



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](#)

공학 석사 학위 논문

오스테나이트계 스테인리스강의 레이저
용접 시 용접 파라미터에 따른
기계적 특성에 대한 연구



2019년 8월

부경대학교 대학원

재료공학과

정 성 민

공학석사 학위논문

오스테나이트계 스테인리스강의 레이저
용접 시 용접 파라미터에 따른
기계적 특성에 대한 연구

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2019년 8월

부경대학교 대학원

재료공학과

정 성 민

정성민의 공학석사 학위논문을 인준함

2019년 6월



주 심 공학박사 박 인 덕 (인)
위 원 공학박사 안 우 상 (인)
위 원 공학박사 남 기 우 (인)

목 차

Abstract

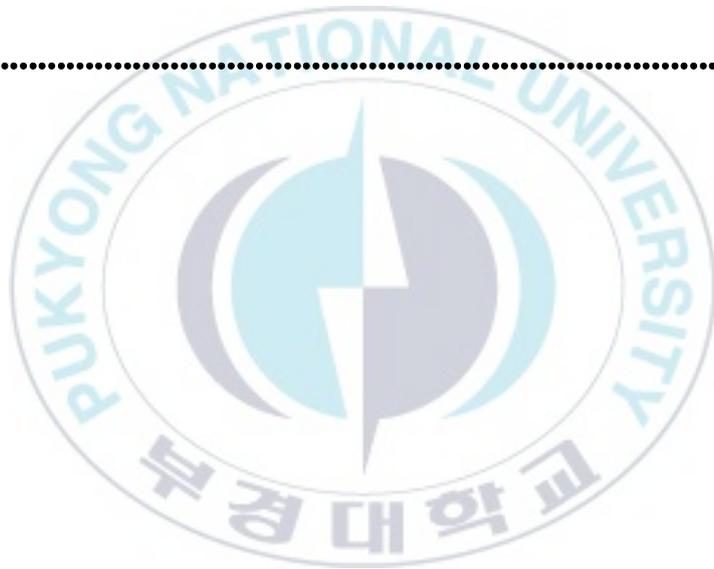
1. 서론	1
1.1 오스테나이트계 스테인리스강	3
1.2 레이저 용접	4
1.3 레이저 용접 시 보호가스	7
2. 재료 및 실험방법	8
2.1 재 료	8
2.2 용 접	10
2.3 미세조직 및 기계적 특성 평가	13
3. 결과 및 고찰	15
3.1 용접부의 형상	15
3.2 미세조직	17
3.3 경도분포	21
3.4 인장특성	23
3.5 굽힘특성	25
3.6 충격특성	26

4. 결론 32

참고문헌 33

발표 논문 목록 37

감사의 글 38



Study on Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel according to Welding Parameters at Laser Welding

Sung-Min Jung

Dept. Materials Science and Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Abstract: Austenitic stainless steel is used in the nuclear industry as structural materials and coatings because it has excellent workability, weldability and high temperature characteristics. Nuclear power plant structures are mainly large structures manufactured using welding which is mainly arc welding. Arc welding is a welding method with relatively high heat input. However, austenitic stainless steel requires low heat input because it has high thermal expansion coefficient and lower thermal conductivity than that of carbon steels. Over heat input may cause various welding defects such as severe deformation and coarsening of the grain in the joint, which may result in deterioration of the mechanical properties. In recently, laser welding has been proposed to solve the problem of heat input.

This study investigated the effect of shielding gas on the mechanical properties of austenitic stainless steels using Ar and N₂. Weldments showed similar appearance and microstructure. Fusion zone of shielding gas N₂ could not find nitrides. Mechanical properties as tensile, bend and impact were similar regardless of types of shielding gas. As a results, shielding gas N₂ welding showed similar characteristics to those of Ar welding. It is considered that shielding gas N₂ is suitable for austenitic stainless steels at laser welding.

1. 서론

스테인리스강 (stainless steel) 은 내식성이 우수하며, 외관이 미려하여 자동차 산업, 건축 산업, 화학플랜트 및 원자력 산업 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. [1-3] 특히, 오스테나이트계 (austenitic) 스테인리스강은 비교적 고온 (650 ℃) 에서도 우수한 내식성을 유지하며, 강도와 연성이 우수하다. 또한 온도에 따른 연성취성전이 (ductile-brittle transition) 거동이 나타나지 않으며, 용접성 및 가공성이 우수하여 원자력 산업에서 매우 광범위하게 적용되며, 주요 구조재 중 하나로 자리 잡고 있다. [1] 원자력시스템의 구조물은 매우 대형으로 제작에 대하여 용접은 필수공정이며, 여기에 SMAW 와 TIG 와 같은 아크 용접 (arc welding) 이 주로 이용되고 있다. 아크 용접은 범용성이 높으며, 다른 용접에 비해 경제적이다는 이점을 가지지만, 용입 깊이가 낮다는 한계를 지닌다. 따라서 두꺼운 재료를 용접할 때 다층 용접이 요구되며, 공정속도가 느리다. [4-6] 이로 인해 입열량이 증가하여 과입열이 일어나기 쉽다. [7] 과입열은 접합부에 큰 열변형 및 잔류응력을 발생시킬 수 있으며, [8] 열영향부 (heat affected zone, HAZ) 를 넓게 만들어 접합부의 품질 및 강도를 저하시킬 수 있다. [8-10] 오스테나이트계 스테인리스강은 일반적인 탄소강에 비하여 열팽창계수가 약 1.5 배 높고, 열전도도는 1/3 정도로 낮은 재료이므로 용접 시 입열량의 제어가 중요하다. [7] 입열이 과하면 고온균열, 입계부식균열, 응력부식균열 등의 용접부 붕괴현상이 발생할 수 있다. 이에 대한 대안으로 재료간의 간격 (gap) 과 개선 각도 (groove) 를 조절하여 입열량을 제어하는 좁은 간격 용접 (narrow gap welding) 과 에너지 밀도가 높은 열원을 사용하는 레이저 용접 (laser beam welding), 전자빔 용접 (electron beam welding) 등이 제시되고 있다. [7]

이 중 레이저 용접은 레이저 빔을 열원으로 사용하는 용접법으로, 레이저 빔은 좁은 영역에 집중되어 매우 높은 에너지 밀도를 가진다. 따라서 레이저 용접은 기존의 아크 용접과 비교하여 적은 입열량으로 깊은 용입을 얻을 수 있으며, 빠른 공정이 가능하다. [7, 11] 레이저 용접은 레이저 빔의 출력이나 펄스 지속 시간 (pulse duration) 등을 조절하여 최대 출력 (peak power) 을 증가시킴으로써 키홀 (keyhole) 기구로 용입을 일으킬 수 있다. 이는 재료 표면 전체에 입열이 가해지는 기존의 아크 용접법과 달리 고밀도 에너지의 열원은 용융금속의 증발을 일으켜 두께 방향으로 깊게 침투할 수 있기 때문이다. [11] 키홀 용접은 열의 전도가 적으며, 용융 및 응고 과정이 매우 빠르므로 적은 입열량으로 깊은 용입을 얻을 수 있다. 그러므로 키홀 용접은 용입부의 종횡비 (aspect ratio) 가 크고, 열영향부 (heat affected zone; HAZ) 가 좁다는 특징을 가진다. 이러한 특징은 오스테나이트계 스테인리스강 용접의 주요 과제인 용접부의 잔류응력 완화와 탄화물 석출에 의한 예민화를 방지하는데 유리하다. [7, 11-14] 아울러 레이저는 빛이므로 공정 시 환경 분위기의 영향이 적으며, 광섬유를 통해 전달될 수 있다. 이러한 점에서 원자력 발전 설비와 같은 유해한 환경에서 설비를 보수하는데 레이저는 이상적인 열원이라 할 수 있다. [11] 현재 가공분야는 CO₂ 레이저, Nd:YAG 레이저, 파이버 레이저 (fiber laser) 및 디스크 레이저 (disk laser) 등이 적용되고 있다.

선행 연구에서 TIG 용접과 레이저 용접을 비교한 결과, [12] 인장, 충격 특성은 레이저 용접부가 TIG 용접부보다 우수하였다. 그러나 굽힘 특성은 TIG 용접부가 다소 우수하였다. 그리고 레이저 출력 5.5 kW, 용접 속도 1.0, 1.5, 2.0 m/min로 용접 입열량이 용접 특성에 미치는 영향 조사한 결과, 1.5 m/min 용접 속도가 가장 우수하였다. [13]

따라서 본 연구는 상기와 같은 선행 연구 결과에 의하여, 레이저 용접 중에 보호가스 (Ar 및 N₂) 를 사용하여, 용접 특성에 대한 영향을 검토하였다.

1.1 오스테나이트계 스테인리스강

스테인리스강은 탄소강의 산화에 취약한 결점을 극복하기 위하여 12% 이상의 크롬 (Cr) 을 첨가시킨 강 (steel) 이다. 첨가된 Cr 은 산소와 반응하여 얇은 산화층 (Cr_2O_3) 을 형성하며, 이 산화층은 열적 및 화학적으로 매우 안정되어 있다. 산화층은 부동태의 피막으로 작용하여 재료의 내식성 및 내열성을 향상시키는 역할을 한다. [1] 스테인리스강은 조직에 따라 페라이트계 (ferritic), 오스테나이트계 (austenitic), 마르텐사이트계 (martensitic), 2상계 (duplex), 석출경화계 (precipitation hardening)로 구분하며, 조직에 따라 내식성, 내열성, 가공성 등에서 차이를 보인다.

이 중 오스테나이트계 스테인리스강은 상온에서 오스테나이트 (γ 상) 조직을 가지는 강이다. 오스테나이트 스테인리스강의 대표강종인 STS304 는 18% Cr 을 함유하는 강에 오스테나이트 안정화 원소인 니켈 (Ni) 을 8% 첨가하여 약 1100 °C 까지 가열한 후 급냉시켜 탄화물을 오스테나이트 조직에 용해시켜 제조된다. 오스테나이트계 스테인리스강은 다른 계의 스테인리스강 보다 내식성 및 내열성이 우수하다. 또한 면심입방 (face-centered cubic, FCC) 구조를 가지므로 슬립계가 많아서 저온에서 연성취성전이 현상이 나타나지 않으며, 가공성이 우수하다는 특징을 가진다. 오스테나이트계 스테인리스강은 일반적으로 비자성이지만 필요에 따라 가공을 가해 부분적으로 마르텐사이트 조직을 형성시켜 자성을 가지게 할 수 있다. 오스테나이트계 스테인리스강은 가정용품, 자동차부품, 건축내외장재, 화학공업 설비, 원자력산업 설비, 각종 의료기구 등 다양한 분야에서 적용되고 있으며, 스테인리스강의 전체 생산량의 60% 이상 차지하고 있다. 한편, 오스테나이트계 스테인리스강은 용접성이 우수하지만 열전도율이 탄소강의 약 1/3 정도로 낮고, 열팽창계수가 1.5 배 정도로 높기 때문에 용접열에 의한 변형이 일어나기 쉽다. 따라서 용접 시 입열량의

제어와 적당한 구속력을 부여하는 것이 건전한 용접부를 얻기 위해 중요하다.
[7]

1.2 레이저 용접

레이저 용접은 레이저 빔을 열원으로 이용하는 용접이다. 용입 기구는 크게 전도 (conduction) 기구와 키홀 기구로 구분되며, 어느 기구로 용입이 일어날지는 최고 출력 혹은 펄스 폭에 의해 결정된다. [11] 전도 기구는 에너지에 대한 용융 효율이 20% 내외인 것에 비하여, 키홀 기구는 70% 정도로 에너지 효율이 매우 높다. 또한 키홀 기구는 용입부의 종횡비가 0.5 미만인 전도 기구와 달리 2~10 정도로 매우 큰 값을 가진다. 키홀이 생성되기 위해서는 금속표면에서 증발이 일어나야 함으로 10^6 W/cm^2 이상의 출력 밀도를 가져야 한다. [11] kW 급의 고출력 레이저를 이용하여 용접을 실시할 경우, 최고 출력이 충분히 높기 때문에 키홀 기구로 용접할 수 있다. 그러나 에너지 밀도가 $10^7 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ 이상으로 과하게 높으면 증기 및 플라즈마의 발생이 과도하게 일어나 금속의 손실과 레이저 빔의 차단이 발생하여 키홀 형성에 문제를 일으킬 수 있으므로 최고 출력이 과도하게 높아지는 것은 피해야 한다. [11]

Fig. 1.1 은 키홀의 생성과정을 나타낸다. 레이저를 재료에 조사하면 재료의 표면에서 광자의 반사, 굴절, 흡수 및 산란이 일어난다. 대부분의 광자는 반사되며, 수 %의 광자만이 재료 표면의 수 μm 아래에 흡수된다. 이때 흡수율은 재료의 종류 및 표면의 산화, 가공 상태에 따라 달라질 수 있다. 흡수된 광자는 금속 중의 자유전자를 여기시키며, 여기된 전자는 재료 내부에 진동을 발생시키며 재료의 온도를 상승시킨다. 일반적으로 금속은 온도가 높을수록 레이저 빔의 흡수율이 높아지는 경향을 보인다. [14] 흡수율이 높아짐에 따

라 승온은 가속되며, [14, 15] 재료의 용융 및 증발이 일어나게 된다. 이때 재료의 증발로 인해 발생하는 증발 반력은 용융부에서 용융금속을 밀어내어 키홀을 형성시키고, 키홀을 유지시키는 구동력으로 작용한다. 그리고 키홀이 깊어지면 레이저의 침투깊이가 증가하여 키홀 벽면에서 레이저 빔이 다중 반사된다. 이로 인해 재료의 광흡수율이 증가하며 가열과정은 가속된다. 이 후 레이저 빔의 조사가 종료되면, 용융된 금속은 표면장력 등에 의하여 다시 키홀 내부로 흘러 들어와 응고되어 용입부를 형성한다.

레이저 용접은 기존의 아크 용접과 비교하여 열원의 에너지 밀도가 높아서 열량대비 가공 효율이 우수하며, 공정속도가 빠르다. 그러므로 적은 입열량으로 용접이 가능하여 용접 열에 의해 발생하는 문제에 대한 우려가 적다. 또한 비접촉 가공방식은 용접 중에 발생할 수 있는 마모, 손상, 오염 등의 우려를 줄이며, 용접재의 형상에 대한 제한을 줄일 수 있다. 그리고 레이저 용접은 빛을 열원으로 사용하므로 자성의 영향을 받지 않고 용접공정이 가능하며, 광케이블을 통해 열원의 공간전송이 가능하다는 장점을 가진다. 이러한 장점은 자성재료의 용접, 극한환경의 용접에 대하여 유리하게 작용할 수 있다.

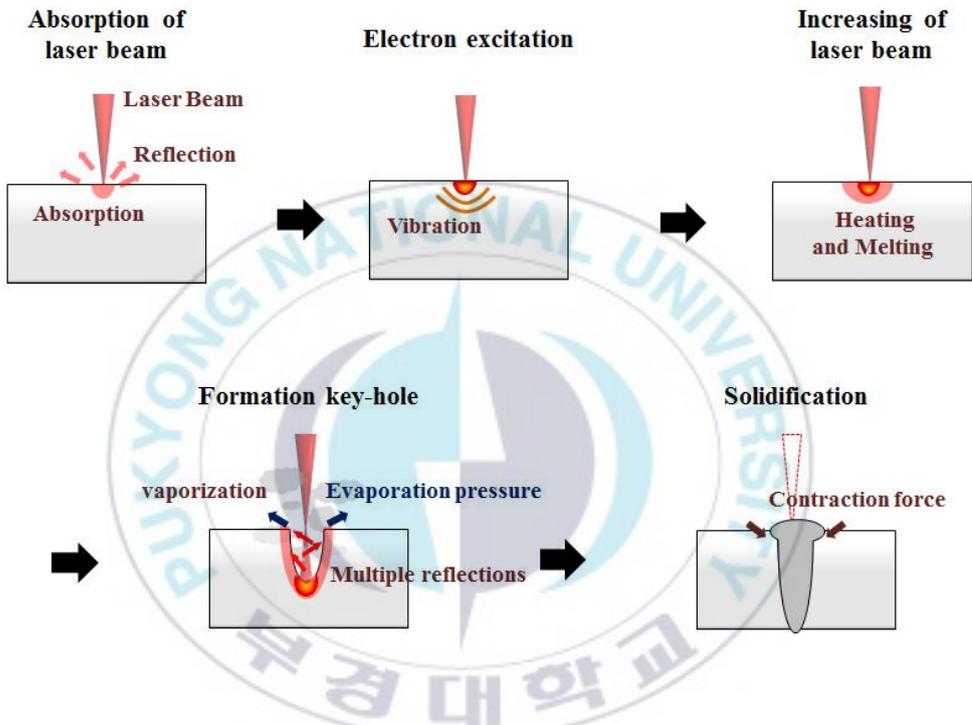


Fig. 1.1 Formation of keyhole mechanism

1.3 레이저 용접 시 보호가스

레이저 용접 공정 중에 발생하는 플라즈마(plasma) 및 플럼(plume)은 레이저 빔의 진로를 방해하여, 에너지의 안정성 및 커플링(coupling)에 부정적인 영향을 줄 수 있다.[16, 17] 보호가스는 플라즈마 및 플럼의 제어에 도움을 줄 수 있다.[11] 일반적으로 오스테나이트계 스테인리스강의 용접은 헬륨(He), 아르곤(Ar) 등의 비활성 기체가 보호가스로 사용되고 있다. He은 이온화 에너지와 열전도도가 높아서 보호가스로서 성능이 우수하지만 가격이 비싸다는 단점이 있다.[18] 반면, Ar은 He에 비하여 가격은 싸지만 보호가스로서 성능이 떨어진다. 그러므로 용접 공정에서 많은 양의 Ar이 요구되며,[18] 이는 공정비용의 상승으로 이어지므로 가격이 싸다는 Ar의 장점은 사라진다. 따라서 스테인리스강의 용접에 대한 경제적인 보호 가스에 대한 연구가 필요하다.

이에 대한 대안으로 질소(N_2)가 제시되고 있다. N_2 는 대기의 78.08%를 차지하는 주성분으로, 포집이 용이하므로 저렴하다. N_2 는 앞에 언급한 He과 Ar보다 큰 질량을 가지며, He과 비슷한 이온화 에너지를 가지므로 플라즈마 및 플럼의 제어에 충분한 효과를 기대할 수 있다.[19] 기존의 아크 용접에서 보호가스로 질소를 사용하면, 용융풀(melting pool)에 N이 다량 고용되므로 사용이 제한되고 있다. 고용된 N은 침전되어 다량의 Fe_4N 을 형성하며, 용접부의 가소성 및 인성의 저하를 일으킬 수 있기 때문이다.[20-22] 반면, 레이저 용접은 공정 중 발생하는 플라즈마가 N_2 의 분압을 감소시켜, 아크 용접과 비교하여 소량이 N이 고용된다.[23] 그리고 냉각속도가 매우 빠르다는 점이 N고용이 적은 또 다른 이유이다. N_2 의 분해 및 이온화가 일어나기 전에 응고가 완료된다.[23] 용융부에서 소량의 N은 오스테나이트 안정화 원소로 작용하여, 내식성, 내피로, 인장강도 등 전반적인 기계적 특성의 향상에 기여할 수 있다고 알려져 있다.[23-26]

2. 재료 및 실험 방법

2.1 재 료

오스테나이트계 스테인리스강은 Ni, Mn, N 등의 오스테나이트 안정화 원소를 다량 함유하여 실온에서도 오스테나이트를 안정한 상으로 가지는 강이다. 본 연구는 18% Cr-8% Ni 을 함유하는 오스테나이트계 스테인리스강의 대표강종인 STS304L 스테인리스강을 실험 재료로 선정하였다. 여기서 L은 탄소를 0.03% 이하로 제한한 저탄소 레벨의 강을 의미하며, 이는 아크 용접 시에 HAZ에서 입계부식이 일어나는 것을 방지하기 위함이다. Table 2.1은 재료의 화학적 조성을 나타낸다.

시험편의 두께는 6 mm이며, 시험편은 용접 전에 350 x 100 mm로 가공하였다. Fig. 2.1은 시험편의 형상을 나타낸다. 레이저 용접은 열원인 빔의 사이즈가 매우 작기 때문에 재료 간의 간격 허용치가 매우 적다. 그러므로 접합면은 밀링 (millng) 가공하여 간격을 최소화하였다.

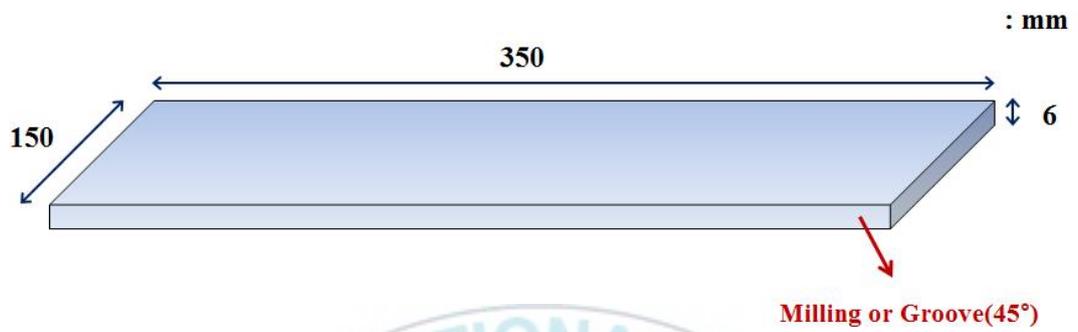


Fig. 2.1 Shape and dimension of materials for welding

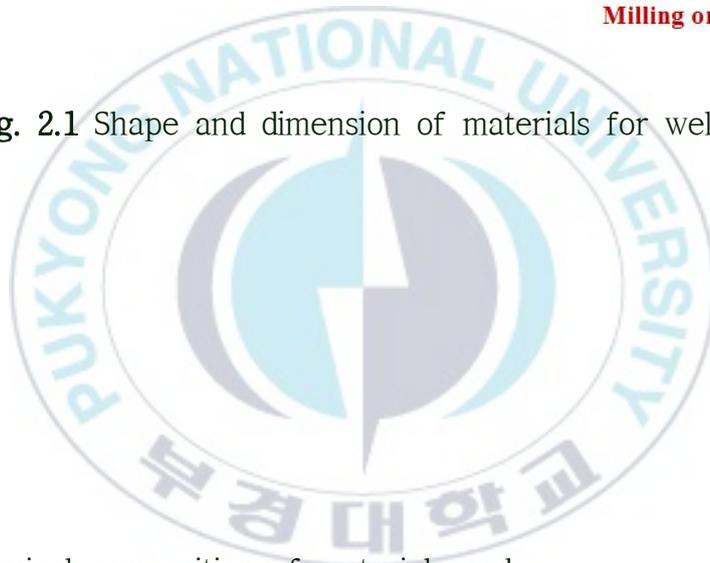


Table 2.1 Chemical composition of material used

Element [%]	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	N
STS304L	0.026	0.042	1.47	0.032	0.002	18.3	8.04	0.19	0.15	444 ppm

2.2 용 접

레이저 용접은 최대출력 16 kW 의 CW (continuous wave) Yb:YAG 디스크 레이저 (Trumpf TruDisk 16002) 를 열원으로 사용하여 실시하였다. 사용된 레이저의 파장은 1,030 nm 이며, BPP 는 16 mm•mrad 이다. 집광 광학계의 초점거리는 233 mm 이며, 초점위치에서 300 μ m 직경의 빔을 가진다. 광학계가 반사광에 의해 손상되는 것을 방지하기 위해 10° 의 전진각을 주어 레이저를 조사하였다. 용접 과정 중에 발생할 수 있는 스파터, 흠 등에 의한 손상은 커팅 에어 (cutting air) 를 사용하여 방지하였다. 용접은 시험편을 스테이지에 위치시킨 후 레이저를 이동시키며 실시하였으며, 용가재는 사용하지 않았다. Fig. 2.2 는 레이저 용접의 모식도를 나타낸다. 용접과정 중에 뒤틀림이 발생하는 것을 방지하기 위해 시험편은 적당한 압력을 가하여 고정하였으며, 용접부의 전면 (face) 과 후면 (root) 은 보호가스 (Ar 및 N₂) 을 분사하여 보호하였다. 용접은 선행 연구에서 용접 비드 등이 가장 우수한 레이저 출력 5.5 kW, 속도 1.5 m/min 로 실시하였다. Table 2.2 는 용접조건을 나타낸다.

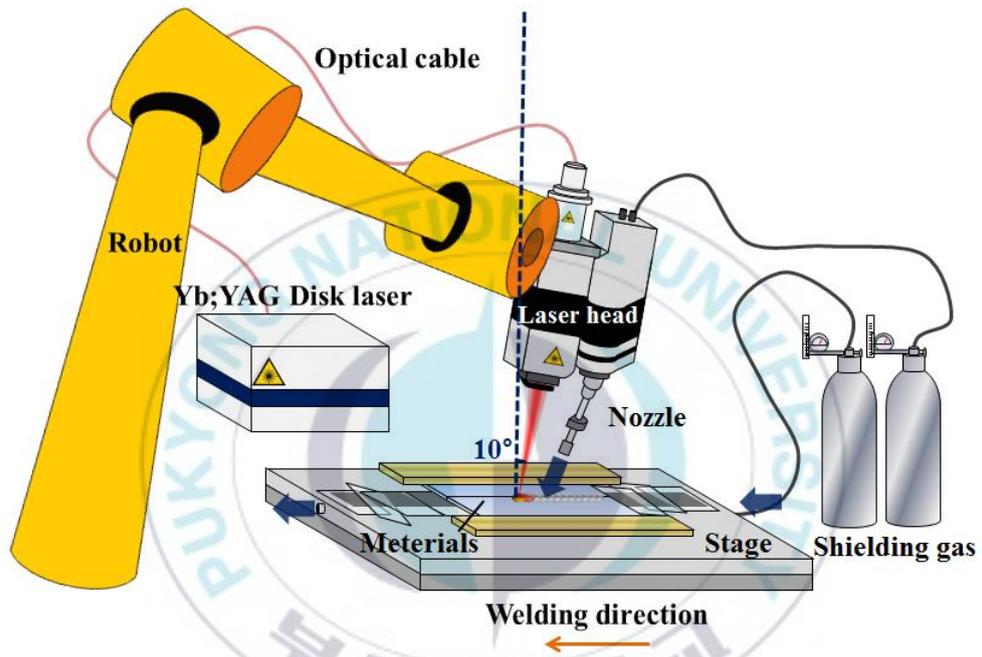


Fig. 2.2 Setup of experimental equipment for laser welding

Table 2.2 Laser welding parameters for evaluating the influence of shielding gas

Laser welding parameters	
Wavelength	1030 nm
Beam Quality	16 mm•mrad
Focal Distance	233 mm
Spot size	300 μ m
Power	5.5 kW
Welding speed	1.5 m/min
Defocus	-2 mm
Incidence angle	10 °
Gap between materials	0 mm
Shielding (face)	21 L/min Ar, N ₂
Shielding (root)	15 L/min Ar

2.3 미세조직 및 기계적 특성 평가

용접부의 미세조직을 광학현미경 (NA-200, Nikon, Japan) 및 전자주사현미경 (SEM, SNE-4500M, Sec, Korea) 을 이용하여 관찰하였으며, 각 용접부의 페라이트 함량은 페라이트 측정기 (Ferrite scope FMP30, Fischer, Germany) 를 이용하여 측정하였다.

용접부의 기계적 특성은 경도, 인장, 굽힘, 충격 시험으로 평가하였다. Fig. 2.3 은 시험편의 형상을 나타낸다. (a), (b) 및 (c) 는 각각 인장시험편, 굽힘시험편 및 충격시험편을 나타낸다. 인장시험편은 ASME Section IX QW-462.1, 굽힘시험편은 QW-462.3에 따라서 제작하였다.[27] 충격시험편은 ASME Section II Part A SA370 에 따라서 Charpy v-notch type A 를 제작하였다.[27] 노치는 모재 (base metal, BM), 용합부 (fusion zone, FZ), 열영향부에 각각 도입하였다.

경도 시험은 마이크로 비커스 경도기 (MMT-X, Matsuzawa, Japan) 를 사용하여 용접부의 수평 방향으로 실시하였다. 압입하중은 200 g, 압입시간은 10 초로 하였다. 측정 위치는 압흔의 크기를 고려하여 표면에서 $600\mu\text{m}$ 아래로 하였다.

인장과 굽힘시험은 만능시험기(UH-F100KNX, Shimadzu, Japan)를 사용하여 실시하였다. 인장시험은 10 mm/min 로 속도로 실시하였으며, 굽힘시험은 용접부의 전면과 후면에 대하여 180° 굽힘을 실시하였다. 충격시험은 충격시험기 (OTC-500, Oriental, Japan) 를 사용하여 실온에서 실시하였다.

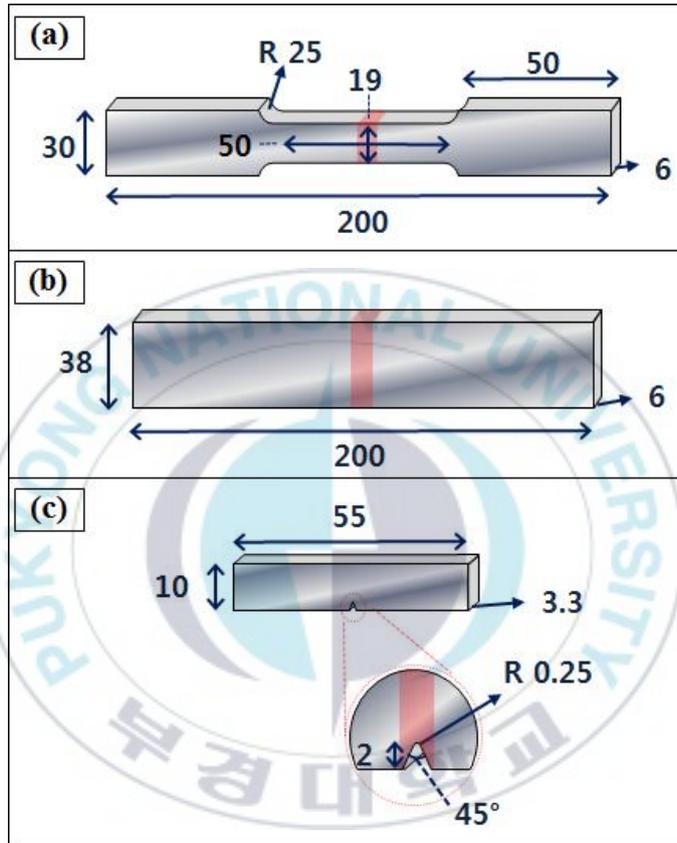


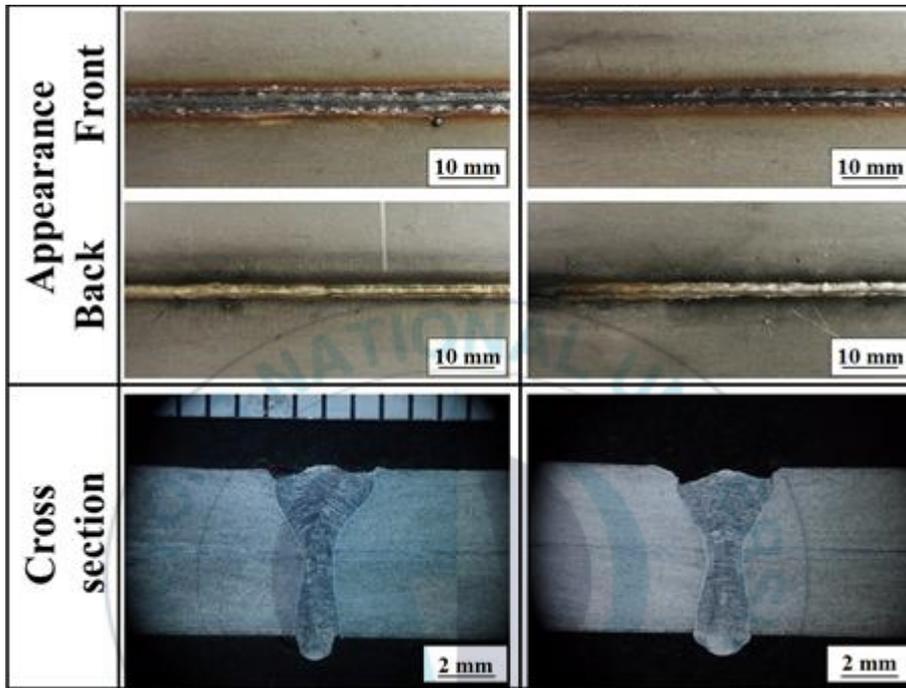
Fig. 2.3 Shape and dimension of specimens. (a) Tensile, (b) Bend and (c) Impact

3. 결과 및 고찰

3.1 용접부의 형상

Fig. 3.1 은 (a) Ar 보호가스, (b) N₂ 보호가스 용접부의 외관 및 단면을 나타낸다. 이것은 2 종류 보호가스가 용접부에 미치는 영향을 조사하기 위한 것으로, 비드 전면에 분사하였다. 용접부는 2 종류 보호가스 (Ar 및 N₂) 를 사용함으로써 모두 매끈하고 연속된 비드가 형성되었으며, 용융물의 비산에 의한 스파터 (spatter) 는 나타나지 않았다. 2 종류 보호가스 용접부는 중형비가 3 이상인 키홀 형상의 용입부를 나타내었으며, 용접비드의 폭은 유사하였다.

2종류 보호가스 용접부가 매끈하고 연속된 비드가 형성한 것은 완전관통에 의해 플라즈마가 접합부의 전, 후면에서 원활하게 분출되어 용융금속의 비산이 적었기 때문이라 생각된다. 또한, 2 종류 보호가스 용접부가 비슷한 형상을 나타낸 것은 보호가스의 영향이 비슷하기 때문이라 생각한다. [28]



(a)

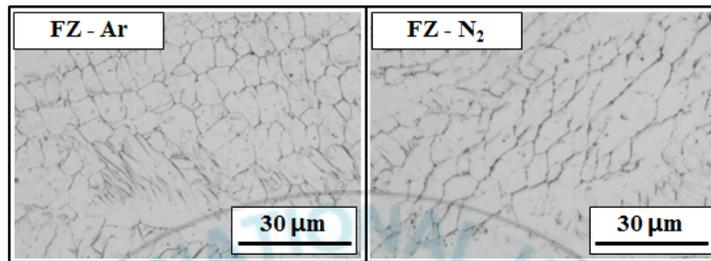
(b)

Fig. 3.1 Appearance and cross section of weldments according to shielding gas. (a) Ar shielding, (b) N₂ shielding

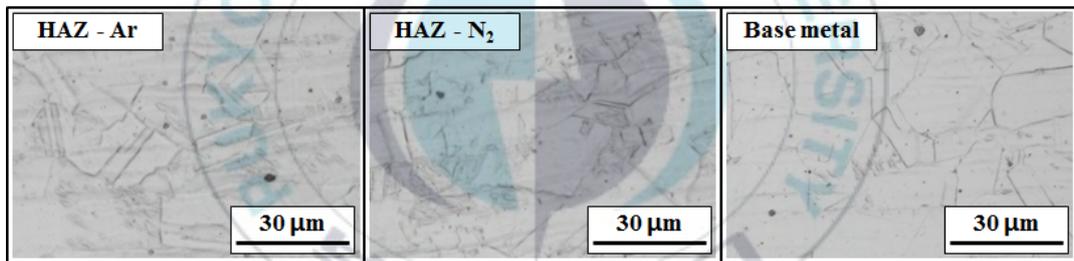
3.2 미세조직

Fig. 3.2 는 2 종류 보호가스 (Ar 및 N_2) 를 사용한 용접부의 미세조직을 나타낸다. (a) 는 FZ 에 대한 미세조직을 나타낸다. FZ-Ar 및 FZ- N_2 의 조직은 모두 밝은 색의 기지 (matrix) 와 검은 선 (line) 모양의 상으로 구성된 2상 조직으로 구성되어 있으며, 결정립의 크기는 유사하였다. 한편, FZ- N_2 조직은 질화물이 나타나지 않았다. (b) 는 용접부에서 1mm 떨어진 곳의 HAZ 와 BM 의 미세조직을 나타낸다. 2 종류 보호가스 용접부의 HAZ 는 BM 과 유사한 조직을 나타내고 있으며, 결정립의 성장은 일어나지 않은 것으로 판단된다.

2 종류 보호가스 용접부의 FZ 조직이 비슷한 것을 통해 보호가스 Ar 과 N_2 의 레이저와의 상호작용이 비슷한 것으로 판단된다. 그리고 FZ- N_2 조직에서 질화물이 나타나지 않은 것은 2 가지 원인으로 생각할 수 있다. 첫째는 용접 시 발생하는 플라즈마에 의해 N_2 분압이 상쇄되었기 때문이다. 둘째는 빠른 냉각속도 때문에 N의 고용이 작았기 때문으로 생각된다.



(a)



(b)

Fig. 3.2 Microstructures according to shielding gas. (a) Fusion zones (FZ), (b) Heat affected zone (HAZ) and base metal (BM)

Fig. 3.3 은 FZ 조직의 화학적 성분을 EDS 로 분석한 것이다. 기지조직과 선모양의 상에 대하여 각각 4 곳의 성분을 분석하였다. 측정결과, 기지조직은 평균 18.32 %의 Cr 과 7.68 %의 Ni 을 함유하였으며, 선형상은 23.80 %의 Cr 과 4.96 %의 Ni 을 함유하였다. STS304 는 서냉 시 δ -페라이트 초정으로 형성하여 포정반응으로 통해 오스테나이트가 되어 완전한 오스테나이트 상을 가진다. 그러나 냉각속도가 빨라지면 원소는 확산의 여유가 줄어들어 δ -페라이트가 잔류하게 된다.[29] 본 실험에서 δ -페라이트가 오스테나이트로 완전히 변태하지 못하여, 오스테나이트 기지 속에 불규칙적으로 분포하는 조직이 나타났다. $\delta \rightarrow \gamma$ 의 상변태는 Cr 과 Ni 의 확산이 깊이 관여한다. 냉각속도가 빠를수록 Cr 과 Ni 의 확산에 시간적 여유가 적어서 초정으로 형성된 δ 상이 응고 후에 많이 잔류하게 된다.[30, 31] Fig. 3.3 에서 페라이트 안정화 원소인 Cr 을 다량 함유하고 있는 선모양의 상이 빠른 냉각에 의하여 잔류하는 δ -페라이트임을 확인할 수 있었다.

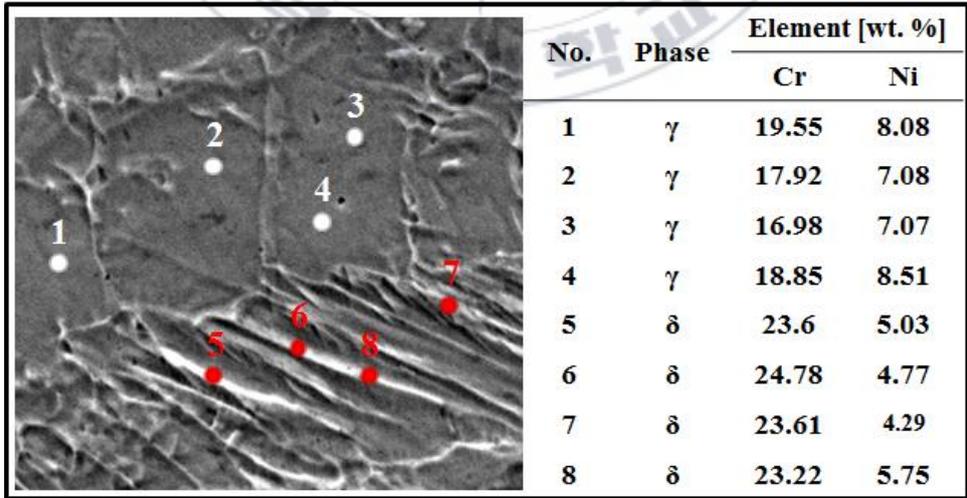


Fig. 3.3 Positions and results of EDS analysis on fusion zone (FZ)

Table 3.1은 2종류 보호가스를 사용한 용접부의 페라이트 함량을 측정한 결과이다. 용접부의 페라이트 함량은 Ferrite scop 를 이용하여 평가하였다. 실험값은 ASME Section III에 의하여 6회 측정하여 평균하였다. Ar 및 N₂의 ferrite number (FN)은 각각 2.97과 2.87로 비슷한 값을 나타내었다.

보호가스 Ar 및 N₂의 FN이 비슷한 것은 N의 고용이 매우 적은 것을 의미한다. 일반적으로 N은 오스테나이트 안정화 원소이므로 N 함유량이 증가함에 따라 용접부의 FN은 감소한다. N의 고용이 적은 것은 레이저 용접 시 발생하는 플라즈마와 용접부의 빠른 냉각속도가 원인이라 판단된다.

Table 3.1 The ferrite numbers in fusion zone (FZ) according to shielding gas

Shielding gas	Ferrite number(FN)
Ar	2.97
N ₂	2.87

3.3 경도분포

Fig. 3.4는 보호가스 Ar 및 N₂를 사용한 용접부의 수평 방향에 대한 경도 분포를 나타낸다. 두 용접부의 경도는 FZ에서 BM보다 약간 높게 나타났다. 보호가스 Ar 용접부의 경도는 FZ에서 208~246 Hv의 분포를 보이며, 평균 경도는 223 Hv이었다. 보호가스 N₂ 용접부의 경도는 FZ에서 204~232 Hv의 분포를 보이며, 평균 경도는 217 Hv였다. 두 용접부는 BM의 평균 경도 213 Hv와 비교하여 약간 증가한 것을 알 수 있다.

실험에 사용된 재료는 저탄소 재료이므로 C에 의한 경도의 변화는 미소할 것으로 생각되며, 경도의 변화는 결정립 크기의 변화에 따른 것으로 생각된다. [32] 비커스 경도 분포는 보호가스의 종류에 관계없이 FZ가 BM보다 약간 높으며, 비슷하게 나타났다. Fig. 3.2에서 보호가스 Ar 및 N₂의 FZ는 비슷한 조직으로 나타났다. 비슷한 경도분포는 비슷한 미세조직을 갖는 것에 의해서 판단된다.

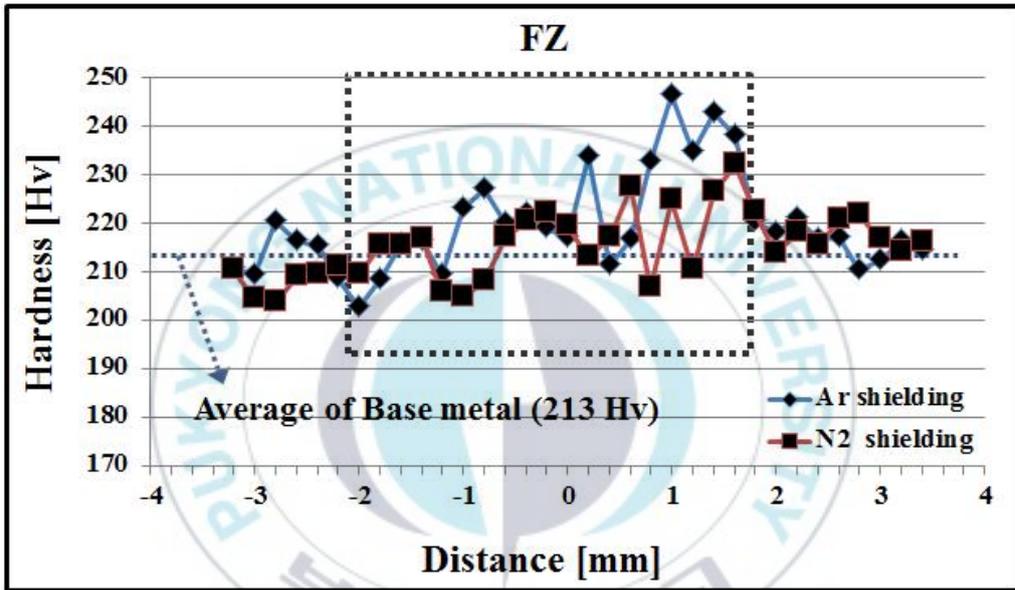


Fig. 3.4 Distributions of Vickers hardness by shielding gas

3.4 인장특성

보호가스에 따르는 용접부의 강도를 평가하기 위하여 인장시험을 실시하였다. Table 3.2 는 보호가스 Ar 과 N_2 를 사용했을 때의 기계적 특성을 나타내며, Fig. 3.5 는 인장시험에서 얻어진 파단 외관을 나타낸다. 두 용접부는 BM 과 비교하여 약간 증가한 인장 및 항복 강도를 나타내었으며, 파단부는 BM 에 위치하였다. 보호가스 N_2 용접부는 보호가스 Ar 용접부보다 큰 인장강도의 향상을 나타내었다. 이것은 미량 고용된 N의 고용강화에 의한 것으로 생각된다. [42] 반면, 두 용접부의 연신률은 BM 에 비하여 낮게 나타났다.

용접부 인장 강도의 증가는 빠른 냉각속도에 의한 결정립의 미세화 [32] 및 δ -페라이트에 의한 입계의 복잡화로 판단된다. [29] 두 용접부 FZ 의 미세조직은 BM 보다 미세한 결정립을 나타내었다. 또한, 두 FZ는 오스테나이트와 δ -페라이트의 2 상 조직으로 구성되어 있으며, 단일상보다 복잡한 입계를 가지고 있다. 균열의 진전 방향인 입계가 복잡해짐에 따라 균열 진전이 억제된 것이다.

연신률의 저하는 δ -페라이트의 영향으로 판단된다. δ -페라이트는 오스테나이트보다 인성이 낮으므로 연신율이 감소한 것으로 생각된다.

Table 3.2 Mechanical properties of base metal and welding joints according to shielding gas

Specimens	Yield stress [MPa]	Tensile stress [MPa]	Elongation [%]
Base metal	291	637	52
Ar shielding	313	650	48
N ₂ shielding	393	695	41

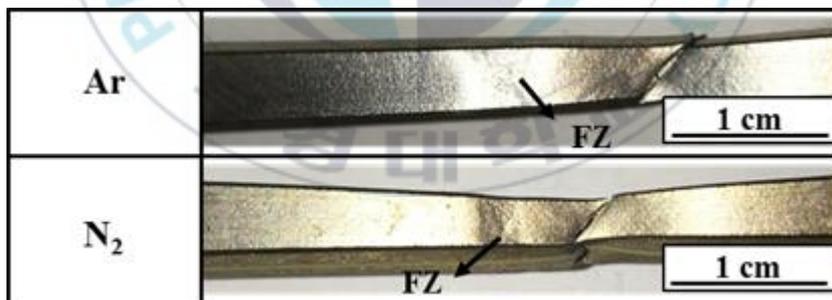


Fig. 3.5 Fracture appearance according to shielding gas after tensile test

3.5 굽힘특성

Fig. 3.6 은 보호가스에 따른 굽힘시험 결과를 나타낸다. 용접부의 굽힘 특성은 지름 24 mm 의 포머 (former) 를 이용하여 평가하였다. 용접부의 전면 및 후면은 180 ° 굽힘을 실시하고, 굽힘부의 표면 균열의 발생 유무를 조사하였다. 보호가스 Ar 및 N₂의 용접부는 균열이 나타나지 않거나, 1mm 이하의 균열이 발생하였다. 이것은 규정 [27] 을 만족하는 굽힘 특성이다.

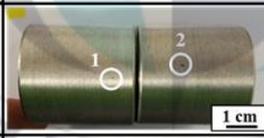
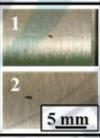
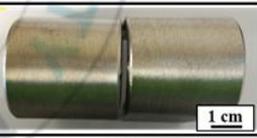
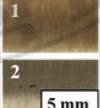
Bending specimen side view	Shielding gas	Face		Root	
		Macro	Crack	Macro	Crack
	Ar				No-crack
	N ₂				

Fig. 3.6 Results from bend test according to shielding gas

3.6 충격특성

Fig. 3.7 은 보호가스에 따르는 레이저 용접 시험편의 샤르피 V-노치 충격시험 결과를 나타낸다. 용접부의 두께를 고려하여 3.3 mm 의 sub size 시험편을 제작하여 실온에서 샤르피 V-노치 충격시험을 실시하였다. Fig. 3.7 (a) 와 (b) 는 각각 FZ 와 HAZ 에 대한 충격흡수에너지를 나타낸다. 비교하기 위하여 BM 의 결과도 같이 나타내었다. (a) FZ 는 보호가스 종류에 관계없이 BM 과 비슷한 흡수에너지 분포를 나타내었으나, (b) HAZ 는 BM 보다 낮은 흡수에너지 분포를 나타내었다.

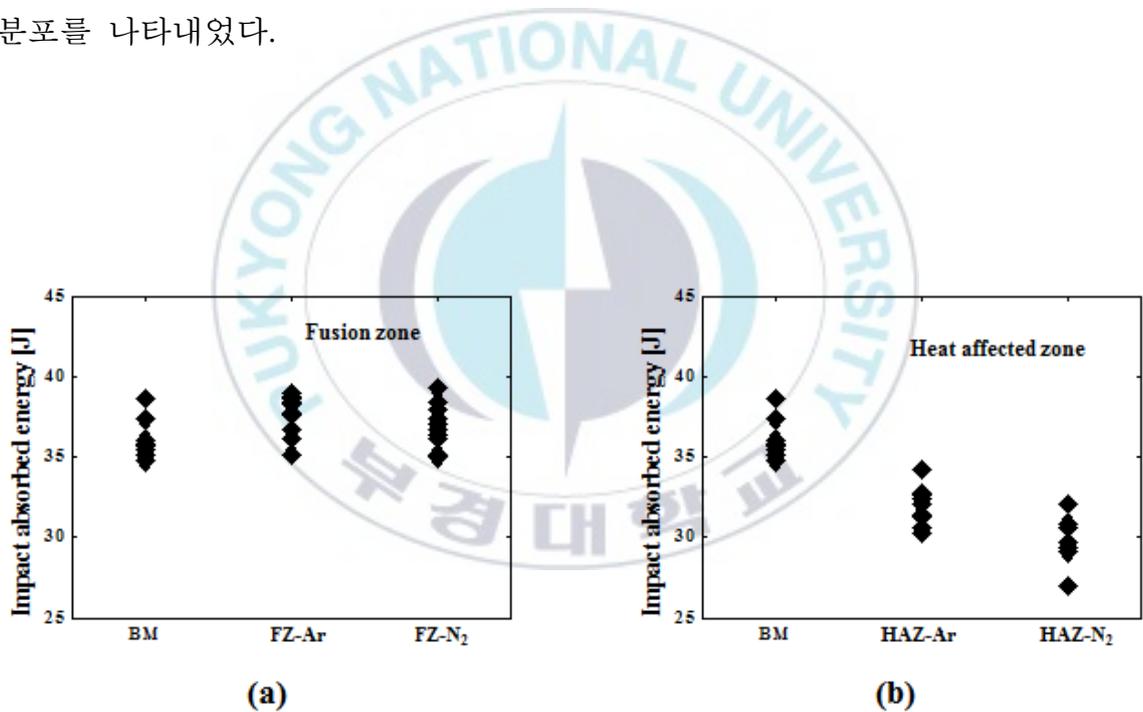


Fig. 3.7 Impact absorbed energy according to shielding gas. (a) Fusion Zone, (b) Heat affected zone

측정된 충격흡수에너지는 용접조건 및 노치의 가공 위치에 따라서 약간 다른 산포를 가지는 것을 알 수 있다. 재료의 기계적 특성에 있어서 평가 정도의 향상을 위하여 산포를 고려한 확률론적 평가는 중요하다. 충격흡수에너지 또한 확정치가 아닌 통계적으로 변동하는 값을 나타내고 있다. 이와 같은 관점에서 해석의 편의성과 최약링크 가설을 고려하여 2-Parameter 와이블 분포 (Weibull distribution)를 적용하여 해석을 실시하였다.[33] 식 (3.1)은 2-Parameter 와이블 분포를 나타낸다. 여기서 α 와 β 는 각각 형상모수 (Shape parameter)와 척도모수 (Scale parameter)를 의미한다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right], \quad x \geq 0 \quad (3.1)$$

Fig. 3.8 (a)와 (b)는 각각 Fig. 3.7의 충격흡수에너지를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 모든 확률지 상에서 충격흡수에너지는 직선으로 표현되고 있으므로 와이블 확률분포에 잘 따른다고 할 수 있다. Table 3.3은 와이블 분포에서 추정된 형상모수 및 척도모수, 그리고 산술통계에 의한 표준편차 (Std), 평균 (Mean) 및 변동계수 (COV)를 나타낸다.

형상모수는 실험값의 분산정도를 나타내는 모수로, 모든 와이블 분포에서 BM이 40.9의 가장 높은 값을 나타내며, 분산의 정도가 가장 적었다. FZ-Ar, FZ-N₂, HAZ-Ar, HAZ-N₂는 각각 33.6, 31.9, 31.7, 26.3의 형상모수를 나타내며, BM에 비해 큰 분산을 나타내었다. 척도모수는 파괴확률이 63.2%일 때의 특성수명을 나타내는 모수로서, FZ-Ar과 FZ-N₂은 각각 38.2 및 36.6의 값을 나타내며, 보호가스 종류에 관계없이 BM의 36.4보다 약간 높은 척도모수를 나타냈다. 반면, HAZ-Ar과 HAZ-N₂은 각각 32.6 및 30.3의 척도모수를 나타내며, BM과 비교하여 약간 낮게 나타났다.

보호가스에 관계없이 FZ의 형상모수와 척도모수는 비슷하게 나타났다. 이것은 2종류 보호가스 용접부의 조직이 비슷한 것으로 판단되며, 보호가스 Ar과 N₂는 레이저 용접에서 작용이 유사하기 때문으로 생각된다.

본 실험에서 레이저 용접부는 10~25 μm의 용융경계 (fusion line, FL) 만을 나타내며, BM과 명확히 구분되는 HAZ는 나타나지 않았다. 그렇기에 Laser-HAZ 시험편의 노치는 FL을 관통하여 가공될 수 있다. FL은 상의 경계이므로 취약하여 응력집중부로 작용할 수 있다. 이것은 레이저 용접부 HAZ의 척도모수가 BM보다 낮은 이유로 생각된다.



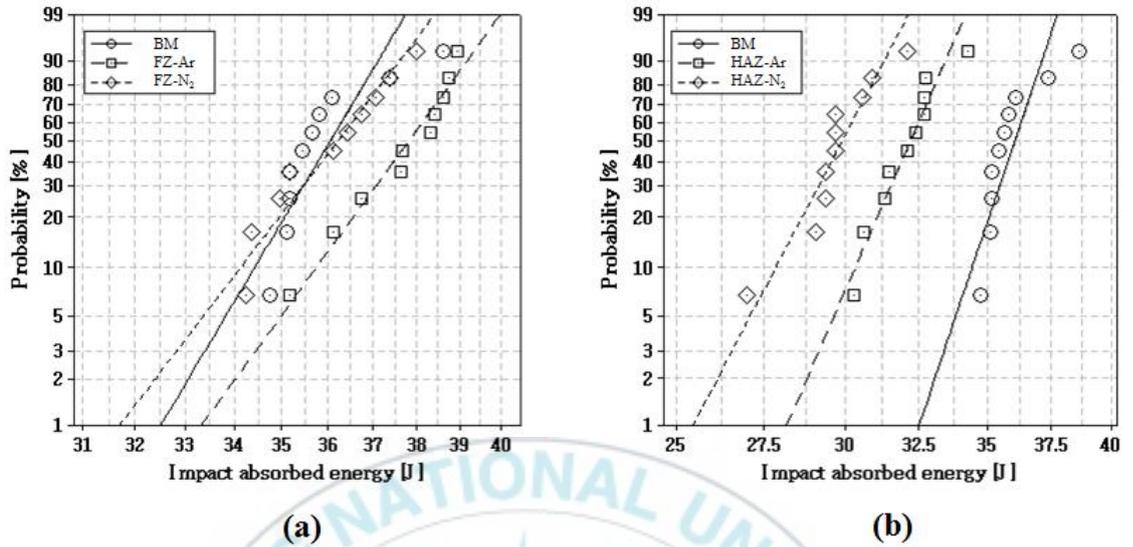
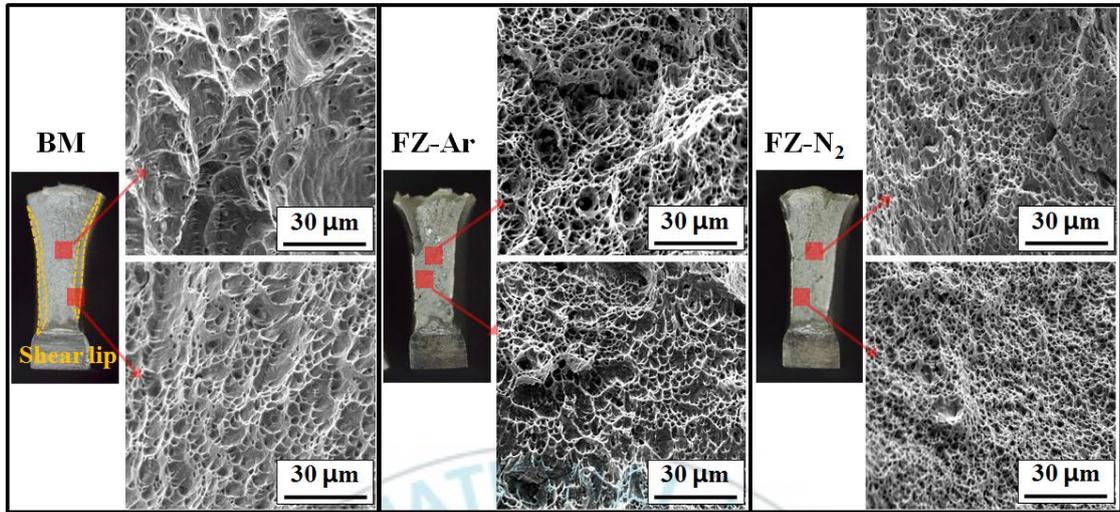


Fig. 3.8 Weibull probability distribution of impact absorbed energy according to shielding gas. (a) Fusion zone, (b) Heat affected zone

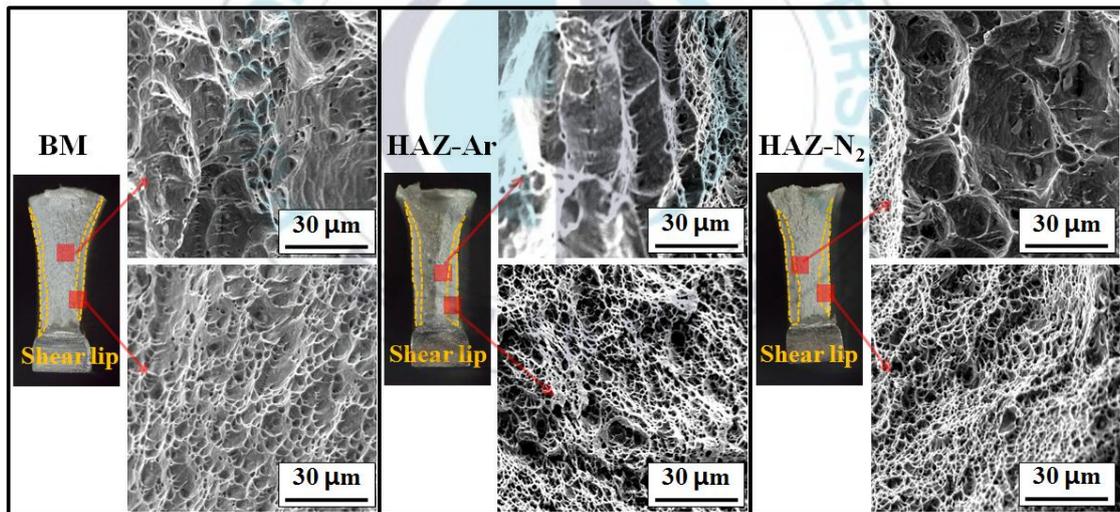
Table 3.3 Impact absorbed energy depending on position of notch

Position of notch	Shape parameter	Scale parameter	Std/ Mean/ COV
BM	40.9	36.4	1.12/ 35.9/ 0.031
FZ-Ar	33.6	38.2	1.26/ 37.7/ 0.033
FZ-N ₂	31.9	36.6	1.29/ 36.0/ 0.035
HAZ-Ar	31.7	32.6	1.17/ 32.1/ 0.036
HAZ-N ₂	26.3	30.3	1.32/ 29.7/ 0.044

충격에 대한 파단양상을 고찰하기 위하여 시험편의 파단면은 SEM 을 이용하여 관찰하였다. Fig. 3.9 (a) 는 BM 을 포함한 용접부의 FZ 에 대한 파단면을 나타낸다. BM 은 중심의 섬유상 (fibrous) 영역과 모서리의 쉘어립 (shear lip) 영역이 육안으로 명확히 구분되는 파면을 나타내었다. 섬유상 영역과 쉘어립 영역은 모두 딩플 (dimple) 을 포함하는 연성파면을 나타내었으며, 섬유상 영역은 쉘어립 영역보다 비교적 큰 딩플을 포함하였다. 모든 FZ 는 딩플을 포함하는 연성파면이 나타났다. FZ 는 BM 과 다르게 파면을 육안으로 관찰하였을 때, 섬유상 영역과 모서리의 쉘어립 영역이 명확히 구분되지 않았다. FZ 파면의 중심부와 모서리는 비슷한 크기의 딩플을 나타내었으며, 딩플의 크기는 BM 에 비하여 미세하였다. 이는 용접 과정 중 생성된 δ -페라이트가 입계를 복잡하게 하여, 균열의 진전을 방해하였기 때문으로 생각된다. Fig. 3.9 (b) 는 BM 을 포함한 용접부의 HAZ 에 대한 파단면을 나타낸다. HAZ 의 파면은 중심의 섬유상 영역과 모서리의 쉘어립 영역으로 구성되며, BM 과 비슷한 파면 양상을 보였다. 이는 용접부의 HAZ 가 결정립의 크기를 제외하고는 BM 과 큰 차이를 가지지 않기 때문으로 생각된다.



(a)



(b)

Fig. 3.29 Macro and SEM fractography after charpy impact test according to shielding gas. (a) Fusion zone, (b) Heat affected zone

4. 결 론

본 연구는 2 종류 보호가스(Ar 및 N₂)가 레이저 용접부의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 2 종류 보호가스는 레이저 용접에서 작용이 비슷하여, 용접부는 매끈하고 연속된 비드를 나타내었으며, 외관상 유사하였다.
- (2) 용접부 FZ는 오스테나이트와 δ -페라이트의 2상 조직을 갖고, 비슷한 크기의 결정립과 δ -페라이트 함량을 나타내었다. 한편, 보호가스 N₂를 사용한 용접부는 N의 고용의 거의 일어나지 않아 질화물이 나타나지 않았다.
- (3) 용접부 FZ는 BM보다 높은 정도 분포를 나타내었으며, 비슷한 정도를 나타내었다.
- (4) 용접부는 BM보다 약간 인장 강도가 증가하였다. 그러나 미량 고용된 N의 고용강화 효과로 보호가스 N₂ 용접부가 약간 높았다. 그러나 FZ에 생성된 δ -페라이트가 오스테나이트보다 인성이 낮으므로 용접부의 연신률은 BM보다 낮았다.
- (5) 용접부는 180° 굽힘에서 3.2 mm를 초과하는 균열은 나타나지 않았다.
- (6) 충격에 대해 2 종류 보호가스 용접부 FZ의 특성수명은 비슷하였으나, BM보다 약간 증가 하였다. 반면 HAZ는 두 용접부에서 BM보다 낮은 특성수명을 나타내었다.

이상에서 보호가스 N₂ 용접부는 Ar 용접부와 비슷한 특성을 나타내었다. 이것으로 보호가스로 N₂를 사용하는 것은 적합하다고 판단된다.

참고문헌

1. Sehwa editor, 1992, “Stainless Steel Manual” , Sehwa, pp.17
2. J .X. Huang, 2005, “A New Application Field of Stainless Steel in China-urban Railway Vehicles” , *China Metall*, Vol. 15, No. 10, pp.4-6
3. L. A Franson and Y. Xu, 2003, “Stainless Steel for Automotive Exhaust System” , *Advanced Materials Processing*, Vol. 94, No. 4, pp. 18-19
4. D. Tang, C. M. Wang, M. Tian, J. Wang and X. Y. Hu, 2015, “Contrasting Study on Quality of SUS301L-HT Joint Fiber Laser Welding and MIG welding” , *Chin J Laser*, Vol. 42, No. 7, pp. 36-38
5. X. J. Wang and J. H. Ye, 2006, “Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Weld Joint of 0Cr18Ni9 Stainless Steel” , *Hot Work Technol*, Vol. 35, No. 23, pp. 36-38
6. M. G. Wu, W. Liu, M. Fan, L. Shao and P. D. Lu, 2005, “Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welding Joint of SUS301L plate” , *J Beijing JiaoTong Univ*, Vol. 29, No. 4, pp. 104-106
7. H. C. Yoo, 2014, “Recent Study of Materials and Welding Methods for Nuclear Power Plant” , *KISTI ReSEAT Program, Pohang*, Korea, pp. 790-755
8. J. U. Park, G. B. An and W. H. Woo, 2016, “Characteristic and Measurement Technology of Inner Welding Residual Stresses in Thick Steel Structures” , *Journal of Welding and Joining*, Vol. 34, No.2, pp.16-21
9. S. Kumar and A. S. Shahi, 2011, “Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded AISI 304 Stainless Steel Joints” , *Materials and Design*, vol 32, pp. 3617-3623
10. J. U. Park, G. B. An and W. H. Woo, 2016, “Characteristic and Measurement Technology of Inner Welding Residual Stresses in Thick Steel Structures” ,

Journal of Welding and Joining, Vol. 34, No.2, pp.16-21

11. D. H. Kim, 2016, Laser processing, *Kyungmoon Books*, Seoul, pp. 82-163, 326-370
12. S. M. Jung, I. D. Park, K. W. Nam and B. C. Choi, 2019, “Study on Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel Welded by Laser and TIG” , *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 27-36
13. Study on Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel depending on Heat Input at Laser Welding, *KSME*, (under submitting)
14. 木下圭介, 平成19年2月, “高出力・ファイバーレーザ溶接現象に関する基礎的研究”, 大阪大学大学院修士論文 (機械工学専攻)
15. D. R. Roessler, 1986, The Industrial Annual Handbook, *Penn Well Book*, pp. 16-30
16. J. L. Zou , W. X. Yang, S. K. Wu, Y. He and R. S. Xiao, 2016, “Effect of Plume on Weld Penetration During High-Power Fiber Laser Welding” , *Journal of Laser Application*, Vol. 28, No. 2, 022003.
17. P. Sathiya, M. Kumar, R. Soundararajan and B. Shanmugarajan, 2013, “Shielding Gas Effect on Weld Characteristics in Arc-Augmented Laser Welding Process of Super Austenitic” , *Optics & Laser Technology*, Vol. 45, pp. 46-55
18. S. K. Wu, K. Zheng, J. L. Zou, F. Jiang and X. H. Han, 2018, “A Study of the Behavior and Effects of Nitrogen Take-up from Protective Gas Shielding in Laser Welding of Stainless Steel” , *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 34, pp. 477-485
19. G. Li , L. Zhang, M. Gao, X. Y. Zeng, 2011, “Influence of Shielding Gas on Fiber Laser Welding of Stainless Steel” , *Hot Work Technol*, Vol. 40 No. 23, pp. 126-129.
20. F. B. Gao, 2014, “Effect of Nitrogen on the Microstructure and Properties of 201 Stainless Steel” , *Inner Mongolia University of Science and Technology*

21. Z. Z. Yuan and Q. X. Dai, 2002, "The role of nitrogen in austenitic stainless steels", *Journal of Jiangsu Univ*, Vol. No. 3, pp. 72-75.
22. B. Z. Deng, Y. Peng and P. Liao, 2011, "Effect of Nitrogen on the Mechanical Properties of Weld Metal of 316L Austenitic Stainless Steel" , *Journal of Mech Eng*, Vol. 47, No. 3, pp. 66-71
23. S. T. Wang, 2008, "Mechanical Behaviors and Mechanisms of Nitrogen Effect of High Nitrogen Austenitic Stainless Steels" , *Graduate School of Chinese Academy of Sciences*
24. B. B Bhatt, H. S. Kamat, S. K. Ghosal and P. K. De, 1998, "Influence of Nitrogen in the Shielding Gas on Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel Welds. *Journal of Mater Eng Perform*" , Vol. 8, No. 5, pp. 591-597
25. L. H. Gong, H. Zhang and D. L. Cheng, 2013, Effect of Nitrogen Addition in Shielding Gas on Corrosion Behavior of Duplex Stainless Steel Welded Joints, *Trans Mater Heat Treat*, Vol. 34, No. 9, pp. 112-125
26. J. Barta, T. Vrtochova and P. Krampotak, 2015, "The Shielding Gas Influence on the Laser Beam Welding of 2205 Duplex Stainless Steel" , *Journal of Slovak Univ Technol*, Vol. 10, pp. 28-34.
27. Section II Part A & C, Section IX of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, *American Society of Mechanical Engineers* (2017)
28. J. Elmer, J. Vaja, H. Carlton, R. Pong, 2015, "The effect of Ar and N₂ shielding gas on laser weld porosity in steel, stainless steels, and Nickel" , *Welding Journal*, Vol 94, pp. 313-325.
29. S. K. Kim, N. J. Kim, G. Shin and C. H. Lee, 1995, "Effect of Cooling Rate kon the Formation of δ -Ferrite in Type 304 stainless steel," *Korean Journal of Metals and Materials*, Vol. 33, No. 9
30. J. S. Lee and J. W. Hong, 1999, "Hot Cracking in Austenitic Stainless Steel Welds," *The Korean Welding & Joining Society*, Vol 17, No. 5

31. N. H. Kang, 2010, “Development of Alloy Design and Welding Technology for Austenitic Stainless Steel,” *The Korean Welding & Joining Society*, Vol. 28, No.1, pp. 10-14
32. J. D. Kim , C. J. Lee and M. K. Song , 2012, “Characteristics of Fiber Laser Welding on STS304L for GTT MARK III Membrane” , *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 36, No. 8, pp. 1067-1075
33. W. A. Weibull, 1951, “Statistical Distribution Function of Wide Applicability” , *Journal of Applied Mechanics*, Vol 18, pp. 293-297



발표 논문 목록

1. 정성민, 박인덕, 이광현, 남기우, 강창룡, 2018, “고출력 디스크 레이저를 이용한 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 기계적 특성 평가”, *대한기계학회 재료 및 파괴부문 2018년도 춘계학술대회 논문집*, Vol. pp. 68-69
Sung-Min Jung, In-Duck Park, Kwang-Hyun Lee, Ki-Woo Nam and Chang-Yong Kang, 2018, Evaluation of Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel Welded by Using High-Power Disk Laser, *Proceedings of the KSME 2018 Spring Annual meeting*, pp 68-69
2. 황석환, 남기우, 박상언, 정성민, 강창용, 2018, “이종재료 기계적 접합법에 따른 물성 비교 평가”, *대한기계학회 재료 및 파괴부문 2018년도 춘계학술대회 논문집*, pp. 248-249
Seok Hwan Hwang, Ki Woo Nam, Sang Eun Park, Sung Min Jung and Chang Yong Kang, 2018, “Comparison of properties according to mechanical joining method of different materials”, *roceedings of the KSME 2018 Spring Annual meeting*, pp 248-249
3. 정성민, 박인덕, 이광현, 남기우, 최병철, 2018, “레이저 용접된 오스테나이트계 스테인리스강의 기계적 특성 연구” *대한기계학회 2018년도 학술대회*, pp. 2558-2561
Sung-Min Jung, In-Duck Park, Kwang-Hyun Lee, Ki-Woo Nam and Byung-Cheol Choi, 2018, “Study on Mechanical properties of Austenitic Stainless Steel Welded by Using Laser”, The Korean Society of Mechanical Engineers 2018 Conference, pp. 2558-2561

감사의 글

2019년 6월 정성민

석사를 하며 졸업하기 까지 많은 어려움이 있었습시다만 많은 분들의 도움을 받아 무사히 석사과정을 마무리할 수 있었습니다. 이에 대하여 감사의 인사를 전하고 싶습니다.

먼저, 저에게 연구에 대한 흥미를 느끼게 해주시고, 공부할 기회를 주신 남기우 교수님께 감사드립니다. 연구뿐만 아니라 생활적인 면에서까지 교수님께 정말 많은 것을 배웠습니다. 감사합니다! 언제나 건강하세요. 교수님!

그리고 옆에서 연구를 지도해 주시고 도와주신 박인덕 박사님께 감사의 인사를 드립니다. 연구원에서 박사님께서 계셔서 큰 의지가 되었습니다. 그리고 많은 격려의 말씀을 해주셨던 서정 박사님, 신동식 센터장님 감사합니다. 정말 큰 힘이 되었습니다. 또한 연구에 대하여 다양한 조언과 도움을 해주셨던 이광현 박사님과 최광덕 선임님께 감사의 인사를 드리고 싶습니다. 두 분 덕분에 많은 것을 배울 수 있었습니다. 그리고 유머 있는 말씀으로 편안한 분위기를 만들어주셨던 이수진 박사님 감사합니다. 덕분에 많이 웃을 수 있었습니다. 그리고 진로에 대하여 많이 조언을 주셨던 최인성 박사님 감사합니다. 참고로 하여 꼭 좋은 곳에 취업하도록 하겠습니다! 다음으로 같은 방에서 생활하며 센터나 연구에 관한 일에 대하여 많이 알려주고 도와주었던 정수씨, 아진씨도 감사합니다. 아진씨는 좋은 곳에 취업하시길 기원합니다!

다음으로 재료강도실험실 부원들에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 먼저, 첫 실험실 후배들이었던 병수, 민현, 예나 고마워. 연구소의 부직학생이 되며, 실험실에 자주 가지 못해서 3명한테는 여러 도움을 받았어. 선배로서 항상 신세만 지고 챙겨준 게 별로 없는 것 같네. 나중에 꼭 갚도록 할게. 그리고 실

협실의 분위기 메이커였던 태영, 재은, 미향도 고마워. 덕분에 즐거웠어. 태영이는 일본 생활 잘 하고 와. 나머지 둘은 이제 곧 졸업이라 고민이 많겠네. 힘내고! 잘 될거야! 그리고 항상 티격태격 하는 장원이형이랑 슈앙이형도 감사해요. 요즘 두 분 덕분에 많이 웃었어요. 아, 장원이형은 졸업 힘내세요! 그리고 동기인 테스파이는 같이 졸업 잘 합시다. 그리고 막내인 세은이는 같이 지낸 시간을 짧았지만 항상 자리 양보해줘서 고마웠어. 그리고 너무 많으셔서 다 언급은 못 드렸지만 인생 선배로서 여러 조언을 해주셨던 재료강도 실험실의 석박사 과정의 선생님들께도 감사의 인사를 드립니다.

모두께 다시 한 번 감사의 인사를 드리며, 무궁한 발전이 있으시길 기원합니다!

