

수소-산소 혼합가스를 이용한 열절단 특성

김남인[†]*, 장용원*, 이정수*

한진중공업 기술연구소*

A Study on Thermal Cutting using Hydrogen-Oxygen Mixed Gas

Nam In Kim[†]*, Yong Won Jang* and Jeong Soo Lee*

Hanjin Heavy Industries & Construction Co., LTD.*

Abstract

Cutting procedures whose qualities are determined by various variables largely influences shipbuilding productivity. Particularly, defects in cutting shapes and cutting surface results in delay of the post shipbuilding stages such as welding and assemblage process. Because cutting procedures are influenced by various numbers of requirements according to the plate thickness, cutting precision can be maintained when the cutting conditions are appropriate. Existing cutting procedures utilize fossil fuels such as propane or ethylene as the main fuel component. Especially, when fossil fuel is applied to thick plate cutting, this process gives relatively slow cutting speed and generates large quantities of harmful polluting fumes. Recently, hydrogen-oxygen mixed gas generated by electrically dissociating water into Hydrogen and oxygen components is welcomed as an alternative fuel source. Also recent results report that alternative cutting fuel improves the cutting qualities and speed. This paper presents that cutting characteristics and optimum cutting condition of hydrogen-oxygen mixed gas.

※Keywords: Hydrogen-oxygen mixed gas (수소-산소 혼합가스), Propane gas (프로판 가스), Ethylene gas(에틸렌 가스), Optimum cutting condition (최적 절단조건)

1. 서론

선박건조에 있어서 절단공정은 다양한 가공변수에 따라 품질이 결정되며 선박 생산성에 많은 영향을 미친다. 절단공정에는 크게 플라즈마 절단과 탄화

수소가스와 절단산소를 이용한 가스절단이 있으며, 플라즈마 절단은 두께 25t 이하의 중박판 강재에 적용되고 가스 절단은 30t 이상의 후판 절단에 주로 이용되고 있다. 특히 후판 절단에 주로 이용되고 있는 탄화수소 가스절단은 절단속도가 상대적으로 느리고 독성 훈(fume) 등의 공해 물질을 다량 배출하는 등 새로운 절단 프로세스가 요구되고

[†]교신저자: namink@hanjinsc.com, 051-410-3374

있다. 절단작업 시 작업자의 판단에 따라 절단품질이 결정되는 경향을 보이며, 이는 부재의 열 변형이나 절단면의 조직변화, 잔류응력 의 발생 등에 의한 절단 후 공정의 작업상 문제를 발생시키고, 이러한 부재가 선체 구조물로서 사용될 경우 성능상 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 또한, 현장에서 불규칙적으로 발생하는 공정변수로 인해 절단품질을 유지하기 위한 최적의 절단조건에 대한 자료가 부족한 실정이며, 절단 공정에서의 품질차이를 일으킬 뿐만 아니라 후 공정에 영향을 주기 때문에 최적 절단조건에 대한 실험적인 연구가 필요하다.

최근 물을 전기 분해하여 발생된 수소와 산소가스를 열원으로 한 혼합가스 절단 공정은 기존 탄화수소 가스절단에 비해 절단 품질, 절단속도의 향상뿐만 아니라 친환경적인 청정원료로 각광 받고 있다. 본 연구에서는 청정원료인 수소-산소 혼합가스를 이용한 절단공정에서의 절단특성에 대해 기존 탄화수소(에틸렌)가스와 비교하였으며, 절단 후 용접특성에 대해 고찰하였다.

2. 절단특성

2.1 수소-산소 혼합가스의 개요

수소-산소 혼합가스란 물(H₂O)의 구성비 그대로 수소와 산소가 2 : 1 로 혼합된 상태의 혼합가스를 말하며, 물연료 자동 공급장치에서 생산되는 완전무공해 연료를 말한다. 고도의 전기분해 기술에 의한 물의 해리작용으로 생성되는 수소-산소 혼합가스는 자체산소에 의해 완전 연소되는 이상적인 혼합기체로서 임플로전(implosion)현상에 의해 독특한 연소특성을 나타낸다. Fig. 1 은 물의 전기분해에 의해 발생하는 혼합가스의 발생 메커니즘을 나타내었다.

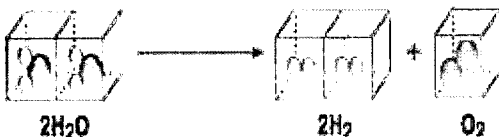
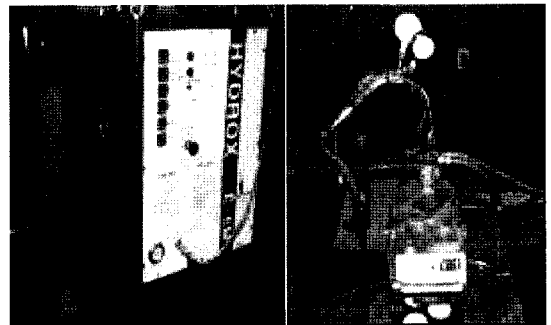


Fig.1 Generation of hydrogen-oxygen mixed gas

2.2 절단 시험방법 및 특성

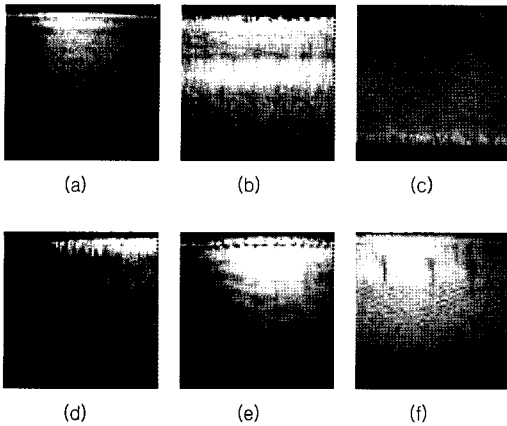
수소-산소 혼합가스의 절단성능을 알아보기 위하여 현재 절단공정에서 사용중인 탄화수소(에틸렌)가스와 비교하여, 절단 품질을 검토하였다. Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 혼합가스 생산량이 시간당 6M³, 사용압력이 3.0kgf/cm² 인 가스발생기를 이용하였으며, 자동절단은 auto carriage 를 이용하였다. 절단 시험에 사용된 재료는 선체 구조용 강재이며, 시험편 크기는 500 mm x 1000 mm(W X L)로 제작하여 150 mm 간격으로 절단속도를 5 단계로 변화하여 절단면이 절단품질규격 ISO 9013 (Table 1)에 만족하는 최적 절단조건을 측정하였다. 절단 팁(tip)은 강재 두께에 따라 수직형 No. 3, 4 을 사용하였으며, 혼합가스를 이용한 절단 시 산소압력은 6.0~6.2kgf/cm², 혼합가스 압력은 1.0~1.2kgf/cm², 예열시간은 7~10sec, 절단팁과 모재와의 거리는 8~10 mm로 하였다. 탄화수소(에틸렌)가스는 현장 사용조건과 동일하며, 산소압력은 5.5~5.8 kgf/cm², 에틸렌 압력은 0.4~0.5 kgf/cm², 백심 길이는 7~10 mm, 예열시간 및 절단팁과 모재와의 거리는 수소-산소 혼합가스와 동일하게 적용하였다.



(A) Mixed gas generator (b) Auto carriage

Fig. 2 Test equipments

수소-산소 혼합가스를 이용한 절단공정에서 절단속도에 따른 절단품질을 검토하기 위해 산소 및 연료가스 압력, 화구와 모재와의 거리에 대한 절단 품질변화를 고찰하여 최적값을 도출하였다. Fig. 3 에서는 절단변수(절단속도, 화구와 모재와의 거리, 예열시간)에 따른 절단면의 품질정도를 나타내었다.



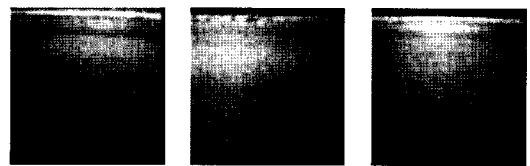
(a) Correct cut (b) For slow cutting speed
 (c) For fast cutting speed
 (d) For insufficient preheating
 (e) Preheat flames too High above the work
 (f) Preheat flames too close to the work

Fig. 3 Cutting surface with varying parameter

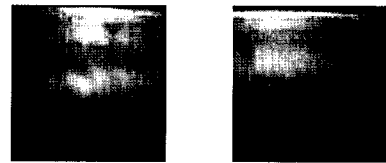
Table 1 The perpendicularity or angularity tolerance and the melting of the top edge (ISO 9013)

Range	Perpendicularity of angularity tolerance, u [mm]	Cut thickness, a [mm]	Δa [mm]
1	$0.05 + 0.003a$	≤ 3	$0.1a$
2	$0.15 + 0.007a$	$>3 \leq 6$	0.3
3	$0.4 + 0.01a$	$>6 \leq 10$	0.3
4	$0.8 + 0.02a$	$>10 \leq 20$	1
5	$1.2 + 0.035a$	$>20 \leq 40$	1.5
		$>40 \leq 100$	2
		$>100 \leq 150$	3
		$>150 \leq 200$	5
		$>200 \leq 250$	8
		$>250 \leq 300$	10

Fig. 4 와 5 는 수소-산소 혼합가스와 에틸렌가스를 이용하여 부재두께 40 mm에서 절단속도에 따른 절단면을 나타내었다. 절단속도가 늦으면 절단면의 윗면이 많이 용융(a, b)되다가 적정조건에 도달하기 시작하면 윗면의 거친 용융부가 사라지고(c), 더 속도가 빨라지면 거친 드래그라인이 생성되며, 절단단면의 직각도를 잃어가고, 아랫면에 드로스(dross)가 부착되는 것으로 나타났다(d, e).

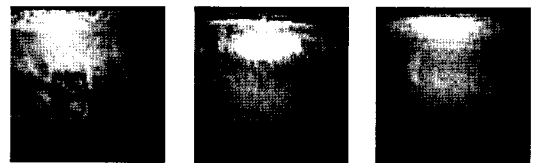


(a) 350 mm/min (b) 400 mm/min (c) 450 mm/min

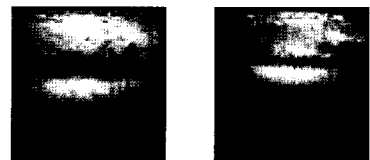


(d) 500 mm/min (e) 550 mm/min

Fig. 4 Cutting surface at various cutting speeds for hydrogen-oxygen mixed gas



(a) 300 mm/min (b) 350 mm/min (c) 400 mm/min



(d) 450 mm/min (e) 500 mm/min

Fig. 5 Cutting surface at various cutting speeds for ethylene gas

Fig. 6 은 절단속도에 따른 윗면 용융 정도를 정량적으로 나타내었으며, 속도증가에 따라 용융량은 줄어드는 특성을 보였으며, 동일한 절단 속도에서 수소-산소 혼합가스가 더 적은 것으로 나타났다. 부재두께 40 mm에서 용융길이가 최대 1.5 mm (Table 1)를 허용기준으로 에틸렌가스 300 mm/min 절단속도를 제외한 나머지 속도범위에서는 모두 만족하는 것으로 나타났다.

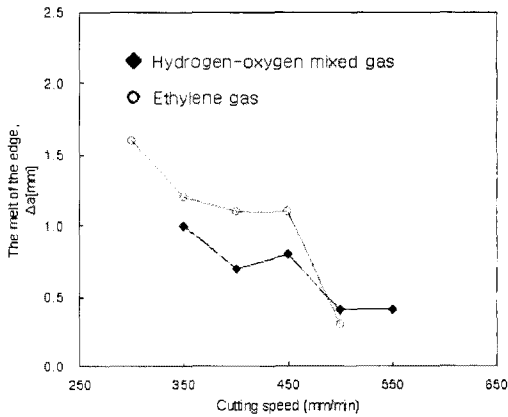


Fig. 6 The melt of the edge width versus cutting

Fig. 7 은 절단된 부재에 대한 열 영향부의 경도 변화를 나타내었다. 절단면에서 가까운 부분은 경도가 높고, 거리가 멀어질수록 점점 낮아지는 경향을 보였으며, 수소-산소 혼합가스의 경우 1.5mm, 에틸렌 가스는 2.0mm 에서 급격히 경도 값이 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 절단 시 부재가 국부적으로 가열되어 열 영향을 받아 강의 변태점 이상으로 온도가 상승되어 내부조직이 바뀌는 특성으로 인하여 경화 조직의 변화를 나타내었으며, 수소-산소 혼합가스의 경우 화염 특성상 에틸렌 가스에 비해 직진성이 높고, 화염 범위가 좁아 열영향부가 좁은 것으로 나타났다. Fig. 8 는 Table 1 의 절단 직각도 오차범위(5 등급)를 기준으로 부재 두께 40mm, 75mm 를 절단가스에 대해 비교하여 나타내었으며, 수소-산소 혼합가스 3 등급, 에틸렌 가스는 4 등급으로 각각 나타났다.

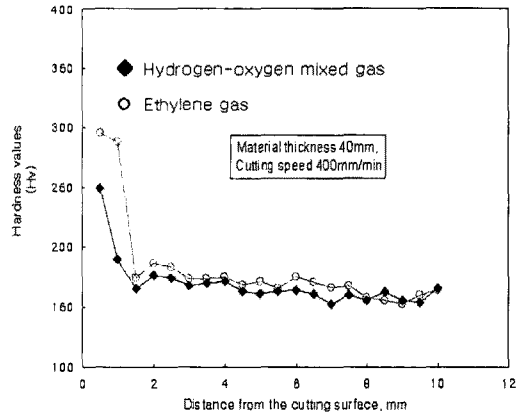


Fig. 7 Hardness values versus distance from the cutting surface

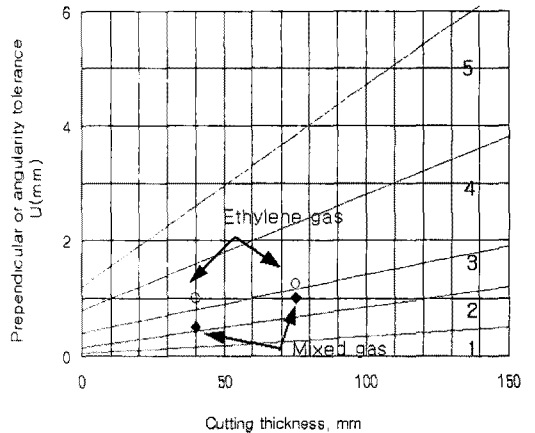


Fig. 8 The perpendicular or angularity tolerance range versus cutting thickness

절단품질규격(ISO 9013)을 기준으로 강재두께 별 절단변수에 따른 절단면의 품질을 시험해 본 결과 Table 2 와 같이 최적 자동 수직절단 조건을 나타내었다. 개선절단은 수직절단과 동일한 장비 및 절단 품질을 기준으로 하였으며, 절단 토치각을 17.5°로 하여 자동 개선 절단을 실시 하였다. 강재 두께별 개선 절단속도는 Table 2 에 나타낸

최적 자동수직 절단 보다 20 ~ 25% 낮은 것으로 나타났다. 수동절단의 경우 절단품질에 가장 큰 영향을 미치는 것 중에 하나인 작업자의 숙련도는 고기량자를 이용하여 절단 품질 변화의 변수를 최소화하였다. 탄화수소(에틸렌)가스와 비교하여 수소-산소 혼합가스 가스를 사용하였을 때, 예열산소가 필요 없는 수소-산소 혼합가스 특성으로 절단 토치 작동이 편리하였으며, 화염의 직진성이 우수하여 작업성 및 절단 품질이 우수한 것으로 나타났다.

Table 2 Vertical cutting condition of mixed gas

T	P		L	S	PT	Tip #
	O	M				
12	6.0 ~ 6.2	1.2 ~ 1.4	8 ~ 10	600	10 ~ 15	#2
18				500		#2
32				480		#3
40				450		#3
60				380	15 ~ 20	#3
75				350	#4	
80				280	#4	

T: material thickness(mm), P: pressure (kg f/cm²)
 O: oxygen gas, M: hydrogen-oxygen mixed gas
 E: ethylene gas, L: length of tip to specimen(mm)
 S: cutting speed(mm/min), PT: preheating time(sec)

3. 용접특성

강재 절단 프로세스 변화에 따른 용접성 즉 재료의 기계적 성질 변화를 정량적으로 파악하기 위해 탄화수소(에틸렌)가스와 상호 비교 방법으로 검토하였다.

3.1 용접방법 및 용접조건

본 연구에 사용한 시험재는 현장 생산재인 두께 15 mm의 선급재인 GL-A 강을 사용하였으며 폭

150 mm, 길이 400 mm 으로 시험편을 제작하였다. 수소-산소 혼합가스와 탄화수소(에틸렌)가스를 이용하여 V-개선 후 Table 3 과 같이 용접을 실시하였다.

Table 3 Welding conditions (FCAW)

Pass	Current [A]	Voltage [V]	Speed [cm/min]	Heat input [KJ/cm]
1	230	27	10.6	35
2	290	35	17.6	35
3	300	35	18.2	35

3.2 경도(Hardness)

경도시험은 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 하중 1kg, 하중 시간 15 초로 하여 시험하였다. Fig. 9 는 수소-산소 혼합가스 및 탄화수소(에틸렌) 가스를 이용하여 절단 후 용접한 시험편의 경도 값을 비교하여 나타내었다. 수소-산소 혼합가스의 경우, 화염 특성상 탄화수소(에틸렌)가스에 비해 직진성이 높고, 화염 범위가 좁아 상대적으로 fusion line 의 경도 값은 높게 나타났으나, 열영향부(HAZ)부의 경도값은 탄화수소(에틸렌)가스보다 낮은 것을 알 수 있다. 이는 탄화수소(에틸렌)가스의 화염 범위가 크기 때문인 것으로 판단된다.

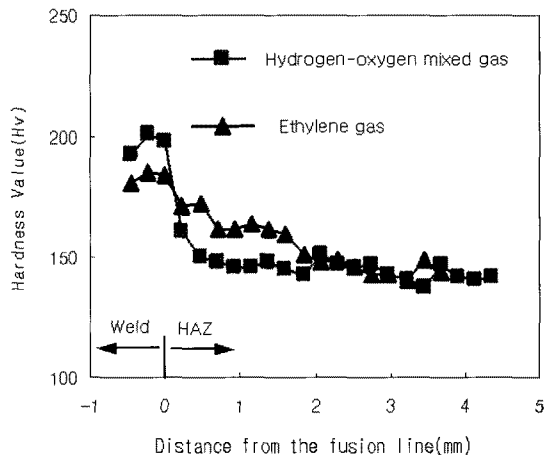


Fig. 9 Result of hardness test

3.3 인성(Toughness)

샤피 충격시험기(Charpy V-notch)를 이용하여 상온에서 fusion line, fusion+1 mm, fusion+2 mm, fusion+3 mm에 대해 충격시험을 각각 3 회 실시하였다. 결과는 Fig. 10 에 나타난 바와 같이 에틸렌 가스에 비해 수소-산소 혼합가스로 절단하여 용접한 시험편의 열 영향부의 인성값이 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 화염범위가 상대적으로 좁고 직진성이 우수한 수소-산소 혼합가스의 특성상 열에 의한 강재의 조직변화가 적기 때문으로 판단된다.

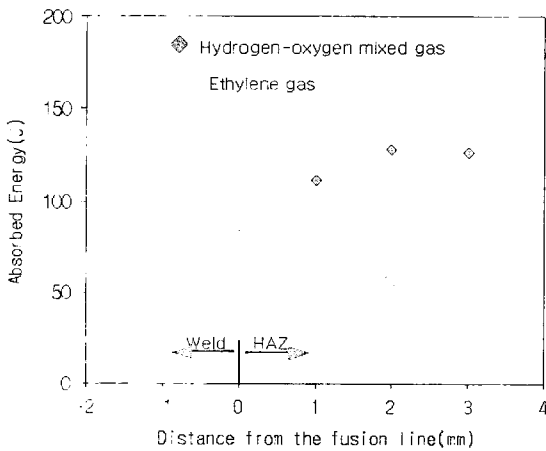
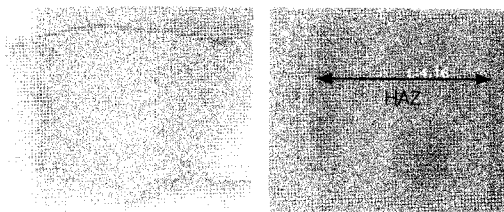


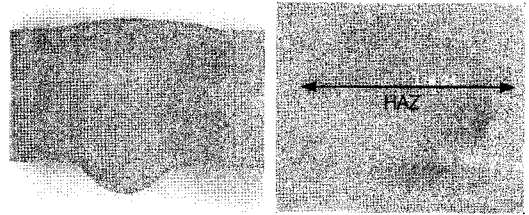
Fig. 10 Result of impact test

3.4 매크로(Macro)

용접부의 매크로 조직을 관찰하기 위해서 가스 절단과 기계가공을 실시한 후 3% 염산 수용액(nital, nitric acid + alcohol)에 10 초간 부식 한 후 관찰한 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. 수소-산소 혼합가스의 경우 탄화수소(에틸렌)가스 보다 열 영향부가 좁은 것으로 나타났다.



(a) Hydrogen-oxygen mixed gas



(b) Ethylene gas

Fig.11 Macro section of weld metal

5. 결론

새로운 청정연료인 수소-산소 혼합가스를 이용하여 강재두께별 절단특성(자동/수동) 및 절단 후 용접특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 절단공정에 주로 사용되는 탄화수소(에틸렌)가스와 비교한 결과, 수소-산소 혼합가스의 화염 특성상 화염의 직진성 및 화염 범위가 좁아 절단 품질 규격(ISO 9013)을 기준으로 탄화수소(에틸렌)가스에 비해 절단품질이 좋은 것으로 나타났으며, 절단속도 측면에서 약 50mm/min 속도가 빠른 것으로 나타나 절단 생산성이 높은 것으로 판단되며, 수동 절단 시 예열산소가 필요 없는 수소-산소 혼합가스 특성으로 절단 토치 작동이 편리한 것으로 나타났다.

2) 절단속도가 낮고, 모재와 팁과 거리가 가까울수록 절단면의 윗면이 많이 용융되고, 절단 속도가 빨라지면 거친 드래그라인이 생성되며, 절단 단면의 직각도가 잃어가고, 아랫면에 드로스가 부착된다.

3) 강재 절단 프로세스 변화에 따른 용접성 측 재료의 기계적 성질 변화를 정량적으로 평가한 결과, 수소-산소 혼합가스를 사용하였을 때 용접성이 가장 취약한 부분으로 알려진 열영향부(HAZ)의 범위가 탄화수소(에틸렌)가스에 비해 상대적으로 좁은 것으로 나타났으며, 충격 인성값은 높은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 김남인, 장용원, 이정수, 강재절단에 의한 생산성 제고 및 절단품질 향상 연구, 최종결과보고서, 한진중공업
- 김인철, 김성일, AH36 고장력 강판의 절단조건 변화에 따른 절단특성에 관한 연구, 대한용접학회지, vol.21, No.2, 2003년
- 산업자원부: 2002년도 대체에너지 실용화 평가사업, 브라운가스 이용시스템실증연구 최종보고서
- 용접·접합편람, 대한용접학회, 1998, pp. 693-716.
- AWS, Welding hand book 8th, volume 2, pp.450~474.
- BS EN ISO 9013:2002, Thermal cutting- Classification of thermal cuts- Geometrical product specification and quality.
- Howard B.Cary and Scottc. Helzer, Modern welding Technology 6th, pp.214~225.



< 김 남 인 >



< 장 용 원 >



< 이 정 수 >