

후판 Al 5083 합금의 GMA 용접에서 보호가스 조성 및 용접변수에 따른 용접성의 평가

김철희^{*,†} · 이기배^{**} · 안영남^{*} · 김대순^{***}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합연구그룹

^{**}HAE 연구소, LG전자

^{***}현대중공업 중앙기술원 생산기술연구소

Effects of Shielding Gas Compositions and Welding Parameters on Weldability during Gas Metal Arc Welding of Al 5083 Thick Plate

Cheolhee Kim^{*,†}, Kibae Lee^{**}, Young-Nam Ahn^{*} and Dae-Soon Kim^{***}

^{*}Welding & Joining Research Group, Korea Institute of Industrial Technology

^{**}HAE R&D Lab, LG Electronics

^{***}Industrial Technology Institute, Hyundai Heavy Industries

[†]Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

1. 서 론

세계적인 에너지 수요 증가와 석유 자원 고갈에 따라 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG)의 수요는 96년 이후 연평균 2.4% 지속적으로 증가하고 있다. 또한 유가 상승에 따라 중소형 심해 및 극지의 유전이 경제성을 확보하고 있으며 전세계 매장량 1위 러시아의 북극해 개발이 활발하여 LNG 수송선의 수요가 증가하고 있다.

LNG를 수송하기 위한 탱크로 일체형 탱크, 멤브레인 탱크, 세미 멤브레인 탱크, 독립형 탱크 및 내부 방열방식 탱크가 있는데 주로 멤브레인 탱크와 독립형 탱크가 현재 건조되고 있다¹⁾. 탱크의 소재는 -162°C이하로 액화된 LNG를 담아야 하고 높은 안정성을 가져야 하므로 독립형 탱크인 구형 탱크에는 최대 두께 200mm 수준의 Al 5083합금이 이용되고 있으며²⁾, SPB(Self-supporting Prismatic-type-B)형 탱크에 알루미늄 합금을 이용할 경우 10~35mm두께의 Al 5083합금이 이용된다³⁾.

후판 Al합금의 고용착 용접을 위하여 대전류용접을 이용할 경우 퍼커링 현상이 발생하므로 이를 방지하기 위하여 가능한 대직경 와이어의 적용이 바람직하며 구형 LNG 탱크 적용두께에서는 4.8mm나 5.6mm직경의 와이어가 추천되고, SPB형 탱크에 적용되는 두께에

서는 2.4mm에서 4.0mm 직경의 와이어가 추천되었다^{4,5)}. 대직경 와이어의 적용 시에는 용접부의 보호 및 용접토치의 냉각을 위하여 특수한 용접토치가 적용되었으며, 연속파형(Continuous Wave, CW) 용접이 수행되었다. 대형 용접토치를 운송하여 용접을 수행하기 위하여 서브머지드 용접캐리지와 같이 상당히 복잡한 형태의 용접장치가 제안되었으며⁴⁾, 당시 용접기 제어기술의 한계로 CW 용접을 적용하면서 "mesospray"와 같은 특수한 용접 이행형태가 제안되었다⁶⁾.

1990년대 이후 국내에서도 인버터용접전원을 이용한 펄스용접기술이 대중화되고 있다. 펄스 GMA (Gas Metal Arc)용접을 적용할 경우 CW용접에 비하여 기공억제, 아크 및 용적이행 안정성향상이 보고된 바 있었으며^{7,8)}, 최근에는 펄스용접을 알루미늄 후판에 적용하여 용접특성을 평가한 연구결과가 발표되고 있다^{2,9)}.

알루미늄 합금의 GMA용접에서는 보호가스로 Ar 혹은 He, Ar-He 혼합 가스를 주로 이용한다. 기존 연구에서는 대용착을 구현하기 위한 보호가스 조성을 제시한 바 있으며^{2,4)}, CW 용접에서 보호가스 혼합비율에 따른 용접특성에 대해서도 연구결과가 발표된 사례가 있다¹⁰⁾. 알루미늄의 용접에서는 수소로 인해 주로 발생하는 것으로 알려진 기공에 대한 방지가 필요하며⁸⁾, 특히 극후판의 용접에서는 요구 용착량을 줄이기 위해 협개선을 이용하는데²⁾, 이 경우 Fig. 1과 같은 다층용접

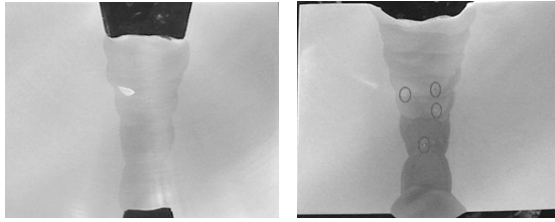


Fig. 1 다층용접에서 융합불량 사례

에서 융합불량이 발생하기 쉬워 보호가스의 조성이 용접성에 주는 영향이 매우 크다. 본 연구에서는 대용량 싱글펄스용접과 트윈용접에서 보호가스 조성 및 용접조건이 용접성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에 적용한 모재는 Al 5083합금이다. 용접재료는 직경 1.6mm, 2.4mm의 Al 5183 합금 와이어를 사용하였으며 각 소재의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

하나의 전극을 이용한 싱글용접에서는 1.6mm와 2.4mm 와이어를 각각 이용하였으며, 2개의 전극을 이용한 트윈용접에서는 1.6mm 와이어만을 이용하였다. 용접전원은 Fronius사의 TPS 5000를 이용하였으며, 펄스용접과형은 용접전원에 내장된 시너직라인을 이용하였다. 토치각도는 싱글 용접의 경우 전진각 10도, 트윈 용접의 경우 선행 와이어가 모재와 수직이다.

보호가스는 40l/min의 유량으로 공급하였으며, He 100%, He 70%+Ar 30%, He 50%+Ar 50%, He 30%+Ar 70%, Ar 100%로 5가지 조성을 가스혼합기를 이용하여 설정하였다. 혼합가스에 대해서는 설정한 조성에 ISO 6143:2008, "Gas analysis - comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures"에 따라

Table 1 사용된 Al 합금의 화학성분 (wt.%)

	Si	Mn	Cr	Cu	Zn	Mg	Fe	Al
5083	0.14	0.98	0.11	0.11	0.18	4.8	0.17	Bal.
5183	0.08	0.70	0.15	0.02	0.10	4.9	0.2	Bal.

Table 2 설정 가스 성분비에 따른 성분분석 결과

설정 성분비	실측 성분비 (%mol/mol)	
	He	Ar
He 70%+Ar 30%	67.9	34.8
He 50%+Ar 50%	44.8	55.6
He 30%+Ar 70%	26.6	71.5

Table 3 적용 시험편의 분류별 결합점수 최대값

분류	1종류	2종류	3종류	4종류
결합점수	6	21	42	3종류 초과

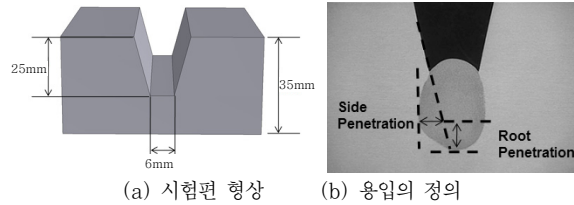


Fig. 2 그루브 시험편 형상 및 용입의 측정

성분분석을 수행하였으며 그 결과는 Table 2와 같다.

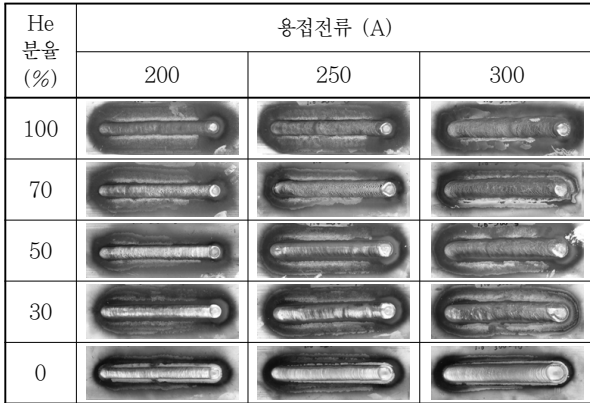
먼저 25mm 두께의 판재에 비드 용접을 수행하였으며 용접 수행 후 비드 표면의 산화, 단면 형상의 변화, 용접기공을 관찰하였다. 용접기공의 경우 KS D 0242:2002, "알루미늄 평판 접합 용접부의 방사선 투과 시험 방법"에 따라 방사선 투과시험을 이용하였다. 가장 흠집(결함)이 많은 부분에서 10mm × 20mm 영역을 설정하고 이 영역내의 결함의 크기와 개수를 측정하여 결함 점수를 산정하였다. 이 때 결함 점수가 낮을수록 결함이 적은 용접부이며 해당 시험편에서 결합점수별 분류는 Table 3과 같다¹¹⁾.

실제 조인트 용접에서 보호가스의 영향을 평가하기 위하여 Fig. 2(a)와 같은 그루브 시험편을 제작하여 보호가스에 따른 2.4mm 싱글와이어 용접을 수행하고, 단면검사를 통해 Fig. 2(b)와 같이 루트용입과 측면 용입을 관찰하였다.

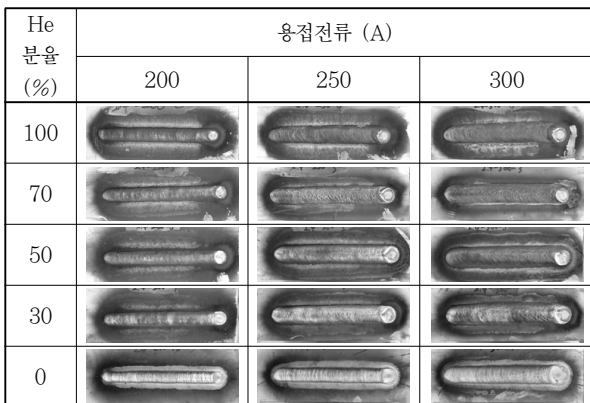
3. 비드 용접결과

용접와이어 및 보호가스 조성의 각 조합에서 아래로 기로 비드용접을 수행하였다. 이 때, 용접전류는 각 용접와이어 및 보호가스에 대해 200A, 250A, 300A로 변경하여 입열량에 대한 평가를 함께 수행하였으며, 1.6mm 트윈 용접전류에서는 용입깊이에 영향을 크게 주는 선행와이어의 전류의 값을 싱글와이어 용접의 전류값과 동일하게 설정하고, 후행와이어의 전류값은 선행전류의 80%로 설정하였다. 용접속도는 0.2m/min으로 고정하였으며 팁-모재간 거리는 20mm로 설정하였다.

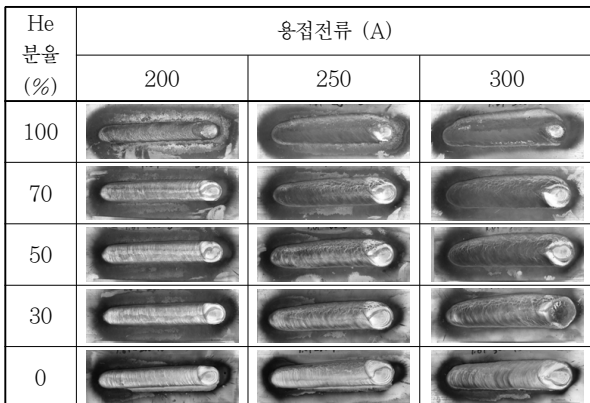
Fig. 3은 각 용접조건에서 용접직후의 비드 표면을 보여준다. Ar 보호가스를 이용할 경우 He 보호가스에 비해 가스 이온의 질량이 크기 때문에 음극에 형성된



(a) 1.6mm 직경와이어, 싱글 용접



(b) 2.4mm 직경와이어, 싱글 용접



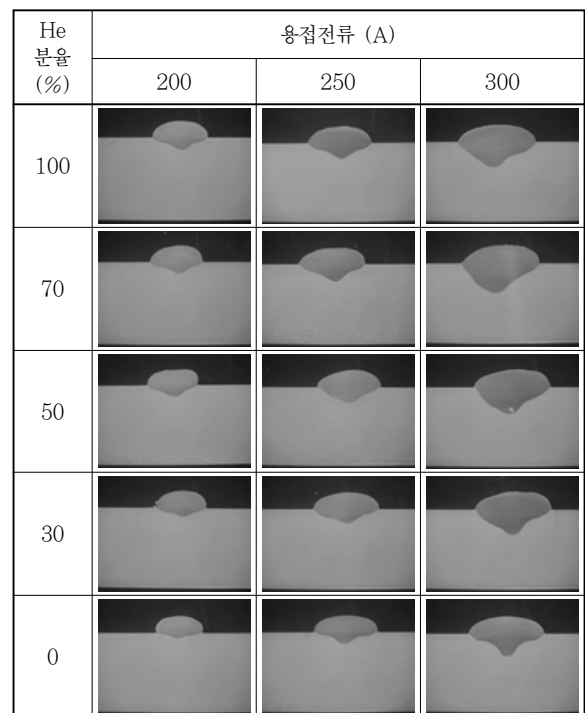
(c) 1.6mm 직경와이어, 트윈 용접

Fig. 3 각 용접조건에서의 용접비드 표면

산화막과 충돌 시 충격량이 더 크고 이에 따라 청정효과가 우수하다고 알려져 있다¹²⁾. 따라서 Ar 가스의 분율이 증가할수록 용접비드 표면 및 주변에서의 청정효과가 더 크게 나타난다. 용접전류가 낮은 경우가 높은 경우에 비하여 더 청정한 비드를 얻을 수 있는데 이는 전류증가에 따라 산화성이 증가한 것에 기인한다. 용접와이어별 특성에서는 2.4mm 싱글와이어 용접에서 가장 청정효과가 높게 나타났다. 이것은 내장 시너직라인

에서 설정 전압값과 연관된 것으로 사료된다. 200A의 용접전류에서 1.6mm와 2.4mm 싱글와이어 용접 시 평균전압은 각각 23.8V와 23.7V로 설정되었다. 와이어 직경이 커질수록 동일전류에서 상대적으로 낮은 전압이 이용되는데 현재 시너직라인에서는 거의 동일한 전압값이 설정됨에 따라 2.4mm 직경 싱글와이어 용접에서 아크 길이가 상대적으로 길게 관찰되었고 이에 따라 청정효과가 크게 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 4는 각 용접조건에서 용접비드 단면을 보여준다. Ar 보호가스의 경우 열전도도가 낮아 에너지 및 아크압력이 아크플라즈마의 중앙부에 집중되므로 손가락 모양의 용입을 형성하고 He 보호가스의 경우 열전도도가 높기 때문에 에너지가 아크 내에 균일하게 분포되고 타원형의 비드형상을 가짐을 확인할 수 있다. He 보호가스의 경우 아크가 용적의 아랫면에 집중될 수 있어 전자기력에 의해 스프레이 모드가 발생하지 않아 용적이행이 안정되지 않고, 스패터 발생을 야기할 수 있으나¹³⁾, 조인트 용접에서 손가락 모양의 용입보다는 타원 모양의 용입형상이 유리하다. 동일 용접와이어에서는 용접전류가 증가할 경우 용입 및 비드의 폭이 증가한다. 1.6mm 싱글와이어용접과 2.4mm 싱글와이어 용접을 비교하면 와이어 직경이 커지는 경우 입열량 및 용착량이 거의 동일하기 때문에 비드형상의 차이는 크지 않다. 트윈와이어 용접에서는 후행와이어로 인한 입열이 더해지므로 상당히 넓은 비드가 형성됨을 확인할 수 있다.



(a) 1.6mm 직경와이어, 싱글 용접

He 분율 (%)	용접전류 (A)		
	200	250	300
100			
70			
50			
30			
0			

(b) 2.4mm 직경와이어, 싱글 용접

He 분율 (%)	선형 와이어 용접전류 (A)		
	200	250	300
100			
70			
50			
30			
0			

(c) 1.6mm 직경와이어, 트윈 용접

Fig. 4 각 용접조건에서의 용접비드 단면

기공평가 결과 모든 조건에서 2mm 이내의 크기로 결함이 발생하였으며, Table 4는 발생한 기공에 대해 평가한 결과이다. 보호가스내의 He분율이 증가할수록 기공으로 인한 결함이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 각 용접와이어별 용접전류에 따른 기공발생 양상은 서로

Table 4 각 용접조건에서의 결함 점수

(a) 1.6mm 직경와이어, 싱글 용접

He 분율 (%)	용접전류 (A)		
	200	250	300
100	2	2	5
70	2	2	7
50	0	2	4
30	0	3	2
0	0	1	1

(b) 2.4mm 직경와이어, 싱글 용접

He 분율 (%)	용접전류 (A)		
	200	250	300
100	5	2	3
70	4	1	2
50	4	1	1
30	2	0	2
0	2	0	1

(c) 1.6mm 직경와이어, 트윈 용접

He 분율 (%)	선형 와이어 용접전류 (A)		
	200	250	300
100	3	2	4
70	1	1	0
50	0	0	0
30	0	0	0
0	0	0	0

다르게 나타난다. 1.6mm 싱글 와이어용접에서는 용접 전류가 증가할수록 기공발생이 증가하는 경향을 보여주고 있으나 2.4mm 싱글와이어용접과 트윈와이어 용접에서는 경향성이 명확하지 않다.

이는 용융풀의 형상, 아크의 안정성, 용적이행 형태 등으로 설명될 수 있다. 트윈와이어 용접에서는 용융풀이 길게 형성되어 용융풀내의 포함된 기공이 방출될 수 있는 시간이 상대적으로 길기 때문에 기공을 감소시키는데 유리한 것으로 판단된다. 2.4mm 싱글와이어 용접에서는 앞에서 설명한 것과 같이 내장 시너직라인에서 설정한 전압값이 비교적 높아 아크가 길게 형성됨에 따라 저전류인 200A에서 아크 안정성이 떨어져 기공이 발생하는 원인으로 설명될 수 있다. 또한 용접전류가 증가할 경우 용적의 온도가 상승하는데 일정 전류이상에서는 용접와이어에 포함된 Mg 성분의 기화로 인해 이행중인 용적의 폭발(in-flight explosion)이 발생할 수 있어 용적의 불안정한 이행 및 아크의 불안정을 야기할 수 있다¹⁴⁾.

4. 수직상향 그루브 용접결과

후판 그루브용접을 모사하기 위한 본 실험에서는 용접전류 250A, 용접속도 0.2m/min, 팁-모재간 거리 27mm에서 2.4mm 직경 와이어로 펄스용접을 수직상향자세에서 수행하였다. Fig. 5에서 확인할 수 있는 것과 같이 단면검사결과 He 분율이 증가할수록 루트용입과 측면용입이 증가함을 알 수 있다. Ar 분율이 증가할 경우 용입이 감소하나 불룩한 비드형상이 개선됨을 알 수 있다. 특히 Ar 100%를 사용한 경우에는 용입이 충분하지 못하여 융합불량이 발생하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 Al 5083후판에서 GMA용접을 수행하고 보호가스 조성 및 용접변수의 영향을 파악하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) He-Ar 혼합 보호가스 중 He 분율이 증가할수록 타원형의 용접비드가 형성되어 용접부의 융합불량을 줄일 수 있다. 그러나 He 분율이 너무 높을 경우 아크안정성이 저해되어 기공발생이 증가한다.

2) 혼합가스 중 Ar의 분율이 증가할 경우 비드의 청정도가 개선되고, 기공이 감소하나 그루브용접에서는 융합불량의 원인이 될 수 있다.

3) 1.6mm 싱글와이어, 2.4mm 싱글와이어, 1.6mm 트윈와이어용접을 비교한 결과 용입의 깊이는 적용 전류에 비례하고 트윈와이어 용접에서 가장 적은 기공이 관찰된다.

4) 용접전류가 증가할 경우 입열 및 용입이 증가하나 표면 산화로 인해 청정도가 저해되며, 싱글와이어 용접에서 전류를 높일 경우 용적의 과열로 인한 용적의 폭발로 기공 발생이 증가할 수 있다. 용접전압이 적정 이상일 경우 아크길이가 증가하여 표면청정도는 향상되나 기공의 원인이 될 수 있다.

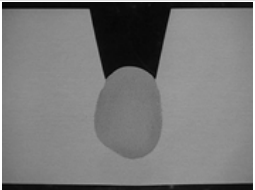
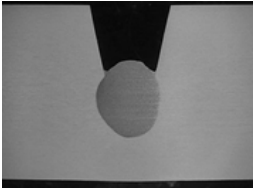
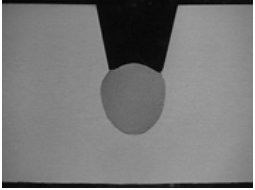
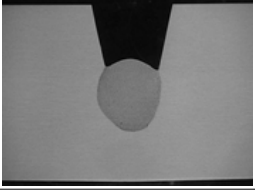
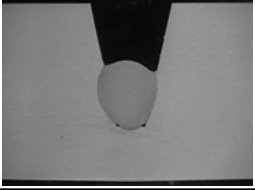
He 분율 (%)	단면	루트용입 (mm)	측면용입 (mm)
100		4.1	4.0
70		1.2	2.9
50		0.5	2.6
30		0.2	2.7
0		0	2.5

Fig. 5 보호가스 조성에 따른 수직용접결과

참 고 문 헌

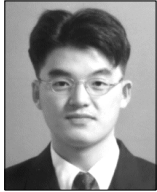
- 양홍중, 이세동: LNG선의 역사 및 Type별 특성, 대한조선학회논문집, **33-6** (1996), 16-24 (in Korean)
- S. Egerland, G. Hills and W. Humer: Using the Time Twin Process to Improve Quality and Reduce Cost in High Deposition Welding of Thick Section Aluminium, Proceeding of the IIW International Conference on Advances in Welding and Allied Technologies, Singapore, July 16-17, 2009, 9-14.
- O. Baba, Y. Okumoto and A. Abe: Production Process of Aluminium Alloy Tank of SPB LNG Carrier, Welding International, **22-7** (2008), 438-445
- 脇野喜彦: 大電流MIG溶接法の厚板への適用, 溶接技術, **26-6** (1978), 57-69 (in Japanese)
- H. Miyazaki, H. Miyauchi, Y. Sugiyama and T. Shinoda: Puckering in Aluminium Alloy Welds - Prevention Using Double Wire MIG Welding, Welding International, **7-6** (1993), 431-437
- M. Kiyohara, T. Okada, Y. Wakino and H. Yamamoto: On the Stabilization of GMA Welding of Aluminum, Welding Journal, **56-3** (1977), 20-28
- P. Praveen, P. K. D. V. Yarlagadda and M.-J. Kang: Advancements in Pulse Gas Metal Arc Welding, Journal of Materials Processing Technology, **164-165** (2005) 1113-1119
- H. Park: Arc and Laser Welding of Al Alloys for the Transportation Applications, Journal of KWS, **19-2** (2001), 142-150 (in Korean)
- K. Lee, C. Kim and D.-S. Kim: High-deposition Pulse GMA Welding for Al 5083 Thick Plate, Proceeding of the International Welding/Joining Conference-Korea, Jeju, Korea, May 8-11, 2012, 167
- J.-K. Chung, H.-S. Yang and D.-G. Lee: A Study on the GMA Welding Characteristics of Al 5083-O

Aluminum Alloy according to the Shield Gas Mixing Ratio and Heat Input, Journal of KWS, **20-2** (2002), 183-188 (in Korean)

11. 알루미늄 평판 접합 용접부의 방사선 투과 시험 방법, KS D 0242:2002, 기술표준원, 2002 (in Korean)
12. 유중돈, 나석주: 아크용접, 대한용접·접합학회, 2011, 139-140 (in Korean)

13. 대한용접학회편: 용접·접합편람, 대한용접학회, 1998, 552 (in Korean)

14. C.-H. Kim, Y.-N. Ahn and K-B. Lee: Droplet Transfer during Conventional Gas Metal Arc Welding and Plasma-Gas Metal Arc Hybrid Welding with Al 5183 Filler Metal, Current Applied Physics (2012), doi:10.1016/j.cap.2012.03.001



- 김철희
- 1973년생
- 한국생산기술연구원 용접접합연구그룹
- 용접공정해석 및 자동화
- e-mail : chkim@kitech.re.kr



- 안영남
- 1982년생
- 한국생산기술연구원 용접접합연구그룹
- 용접시공 및 공정최적화
- e-mail : welding@kitech.re.kr



- 이기배
- 1983년생
- LG전자 HAE연구소
- 제어 및 자동화
- e-mail : kibae.lee@lge.com



- 김대순
- 1958년생
- 현대중공업 생산기술연구소
- 용접공정 및 야금
- e-mail : drkim@hhi.co.kr