1.1와 같은 실험 장치를 배치하여 진행하였다. 납 차폐체 한쪽에는 선원을 밀착하고, 다른 한쪽에는 시료물질을 밀착하여 선원으로부터 나오는 감마선을 측정한다. 사용한 감마선원은 Cs-137(0.662 MeV)를 이용하여 감마선 차폐실험을 진행하였다. 차폐 시료는 순수 하이드로젤과 마이크로미터 크기의 산화금속 분말인 철, 텅스텐 납을 이용하여 제작하였다. 각 시편별 5 mm씩 두께가 증가할수록 6~18%정도로 투과율이 감소하였다. 산화납이 함유된 하이드로젤이 가장 낮은 투과율인 37.97%가 측정되었다. 이를 보면 하이드로젤에 들어간 금속분말의 원자번호가 증가할수록 차폐 성능도 같이 향상되는 것을 확인하였다. 그림 4.2.1은 하이드로젤 감마선 투과율 기울기를 그래프로 나타낸 것이다. 우선 그림 4.2.1에서 세로축을 투과율에 대한 로그 스케일로 하고 가로축을 두께에 대한 선형 스케일로 하여 투과율 값을 바탕으로 선형회귀분석을 통해 감쇠계수를 도출하였다. pure는 순수 하이드로젤을 나타내는 것이고 나머지 Fe_2O_3 , WO_3 , PbO_2 는 하이드로젤에 들어간 금속 산화물들을 나타낸 것이다. 또한, 그림 4.2.2에는 오차를 분석하기 위해서 금속분말 함유 및 두께 증가에 따른 계측에 있어서 평균값과 표준편차를 그래프로 나타내었다. 데이터들에 대한 표준편차가 크게는 11.42까지 나왔으나 이 경우를 제외하고는 데이터 표준편차 평균이 3.44로 데이터 편차가 크지 않은 것을 확인하였다. RF 열플라즈마를 이용하여 합성한 붕화 티타늄 나노분말을 함유한 연성재료를 제작하여 감마선 차폐 실험을 진행하였고, 두께 증가에 따른 투과율을 그림 4.2.4에 나타내었다. 이 또한, 그림 4.2.1와 동일하게 x축을 선형으로 나타내고 y축은 로그 스케일로 나타내었다. 연성재료에 함유된 붕화 티타늄의 함량은 일반 산화금속분말 함량보다 작게 들어갔다. 붕화티타늄 나노분말에 함량은 30 ml기준으로 TiB_2 nanoparticle-1은 2g, TiB_2 nanoparticle-2은 5g이 함유되었다. TiB_2 기준으로 몰 비로 환산하였을 때 최대 0.07 mol이 함량되었다. 그럼에도 불구하고 산화철이 함유된 연성재료 시편과 비슷한 투과율과 감쇠계수를 값을 보여주었다. 나노분말이 함유한 연성재료를 만드는 과정은 일반

마이크로 크기의 금속분말이 함유한 연성재료를 만드는 것보다 기술적인 면에서 많은 연구와 시간이 투자되어야 한다. 그리고 방사선 차폐에 효과적인 물질을 만들기 위해서는 원자번호가 높은 물질을 이용하여 붕화금속 나노분말을 합성해야 한다. 그림 4.2.5은 투과율 값을 바탕으로 선형회귀분석을 통해 얻은 각 시편별 감쇠계수 수치를 나타낸 그래프이다. 산화납이 함유된 하이드로젤이 가장 높은 감쇠계수로 0.296 cm^{-1} 를 기록하였고, 순수 하이드로젤, 붕화 티타늄, 산화철, 산화텅스텐이 각각 0.216 , 0.238 , 0.246 , 0.251 cm^{-1} 로 측정되었다.

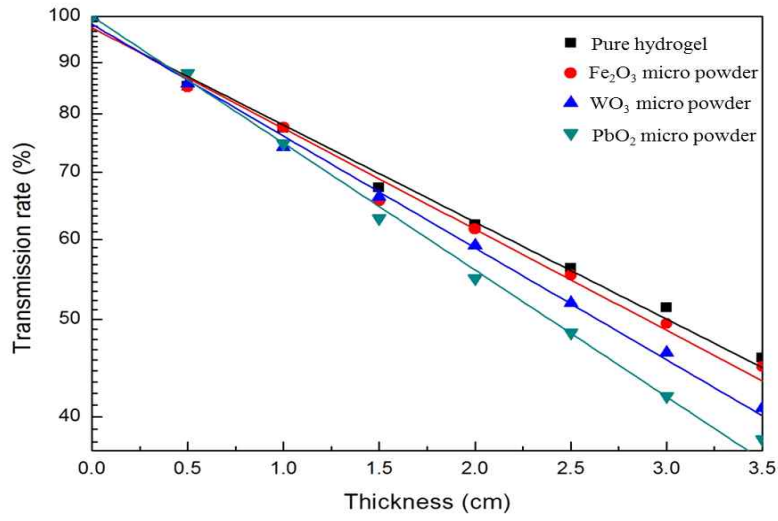


그림 4.2.1 마이크로 크기의 금속분말이 함유된 연성재료에 대한 감마선 투과율 기울기 그래프

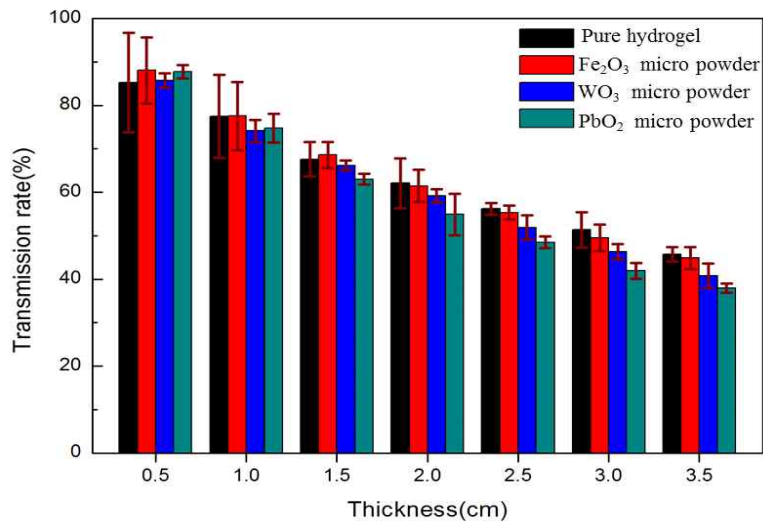


그림 4.2.2 마이크로 크기의 금속분말이 함유된 연성재료 두께별 감마선 투과율 및 표준편차 그래프

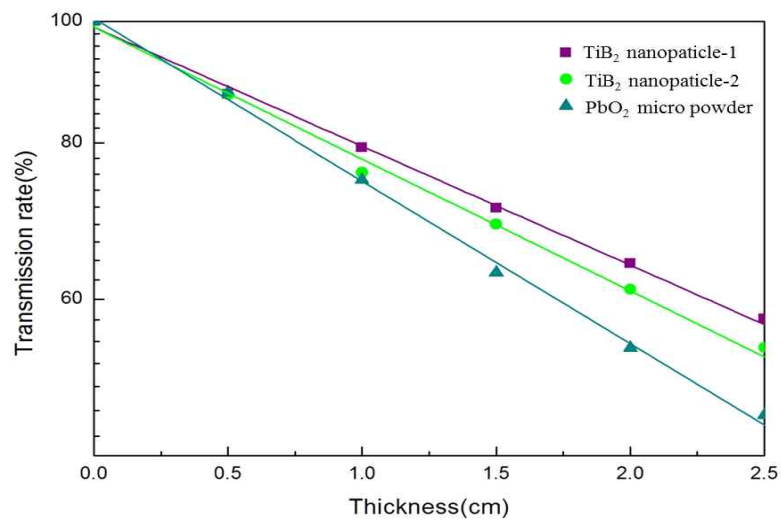


그림 4.2.3 붕화티타늄 나노입자와 산화납이 함유된 연성재료에 대한 감마선 투과율 기울기 그래프

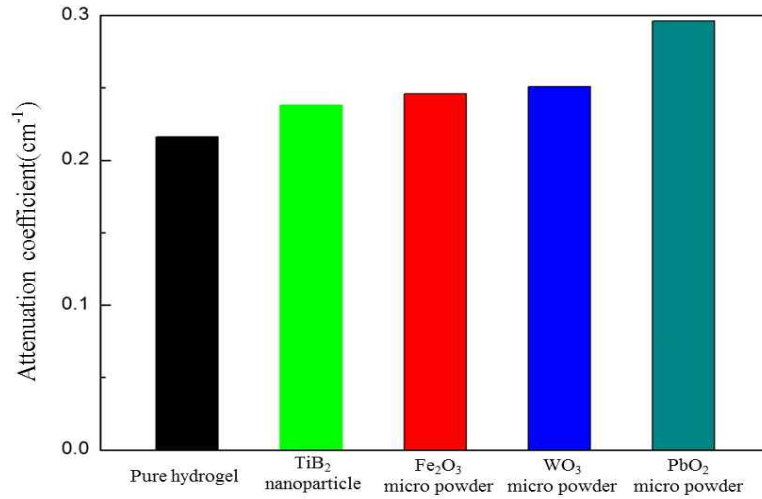


그림 4.2.4 Cs-137에 대한 나노 및 마이크로 분말이 함유된 연성재료의 감쇠계수

표 4.2.1 Cs-137에 대한 나노 및 마이크로 분말이 함유된 연성재료의 감쇠계수

Sample	Pure hydrogel	TiB ₂ nanoparticle	Fe ₂ O ₃ micro powder	WO ₃ micro powder	PbO ₂ micro powder
감쇠계수 (cm ⁻¹)	0.216	0.238	0.246	0.251	0.296

3. Co-60에 대한 연성재료 감마선 차폐 실험 결과

하이드로젤에 대한 Co-60 감마선 차폐 실험을 측정하기 위해서 그림 4.1.2와 같은 실험 장치를 배치하여 진행하였다. 하이드로젤 한쪽에는 OSL을 밀착하고, 다른 한쪽에는 납 블록을 밀착시켜 납 블록을 통과하여 진행되는 방사선에 대하여 차폐 실험을 진행하였다. 사용한 감마선원은 제주대학교 원자력과학기술연구소에서 보유하고 있는 Co-60(1.173, 1.322 Mev) 고에너지 감마선원을 이용하였다. 차폐 시료는 마이크로미터 크기의 산화금속 분말인 철, 텅스텐, 납을 함유된 하이드로젤을 제작하였다. 각 시편 두께를 35 mm로 고정하여 차폐 실험을 진행하였다. 실험결과 산화납이 함유된 하이드로젤이 가장 낮은 투과율인 52.94%가 측정되었다. 이를 보면 하이드로젤에 들어간 금속분말의 원자번호가 증가할수록 차폐 성능도 같이 향상되는 것을 확인하였다. 그리고 나머지 산화철, 텅스텐에 투과율은 62.25, 55.39%가 측정되었다. 한 두께에 대한 감쇠계수를 도출하기 위해서 식(4.1.1)를 사용하였다. 각 시편에 대한 감쇠계수를 도출한 결과 그림4.3.1와 표4.3.1에 순수 물질인 Al, Sn에 대한 감쇠계수[31] 값과 함께 비교하여 그래프에 나타내었다. 연성재료 시편 중 가장 높은 감쇠계수 값은 산화납이 함유된 하이드로젤로 0.181 cm^{-1} 가 나왔다. Cs-137에 대한 차폐 실험결과와 비교해 보았을 때 감마선 에너지가 증가함에 따라 차폐성능은 떨어지는 것을 확인하였다.

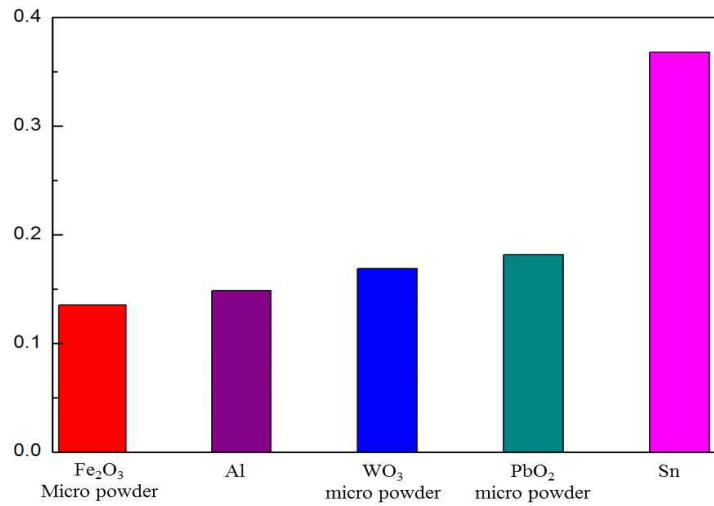


그림 4.3.1 Co-60에 대한 금속 및 마이크로 분말이 함유된 연성재료의 감쇠계수

표 4.3.1 Co-60에 대한 금속 및 마이크로 분말이 함유된 연성재료의 감쇠계수

Sample	Fe ₂ O ₃ micro powder	Al	WO ₃ micro powder	PbO ₂ micro powder	Sn
감쇠계수 (cm ⁻¹)	0.135	0.148	0.168	0.181	0.368

V. 결 론

본 연구를 통하여 기존에 개발된 연성재료 보다 신축성이 뛰어나며 방사선 차폐에도 효과적인 붕화금속 나노분말이 함유된 연성재료 개발 연구를 수행하였다. RF 열플라즈마 전산해석을 통하여 나노입자 합성의 최적의 조건을 분석하였고, 합성된 붕화금속 나노분말을 합성 및 특성 분석이 이루어졌다. 그리고 개발된 연성재료에 대한 정략적인 감쇠계수를 도출할 수 있는 방사선 차폐 실험 측정 장치를 개발하였다.

나노입자 합성을 위한 RF 플라즈마 운전조건에 대한 전산해석을 통해 최적의 나노입자 합성 조건을 분석하였고, 이를 토대로 붕화금속 나노분말을 합성하는데 있어 최적의 RF 플라즈마 시스템의 설계 및 운전 조건을 제시할 수 있다. 전산해석을 통한 RF 플라즈마 시스템의 설계조건은 토치 반경 25 mm, 코일 감은 수 5회일 때, 고온영역이 토치 중심부에 넓게 분포하는 것을 확인하였다. 운전조건으로는 센트럴 가스를 20 L/min으로 고정하고 쉬스가스는 50~60 L/min이 붕화금속 나노분말을 합성하는 최적의 운전조건을 제시하였다.

기능성 분말을 함유한 연성재료에 대한 감마선 차폐 실험 결과 Cs-137 감마선에 대해 산화납이 함유된 하이드로젤이 가장 높은 감쇠계수 0.296 cm^{-1} 가 나왔다. 그리고 붕화금속 나노분말이 함유된 시편은 일반 산화금속 분말보다 함유된 양이 낮지만 산화철이 함유된 시편과 비슷한 수준에 차폐성능을 보여 주었다. Co-60 감마선 차폐 실험도 동일하게 산화납이 함유된 하이드로젤이 가장 낮은 투과율과 높은 감쇠계수 값인 0.181 cm^{-1} 를 기록하였다. 이는 일반 순수 물질인 Al 보다 높은 차폐 성능을 가지고 있는 것을 확인하였다.

개발되는 붕화금속 나노입자가 함유된 연성 재료를 이용하여 중성자선과 감마선을 효과적으로 차폐할 수 있는 연성재료 개발이 이루어 질 것으로 기대된다. 그리고 기존에 마이크로미터 입자 금속분말을 붕화금속 나노분말로 대체하여 보다 많은 농도가 하이드로젤에 함유 하도록 하여 방사선 차폐 성능을 더욱 향상시키는 연구가 진행되어야 한다.

본 연구를 통해 개발된 연성재료는 항공우주 분야에서 우주선으로부터 고가의

전자기기 등을 보호하는데 활용될 수 있으며, 원자력 산업에 종사하는 사람들이 착용할 방사선 차폐 효율이 향상된 의복 제작 등에 다양하게 활용 될 수 있다. 그리고 이 연성재료는 두께와 상관없이 연성을 띄고 있으므로, 이는 원자력 발전에서 발생하는 사용 후 핵연료의 영구저장에서 기존 차폐재와 함께 사용되어 운송 시 발생하는 진동과 매우 장시간 저장되는 처분장의 지각변동과 같은 외부환경 변화에 대응하여 안전하게 핵물질을 보관 할 수 있는 기능을 할 수 있다.

참고문헌

- [1] Qin-Hong Hu, Jian-Qing Weng, Jin-Sheng Wang, "Sources of anthropogenic radionuclides in the environment: a review", *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(2010), 426-437.
- [2] Benedikta Lukšienė, Danutė Marčiulionienė, Andrej Rožkov, Arūnas Gudelis, Elis Holm, Audronė Galvonaite, "Distribution of artificial gamma-ray emitting radionuclide activity concentration in the top soil in the vicinity of the Ignalina Nuclear Power Plant and other regions in Lithuania", *Science of the Total Environment*, 439(2012), 96-105.
- [3] Santhosh M. Malkapur, Harsharaj Satdive, Mattur C. Narasimhan, Narayana B. Karkera, P. Goverdhan, V. Sathian, "Effect of mix parameters and hydrogen loading on neutron radiation shielding characteristics of latex modified concrete mixes", *Progress in Nuclear Energy*, 83(2015), 8-12.
- [4] L. Bartoli, F. Becherini, F. Grazzi, M. Zoppi, "Surface scattering efficiency of some common materials for shielding pulsed neutron scattering instruments", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 608(2009), 360-362.
- [5] Vishwanath P. Singh, N.M. Badiger, J. Kaewkhao, "Radiation shielding competence of silicate and borate heavy metal oxide glasses: Comparative study", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 404(2014), 167-173.
- [6] Kulwinder Singh Mann, Asha Rani, Manmohan Singh Heer, "Shielding behaviors of some polymer and plastic materials for gamma-rays", *Radiation Physics and Chemistry*, 106(2015), 247-254.
- [7] Mehmet Erdem, Oktay Baykara, Mahmut Dogru, Fatih Kuluozturk, "A novel shielding material prepared from solid waste containing lead for gamma ray", *Radiation Physics and Chemistry*, 79 (2010), 917-922.
- [8] 김재우 외, "초미세보론 분산 경량 고효율 폴리머기지 방사선 차폐재 개발", 한국원자력연구원, 2009.
- [9] Jiheon Jun, Jaewoo Kim, Yeonjoo Bae, Young Soo Seo, "Enhancement of

dispersion and adhesion of B₄C particles in epoxy resin using direct ultrasonic excitation”, *Journal of Nuclear Materials* 416 (2011), 293-297.

[10] Duckbong Seo, Jaewoo Kim, Phil-Hyun Kang, Chang Eui Seo, Jun-Hyung Lee, Hyun-Jin Kim, “Enhancement of flame retardancy and mechanical properties of HDPE/EPM based radiation shielding composites by electron beam irradiation”, *Journal of Nuclear Materials*, 429(2012), 99-104.

[11] Yiping Huang, Weijiang Zhang, Lu Liang, Jiao Xu, Zhou Chen, “A “Sandwich” type of neutron shielding composite filled with boron carbide reinforced by carbon fiber”, *Chemical Engineering Journal*, 220(2013), 143-50.

[12] Yoshinori Sakurai, Akira Sasaki, Tooru Kobayashi, “Development of neutron shielding material using metathesis-polymer matrix”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 522(2004), 455-61.

[13] Ji Wook Shina, Jang-Woo Lee, Seunggun Yu, Bum Ki Baek, Jun Pyo Hong, Yongsok Seo, Woo Nyon Kim, Soon Man Hong, Chong Min Koo, "Polyethylene/boron-containing composites for radiation shielding", *Thermochimica Acta*, 585(2014), 5-9.

[14] Le Chang, Yan Zhang, Yujian Liu, Jun Fang, Weilin Luan, Xiangmin Yang, Weidong Zhang, "Preparation and characterization of tungsten/epoxy composites for γ -rays radiation shielding", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 356-357(2015), 88-3.

[15] Shruti Nambiar, Ernest K. Osei, John T. W. Yeow, “Polymer Nanocomposite-Based Shielding Against Diagnostic X-rays”, *Journal of Applied Polymer Science*, 127: 4939-4946, 2013.

[16] M.Z. Botelho, R. Kunzel, E. Okuno, R.S. Levenhagen, T. Basegio, C.P. Bergmann, "X-ray transmission through nanostructured and microstructured CuO materials", *Applied Radiation and Isotopes*, 69(2011), 527-530.

[17] Jeong-Yun Sun, Xuanhe Zhao, Widusha R. K. Illeperuma, ovijit Chaudhuri, Kyu Hwan Oh, David J. Mooney, Joost J. Vlassak and Zhigang Suo, “Highly stretchable and tough hydrogel”, *Nature* 480(2012), 133-136.

- [18] Kong, H. J., Wong, E.& Mooney, D. J. "Independent control of rigidity and toughness of polymeric hydrogels.", *Macromolecules* 36(2003), 4582-4588.
- [19] Jackson, A. P. "Measurement of the fracture toughness of some contact lens hydrogels", *Biomater.* 11(1990), 403-407.
- [20] Yu, Q. M., Tanaka, Y., Furukawa, H., Kurokawa, T. & Gong, J. P. "Direct observation of damage zone around crack tips in double-network gels". *Macromolecules* 42(2009), 3852-3855.
- [21] Min Sik Choi, Dong Uk Kim, Sooseok Choi, Bo-Hyun Chung, S.J. Noh "Iron reduction process using transferred plasma", *Current Applied Physics* 11(2011), 82-86.
- [22] Sooseok Choi, Hyunseok Lee, Sungwoo Kim, Sang Hee Hong "Thermal Plasma Analysis for PFCs Pyrolysis Process on a Large Scale", *Korean Physical Society* 55(5), 1819-1824.
- [23] Sooseok Choi, Sang Hee Hong, Hyun Seok Leea, Takayuki Watanabe "A comparative study of air and nitrogen thermal plasmas for PFCs decomposition", *Chemical Engineering Journal* 185-186(2012), 193-200.
- [24] Sooseok Choi, Jin Myung Park, Won Tae Ju, Sang Hee Hong "Effects of Constrictor Geometry, Arc Current, and Gas Flow Rate on Thermal Plasma Characteristics in a Segmented Arc Heater", *Journal of Thermal Science and Technology* 6(2), 210-218.
- [25] Hyun Seok Lee, Sooseok Choi, Sung Woo Kim, Sang Hee Hong "Crystallization of amorphous silicon thin film by using a thermal plasma jet", *Thin Solid Films* 517(2009), 4070-4073.
- [26] 홍상희 외, "산업용 열플라즈마 발생기의 최적 설계제작 기술", 서울대학교, 2005.
- [27] K. C. Karki, "A Calculation Procedure for Viscous Flows at All Speeds in Complex Geometries," Ph. D. Dissertation, University of Minnesota, Minneapolis, USA, 1986.
- [28] S. R. Mathur and J. Y. Murthy, "A Pressure-Based Method for Unstructured Meshes", *Numerical Heat Transfer Part B* 31, 195 (1997).

- [29] 정원정, “감마선 질량감쇠계수 측정에 관한 연구”, 동아대학교, 2000.
- [30] J.H. Hubbell, "Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 KeV to 20 MeV" Int. J. Appl. Radiat. Isotop., 33(11), 1269-1290(1982).
- [31] J.H. Hubbell and S. M. Seltzer, “Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy- Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements $Z = 1$ to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetrist Interest“, Radiat. Phys. Division, PML, NIST(1995).

감사의 글

한편의 논문을 마무리하는 이 시점에서 부족한 논문이지만, 오늘이 있기까지 많은 도움을 주신 고마운 분들에게 감사의 마음을 전합니다.

먼저, 많이 부족한 저를 위해 항상 아낌없는 조언과 격려를 해주신 최수석 교수님께 진심어린 존경과 깊은 감사를 드립니다. 그리고 논문심사에서 아낌없는 조언을 해주신 박재우 교수님, 이연건 교수님께도 감사드립니다. 또한, 학부생부터 시작하여 대학원까지 6년 동안 수업 등을 통한 많은 배움을 주신 이윤준 교수님, 이현주 교수님, 천원기 교수님, 김남진 교수님께 감사드립니다.

열플라즈마 실험실이라는 공간에서 2년 동안 많이 부족하고, 잘해주지 못한 선배이지만 밑에서 잘 따라준 우리 덕희, 학과 행사와 실험실 과제하느라 힘들어한 태승, 용희, 항상 밝고 긍정적인 주영이, 실험실에 없으면 안 될 일꾼 문경이, 평생 열플라즈마 실험실 막둥이 민아에게 매우 고맙다는 말을 하고 싶습니다. 특히, 내 옆에서 귀찮은 일, 쉬운 일 마다하지 않고 실험실 일을 도와준 병일에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 학부 때부터 대학원까지 힘든 순간 고민 상담과 함께 격려와 조언을 해주신 경호형, 용현이형, 민규형, 승현이형 감사합니다. 선배로써 많이 챙겨주지 못해 미안한 지훈이와 소원에게도 고맙다는 말을 하고 싶습니다. 매일 나 때문에 화나지만 계속 옆에 있어 주는 제원에게도 고맙다는 말을 하고 싶습니다. 그리고 지금 각자에 위치에서 열심히 달려가고 있는 친구들 기홍, 윤석, 승률, 재정, 영훈, 지용에게 고맙다는 말과 응원의 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 언제나 뒤에서 한결같은 보살핌과 사랑으로 저를 키워주신 부모님께, 마음은 간절했지만 쑥스러워 말하지 못했던 사랑한다는 말을 하고 싶습니다.