

스테인리스강 프로펠러축의 가공에 따른 재질특성에 관한 연구

Properties of the material on stainless steel propeller shaft with the weld working

손영태^{†*}, 정광교^{*}, 이명훈^{**}

Yeong-Tae Son^{†*}, Kwang-Gyo Choung^{*}, Myeong-Hoon Lee^{**}

ABSTRACT

Stainless steel 304 or stainless steel 630 types using propeller shaft of a small ship or a FRP fishing boat generally restrain localization corrosion and abrasion damage occurrence to shaft bearing or grand packing contact. In general, the residual stress which remains after welding or heat treatment in material can cause the stress concentration or localization corrosion. In case of small ship, stainless steel such as STS304 has long been used for propeller shaft. Meanwhile, crew of small ship tend to reuse damaged propeller shaft after repair by welding and performing heat treatment to save cost. However, it was found that reused propeller shaft by repair often caused troubles in ship's operation.

In this study, the basic guideline for maintenance and treatment of propeller shaft are investigated. From the results of investigation, remarkable deterioration of the material properties and corrosion resistance on the welded work part was observed.

※ **Keywords** : Propeller shaft(프로펠러축), heat treatment(열처리), Material properties(금속 특성), localization corrosion(국부부식), abrasion damage(마모손상), Corrosion resistance(부식저항)

* 선박안전기술공단 기술연구팀

** 한국해양대학교 기관시스템공학부

† 논문 주저자

1. 서 론

FRP 어선 등 소형선박의 스테인리스강 프로펠러축의 재료로는 대부분 STS 304를 사용하고 있다. 그러나 이것은 해수환경중 사용조건에 따라 부분적으로 극심한 부식이나 마모 등의 손상이 발생할 수 있다. 만약, 이와 같은 상태의 프로펠러축을 용접이나 열처리 방법 등에 의해 그 손상부위만을 육성가공할 경우(일반적으로 어떤 재료에 부분적으로 용접이나 열응력을 가하여 가공하게 되는 경우)에는 그 재료의 종류 및 가공 방법 등의 조건에 따라서 가공부위에 잔류 응력(Residual stress)이 존재하게 된다. 이러한 프로펠러축을 그대로 선박에 장착하여 사용할 시에는 하중응력이나 노출 환경 등의 조건에 따라 응력 집중(Stress Concentration)이나 국부부식(Localized Corrosion) 등의 원인 작용으로 인하여 프로펠러축에 손상이 발생할 수 있으며 이에 따라 선박 및 인명 안전 문제가 유발할 것으로 추정되고 있다.

또한, 현장에서 가장 많이 사용되어지고 있는 해수 유힐 방식의 제2종 프로펠러축인 STS 304 재를 장시간 사용할 시에는 베어링(Bearing)이나 그랜드 패킹(Gland Packing)의 접촉부 등에서 축의 마모 및 부식 손상이 발생되어 선체진동이나 누수 등의 문제가 심해지게 된다. 이때 경우에 따라 선박 외부 또는 자체에서 가해지는 응력이나 충격 등의 영향으로 인해 절손되는 사례는 물론 운전 중 절손 될 수 있는 가능성이 높아서 선박 운 영자들의 안전운항이 우려되고 있다.

현재 선박기관기준 제6조 제2항에서는 '선박의 추진을 위한 동력을 전달하는 축, 축 커플링 및 기어는 용접수리를 하여서는 아니 된다. 다만, 수리

개소나 수리방법 등에 대하여 해양수산부장관이 인정하는 경우에는 그러하지 아니한다.' 라고 규정하고 있으나 위의 단서조항을 만족하는 수리개소나 수리방법에 대하여 해양수산부장관이 인정한 바가 명확하지 않은 상황에서 프로펠러축의 마모나 부식 등의 손상 정도에 따라 그 부위만을 부분적으로 육성가공하여 사용할 경우 발생하는 현상들을 분석하고 연구결과에 따라 단서조항에 대한 적정기준을 제시하고자 하는 것은 선박 안전지도 등의 측면에서도 중요한 의미를 갖는다.

따라서, 육성가공에 따른 축의 강도나 내식 등의 재질특성변화를 조직적인 관점에서 분석하여 위의 기준을 증명할 수 있는 근거를 마련함은 물론 연구결과를 통하여 단서조항에 대한 범위를 명확히 정립함으로써 프로펠러축 검사와 관련한 세부적인 기본 자료를 제시하는 것은 중요한 과제라고 사료된다.

또한 소형 낚시전용 어선에서 주로 사용되어지고 있는 STS 630프로펠러축의 경우에는 선박기관기준 제65조 제1호(총 톤수 20톤 이상의 경우는 제59조 제1항 적용)에 근거하여 제2종축의 형태로 구분됨에도 불구하고 기준상에 석출경화계의 스테인리스강이라는 이유로 인해 제1종축으로 인정-분류되어지고 있다. 그러나, STS 630의 경우 우리 공단의 2006년도 자체 연구사업인 「2종 스테인리스강축 방식용 AI계 경량합금재의 실용화 방안 연구」결과에 의하면, 스테인리스강의 내식특성이 STS 316 > STS 304 > STS 630 순으로 양호하였고, 실제 신품축을 설치하여 사용 중 단시간에 절손되는 경우도 발생되고 있는 실정이다. 실례로서 선박의 엔진출력을 높이는 과정에서 프로펠러축의 직경이 기준에 미달되는 경우에는 선

미 쪽(stern tube)의 구조를 변경하기보다는 그보다 손쉬운 STS 630을 사용하여 프로펠러축의 허용 직경을 경감하는 경우가 있다.(예, 약 3톤 선박, 197PS × 2200rpm, 감속비가 2.06:1일 경우에 프로펠러축 지름의 규정치는 STS 304를 사용할 경우에는 49mm 이상, STS 630을 사용할 경우에는 39mm 이상이면 만족하므로 약 20%이상을 감소할 수 있다.)

한편, 현장에서는 STS 630의 경우 강도가 커서 축의 중심선을 조정하기가 어렵기 때문에 부득이 축신(환봉)에 국부적인 열을 가해 축의 중심선을 조정하고 있는 실정이다. 이상과 같은 경우가 복합적으로 얽혀서 STS 630이 실질적으로는 강도가 큰 재료임에도 불구하고 축 절손 사고가 많이 발생하고 있는 것으로 추정되고 있다. 이것은 향후 대형안전사고의 위험을 배제할 수 없는 상황이므로 이에 대한 근거 자료도 제시하는 것이 필요하다. 즉, 이와 같이 해수중에 내식성이 취약하며 가공단계에서부터 열이 가해진 STS 630 프로펠러축이 정상적인 축재료와 비교하여 그 강도나 내식성 등에 미치는 영향이 어떠한지를 검토하는 것은 1종프로펠러 축으로써의 유효성 검증을 통한 신뢰성의 정립과 더불어 운항선박의 해양안전을 확보하는데 있어서 중요한 과제로 사료된다.

STS 304 프로펠러축의 육성가공 및 STS 630 프로펠러축의 열가공에 따른 강도 및 내식성 등의 재질특성변화 등을 조사 분석하여 선박기관기준 제8조 제2항에서 규정하고 있는 ‘용접수리 불가’에 대한 근거자료 제시(동조동항의 단서조항에 대해서는 일반적으로 알려진 스테인리스강의 용접에 대한 적정방법 이외에 연구결과를 바탕으로 적정 기준을 제시할 수 있는지에 대한 부분도 동시

에 검토 하고자 함)는 물론, 선박기관기준 제65조 제1호(총 톤수 20톤 이상의 경우는 제59조 제1항 적용)에서 규정하고 있는 석출경화계 스테인리스강의 제1종축으로써의 인정여부에 대한 적정 유효성을 제시하여 프로펠러축의 가공(육성·열)과정에 필요한 기본 방향을 제시하고자 하였다.

또한 본 연구과제는 스테인리스강의 환봉에 대한 가공(육성·열) 특성을 살펴봄으로써 기존에 이미 발표된 판 형태의 스테인리스강 용접에 대한 연구와는 다소 구별되는 과제일 뿐만 아니라 단순한 스테인리스강의 용접특징을 나타낸 실험들과는 다르게 스테인리스강 프로펠러축에 대한 특징들을 분석하고 평가함으로써 현장중심의 연구가 될 수 있도록 하였다.

2. 시험 방법

2.1 시험재의 선정 및 규격 등

본 연구과제의 시험재로 사용된 스테인리스강 환봉의 가공 등에 대한 절차나 가공에 따른 시험편 제작에 있어서 명확하게 규정화 된 것이 없으며 용접 등의 가공에 따른 시험편 채취 및 시험에 관한 방법의 기준 등이 서로 상이한 관계로 본 연구과제의 실험에서 이루어진 가공방법 등의 절차나 시험편 제작은 ‘KS 규격’, 선급에서 규정하고 있는 절차 및 ISO 등의 관련기준을 인용하여 시행하고자 하였으며 이에 준한 시험을 함으로써 시험 방법 및 결과에 대한 근거를 명확히 하는 등 신뢰성을 높이고자 하였다.

본 시험에 사용된 시험재료는 현장선박에서 사용 중인 직경 100 \emptyset 및 70 \emptyset 의 STS 304 중고축

과 직경 75 ϕ 의 STS 630 중고축 및 신축 직경 25 ϕ 의 STS 304, 630을 시험재로 선정하였다. Fig. 1은 시험에 사용된 재료의 종류 및 규격을 나타낸 것으로 STS 304 중고축의 경우 근해채낚기 어선(포항 근해)에서 10년 정도 사용된 100 ϕ × 3,000L(mm)인 것과 어장관리선(여수)에서 6년 정도 사용된 70 ϕ × 3,150L(mm)인 축을 추출하여 사용하였다. 그리고, STS 630 중고축은 낚시어선(여수)에서 5년 정도 사용된 75 ϕ × 3,050L(mm)인 것을 추출하여 사용하였으며, 추가로 중고축이 아닌 신축 STS 304와 STS 630 모두 25 ϕ × 200L(mm)을 사용하였으며 각각 길이방향으로 200mm 절단한 시험재를 사용하였다.

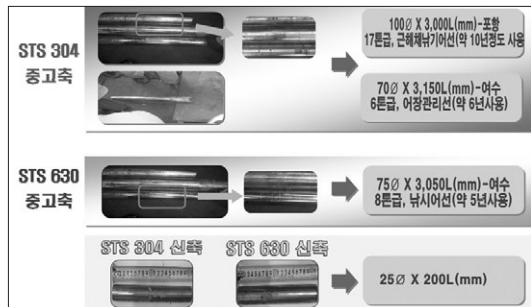


Fig. 1. 시험에 사용된 재료의 종류 및 규격

2.2 시험종류별 시험편 제작

Fig. 2는 시험재의 제작과정을 나타낸 것으로서, 각 시험재를 길이방향으로 200mm씩 절단하고 시험재 종류별 전체육성 및 반육성 가공을 위해 그림과 같은 조건으로 시험재를 임의 마모하였으며, STS 308을 용접금속으로 하여 MIG, CO₂ 및 수동피복아크(Shield arc) 용접법으로 시험재를 육성가공 하였다. 육성가공은 길이방향으로

60mm를 라운드 형태로 가운데 부분은 오목하게 절단하였고, 길이 방향으로는 20mm로 절단 하였다. 반육성 가공은 길이방향으로 45mm를 라운드 형태로 가운데 부분은 오목하게 절단하였고, 길이 방향으로는 12mm로 절단하였다. 이때, 가운데 라운드 형태의 오목한 부분은 45° 각도로 절단하였다. 스테인리스강 축인 STS 304 시험재에 사용 된 용접 봉인 STS 308의 경우, 인장강도는 53kgf/mm², 연신율은 40%이상, 경도는 187HB인 것을 사용하였다. 그리고, 각각의 시험재에서 인장시험편, 충격(U노치) 시험편, 조직관찰 시험편, 전기화학적 분석시험용 시험편을 각각 채취하였다.

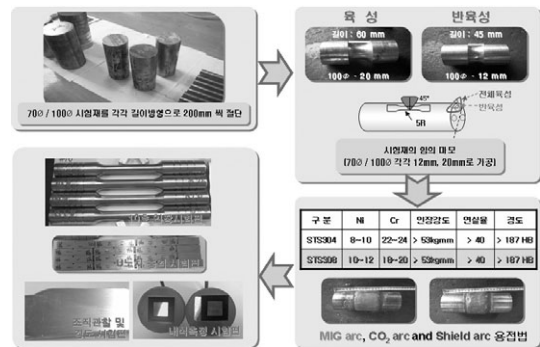


Fig. 2. 각종 시험편 제작과정

그리고, 제작된 시험재에 대해 각종 분석 및 평가를 실시하기 위하여 Fig. 3, Fig. 4와 같이 육

Table 1. 각 지역에 따른 육성가공 방법의 구분

지역 \ 구분	반육성	육 성	용접방법
부산(B), STS 304	1, 2, 3, 13	5, 6	MIG 용접
포항(P), STS 304	8, 10	7, 9	CO ₂ 용접
통영(T), STS 304	4, 15	11, 12	수동피복 아크 용접
부산(B), STS 630	14, 16, 17, 18	-	MIG 용접

성, 및 반육성 용접을 실시하였다. Table 1은 포항, 통영, 부산 지역별 용접 방법을 나타내었다.

구분		외관 (STS 304 : ø 100, L : 200)	구분	외관 (STS 304 : ø 70, L : 200)
MIG 용접	반육성 (12mm, No : 3, 13)		반육성 (12mm, No : 1, 2)	
	육성 (20mm, No : 5)		육성 (20mm, No : 6)	
CO ₂ 용접 (1.6mm 와이어 사용)	반육성 (12mm, No : 10)		반육성 (12mm, No : 8)	
	육성 (20mm, No : 9)		육성 (20mm, No : 7)	
수동피복 아크용접 (스테인리스강용 피복 아크용접봉 사용)	반육성 (12mm, No : 15)		반육성 (12mm, No : 4)	
	육성 (20mm, No : 11)		육성 (20mm, No : 12)	

Fig. 3. 육성 및 반육성 시험재 제작(STS 304)

구분		외관 (STS 630 : ø 75, L : 200)	구분	외관 (STS 304 : ø 25, L : 200)	열처리 유무
MIG 용접법	반육성 (12mm, No : 14)		용접(X)		X
	반육성 (12mm, No : 16)		구분	정면 (STS 630 : ø 25, L : 200)	
	반육성 (12mm, No : 17)		용접(X)		X
	반육성 (12mm, No : 18)		용접(X)		0

Fig. 4. 열 가공 및 반육성 시험재 제작(STS 630)

2.3 시험 내용

가. 비파괴 검사

이상의 시험재를 시험편으로 제작하기 전 초음파탐상시험(Ultrasonic Testing : UT)을 실시하였으며, 또한 시험편으로 제작 후의 상태를 관찰하기 위해 액체침투탐상시험(Liquid Penetrant Test : PT)을 실시하였다. 이러한 비파괴 검사를 통하여 시험 소재에 대한 내부 및 표면 상태를 살펴봄으로써 원 소재 및 용접으로 인하여 발생될

수 있는 결함 등에 대하여 나타내고자 하였으며 특히, 이번 실험에서 시험재에 대한 초음파탐상시험은 Fig. 5와 같이 각 시계방향의 끝단 부분에서 원 중심 방향을 향해 최소 3번 정도 육성부분위치에 UT-Check를 하여 그 평균값을 나타내어 결함과 비결함 유무를 판단하였다. 즉, 원방향의 12등분을 구분하여 각각의 방향에서 측정된 피크를 연결하면 결함정도를 측정할 수 있다.

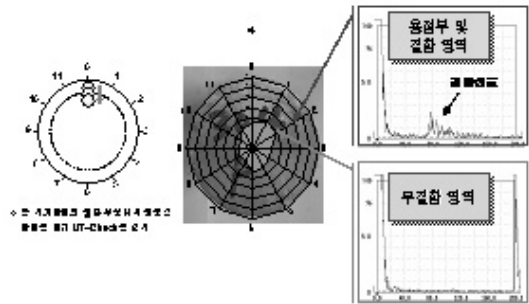


Fig. 5. 초음파 탐상에 의한 용접부 및 결함영역 측정

나. 가공부유별 비교 조직 관찰

표본에 빛을 비추어 그 표본을 통과한 빛이 대물렌즈에 의해 확대된 실상을 맺고 이것을 접안렌즈를 통해 재확대된 상을 관찰할 수 있도록 고안된 광학 현미경을 이용, 각 부위별 조직을 관찰하였다. 이를 위해 시험편을 경면연마 한 후 에칭처리 하였으며 모재부, 열영향부, 용접부 등의 조직을 $\times 40 \sim \times 1200$ 의 배율로 조직사진 촬영을 하였다. Fig. 6은 고배율 광학 현미경을 나타낸 것으로서, 용접 부 및 파단면의 관찰과 금속 조직의 상태를 분석을 할 수 있다.

다. 인장시험

육성·반육성된 시험재를 길이방향으로 절단하



Fig. 6. Sometech社 고배율 광학 현미경 (Model : Icamscope, SV-35)

여 인장시편을 제작하고 인장시험기에서 서서히 인장하중을 가하여 재료의 항복점·내력(耐力)·인장강도·신장(伸長)·드로잉(drawing) 등 기계적인 여러 성질을 측정하였다. Fig. 7은 인장 시험기 및 인장시험편을 나타낸 것으로서 인장시험은 앞에서 언급한 바와 같이 인장시험 기준(KS D 3706)에 따라 인장시험편 KS B 0810의 10호 시험편을 사용하여 인스트롱 실험을 실시하였다.

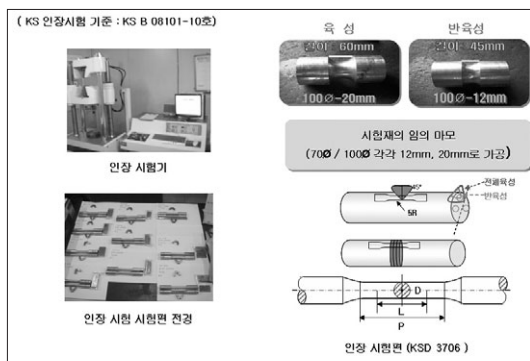


Fig. 7. 인장시험기 및 인장시험편

라. 충격시험

동일 재료라고 하더라도 외적조건에 따른 인성의 변화, 예를 들면, 열처리에 의한 금속조직의 변

화, 사용온도의 변화, 결함이 있는 경우 등에 대한 인성의 차이를 조사하기 위해서는 충격실험이 필요하다. 또, 두 재료의 인장시험 결과가 비슷하지만 열처리한 시편과 비교하여 충격시험을 하게 되면 특히 큰 차이가 발견될 수도 있다. 이를 위해 충격 굽힘 시험에 사용되는 시험편(試驗片)을 10×10×55mm로 제작하였고, 중앙에 U자형의 노치를 두었다. 이것을 수평으로 놓고 노치의 반대쪽을 시험기의 해머로 두들겨 절단하는 데 소요된 에너지를, 최초로 해머를 들어 올린 각과 절단 후의 치켜 올린 각에서 계산하여 노치부의 최소 면적으로 나눈 값으로 충격값을 측정 하였다. Fig. 8은 충격 시험기 및 충격 시험편을 나타낸 것으로서 충격시험편은 규격에 맞게 가운데 부분에 U노치를 두었다.

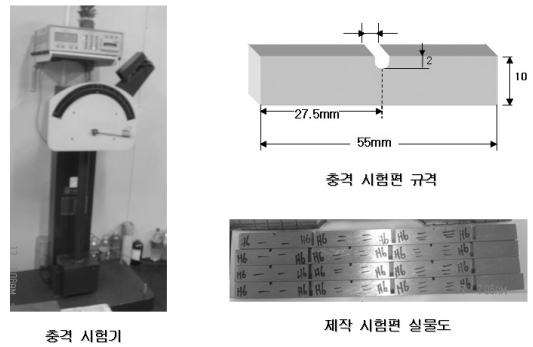
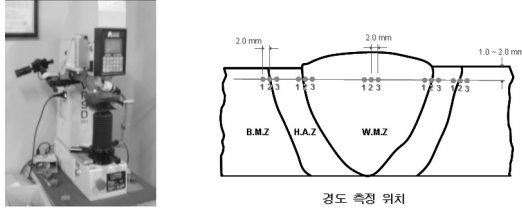


Fig. 8. 충격 시험기 및 충격 시험편

마. 경도시험

대면각 136°의 정사각뿔 다이아몬드 압자(壓子)를 재료 표면에 살짝 눌러 흔적(靨 자국)을 만들고, 하중을 뺀 뒤에 남겨진 영구적인 흔적의 대각 선길이에에서 걸넓이를 산출하여 하중을 넓이로 나눈 몫으로 측정을 한다. Fig. 9는 비커스 경도기 및 경도 측정 위치를 나타낸 것이다. B,M,Z(모재

부), H.A.Z(열영향부), W.M.Z(용접부)에 각각 3개의 점에 경도를 측정하여 평균값으로 환산하여 나타냈다.



비커스 경도기
Fig. 9. 비커스 경도기 및 경도 측정 위치

바. 부식시험

분극측정용 Potentio-stat는 미국 Gamry Instrument사의 CMS 100 종합 부식시스템을 사용하였고 분극전지(Polarization cell)는 시험편인 작동전극(Working Electrode)과 백금 대전극(Counter Electrode)이 서로 양극과 음극이 되고 염화은 기준전극(Ag/AgCl, SSCE)이 연결되는 3전극계로 구성되어 있다. 이때의 주사속도(Scan Rate)는 1mV/sec로 측정하였다. Fig. 10은 전기화학적 CMS 100 종합 부식시스템을 나타낸 것이다.

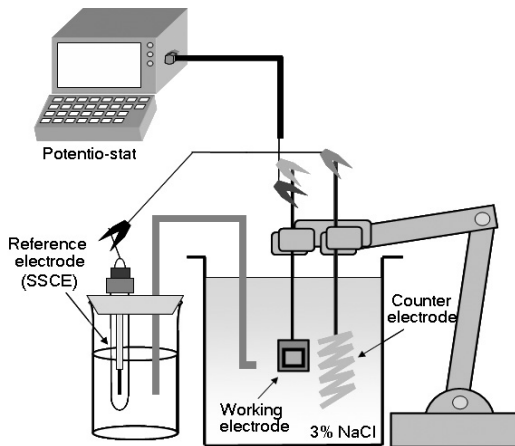


Fig. 10. 전기화학적 CMS 100 종합 부식시스템

사. 저인장 응력 부식시험

인장용 시험편을 천연해수용액셀(cell)에 침지하여 관통시킨 후 재료만능 시험기(instron limited high Wycombe)에 고정시켰다. 그리고 시험편과 Hioki 자연전위 측정기를 연결하여 변형시의 자연전위를 측정하였다. Fig. 11은 저변형인장시험기(Slow Strain Rate Test : SSRT)를 나타내고 있다.

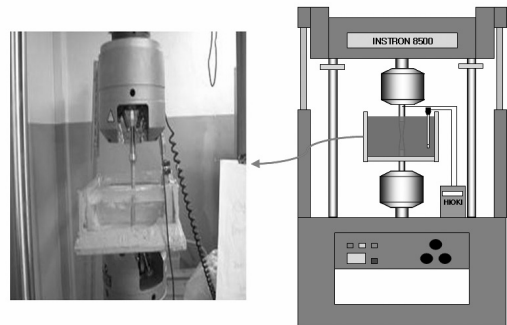


Fig. 11. 저변형인장시험기(Slow Strain Rate Test : SSRT)

3. 시험 결과

3.1 가공종류에 따른 조직관찰 결과

가. STS 304의 가공종류별 조직관찰

용접에서 용접 비이드 형상은 비이드면과 용접 비이드 단면을 나타낼 수 있다. 조직사진으로부터 표면 불규칙, 스패터(Spatter), 열간균열, 기공 등과 같은 육안 결함을 알아볼 수 있으며, 용접 비이드 절단면은 용접 선간의 폭을 측정함으로써 비이드 침투 또는 용접 깊이 비이드 높이(Crown height) 및 용접 비이드 전체 면적 등을 나타낸다. 이러한 모든 인자들은 횡단면으로부터 정해지며, 부적당한 절단은 용접깊이 및 비이드 면적을 측정하는데 과오를 범한다. 용접부에서 용해 금속은 열영향부

의 부분적으로 용해된 결정입자(Grain)로부터 방향성을 가지고 성장하여 응고된다. 셀(Cell)과 수지상(Dendrite)은 열영향부 입자로부터 용지(Well pool)내로 선택적 결정방향으로 다발(Packet)형상으로 성장한다.

Fig. 12는 용접(Fusion weld)부 비이드(Bead) 형상을 나타낸 것으로서 용접부의 끝단과 끝단을 잇는 부분을 비이드 면이라고 한다. 이러한 용접부는 열영향부, 토우 비이드 면, 경계면, 기지 등으로 나눌 수 있다

Fig. 13은 STS304의 가공종류별 조직관찰 사진을 나타내고 있다. MIG, 수동피복아크(Shield arc), CO₂로 용접한 경우 기지 금속(Matrix metal)은 입계상의 오스테나이트(Austenite), 페라이트(Ferrite)조직을 나타내고 있고, 기지와 경화조직과의 경계를 이루는 부분, 용접선(Interface between hardened zone and matrix)은 부분적으로 변화가 일어나 조질화된 영역이다. 그리고 가운데 용접부는 결정립이 미세화 되면서, 미세침상(Acicular) 펄라이트(Perlite)조직을 나타내고 있다.

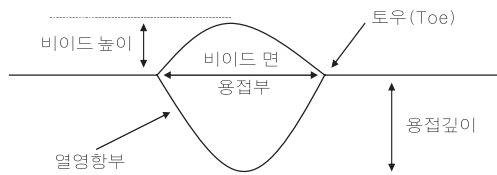


Fig. 12. 용접(Fusion weld)부 비이드(Bead)

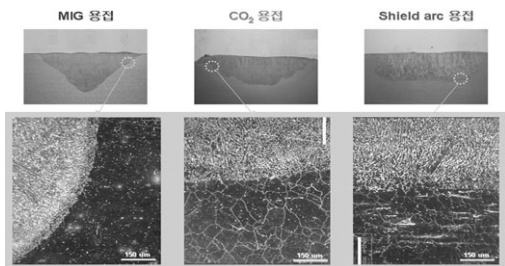


Fig. 13. STS 304의 가공종류별 조직관찰 사진

나. STS 630의 가공종류별 조직관찰

Fig. 14는 STS 630의 MIG용접가공 시험편의 조직관찰 사진을 나타낸 것이다. 일반적으로 STS 630 재질의 축은 STS 304재질의 경우처럼 용접에 의해 육성가공하는 경우는 거의 드물다. 그러나 여기서는 STS630 재질을 용접육성가공 하였을 때 그 조건이 어떻게 변화하는 지를 관찰한 것이다. 즉, MIG용접한 시험편으로서 모재와 용접부 사이에는 열영향부인 HAZ부가 존재하고, 모재부(BMZ)와 용접부(WMZ) 사이에는 뚜렷한 경계부분이 보인다.

STS 630은 석출경화계로서 표면의 기지(Matrix)는 마르텐사이트(Martensite)조직으로 보여지고, 어두운 부분에서 일부 흰 부분은 석출경화된 조직으로 판단된다. 용접부 또한 조직의 큰 변화가 없으나 밝은 흰색계열로 조직이 나타났다.

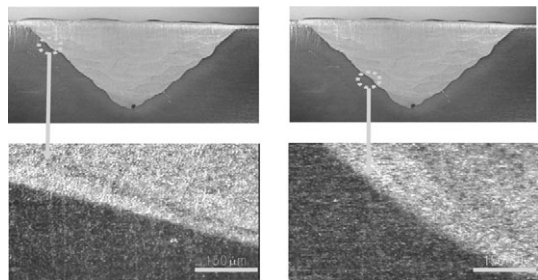


Fig. 14. STS 630의 MIG용접가공 시험편의 조직관찰 사진

3.2 가공종류에 따른 인장시험 결과

가. STS 304의 가공종류별 인장시험

Fig. 15는 STS 304 시험편의 각 종류별 인장강도를 나타내고 있다. KS 기준 인장 응력값은 520N/mm²이지만, 모든 시험편이 기준값에 미달되는 값을 나타내었다. 부산에서 MIG 용접한 시험편과 통영에서 수동피복아크 용접한 인장 응력

값은 비슷하게 나타났지만, 포항에서 CO₂한 시험편은 다소 낮은 값을 나타내었다. Fig. 16은 STS 304 시험편의 각 종류의 항복응력값을 나타낸 그래프이다. 항복 응력값은 인장강도 값과 달리 KS 기준(205N/mm²)에 비해서 모두 높게 나타났다. Fig. 17은 STS 304 시험편의 각 종류별 연신율을 나타내는 것으로서, KS 기준(40%)과 비교해서 기준치에 미달하는 시험편과 기준을 넘는 시험편이 다양하게 포함되어 있다.

따라서 가공종류에 따른 인장시험 한 시험편에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다. Fig. 15~Fig. 17은 각각 인장강도, 항복강도 및 연신율 측정시험 결과의 평균값을 나타낸 그래프이며 항복강도 값은 기준치 이상이었으나 인장강도 및 연신율은 KS 기준치에 미달되었다. 여기서 특히 CO₂ 육성 용접 한 경우에는 MIG나 수동피복 아크 용접한 경우보다 최대인장강도나 항복강도가 상대적으로 낮은 경향을 나타내고 있었다. 이와 같은 이유는 용접방법에 따라 다소 차이는 있을수 있으나 용접 가공에 의한 열영향부 내의 조직변화 및 용접 후 냉각 시 용착금속 수축으로 인해 발생하게 된 잔류응력의 영향이라고 생각된다. 이상의 인장시험

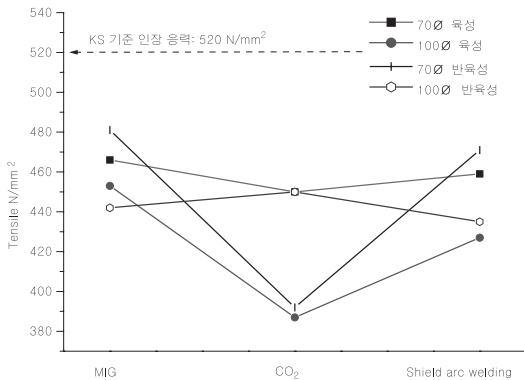


Fig. 15. STS 304 시험편의 각 종류별 인장강도

결과는 STS 304 비육성가공한 중고품(70Ø-평균 624.71N/mm²)의 결과보다 낮게 나타났으며 최고 40.9%까지 낮은 결과를 보이고 있다.

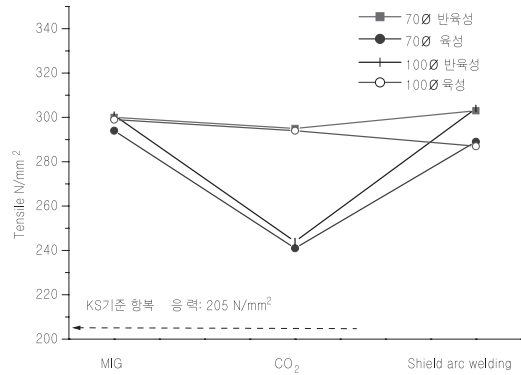


Fig. 16. STS 304 시험편의 각 종류별 항복응력

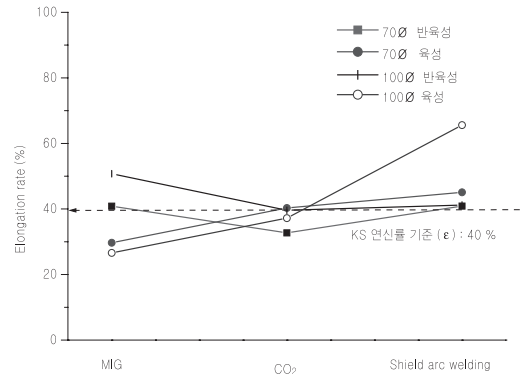


Fig. 17. STS 304 시험편의 각 종류별 연신율

나. STS 630의 가공종류별 인장시험

STS 630은 육성가공하여 일반적으로 사용되지는 않지만, 이번 연구과제에서는 육성가공 된 STS 630시험편에 대한 인장특성을 추가하여 시험하였으며 인장강도 및 연신율은 Fig. 18~Fig. 19와 같이 나타났고, KS기준인 인장강도 930N/mm², 연신율 16%에 모두 도달하지 않는 특성을 보이고 있다. 이것으로 미루어 보아 STS 630의 시험재에

취해진 반육성가공은 재료의 원래적 특성을 저하시키는 원인으로 작용하며 이러한 이유는 재료의 내부에 잔류응력이 존재하기 때문인 것으로 사료되며 STS 630 비 반육성 가공한 중고품(75 ϕ -평균 869.38N/mm²)의 결과보다 낮게 나타났으며, 최고 54.2%까지 낮은 결과를 보이고 있다. 이와 같은 이유도 위에서 언급한 것과 마찬가지로 내부의 잔류응력과 용접방법의 차이 때문이라고 사료된다.

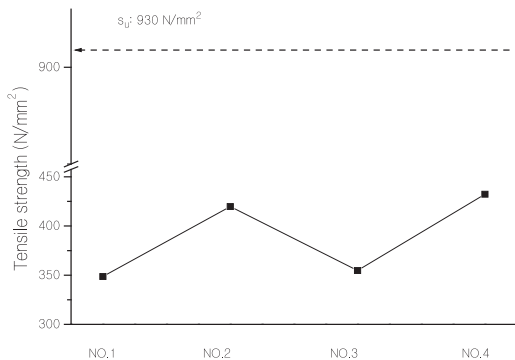


Fig. 18. STS 630 시험편의 인장강도

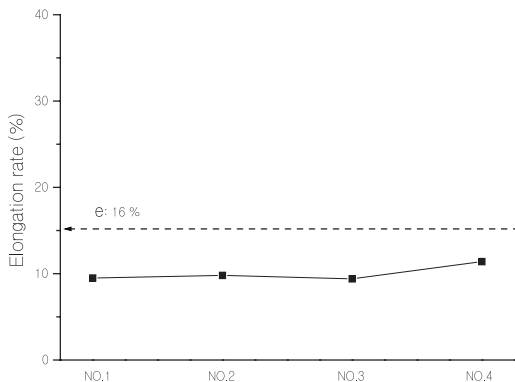


Fig. 19. STS 630 시험편의 연신률

3.3 가공종류에 따른 충격시험 결과

가. STS 304의 가공종류별 충격시험

충격 시험은 재료의 취성을 측정하는 시험으로,

파괴까지에 소요되는 에너지로 취성을 나타낸다. Fig. 20은 STS 304의 가공종류별 충격강도를 나타낸 것으로서, MIG 육성 가공한 시험편이 82.03133(J) 정도의 값으로서, 가장 낮은 값을 보이고 있으며, MIG 반육성 가공한 시험편 또한 105.6487(J) 정도의 값을 보이고 있다. CO₂ 반육성 용접한 시험편은 136.252(J)으로 중간 정도의 값을 나타내었고, 수동 피복 아크 육성 용접한 시험편은 180.826(J), 반육성 용접한 시험편은 195.774(J)을 나타내었다. 이것으로 미루어 보아 용접 특성에 따른 충격시험의 특성은 MIG < CO₂ < 수동아크 피복의 순으로 그 값이 크게 나타났다. 또한, 육성가공한 용접보다 반육성 가공한 시험편의 충격강도 값이 더 낮은 값을 나타내었다. 이것은 육성 가공보다 반육성 가공한 시험편이 용접된 깊이가 적기 때문이라고 사료된다.

Table. 2는 STS 304의 가공종류별 충격강도 비교값을 나타내고 있다. 용접한 시험편에 비해 용접하지 않은 STS 304시험편의 충격강도 값은 373.773(J)을 나타내었다. 이것은 용접에 따른 충격강도 값의 저하를 의미하며, 용접에 따른 재료의 손상이 상당히 심하다는 것을 나타내고 있다.

이와 같은 이유로, CO₂용접은 활성으로 고온의 아크에서 산화성이 크고 용착금속의 산화가 심하여 용융표면에 산화막을 일부 형성시켜 용착을 방해하기 때문에 비록 탈산제를 함유한 와이어를 사용하더라도 불활성 기체를 사용하는 MIG용접에 비해 가공 및 그 밖의 결함이 생기기 쉽다. 따라서 MIG에 비해 상대적으로 용접금속 중의 산소함유량이 높아지고, 노치인성이 저하될 가능성이 크므로 충격시험에서도 제일 낮은 값을 갖을 것으로 생각되나 용접 중 시험편에 불순물이 존재, 녹 발생 등으로 인하여 실험 결과가 반대로 나온 것으로 사료된다.

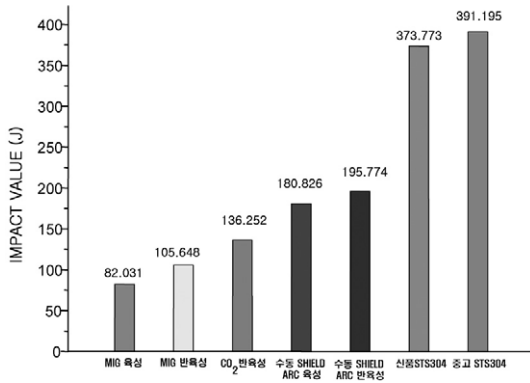


Fig. 20. STS 304 가공종류별 충격강도

Table 2. STS 304의 가공종류별 충격강도 비교값
(단위 : J/cm²)

종류	STS 304-100Ø 반용성 (HWW) 가공			STS 304-100Ø OWW		STS 304 (신품시편) -비가공	
	부산B3 (MIG)	포항 P10 (CO ₂)	통영T15 (수동 아크)	부산B5 (MIG)	통영T11 (수동 아크)	S3-1 (비 가공)	S3-2 (비 가공)
1회	105,802	150,756	163,120	87,190	213,126	384,634	379,544
2회	108,636	131,182	229,630	75,834	181,058	359,538	385,408
3회	102,508	126,818	194,572	83,070	148,294	377,160	378,347
평균	105,649	136,252	195,774	82,031	180,826	373,773	381,010

나. STS 630의 가공종류별 충격시험

Fig. 21은 75Ø직경의 STS 630의 가공종류별 충격강도 값을 나타내고 있다. H6-1 시험편(STS 630 75Ø-열처리)의 경우는 152.7333(J)이고, H6-2 시험편(STS 630 75Ø-열처리)의 경우는 143.7213(J)의 값을 나타내었고, NH-1 시험편(STS 630 75Ø-비열처리)은 101.7653(J), NH-2 시험편(STS 630 75Ø-비열처리)은 107.116(J)의 값을 나타내었다. 이것으로 미루어 보아 열처리한 시험편이 열처리 하지 않은 시험편에 비해서 충격 강도 값은 향상된 것을 알 수 있었다. 이와 같은

열처리를 함으로써 금속 조직 내부에서 결정입자들이 미세화 되어 강하게 되므로 충격강도 값이 높게 나타난 것으로 사료된다.

Table. 3은 STS 630의 가공종류별 충격강도 비교값을 나타내고 있다.

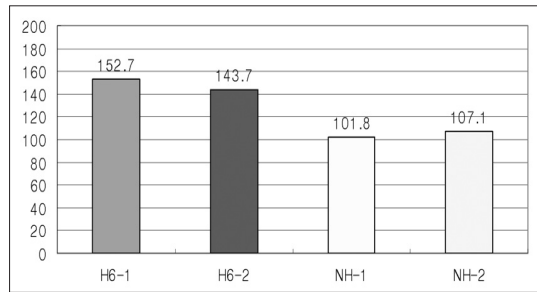


Fig. 21. STS 630 가공종류별 충격강도

Table 3. STS 630의 가공종류별 충격강도 비교값
(단위 : J/cm²)

종류	STS 630-75Ø (열처리)		STS 630-75Ø (비열처리)	
	H6-1	H6-2	NH-1	NH-2
1회	150.256	134.584	111.960	97.358
2회	160.150	150.256	99.232	119.600
3회	147.794	146.324	94.104	104.390
평균	152.733	143.721	101.765	107.116

3.4 가공종류에 따른 경도시험 결과

가. STS 304의 가공종류별 경도시험

Fig. 22는 70Ø STS 304 시험편의 가공방법에 따른 각 부위별 경도 측정결과 및 확대사진을 나타낸 것으로서 반용성가공의 경우, 열 영향부 부근에서 모재보다도 경도값이 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 각각의 가공법은 반용성 STS 304 70Ø MIG 용접, 반용성 STS 304 70Ø CO₂ 용

접, 반육성 STS 304 70 ϕ 수동피복아크(Shield arc) 용접을 한 경우이다.

Fig. 23은 70 ϕ STS 304 시험편의 각 부위별 경도 측정결과 및 확대사진을 나타낸 것으로서, 육성가공한 경우에도 상대적으로 열영향부의 강도값이 상대적으로 모재부보다 낮아지는 것을 확인할 수 있으며 각각의 가공법은 육성 STS 304 70 ϕ MIG 용접, 육성 STS 304 70 ϕ CO₂ 용접, 육성 STS 304 70 ϕ 수동피복아크(Shield arc) 용접을 한 경우이다.

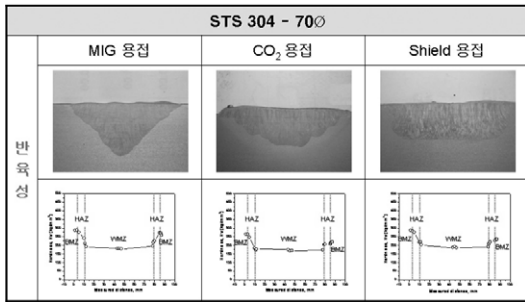


Fig. 22. 반육성 STS 304 70 ϕ 시험편의 각 부위별 경도 측정결과

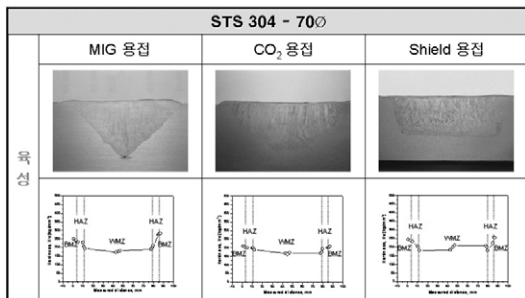


Fig. 23. 육성 STS 304 70 ϕ 시험편의 각 부위별 경도 측정결과

Fig. 24는 반육성 가공한 100 ϕ STS 304 시험편의 각 부위별 경도측정결과 및 확대사진을 나타낸 것으로서 각각의 가공법은 반육성 STS 304 100 ϕ MIG 용접, 반육성 STS 304 100 ϕ CO₂ 용

접, 반육성 STS 304 100 ϕ 수동피복아크(Shield arc) 용접을 한 경우이다.

Fig. 25는 육성 가공한 100 ϕ STS 304 시험편의 각 부위별 경도측정결과 및 확대사진을 나타낸 것으로서 실험결과와 앞의 내용과 유사하며 각각의 가공법은 육성 STS 304 100 ϕ MIG 용접, 육성 STS 304 100 ϕ CO₂ 용접, 육성 STS 304 100 ϕ 수동피복아크(Shield arc) 용접을 한 경우이다.

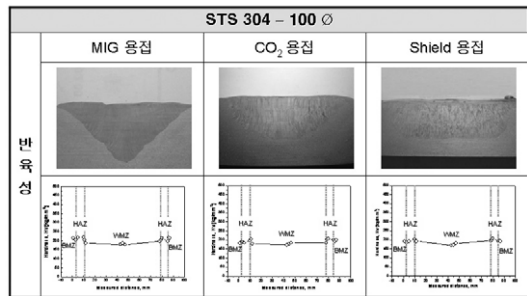


Fig. 24. 반육성 STS 304 100 ϕ 시험편의 각 부위별 경도 측정결과

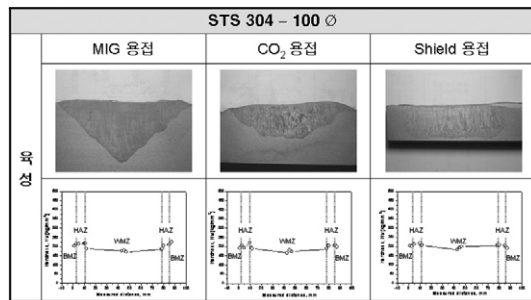


Fig. 25. 육성 STS 304 100 ϕ 시험편의 각 부위별 경도 측정결과

전체적으로 직경 70 ϕ 시험편이 직경 100 ϕ 의 시험편보다 높은 경도 값을 나타내었으며, 이는 직경 70 ϕ 의 프로펠러축 시험편에서 상대적으로 냉각속도가 빠르기 때문인 것으로 사료된다. 용접 프로세스에 따라서는 앞서 설명한 바와 같이

냉각속도가 빠른 MIG, 수동아크, CO₂ 용접법 순으로 경도 값이 낮아지는 경향을 나타내었다. 각 종류별 시험편의 부위별 경도 측정결과 비교 값을 비교해 보면 BMZ~HAZ > HAZ~WMZ > WMZ 순으로 용접부위가 가장 낮은 경도 값을 나타냈고, 용접방법에 따라서는 MIG > 수동아크 > CO₂ 순으로 MIG 용접 시에 경도 값이 가장 높은 값을 나타내었다.

STS 304 시험편의 각 부위별 경도측정 결과 경도 값이 용접부에서 가장 낮게 나타난 이유는 용접 전 180℃의 예열작업 등의 영향뿐만 아니라 조직 사진 관찰에서도 알 수 있듯이 일반판재가 아닌 환봉형태의 형상인 경우 냉각속도가 빠른 봉의 바깥 부분은 경도가 상대적으로 높고 열이 빠져나가기 쉽지 않는 봉축 중심의 용접부에서는 전체적으로 냉각속도가 서냉으로 진행되면서 상대적으로 낮은 경도 값을 나타낸 것으로 판단된다. 또한 상대적으로 페라이트 상이 가장 작은 MIG 용접법에서 냉각속도가 빠를 것으로 생각되며, 그 다음으로 수동아크 용접, CO₂ 용접 순으로 냉각속도가 빠를 것으로 판단된다. 냉각속도가 빠르면 결정립이 작아지게 되고 경도 값은 크게 되므로 MIG용접 시 가장 높은 경도 값이 나타나는 것으로 판단된다.

나. STS 630의 가공종류별 경도시험

Fig. 26은 STS 630 75Ø 시험편의 각 부위별 경도측정 결과를 나타낸 것으로서, 모재부인 BMZ 부분이 가장 높은 경도 값을 나타내었고, 모재부인 BMZ와 열영향부인 HAZ경계부분은 중간정도의 경도 값을 나타내었다. 용접부인 WMZ부분은 경도 값이 가장 낮은 특성을 보였다. 이와 같은 특성은 STS 304와 유사한 경향을 나타내었다. Fig. 27은

반육성 STS 630 75Ø MIG 용접-1, Fig. 28은 반육성 STS 630 75Ø MIG 용접-2, Fig. 29는 반육성 STS 630 75Ø MIG 용접-3, Fig. 30은 STS 630 75Ø MIG 용접-4 시험편의 각 부위별 경도 측정 결과를 나타낸 것의 확대 그래프이다.

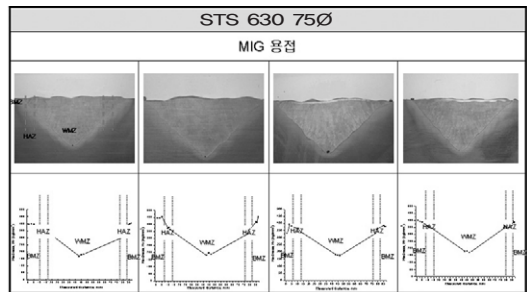


Fig. 26. 반육성 STS 630 75Ø 시험편의 각 부위별 경도 측정결과

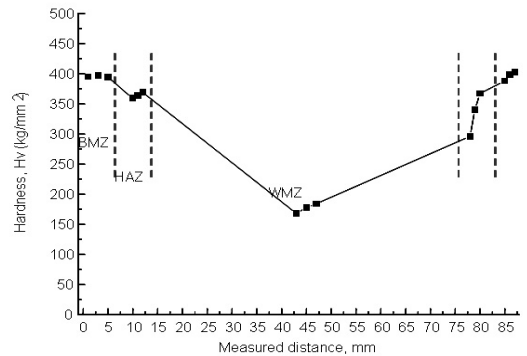


Fig. 27. 반육성 STS 630 75Ø MIG 용접-1

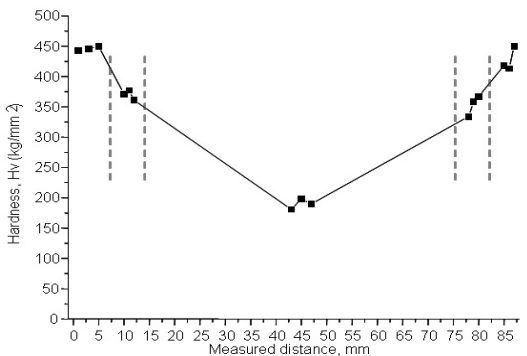


Fig. 28. 반육성 STS 630 75Ø MIG 용접-2

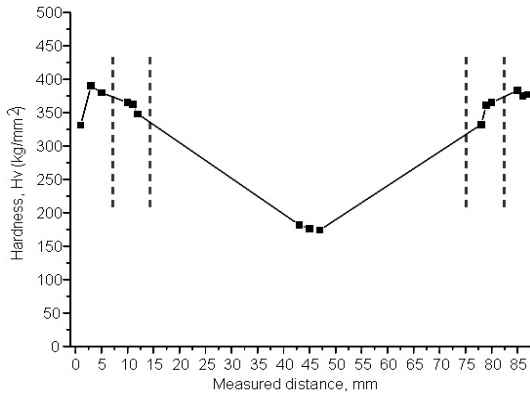


Fig. 29. 반육성 STS 630 75Ø MIG 용접 - 3

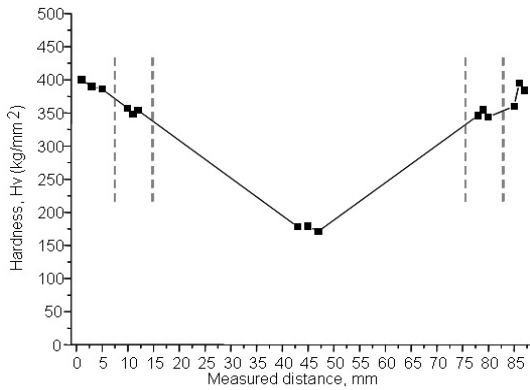


Fig. 30. 반육성 STS 630 75Ø MIG 용접 - 4

3.5 가공종류에 따른 부식시험 결과

가. STS 304의 가공종류별 부식시험

Fig. 31~Fig. 33은 육성가공된 STS 304 시험편의 전기화학적 양분극 측정결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 전체적으로 BMZ보다 HAZ 및 WMZ부에서 낮은 부식전위 및 부동태 전류밀도를 나타내었다. 이것은 육성가공에 의해 용접부의 내식성이 저하되는 것과 모재와의 전위차에 의한 용접부위의 갈바닉 부식으로 부식의 촉진이 가능하다는 것을 의미한다.

Fig. 34는 육성가공방법에 따른 용접부(W.M.Z)의 내식특성을 나타내고 있다. 용접부의 내식성은 Arc용접이 가장 낮은 전류밀도 값을 보여 내식성이 가장 우수한 특성을 보였고, MIG용접과 CO₂ 용접은 비슷한 전류밀도 값을 나타내었다. Fig. 35는 육성가공방법에 따른 열영향부(H.A.Z)의 내식특성을 나타낸 것으로서 MIG 용접 > CO₂ > 실드 아크 용접순으로 내식성이 우수하게 나타났다. Fig. 36~Fig. 37은 비열가공 및 열가공된 STS 630 시험편(신품, 중고품)의 전기화학적 양분극 측정 결과를 나타내고 있다.

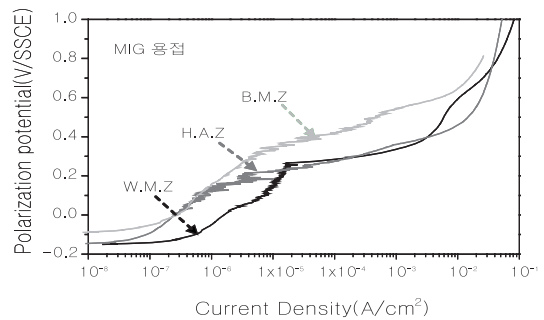


Fig. 31. STS 304 MIG 용접 시험편의 전기화학적 양분극 측정 결과

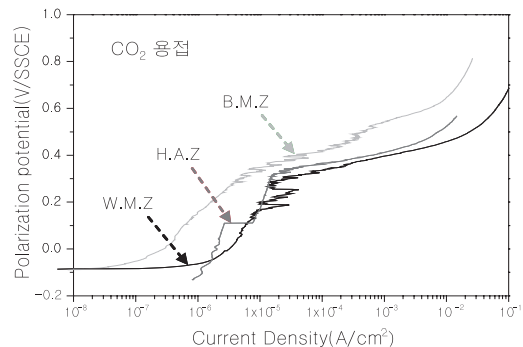


Fig. 32. STS 304 CO₂ 용접 시험편의 전기화학적 양분극 측정 결과

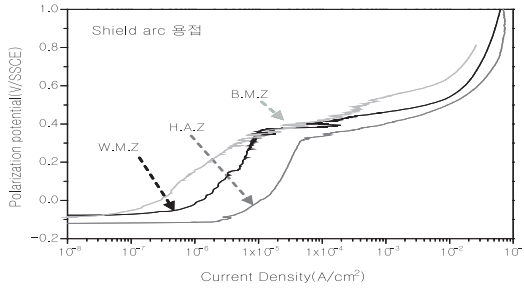


Fig. 33. STS 304 수동피복아크(Shield arc) 용접 시험편의 전기화학적 양분극 측정 결과

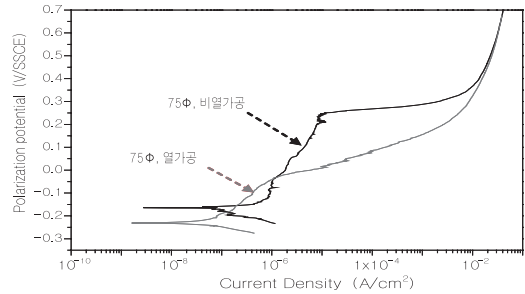


Fig. 37. 75φ 비열가공 및 열가공 STS 630시험편의 전기화학적 양분극 측정 결과

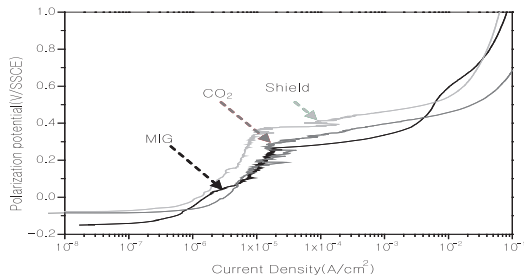


Fig. 34. STS 304 육성가공방법에 따른 W.M.Z 부의 내식특성

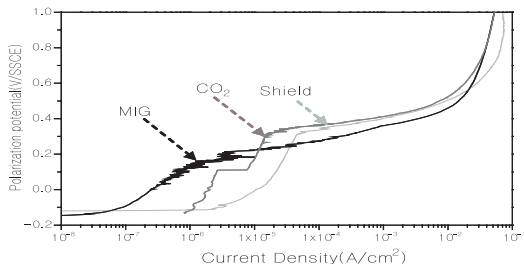


Fig. 35. STS 304 육성가공방법에 따른 H.A.Z 부의 내식특성

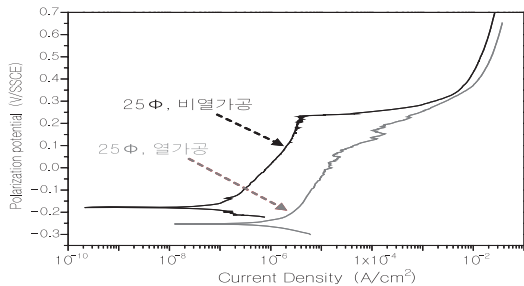


Fig. 36. 25φ 비열가공 및 열가공 STS 630시험편의 전기화학적 양분극 측정 결과

3.6 가공종류에 따른 저인장 응력부식시험 결과

MIG용접법으로 육성가공 된 STS 304 시험편의 저인장응력부식 시험에서 대기중 인장시험에서는 인장강도는 453.31N/mm^2 , 항복강도는 294.49N/mm^2 값을 나타내었고, 해수중 SSRT 인장시험에서 인장강도는 453.16N/mm^2 , 항복강도는 141.95N/mm^2 값을 나타내었다. SSRT 시험결과 인장강도는 거의 변화가 없었고, 항복강도는 약 152.54N/mm^2 정도 값이 떨어졌다.

해수중에서 실시한 인장시험이 대기중에서 실시한 인장시험보다 그 값들이 낮게 나타나는 이유는 용접으로 인한 조직의 경화와 용접잔류 응력이 조직내부에 포함되어 있고, 해수중에서 일정하중에 의한 일정속도(0.01mm/min)로 인장하는 도중에 용접된 부분부터 파괴가 일어난다. 파괴가 일어나는 부분을 중심으로 해수가 침투하게 되고, 해수는 재료의 파괴를 가속화 하게 된다. 따라서 항복강도는 급격히 낮아져서 빠른 시간 내에 파괴가 일어나기 때문이다.

Fig. 38는 MIG용접으로 육성 가공된 STS 304 시험편의 저인장응력부식 시험의 시간의 변화에

다른 부식전위를 나타내고 있다. 초기에는 급격히 귀방향으로 이행하나 약 200분경과 후 급격히 비방향으로 이행하는 것을 알 수 있다. 계속 그 상태를 유지하다 파단시 급격히 전위가 낮아진 후, 다시 귀한 방향으로 전위값이 이동하여 거의 일정하게 전위값이 유지되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 파단이 정지된 후, 표면의 산소와 결합하여 Cr₂O₃의 얇은 산화피막이 형성되어 전위값이 귀전위 값으로 상승했다고 판단된다.

Fig. 39와 Fig. 40은 각각 CO₂아크용접법으로 육성가공된 시험편의 시간에 따른 부식전위와 수동 피복 아크 용접으로 육성가공된 시험편의 시간에 따른 부식전위를 나타내고 있다.

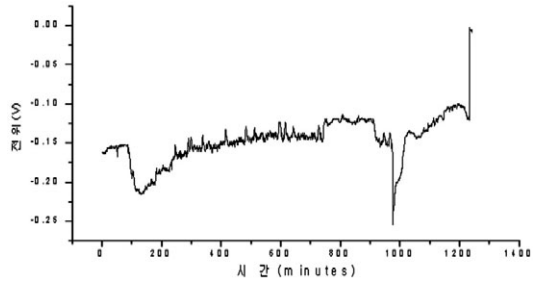


Fig. 40. 수동 피복 아크 용접으로 육성가공된 시험편의 시간에 따른 부식전위

4. 결론

STS 304방법에 따라 육성부위가 차이가 있고, 용접융합부가 균일하지 않았다. 이와 같이 용접특성이 다른 이유는 지역별 CO₂, MIG, 수동피복 아크 방법의 차이에 따른 용입깊이, 토치각도 등의 용접방법에 차이가 있기 때문이라고 사료되며, 육성용접 가공한 재료는 항복강도인 경우는 기준값보다도 다소 높은 값을 나타내었으나, 인장강도나 충격값이 그 기준값보다 미달되었다.

용접된 시험편의 BMZ, HAZ, WMZ의 내식성을 비교해 보면, 모재부분이 가장 내식성이 좋은 것으로 나타나고, 열영향부, 용접부가 가장 좋지 않은 내식성을 나타내었다. 이와 같이 STS 304재보다 좋지 않은 내식특성을 나타내는 용접부와 열영향부는 해수에서 장기간 사용시 부식에 취약할 것으로 판단된다. 따라서 STS 304 프로펠러축에 용접에 따른 육성가공시 세심한 용접 기술이 필요하고, 근본적으로는 용접하지 않는 것이 좋을 것으로 사료된다. 또한, STS 304재의 경우에는 각 지역별로 다른 방법으로 이루어진 축 육성가공에 대한 실험결과가 모두 “KS 허용기준치”에 미달하는 것으로 나타나 선박기관기준 제8조 제2항에서

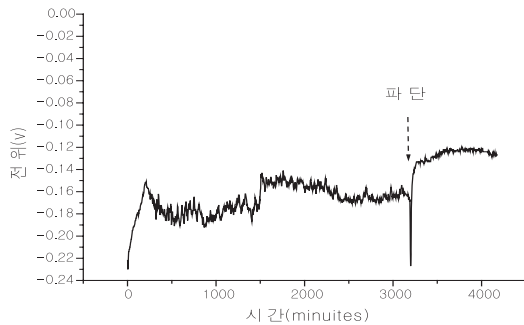


Fig. 38. MIG용접법으로 육성가공된 시험편의 시간에 따른 부식전위

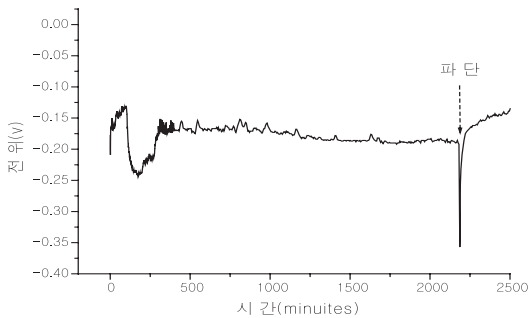


Fig. 39. CO₂ 아크용접법으로 육성가공된 시험편의 시간에 따른 부식전위

규정하고 있는 ‘용접수리 불가’에 대한 근거자료로 제시할 수 있었다.

또한, 선박기관기준 제65조 제1호(총 톤수 20톤 이상의 경우는 제59조 제1항 적용)에서 규정하고 있는 석출경화계 스테인리스강의 제1종축으로써의 인정여부에 대한 유효성 검토에 있어서는 축 열가공에 대한 실험결과가 “KS 허용기준치”에 미달하는 결과를 나타냄으로써 현장에서 이루어지고 있는 가공법으로 STS 630을 제1종축으로 인정할 수 있는지에 대한 새로운 검토가 필요할 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- (1) “1995年度の 船體損傷のまとめ”, 日本海事協會會誌, 情報技術部, No. 240, p. 8, 1997(III)
- (2) 水上智夫, 石川一郎, 最近の 船體損傷の傾向と對策, 日本海事協會, 技術研究所, 研究發表會講演集, pp. 8~9, 1993
- (3) D. F. Hassonand, C. R. Corwe. “Materials for Marine System and Structures”, Vol. 28, Academic press, (1998)
- (4) 杉本澤田, 森岡; 日本金屬學會, Vol.34, 312, 1970
- (5) NACE International, “Cost of Corrosion : \$300 Billion a year”, MP, Vol. 34, No. 6, p. 5, 1995
- (6) 阿部正美, 海洋及び港灣構造物における防蝕及び補修法に關する研究, 運輸省港灣技術研究所構造部, 1998
- (7) 田大熙, 實用防蝕工學, 太和出版社, pp. 18~32, 1990
- (8) 李明勳外2, 日本金屬學會, Vol.57[6], 686~691, 1993
- (9) K. Stowe, “Ocean Science”, pp. 300~305, John wiley & sons, Inc, 1983
- (10) 善一章, 海洋還境における剛構造物の腐食の實態と集中腐食對策に關する研究, 運輸省港灣技術研究所, pp. 163~198, 1976
- (11) S. C. Dexter and S. H. Lin, Material Performance, April, pp. 16~21,
- (12) 系井康彦外2, 日本輕金屬學會, Vol.38[2], 114, 1988
- (13) ‘Uhlig’ s Corrosion handbook’, R. Winston Revie, (John Wiley & Sons Inc.), 2000
- (14) 2종 스테인리스강축 방식용 AI계 경량합금재의 실용화 방안연구; 선박검사기술협회, 2006
- (15) 스테인리스강 용접 시 용접성에 미치는 용접 조건에 관한 연구; 성재준, 2003
- (16) 열재현에 의한 SS440강 및 STS 304강의 기계적성질 및 초음파 특성; 정정환, 2004
- (17) 스테인리스강의 용접 ; 한국과학기술정보연구원, 2006
- (18) 이종금속 TIG 용접부의 기계적 특성에 관한 연구, 주동휘, 2006
- (19) 용접·접합 편람, 대한조선학회, 1998
- (20) 강구조 용접코드 2000 ; 최진성(골드출판사), 2000
- (21) 용접과 WPS / PQR ; 김대식(21세기세기사), 2007
- (22) 최신 용접공학 ; 정순억 외 1명(보성각), 1994

이 논문은 선박안전기술공단 자체연구개발 사업으로 이루어진 것임을 밝힙니다.