고강도 용착금속의 미세조직이 저온균열에 미치는 영향

이 명 진* · 강 남 현*,†

*부산대학교 재료공학부

The Effects of Microstructure on Cold Crack in High-Strength Weld Metals

Myung-Jin Lee* and Nam-Hyun Kang*,†

*Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

†Corresponding author : nhkang@pusan.ac.kr

(Received February 3, 2014 ; Revised February 13, 2014 ; Accepted February 19, 2014)

Abstract

In the past, cold crack was commonly observed in the HAZ(heat affected zone) of high-strength steels. Applying to TMCP(thermo-mechanical controlled process) and HSLA(high strength low alloy) steels, cold crack tends to increase the occurrence in the weld metal. It is generally understood that cold crack occurs when the following factors are present simultaneously : diffusible hydrogen in the weld metal, a susceptible microstructure and residual stress. In particular, many studies investigated the microstructural effect on the cold crack in HAZ and the cold crack in weld metals starts to receive the special attendance in modern times. The purpose of the study is to review the effect of weld microstructures (grain boundary ferrite, Widmanstätten ferrite, acicular ferrite, bainite and martensite) on cold crack in the weld metals. Among various microstructures of weld metals, acicular ferrite produced the greatest resistance to the cold crack due to the fine interlocking nature and high-angle grain boundary of the microstructure.

Key Words : Cold crack, Weld metal, Grain boundary ferrite, Widmanstätten ferrite, Acicular ferrite, Bainite, Martensite

1. 서 언

최근 철강소재의 고강도화에 따라 용접 열영향부에서 주로 발생하였던 저온균열이 용착금속에서 발생하는 경향이 증가하고 있다¹⁾. 저온균열은 용접 후 시간의 경과에 따라 발생하기에 지연균열(delayed crack) 또는 수소 유기 균열(hydrogen induced crack)이라고 하며, 주로 모재의 용접 열영향부와 용착금속에서 발생한다. 이러한 저온균열의 주요 인자는 용접부 확산성 수소, 경화 조직 및 인장 잔류 응력의 복합적 작용에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다.

1980년대 TMCP(thermo-mechanical controlled process)라는 열가공제어압연 방법을 적용한 HSLA(high strength low alloy)강이 등장하기 전까지 강재의 강

도 증가는 주로 합금원소 첨가에 의존하였다. 이러한 철강 모재의 합금 원소 첨가가 증가함에 따라 탄소당량(carbon equivalent)이 증가하여 용접성이 감소하게 되었고, 이로 인하여 저온균열은 상대적으로 경도가 높은 용접 열영향부에서 주로 발생하였다.

TMCP 제조방법에 의해 생산된 HSLA강은 탄소 함량을 최소화 하면서 미량의 Nb, Ti, V 등 강력한 탄화물 합금 원소를 첨가하여 탄소당량을 감소하면서, 제어 압연 후 냉각 속도 관리를 통하여 결정립 미세화 및 미세조직 제어로써 강재의 강도를 증가시켰다. 이로 인하여 철강 모재의 저온균열 저항성을 크게 향상시킬 수 있었던 반면, 고강도 용착금속에서의 저온균열은 증가하는 경향을 나타내고 있다.

현재 열영향부에서 발생하는 저온균열 관련하여 주요 인자인 용접부 확산성 수소 함량과 미세 조직, 인장 잔

류 응력 등에 대하여 체계적인 많은 연구가 진행 된 반면, 용착금속의 저온균열에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다. 고강도강 용착금속의 저온균열에 있어서 미세조직의 영향이 확산성 수소 및 인장 잔류 응력보다 크게 작용하고 있다고 보고되었다²⁾. 열영향부의 경우 다양한 연구결과에 의해 저온균열과 미세조직과의 연관성이 파악되어 저온균열을 최소화 할 수 있지만^{3,4)}, 용착금속의 경우 저온균열에 미치는 미세조직의 연관성에 대한 연구는 미비한 실정이다.

모재의 용접 열영향부 저온균열과 연관된 각종 미세조직의 상대적 저온균열감수성이 높은 순서는 여러 연구자들에 의해서 보고가 되었다. 각 미세조직 별 저온균열 감수성은 쌍정 마르텐사이트 > 래스 마르텐사이트 > 템퍼드 마르텐사이트 > 베이나이트 > 펄라이트 > 침상페라이트 순으로 크다⁵⁻⁷⁾.

이에 본 논문은 용착금속에서의 저온균열과 관련한 기존의 연구 결과, 기술 보고⁸⁻¹³⁾ 및 저자의 연구결과를 토대로 고강도 용착금속에서 생성될 수 있는 미세조직인 입계 페라이트(grain boundary ferrite), 위드만스테텐 페라이트(Widmanstätten ferrite), 침상페라이트(acicular ferrite), 베이나이트(bainite), 마르텐사이트(martensite)와 저온균열과의 연관성에 대하여 기술하고자 한다.

2. 용착금속의 냉각에 따른 미세조직

Fig. 1은 고강도 철강 소재의 용착금속에서 나타나는 대표적인 미세조직을 나타낸다. 용착금속의 미세조직은 모재의 조성, 용접봉의 화학 성분, 입열량, 보호가스, 냉각속도 등에 의하여 영향을 받는다¹⁴⁻¹⁸⁾. Fig. 2는 일반적인 탄소강의 용접 시 냉각에 따른 용착금속 냉각 곡선의 개략도를 나타낸다. 철강 소재에 있어서 용융풀(weld pool)의 온도는 약 2,500K정도까지 상승하고, 용융금속(liquid steel)내 용존산소(dissolved oxygen)

Fig. 1 Microstructure of weld metal (a) bainite(α_b) and martensite(α'), (b) grain boundary ferrite (α_w), acicular ferrite(α_a), Widmanstätten ferrite (α_w)¹⁸⁾

Fig. 2 Schematic illustration of a weld metal cooling curve associated with continuous cooling transformation(CCT) diagram¹⁹⁾

는 증가 하게 된다. 용융풀의 온도가 낮아지면서 온도 범위가 2,000~1,700°C에 이르면 용융금속 내의 용존 산소와 탈산원소가 반응하여 0.1~1μm크기의 복합산화물(complex oxide inclusion)을 형성한다. 온도범위가 1,800~1,600°C로 냉각되면, δ-페라이트가 응고되기 시작한다. 온도가 점점 감소함에 따라 δ-페라이트는 오스테나이트로 변태가 진행된다.

약 1600~800°C까지 온도가 낮아지면 오스테나이트 결정립이 성장하고, 800°C까지 냉각되면 오스테나이트 결정립에서 입계 페라이트가 생성된다. 연속 냉각이 진행됨에 따라 600~300°C까지 냉각되면 오스테나이트/입계 페라이트 계면에서 위드만스테텐 페라이트가 생성되어, 오스테나이트 내부로 성장하게 된다. 이 후 300°C 이하의 온도에서는 오스테나이트 결정립 내부에 존재하는 비금속 개재물에서 침상페라이트가 생성되고, 잔류 오스테나이트는 베이나이트나 마르텐사이트로 변태 된다.

용착금속에 대한 원소의 첨가는 경화능을 증가시켜 연속냉각 곡선을 오른쪽으로 이동시켜, 오스테나이트-페라이트 변태온도를 낮춰 동일 냉각 조건에서 침상페라이트나 베이나이트, 마르텐사이트와 같은 저온상의 분율을 높임으로써 용접금속의 강도를 향상시키게 된다.

3. 저온균열에 영향을 미치는 용착금속의 미세조직

3.1 입계 페라이트 (grain boundary ferrite)

오스테나이트 결정립계에서 조대하게 생성되는 입계 페라이트는 일반적으로 저온인성을 감소시키는 것으로

Fig. 3 Micrograph showing the crack propagation across the grain boundary ferrite²²⁾

Fig. 4 Micrograph showing the preferential crack propagation along the grain boundary ferrite²⁶⁾

알려져 있다. 입계 페라이트와 용착금속의 저온균열과의 관계에 대해서는 다양한 연구 결과들이 보고되어 있다. 일부에서는 용착금속의 저온균열이 입계 페라이트와 관계없이 전파된다고 주장하고 있다²⁰⁻²²⁾. Fig. 3은 고강도 저수소계 FCA 다층용접부의 저온균열을 보여주는 사진으로, 저온균열이 입계 페라이트를 따라 전파되지 않고, 결정립을 가로질러서 전파되고 있음을 알 수 있다. 반면 많은 연구자들은 입계 페라이트가 용착금속의 저온균열에 악영향을 미친다고 보고하고 있다²³⁻²⁶⁾. Fig. 4는 인장강도 700MPa급 FCA 다층용접부에서 저온균열을 나타내는 사진으로, 저온균열이 입계 페라이트를 따라 선택적으로 전파되는 것을 보여준다.

용착금속의 입계 페라이트가 저온균열의 전파 경로로서 역할을 할 때, 결정립 내부를 따라 균열이 진전되는지, 입계 페라이트의 결정립계를 따라 전파하는지에 대해서는 보다 체계적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그러나, 입계 페라이트가 용착금속의 저온균열 민감도와 관련이 없다는 연구결과도 존재하지만, 여러 연구에서 저온균열 전파 시 입계 페라이트가 기여한다는 결과 및 입계 페라이트 분율 증가 시 저온인성이 감소하는 점 등을 고려하여 용착금속에서 입계 페라이트의 분율을 최소화 하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

Fig. 5 Micrograph showing the Widmanstätten ferrite(W) (a) optical micrograph and (b) TEM micrograph²⁷⁾

3.2 위드만스테텐 페라이트 (Widmanstätten ferrite)

위드만스테텐 페라이트는 용착금속의 냉각과정 중 오스테나이트 입계에서 낮은 전위 밀도를 가지면서 형성되는 침상형 조직으로써, 용접부의 취성을 증가시키고 저온인성을 감소시키는 것으로 알려져 있다²⁷⁾. 위드만스테텐 페라이트는 오스테나이트 입계라는 동일한 면에서 같은 방향으로 성장한 래스(lath)의 경계로만 이루어진 것이기 때문에 대부분 저경각(low-angle)입계를 가지고 있다. Fig. 5는 위드만스테텐 페라이트의 미세조직을 보여주는 사진으로 이러한 미세조직학적 특징으로 인하여 균열 발생 시 균열의 진행을 굴절 시키지 못하여 균열저항성이 낮은 조직이다. 위드만스테텐 페라이트는 Mn 첨가량이 증가할수록, 오스테나이트 결정립이 미세할수록 생성이 억제된다고 보고된다²⁷⁾. 그러나, 용착금속에서의 위드만스테텐 페라이트의 저온균열 영향과 관련하여 보고된 연구결과는 거의 전무한 실정이다. 다만 용착금속에 있어서 균열 저항성이 낮고, 취성 증가 및 저온인성을 감소시킨다고 알려진 만큼 성장을 억제시키는 것이 저온균열에 유리할 것으로 판단된다.

3.3 침상페라이트 (acicular ferrite)

오스테나이트 결정립 내부의 개재물로부터 불균일 핵 생성되어 성장하는 침상형 페라이트는 랜덤(random)한 방향을 가지는 래스(lath) 또는 플레이트(plate)를 가지고 있으며, 결정립이 매우 미세하고 높은 전위 밀도를 가지고 있기 때문에 용착금속의 강도와 인성을 동시에 향상시킬 수 있다고 알려져 있다. 이러한 래스(lath) 또는 플레이트(plate)가 서로 얽혀있는(interlocking)구조를 가지고 있고, 고경각(high-angle)입계를 가짐으로 인하여 균열 전파에 저항성이 높다고 할 수 있다. Fig. 6은 침상페라이트의 이러한 특징에 대해서 보여주는 그림이다. 균열의 전파 시 결정방위가 다

Fig. 6 Schematic illustration of crack propagation in various lath microstructure²⁸⁾

Fig. 7 Micrograph illustrating the branching and blunted crack (a) optical micrograph and (b) SEM micrograph³²⁾

른 침상페라이트 래스의 경계에서 균열이 바로 전파되지 못하고 굴절하게 된다. 이러한 균열 전파 지연 현상에 의하여 용착금속에 있어서 침상페라이트 조직은 저온인성 및 저온균열에 대한 저항성이 우수하고, 저온균열을 방지 할 수 있는 지배적인 미세조직이라고 할 수 있다.

용착금속의 미세조직에서 침상형 페라이트의 분율이 증가할수록 용착금속의 인성 및 저온균열 저항성이 향상되고^{29,30)}, 최근에는 Ni등과 같은 합금 원소 첨가에 의한 침상형 페라이트의 분율을 향상시키는 연구³¹⁾ 외에 비금속 개재물을 적절히 제어하여 침상형 페라이트가 발달되도록 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

Fig. 7은 저온균열이 침상형 페라이트 조직을 가로질러 진행되는 동안 균열이 직진하지 못하고 여러 방향으로 굴절되는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 앞서 언급한 침상형 페라이트의 미세조직학적 특징인 서로 얽혀있는(inter-locking)구조와 고경각(high-angle)입계

에 기인한다. 용착금속의 저온균열 민감도를 최소화 하기 위해서는 침상형 페라이트 분율을 증가 시키는 것이 유리할 것으로 판단된다.

3.4 베이나이트 및 마르텐사이트 (bainite and martensite)

용착금속에서 베이나이트는 오스테나이트 입계에서 생성되며 대부분 저경각(low-angle)경계를 가지며, 균열이 전파할 때 굴절시키는 역할을 못 하기 때문에 취성 파괴에 대한 저항성이 낮아 저온균열 민감도가 높은 미세조직이다³³⁾.

마르텐사이트 조직은 철강 미세조직 중 가장 경한 조직으로 저온균열 민감도가 가장 높은 미세조직으로 알려져 있다. 용착금속에서 마르텐사이트 변태 시 체적이 팽창하여 저온균열 발생의 원인이 된다. Fig. 8은 고강도 FCA용접부에서 저온균열이 마르텐사이트 조직을 따라 진행되고 있음을 보여준다.

베이나이트와 마르텐사이트에 대한 용착금속의 저온균열 관련 연구는 이제 시작 단계로 본 저자의 해양플랜트용 항복강도 600MPa급 저수소계 FCA 용접와이어에 대한 저온균열 Y-groove 시험 결과를 정리하였다. 사용된 용접재료에 대한 화학 조성 및 기계적 물성을 Table 1에 나타내었다.

용착금속의 미세조직은 침상페라이트 외에 빠른 냉각

Fig. 8 Micrograph showing the cold crack propagating along the martensite³⁴⁾

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of weld metals

No.	Chemical Composition (wt.%)						Tensile Properties		CVN	
	C	Si	Mn	Ni	Others	Ceq	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	Temp. (°C)	Energy (J)
600-1	0.06	0.2	1.2	2.1	Ni, Cr, Mo, Ti, Al, B, Cu, Nb	0.406	632	644	-60	75
600-2	0.06	0.4	1.4	2.5		0.480	675	695		92

Table 2 Phase volume fraction of weld metal

No.	Acicular Ferrite	Bainite + Martensite
600-1	45.7%	54.3%
600-2	28.6%	71.4%

속도로 인하여 베이나이트 및 마르텐사이트 조직을 확인할 수 있었다. Table 2는 각각의 용접재료별 미세조직의 분율을 측정한 것으로 상대적으로 탄소당량이 높은 600-2시편의 경우 저온 변태 조직인 베이나이트와 마르텐사이트의 분율이 70% 이상 높게 나타나며, 상대적으로 탄소당량이 낮은 600-1시편은 저온변태 조직의 분율이 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 600-1시편보다 600-2시편의 경우 합금원소 첨가 증가로 인하여 경화능이 상승함으로써 베이나이트나 마르텐사이트의 저온변태 조직 분율이 증가한 것으로 판단된다.

저온균열은 2종류의 용착금속에서 모두 발생하였으며, 저온균열을 측정 한 결과 600-1시편보다 600-2시편에서의 저온균열이 높게 나타났다. 저온균열이 발생한 용접재료에 대해서 Fig. 9와 같이 파면을 확인한 결과 모든 용접재료에서 대부분 수소 파괴의 전형적인 파면인 입계파괴(intragranular) 형태의 파면을 나타내었다. 저온균열은 Fig. 10과 같이 발생한 파면의 전파 경로를 확인한 결과 저온 변태(경화)상인 베이나이트와 마르텐사이트를 따라 균열이 전파되는 것을 확인할 수 있었고, 이러한 저온변태상의 경우 저온균열 민감도가 높음을 확인 할 수 있었다.

Fig. 9 Cold crack fractography of weld metals (a) 600-1 and (b) 600-2 **Fig. 10** SEM image of cold crack propagation

4. 결 론

고강도 용착금속에서 생성될 수 있는 미세 조직인 입계 페라이트, 위드만스테텐 페라이트, 침상페라이트, 베이나이트, 마르텐사이트와 저온균열과의 연관성은 다음과 같다.

1) 입계 페라이트와 용착금속의 저온균열 민감도는 관련이 없다는 연구결과도 존재하지만, 여러 연구에서 저온균열 전파 시 입계 페라이트가 기여한다는 결과를 고려한다면 용착금속에 있어서 저온균열의 민감도가 높은 조직이라고 할 수 있다.

2) 위드만스테텐 페라이트는 저경각(low-angle)입계에 의한 미세조직적 특성으로 인하여 균열 발생 시 균열저항성이 낮은 조직이다.

3) 침상페라이트는 미세조직학적 특징인 서로 얽혀있는(inter-locking)구조와 고경각(high-angle)입계로 인하여 균열이 바로 전파되지 못하고 굴절하기 때문에 용착금속의 저온균열 저항성이 가장 우수한 조직이다.

4) 베이나이트는 저경각(low-angle)입계를 가지며, 균열이 전파할 때 굴절시키는 역할을 못하기 때문에 용착금속의 저온균열 민감도가 높은 미세조직이다.

5) 마르텐사이트는 미세조직 자체의 높은 경도와 변태 시 발생하는 체적 팽창 등의 원인으로 용착금속의 저온균열에 있어서 가장 민감도가 높은 조직이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 부품소재기술개발사업(No.10035163)과 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2013 R1A1A2013125).

Reference

1. N. Bailey and M. D. Wright : Weldability of High Strength Steels, Welding and Metal Fabrication, (1993), 389-396
2. H. J. Yi, Y. J. Lee, J. Y. Kim, S. S. Kang : Effect of microstructure and chemical composition on cold crack susceptibility of high strength weld metal, Journal of Mechanical Science and Technology, **25** (2011), 2185-2190
3. H. J. Kim, B. Y. Kang : Microstructural characteristics of steel weld metal, Journal of KWS, **18-5** (2000), 565-572 (in Korean)
4. D. S. Tayler, G. M. Evans : Development of MMA electrodes for offshore fabrication, Metal Construction, **15-8** (1983), 438-443
5. T. Boniszewski and F. Watkinson : Effect of weld

- microstructures on hydrogen-induced cracking in transformation steels, *Metal and Materials* **7(2&3)** (1973), 90-96&145-151
6. T. Boniszewski : Hydrogen Embrittlement in Low Carbon Nickel and Manganese Steels, *British Welding Journal*, **12(7)** (1965), 349-362
 7. T. Boniszewski, F. Watkinson, R. C. Baker and H. F. Tremlett : Hydrogen embrittlement and heat-affected zone cracking in low carbon alloy steels with acicular microstructures, *British Welding Journal*, **12(7)** (1965), 14-36
 8. H. J. Kim, B. Y. Kang : Developing of Welding Consumable for Controlling the Cold Cracking in Steel Deposited Metal, *Journal of KWS*, **20-3** (2002), 259-264 (in Korean)
 9. H. J. Kim, B. Y. Kang : Effect of Microstructure on Cold Cracking in Weld Metal, *Journal of KWS*, **21-1** (2003), 8-13 (in Korean)
 10. H. J. Kim, B. Y. Kang : Evaluation Methods for Cold Crack Susceptibility of Deposited Metal, *Journal of KWS*, **20-4** (2002), 429-436 (in Korean)
 11. K. H. Kim, H. J. Kim and H. S. Ryoo : Verification of Quantitative Evaluation Method for Ferritic Weld Metal Microstructure, *Journal of KWS*, **23-4** (2005), 27-33 (in Korean)
 12. H. W. Lee, S. W. Kang and M. H. Kim : Effect of Hydrogen Depends on Transverse Cracks in Thick Steel Weldments, *Journal of KWS*, **26-3** (2008), 225-229 (in Korean)
 13. H. W. Lee, S. W. Kang and J. M. Lee : Effect of Susceptible Microstructure Depends on Transverse Cracks in Thick Steel Weldments, *Journal of KWJS*, **26-3** (2008), 219-224 (in Korean)
 14. S. Liu and J. E. Indacochea : *Welding Theory and Practice*, Part 3 (1990)
 15. J. M. Dowling, J. M. Corbett and H. W. Kerr : Inclusion phases and the nucleation of acicular ferrite in submerged arc welds in high strength low alloy steels, *Metallurgical Transactions A*, **17** (1986), 1611-1623
 16. R. A. Farrar, Z. Zhang, S. R. Bannister and G. S. Barritte : The effect of prior austenite grain size on the transformation behaviour of C-Mn-Ni weld metal, *Journal of Materials Science*, **28** (1993), 1385-1390
 17. B. J. Kim, S. H. Uhm, C. H. Lee : Effects of inclusions and microstructures on impact energy of high-input Submerged-Arc-Weld metals, *Journal of Engineering Materials and Technology*, **127** (2005), 204-213
 18. S. S. Babu and S. A. David : Inclusion formation and microstructure evolution in low alloy steel welds, *ISIJ Int*, **42-12** (2002), 1344-1353
 19. S. S. Babu : Acicular ferrite and bainite in Fe-Cr-C weld deposits, Ph. D. Thesis, University of Cambridge (1991)
 20. P. H. M. Hart : Resistance to hydrogen cracking in steel weld metal, *Welding Journal*, **65-1** (1986), 14-22
 21. A. P. Chakravarti, S. R. Balb : Evaluation of weld metal cold cracking using the G-BOP test, *Welding Journal*, **68-1** (1989), 1s
 22. H. W. Lee : Weld metal hydrogen-assisted cracking in thick steel plate weldments, *Mat. Sci. and Eng. A*, **445-446** (2007), 328-335
 23. M. J. Robins, P. J. Kilgallon : A Review of the effect of microstructure on hydrogen embrittlement of high strength offshore steels, *Offshore Shore Technology Report-OTO* 1999 065, Dec, 1999, Cranfield University, UK
 24. F. Watkinson : Hydrogen cracking in high strength weld metal, *Welding Journal*, **58-9** (1969), 417-424
 25. R. J. Parageter : Effect of arc energy, plate thickness and preheat on C-Mn steel weld metal hydrogen cracking, *TWI Report* 1992 (1992), 461
 26. J. S. Seo, H. J. Kim, and H. S. Ryoo : Effect of Grain Boundary Ferrite on Susceptibility to Cold Cracking in High-strength Weld Metal, *METALS AND MATERIALS International*, **14-4** (2008), 515~522
 27. C. L. Choi, D. C. Hill : A Study of Microstructural Progression in As- Deposited Weld Metal, *Welding Journal*, **5Z** (1978), 232s
 28. J. L. Lee and Y. P. Pan : *Metall. Trans. A*, **21** (1990), 1527
 29. J. R. Garland and P. R. Kirkwood : Toward improved submerged arc weld metals, *Metal Construction part 1*, **7-5** (1975), s275
 30. J. R. Garland and P. R. Kirkwood : Toward improved submerged arc weld metals, *Metal Construction part 2*, **7-6** (1975), s320
 31. S. H. Kim, C. Y. Bang, K. S. Bang : *Journal of Materials Science*, **36** (2001), 1197
 32. H. J. Yi, Y. J. Lee, J. Y. Kim and S. S. Kang : Effect of microstructure and chemical composition on cold crack susceptibility of high-strength weld metal, *Journal of Mech. Sci. and Tech.* **25-9** (2011), 2185~2193
 33. J. H. Tweed and J. F. Knott : *Metal Science*, **17-2** (1983), 45
 34. J. S. Seo, J. H. Kim, H. J. Kim and H. S. Ryoo : Characteristics of Cold Cracks in FCA Weld Metal, *Journal of KWJS*, **25-4** (2007), 342-346 (in Korean)

- 이명진
- 1974년생
- 부산대학교 재료공학부
- 용접야금, 합금설계, 열처리
- e-mail : mj.lee@pusan.ac.kr

- 강남현
- 1970년생
- 부산대학교 재료공학부
- 용접야금, 레이저접합, 무연솔더
- e-mail : nhkang@pusan.ac.kr