

산업용 철강재 절단토치용 노즐 개발 및 적용에 관한 연구

이현찬, 유현석, 이중성
한국가스공사 연구개발원 이용기기연구센터

Development of NG Fueled Steel Cutting Torch for Industrial Application

Hyun-Chan Lee, Hyun-Seok You, Joong-Seong Lee
Korea Gas Cooperation Research & Development Div.

1. 서론

천연가스의 안정적 수요관리 및 확대를 위해서는 산업용 수요를 개발하는 것이 유리하므로, 다양한 산업분야에 대한 적용기술을 개발하는 것이 필수적이다. 이러한 관점에서 볼 때 산업용 철강재 절단분야는 기존 사용연료인 에틸렌, 아세틸렌, LPG에 비하여 천연가스의 연소물성값(발열량, 연소속도, 화염직진성 등)이 상대적으로 절단공정에 불리하므로 이 분야에 대한 기술개발이 필요한 실정이다.

이러한 절단공정에 사용되는 연료는 취급상의 안전성이 떨어지고, 가격이 천연가스에 비하여 비싼 점이 단점으로 지적되어 왔으며, 특히 대규모 사업체의 경우 난방은 천연가스를 사용하고 절단공정에는 에틸렌, 아세틸렌, LPG 등을 사용함으로써 작업장내 연료 일원화를 이루지 못하고 있는 실정이므로 철강재 절단업체에서도 천연가스로의 기술개발을 희망하고 있다.

이러한 절단토치 설계기술은 독일, 일본 등에서 개발되어 있는 것으로 조사되었으나 그 적용 사례는 매우 드물며, 특히 1000mm 이상의 철강재 절단 기술에 대한 신뢰성은 매우 떨어지는 실정이며 2000mm 철강재 절단성공은 아직까지 보고된 바가 없다.

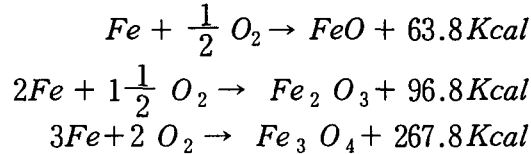
따라서 본 연구에서는 수치해석 및 실증실험을 통해 천연가스 토치의 최적

설계기술을 확보하고 400~2000mm까지 절단할 수 있는 노즐을 개발하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 산소/가스 절단 원리

산소/가스 절단은 산소와 철과의 화학반응을 이용하는 절단법이다. 이 방법은 강재의 절단 부분을 팁(tip)에서 불어 나오는 산소-연료 가스 불꽃으로 약 800~900℃로 될 때까지 예열(pre-heating)한 후, 팁의 중심부에서 고압의 산소(절단산소)를 불어내면 철은 연소하여 산화철이 되고, 그 산화철의 용융점은 철보다 낮으므로 용융과 동시에 절단된다. 절단시 철의 산화는 보통 다음과 같은 열화학 반응에 의하여 발열이 수반된다고 생각되고 있다.



2.2 연소 해석 모델

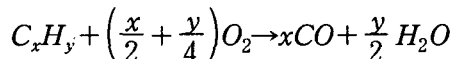
본 연구에서는 독자 설계기술의 이론적 근거 및 체계화를 위해 노즐에서 산소 분출시의 유동장 및 연소장에 대해서 상용코드(FLUENT)를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 기존의 난류연소모델들 중 본 연구의 계산 모델에 가장 적합한 연소모델을 선정하여 사용하였다.

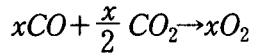
반응률을 eddy lifetime (ϵ/k)과 관련시키고 확산 및 예혼합 화염 모두에 적용되는 Magnussen의 모델을 사용하였다.

$$R_{fu} = -\rho \frac{\epsilon}{k} \text{MIN} \left[Am_{fu}, \frac{Am_{ox}}{STOIC}, AB \frac{m_{pr}}{1+STOIC} \right]$$

여기서 $m_{fu} + m_{ox} + m_{pr} = 1$, $A = 32$, $B = 4$ $STOIC$ = stoichiometric value

또한 ϵ/k 및 R_{fu} 은 유선곡률에 대한 영향이 반영되도록 하였으며 R_{co} 도 위의 모델에 적용하였다. 연소모델은 반응식을 수반해야 되는데 본 연구에서는 CO 농도를 계산키 위해 다음과 같이 2-step global 모델을 사용하였다.





$m_{fu}, m_{co}, m_{co2}, m_{ox} - im_{fu}, m_{no}$ 의 전달 방정식을 계산하여 위와 같은 반응식으로 부터 나머지 화학종을 평형 상태식으로부터 구한다. 여기서 i 는 stoichiometric 값으로

$$i = \frac{32\left(\frac{x}{2} + \frac{y}{4}\right)}{12x + y}$$

이다.

3. 실험방법 및 장치

3.1 실험방법

본 연구에서는 LNG 토치 노즐설계 방안으로 연료가스인 천연가스의 단점인 낮은 화력(LPG에 비해 2.3배 낮은 발열량)과 빠른 확산 특성을 보강하는 방안을 기초하였다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 노즐의 배열이 대칭인 것과 비대칭인 것으로 구분하여 설계하였다.

비대칭인 것은 산소 및 연료가스의 분출 형태를 절삭방향으로 볼 때 비대칭적으로 설계된 것이다. 이는 천연가스 화염의 직진성이 상대적으로 떨어져 화염을 한쪽으로 집중하기 위한 것이다. 그러나 원형형태의 재료를 절단할 때에는 비대칭적 노즐을 적용하기가 곤란하므로 대칭적 화염 형태를 유지하면서 연료가스의 길이 방향으로 집중력을 강화하는 방법도 모색하였다. 이를 위해 먼저 절단산소의 속도를 증가시켜 산소 stream의 유동력을 높이고, 연료가스 및 예열산소의 분출에 있어서는 중앙으로의 집중력을 향상시키는 방안이 고려되었다.

이러한 기본 개념을 가지고 설계된 노즐은 먼저 수치해석을 통해 그 성능을 예측하였고 예측된 결과가 양호하게 나온 노즐을 현장적용 실험을 통해 실제 절단성능을 확인하였다. 이때 운전조건시 필요한 가스유량은 실측이 곤란하였으므로 우선 노즐내 유동계산을 통해 예측한 공급압력을 기준으로 실험을 실시하였으며, 실험을 통해 최적 공급압력을 확인하였다.

3.2 실험장치

본 연구를 통해 총 6개의 신규 노즐을 설계, 제작하였다. 개발에 사용된 노

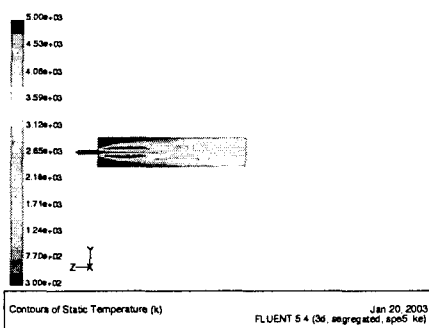
즐은 기존 LPG 노즐을 포함해서 M2-1, M2-2, M2-3, M2-4, M3-1, M3-2로 명했다. 여기서 LPG 노즐, M2 계열은 노즐크기 및 배열이 좌우대칭인 구조이며 M3 계열은 비대칭인 구조이다. 첨자가 커질수록 절단산소의 직경이 증가하는 것이며 예열산소 및 연료 노즐은 일정하다. 노즐길이는 LPG 노즐, M2-4 및 M3-2가 100mm이며 나머지는 80mm이다.

현장적용 실험장소는 대형 선박용 엔진을 제작하는 업체였으며, 절단되는 두께는 주로 400~200mm였고 실증실험도 생산에 사용되는 재료를 사용하였다. 가공재료의 부피가 큰 관계로 절단토치의 이송은 전용 NC 머신에 의해 프로그램화 되어져 이루어 졌다.

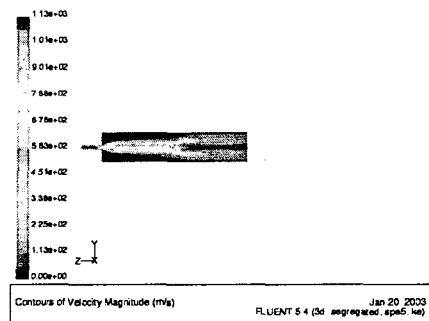
4. 결과

4.1 수치해석 결과

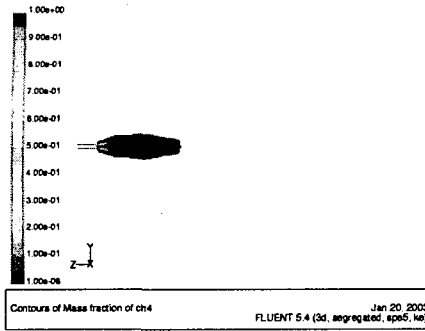
2.2절에서 고려한 연소모델로 설계노즐에 대한 수치해석을 실시하였다. Fig. 1은 LPG 노즐(1500~2000mm 절단용) 노즐에 연료로 천연가스를 적용했을 때의 결과이며 이는 신규로 설계한 LNG 노즐과 비교하기 위해서 계산하였다. 절단산소 입구속도 조건은 611m/s, 연료가스입구속도 조건은 184m/s이다. 온도장을 보았을 때 전형적 형태의 산소-연료가스 화염형상으로 계산결과가 타당한 것으로 나타났다. 속도장은 절단노즐 중심부에서 최고유속을 잘 나타내고 있으며 후반부에서의 확산 정도가 크게 벌어짐을 알 수 있다. 연소반응대 영역을 알 수 있는 메탄 물분율을 보면 상대적으로 반응대가 짧고 노즐반경방향으로 퍼져 있음을 알 수 있다. 따라서 개발노즐은 속도장의 후반부 확산과 반응대의 퍼지는 형상을 최소화할 수 있는 기능을 갖추어야 할 것이다.



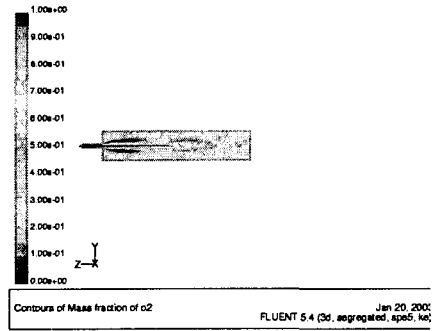
a) Temperature field



b) Velocity field



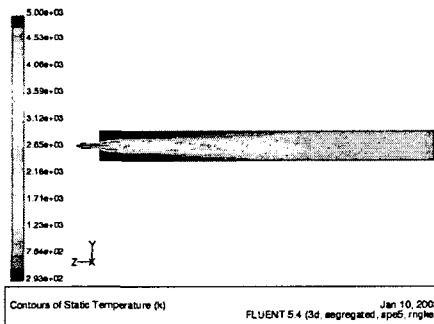
c) CH₄ mole fraction



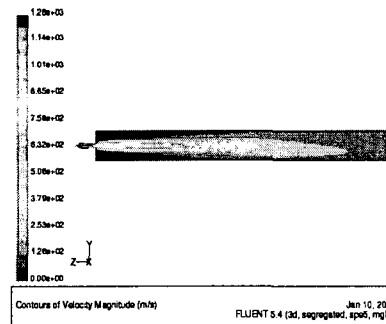
d) O₂ mole fraction

Fig. 1 LPG 노즐(1500~2000mm)에 천연가스를 연료로 적용한 계산결과

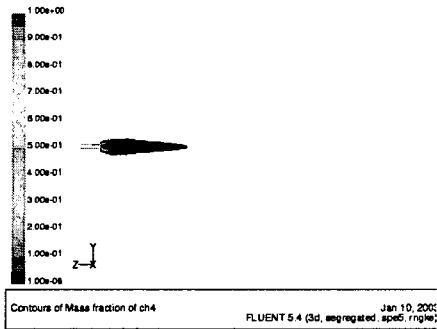
Fig. 2는 노즐 M2-4(1500~2000mm)로 절단산소 입구속도 조건은 692m/s, 연료가스입구속도 조건은 64m/s인 결과로, M2-3에 비해 반응대가 길게 일어남을 알 수 있다. 특히 산소의 흐름이 더욱 양호해진 모습이다. M2-4 model은 M2-3 model의 후속모델로써 노즐길이를 증대 하였고 노즐 구조를 약간 개선한 것이다.



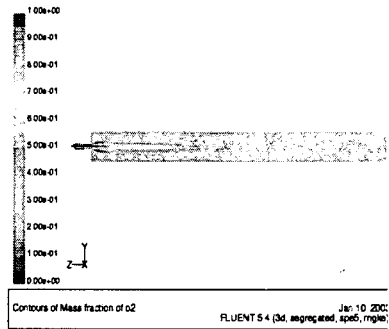
a) Temperature field



b) Velocity field



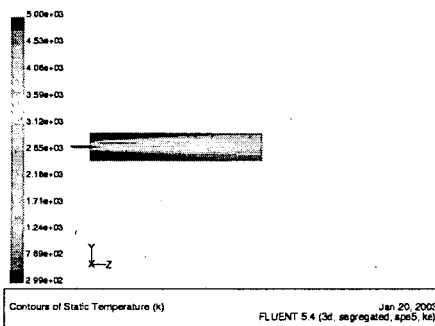
c) CH₄ mole fraction



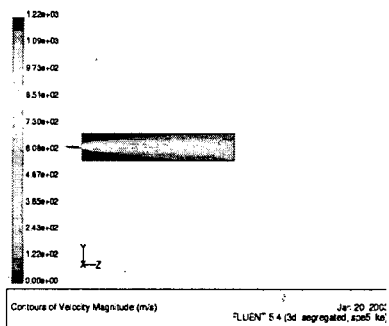
d) O₂ mole fraction

Fig. 2 노즐 모델 M2-4(1500~2000mm)에서의 계산결과

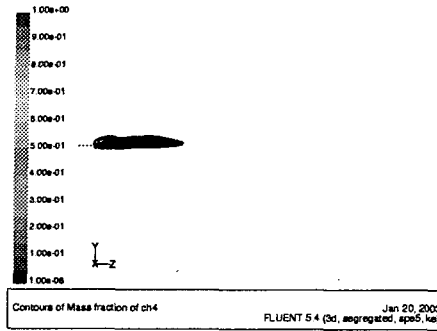
Fig. 3은 M3-2(1500~2000mm) 노즐로 절단산소 입구속도 조건은 741m/s, 연료가스입구속도 조건은 180m/s인 결과로, 화염이 비대칭적으로 치우쳤음을 알 수 있고, 화염이 중앙에서 약간 상단부분에서 안정되게 형성되고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 연소반응대가 길게, 좁게, 높게 나타나 절삭에 필요한 예열온도 상승에 있어서 LPG 노즐에 비해 효율적임을 예측하고 있다. 또한 산소농도 그림에 의하면 LPG 노즐에 비해 좁게 jet 형상이 나타나 산소 jet에 의한 미산화철 제거에 있어서 효율적임을 예측하고 있고, 속도크기를 볼 때도 LPG 노즐에 비해 후반부까지 길게 나타나고 있음을 알 수 있다.



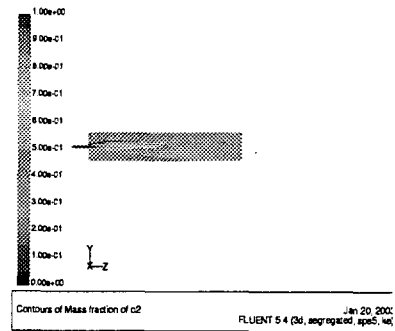
a) Temperature field



b) Velocity field



c) CH₄ mole fraction

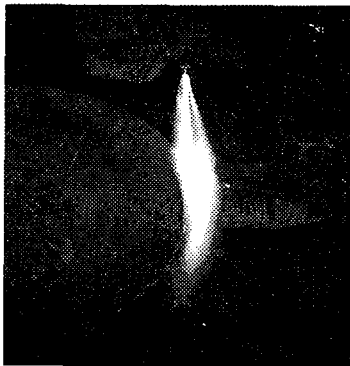


d) O₂ mole fraction

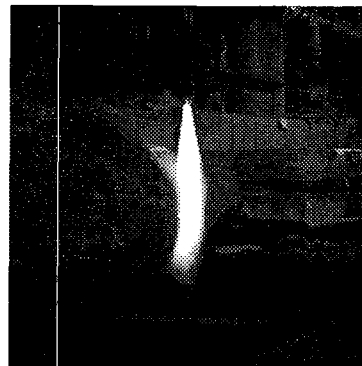
Fig. 3 노즐 모델 M3-2에서의 계산결과

4.2 현장적용 실험결과

M2-3에서 나타난 절단면의 drag를 개선하기 위하여 새롭게 설계한 노즐 M2-4, M3-2에 대해 절단실험을 실시하였다. Photo 1은 노즐에 형성된 각각의 화염 형상을 잘 나타내고 있으며 수치해석결과와도 잘 일치하고 있다. 운전조건은 M2-3와 동일한 조건이다. 노즐 M2-4에서 형성된 화염은 후반부에서의 산소 흐름이 양호한 것을 볼 수 있으며 M3-1은 선단부에서 산소분출 유동이 먼저 강하게 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다.



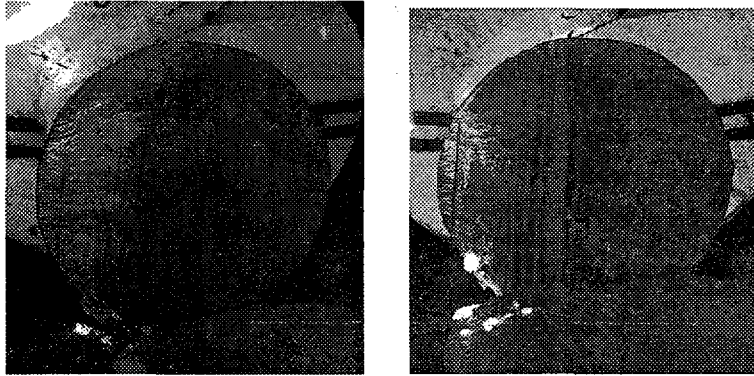
M3-1 노즐



M2-4 노즐

Photo 1 M2-4, M3-1 노즐에서 형성된 젯트화염

Photo 2는 절단면을 보여 주고 있다. M2-4 노즐로 절단된 면은 매우 양호하게 나타났으며 drag는 100mm로 나타났다. M3-2인 경우는 강력한 산소흐름에 의해 M2-4에 비하여 거친면을 나타냈으나 고두께의 후판 절단에는 화력이 모자라는 LNG의 단점을 크게 보완하고 있으며 drag도 50mm로 나타났으며 이는 M2-4에 비하여 절단성능은 더 우수한 것을 나타내는 결과이다. 따라서 수치해석으로 예측되어진 M2-4 및 M3-2가 M2-3보다 화염의 직진성이 개선되었고 절단 산소의 분출유동도 양호하게 나타난 결과가 실험적으로 잘 검증된 결과라 하겠다.



M2-4 노즐

M3-2 노즐

Photo 2 2000mm 철강재 절단면

이상의 실험결과를 종합적으로 볼 때 M3-1인 경우가 M2-4 보다 약 30% 정도 절단 폭이 크다고 할 수 있다. 그리고 kerf는 모두 약 1.5 ~ 2 정도로 측정되어 LNG 토치 현장 적용에 문제가 없는 것으로 나타났다. 또한 여기에 수록되지는 않았지만 노즐 M2-1은 900~1200mm 절단하는데 양호한 성능을 나타냈고, M2-2는 1200~1500mm를 절단하는데 성공하였다.

Fig. 4에 개발된 산소/천연가스 절단노즐 이송속도를 철강재의 두께에 따라 나타냈다. 이것은 현장에서 사용하고 있고 일반적으로 사용자들이 원하는 절삭 속도에 근거하였다. 이때의 철강재의 성분은 약 0.3%의 탄소가 함유된 일반적인 철강재를 기준으로 하였다. 일반적으로 기존의 LPG 나 에틸렌에 비해 약 5-7% 정도 절삭 속도가 감소한 정도여서 적용하는 데는 큰 무리가 없는 것으로 검토되었다.

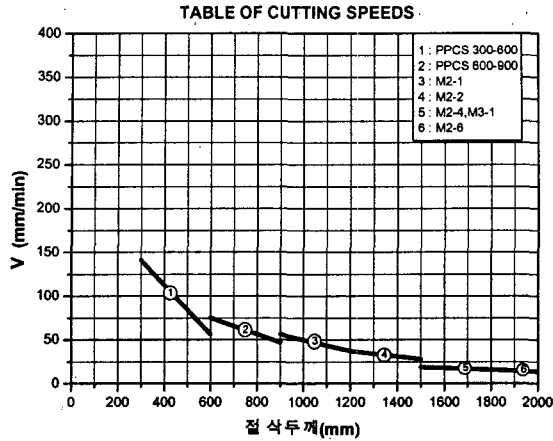


Fig. 4 산소/천연가스 절단노즐의 절삭 속도

5. 결론

천연가스용 철강재 절단토치 개발 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 절단공정에 사용되던 LPG에 비하여 천연가스는 화염의 높은 확산성과 낮은 발열량으로 기존 노즐을 사용하게 되면 절단면의 kerf와 drag가 증가하여 제품 가공성이 떨어짐을 확인하였다.
- 2) 개발노즐에서는 절단산소의 속도를 증가시켜 산소 stream의 유동력을 높이고, 연료가스 및 예열산소의 분출에 있어서는 증앙으로의 화염집중력을 향상시켜 LPG 노즐과 비교하여 kerf 및 drag의 차이를 최소화 시키는데 성공하였다.
- 3) Magnussen의 연소모델을 산소/가스 절단 화염 연소장 수치해석에 적용한 결과는 실증실험결과와 비교하였을 때 매우 유사한 결과를 나타냈다.
- 4) M2-1(900~1200mm), M2-2(1200~1500mm), M2-4 및 M3-2(1500~2000mm) 노즐에 대해서 노즐내 유동장 계산에 기초한 최적운전조건을 도출하여 LPG 절단 속도에 비해 5~7% 정도만 감소한 결과를 얻을 수 있었다.
- 5) 연구결과는 현재 대형선박용 엔진을 제작하는 업체에 적용되어 천연가스 수요 창출을 이룩하였다.

REFERENCES

1. Welding Handbook, (1978). 7th Ed., Vol. 2, American Welding Society.
2. Roger A. Strehlow, (1980). Combustion Fundamentals, McGRAW-HILL.
3. Dale A. Anderson, (1985). Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, McGRAW-HILL.
4. A. Dervieux B. Larrouturou, (1989). Numerical Combustion, Springer-Verlag Berlin, Germany.
5. P. Bradshaw, T. Cebeci, J. H. Whitelaw, (1984). Engineering Calculation Methods for Turbulent Flow, Academic Press, USA.
6. Development of Steel Cutting LNG Torch for Industrial Use, (2000). 99-DD-GU-수시-042-13, Technical Report, Korea Gas Corporation R & D Center