

TIG 용접용 텅스텐 전극봉 연구 개발 동향

이 희 근^{*,†} · 윤 광 희^{*} · 강 정 윤^{**}

^{*}대우조선해양 산업기술연구소 용접기술연구부

^{**}부산대학교 재료공학부

Development of Tungsten Electrode for TIG Welding

Hee-Keun Lee^{*,†}, Kwang-Hee Yun^{*}, and Chung-Yun Kang^{**}

^{*}Dept. of Welding Science and Engineering, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering, Geje, 53302, Korea

^{**}Dept. of Material Science and Engineering, Pusan National University, Pusan, 46241, Korea

[†]Corresponding author: zetlee@dsme.co.kr

(Received July 27, 2022; Revised August 16, 2022; Accepted August 25, 2022)

Abstract

Tungsten Inert Gas (TIG) welding process is mostly applied to high alloy steel pipes including stainless steels because of superior welding quality and gap bridge-ability than other welding processes. However, it has poor productivity due to low welding speed and deposition rate. In order to improve TIG welding productivity, high performance TIG welding with higher arc temperature, automation and high deposition rate system including hot wire have been developed. Higher arc temperature and longer welding time damage tungsten electrodes of TIG welding. It causes welding defect such as tungsten inclusion and short replacement cycle of tungsten electrodes. Various types of tungsten electrodes containing rare earth metal oxides (thorium, lanthanum, cerium, etc) were introduced to improve electrode erosion resistance and arc stability. In this study, their operation characteristics, arc starting performance, tip development, and electrode consumption were reviewed.

Key Words: TIG welding, GTAW, Tungsten electrode, Thorium, Lanthan, Tungsten rim, Arc start, Electrode consumption, Electrode erosion resistance

1. 서 론

Tungsten Inert Gas Welding(이하, TIG 용접)은 불활성가스(Ar, He) 분위기 속에서 텅스텐 전극봉과 모재 사이에서 아크를 발생시켜 용접하는 비소모식 아크 용접이다. 다른 용접 방법에 비해, 용접부 물성이 우수하고, 표면 비드가 미려하다는 장점이 있으나, 용접 속도 및 용착률(Deposition rate)이 낮다는 단점을 가지고 있다. 이런 단점을 극복하기 위해, TIG 아크의 고전류화, 고밀도화 및 고용착화, 자동화에 대한 연구가 진행되고 있다¹⁻⁵⁾. 그러나, TIG 아크가 고전류화 및 고밀도화 될수록 아크 온도가 증가하고 자동 용

접이 적용될수록 아크 유지 시간도 증가하여, TIG 아크가 발생하는 텅스텐봉의 열적 부하가 증가하게 된다. 특히 원활한 열전자 방출을 위해 텅스텐봉을 날카롭게 연마한 선단부(Tip)의 부하가 증가하여 훼손되면서, 아크 재착화(Arc re-ignition) 불량 및 용접부 내 텅스텐 혼입 결함 등이 발생하고, 이 현상을 방지하기 위해 텅스텐 전극봉 교체 주기가 짧아지므로, 용접 속도 증가 효과가 낮아지는 문제가 있다. 따라서, TIG 아크의 고온화에 따른 텅스텐 전극봉의 내구성을 향상시키는 연구가 필요하나, 국내에서는 이에 대한 체계적인 연구가 부족한 실정이다. 현재 텅스텐 전극봉의 아크 내구성을 향상시키기 위하여, 텅스텐 전극봉에 토륨, 란탄, 세륨, 지르코늄 산화물 등을 첨가하고 있다. 그

러나, 각 산화물 종류 및 첨가량에 따른 텅스텐 전극봉의 장단점을 비교한 자료가 국내에는 발표가 되지 않았고, 평가 방법에 대한 기준도 불분명하여, 사용자 입장에서는 모재 종류 및 용접 조건별 텅스텐 전극봉 종류 및 제품 선택에 어려움이 있다. 이에, 세계적으로 현재까지 연구된 TIG 용접용 텅스텐 전극봉 연구 결과를 리뷰하였다.

2. 텅스텐 전극봉 소모 기구

Fig. 1은 용접 전후의 텅스텐봉 변화를 나타내었다. (a)는 용접 전 연마된 텅스텐봉을 나타내고 있다. 텅스텐봉 선단부(Tip)가 15도의 각도로 연마되어 있고, 표면은 텅스텐봉 길이 방향으로 연마되어 있다. (b)와 (c)는 자동 용접 후 텅스텐봉의 선단부 변화를 나타낸다. 선단에서 1~2mm 높은 곳에서 이물질이 생성되어 있음을 알 수 있다. 이 물질을 용접 작업 현장에서는 텅스텐봉 꽃 또는 우산이라고 표현하고 있고, Matsuda⁶⁾는 Tungsten Rim(이하, 텅스텐 림)으로 명명하였다. (d)는 텅스텐 림을 폴리싱 페이퍼로 제거한 표면 사진으로, 기공이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 2는 텅스텐 림 발생에 따른 TIG 아크 특성 변화를 확인하기 위하여, Ar - 0.1% O₂를 보호가스로 사용하여 TIG 용접할 경우, 시간에 따른 아크 전압과 아크 압력 변화를 나타낸 결과이다⁷⁾. Ar에 0.1% 산소를 투입한 이후에 텅스텐 림이 발생하였고, 아크 압력은 초기에는 증가 후, 계속 감소하는 경향을 나타내었다. 아크 전압은 산소 투입 후에는 다소 증가하여 계속 유지되었고, 250초 이후부터 변동 현상이 나타났다. 따라서, 텅스텐 림 발생이 아크의 불안정을 나타내므로, 용접부 용입에도 영향을 주게 된다. 따라서, 일정

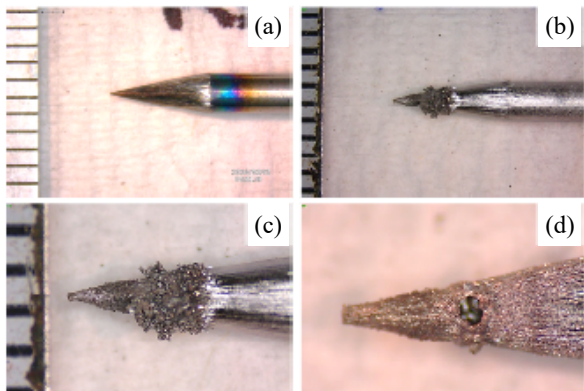


Fig. 1 Appearance of Tungsten Electrode, (a) Tungsten electrode as grinded before welding (b) Tungsten electrode after automatic TIG welding (c) Magnification of (b) (d) Tungsten electrode of (c) after polishing

한 용입 깊이를 위해서는 텅스텐 림 생성을 억제해야 한다. 한편, 텅스텐 림을 전자현미경으로 확대한 사진을 보면, 덴드라이트(Dendrite) 형상으로 되어 있음을 알 수 있다. 이 덴드라이트의 성분 분석을 실시한 Fig. 3을 보면, X선 회절 분석을 통해 순수한 텅스텐으로 확인되었다⁸⁾.

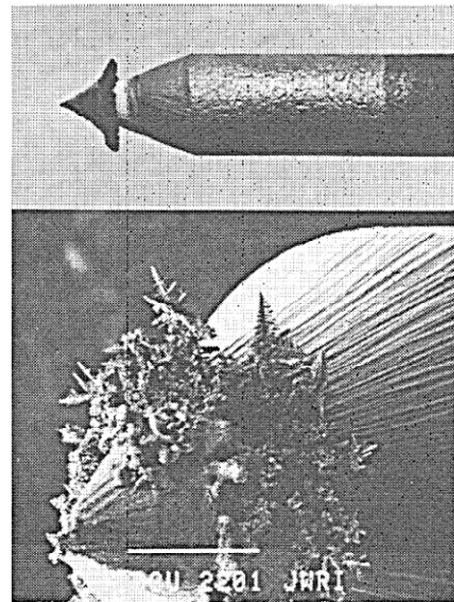
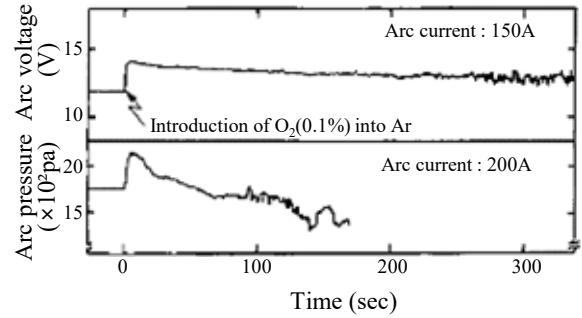


Fig. 2 Unstable arc behavior due to rim formation and appearances of the rim⁷⁾

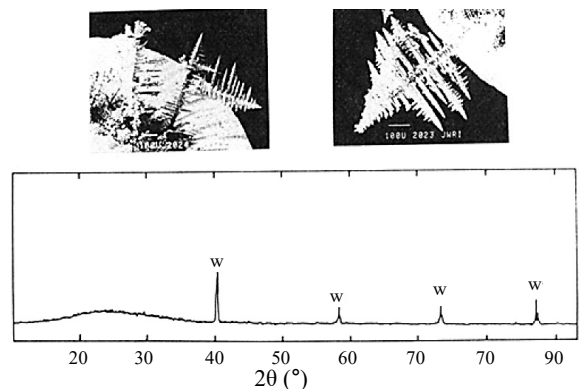


Fig. 3 Shape and X-ray diffraction analysis of rim material⁸⁾

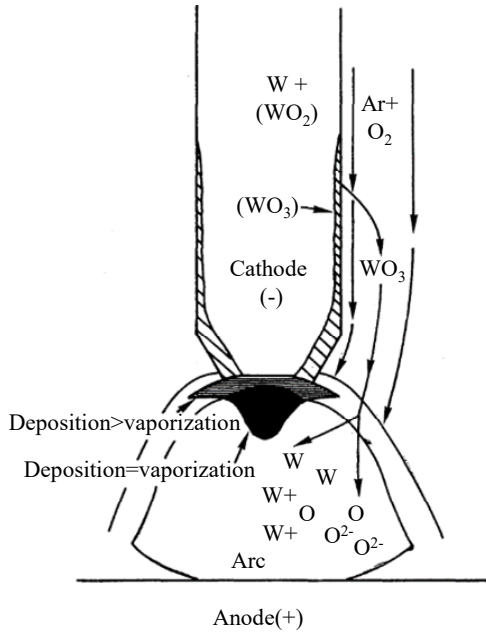


Fig. 4 Schematic illustration of rim formation mechanism⁶⁾

Fig. 4는 텅스텐 림 발생 기구를 나타낸 결과이다⁶⁾. Matsuda의 결과에 의하면, TIG 용접을 시작하면, TIG 아크 열에 의해 텅스텐봉의 온도가 올라가고, 보호가스 내 존재하는 산소와 텅스텐봉 표면이 반응하여, 텅스텐 산화물이 생성된다. 통상 텅스텐은 400도 이상에서는 공기 중에서 산화가 일어나며, 고온으로 갈수록 낮은 산소 함량에서도 산화가 발생하는 것으로 알려져 있다⁹⁾. 한편 TIG 용접시 사용하는 보호가스는 통상 99.99% 순도의 아르곤을 사용하므로 100ppm의 산소를 함유하고 있기 때문에, 고온에서 텅스텐봉과 반응하여, 텅스텐 산화물이 생성된다. 표면에 생성된 텅스텐봉 산화물은 보호가스에 의해 아크로 이동하고, 아크 내부에서 산소와 분리된 텅스텐은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 플라즈마 제트(Plasma jet) 기류에 의해 텅스텐봉 선단부로 이동되어, 덴드라이트로 형성 및 성장되어, 텅스텐 림이 생성된다.

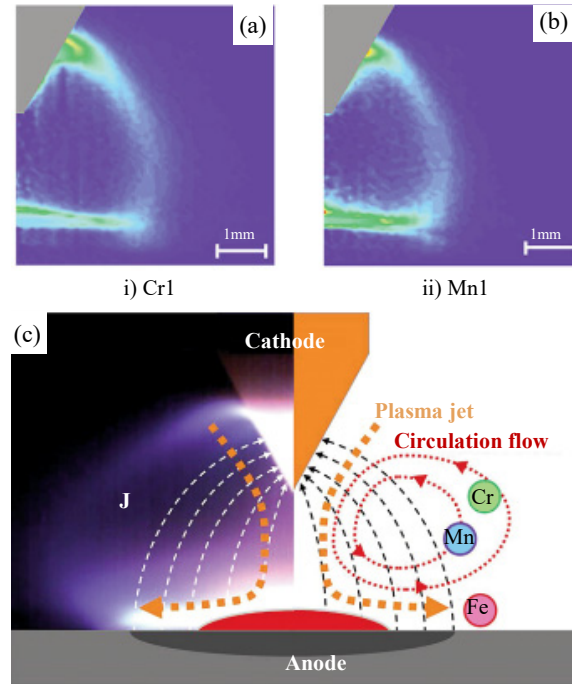


Fig. 5 Illustration of behavior of metal vapor in TIG arc¹⁰⁾ (a), (b): Radiant intensity distribution of Cr I and Mn I given by Abel inversion (c) Illustration of behavior of metal vapor in TIG arc

3. 산화물계 텅스텐 전극봉 특성

텅스텐 전극봉은 순수 텅스텐 전극봉과 La_2O_3 , ThO_2 , CeO_2 , ZrO_2 등 산화물 종류와 함량에 따른 다양한 텅스텐 전극봉이 있고, 아래의 Fig. 6와 같이 색상으로 구분하고 있다¹²⁾. AWS와 ISO 규정을 보면, 텅스텐 전극봉 구경, 크기 허용 범위와 구경별 사용 전류 범위에 대해서만 기재되어 있고, 사용자 입장에서 각 텅스텐 전극봉을 평가할 수 있는 방법은 없는 실정이다. KS 규격에서만 화학분석, 구경 허용 범위, 낙하 시험, 아크 시험을 통한 텅스텐 전극봉 소모량에 대해 규정되어 있다. 그러나 화학분석시험의 경우, 순수 텅스텐 및 토륨 산화물계 텅스텐 전극봉에 대해서만 진행할 수 있

AWS classification	Color	Alloying element	Alloying oxide	Alloying oxide%
EWP	Green	-	-	-
EWCe-2	Orange	Cerium	CeO_2	2.0
EWL a-1	Black	La	La_2O_3	1.0
EWL a-1.5	Gold	La	La_2O_3	1.5
EWL a-2	Blue	La	La_2O_3	2.0
EWTh-1	Yellow	Th	ThO_2	1.0
EWTh-2	Red	Th	ThO_2	2.0
EWZr-1	Brown	Zr	ZrO_2	0.25

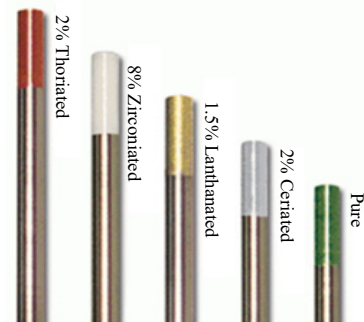


Fig. 6 Color code and alloying elements for tungsten electrodes¹²⁾

고, 다른 산화물계 텅스텐 전극봉의 경우, 인수/인도 당사자 사이의 협정에 따른다고 되어 있기 때문에, 실제적으로는 평가 절차가 없는 실정이다.

실제 작업 현장에서 텅스텐 전극봉에 필요한 요구 특성은 아크 착화의 용이성(최초 아크 착화 용이성, 재아크 착화 용이성)과 아크 내구성(아크 착화 최대 횟수, 용접 중 텅스텐봉 선단 유지 정도)과 더불어, 용접부 품질이다.

Fig. 7는 텅스텐 전극봉 종류별 18~36V 전압에서의 TIG 아크 재착화 횟수를 나타낸 것이다⁸⁾. 수냉 동판 위에 텅스텐 전극봉을 3mm 이격 후 아크 착화 실험을 진행하였고, 텅스텐 전극봉 선단부 각도는 45도, 텅스텐 전극봉 구경은 3.2mm이다. 순 텅스텐 전극봉은 낮은 전압에서 아크 착화가 되지 않으며, 높은 전압에서도 재착화 횟수가 낮은 반면에, 산화물이 첨가된 전극봉은 낮은 전압에서도 착화가 일어나며, 아크 재착화 횟수가 순 텅스텐 전극봉에 비해 높다는 것을 알 수 있다. 특히 란탄 산화물계 텅스텐 전극봉의 아크 착화 용이성이 가장 우수한 경향을 보인다.

이는 Table 1에 나타낸 바와 같이, 금속 산화물의 전자 일함수(Electron work function, eV)가 낮아, 전자 방출이 용이하기 때문이며, 특히 란탄 산화물의 일함수가 제일 낮기 때문에 아크 착화 용이성이 가장 우수한 것으로 알려져 있다¹⁴⁾.

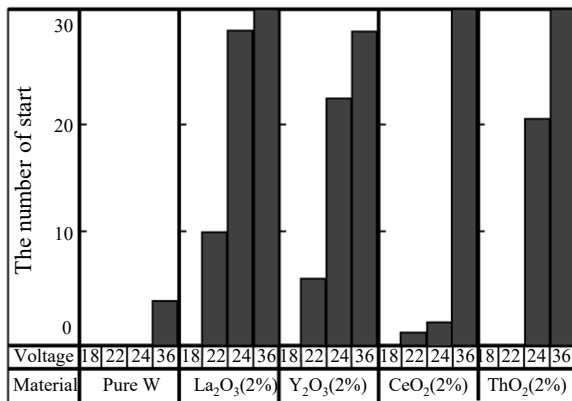


Fig. 7 Arc-starting characteristics evaluated by open circuit voltage tests⁸⁾

Table 1 Electron work function of tungsten and rare earth materials¹⁴⁾

Material	Metal eV	Oxide eV
Lanthanum	3.3	2.5
Thorium	3.35	2.6
Cerium	2.84	3.2
Pure Tungsten	4.5	No oxide present

Fig. 8은 텅스텐 전극봉 종류별 용접 열화 시험 후의 수직단면 미세조직 분석 결과이다⁸⁾. 텅스텐 전극봉(구경 1.6mm)를 이용하여, 용접 전류 180A로, 수냉 동판 위에 1시간 용접을 진행하였다. 순 텅스텐 전극봉은 결정립이 매우 조대화되었고, 지르코늄 산화물계 텅스텐 전극봉은 선단부가 훼손되었으며, 토륨 산화물계 텅스텐 전극봉도 선단부 훼손과 더불어, 내부에 기공이 생성된 것을 알 수 있다. 반면에, 란탄, 세륨 및 이리듐 산화물계 텅스텐 전극봉은 비교적 안정한 형상을 보이므로, 아크 열에 의한 내구성이 우수하다고 할 수 있다.

이는 텅스텐 전극봉 내부의 란탄 및 세륨 산화물의 부피 분율이 토륨 산화물 부피 분율에 비해 높기 때문에 알려져 있다. Table 2를 보면, 동일 무게로 원소 함유시, 토륨의 부피가 가장 낮고 밀도가 높기 때문에, 토륨 산화물 함량이 낮다는 것을 알 수 있다¹⁴⁾. 이 산화물들은 열에 의한 결정립 성장을 방해하는 역할을 하고, 용접시 우선적으로 전자를 방출하는 역할을 하나, 산화물 함량이 낮을수록 산화물이 일찍 소진되기 때문

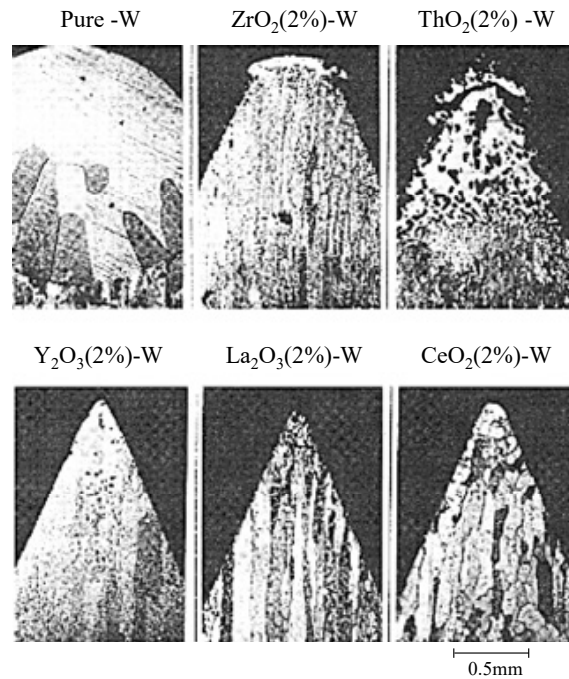


Fig. 8 Change in microstructure of an electrode cross section after heavy loading⁸⁾

Table 2 Physical properties of rare earth materials¹⁴⁾

Material	Density (g/cm ³)	Volume % of 2% by weight electrode
Lanthanum	6.15	5.7
Thorium	11.72	3.8
Cerium	6.65	5.2

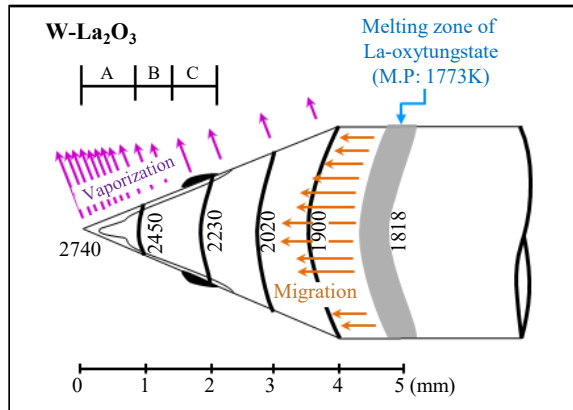


Fig. 9 Schematic illustration of the oxide distribution and behavior accompanied by the temperature distribution along the electrode axis⁸⁾

에, 결정립 성장을 방해하지 못하게 되어 선단부가 훼손되고, 특히 토륨 산화물이 소진된 자리에 기공이 발생하는 것으로 보인다.

Fig. 9은 란탄 산화물계 텅스텐 전극봉의 아크 방전시 란탄 산화물의 거동을 나타낸 모식도이다⁸⁾. 란탄 산화물계 텅스텐 전극봉을 사용할 경우, 아크 온도는 2740K를 나타낸다. 용접 중 아크 온도가 텅스텐 내부로 전도되면서, 텅스텐 내부에 존재하는 La_2O_3 과 텅스텐이 반응하여 La-oxytungstates(용점: 1773K)를 형성하고, 이 화합물은 용점보다 높은 온도를 가진 영역에서 용융 후, 모세관 현상에 의해 결정입계를 따라 낮은 온도 영역에서 높은 온도 영역인 선단부 표면으로 이동 후 증발함으로써 아크를 유지하게 한다. 따라서 산화물의 선단부에서의 증발 속도와 텅스텐 내부에서의 이동 속도, 즉 산화물의 공급속도의 균형이 아크 착화성 및 아크 내구성에 매우 중요하다. 또한, 산화물의 양, 분포, 크기와 더불어 텅스텐봉 결정립 형상은 아크 내구성 및 아크안정성과 밀접한 상관관계가 있으나, 이에 대한 평가 기준은 없는 실정이다. 결정립 형상은 텅스텐봉 길이 방향으로 생성이 되어야, 산화물이 텅스텐봉 선단부로 신속히 이동이 가능하다.

반면에, 토륨 산화물계 텅스텐 전극봉을 사용할 경우, 아크 온도는 3600K를 나타내어, 텅스텐 전극봉 선단부에서 토륨 산화물의 증발 속도가 텅스텐 내부에서의 이동 속도보다 매우 빠르기 때문에, Fig. 8의 미세조직에서 나타난 바와 같이, 선단부에 기공이 존재하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

TIG용접의 고전류화, 고밀도화 및 자동화에 따른 TIG 용접용 텅스텐 전극봉의 아크 내구성 향상을 위한

텅스텐 전극봉 연구 개발 동향을 리뷰하였다.

1) TIG 용접시 텅스텐 전극봉 선단부에 발생하는 텅스텐 림(Rim)은 보호가스 내 산소와 텅스텐 전극봉 표면이 반응하여 생성된 텅스텐 산화물이, TIG 아크에서 순수한 텅스텐으로 분리되고, 플라즈마 제트 기류에 의해, 텅스텐봉 선단부로 이동되어, 텐드라이트로 형성 및 성장되어 발생한다. 생성 후에는 아크 압력 및 전압 불안정을 초래한다.

2) 텅스텐 전극봉에 필요한 요구 특성은 아크 착화의 용이성(최초 아크 착화 용이성, 재아크 착화 용이성)과 아크 내구성(아크 착화 최대 횟수, 용접 중 텅스텐봉 선단 유지 정도)과 더불어, 용접부 품질이다.

3) 순 텅스텐 전극봉보다 산화물을 포함한 텅스텐 전극봉이 아크 착화성과 내구성이 좋고, 특히 란탄 산화물이 낮은 전자일함수와 높은 부피 분율로 인해 가장 우수한 특성을 나타내었다.

4) 산화물계 텅스텐 전극봉에서는 산화물의 텅스텐 전극봉 선단부에서의 증발 속도와 텅스텐 내부에서 선단부로의 이동 속도의 균형이 아크 착화성 및 아크 내구성에 매우 중요하다. 또한, 산화물의 양, 분포, 크기와 더불어 텅스텐봉 결정립 형상은 아크 내구성 및 아크안정성과 밀접한 상관관계가 있기 때문에, 이에 대한 평가 기준이 필요하다.

ORCID: Hee-Keun Lee: <http://orcid.org/0000-0001-6114-6407>
ORCID: Chung-Yun Kang: <http://orcid.org/0000-0003-1122-5320>

References

1. S. H. Jeon, T. W. Kim, Y. W. Lee, and Y. C. Kim, Study on the improvement of TIG welding productivity through analysis of ArcTig welding properties. *J. Weld. Join.* 39(6) (2021) 632-640. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.6.8>
2. H. K. Lee, J. Y. Kim, and I. H. Hwang, Effect of welding parameters in application of plasma arc welding to 316L stainless steels, *Proceedings of the 2006 Annual Meeting of Korean Welding Society*, The Korean Welding and Joining Society, (2006) 66-68.
3. P. K. Baghel and D. S. Nagesh. Pulse TIG welding: process, automation and control, *J. Weld. Join.* 35(1) (2017) 43-48. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.1.43>
4. M. Lohse, U. Füssel, H. Schuster, J. Friedel, and M. Schnick, M. Keyhole welding with CF-TIG (cathode focussed GTA), *Weld. World*, 57(5) (2013) 735-741. <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0074-y>
5. K. Hori, H. Watanabe, T. Myoga, and K. Kusano, Development of hot wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire-research on pulse heated hot wire TIG welding processes, *Weld. Int.*

- 18(6) (2004) 456-468.
<https://doi.org/10.1533/wint.2004.3281>
6. F. Matsuda, M. Ushio, H. Fujii, and A. A. Sadek, Effect of surface coating around tungsten electrode on formation of rim, *Trans. JWRI* 16(1) (1987) 211-214.
 7. M. Ushio, Arc discharge and electrode phenomena. *Pure Appl. Chem.* 60(5) (1988) 809-814.
<https://doi.org/10.1351/pac198860050809>
 8. A. A. Sadek, M. Ushio, and F. Matsuda, Effect of rare earth metal oxide additions to tungsten electrodes. *Metall. Trans.. A*, 21(12) (1990) 3221-3236.
<https://doi.org/10.1007/BF02647317>
 9. S. C. Cifuentes, M. A. Monge, and P. Pérez, On the oxidation mechanism of pure tungsten in the temperature range 600-800 C. *Corrosi. Sci.* 57 (2012) 114-121.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.12.027>
 10. M. Tanaka and Y. Tsujimura, Visualization of metal vapor behavior in TIG welding, *J. Japan Weld. Soc.* 30(2), (2012) 164-170.
<https://doi.org/10.2207/qjjws.30.164>
 11. M. Tanaka, Physics of welding arcs, *J. Japan Weld. Soc.* (2018) 87-88.
 12. AWS A5. 12M/A5. 12 (ISO 6848-2004 MOD), Specification for tungsten and oxide dispersed tungsten electrodes for arc welding and cutting, *American Weld. Soc.* (2009).
 13. KS D 7029, Tungsten electrodes for inert gas shielded arc welding, *Korean Agency Technol. Stand.* (2002).
 14. Diamond ground products Inc, Guidebook for the proper selection and preparation of tungsten electrodes for arc welding, *Diamond ground products Inc*, California, USA (2008) 0-17.