

세아제강 모노폴 용접전 예열장치 검토자료

풍력용 모노폴 용접전 예열장치 디자인 검토 자료입니다. V2.2
PSTEK 내부용

2021. 05. 18

PSTEK Co., Ltd.

POWER SYSTEM TECHNOLOGY

모노폴 용접라인 고객 기초 요구사항

1) L-SEAM 용접전 예열장치

- 대상 제품 사양: STEEL PLATE-일반 구조용 강재(S355),
두께 100T(기준, 최대 200T), 길이 4M(기준, 최대 4.2M)
- 예열 위치: STEEL PLATE 상면 또는 하면
- 예열 온도: 상온 → 150~200°C
- 예열 폭: 용접부 중심에서 좌우 75mm(너비 기준 150mm)
- 예열 길이: 4M(기준, 최대 4.2M)
- 예열 시간: 10분 내외
- 기능 A. 맞대기 상태의 STEEL PLATE의 예열 작업
B. 예열 후 온도 측정(수동 또는 자동)

2) C-SEAM 용접전 예열장치

- 대상 제품 사양: STEEL CAN, 두께 100T(기준, 최대 200T),
외경 10M(기준, 최대 14M), CAN의 길이 4M(기준, 최대 4.2M)
- 예열 위치: STEEL CAN 내면 / 외면 개별 구성(용접 설비의 형태에 따라 구성 -
내면 / 외면 용접설비 구분되어 있음) → 용접 지점 1M 전단에 구성
- 예열 온도: 상온 → 150~200°C
- 예열 폭: 용접부 중심에서 좌우 75mm(너비 기준 150mm)
- 예열 길이: 31.4M(기준, 최대 44M)-외경 10M의 원주 기준, 최대는 외경14M의 원주 기준
- 예열 시간: CAN 회전 속도 고려하여 예열 너비와 폭으로 가열 시간 산출/반영 필요
- CAN 회전 속도: 2M/Min
- 기능 A. CAN + CAN 상태의 원주방향 용접부에 대한 예열 작업
B. 예열 후 온도 측정(수동 또는 자동)

표면전력밀도 기반 유효 가열코일 계산식 (재계산)

Welder Pre Heater Power Calculation Table R2 20210304 PSTEK Lab.											
Heating Zone	Center~ 35mm	Center~ 40mm	Center~ 50mm	Center~ 60mm	Center~ 75mm	Center~ 35mm	Center~ 40mm	Center~ 50mm	Center~ 60mm	Center~ 75mm	단위
편측 가열폭	35	40	50	60	75	35	40	50	60	75	mm Side
Thickness	30	30	30	30	30	100	100	100	100	100	mmT
Heating Width (both)	70	80	100	120	150	70	80	100	120	150	mmW
Speed MIN	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	MPM
Speed SEC	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	mm/Sec
work coil Length	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	mmL
Heating Time	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	Sec
Pass Volume/sec	25	28	35	42	53	82	93	117	140	175	CC
Density	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	g/cc
Pass Weight/sec	191	218	273	328	410	637	728	910	1,092	1,365	g
Pass Ton/Hour	0.69	0.79	0.98	1.18	1.47	2.29	2.62	3.28	3.93	4.91	Ton/Hour
Specific Heat	481.2	481.2	481.2	481.2	481.2	481.2	481.2	481.2	481.2	481.2	J/kgK
Temp In	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	°C
Temp Out	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	°C
Increase Temp(dT)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	°C
Pure Heat Capacity [W]	9,196	10,509	13,137	15,764	19,705	30,652	35,031	43,789	52,547	65,684	WSEC
[kW]	9	11	13	16	20	31	35	44	53	66	kW
Efficiency	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	74.0	75.0	75.0	75.0	75.0	%
Required Power [W]	12,261	14,013	17,516	21,019	26,274	41,422	46,708	58,386	70,063	87,578	WSEC
Required Power [kW]	12	14	18	21	26	41	47	58	70	88	KWSEC
15% margin Power	14	16	21	25	31	49	55	69	82	103	KWSEC
가열코일 하부 표면적	250	300	400	500	650	250	300	400	500	650	cmsq
면적당 발열밀도	36.8	35.0	32.8	31.5	30.3	122.6	116.8	109.5	105.1	101.1	W/cm2
면적당3W기준 코일길이	12.3	11.7	10.9	10.5	10.1	40.9	38.9	36.5	35.0	33.7	M
면적당12W기준 코일길이	3.1	2.9	2.7	2.6	2.5	10.2	9.7	9.1	8.8	8.4	M

용접 재료 표면이 블루잉 온도(표면 산화시작, 350~400°C)를 초과하지 않는 범위 전후의 가열코일 길이를 산출하기 위한 수정된 수식으로 재계산한 결과임. 실제 산소 토치처럼 급속 가열(화구당 약 11KW 수준의 급속 가열원)을 이용하고 중간에 휴지기가 장 시간 있는 열원은 Soaking Time

표면 열처리 템퍼링용 유도가열코일 하면 발열밀도 제한치 테이블

특정 전력밀도를 넘어가면 표면 열처리 경도가 풀려버리는 소려 가열시에 표면 전력밀도 한계치 테이블이다. 냉재 소재는 고투자율로 유도가열 침투깊이가 매우 얇아서 60Hz 상용주파수 가열시에도 전력밀도가 높지 않다.

가열코일의 길이가 1000mm이고 폭이 100mm 이라고 가정하면 가열 표면적은 $100\text{cm} \times 10\text{cm} = 1000\text{cmsq}$ 이다. 60Hz 가열 장치를 사용하더라도 최대 가열량은 9.3kW 수준이 된다. **따라서 폭100mm 길이 1M당 10KW 수준이상의 유도가열 전력밀도는 주파수를 아무리 낮추어도 어려운 결론에 이르게 된다.**

60Hz 수준의 유도가열은 효율이 매우 떨어지고 공진콘덴서와 매칭 트랜스 부피가 상용주파수 변압기와 동일하다.

주파수(HZ)	소려시 온도범위	
	149~426℃	426~704℃
60	9.3W/cm ²	23W/cm ²
180	7.8W/cm ²	22W/cm ²
1000	6.2W/cm ²	19W/cm ²
3000	4.7W/cm ²	16W/cm ²
10000	3.1W/cm ²	12W/cm ²

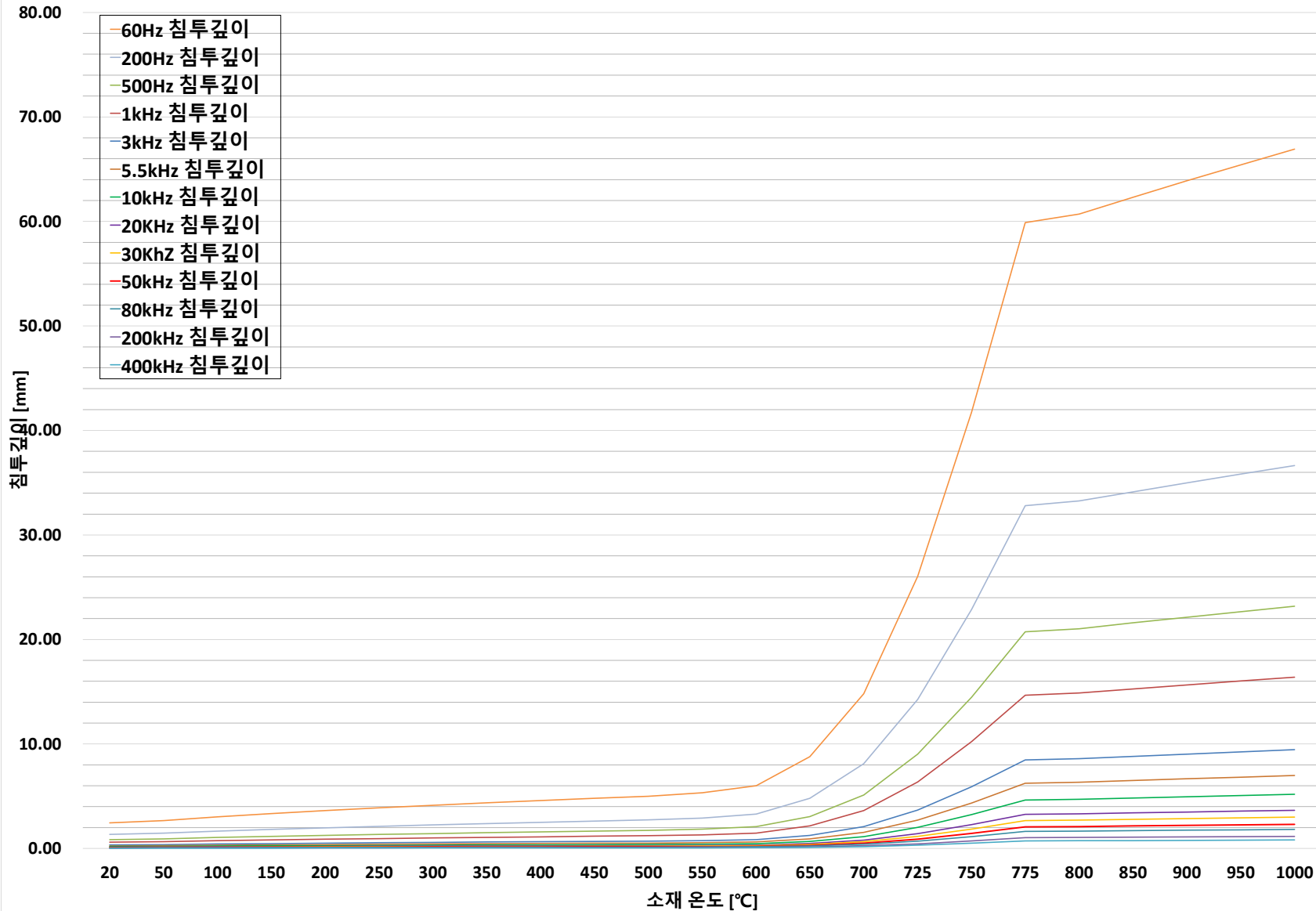
표5 유도소려시 필요한 전력밀도

범용 산소 토치의 평균 환산 전력이 약 9~11KW 수준이므로 여러 개의 산소 토치를 사용하는 경우는 이동하는 토치 배열 사이 간극을 수학의 `급수`형태로 넓혀야 가능한 구조가 되겠다. 산소 토치는 완전 연소 불꽃을 조절하므로 발생 가스가 CO₂가 되어 상대적으로 표면 블루잉 산화를 일부 방지하는 분위기 효과가 있으므로 표면 전력밀도를 약간 더 높여도 가능하다. 하지만 토치 가열 만의 특성으로 표면 열 얼룩이 남을 만큼 급 가열하면 표면 산화를 억제할 방법이 없고 디지털적 제어를 적용하여 정열량, 정온도 제어가 매우 어렵다.

핵심 포인트는 가열 밀도를 분산하려면 가열코일 길이가 길어져야 하거나 작은 장비로 나누어 분산가열 해야 한다.(또는 전후면 동시가열) 구조용 Steel 강재는 구리(열전도율 구리: 401, Steel: 46, x8.71배)와 같이 열전도가 좋은 소재가 아니므로 블루잉 방지 가열 기법으로 용접 면에서 약간 떨어진 곳을 가열하여 진행방향 대비 90도 방향의 열전달을 통하여 온도가 평준화 되는 절충적인 기법을 찾아야 블루잉 표면산화가 없는 고속 예열이 가능하지만 결과적으로 소재두께의 2배 이상 수준의 폭을 가열해야 하는 상황에서는 유효 효율이 매우 낮게 된다.

유도가열 주파수별 침투깊이 환산표

Steel 온도 구간별 유도전류 침투깊이 그래프



소재표면 전력밀도가 낮고 냉재 상태 일때는 고주파나 저주파의 침투깊이가 열 특성 차이가 미미함. 따라서 가열효율면에서 고주파가 유리함

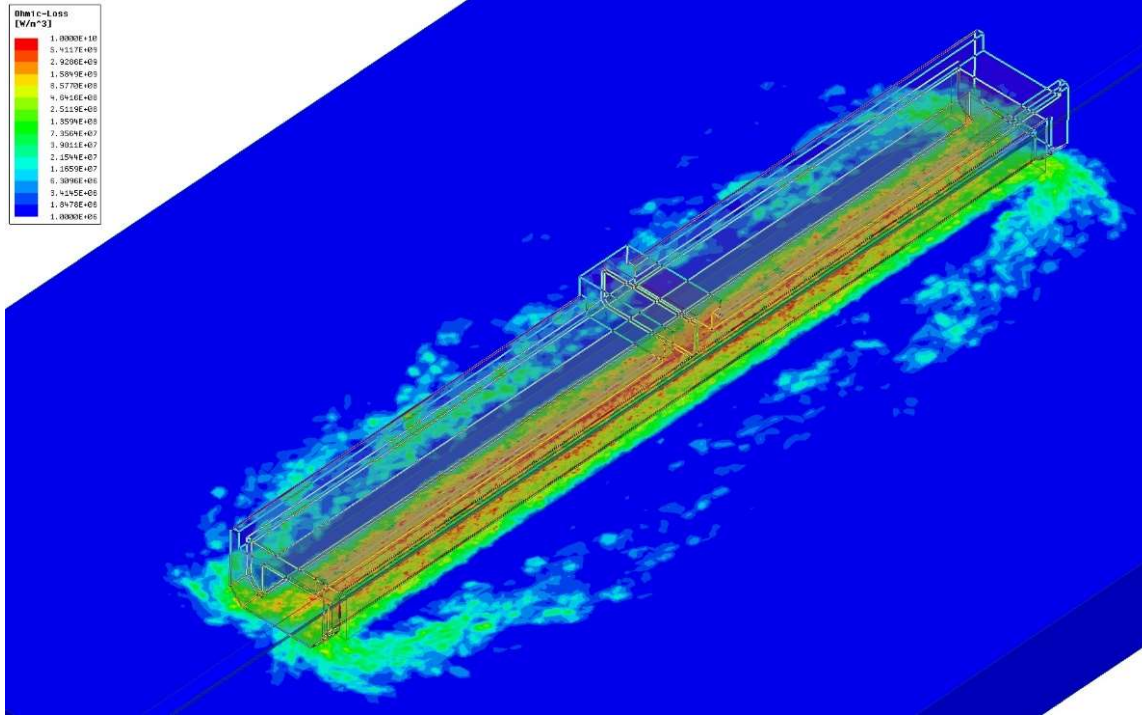
따라서 중-고주파 장비로 디자인하는 것이 장비 외형 볼륨을 줄이는데 더 유리함. 가청음을 벗어나서 작업장 소음 환경에도 도움됨.

산소토치의 경우는 극단적인 표면 가열이므로 400kHz 수준으로 봐야 함.

20~30kHz는 0.15~0.2mm 수준의 침투 깊이가 됨

60Hz 장비의 침투깊이와 20~30Khz 침투깊이가 100mmT 기준에서는 대별적으로 차이가 크지 않기에 가열코일을 약간 늘려서 가열(진행 속도대비 전력 밀도 분산)하는 것이 더 효과적이고 전체적인 효율이 상승하고 가열코일과 콘덴서가 주파수에 역비례로 작아짐

유도가열 기초 해석

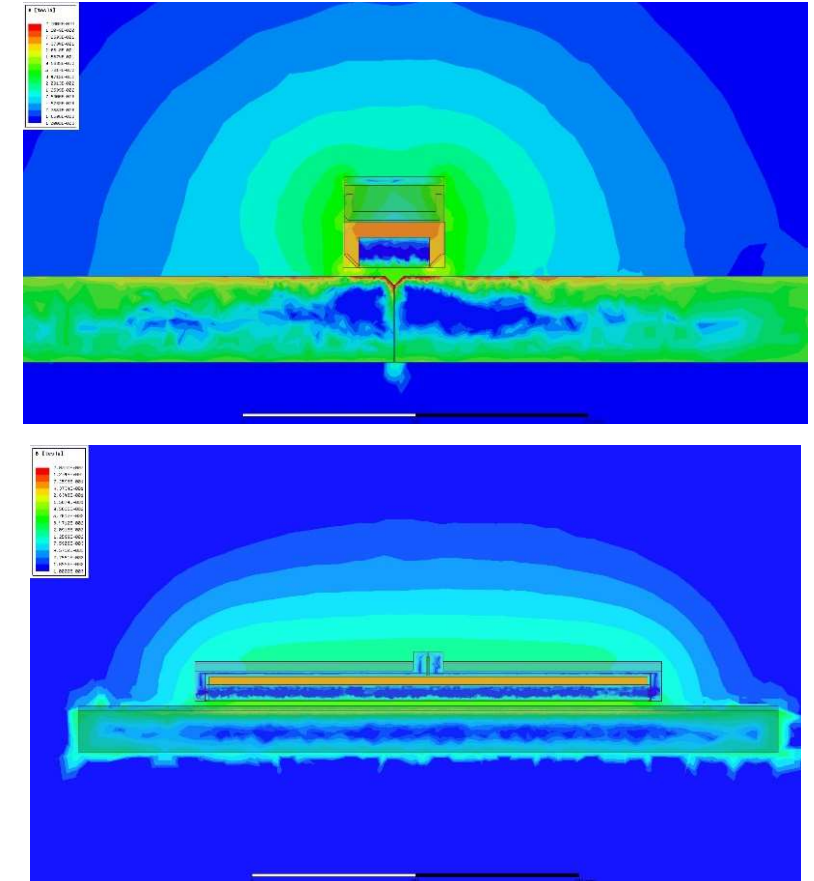


30kHz 5000A 조건에서 광폭형 가열코일 방식으로 1000mmL 길이로 해석함. 코일폭은 약80mmW 코일-소재 Gap은 10mm수준

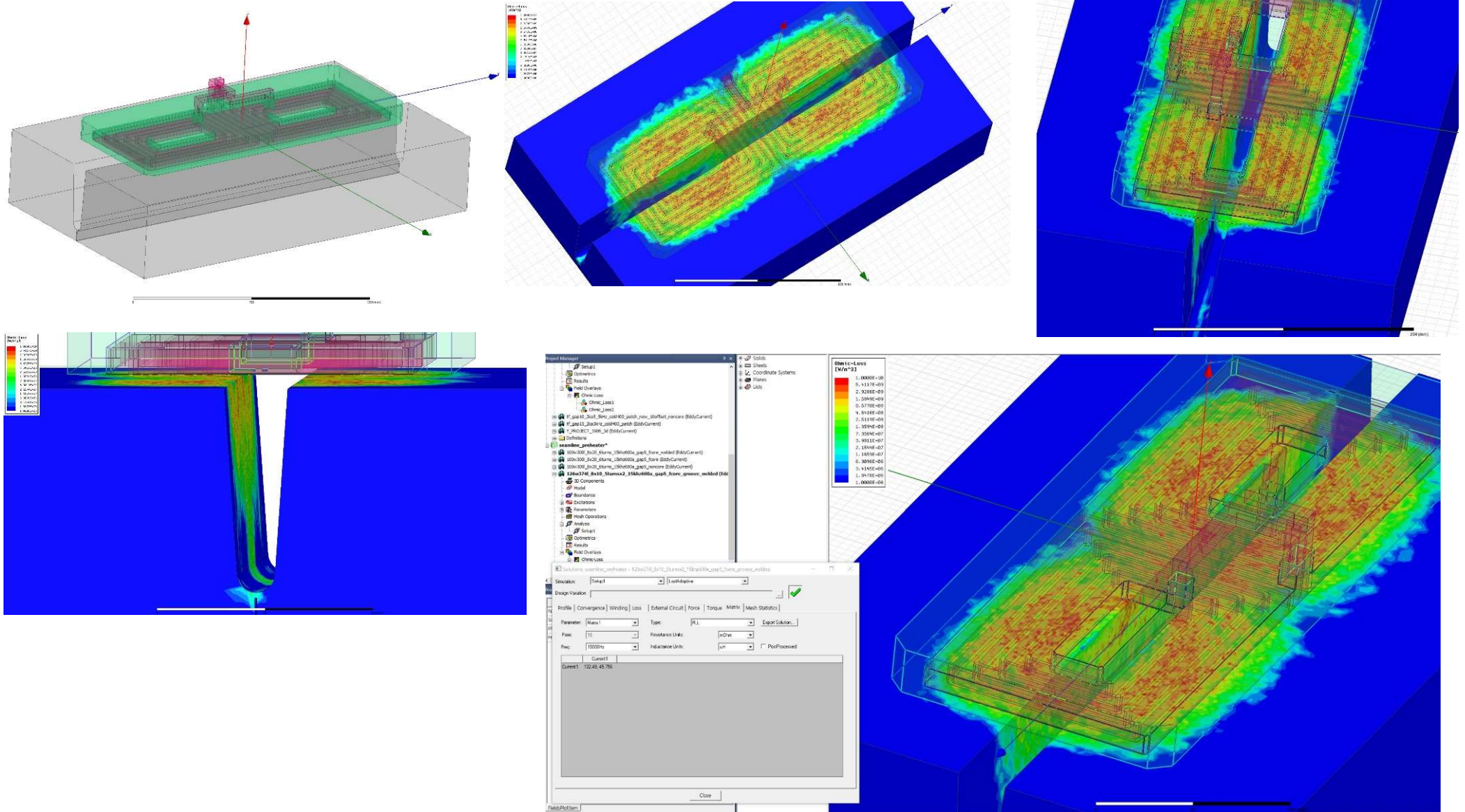
코일의 발열이 거의 없는 주문 가공형 페라이트 재질로 선정됨
(냉각수 소요량 최저 필요 조건)

30Khz 고주파 장비의 자기장 패턴은 구조적으로 멀리 도약하지 않으므로 용접선 근처에서 용접 불꽃을 산란시키는 작용이 덜하게 됨 (주파수가 높으면 용접아크 힘 현상이 거의 없어짐.)

표면에 에너지를 집중시켜서 블루잉 현상이 나타난다면 용접선 V 홈 외곽측에 유도전류가 집중되는 가열코일을 설계하는 방법도 강구되고 있음. V홈 저면에 형성된 온도 구배가 제일 중요하므로 열전달 해석을 통해서 최적의 가열패턴을 찾아야 함.

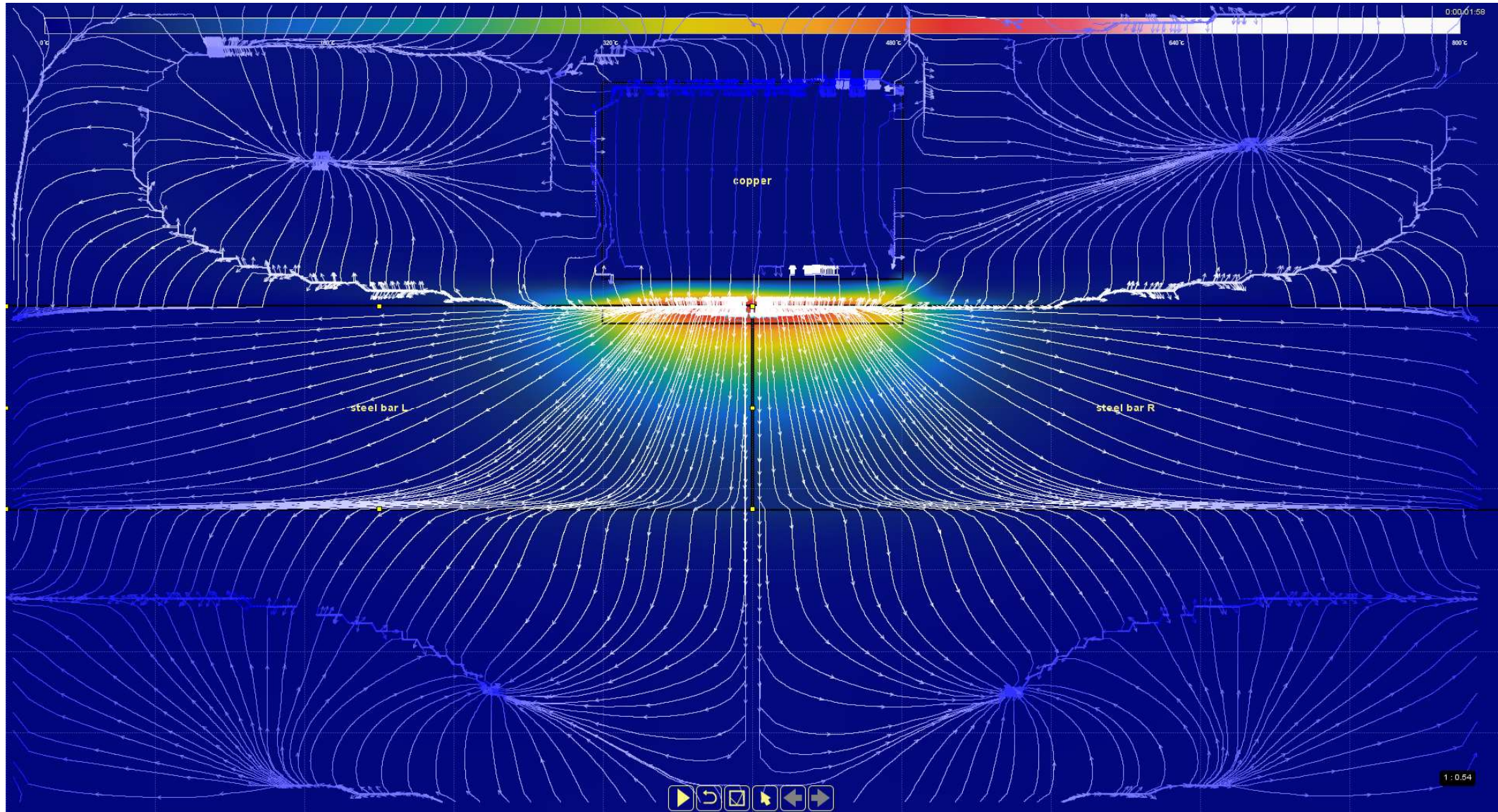


유도가열 기초 해석2



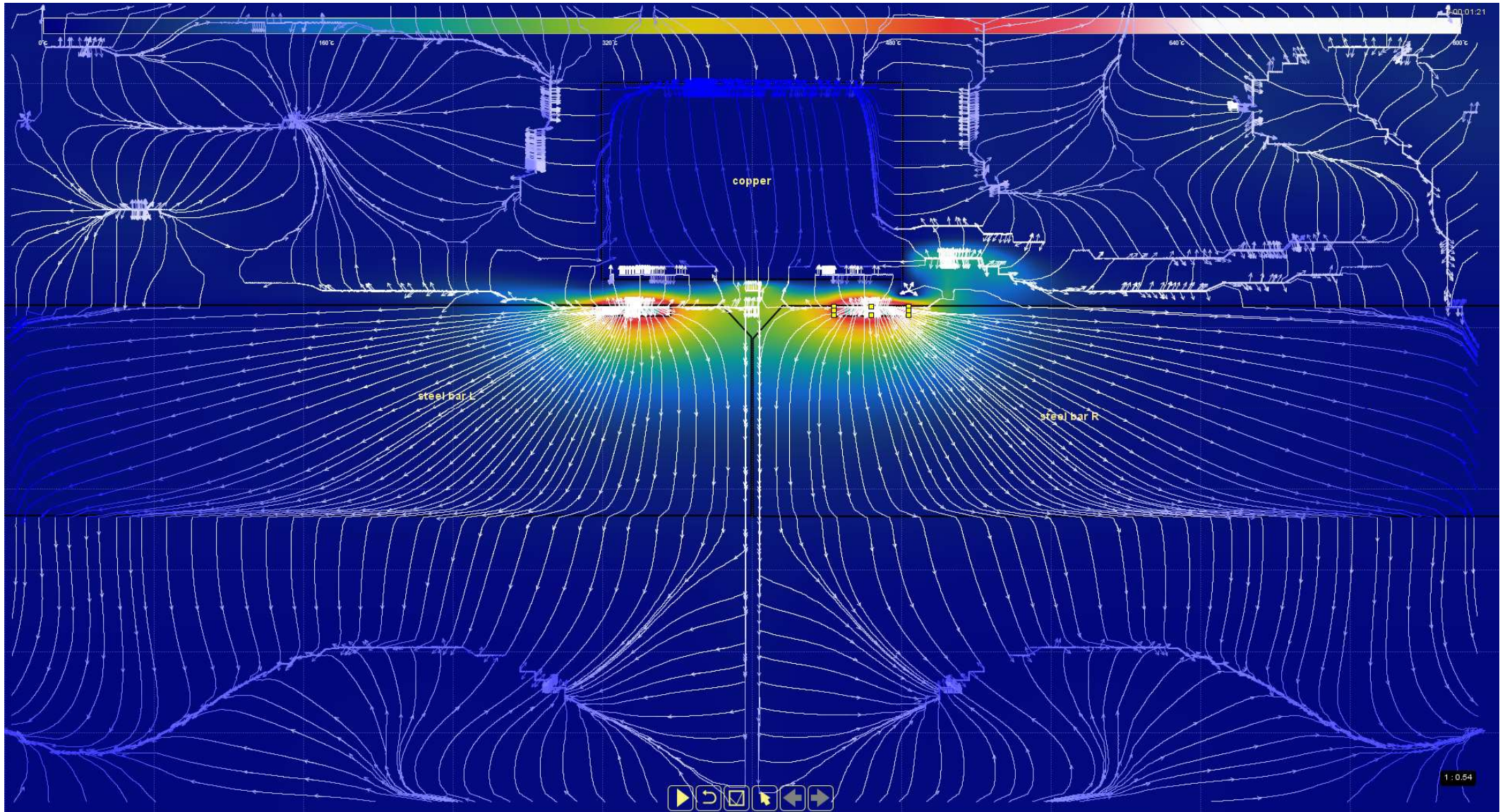
15kHz 600A 조건에서 광폭형 가열코일 방식으로 400mmL 길이로 해석함. 코일폭은 약120mmW 코일-소재 Gap은 10mm수준 → L값 45.75uH , 저항값 132mOhm (5턴 직렬, Gap 10mm)
코아의 발열이 거의 없는 주문 가공형 페라이트 재질로 선정됨 (냉각수 소요량 최저 필요 조건)

유도가열 이후 열전달 간이 해석 (2D 공개 Soft Ware)



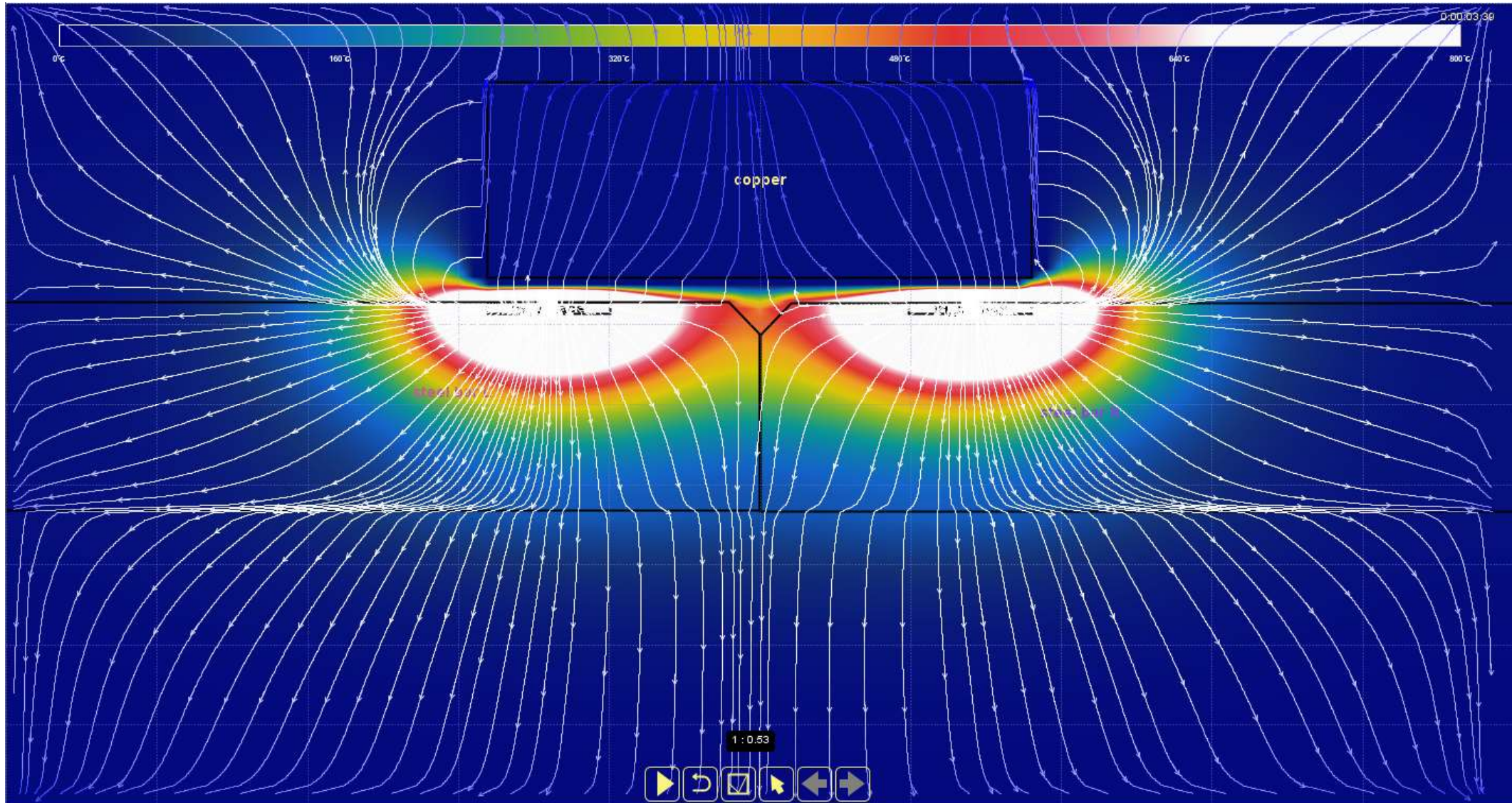
피가열 소재가 냉재 상태이므로 유도가열 방식은 주파수가 낮아도 표면에만 발열이 집중된다. 100mmT 2D 열전달 해석을 간이로 해보더라도 80KW 30kHz 급 1M 가열코일 수준의 발열량은 2분후 표면 블루잉온도에 도달하게 된다. 추가로 정밀 3D 해석이 필요하다. 정밀 해석 결과에 따라서 가열코일의 면적이 매우 넓어야 가능할 수도 있다.

열전달 간이 해석 2차 (2D 공개 Soft Ware)



용접면에서 약간 벗어난 곳에서 전력밀도를 높여서 가열한다면 높은 전력밀도를 유지한 상태로 용접라인부분에서의 블루잉 표면산화를 어느정도 완화시킬 수 있는데 단점으로는 가열량이 증가되어 효율이 급속히 낮아지는 결과를 초래한다.

열전달 해석 3차, 다수 경우의 수 비교결과 (2D 공개 Soft Ware)



물리적인 비율을 달리하여 해석 경우의 수를 다양하게 돌려 보아도 용접면에서 두께이상으로 먼 곳을 가열하여 야 용접면의 블루잉 경계점 이내로 가열하면서 가열이후 후면부 까지 열전달이 일어나는 구조가 된다. 그렇게 되면 전체 가열량은 두께 대비로 2배 이상의 열량을 가열해야 하므로 산소 토치 대비로 장비만 비대하여 지고 실효적인 장비 구현이 어렵게 된다.

대구경 후육관 파이프용 유도가열 VS 산소토치의 장단점 비교

	유도가열	LPG 산소 가열토치	비고
가열밀도	최대 10kW/cm2	최대 15kW/cm2	열처리 / 커팅
가열량	심어닐러 기준 최대500kW /M (폭20mmW)	일반 단일 화구 10~11kW (직경 50mmD 분산 가열)	일반적 기준
가열형태	길이방향 띠 밴드 구조	동심원 화구 구조 다중배열	
장점	정열량 제어 가능, 프로그램 가열량 제어, 자동화 접근성 용이, 초급속 가열가능	저렴한 가격, 손쉬운 화구 배열 기구물 설계, 손쉬운 정비접근성, 중급 화력 가열시에도 CO2 표면 분위기 형성-표면산화 억제	
단점	고가의 장비, 가열코일 중량과다, 정비 난이도 높음, 고정유지비 (수전, 수냉각), 급속 가열시 표면 산화막 스케일 발생, 현장 감전 가능성 존재	가스 누출 및 폭발 위험성, 역화 사고 발생,	
사용제약	고전력 밀도적용시 인터벌 분할 가열 또는 저전력 분산가열	산소 토치 연속 배치 지양 심부 Soaking	

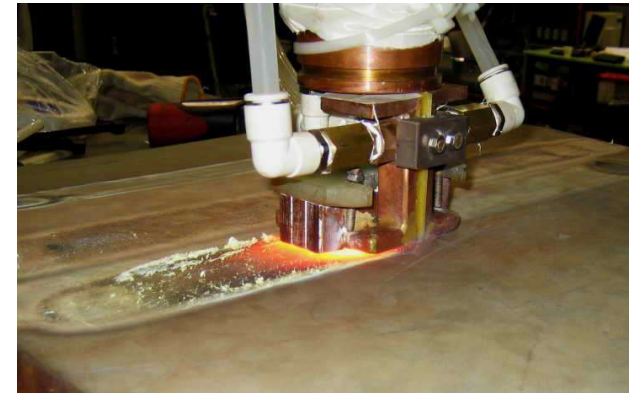
- 대전제 : 표면 전력밀도가 심부 열전달을 보다 높으면 표면이 블루잉 수준의 온도까지 높아 용접에 방해가 되는 산성표면층을 형성하므로 전력밀도를 최대한 낮추어야 한다.
- 유도가열을 사용하더라도 현실적인 대안은 작은 장비를 여러 개를 놓고 산소 토치와 같은 배열로 풍당 풍당 인터발 가열하는 방법 말고는 고온 승온 영향으로 표면 산화막 스케일을 방지할 방법이 마땅히 없다. 장비 용량을 키우는 방식보다는 분산 가열체 초점을 맞추는다면 경제성 평가가 더 선행되어야 한다.

경쟁사 유도가열 방식 용접전 예열장치 사례 분석



- 최대 35kW 급 이동형 소형 사각 CT 방식 용접전 예열장치
- 이동 속도 카운팅 휠을 기반으로 진행속도를 감지하여 비례 가열방식의 급속 가열장치
- 315°C 최대 조건으로 가열하는 고전력 밀도 구현: 동영상에서 표면 산화막 스케일링 관측됨. 용접 품질의 제한에 따라 적용여부 판별필요.
- 피에스텍 유사 컨셉은 선박 선수미 곡가공용 급속 900도 벤딩가열장치(100kW 20kHz) 와 특징 유사
- 이동형 CT의 전력집중도가 과다
- CT와 가열코일 내구성이 낮음
- 링크 하단

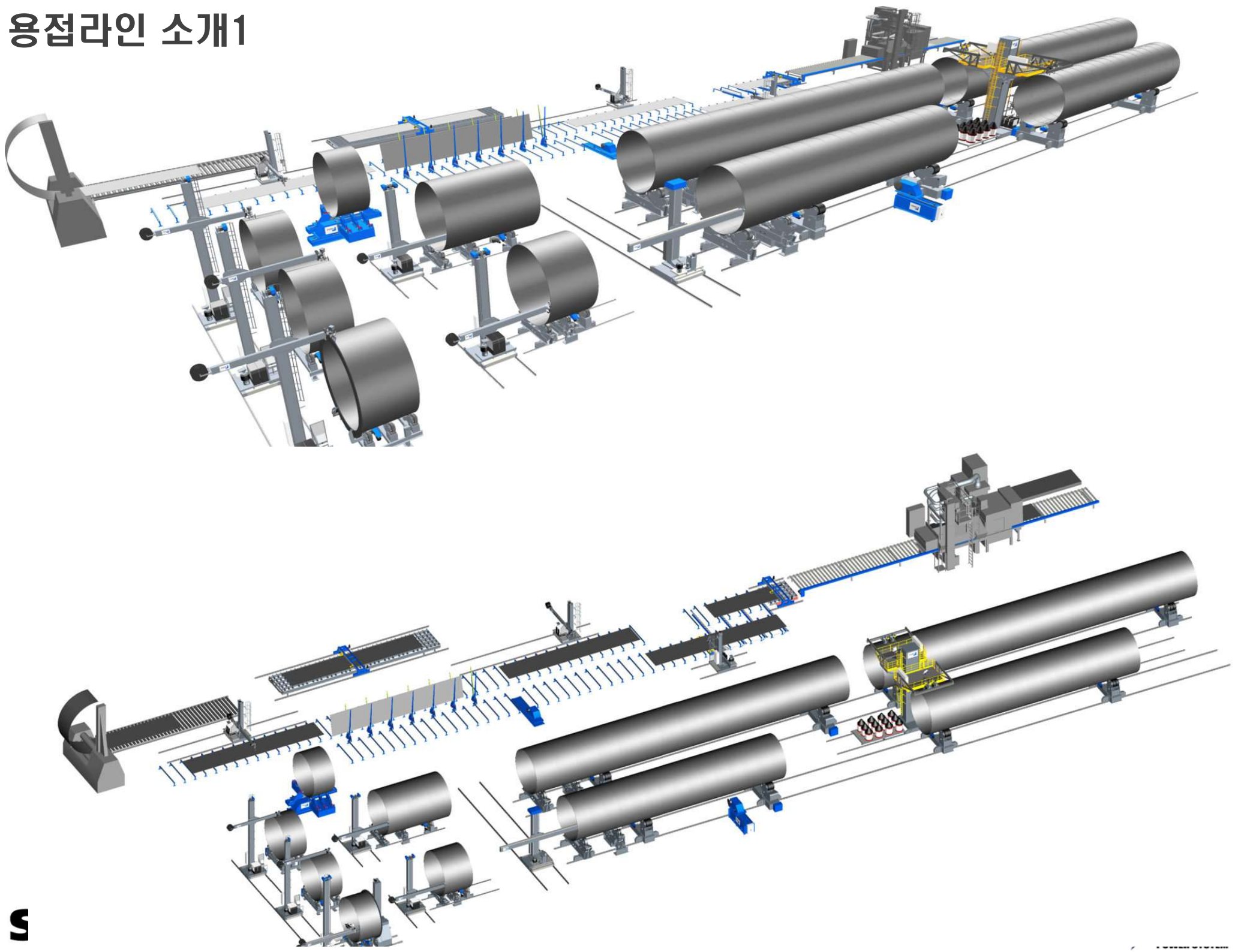
[\(2\) ProHeat Induction Heating Systems Offer Flexibility – YouTube](#)



- 최대 35kW 급 C형 패드 방식 가열장치 (내부에 운동장 모양으로 감긴 수냉식 가열코일이 길게 형성되어 가열하고자 하는 곳에 감아서 전력밀도를 낮추어 가열하는 방식)
- 가장 널리 쓰이고 표면 전력밀도가 낮고 잔고장이 적은 대표적인 공법으로 실사용도 많은 편이다. 수냉각 파워케이블을 감는 방식에서 최근에 간편한 C 타입 패드형으로 진화된 사례임.
- 실제 사용 동영상에서는 표면 산화막 스케일이 거의 관측되지 않음
- 링크 하단

[\(2\) Miller ProHeat Induction Heating – Air Cooled System – YouTube](#)

용접라인 소개1



용접라인 소개2



PSTEK은 고객의 진정한 가치를 판매합니다.

감사합니다.

Power System Technology

Since 1998

(주)피에스텍



Addr: 경기도 안양시 호계동 1028-16

TEL.: +82 - 31 - 451 - 5103

FAX: +82 - 31 - 451 - 5106

URL: <http://www.pstek.co.kr>