알루미늄 맞대기 아크 용접부 형상이 피로강도에 미치는 영향

조정호^{*,†} · 백성진^{*} · 신승철^{*} · 이건호^{*} · 강문구^{*} · 조영래^{**}

^{*}충북대학교 기계공학부

^{**}현대자동차 경금속재료개발팀

Effect of Aluminum Arc Butt Joint Weld Geometry on Fatigue Strength

Jungho Cho^{*,†}, Sungjin Baek^{*}, Seungchul Shin^{*}, Gunho Lee^{*}, Mun-Gu Kang^{**} and Young-Rae Jo^{**}

^{*}Chungbuk National University, School of Mechanical Engineering, Cheongju, 28644, Korea

^{**}Hyundai Motors, Light Metal Materials Development Team, Hwaseong, 18280, Korea

[†]Corresponding author: junghocho@cbnu.ac.kr

(Received January 14, 2021; Revised February 1, 2021; Accepted February 9, 2021)

Abstract

The use of aluminum in auto odies is increasing due to the requirement of mass reduction for gas mileage enhancement. However, few open studies have been conducted on the fatigue strength of arc welded aluminum butt joints. In this study, the fatigue strength of arc welded butt joints of aluminum sheets was investigated. The material was 6061-T6 with a thickness of 4 mm. Welding specimens were prepared to determine the effects of the top bead toe angle, penetration depth, top surface misalignment, and alternative double-butt joint formation. Results showed that the top surface misalignment and partial penetration were more critical than the top bead toe angle on fatigue strength. Partial and full penetration revealed the lowest and highest fatigue strength, respectively. Because of the low viscosity and surface tension, achieving full penetration in butt joint aluminum arc welding without a backing component while also controlling penetration depth are impossible. An alternative solution to this problem is to apply a double-butt joint design, with experimental results showing for the first time the validity of this solution in terms of fatigue strength.

Key Words: Aluminum, Arc, Welding, Fatigue, Automotive, Butt joint

1. 서 론

지구 온난화에 따른 연비 향상 목적으로 차체의 경량화 요구는 점차 증가하고 있다. 이에 따라, 알루미늄의 차체 비중이 확대되고 있으나, 알루미늄의 낮은 아크 용접성에 대한 심도 깊은 연구나 용접부의 피로 성능에 대한 검증 사례는 쉽게 찾아볼 수가 없다. 알루미늄은 철강 재료와 달리, 내구한도가 없는 것으로 알려져 있다¹⁾. 덧붙여, 차체 구조용 소재로 사용된 역사가 짧고²⁾, 아크 용접성이 좋지 못하기³⁻⁵⁾ 아크 용접부에 대한 피로 특성 연구가 부족한 실정이다. 검색 가능한 문헌들을 살펴보면, 알루미늄 판재의 저항 점 용접부 피로 성능^{6,7)}에 관한 연구 사례가 일부 있고, 특징적으로

마찰교반 알루미늄 용접부의 피로에 관한 많은 연구 논문이 있으나⁸⁻¹⁴⁾ 아크 용접부에 대한 피로 관련 연구는 그리 많지 않다. Ghazvinloo et al¹⁵⁾은 로봇 알루미늄 GMAW에서 전압, 전류, 용접속도가 피로에 미치는 영향에 대해 연구하였고, Gori et al¹⁶⁾과 Silva et al¹⁷⁾은 GMA 용접과 마찰교반 용접의 피로 성능을 비교하였다. Zhang et al¹⁸⁾은 레이저-아크 하이브리드 용접부에 대해 고주파 피로 성능에 대해 연구하였고, Qiao et al¹⁹⁾은 GTA 용접과 마찰교반 용접의 피로 성능을 비교하였으며, Kuk et al²⁰⁾은 아크 용접의 온도와 보호가스 조성이 피로에 미치는 영향을 분석하였다. Livieri et al²¹⁾은 아크 용접부의 피로에서 응력 집중에 관해 연구하였고, Han et al²²⁾은 철도용 대형 압출재 아크 용접부의 피로 강도에 대해 연구하였다.

자동차 회사에서는 차체용 알루미늄 판재의 아크 용접 부에서 용입과 비드 형상이 피로 성능에 미치는 영향에 대해 궁금해한다. 이에 어느 정도 부합하는 연구 사례는 1971년의 Person et al²³⁾ 한 건에 불과하지만, 해당 연구는 판재 맞대기 이음의 비드온, 비드오프 용접이 피로에 미치는 영향을 분석한 것에 머물렀다.

본 연구는 실험을 통해 차체용 알루미늄 아크 용접부에서 비드 형상이 피로 강도에 미치는 영향을 분석하였다. GMAW의 공정 변수를 조절하여, 4mm 두께의 차체용 6061-T6 맞대기 이음 용접부에서 110°와 150° 토우각, 부분용입과 완전용입, 그리고 생산 현장에서 발생할 수 있는 맞대기 이음 상면의 비정렬, 덧붙여 완전 용입 조건을 대체하기 위한 반턱쪽매(double butt) 이음이 피로성능에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 용접시편 제작

용접 시편은 충분한 너비의 알루미늄 판재를 맞대기 용접하고, 준정상상태인 중앙부에서 와이어 커팅을 이용해 표준시편을 채취하였다. 일반적인 펄스 GMA 용접기를 이용하였고, 보호가스는 100% Ar을 사용하였고, 1.2mm 직경의 4043 알루미늄 와이어를 적용하였다. 알루미늄 용접 시, 용융지의 점성과 표면 장력이 매우 낮아 이면 비드 형성에 일관성이 없어 완전 용입을 얻는 것이 매우 어렵기 때문에, 스틸 소재의 백킹을 이용해 완전 용입 시편을 제작하였다. 부분 용입은 3mm 내외로 조절하였고, 모든 시편의 단면 분석을 통해 부분 용입 깊이를 기록하여 분석하였으나, 결과적으로 부분 용입의 미세한 편차는 피로성능에 유의미한 결과를 보이지 않았다. 피로 성능의 관심 인자는 앞서 언급한 바와 같이 상면 비드의 토우각, 상면 비정렬, 반턱쪽매 이음으로, 각각의 인자는 Fig. 1의 개요도와 같다. 토

Table 1 Welding specimen conditions and number of specimens

Condition	Toe angle (°)	Misalignment (mm)	Penetration	# of specimens
B1	150	0	Full	20
B2		1.0	Full	20
B3		0	Partial	20
B4		0	Double butt full	20
B5	110	0	Full	20
				100 in total

우각은 110°와 150°의 2가지 레벨로 제어하였고, 상면 비정렬은 정렬의 경우와 1mm 비정렬의 경우를 비교하였다. 생산 현장에서는 알루미늄의 맞대기 이음에서 완전 용입 제어가 불가능하여, 설계 변경을 통해 반턱쪽매 형상으로 용접을 하고 있다. 이 실험에서 반턱쪽매 이음의 판재는 전체 두께 6mm로 아래 쪽 턱을 2mm로 두어, 4mm 두께 판재의 완전 용입과 마찬가지로 4mm의 용입을 만들 수 있도록 하였다. 반턱쪽매 이음 시편은 첫 번째 맞닿는 이음의 루트까지 용입이 이루어지는 완전 용입의 경우만 제작하였다. 각 조건들의 조합에서 20개의 시편을 제작하여 피로시험을 진행하였다. 각 조건의 조합은 Table 1과 같다.

기본적인 용접조건은 다음과 같다. 용접속도는 30 cm/min 이고, 전류는 160A, 전압은 16.5V이며, 보호가스 공급량 21 L/min이다. 다양한 비드 형상을 만들어 내기 위해 보호 가스를 제외한 가능한 모든 공정 변수를 조절하였다. 여기에는 전류와 용접속도 및 토치의 작업각과 진행각도 포함된다. 토우각 제어는 전류와 용접속도 만으로는 한계가 있어, 110° 토우각 재현에서는 토치 각도를 이용해 비대칭의 비드 형상을 만들어 냈다. 110° 토우각을 만드는 경우 반대쪽 토우각은 이보다 큰 토우각이 만들어지지만, 토우각이 클수록 피로 성능이 우수해 110° 토우각 영역에서 파단이 발생하므로 비대칭 토우각에 의한 영향은 무시한다. 제어 공정 변수가 많고, 각 조건 별로 변수 조합이 모두 다르며, 용접부 형상에 따른 피로 시험이 주된 연구 주제이기에 별도로 공정 변수들을 모두 나열하지는 않는다.

피로 시험을 위한 시편의 치수는 Fig. 2와 같다. 왼쪽은 맞대기 이음 시편을 보여주고 있으며, 오른쪽은 반턱쪽매 이음으로 용접 전 V-그루브 형상을 보여주고 있다. 각 조건 별로 만들어진 비드 형상은 Fig. 3과 같다. (a)는 완전용입 시편의 단면을 보여주고 있고, (b)는 상면 1mm 비정렬, (c)는 부분용입, (d)는 반턱쪽매 완전용입의 비드 형상을 각각 보여주고 있다. 모든 이

Fig. 1 Schematic of toe angle, top surface misalignment, and double butt joint

Fig. 2 Fatigue specimen dimension. Left side: butt joint, right side: double butt joint

Fig. 3 Examples of various bead shapes. (a) full penetration (b) top surface mis-alignment full penetration (c) partial penetration (d) double butt full penetration

미치는 와이어 커팅 이후의 단면이다. (a)와 (b)의 이면비드는 백킹에 의해 형성된 것이다.

3. 피로시험

Table 1의 B1부터 B5까지 서로 다른 비드 형상을 가진 5개의 조건 별로 20개의 피로시험편을 제작하여, 총 100개 시험편에 대한 피로시험을 진행하였다. 각 조건 별로 20개의 시험편은 4개 하중에 대해 5개씩 피로시험을 수행하고, 평균값을 계산했다. 알루미늄의 소재 특성 상, 피로 한도가 없기 때문에 최대 반복 하중 사이클은 50만회로 제한하였다. 반복 하중 주파수는 20Hz 이고, SR(stress ratio)은 0.1로 설정하였다. 용접 조건 설정 중 엑스레이 검사를 수행해 기공이 최소화되는 조건을 설정하였고, 와이어 커팅으로 가공 전 엑스레이 검사를 하여 기공 여부와 기공의 평균 직경과 최대 직경을 기록하였으며, 채취한 시험편 중 기공이 과다한 시험편은 피로시험에서 배제하였다. 사용된 장비는 국제공인 교정기관인 (주)가나시험기사의 5톤급 피로시험기로 검

교정을 완료하였으며, 한국생산기술연구원의 MTS社 피로시험기와 평판 표준시험편을 대상으로 한 추가 비교검증을 거쳐 본 실험에 적용하였다. 단면 비드 사진을 통해 전면 비드와 이면 비드의 토우각을 측정하여 기록하였고, 파단 위치와 파단면 사진을 기록하여 피로 특성을 분석하였다. 기록된 데이터 베이스는 Fig. 4의 예와 같다. 용접부 단면 비드 형상과 상면, 이면 비드의 토우각 및 엑스레이 이미지, 파단 외형과 파단 단면, 기공 정보까지 모두 기록되어 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 피로 시험 결과 데이터 베이스의 또 다른 예로, 각 시험편에 적용된 최대 최소 하중과 SR, 주파수, 피로 파단 사이클, 파단 시작 위치 등을 기록하였다.

4. 결과 및 고찰

B1부터 B5까지 서로 다른 비드 형상을 가진 5개의 조건 별 4개 하중에 대한 피로시험 S-N 선도는 Fig. 6과 같다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 B1의 150° 토우각을 갖는 완전용입 조건이 가장 우수한 피로 성능을 보인다. B5 완전용입 조건은 B1과 달리 110° 토우각으로 B1 보다는 낮은 피로성능을 보이나 다른 조건들에 비해서는 월등히 우수함을 알 수 있다. B2는 150° 토우각을 갖고 완전용입 조건이지만, 상면 비정렬에 의해 피로 성능이 현저히 저하됨을 알 수 있다. B4는 반턱쪽매 이음으로 4mm의 용입을 확보했지만, 접합이 이뤄지지 않은 2mm 턱 부분에 응력이 집중되고 파단이 쉽게 시작되기 때문에 피로성능이 현저히 저하됨을 알 수 있다. 마찬가지로 B5의 부분용입 조건도 루트 갭에 응력이 집중되고 파단이 쉽게 시작돼 가장 낮은 피로성능을 보이고 있다.

보다 상세한 고찰을 통해 결과를 다시 보면, Fig. 4와 Fig. 5의 B1 150° 토우각 맞대기 완전용입 결과에서, 예상과는 달리 이면 비드에서 주로 균열이 시작되어 상면 비드를 관통하며 피로 균열이 진전되었음을 알 수 있다. 이와는 달리 B5 110° 토우각 맞대기 완전용입 결과에서는 균열 시작 위치가 상면 토우부와 이면 토우부 각각 50% 정도로 발생하였다. 이면 비드 토우각이 백킹을 통해 150° 내외로 제어된 것을 감안하면, 상면 비드 토우각과 이면 비드 토우각이 유사할 때 이면 비드 토우부로 피로 응력이 집중된다고 결론을 내릴 수 있으나, 본 연구는 거시적인 관점에서 비드 형상의 영향을 보고 있으므로, 이에 대해서는 추가적인 검증이 필요할 것으로 보인다.

흥미로운 것은 토우각이 피로성능에 미치는 영향이 기타 다른 조건들에 비해 상대적으로 적다는 것이다. 용융 알루미늄은 점성과 표면 장력이 철강에 비해 낮아

B1-12kN-4								
Bead Cross Section	1		Top bead toe angle		2		Top bead toe angle	
			155	145			154	152
			Back bead toe angle				Back bead toe angle	
			151	152			165	158
X-ray
Top
Side
Fractography	1		2		Porosity			
					Avg. dia.	0.218		
					Max. dia.	0.307		

Fig. 4 Example of welding specimen fatigue test result data base.

condition	#	Stress ratio	Applied Load				Frequency	Life Cycle	LC AVG	LC Min	LC Max	Crack start	Load level (%)	Tensile strength [kN]
			Max. load (kN)	Min. load (kN)	Mean. load (kN)	Amp. load (kN)								
#B2 butt 150° full misalign 1mm	1	0.1	10	1	5.5	4.5	20	61101	49934.8	35927	61101	Back toe	61.7	
	2	0.1	10	1	5.5	4.5	20	46787				Back toe	61.7	
	3	0.1	10	1	5.5	4.5	20	53874				Back toe	61.7	
	4	0.1	10	1	5.5	4.5	20	51985				Back toe	61.7	
	5	0.1	10	1	5.5	4.5	20	35927				Back toe	61.7	
	6	0.1	8	0.8	4.4	3.6	20	156740	149281	130115	158811	Back toe	49.4	
	7	0.1	8	0.8	4.4	3.6	20	158811				Back toe	49.4	
	8	0.1	8	0.8	4.4	3.6	20	157505				Back toe	49.4	
	9	0.1	8	0.8	4.4	3.6	20	130115				Back toe	49.4	
	10	0.1	8	0.8	4.4	3.6	20	143234				Back toe	49.4	
	11	0.1	6	0.6	3.3	2.7	20	500000	500000	500000	500000	-	37.0	
	12	0.1	7	0.7	3.85	3.15	20	500000				-	43.2	
	13	0.1	7.5	0.75	4.125	3.375	20	252372	223567.6	172107	271887	Back toe	46.3	
	14	0.1	7.5	0.75	4.125	3.375	20	184693				Back toe	46.3	
	15	0.1	7.5	0.75	4.125	3.375	20	172107				Back toe	46.3	
	16	0.1	7.5	0.75	4.125	3.375	20	271881				Back toe	46.3	
	17	0.1	7.5	0.75	4.125	3.375	20	236779				Back toe	46.3	
	18	0.1	7	0.7	3.85	3.15	20	280917	320159.5	280917	400806	Side edge	43.2	
	19	0.1	7	0.7	3.85	3.15	20	291279				Back toe	43.2	
	20	0.1	7	0.7	3.85	3.15	20	400806				Back toe	43.2	
	21	0.1	7	0.7	3.85	3.15	20	307636				Back toe	43.2	
	22	0.1					20							
	23	0.1					20							
	24	0.1					20							
	25	0.1					20							

Fig. 5 Example of welding specimen fatigue test result.

토우각 제어가 매우 어려우므로, 생산 현장에서는 토우 각보다는 상면 비정렬이나 용입 깊이에 훨씬 더 신경써야 한다는 결론이 내려진다. 실제 알루미늄 맞대기 이

음 용접 시, 백킹 없이는 완전 용입의 이면 비드 제어가 어려운 점이 있지만 불규칙한 이면 비드를 만들더라도 완전 용입 조건을 적용해야 피로 성능 저하를 막을

Fig. 6 S-N curve of various welding specimen fatigue test

수 있다. 그러나, 차체의 구조 특성상 백킹을 사용할 수 없고, 알루미늄 판재의 완전 용입은 매우 쉽게 용락이 발생할 수 있다. 이에 따라, 실제 현장에서는 추가적인 비용이 발생함에도 불구하고, 부득이 반턱쪽매 형상을 적용하고 있으며, 이 실험 결과는 이 대안이 부분 용입에 비해 피로성능에 있어서 매우 효율적임을 보여 준다.

5. 결 론

이 연구는 4mm 두께 차체용 알루미늄 6061-T6 판재의 맞대기 아크 용접에서 용접부 형상이 피로성능에 미치는 영향을 실험을 통해 검증하였다. 용접부 형상 검토 대상은 완성차 업체의 의견을 반영하여, 비드의 토우각, 용입 정도, 상면 비정렬, 맞대기 완전용입 대체용 반턱쪽매로 한정하였다. 잘 알려진 바와 같이 토우각이 150°인 경우, 110° 토우각보다 피로 성능이 우수하지만, 용입이나 상면 비정렬에 의한 피로성능 저하에 비하면 토우각의 영향은 그리 크지 않았다. 동일한 용입이라면 보다 큰 토우각을 만드는 것이 피로성능에 유리하나, 생산 현장 상황을 고려했을 때, 큰 토우각 확보는 매우 어려운 일이므로 토우각보다는 용입 관리에 신경써야 할 것이다. 평판 맞대기의 완전용입 제어에 어려움이 있어, 대안으로 적용되고 있는 반턱쪽매 이음은 평판 완전용입과 동일한 4mm 용입에도 불구하고, 미용접 위치에 집중되는 응력으로 완전용입 보다 피로성능이 크게 저하되는 것을 알 수 있다. 그럼에도

불구하고, 반턱쪽매 이음의 피로 성능은 부분용입보다 우수하므로, 백킹 없이는 완전용입형상을 만들어 낼 수 없는 알루미늄 용접의 특성 상 실제 생산에 있어서 좋은 대안이 될 수 있음을 입증하였다.

결론적으로, 알루미늄 판재의 맞대기 아크 용접 시, 생산 현장에서는 제어가 어려운 토우각에 신경 쓰기 보다는 상판 정렬과 용입 깊이에 더 중점을 두어 공정 변수 관리를 해야 한다. 이상적인 경우는 큰 토우각에 완전용접 공정 변수를 적용하는 것이지만, 알루미늄 용융지는 점성과 표면장력이 낮아 백킹 없이는 용락이 발생해 완전용입이 불가능하므로 현재와 같이 반턱쪽매 이음을 적용해 일정한 용입을 보장하는 것이 좋은 대안이 될 수 있음을 피로시험을 통해 처음으로 확인하였다.

ORCID: Jungho Cho: <https://orcid.org/0000-0003-2165-2692>

References

1. D. R. Askeland and W. J. Wright, Essentials of Materials Science and Engineering, 4thed., CENGAGE, Boston, USA (2019), 245-247.
2. E. Patrick and M. Sharp, Joining Aluminum Auto Body Structure, *SAE Technical Paper* 920282, (1992). <https://doi.org/10.4271/920282>
3. J. Cho, Weldability Increase of Aluminum by Variable Polarity Arc, *J. Weld. Join.* 32(1) (2014) 108-111. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.1.108>
4. J. Cho, J. J. Lee and S. H. Bae, Heat input analysis of variable polarity arc welding of aluminum, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 81 (2015) 1273-1280.

- <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7292-y>
5. H. Jeong, K. Park, S. Baek and J. Cho, Thermal efficiency decision of variable polarity aluminum arc welding through molten pool analysis, *Int. J. Heat. Mass Transfer*. 138 (2019) 729-737.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.089>
 6. R. S. Florea, D. J. Bammann, A. Yeldell, K. N. Solanki and Y. Hammi, Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy, *Mater. Des.* 45 (2013) 456-465.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.053>
 7. A. Gean, S. A. Westgate, J. C. Kucza AND J. C. Ehrstrom, Static and Fatigue Behavior of Spot-Welded 51 82-0 Aluminum Alloy Sheet, *Weld. J.* 78(3) (1999) 80s-86s.
 8. K. V. Jata, K. K. Sankara and J. J. Ruschau, Friction-Stir Welding Effects on Microstructure and Fatigue of Aluminum Alloy 7050-T7451, *Metall. Mater. Trans. A*, 31A (2000) 2181-2192.
<https://doi.org/10.1007/s11661-000-0136-9>
 9. M. N. Ilman, Kusmono and P. T. Iswanto, Fatigue crack growth rate behaviour of friction-stir aluminium alloy AA2024-T3 welds under transient thermal tensioning, *Mater. Des.* 50 (2013) 235-243.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.081>
 10. G. D'Urso, C. Giardini, S. Lorenzi and T. Pastore, Fatigue crack growth in the welding nugget of FSW joints of a 6060 aluminum alloy, *J. Mater. Process. Technol.* 214(10) (2014) 2075-2084.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.01.013>
 11. D. G. Moghadam and K. Farhangdoost, Influence of welding parameters on fracture toughness and fatigue crack growth rate in friction stir welded nugget of 2024-T351 aluminum alloy joints, *Trans. Nonferr. Met. Soc. China*, 26(10) (2016) 2567-2585.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64383-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64383-2)
 12. D. A. Wang and C. H. Chen, Fatigue lives of friction stir spot welds in aluminum 6061-T6 sheets, *J. Mater. Process. Technol.* 209(1) (2009) 367-375.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.008>
 13. Yu E Ma, Z. C. Xia, R. R. Jiang and WenYa Li, Effect of welding parameters on mechanical and fatigue properties of friction stir welded 2198 T8 aluminum - lithium alloy joints, *Eng. Fract. Mech.* 114 (2013) 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.10.010>
 14. P. C. Lin, J. Pan and T. Pan, Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 2: Welds made by a flat tool, *Int. J. Fatigue*, 30(1) (2008) 90-105.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.02.017>
 15. H. R. Ghazvinloo, A. Honarbakhsh-Raouf and N. Shadfar, Effect of Arc Voltage, Welding Current and Welding Speed on Fatigue Life, Impact Energy and Bead Penetration of AA6061 Joints Produced by Robotic MIG Welding, *Ind. J. Sci. Tech.* 3(2) (2010) 156-162.
 16. Y. Gori and R. P. Verma, Experimental Fatigue Life Estimation of AA5083 Aluminium Alloys Welded by Two Welding Processes- Gas Metal Arc (GMA) Welding and Friction Stir Welding (FSW), *J. Graph. Era. Univ.* 5(1) (2017) 10-15.
 17. J. da Silva, J. M. Costa, A. Loureiro and J. M. Ferreira, Fatigue behaviour of AA6082-T6 MIG welded butt joints improved by friction stir processing, *Mater. Des.* 51 (2013) 315-322.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.026>
 18. C. Zhang, M. Gao and X. Zeng, Effect of microstructural characteristics on high cycle fatigue properties of laser-arc hybrid welded AA6082 aluminum alloy, *J. Mater. Process. Technol.* 231 (2016) 479-487.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.019>
 19. Y. Qiao, H. Zhang, L. Zhao and Q. i Feng, Fatigue Crack Growth Properties of AA 5754 Aluminum Alloy Gas Tungsten Arc Welding and Friction Stir Welding Joints, *J. Mater. Eng. Perform.* 29 (2020) 2113-2124.
<https://doi.org/10.1007/s11665-020-04739-4>
 20. J. M. Kuk, K. C. Jang, D. G. Lee and I. S. Kim, Effects of temperature and shielding gas mixture on fatigue life of 5083 aluminum alloy, *J. Mater. Process. Technol.* 155-156 (30) (2004) 1408-1414.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.117>
 21. P. Livieri and P. Iazzarin, Fatigue Strength of Steel and Aluminium Welded Joints based on Generalised Stress Intensity Factors and Local Strain Energy Values, *Int. J. Frac.* 133 (2005) 247-276.
<https://doi.org/10.1007/s10704-005-4043-3>
 22. S. W. Han, H. J. Lee and S. R. Lee, Fatigue Strength Evaluation of Butt Welded Aluminum Alloy Component for Railway Vehicles, *Proc. of Spring Conference of Korean Society for Railway*, (2020) 242-249.
 23. N. L. Person, Fatigue of Aluminum Alloy Welded Joints, *Weld. J.* 50 (2) (1971) 77s-87s.