

# 프로필렌 화염을 이용한 선박용 철판 가공 시 온실가스 감소 효과 및 재료의 인장 특성에 미치는 영향 연구

김도현\* · 김동욱\*\* · 서형석\*\*\*†

\* 울산대학교 조선해양공학부 석사과정, \*\* 울산대학교 조선해양공학부 석사수료, \*\*\* 울산대학교 조선해양공학부 교수

## Greenhouse Gas Reduction and Marine Steel Plate Tensile Properties When Using Propylene Flame in the Cutting Process

Do Hyeon Kim\* · Dong Uk Kim\*\* · Hyoung-Seock Seo\*\*\*†

\* Master's degree course, School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan

\*\* Master's degree candidate, School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan

\*\*\* Professor, School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan

**요 약 :** 선박의 건조과정 중 강재의 절단과 곡 가공, 용접에 있어 화염의 사용은 필수적이다. 현재 조선소의 강재 절단과 가공 과정에서는 아세틸렌이 화염 연료로 가장 많이 사용되고 있지만, 폭발 사고의 위험성과 상대적으로 적은 발열량의 한계로 최근에는 프로판 연료의 활용이 증가하고 있다. 하지만 프로판 연료는 상대적으로 가공 속도가 느리고, 가공 시 슬래그의 발생빈도가 높아 품질이 저하된다. 대체 연료로써 프로필렌이 주목받으며 가공 속도와 품질향상에 대한 기대가 증가하고 있다. 프로필렌은 발열량이 우수한 연료로 강재 가공 간 생산성과 가공 품질의 우수성을 갖추고 있다. 이에 본 논문에서는 프로판, 프로필렌 화염을 이용한 철판 가공 시 각 연료의 연소 특성을 분석 및 비교하였다. 프로필렌 화염을 이용한 철판 가공 시 배출되는 온실가스와 유해가스를 프로판 연료의 배출량과 비교하여 저감효과를 실험적으로 확인하였다. 또한, 가공 연료에 따른 입열량이 선박용 강재의 기계적 강도 변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 열 분포실험과 인장시험을 수행하였다. 실험 결과로, 대체 연료인 프로필렌을 사용할 때 프로판 연료에 비해 온도분포가 고르게 나타났다. 기계적 강도 실험 결과로 인장강도의 저하는 관찰되지 않았으나, 변형률은 감소하는 경향을 보였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 향후 실제 조선소의 강재 가공 및 절단과정에 적용하였을 때, 발생하는 문제점에 대한 분석 및 보완연구를 수행할 예정이다.

**핵심용어 :** 온실가스 저감, 프로판 화염, 프로필렌 화염, 열 분포 특성, 인장 특성

**Abstract :** The use of flames is essential in cutting, bending, and welding steel during a ship's construction process. While acetylene fuel is commonly used in steel cutting and the manufacturing process in shipyards, the use of propane as an alternative fuel has recently been increasing, due to the lower risk of explosion and propane's relatively low calorific value. However, propane fuel has a relatively slow processing speed and high slag generation frequency, thereby resulting in poor quality. Propylene is another alternative fuel, which has an excellent calorific value. It is expected to gain wider use because of its potential to improve the quality, productivity, and efficiency of steel processing. In this study, the combustion characteristics of propane and propylene fuel during steel plate processing were analyzed and compared. The reduction of greenhouse gases and other harmful gases when using propylene flame was experimentally verified by analyzing the gases emitted during the process. Heat distribution and tensile tests were also performed to investigate the effects of heat input, according to processing fuel used, on the mechanical strength of the marine steel. The results showed that when propylene was used, the temperature was more evenly distributed than when propane fuel was used. Moreover, the mechanical tests showed that when using propylene, there was no decrease in tensile strength, but the strain showed a tendency to decrease. Based on the study results, it is recommended that propylene be used in steel processing and the cutting process in actual shipyards in the future. Additionally, more analysis and supplementary research should be conducted on problems that may occur.

**Key Words :** Greenhouse gas reduction, Propane flame, Propylene flame, Heat transfer characteristic, Tensile property

\* First Author : [kdh6479@ulsan.ac.kr](mailto:kdh6479@ulsan.ac.kr), 052-259-1384

† Corresponding Author : [seohs@ulsan.ac.kr](mailto:seohs@ulsan.ac.kr), 052-259-2153

## 1. 서론

산업통상자원부와 조선업계는 2020년 조선 산업 탄소중립 위원회 1차 개최를 통해 선박 배출 온실가스 감축과 친환경 선박 시장 창출을 논의한 데 이어 2021년에는 제2차 위원회를 개최하였다(KEA, 2021). 제2차 탄소중립위원회의 핵심 추진전략은 고탄소 원료 대체, 생산 공정 탄소 저감, 다배출설비 전환, 재사용·재생이용·재자원화의 4대 전략별 세부 과제 발굴로 구성되어 있다(KEA, 2021). 특히, 제2차 탄소중립위원회의 추진전략에서는 기존의 친환경 선박 개발에 집중했던 핵심 추진전략을 생산 공정의 친환경화로 선정하는 변화를 주었다.

실제로 생산 공정에서 발생하는 탄소와 온실가스는 주목할 만하다. 선박용 후판의 가공과 조립공정에서 발생하는 온실가스 배출량은 전체 공정의 약 17%로, 약 40%를 차지하는 도장 공정을 이어 두 번째로 높은 비중을 차지한다(Ministry of Knowledge Economy, 2011). 매년 국내 후판 출하량의 평균 약 40%를 조선소에서 구입하며(KOSA, 2019), 선박용 후판 가공 및 조립공정의 온실가스 배출량은 저감을 위한 대응이 필요한 수준이다.

특히, 선박용 후판은 화염을 이용하여 가공하기 때문에 가공 과정에서 온실가스가 발생하게 된다. 후판 가공 시 사용되는 대표적인 연료로서 아세틸렌과 프로판이 사용되고 있다. 하지만 아세틸렌은 산소와 결합하였을 때 2.5~100%의 넓은 폭발한계를 가지고 있기 때문에 폭발사고의 위험성이 크다(Explore the World of Piping, 2022; Nan, 2021). 이에 반하여 프로판 연료는 2.1~9.5%의 비교적 좁은 폭발한계를 가지기 때문에 아세틸렌에 비해 안전하다. 최근에는 대체 연료로 프로필렌이 주목받고 있다. 프로필렌의 품질 우수성과 안전성에 관한 여러 연구(Han et al., 2014, Choi and Choi, 2020)가 수행되고 있지만 온실가스 배출 측면에서 기존의 연료와 비교한 연구는 미비하다.

이에 본 연구에서는 프로판 연료와 프로필렌 연료를 사용해 선박용 강재를 절단할 때 발생하는 배출가스를 분석하여 프로필렌 연료의 친환경성을 확인하였다. 나아가 프로판 연료로 선박용 강재를 가열할 때, 재료의 열 분포 특성을 확인하였다. 끝으로 프로판 화염과 프로필렌 화염을 이용하여 가공한 시험편의 인장 특성을 실험방법으로 분석하였다.

## 2. 화염 특성 분석

### 2.1 온실가스 저감효과

본 연구에서는 프로필렌이 대체 연료로 사용되었을 때 온

실가스 저감효과에 관한 기초연구로써 배출가스 분석을 수행하였다. 국제해사기구는 대표적으로 질소산화물(NOx)과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 포함한 배출가스에 대한 규제를 시행하고 있다(Jeong et al., 2018). 이에 프로판 연료와 프로필렌 연료를 사용한 화염의 질소산화물과 이산화탄소의 발생량을 비교하였다. 기초연구에서는 연료를 이용한 화염에서 발생하는 배출가스의 분석을 위해 시스템을 구축하였으며, 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다.

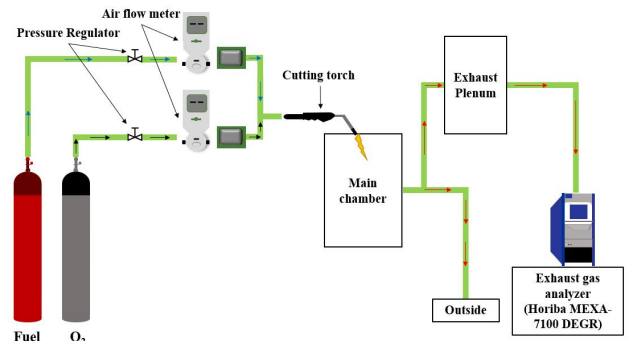


Fig. 1. Schematic of emission analysis system.

연소 및 분석시스템은 화염의 배출가스를 가스분석기로 전달하도록 설계하였다. 동일한 양의 연료를 사용했을 때 배출되는 가스를 비교하기 위해 압력 조절기와 에어플로미터를 산소통과 연료통에 설치하여 공기-연료비(Air-Fuel Ratio, AFR)를 조절하였다. 공기-연료 혼합물의 연소 시 발생하는 배출가스를 분석하기 위해 MEXA-7100 DEGR 배출량 측정 장비를 사용하였으며, 본 실험의 표적 배출가스인 질소산화물과 이산화탄소에 대한 측정 사양은 Table 1과 같다(HORIBA, 2001). 배출가스가 균일하게 측정 장비에 흡입될 수 있도록 배기 플레넘을 이용하여 공급하였다. 프로판 연료와 프로필렌 연료를 사용한 화염의 질소산화물과 이산화탄소의 발생량을 비교하기 위한 실험은 1800초 동안 진행하였다.

Table 1. Specification of Horiba MEXA-7100DEGR

Emission gas	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>
Measuring range	0-10,000 ppm	0-20% vol.
Span gas	NO, NO <sub>2</sub>	CO, N <sub>2</sub>
Accuracy	±1%	

공기-연료의 비율과 배출가스 발생량의 상관관계를 분석하기 위해서 식(1)의 공기-연료비를 계산하였다.  $m_{air}$ 은 공기

프로필렌 화염을 이용한 선박용 철판 가공 시 온실가스 감소 효과 및 재료의 인장 특성에 미치는 영향 연구

의 질량,  $m_{fuel}$ 은 연료의 질량이다. 당량비는 실제 AFR과 이론 AFR의 비율을 나타내며 식(2)로 표현된다.

$$AFR = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (1)$$

$$Equivalence\ Ratio(\Phi) = \frac{AFR}{AFR_{stoich}} \quad (2)$$

본 실험에 사용된 프로판과 프로필렌의 특징은 Table 2에 나타내었다. 실험은 당량비의 변화에 따른 배출가스 발생 정도를 확인하기 위해 공기의 비율을 증가시키며 당량비를 조절하였다. 실험에 사용된 연료 압력은 1.5 bar이며 공기압력은 5 bar이다. 질량 유량은 0.5 kg/s이며, 주위온도는 293 K로 통제하였다. 당량비 0.12, 0.24, 0.47, 0.71, 0.95, 1.18, 1.42의 경우에 대해 배출가스를 분석하였다. 당량비 1을 기준으로 1보다 크면 과농혼합기, 1일 경우 양론혼합기, 1보다 작으면 희박혼합기로 분류된다.

Table 2. Fuel feature of Propane and Propylene

Feature	Propane	Propylene
Chemical formula	$C_3H_8$	$C_3H_6$
Vapor density [ $kg/m^3$ ]	509	609
Heating value [MJ/kg]	46.34	43.9
Boiling point [ $^{\circ}C$ ]	-42	-47.7
Autoignition temperature [ $^{\circ}C$ ]	510	438
Flame temperature [ $^{\circ}C$ ]	1980	2924
Flame velocity [m/s]	0.4	0.5
Stoichiometry AFR	15.8	14.5

Fig. 2는 당량비에 따른 프로판 화염과 프로필렌 화염의 질소산화물 배출 결과이다. 실험 결과로 희박혼합기 구간에서는 당량비 증가에 따라 두 연료 모두 질소산화물의 배출량이 증가하였다. 이는 당량비 증가와 함께 챔버 내부의 온도가 증가했기 때문이다(Cho et al., 2009). 연소과정에서 반응하는 공기 중의 질소는 고온에서 산화되어 질소산화물 형태를 가진다. 특히 양론혼합기에서는 연소 온도가 가장 높기 때문에 챔버 내부의 온도는 최대점에 이르고 질소산화물의 배출량이 가장 크다(Park et al., 2008). 반면, 과농혼합기 구간에서는 당량비 증가에 따라 질소산화물의 배출량이 감소하며, 두 연료의 질소산화물 배출량 차이가 증가하는 경향을 보였다. 과농혼합기 구간의 당량비 증가에 따른 질소산화물

의 감소는 배출된 질소의 환원 반응이 활성화되기 때문이다(Kim et al., 2016). 과농혼합기에서는 산소 함유량이 풍부하기 때문에 반응과정에서 질소산화물을 질소( $N_2$ )로 환원시키는 과정이 존재하므로 질소산화물의 배출량이 감소한다(Moon et al., 1999). 결과적으로 프로필렌 화염의 사용은 당량비에 관계없이 프로판 화염 사용보다 질소산화물 배출량을 감소시킬 수 있다.

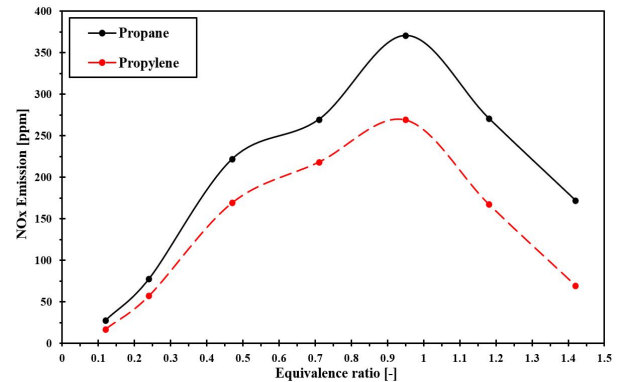


Fig. 2. NOx emission vs Equivalence ratio curve.

Fig. 3은 프로판 화염과 프로필렌 화염에서 배출된 이산화탄소량과 당량비 관계를 나타낸다. 두 연료 모두 이산화탄소 배출량 경향은 당량비가 증가함에 따라 미약한 감소를 보였다. 전체 결과를 분석하면, 이산화탄소의 배출은 당량비와 관계없이 프로판 화염이 프로필렌 화염과 비교해 평균 22.7% 이상 많은 양이 발생하였다.

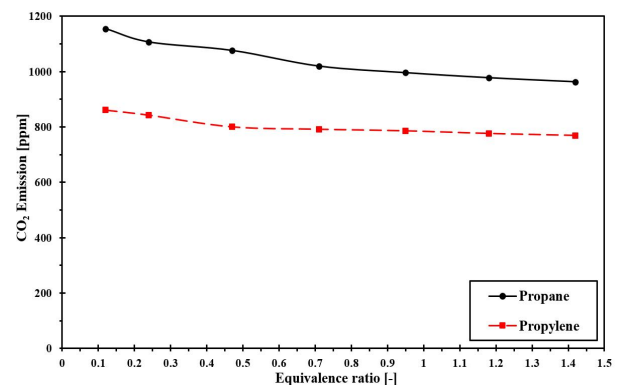


Fig. 3. CO<sub>2</sub> emission vs Equivalence ratio curve.

## 2.2 열 분포 및 연료 소모 특성

또한 본 연구에서는 선박용 강재인 SS400(Lee et al., 1996) 후판을 화염으로 절단 가공할 때, 화염 종류에 따른 강재의 온도분포와 연료 소모 특성을 확인하였다. Fig. 4는 SS400 후

판의 온도분포를 측정하기 위한 실험구성을 보여준다. 실험 시스템의 구성은 Fig. 1의 구성과 유사하다. Fig. 4와 같이 온도의 분포를 가시적으로 확인하기 위해 thermal camera를 추가로 설치하였고, 동시에 후판의 온도분포를 측정하기 위한 thermocouple과 midi logger GL840을 추가 설치하였다. 500 mm 정사각 후판의 두께는 30 mm이다. 후판 전체의 온도분포 측정을 위해 판을 가로 3개 구역, 세로 3개 구역, 총 9개의 정사각 구역으로 나누었다. 각 구역 중앙부에 thermocouple을 설치하였으며, thermocouple 사이의 간격은 약 160 mm이다. 설치된 thermocouple을 이용하여 후판 9개 구역의 온도분포를 각각 측정하였다. 화염의 분출구는 채널 5번 위치인 후판 뒷면 정중앙에 60 mm 이격하여 설치하였다.

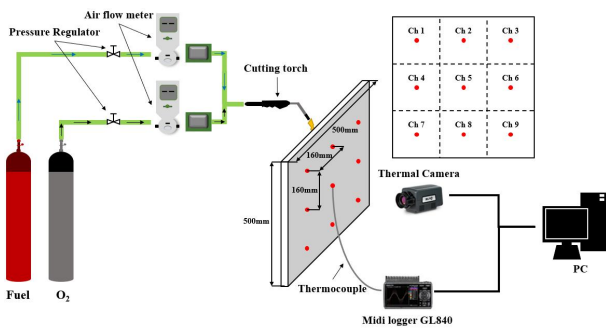


Fig. 4. Schematic of thermal distribution system.

Fig. 5는 프로판 화염을 이용한 화염으로 가열한 후판의 온도분포이다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 화염이 직접 닿는 위치인 5번 채널에서의 온도가 가장 높게 확인되었다. 주변 채널의 온도 증가는 상대적으로 완만한 결과를 보였다. 전체적으로 프로판 화염은 가열 시간 증가에 따라 온도가 지속해서 상승하는 경향을 보였다.

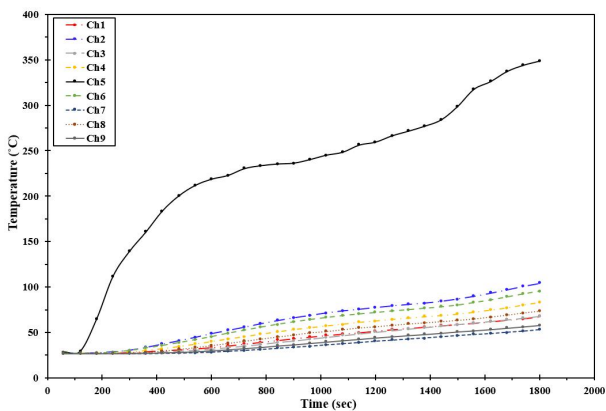


Fig. 5. Temperature vs Time curve of Propane flame.

Fig. 6은 프로필렌 화염을 이용하여 후판을 가열하였을 때 채널별 온도분포를 보여준다. 프로필렌 연료를 사용해 가열한 경우 프로판 연료와 다르게 약 400초 이후 온도 상승의 기울기가 완만해지며, 온도가 일정온도에 수렴하는 듯한 경향을 보였다. 또한, 프로판 연료와 마찬가지로 화염이 직접 가해지는 5번 채널에서의 온도가 가장 높게 나타났다. 반면 주변 채널로의 열전달이 상대적으로 용이하여 프로판 화염 결과보다 주변 채널의 온도 상승 폭이 크게 나타남을 확인하였다.

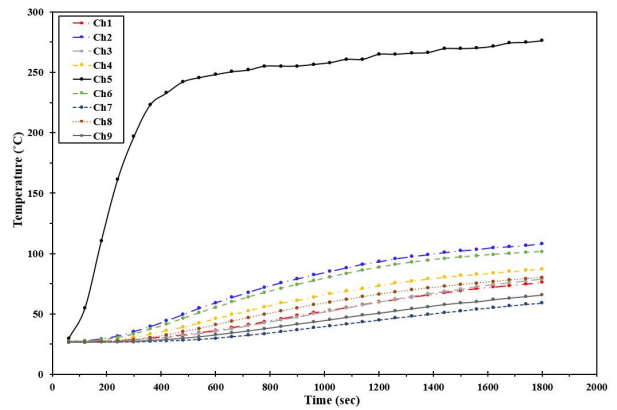


Fig. 6. Temperature vs Time curve of Propylene flame.

Fig. 7은 각 화염을 사용하였을 때 시간에 따른 온도분포이다. 결과로 프로판 화염의 온도분포는 프로필렌 화염의 온도분포에 비해 다소 집중된 분포를 보였다. 이는 재료의 국부적인 손상과 변형을 발생시킬 수 있다. 나아가 프로필렌 화염의 연소는 프로판 화염보다 다소 안정적인 모습을 보였으며, 전체로의 열 전과가 프로판 화염보다 빠름을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 프로판 화염과 프로필렌 화염의 시간에 따른 연료 소모량을 나타내었다. Fig. 8에 보이는 결과 값은 당량비가 0.95로 양론혼합기에 근접한 경우를 선택하였다. 그 이유는 당량비가 1일 때 연료는 가장 높은 온도로 연소하므로 (Lee et al., 2013) 화염이 강제에 가할 수 있는 가장 높은 온도 조건을 부여할 수 있기 때문이다. 초기에는 프로판이 프로필렌보다 연료 소모량이 높은 결과를 보였으며, 연소 시작 600초 이후 유사한 소모량을 가졌다. Table 2와 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 프로필렌 연료는 프로판연료에 비해 초기의 연료소모가 적고 화염온도가 더 높다. 높은 화염온도는 철판의 가공속도를 향상할 수 있으며, 생산성 증대로 이어질 수 있다.

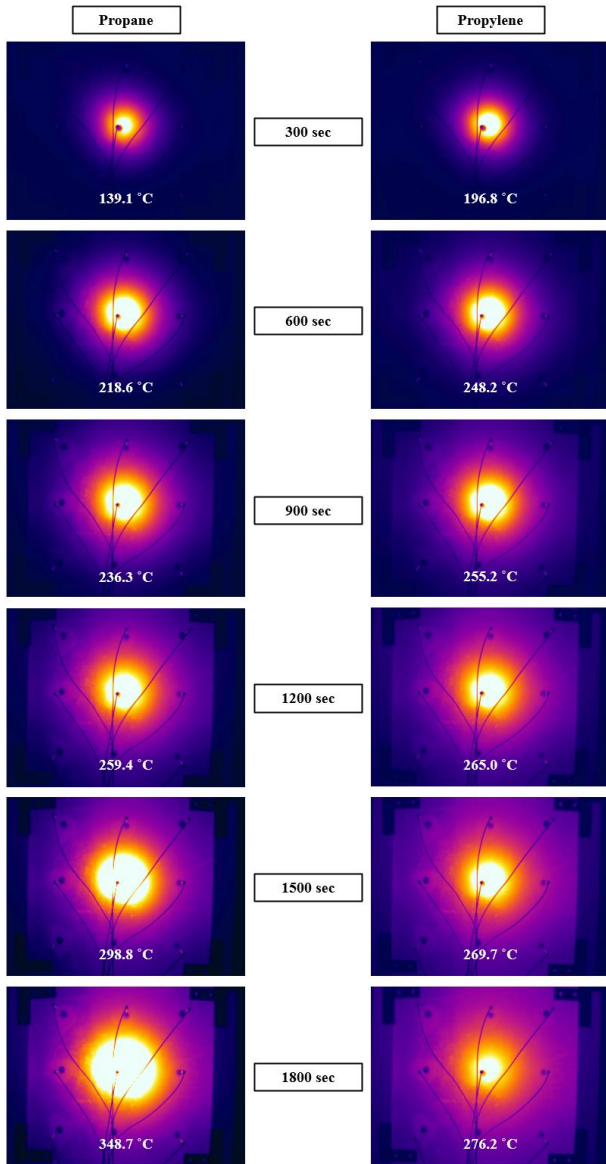


Fig. 7. Thermal distribution characteristic according to time.

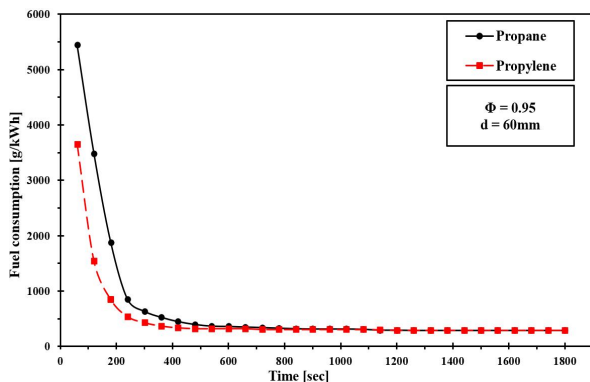


Fig. 8. Fuel consumption vs Time curve.

실험에서 프로판 화염과 프로필렌 화염의 배출가스 특성을 비교한 결과, 프로필렌 연료 사용은 질소산화물과 이산화탄소의 배출량을 줄일 수 있으므로 후판의 절단 가공 시 연료로 활용하면 친환경 효과를 기대할 수 있다.

프로필렌 연료의 친환경 이점은 확인되었지만 이를 대체 연료로 사용하려면 가공 후 구조 강재의 기계적 성능 검증이 필요하다. 즉, 강재를 화염으로 가공할 때, 각 화염의 열 분포에 의한 재료의 기계적 특성 변화에 관한 연구가 필요하다. 따라서 선박의 주요 후판 재료인 SS400을 대체 연료 후보인 프로필렌 화염으로 가공한 후 재료의 기계적 특성에 미치는 변화를 분석하였다. 화염을 이용한 절단 가공이 강재의 인장 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 프로판 화염을 이용해 절단한 강재와 프로필렌 화염을 이용해 절단한 강재, 열 영향을 받지 않은 강재를 시편으로 제작하여 인장 시험 수행 및 비교하였다.

### 3. 기계적 시험

#### 3.1 시험편 준비

시편 제작을 위해 SS400 모재를 각각 프로판 연료와 프로필렌 연료를 사용하여 절단하였다. 절단면은 각 연료 화염에 의한 열 영향을 받은 부분이므로, 각각의 절단면을 채취하여 인장 시편 형태로 가공하였다. 시편의 종류는 각 연료 화염에 의한 기계적 특성의 변화를 확인하기 위해 열 영향을 받지 않은 시편(RW), 프로판 화염으로 절단한 시편(PA), 프로필렌 화염으로 절단한 시편(PY)으로 나누어 독립적으로 제작하였으며 과정은 Fig. 9와 같다. 열 영향을 받지 않은 시편의 제작을 위해 모재를 CNC(Computer Numerical Control)를 이용하여 1 mm 두께의 판을 제작하였다. 열 영향을 받은 시편의 경우 프로판 화염과 프로필렌 화염을 이용하여 모재로부터 1 mm의 판을 채취하였다. 세가지 종류의 채취한 1 mm 두께의 판을 CNC 가공을 이용하여 소형인장시험편 형태로 제작하였다. 시편은 실험 결과의 신뢰성 확보를 위해 종류별로 7개, 총 21개를 제작하였다.

각각의 화염 연료별 열 분포 특성이 재료의 열 경화에 미치는 영향을 확인하기 위해 인장시험을 통한 인장 변형률을 확인하였다. 시편의 앞면은 화염을 직접 받은 부분이며, 뒷면은 화염으로부터 두께인 1 mm만큼 떨어진 부분이다.



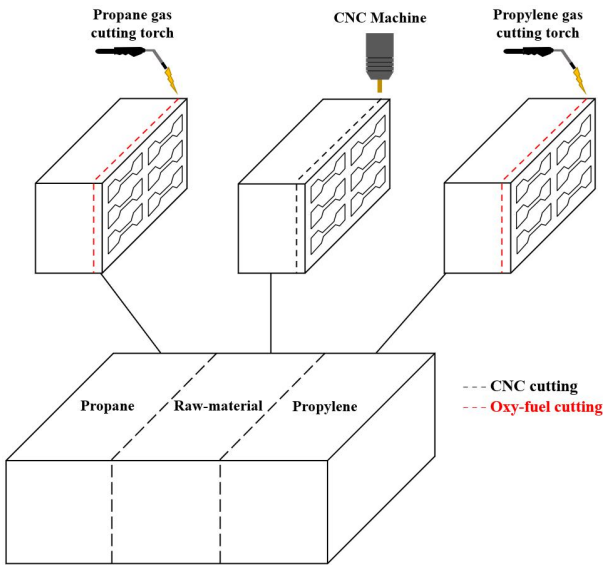


Fig. 9. Schematic of specimen manufacturing.

시편의 치수는 Fig. 10과 같다. 소형 인장 시편의 각 치수에 대한 기준이 명확하지는 않으나 두께(T)의 경우 평행부 너비(W)의 0.2배 이하가 되지 않도록 하였으며(Yoon et al., 2003), ASTM E8/E8M(ASTM, 2013)을 참고하여 제작하였다. 시편의 전체 길이(L)는 75 mm, 물림부의 너비(C)는 15 mm, 물림부의 길이(B)는 20 mm이다. 평행부 길이(A)는 24 mm, 평행부 너비는 4 mm, 모서리반지름(R)은 5.5 mm, 두께는 1 mm이다.

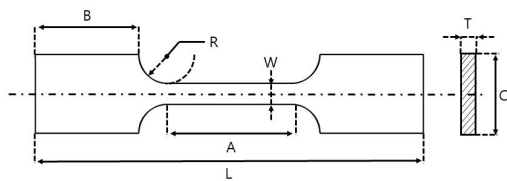


Fig. 10. Dimension of specimen.

### 3.2 인장시험

인장시험은 ASTM E8/E8M(ASTM, 2013)을 준용하여 수행하였다. 시험 장비는 Fig. 11과 같이 SALT 사의 ST-1000 UTM(Universal Testing Machine) 장비를 사용하여 수행하였다. 장비의 maximum load cell capacity는 3 kN, 인장시험 속도는 2 mm/min으로 시편이 완전 파단에 도달할 때까지 실험을 진행하였다.

열 경화에 의한 변형률 차이를 확인하기 위해 시편의 앞과 뒷면에 스트레인게이지를 부착하여 각 면의 변형률을 측정하였다. 스트레인게이지의 신호는 NI(National Instrument)의 PXI 장비를 이용하여 측정하였다. 내장 프로그램인 NI Signal

Express 2015로 스트레인 데이터를 기록하였으며, 데이터는 초당 100개의 데이터를 입력받도록 설정하였다. 실험과정에서 얻은 하중 값과 변형률 값의 Time step을 일치시키기 위해 UTM 장비의 하중 gain 설정 또한 초당 100개로 설정하였다.

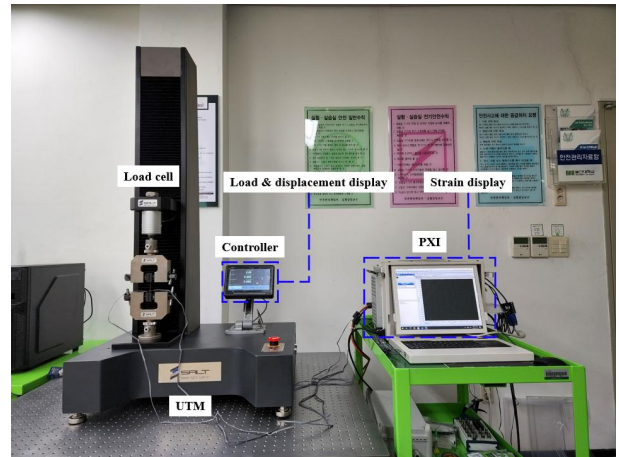


Fig. 11. Experimental set-up.

## 4. 기계적 시험 결과

각 실험 결과들의 COV(Coefficient of Variable)를 계산해 보았을 때 평균 약 5% 이하의 결과를 보였기 때문에 실험 결과의 신뢰성이 확보되었음을 확인하였다. Fig. 12~15의 결과는 각 경우의 대표 결과 값을 사용하였다.

Fig. 12는 열 영향을 받지 않은 시편의 공칭응력-변형률 곡선이다. 그래프 내부에 삽입된 보조 그래프는 스트레인게이지로 측정한 시편의 변형률을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. RW 시편의 실험 결과로 시편의 탄성계수는 앞면 191.3 GPa, 뒷면 192.7 GPa의 결과로 매우 유사한 값을 가졌다. 인장강도 404.3 MPa에서 초기 항복 거동을 보였으며, 변형률 0.002~0.046, 인장응력 404.3~434.4 MPa 구간에서 지속적인 항복 거동을 보였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 파단 변형률은 0.146이며, 앞면과 뒷면의 일치율은 99.4%로 매우 유사한 결과를 보였다. RW 시편의 실험 결과, 열 영향이 없을 때, 시편 양쪽 면의 변형률 특성은 동일함을 확인하였다. 이 결과를 기준으로 PA 시편과 PY 시편에 각각 작용한 프로판 화염과 프로필렌 화염의 영향을 분석하고자 한다.

Fig. 13~15의 그래프 범례에 표현된 Direct와 Indirect는 각각 시편의 앞면과 뒷면을 의미하며, 열 영향을 받은 PA 시편과 PY 시편의 경우 Direct는 화염이 직접 닿은 부분이며, Indirect는 Direct에서 두께 1 mm만큼 떨어진 면이다.

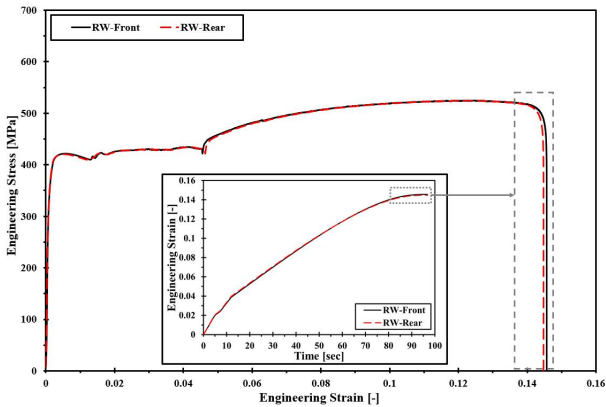


Fig. 12. Engineering stress vs Engineering strain curve of RW specimen.

Fig. 13에는 프로판 화염의 영향을 받은 시편의 공칭응력-변형률 선도를 나타내었다. 시편의 탄성계수는 앞면 195.5 GPa, 뒷면 197.6 GPa의 결과로 매우 유사한 값을 가졌다. 탄성계수는 RW 시편과 유사한 결과를 얻었으며, 프로판 화염에 의한 탄성계수의 변화는 미미한 것으로 판단된다. PA 시편은 인장강도 400.5 MPa에서 초기 항복 거동을 보였으며, 변형률 0.002~0.025, 인장응력 400.5~427.3 MPa 구간에서 지속적인 항복 거동을 보였다. 반면, 변형률 경화의 시작점에서 앞면과 뒷면의 변형률 차이가 발생하였다. 내부 보조 그래프의 공칭 변형률 0.023 지점에서 최초로 변형률 차이가 관찰되기 시작했으며, 나아가 과단 변형률 값은 94.3%의 일치율을 보였다. 과단 변형률은 Direct가 Indirect보다 낮은 값을 보였으며, RW 시편의 결과와 명확한 차이가 관찰되었다. 과단 변형률의 차이가 발생한 이유는 Direct 부분에 발생한 열 경화에 의함이다(Park et al., 2017).

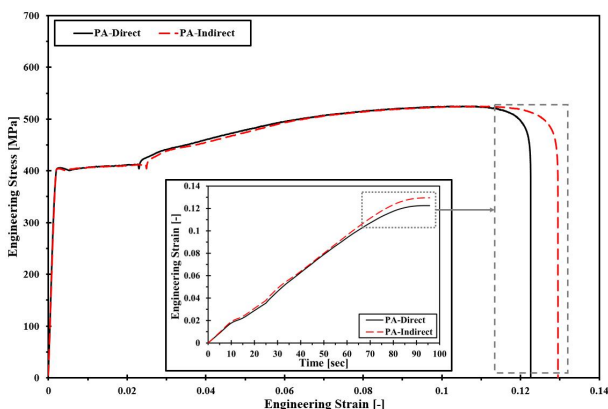


Fig. 13. Engineering stress vs Engineering strain curve of PA specimen.

Fig. 14는 프로필렌 화염 영향을 받은 시편의 공칭응력-변형률 선도이다. 시편의 탄성계수는 앞면 208.7 GPa, 뒷면

209.9 GPa의 결과를 보였다. 특히, 결과에서 주목할만한 점은 과단 변형률이 RW 시편과 비교해 52.3%로 감소하였다. 동시에 변형률 경화 지점이 0.005 지점으로 당겨지는 현상을 보였다. 이는 상대적으로 높은 입열량을 가지는 프로필렌 화염에 의해 열 경화 발생량이 증가하였기 때문이다(Park et al., 2016). 과단 변형률의 경우 앞면과 뒷면의 차이가 눈에 띄게 증가하였다. RW와 PA 시편에 비해 뚜렷한 항복점이 관찰되지 않았으며, 일정 범위의 지속적인 항복 거동 또한 나타나지 않았다. 이는 열 가공에 의한 잔류응력의 영향으로 불분명해진 것으로 판단된다(Andrew Pytel and Jaan Kiusalaas, 2013).

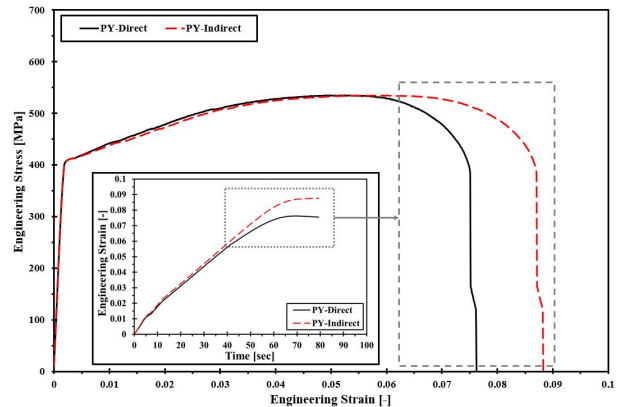


Fig. 14. Engineering stress vs Engineering strain curve of PY specimen.

Fig. 15는 RW, PA, PY 시편의 인장 거동을 비교한 결과이다. 화염 영향에 의한 인장 특성의 변화를 확인하기 위해 시편의 앞면에서 추출한 변형률 데이터를 활용하여 공칭응력-변형률 그래프를 작성하였다. 각 시편의 극한 인장강도 결과는 RW 시편은 524.3 MPa, PA 시편은 524.9 MPa, PY 시편은 534.9 MPa로 나타났다. 극한 인장강도 결과로부터 프로필렌 대체 연료 사용 시 극한 인장강도 저하에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

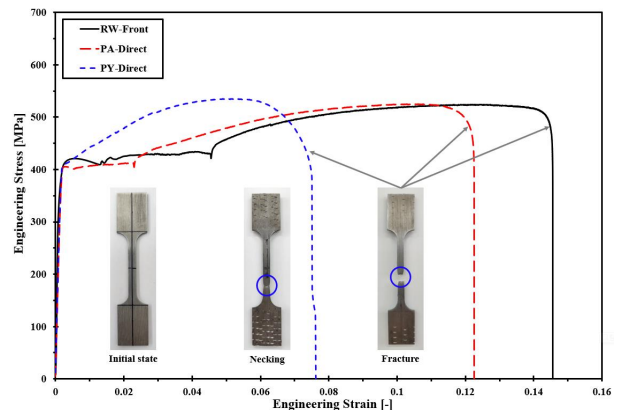


Fig. 15. Comparison Engineering stress vs Engineering strain curve.

Fig. 16은 각 시편에 대해 Direct와 Indirect에서의 과단 변형률을 정리한 선도이다. 먼저 RW 시편의 경우 열 영향이 없으므로 시편의 앞면과 뒷면이 동일한 변형률 결과를 보이며, 이 값을 reference value로써 비교하였다. RW 시편을 기준으로 PA 시편의 결과를 분석해보면, 열을 간접적으로 받은 Indirect의 변형률이 Direct에 비해 큰 값을 보이는데, 이는 열 영향을 직접 받은 Direct 부분에 열 경화가 상대적으로 크게 발생하였기 때문이다. PY 시편의 경우 PA 시편보다 Indirect와 Direct의 결과가 모두 낮은 값을 보였으며, 특히 RW 시편보다 Indirect의 변형률 감소 폭이 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 프로필렌 화염의 경우 프로판 화염과 비교해 상대적으로 높은 화염온도를 가지기 때문에 열에 의한 재료의 경화가 두께 방향으로 미치는 영향이 PA보다 크며, Indirect 부분까지 상당한 경화를 발생시켰을 것으로 판단된다.

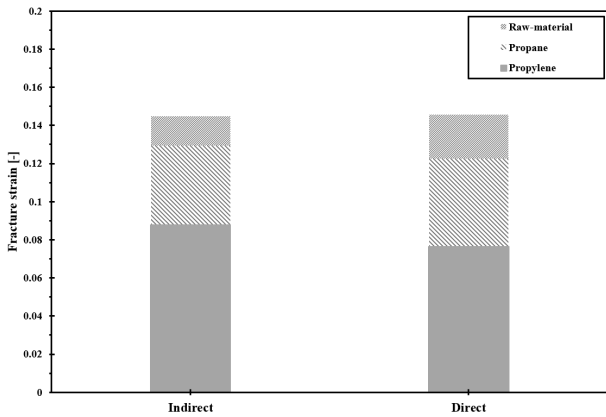


Fig. 16. Fracture strain on direct affected side and indirect affected side.

## 5. 결론

본 연구에서는 선박 강제 가공을 위해 사용되는 프로판 화염과 대체 연료로 주목받고 있는 프로필렌 화염의 친환경 특성, 열 분포 특성과 각 화염으로 가공된 시편의 인장 특성을 비교하였다.

온실가스감소 효과를 살펴보기 위해 프로필렌 화염과 프로판 화염의 배출가스 및 열 분포 특성을 분석하였다. 연구 결과, 프로필렌 화염은 프로판 화염보다 질소산화물과 이산화탄소 배출량이 적게 나타났다. 화염의 열 분포 특성의 경우 프로판 연료는 열 분포가 국부적으로 집중되는 반면, 프로필렌 화염의 열 분포는 상대적으로 넓은 범위로 열전달이 이루어지기 때문에 열 집중에 의한 국부 손상을 방지할 수 있다. 동시에 프로필렌 연료는 프로판 연료보다 연료 소모량을 줄일 수 있는 장점이 있다.

또한 프로판 화염과 프로필렌 화염으로 절단 가공한 시편의 인장 특성을 비교한 결과, 프로필렌 화염이 재료의 최대 인장강도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 확인되었다.

결론적으로 프로필렌 연료는 프로판 연료에 비해 안전하며, 가공 후 품질이 우수하다. 선박용 강제 가공 과정에서 대체 연료로써 프로필렌을 사용할 때 온실가스 저감효과, 재료의 국부 변형 방지 및 연료 소모량 절감을 기대할 수 있다.

향후, 본 연구에서 연구된 결과를 바탕으로 조선소 및 현장에서 강제 가공 및 절단 등의 현장 테스트와 현장 모니터링을 통해 프로필렌 화염을 이용한 향상된 강제 가공법 및 환경오염 감소에 관한 연구를 지속해서 수행할 예정이다.

## Acknowledgement

본 연구는 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-003)과 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0001968, 2022년 산업혁신인재성장지원사업)의 결과입니다.

## References

- [1] American Society for Testing and Materials(ASM)(2013), Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (ASTM E8/E8M-13a), ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- [2] Andrew Pytel and Jaan Kiusalaas(2013), Mechanics of Materials, Cengage learning, second edition.
- [3] Cho, B. K., D. W. Choi, G. B. Kim, Y. J. Chang, J. H. Song, and C. H. Jeon(2009), Effect of the Degree of Fuel-Air Mixing and Equivalence Ratio on the NO<sub>x</sub> Emission and Heat Release in a Dump Combustor, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 33, No. 9, pp. 658-665.
- [4] Choi, Y. J. and J. W. Choi(2020), Experimental Study on the Changes in the Oxygen Concentration and the Pressure at Temperature of 200°C for the Assessment of the Risks of Fire and Explosion of Propylene, Korean Chem. Eng. Res., Vol 58, No. 3, pp. 356-361.
- [5] Explore the World of Piping(2022), Lower and Upper Explosive Limits for Flammable Gases and Vapors, [https://www.wermac.org/safety/safety\\_what\\_is\\_lcl\\_and\\_ucl.html](https://www.wermac.org/safety/safety_what_is_lcl_and_ucl.html).
- [6] Han, S. H., H. C. Lee, K. S. Park, and T. O. Kim(2014), Consequence Analysis for Fire and Explosion Accidents in



Propylene Recovery Process, KIGAS, Vol. 18, No. 1, pp. 52-60.

- [7] HORIBA(2001), Horiba MEXA-7000DEGR Instruction Manual.
- [8] Jeong, T. H., S. G. Kang, J. K. Lee, J. G. Ahn(2018), Introduction to International Maritime Organization (IMO) GHG Emissions Regulation and Domestic and Foreign Response Measures, The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 55, No. 4, pp. 48-54.
- [9] KEA(2021), Energy issue briefing, No. 166, pp. 1-5.
- [10] Kim, J. W., H. Lim, Y. G. Go, and C. H. Jeon(2016), Characteristics of UBC and NOx Emission in Air Staging Combustion, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 40, No. 10, pp. 637-644.
- [11] KOSA(2019), An Analysis of the Shipment Structure of Steel Report.
- [12] Lee, J. B., D. Y. Kim, D. H. Shin, S. H. Lee(2013), Thermal and Flow Characteristics of Fluid with Fuel Type and Equivalence Ratio in Flame Spray Process, Journal of ILASS-Korea, Vol. 18, No. 4, pp. 202-208
- [13] Lee, Y. B., N. I. Cho, and K. E. Park(1996), A study on surface fatigue crack behavior of SS400 weldment, Journal of KWS, Vol. 14, No. 2, pp. 90-95
- [14] Ministry of Knowledge Economy(2011), Greenhouse gases·energy management systems in the shipbuilding industry standard manual, pp. 1-271
- [15] Moon, H. C., C. B. Sun, G. D. Lee, B. H. Ahn, L. T. Lim, and S. S. Hong(1999), Catalytic Reduction of Nitric Oxide by Carbon Monoxide over Perovskite-Type Oxide, J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 10, No. 3, pp. 407-414
- [16] Nan(2021), Ladipo market explosion caused by acetylene gas - LPG retailers, <https://guardian.ng/news/nigeria/ladipo-market-explosion-caused-by-acetylene-gas-lpg-retailers/>.
- [17] Park, D. B., B. K. Cho, Y. J. Chang, and C. H. Jeon (2008), The Impact Equivalence Ratio and Fuel-Air Unmixedness on NOx Emission Characteristics, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. spring conference, pp. 376-380.
- [18] Park, M. H., J. P. Lee, B. J. Jin, I. J. Kim, J. S. Kim, and I. S. Kim(2017), An Experiment Study for Hardness Characteristic of Weldment according to Welding Heat-Input of Vertical GMA Welding Process, Journal of Welding and Joining, Vol. 35, No. 2, pp. 35-42.
- [19] Yoon J. H. and B. S. Lee(2003), The application of small specimen technique to the evaluation of tensile properties of the irradiated materials.

---

Received : 2022. 04. 28.

Revised : 2022. 05. 30.

Accepted : 2022. 06. 27.