



사단
법인 한국원자력학회
KOREAN NUCLEAR SOCIETY

Characterization of plasma arc piercing process for STS304

2021.05.12

Dong-Hyun Kim^{a,b}, Dae-Won Cho^{a,*}, Jeong Suh^a, Kwang-Deok Choi^a, Ryoan-Han Kim^a, Tae-Hyung Na^c

^a*Busan Machinery Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials*

^b*Mechanical Engineering, Pusan National University*

^c*Central Research Institute Korea Hydro and Nuclear Power Co. Ltd, Daejeon*

dwcho@kimm.re.kr



한국기계연구원
KOREA INSTITUTE OF MACHINERY & MATERIALS

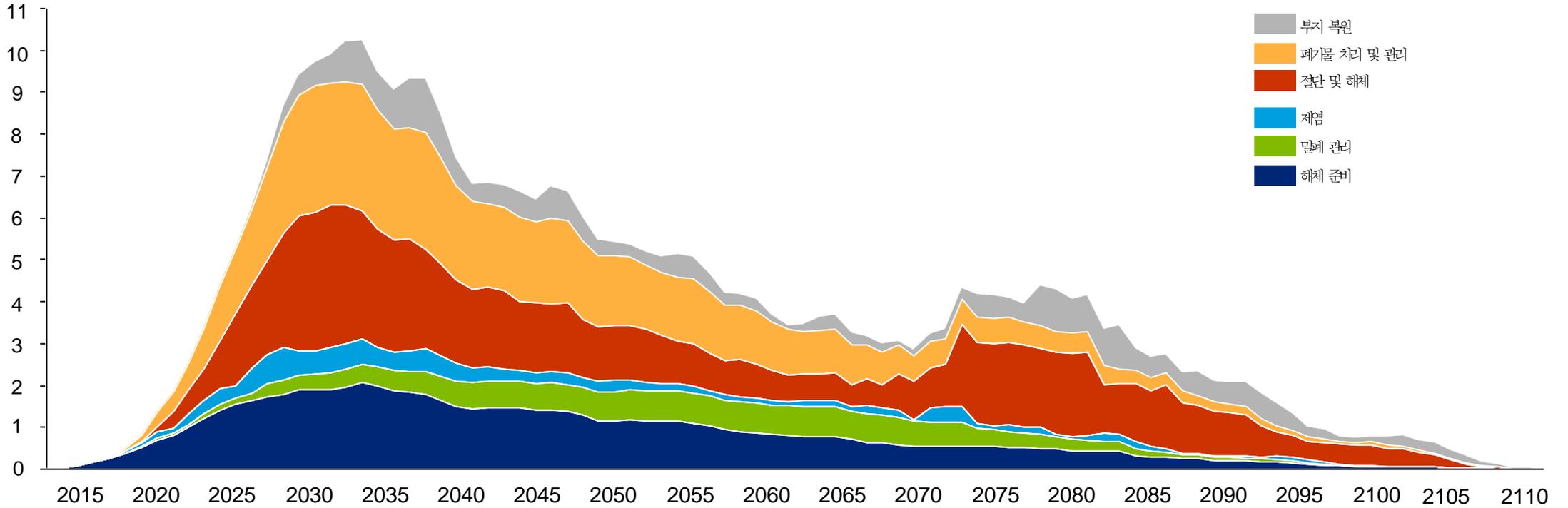
목차

1. 연구 배경
2. 실험 계획
3. 실험 결과
4. 결 론

연구 배경

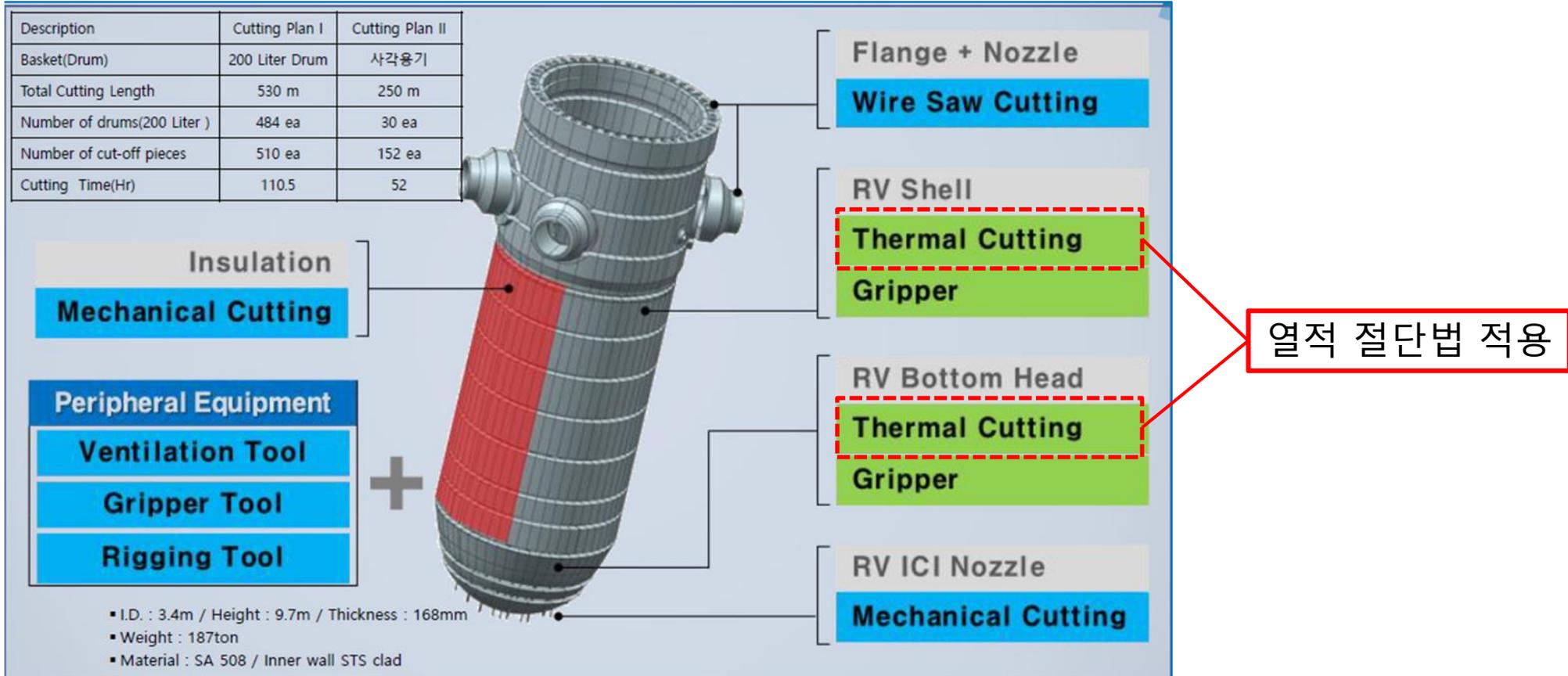
주요 공정 단계에 따른 원자력 발전소 해체 시장 규모 예측

(단위: 조원)



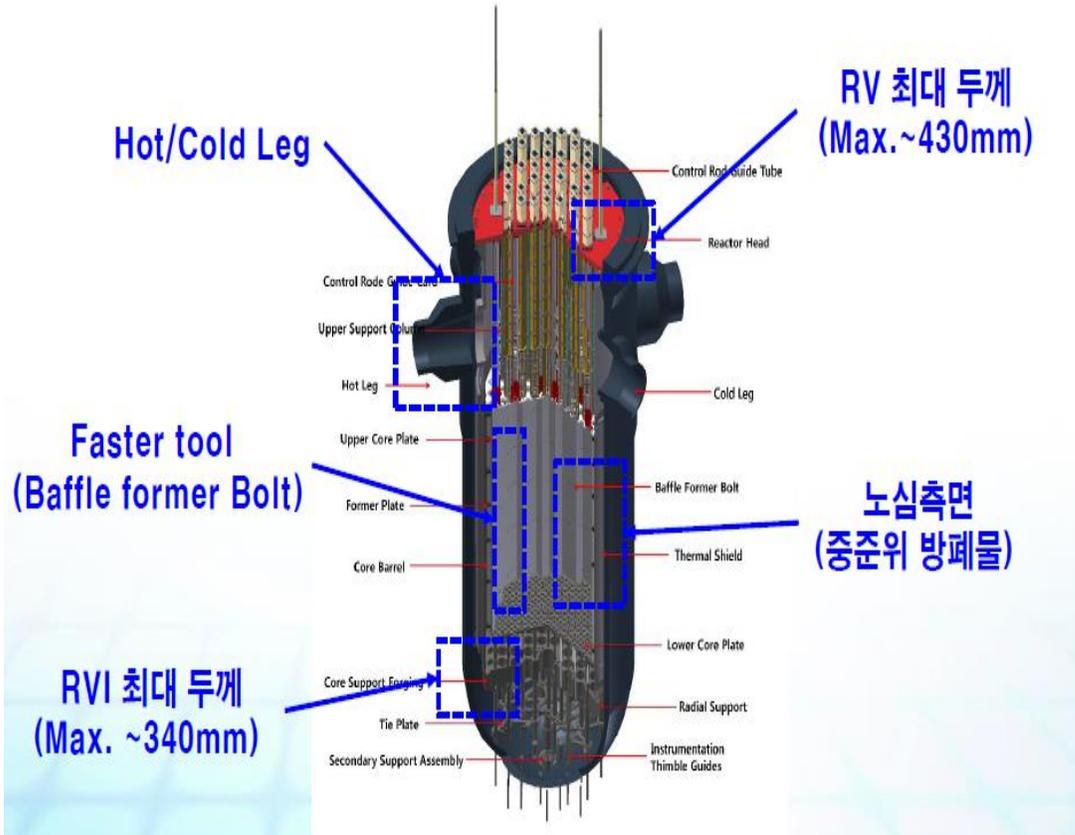
출처: IAEA-PRIS Database, OECD/NEA, NRC, NDA, 각국 원전 운영사 Official Website & Publications, News Clipping; Deloitte Analysis

연구 배경 – example (RV)



<KHNP, 2nd International Workshop on Nuclear Decommissioning of Aging NPPs In Cooperation with IAEA>

연구 배경 – example (RVI)



구조물		재질	Mass (kg)	Volume (m ³)	방사능 준위	
노심 측면	Baffle plate	STS-304	9,523	76.40	중준위	
	Barrel	STS-304	30,472	244.48	중준위	
	Baffle former	STS-304	2,612	20.96	중준위	
	Thermal shield	STS-304	23,697	190.13	중준위	
내부 구조물	노심 상부	Upper support assembly	STS-304	6,153	49.37	극저준위
		Upper core plate	STS-304	1,534	12.31	저준위
		Guide tube	STS-304	8,419	67.55	극저준위
	Upper support column	STS-304	20,713	166.18	극저준위	
	Thermo-couple column	STS-304	45	0.36	극저준위	
	Hold down spring	STS-304	618	4.96	극저준위	
	노심 하부	Lower core plate	STS-304	1,682	13.50	저준위
Core support plate		STS-304	4,192	33.63	극저준위	
Secondary core support plate		STS-304	1,284	10.30	극저준위	
Secondary core support column		STS-304	7,776	62.39	극저준위	
Core support tube		STS-304	665	5.34	극저준위	
압력용기		Carbon Steel	185,397	1,465	저준위	

연구 배경 – Cutting method

Category		Methods
Thermal	Chemical Energy Sources	Oxy-fuel cutting
		Metal powder assisted oxy-fuel cutting
		Oxygen lance
	Electrical Current Sources	Plasma cutting
		Oxy-arc cutting
		Electric arc water jet cutting
		Electric discharge machining
		Contact arc metal cutting
	Laser beams	Contact arc metal drilling
		Laser beam cutting
Oxygen assisted laser beam cutting		
Mechanical	X	Laser sublimation cutting
		Shearing
		Sawing
		Grinding
		Explosive cutting
		Orbital cutters
		Milling
	Hydraulic cutting	Cutting and de-coating with pure water jets
		Cutting with abrasive water jets

열적 절단 시 많은
2차 폐기물 발생



2차 폐기물 발생량에
대한 분석 필요



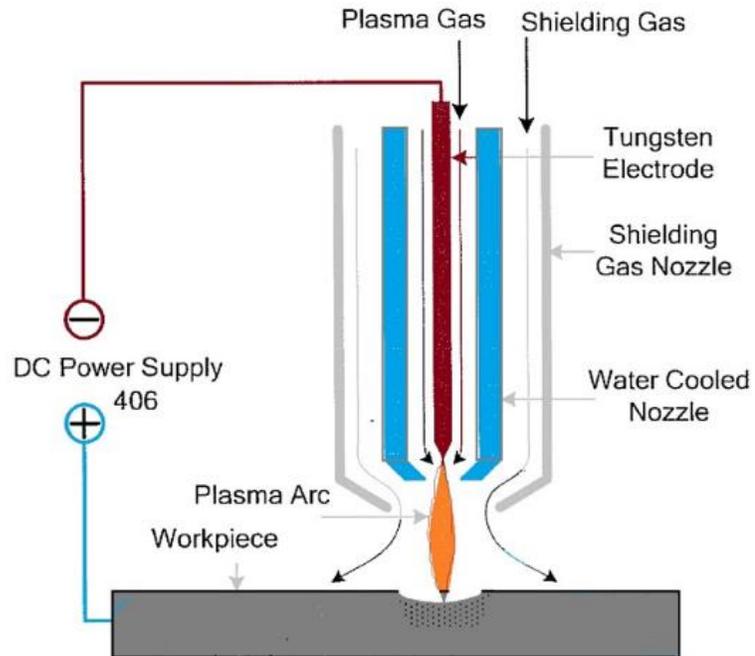
물리적인 현상에 대한
이해 필요

연구배경 – Plasma arc Cutting

◆ 플라스마 아크 절단

플라스마 절단 (Plasma Cutting)

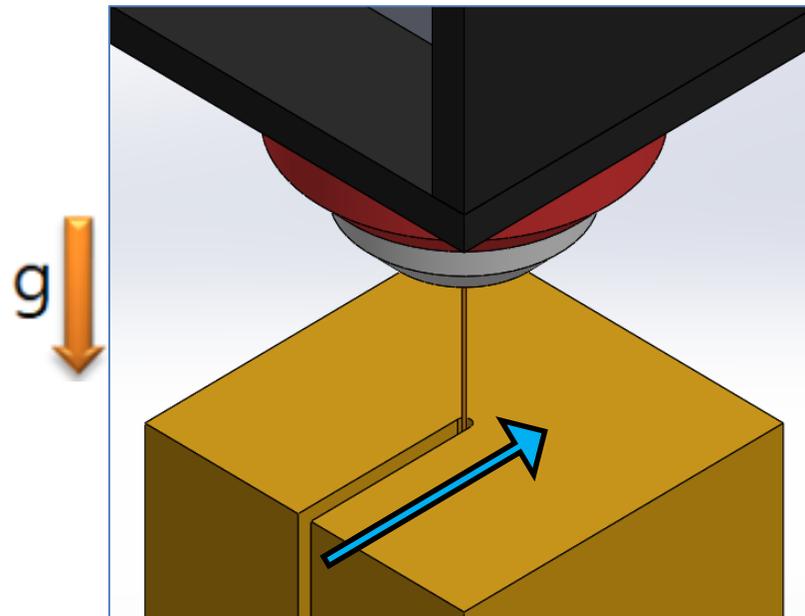
- 아크 열원을 절단부에 집중적으로 투사함으로써 절단할 재료를 용융 및 제거하는 절단 방법



PLASMA ARC MACHINING

끝단부 절단 시작(Edge start)의 필요성

- 후판 절단의 경우 edge에서 절단시작하는 것이 절단 품질에 있어 좋음
- 절단 초기에 용융물을 불어내야 절단 효율 상승



연구배경 – Plasma arc Piercing

◆ 플라즈마 아크 피어싱

플라즈마 아크 피어싱 (Plasma arc Piercing)

- 모서리가 확보 안되거나 절단 대상의 형상이 **복잡한** 경우 plasma cutting을 위해 **plasma piercing**을 수행

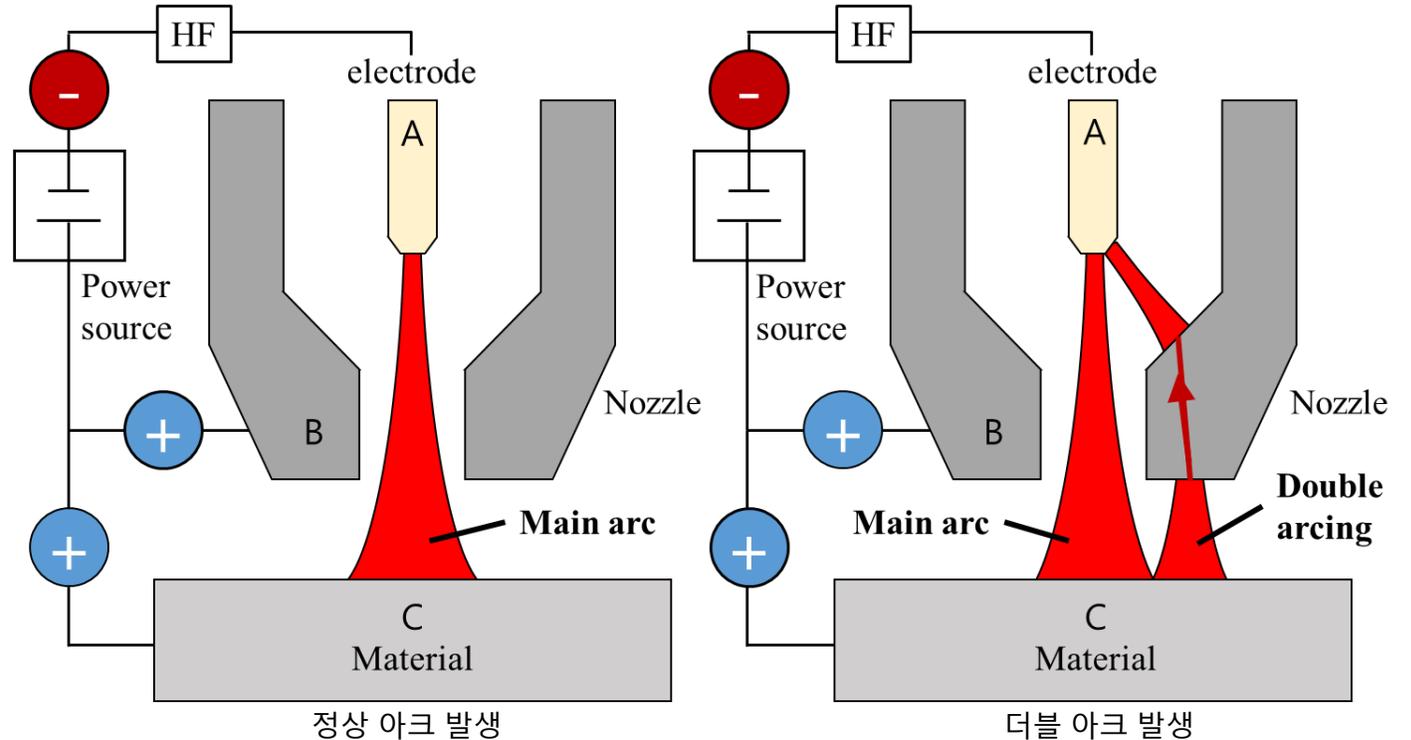


더블 아크 (Double Arcing, DA)

- Piercing 조건에 따라 더블 아크가 발생
- 더블 아크
 - 전극 파손
 - Piercing hole area 및 DA affected area 증가
 - Piercing 시간 증가



- 더블 아크 발생은 **공정 시간 증가 및 2차 폐기물 증가, 절단 품질 하락**을 의미



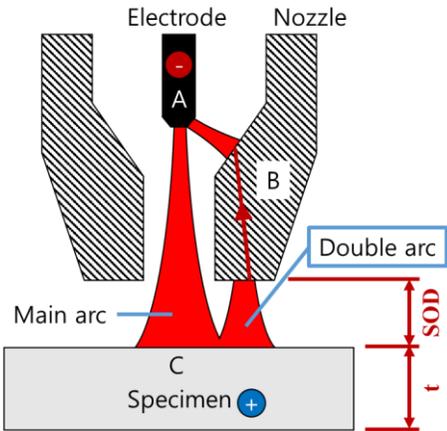
따라서 더블 아크 발생을 최소화 할 수 있는 최적의조건을 찾아야함

실험 계획

◆ 변수에 따라 플라즈마 아크 피어싱의 품질이 달라짐

- 노즐-시편 거리(SOD), 노즐 type, 전류, 시편 두께

Ex) 노즐-시편 거리 시편두께



노즐-시편 거리 ↓ & 시편 두께 ↑
→ 낮은 절단 품질

Ex) Nozzle shape



Nozzle decides the cutting gas flow

✓ Current

- Plasma current decide the arc heat source, arc pressure, which is the dominant physical model in plasma cutting process

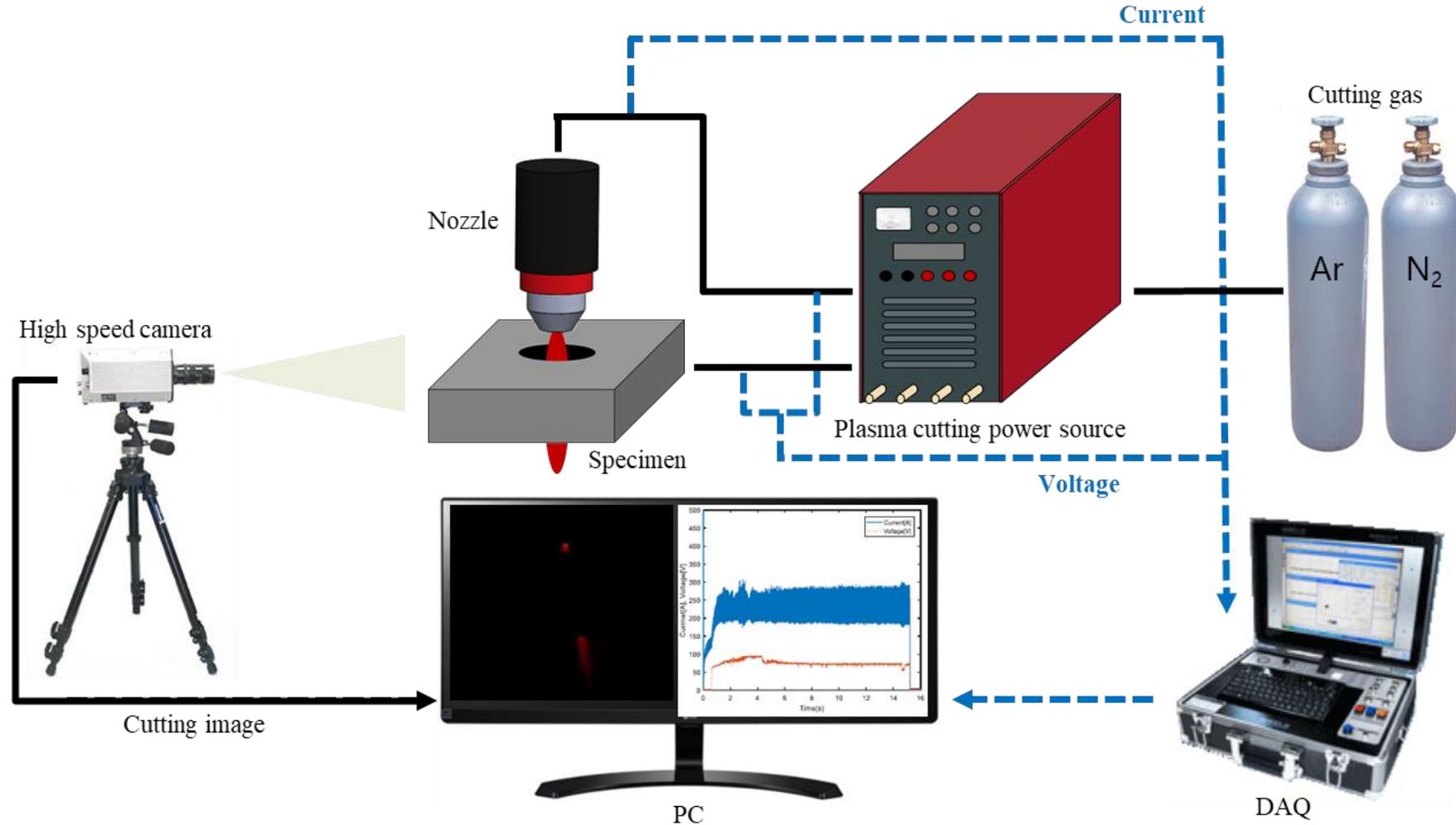
$$\eta_A q_A(x, y) = \eta_A \frac{VI}{2\pi r_A^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2r_A^2}\right) \quad p_A \cong \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 r_A^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_A^2}\right)$$

Arc heat source

Arc pressure

노즐-시편 거리와 전류, 시편 두께에 따라 아크가 시편 상단면에 미치는 영향을 연구

실험 계획 - 실험 장비 구성



실험 계획 – 결과 표

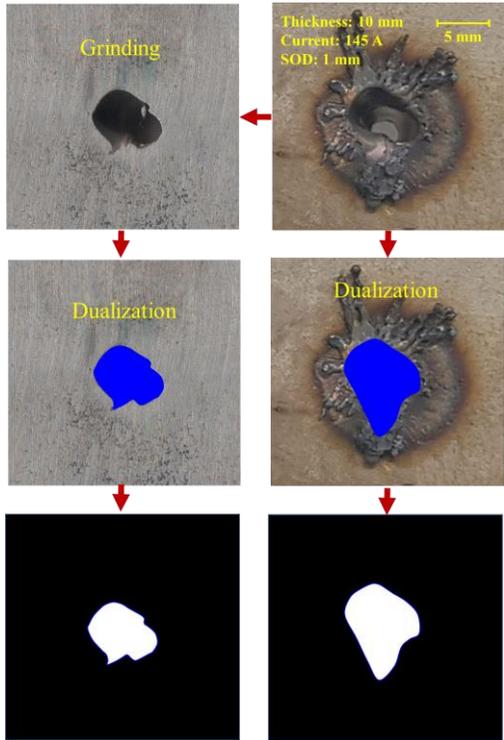
No	Variables			Results					
	Thickness (mm)	SOD (mm)	Current (A)	Area (mm ²)		P _T (s)	t _T (s)	DAT (s)	DAR (%)
				DA affected	Hole				
1	5	1	145	61.61	23.6	0.4	2.8	0.9	32.5
2	5	1	180	83.23	54.2	0.4	3.7	2	54.8
3	5	2	145	24	24.2	0.3	2	0.4	21
4	5	2	180	32.59	18.6	0.3	2	0.2	10.4
5	5	3	145	22.6	18.8	0.3	1.3	0	0
6	5	3	180	24.29	20.6	0.3	2	0	0
7	5	4	145	24.64	20.1	0.3	2	0	0
8	5	4	180	24.11	19.5	0.3	2	0	0
9	5	5	145	23.03	19	0.3	1.7	0	0
10	5	5	180	25.28	21	0.3	1.5	0	0
11	10	1	145	84.95	34	3	7.1	6.4	90.2
12	10	1	180	97.9	64.1	1.5	3.7	3.2	88.3
13	10	2	145	72.31	38.3	1.6	3	1.2	39.2
14	10	2	180	75.67	63.7	1.3	3	1.3	42.5
15	10	3	145	44.84	38.3	1.2	2.6	0.8	23.9
16	10	3	180	60.98	34.6	1.1	2.4	1	44.5
17	10	4	145	38.84	32.4	1.2	2.6	0.5	17.6
18	10	4	180	42.41	33.4	1	2.3	0.3	12.3
19	10	5	145	40.56	35.3	1	2.5	0.3	11.1
20	10	5	180	46.98	40.1	0.8	2.5	0.8	33.2

- Thickness
: 시편의 두께
- Stand-off distance(SOD)
: 시편과 노즐과의 거리
- Current
: Plasma Arc 설비에 입력한 전류값
- Area
: Arc에 의해 만들어진 시편 상단면의 구멍 면적 (더블 아크 영향부 및 홀 면적)
- Piercing time(P_T)
: 아크 점화 이후 시편 piercing까지 걸린 시간
- Total time(t_T)
: Arc가 유지된 총 시간
- Double Arc time(DAT)
: Double Arc가 유지된 총 시간의 합
- Double Arc Rate(DAR)
: $\frac{EDAT}{Total\ time} \times 100 (\%)$

실험 계획 – 데이터 측정

● 실험 결과 측정 방법

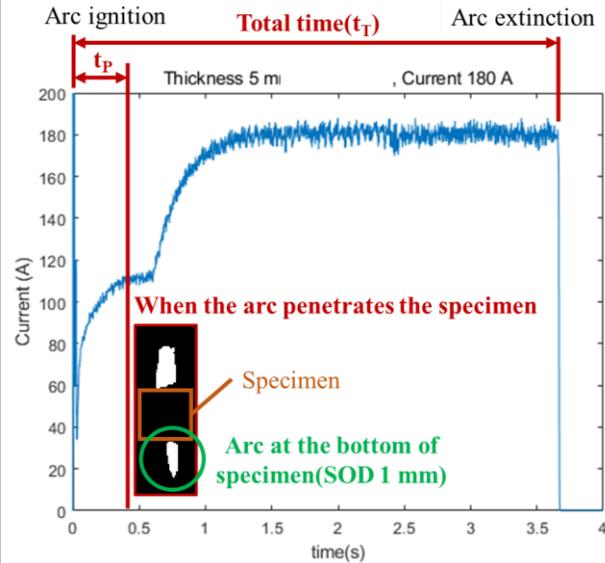
DA affected & Hole area 측정



(a) Hole area (b) DA affected area

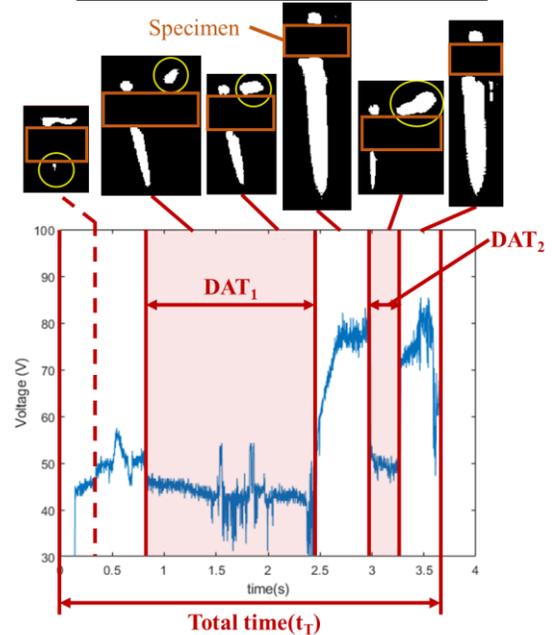
- ① 시편 상단면의 DA affected와 hole 촬영
- ② 촬영한 형상을 이원화 후 면적 계산

Piercing time & Total time 측정



- ① 계측 장비로 전류 · 전압 파형 측정
- ② 고속카메라로 아크 형상 촬영 후 영상처리
- ③ 영상처리한 아크 형상과 전류 · 전압 파형 동기화
- ④ 동기화한 정보로 Piercing time 및 Total time 측정

DA time & DA rate 측정

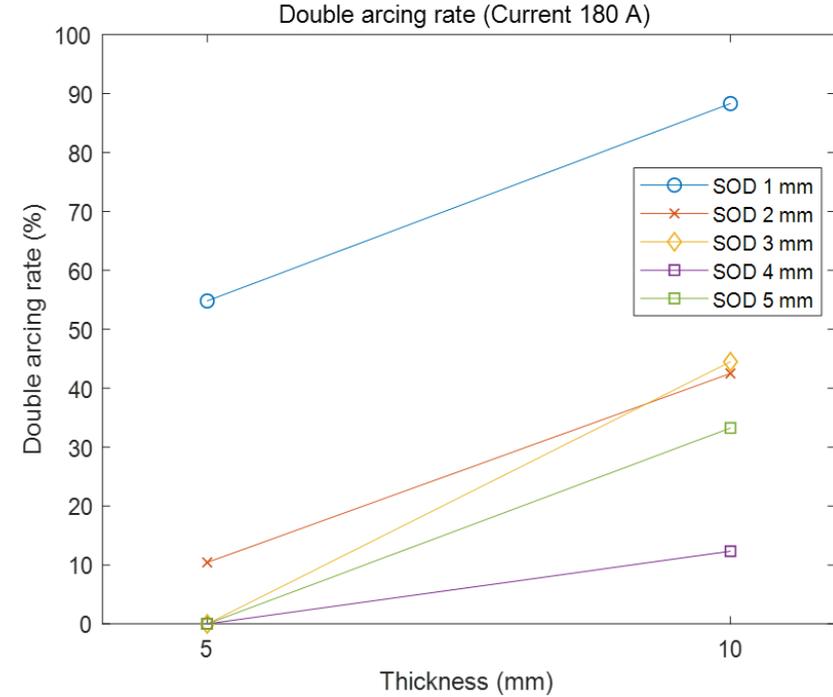
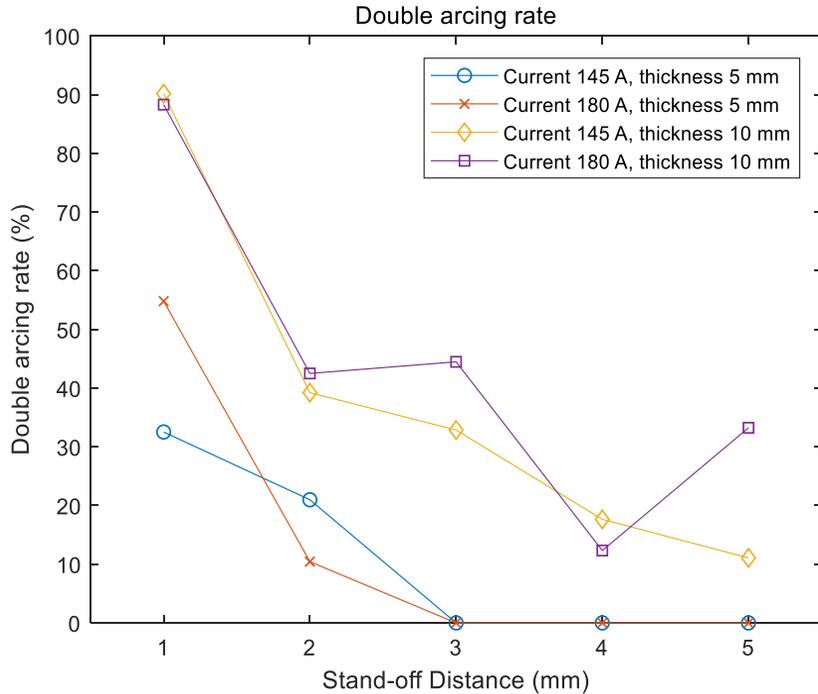


- ① 영상처리한 아크 형상과 전류 · 전압 파형 동기화(전압 강하 및 노이즈 발생 시 더블 아크 발생)
- ② $\frac{EDAT}{Total\ time} \times 100$ (%)과 같이 아크가 유지된 시간 동안 더블 아크가 발생한 시간을 측정

실험 결과

● 결과 분석-1

Double arcing rate 비교



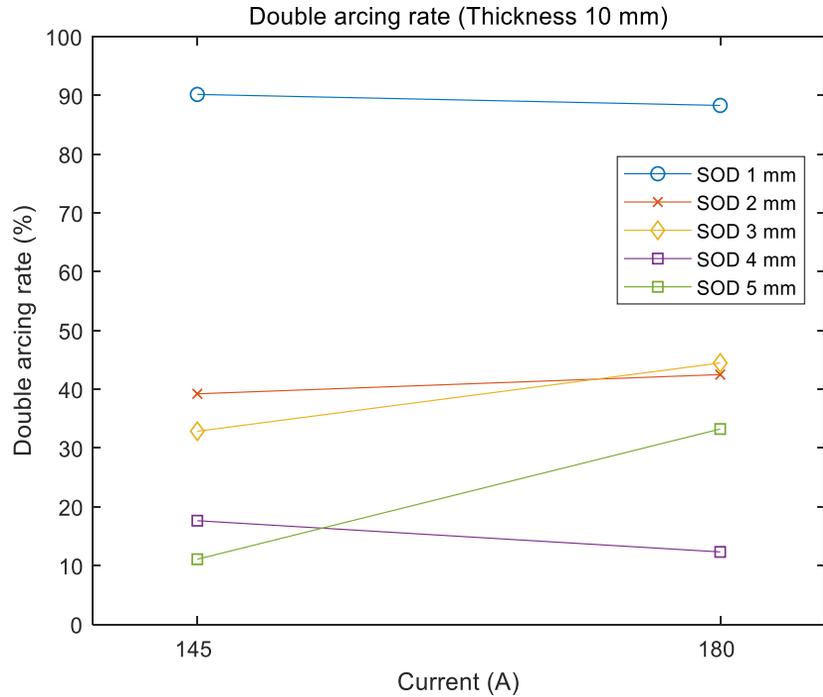
➤ Stand-off Distance ↓ → Double arcing rate ↑

➤ Thickness ↑ → Double arcing rate ↑

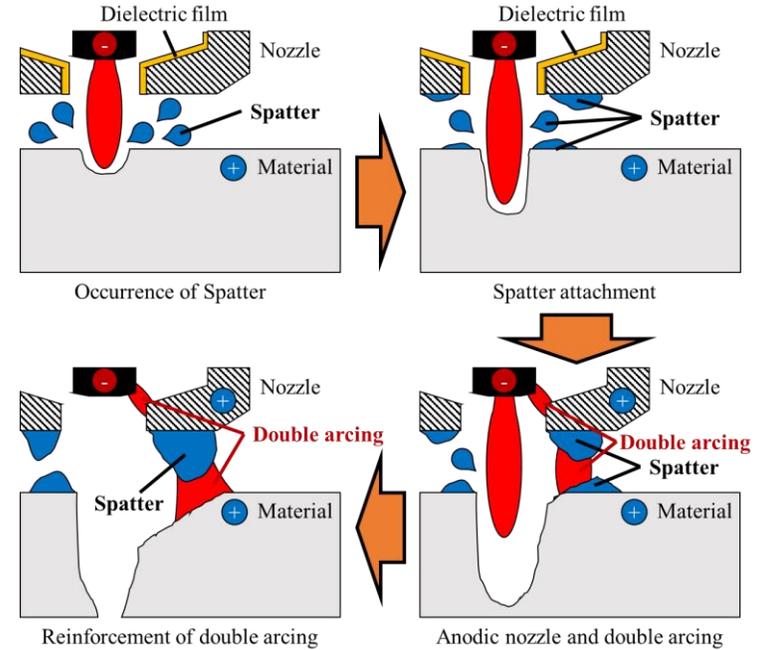
실험 결과

● 결과 분석-1

Double arcing rate 비교



- 전류 변화에 대한 Double arcing rate의 경향은 나타나지 않았음

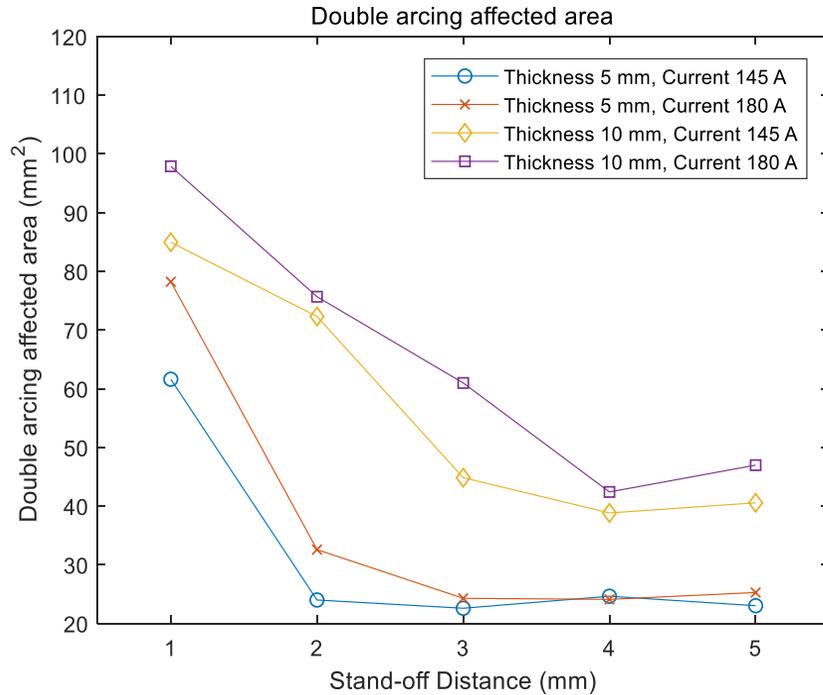


- Thickness ↑ → Spatter부착량 ↑
- Stand-off Distance ↓ → 노즐에 전류가 흐를 가능성 ↑
- 노즐에 전류가 통할 경우 **Double arcing 발생 가능성이 높아짐**

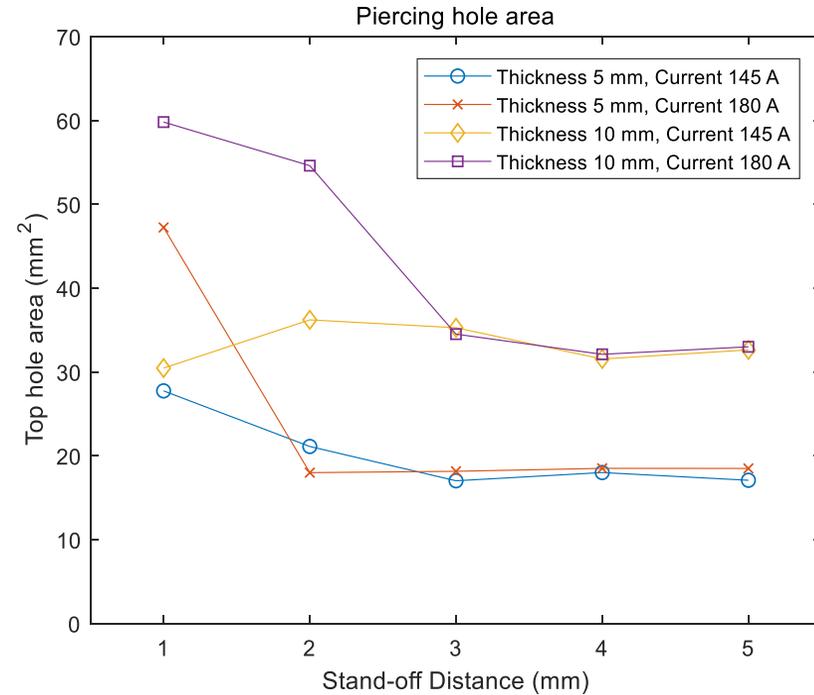
실험 결과

● 결과 분석-2

DA affected area & Hole area 비교



- Stand-off Distance ↓ → Double arcing rate ↑
➔ **DA affected area ↑**

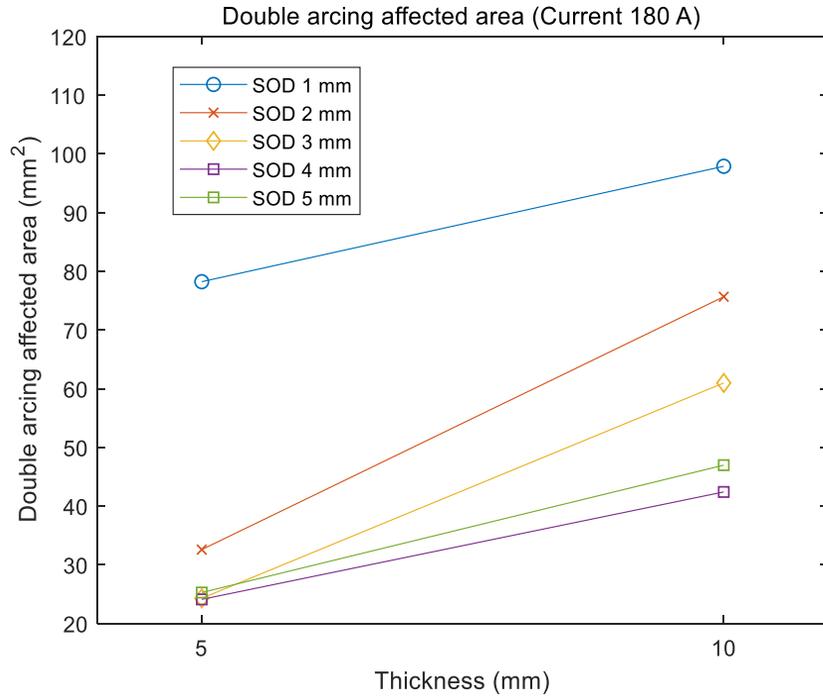


- Stand-off Distance ↓ → Double arcing rate ↑
➔ **Hole area ↑**

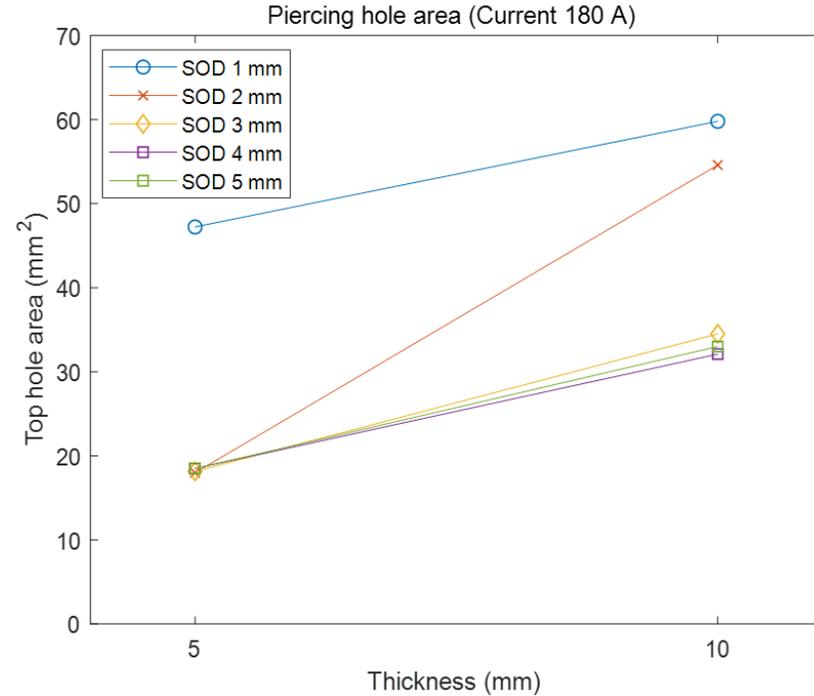
실험 결과

● 결과 분석-2

DA affected area & Hole area 비교



➤ Thickness ↑ → Double arcing rate ↑
➔ **DA affected area ↑**

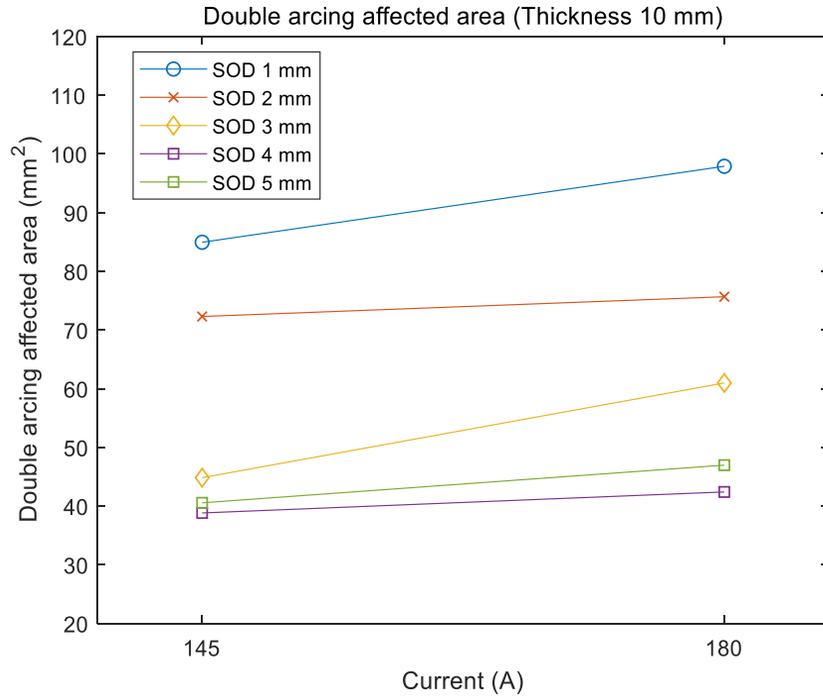


➤ Thickness ↑ → Double arcing rate ↑
➔ **Hole area ↑**

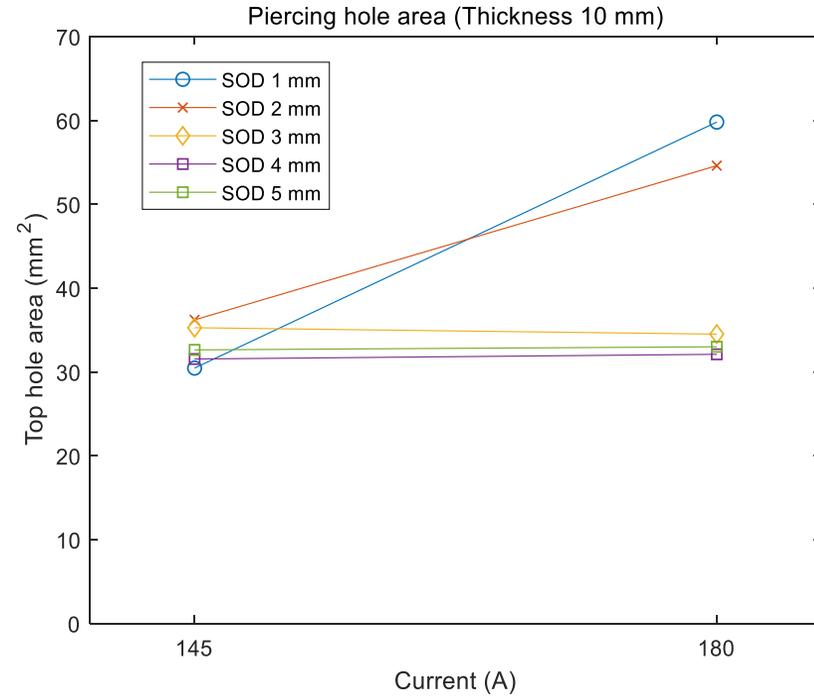
실험 결과

● 결과 분석-2

DA affected area & Hole area 비교



➤ Current ↑ → 아크출력 ↑
➔ DA affected area ↑

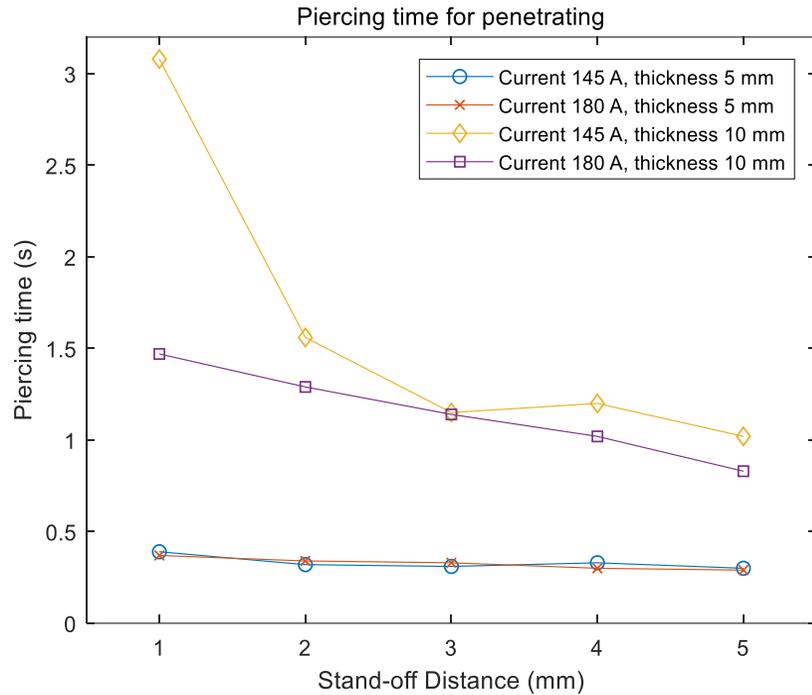


➤ Current ↑ → 아크출력 ↑
➔ Hole area ↑

실험 결과

● 결과 분석-3

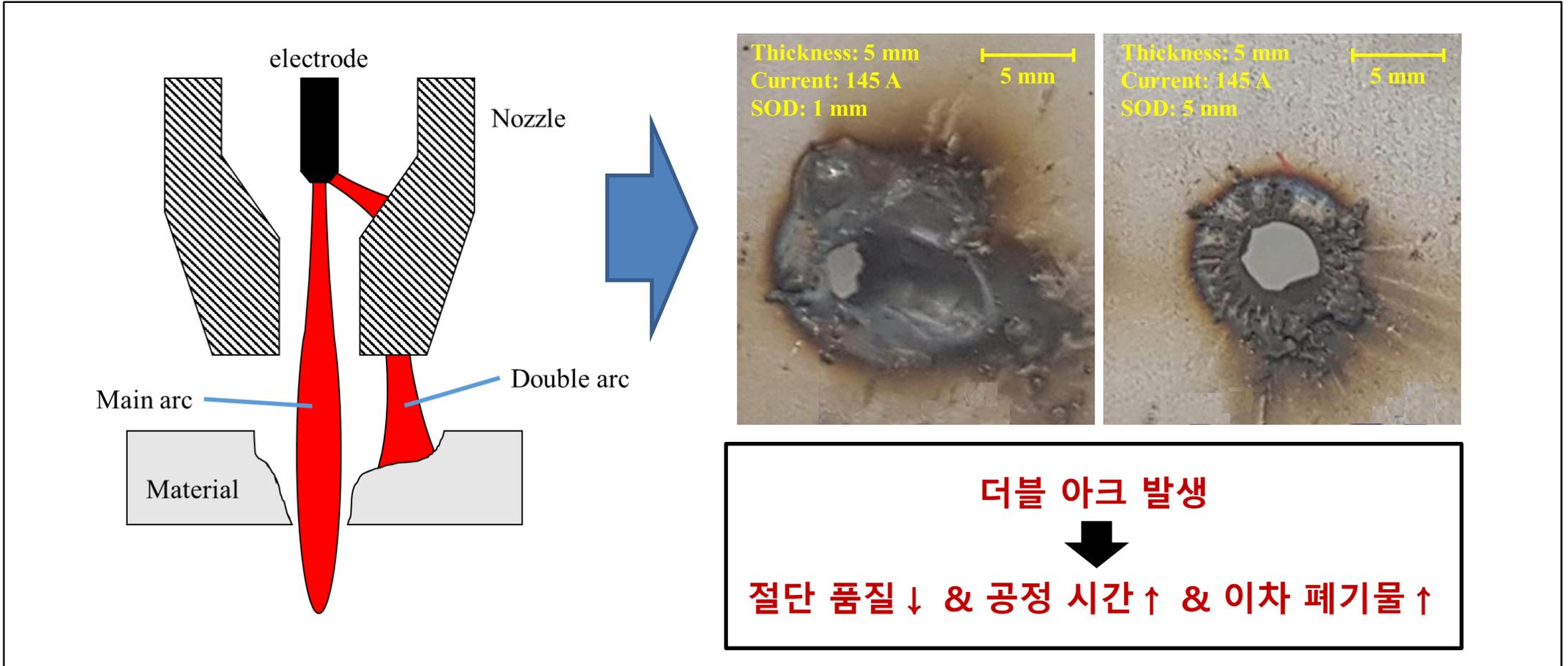
Piercing time 비교



- 시편 두께가 두꺼워질수록 Stand-off Distance의 영향이 커짐
- Stand-off Distance ↓ & Thickness ↑
➔ **Double arcing rate ↑** ➔ **Piercing time ↑**

실험 결과

● 결과 분석-4



The diagram on the left illustrates the double arc welding process. It shows an electrode entering a nozzle, with a main arc established between the electrode tip and the material, and a secondary double arc established between the electrode and the nozzle. Labels include 'electrode', 'Nozzle', 'Main arc', 'Double arc', and 'Material'. A blue arrow points from the diagram to two photographs on the right.

The first photograph shows a weld on a 5 mm thick material at 145 A current and 1 mm SOD. It features a large, irregular weld pool. A 5 mm scale bar is present.

The second photograph shows a weld on a 5 mm thick material at 145 A current and 5 mm SOD. It features a smaller, more circular weld pool with a distinct central crater. A 5 mm scale bar is present.

더블 아크 발생
↓
절단 품질 ↓ & 공정 시간 ↑ & 이차 폐기물 ↑

결 론

1. 본 연구에서는 Band-pass filter를 부착한 고속카메라와 DAQ측정 장비를 활용하여 시편-노즐 거리와 전류, 시편 두께에 따른 플라즈마 아크 피어싱 특성 및 더블 아크와의 관계를 분석함
2. DAQ를 통해 측정한 전압파형에서 전압강하 및 노이즈는 더블 아크 발생을 의미
3. 시편-노즐 거리가 작을수록 시편 상단면의 홀 형상과 더블 아크 영향부의 형상이 불규칙한 모양을 가지는 반면 시편-노즐 거리가 클수록 매끄러운 원형 모양을 가짐
4. 시편-노즐 거리가 작을수록 더블 아크 발생률이 증가했으며 이로 인해 시편 상단면의 홀 면적과 더블 아크 영향부의 면적이 증가
5. 시편 두께가 두꺼울수록 더블 아크 발생률이 증가했으며 이로 인해 시편 상단면의 홀 면적과 더블 아크 영향부의 면적이 증가
6. 145 A에서 180 A로의 전류 변화에 대한 더블 아크 발생률의 뚜렷한 경향은 나타나지 않았으나 시편 상단면의 홀과 더블 아크 영향부의 면적이 증가하는 경향이 나타남