

필릿 용접의 기계적 시험 특성 평가

조병준¹, 이성준², 임종국^{3*}

¹한국폴리텍대학 신기술교육원, ²시흥도시공사, ³한국교통대학교 안전공학과

Evaluation of Mechanical Test Characteristics of Fillet Welding

Byung-Jun Cho¹, Soung-Jun Lee², Jong-Guk Rhim^{3*}

¹Korea Polytechnic University New Technology Education Center

²Siheung Urban Corporation

³Korea National University of Transportation

요약 FCAW는 모든 자세에서 용접이 가능하고 작업여건 변수가 많은 현장에서 우수한 품질을 얻을 수 있는 장점이 있어 탄소강과 합금강의 중판, 후판 용접에 많이 사용되고 있다. 최근 국내에서 진행된 연구논문의 대부분이 피로 강도 평가 방법 연구, 잔류응력 및 변형, 필릿 용접 공정 개발 등의 연구가 시행되었으나 필릿 용접을 대상으로 경도, 매크로, 자분탐상 결과를 토대로 하여 기계적 특성을 나타낸 연구가 부족함에 따라 본 연구에서는 FCAW를 이용하여 상부는 SS400(일반구조용 압연강재) 후판은 SM490A(용접구조용 압연강재)를 이용하여 필릿 용접 후 경도시험, 매크로 시험, 자분탐상시험을 통해 아래와 같은 결론을 도출하였다. 경도시험 결과, 모든 결과 값이 KS B 0893의 규격치 350Hv보다 낮게 나타나 양호한 것으로 판단되었고, 매크로 시험 결과 용접부의 형상별로 균일한 조직 상태를 나타냈으며, 용접부 전 단면에 걸쳐 내부 결함, 기포 또는 불순물 등이 발견되지 않아 lamination의 우려가 없었으며, 자분탐상검사 결과 별도의 문제점이 발견되지 않았다.

Abstract FCAW is used mainly in the welding of carbon steel and alloy steel because it can be welded in all positions and can obtain excellent quality at sites with variable working conditions. Recently, many studies in Korea have estimated the fatigue strength, residual stress, and deformation, and to develop a fillet welding process. On the other hand, there have been few studies of the mechanical properties based on the strength, macro and magnetic particle test results for fillet welding. This study shows the following results through fillet welding, macro testing and strength testing using SM490A (solid-structure rolled steel) for thick plates using SS400 (rolled steel) for the upper plate and FCAW. The hardness test, macro test and magnetic particle test were then conducted. The hardness tests showed that all result values were smaller than the KS B 0893 standard values of 350Hv. The macro-test showed that each type of welded part was in a normal organic state and that there were no internal errors, bubbles, or impurities on the front of the welded part. Therefore, there were no concerns about lamination. The magnetic particle examination showed no problems.

Keywords : FCAW, SM490A, SS400, Fillet Welding, Hardness Test, Macroscopic Examination, Magnetic Particle Inspection

*Corresponding Author : Jong-Guk Rhim(Korea National University of Transportation)

email: jkrhim@ut.ac.kr

Received October 11, 2019

Revised December 26, 2019

Accepted February 7, 2020

Published February 29, 2020

1. 서론

이산화탄소 아크용접(FCAW: Flux Cored Arc Welding)은 1950년대 초에 개발된 용접 방법으로 피복 아크용접(SMAW: Sheild Metal Arc Welding)의 대안으로 개발되었다[1-2].

SMAW는 전극 와이어 외부에 피복제가 있어 피복제에 의해 아크가 안정되고 우수한 품질의 용접물을 얻을 수 있지만 가장 문제가 되는 것은 자동화 및 반자동 등 자동화가 어려워 작업능률이 떨어지고 경제적이지 못하다는 것이다.

또한 가스 메탈 아크용접(GMAW: Gas Metal Arc Welding)은 자동화는 가능하지만 솔리드 와이어는 Spatter 발생이 많아 작업성이 떨어지고 용접 품질에도 FCAW에 비하여 떨어진다.

이러한 단점을 보완해주는 FCAW는 전 자세에 용접이 가능하고, 탄소강과 합금강의 중판 또는 후판 용접에 가장 많이 사용되며 용착 속도와 용접 속도가 상당히 크다.

또한 솔리드 와이어에 비하여 우수한 용접 결과를 얻을 수 있고, 작업여건에 변수가 많은 현장 용접에서 우수한 용접 품질을 얻을 수 있어, 현장에서 많이 사용하고 있다.

특히 조선소에서는 대부분 FCAW를 사용하고 있으며, 최근에는 철 구조물 산업인 철골, 건설기계, 플랜트 산업에서 폭넓게 사용되고 있다.

일반 구조용 압연 강재(SS400)의 경우 탄소 함유량이 적어 열처리가 되지 않는 특성이 있어 원판 그대로 사용되며, 연강이 해당된다. 선박 및 차량 등 다양한 산업 현장에서 사용되고 있으나, 기계 내부의 특정 응력을 받는 재료로는 사용이 불가하며, 기계를 지지해주는 부분에 사용되고 있다.

용접 구조용 압연강재(SM490A)는 용접성이 뛰어나고 균열이 생기지 않는 강재로, 교량 구조물, 선박, 석유 저장소, 각종 용기 등 구조물에 사용되며, 조선 해양 구조물 등에 대량으로 사용되고 있다.

용접 시 금속 재료가 가열, 용융, 용합, 응고, 냉각하는 일련의 복잡한 과정이 국부적으로 단 시간 내에 이루어지기 때문에 잘못된 시공이 이루어질 경우 용접 결함 발생, 이음 성능 저하 등의 문제가 발생한다. 또한 불안정한 용접은 대형 사고로 이어질 수 있기 때문에 완전한 용접 검사를 통해 용접부의 품질 및 안전성을 확보하는 것이 중요하다[1].

본 연구에서는 다양한 산업 현장에서 다수 사용되고

있는 SS400과 SM490A를 필릿 용접을 통해 시험편을 채취하여 한국산업규격(KS)에 따라 경도시험, 매크로 시험, 자분탐상검사를 실시하고자 하며, 이를 통해 용접부의 기계적 안정성을 명확히 파악하여 용접부의 품질 및 안정성을 확인할 수 있는 구체적인 근거를 제시하는데 목적이 있다[3-5].

2. 실험방법

2.1 사용재료 및 실험조건

본 연구에서는 일반구조용 압연 강재인 SS400과 용접 구조용 압연 강재인 SM490A를 필릿 용접하여 시험용 모재(두께 30 mm)로 사용하였으며, Table 1, 2에 각각 화학성분 및 기계적 성질을 나타내었다.

Table 1. Mechanical characteristics of base metal and filler metal

Separation	C	Si	Mn	P	S
SS400 (SS275)	≤0.25	≤0.45	≤1.40	≤0.050	≤0.050
SM490A (SM355A)	≤0.20	≤0.55	≤1.60	≤0.035	≤0.035

Table 2. Chemical compositions of base metal and filler metal

Separation	Yield Strength[MPa]	Tensile Strength[MPa]	Elongation[%]
SS400 (SS275)	≥265	410~550	≥21
SM490A (SM355A)	≥345		≥22

용가재의 경우 현대중합금속에서 생산된 SF-71(∅ 1.4), AWS Spec는 A5.20, AWS-class는 E-71T-1을 사용하였다. 용접부 보호를 위하여 CO₂ (Composition of gas mixture 99.9%) 가스를 사용하였으며 (유량: 20~25 l/min, gas sup size: 10~20 mm), 전류 형태는 역극성(DCRP: Direct Current Reverse Polarity)을 사용하였다. 위빙은 BOTH 이었으며, 팁과 모재와의 간격은 15~25mm 설정하였고 Single, Multi. pass를 사용하였다. 또한 예열 시 최저 예열 온도는 20~50℃을 최대 층간 온도는 MAX. 250℃, 후열 처리 시 온도는 93~104℃, 후열 처리시간은 46시간~50시간으로 하였다[1].

Table 3. Welding procedure

Separation	Content
Joint	<ul style="list-style-type: none"> Type of Joint : See Joint Detail Single : [O], Double : [X] Backing : [O], SS400
Base Metals	<ul style="list-style-type: none"> Mat'l class : SS400+SM490A Qualified thickness : 30mm (Groove) : unlimited (Fillet) : N/A Pipe dia range : N/A
Filler Metals	<ul style="list-style-type: none"> AWS Spec : A5.20 AWS class : E71T-1 Wire Size : $\phi 1.4$ Brand name : SF-71 (Hyundai General Metal Co., Ltd) Consumable insert : N/A
Shielding	<ul style="list-style-type: none"> Flux : Electrode-Flux(class) Brand name : N/A / Gsa(es) Type : CO_2 Composition of gas mixture : 99.9% Flow rate : 20~25 ℓ / min Gas cup size : 10~20mm Other : NONE
Preheat	<ul style="list-style-type: none"> Min. Preheat Temp : 25mm UNDER(20$^{\circ}C$), OVER(50$^{\circ}C$) Mix. Interpass Temp : MAX. 250$^{\circ}C$ Other : NONE
Elec.Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> Current type : DCRP Transfer mode(GMAW) : N/A Other : NONE
Technique	<ul style="list-style-type: none"> String/wave : BOTH single / multi. Pass(PER SIDE) : MULTI single / multi. Elect : SINGLE Electrode spacing Longi : N/A, Lateral : N/A, Angle : N/A Contact tip work distance : 15~25mm Peening : NONE Inter pass cleaning : GRINDNIG AND / OR BRUSHING
Post weld heat treatment	<ul style="list-style-type: none"> PWHT Temp : 93~104$^{\circ}C$ Holding Time : 46~50H

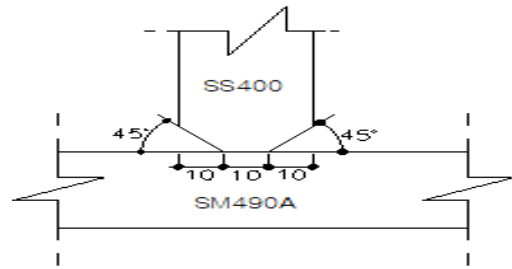


Fig. 1. Joint Detail

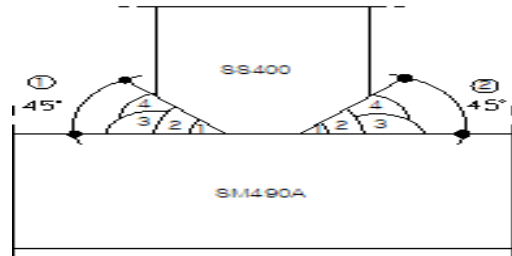


Fig. 2. Flat position(1F & 3F)

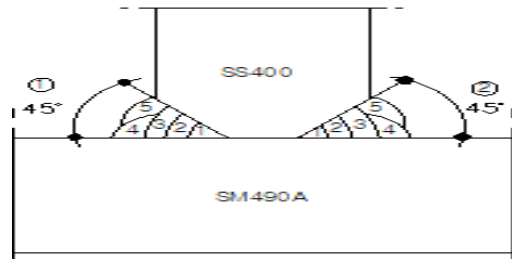


Fig. 3. Horizontal position(2F)

2.2 용접 자세별 형상

일반구조용 압연 강재인 SS400과 용접 구조용 압연 강재인 SM490A을 이용하여 필릿 용접을 하였다. 필릿 용접의 이음 형태는 Figs.1에 나타내었고, 1F, 2F, 3F에 따른 용접 자세별 이음 형상은 Figs. 2~3에 나타내었다. 1F에서는 판 두께 30t(mm)에 루트 간격 6s(mm), 각도는 45°, 뒷 받침대는 SS400(두께 9mm, 길이 75mm)를 이용하였다. 2F에서는 판 두께 25t(mm), 각도는 35°, 뒷 받침대는 SS400(두께 9mm, 길이 75mm)를 이용하였다. 마지막으로 3F에서는 1G와 동일하게 판 두께 25t(mm)에 루트 간격 6s(mm), 각도는 45°, 뒷 받침대는 SS400(두께 9mm, 길이 75mm)를 이용하였다.

2.3 용접부 경도시험

용접부 경도시험은 용접에 의한 경도 분포를 조사하기 위해 136 $^{\circ}$ 인 사각뿔 다이아몬드의 압입자를 사용하여 1~120 kgf의 하중으로 시험편에 압입한다. 이때 생긴 오목 자국의 대각선을 측정하고 미리 계산 되어진 환산표와 비교하여 경도를 표시한다[6-7].

Figs.4의 장비를 활용하여 KS B 0893(용접 열 영향부의 최고 경도 시험방법)에 따른 비커스 경도 시험기를 사용하였으며, 자세별 4개의 시험편을 제작하여 10 kgf의 하중을 가해 실험을 하였다.



Fig. 4. Hardness tester

2.4 매크로 시험

용단 면의 조직을 낮은 배율의 현미경을 이용하여 관찰하는 시험으로 불순물 개입 여부, 조직 균일 정도, lamination 발생 여부 등을 확인하는 것을 목적으로 한다. Figs.5의 장비를 활용하여 KS D 0210(강의 매크로 조직 시험방법)에 따라 조직 시험을 계획하였으며, 시험편을 소재의 용접부 방향으로 설정하여 실험을 하였다 [7].



Fig. 5. Macro test device

2.5 자분탐상검사

자분탐상검사는 결함 등과 같은 불연속 부가 있는 강 자성체를 자화했을 때, 불연속부 가까이의 공간에 자속이 누설하는 것을 검출하여 불연속부의 존재 및 위치를 찾아내는 것을 목적으로 한다.

Figs.6는 자분탐상검사를 하기 위해 반드시 필요한 자화장치, 자분 살포장치, 자외선 조사장치, 탈자장치를 나타내고 있으며, Table 4에는 자분탐상검사 방법을 나타낸 것으로 표면 상태는 용접부, 자화 방법은 연속법 및 극간법을 사용하였고, 자극 간격은 10~15Cm, 자화전류는 L/P 4.5Kg, AC 4.5 Amp, 탈자는 미 실시 하였으며, 자분은 Spraying로 적용하여 검사를 실시하였다.



Fig. 6. Magnetic Particle Testing Equipment

Table 4. Magnetic Particle Examination procedure

Separation	Content
Surface Condition	· AS Welded
Equipment	· Maker : NAWOO · Model : MY-2
Magnetic Particle	· Maker : NAWOO · Color : BLACK · Wet
Magnetization Technique	· Continuous · Yoke
Black Light	· Maker : N/A · Model : N/A · Intensity : N/A
Magnetization Spacing	· 10~15Cm
Magnetization Current	· L/P : 4.5 Kg · AC : 4.5 Amp
Reference Block	· A1-30/100
Demagnetization	· NO
Magnetic Particle Application	· Spraying
Code/Procedure	· AWS D 1.1

3. 실험분석 및 결과

3.1 경도시험 결과

용접부의 경도는 냉각 속도가 동일할 때 합금원소의 양에 따라 달라진다. 용접 경화성에 미치는 합금원소의 영향은 탄소 당량으로 표시되는데 이는 일반적으로 경도가 탄소 당량의 증가에 따라 비례하여 증가하기 때문이며, 통상 비커스 경도가 400 Hv 이상이 되면 균열이 발생될 확률이 높다. 따라서 KS B 0893(용접 열 영향부의 최고 경도 시험방법)에서는 350 Hv 이하로 제한하고 있다[1]. 자세별 경도시험 결과는 Tables 5~7와 같이 나타내었다. 1F 자세에서는 경도시험을 한 결과 SM490A

의 모재부에서는 159~161, 열 영향부에서는 232~235, SS400의 모재부에서는 152~154, 열 영향부에서는 184~186, 용착 금속부에서는 197~198의 결과가 나타났다. 2F 자세에서 용접한 부분에 대해 경도시험을 한 결과 SM490A의 모재부에서는 154~157, 열 영향부에서는 172~173, SS400의 모재부에서는 151~154, 열 영향부에서는 234~237, 용착 금속부에서는 189~195의 결과가 나타났다. 3F 자세에서 용접한 부분에 대하여 경도시험을 한 결과 SM490A의 모재부에서는 157~160, 열 영향부에서는 221~230, SS400의 모재부에서는 152~155, 열 영향부에서는 193~198, 용착 금속부에서는 211~214의 결과가 나타났다. 이는 모두 KS B 0893의 규격치인 350Hv보다 낮은 값으로 모든 자세에서 용접한 시료의 경도가 양호한 것으로 판단된다.

Table 5. Hardness test results(1F)

Position	SM490A								
	Base metal			HAZ					
	1	2	3	1	2	3			
Result	161	160	159	232	232	235			
Position	Weld Metal			SS400					
				Base metal			HAZ		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Result	197	198	198	186	186	184	156	152	154

Table 6. Hardness test results(2F)

Position	SM490A								
	Base metal			HAZ					
	1	2	3	1	2	3			
Result	157	157	154	172	173	173			
Position	Weld Metal			SS400					
				Base metal			HAZ		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Result	192	189	195	236	234	237	154	153	151

Table 7. Hardness test results(3F)

Position	SM490A								
	Base metal			HAZ					
	1	2	3	1	2	3			
Result	157	160	158	221	225	230			
Position	Weld Metal			SS400					
				Base metal			HAZ		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Result	211	214	212	198	196	193	155	152	152

3.2 매크로 시험 결과

Figs. 7~9는 매크로 조직 시험 결과를 나타낸 것이다. 매크로 조직 시험은 강재의 단면에 불순물의 개입 여부, 조직 균일의 정도를 육안으로 관찰하는 것이다. 시험 결과 용접부 전 단면에 걸쳐 개재물 등의 불순물이 발견되지 않아 lamination 등의 우려가 없고, 판 두께 방향으로 균질한 조직 상태를 나타낸 것을 확인할 수 있었다.

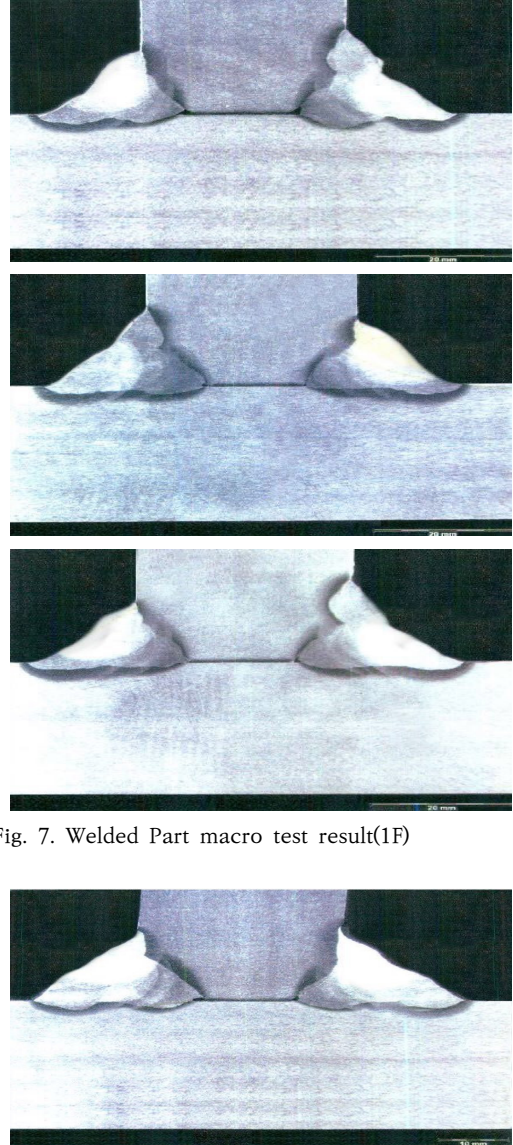


Fig. 7. Welded Part macro test result(1F)

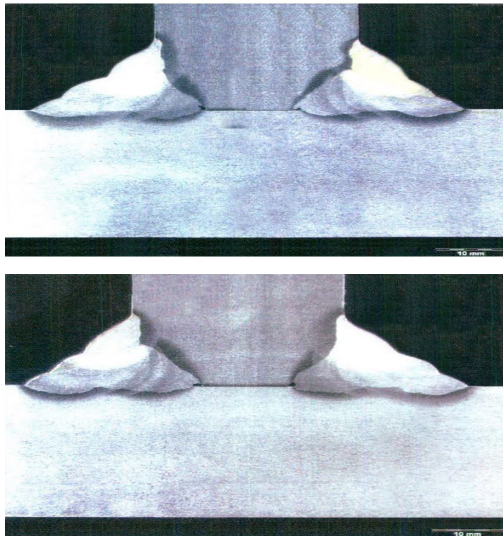


Fig. 8. Welded Part macro test result(2F)

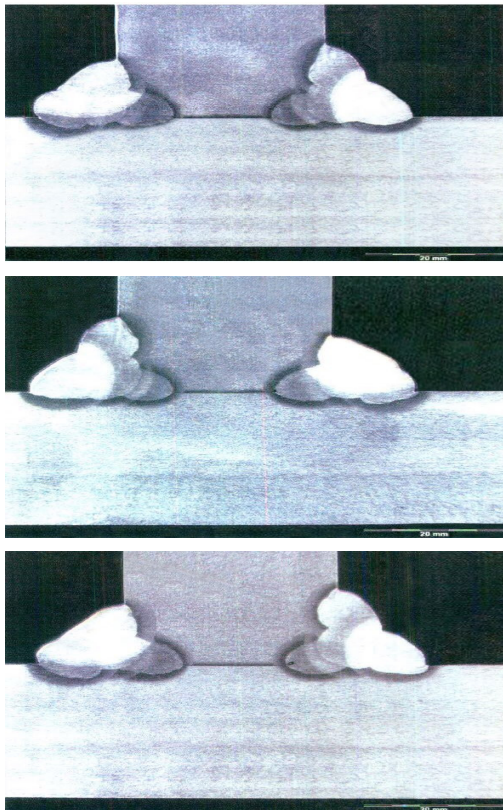


Fig. 9. Welded Part macro test result(3F)

3.3 자분탐상검사 결과

자분탐상검사 결과 정밀한 결과를 얻기 위해 탐상면을

서로 직각으로 2이상의 방향에서 자화하였고, 재료 및 구조물에 사용되는 철 재료 등에 결함이나 구멍이나 흠 또는 파인 부분들에서 나타나는 노치(notch)가 발생하지 않아, 이는 응력의 감소를 나타내는 것으로 용접부에 대한 영향 및 별도의 결함은 나타나지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 SS400과 SM490A를 필릿 용접을 통해 시험편을 채취하여 한국산업규격(KS)에 따라 경도시험, 매크로 시험, 자분탐상검사를 실시하고자 하며, 이를 통해 용접부의 기계적 안정성을 명확히 파악하여 용접부의 품질 및 안정성을 확인하고자 하였으며, 도출된 결과는 다음과 같다.

1. 경도시험 결과 모든 시험 시료의 모재부, 열 영향부, 용착 금속부 경도가 KS B 0893의 규격치인 350 Hv보다 낮아 양호한 것으로 확인되었다. 이를 통해 용접 후 경도에 용접 자세 및 부위가 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.
2. 매크로 시험 결과 용접부 형상별로 균일한 조직 상태를 나타냈으며, 용접부 전 단면에 걸쳐 개재물 등의 불순물이 전혀 발견되지 않았다. 따라서 모든 용접 자세에서 용접 후 lamination 등의 하자 우려가 발생되지 않는 것으로 사료된다.
3. 자분탐상검사 결과 노치(notch)가 발생하지 않았고, 용접부의 결함이 발생되지 않은 것으로 보아 안정성이 있는 것으로 판단된다.

References

- [1] B. J. Cho, S. J. Lee, "Evaluation of Mechanical Test Characteristics according to Welding Position in FCAW Heterojunction", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.20, No.8, pp.649-656, 2019
DOI: <http://doi.org/10.5962/KAIS.2019.20.8.649>
- [2] J. H. Koh, J. H. Kook, "A Study on the Effect of Heat Input on the Microstructure and Toughness of Weldments Made by Domestic Flux Cored Wires", *Journal of the Korean Welding society*, Vol.11, No.4, pp.57-69, 1993.
- [3] B. H. Kim, W. I. Kim, C. Choi, Y. H. Park, "Study of

Weld Part Status Change by CO_2 Welding According to the Variation of Gas Composition and Welding Wire on SS400 Material”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol.11, No.5, pp.129-136, 2012.

- [4] B. C. Goo, “Fatigue of SS490A and SS400 Corroded Specimens”, *Journal of Korean Railway Association*, Vol.12, No.5, pp.725-731, 2009.
- [5] J. Y. Kim, S. S. Kang, G. Y. Kim, S. C. Park, C. K. Kim, “Research on Fafigue Life Prediction of Muffler with Weld-zone Shape”, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.36, No.1, pp.85-93, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.1.85>
- [6] D. H. Kim, D. Y. Kim, K. T. Lee, H. Y. Kim, “Strength Analysis of MIG Welding Specimen Considering Weld Characteristics”, Conference on the Sector of the Korean Society of Automotive Engineers, Ilsan, Korea, pp. 1195-1201, 2012. 5.
- [7] J. U. Park, “Computational Modelling to Predict the Welding Deformation in Steel Structures”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.8, No.1, pp.96-102, 2007

조 병 준(Byung-Jun Cho) [정회원]



- 2010년 2월 : 충주대학교 산업대학원 에너지시스템 공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 한국교통대학교 일반대학원 안전공학과 (박사수료)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 안전공학과 외래교수
- 2005년 3월 ~ 현재 : 한국폴리텍대학 충주캠퍼스 산업설비과 교수
- 2019년 1월 ~ 현재 : 한국폴리텍대학 신기술교육원 교수

<관심분야>

용접, 접합, 비파괴 분야

이 성 준(Soung-Jun Lee) [정회원]



- 2018년 2월 : 한국교통대학교 글로벌융합대학원 안전공학과(공학석사)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 호서대학교 일반대학원 안전공학과(박사과정)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 한국산업인력공단 출제 및 검토위원(용접분야)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 시흥도시공사 환경교통사업본부 주임

<관심분야>

이종용접, 비파괴 분야

임 중 국(Byung-Jun Cho) [정회원]



- 1987년 8월 : 충북대학교 일반대학원 재료공학과(공학석사)
- 1994년 2월 : 충북대학교 일반대학원 재료공학과(공학박사)
- 1997년 1월 ~ 현재 : 한국교통대학교 안전공학과 교수
- 2016년 3월 ~ 2015년 8월 : 한국교통대학교 공학교육혁신센터장
- 2016년 3월 ~ 2018년 2월 : 한국교통대학교 교수회장

<관심분야>

재료공학, 비파괴 분야