

< 논문 >

베벨각도와 미세기공에 따른 필렛 용접부의 피로강도평가에 관한 연구

홍춘희[†] · 오세종^{*} · 이원석^{**} · 이현우^{***}
(2006년 4월 20일 접수, 2006년 9월 11일 심사완료)

Fatigue Strength Estimation of the Fillet Weldments with Different Beveling Angle and Porosity

Chun Hyi Hong, Se Jong Oh, Won Seok Lee and Hyun Woo Lee

Key Words: Fillet Weldment(필렛 용접), Beveling Angle(베벨 각도), Porosity(미세 기공), Fatigue Strength Estimation(피로 강도 평가)

Abstract

The fatigue test of the fillet weldments was executed with different beveling angles and porosities. The beveling angles of 0°, 45° and 55° were compared with fatigue lives. After the fillet weldment failure, the porosities which found at the fractured surface were observed to account the effect on fatigue life. Finite element analysis was performed to correlate the fatigue strength and the sizes and the locations of porosities. The stress-strain field was severely affected by the length of notch and the sizes and locations of porosities. Based on the quantitative analysis of porosity effect, the total volume of porosities was a key factor for fatigue strength of the fillet weldment.

1. 서 론

일반적으로 베벨(beveling)가공된 필렛 용접의 경우, 자동용접 품질은 베벨각도(beveling angle) 및 루트 페이스(root face)량과 용접 토치 각도와 상관계수에 의해서 결정되는 경우가 많다.⁽¹⁾ 또한, 베벨가공이 없는 필렛 용접보다 베벨가공된 필렛 용접의 피로 강도는 루트 페이스량에 따라 변화한다. 그러므로 베벨가공된 필렛 용접의

피로강도를 정확히 규명하는 것은 설계 수명을 예측하는 중요한 인자이다.⁽²⁾

용접 가공 시 모재 표면이나 용재의 오염은 용접 후 응고 과정 중에 소재 내부에 불순물과 가스형성에 의한 결함을 유발한다. 이러한 미세 기공 결함은 피로 수명을 단축시키는 요인이 된다.

본 연구에서는 0°, 45°, 55°의 베벨각도를 선정하여 필렛 용접을 한 후 피로시험을 실시하였으며, 파단 후 용접부에서 기공의 크기 및 개수를 측정하여 용접 기공과 피로수명간의 상관계수를 분석하였다. 또한, 베벨각도 및 기공의 분포에 따른 피로 강도를 예측하기 위해 유한요소 해석을 실시하였다. 먼저, 각 베벨각도별 이음현상과 용접상태에 따른 용접 부를 모델링하였으며, 베벨각도별 시험 결과와 응력분포를 비교하였다. 또한, 베벨각도별로 구별하여 기공이 존재하지 않고 용접 초기 노치부에서 발생하는 응력과 용접

[†] 책임저자, 회원, 부산대학교 기계설계공학과
E-mail : jester_said@hotmail.com
TEL : (051)510-1486 FAX : (051)516-8597
^{*} 회원, 기계부품소재기술지원센터
^{**} 회원, 연암공업대학 기계설계과,
BEE in Queensland University of Technology
^{***} 회원, 부산대학교 기계공학과

노치부에 가공의 크기를 가정한 뒤, 이에 따른 피로 수명 변화 관계를 예측하였다.⁽³⁾

2. 피로시험 및 FEM 해석

2.1 시험편

시험편은 건설장비의 하부 swing-ring부 링 중심에서 반경방향으로 절단하고, 다시 링 부위에서 폭이 15mm가 되도록 절단하였다. 시험편의 형상은 Fig. 1(a)와 같다. 피로 시험 시 작용하중은 화살표 방향으로 인장 하중을 가하였다. 실제 건설장비 운전 시 swing-ring부에는 굽힘 하중을 받고 있으나, 시험 장비 및 시험편의 크기를 고려하여 인장하중으로 시험하였다. 일반적으로 pull-push 타입의 인장 하중에서의 피로강도가 굽힘 하중에 비하여 70%~80%정도의 값을 보이므로, 시험에서 설계수명을 만족하는 인장하중을 가하였을 경우 굽힘 하중은 충분히 만족한다고 볼 수 있다.

시험편의 두께별 화학조성은 Table 1과 같다. 각 두께별 및 압연방향에 따른 기계적 물성 치는 Table 2와 같다. 동일 두께에 대해 압연방향별 인

장강도는 거의 변화가 없었으며, 두께별로는 15mm가 25mm, 35mm보다 미세한 차이로 크게 나타났다. 각 베벨 각도 (0°, 45° 55°)에 따른 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1(b)와 같다. 각 형상별 노치길이는 초기 설계 시에는 45°의 경우 3mm, 55°의 경우 6mm, 0°의 경우 15mm였으나 용접 가공 후 용입에 의한 루트페이스의 감소로 45°의 경우 2mm, 55°의 경우 3mm, 0°의 경우 10mm 값을 보였으며, 이를 유한 요소 해석 시 초기 노치 길이로 적용하였다.

2.2 시험장비 및 시험조건

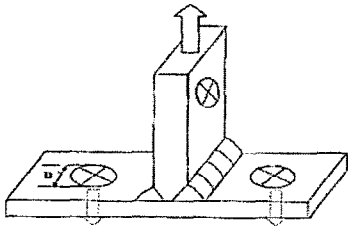
시험시간 및 장비의 진동을 고려하여 5Hz ~ 15Hz의 주파수를 적용하였다. 시험편의 장착을 위

Table 1 Chemical composition of SM490A (wt. %)

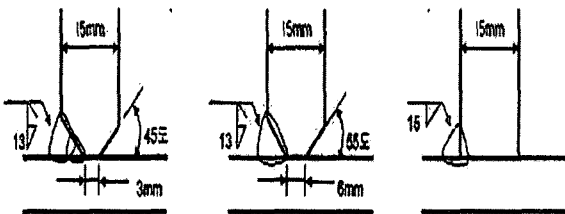
t (mm)	C	Si	Mn	P	S	Nb	Carbon equi.	
							C _{eq} *	P _{CM} **
15	0.13	0.41	1.12	0.016	0.012	0.03	0.32	0.20
25	0.14	0.39	1.31	0.018	0.013	0.03	0.36	0.22
35	0.15	0.39	1.39	0.017	0.009	0.04	0.39	0.23

$$*C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} (\%)$$

$$**P_{CM} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mb}{15} + \frac{V}{10} + \frac{Cu}{20} + 5B(\%)$$



(a) Specimen shape and load direction



(b) Weldment conditions with beveling angle (thickness is 15mm)

Fig. 1 Specimen and weldment conditions

Table 2 Mechanical properties of SM490A

t (mm)	Rolling Direction	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Bending Strength
15	L	398	546	25	Good
	C	395	541	23	Good
25	L	374	525	27	Good
	C	372	525	26	Good
35	L	374	524	27	Good
	C	372	521	25	Good

단, L : longitudinal to rolling direction

C : transverse to rolling direction

하여 설계, 제작된 지그와 시편의 체결된 모습은 Fig. 2(b)와 같다. 시편은 볼트를 사용하여 체결한 후에 인장하중을 가하였다. 시편의 하부에 중심을 맞추기 위한 구멍을 가공하였고, 지그의 상부에는 편을 설치하여 별도의 중심 조정 없이 시편의 중심을 시험기의 중심과 일치하도록 하였다. 시험편의 피로한도는 2×10^6 사이클로 정의하였다.

2.3 용접 부 기공 상태에 따른 피로수명 영향

용접 가공 시 모재 표면이나 용재의 오염은 용접 후 응고과정 중 소재 내부에 불순물과 가스 형성에 의한 결함을 유발한다. 이 중, 실제 시편의 파단면을 관측한 결과 루트 페이스와 용입부 첨단 주변에 존재하는 0.2mm 이하의 기공의 경우 슬래그 및 미립자의 분포가 대부분이었으며, 일반적으로 긴 균열과 짧은 균열을 정의하는데 있어서 짧은 균열의 크기 범위는 0.1mm~0.2mm로 정의하는 것으로 알려져 있다.⁽³⁾ 본 연구의 피로수명시험에서는 용접 부 첨단을 따라 광범위하게 노치와 미세기공이 존재함으로 인하여 용접부의 피로수명은 균열의 발생수명보다 균열의 성장수명으로 보는 것이 타당하다고 판단하여 관측이 가능한 0.2mm의 미세기공을 최소 치수로 고려하였다.

파단 후 시험편에서 관찰된 기공의 대표적인 사진들은 Fig. 3과 같다. 피로수명에 대한 미세기공의 영향을 파악하기 위해 파단면에서 기공의

분포 및 최소 0.2mm 이상의 지름을 갖는 기공의 개수를 관찰하여 기공의 개수와 피로수명과의 상관관계를 분석했다. 그리고 기공의 전체부피와의 상관관계를 구하기 위해서 영향을 미치는 것으로 나타난 기공들을 대상으로 가장 긴 폭과 짧은 폭을 측정하여 각각의 부피를 계산하였다. 그리고 관찰된 기공의 경우 몇몇 일정한 구형을 이루지 않는 것도 발견할 수 있으나, 대부분의 경우에서 구형을 이루고 있으므로 기공의 지름을 기준으로 구체로서의 부피를 계산하여, 한 시편당 관찰된 기공의 부피를 합산함으로써 시편당 존재하는 기공의 총 부피를 산출 하였다.

2.4 유한요소해석

자동 용접 조건에 있어서 중심부와 외곽의 용접 조건이 차이가 있었으므로 용접 부 내부와 외부 양측의 온도분포가 다소 차이가 있다. 용접조건에 따른 베벨각도별의 온도 분포는 Fig. 4와 같다. 그림의 오른쪽이 swing-ring 중심부이며, 왼쪽은 외곽부이다. 온도차이로 인한 열 변형으로 bowing 현상이 생기며, 시험편의 절단면을 측정

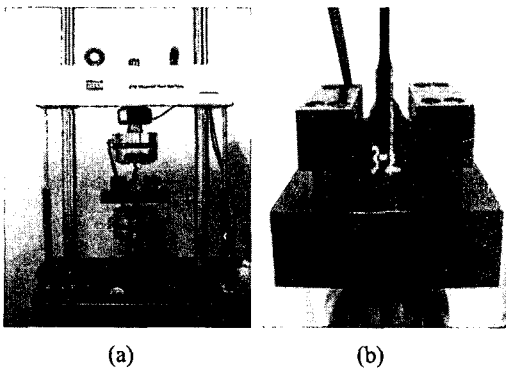


Fig. 2 Photographs showing the fatigue testing equipment : (a) MTS 810 material test system and (b) Specimen and jig

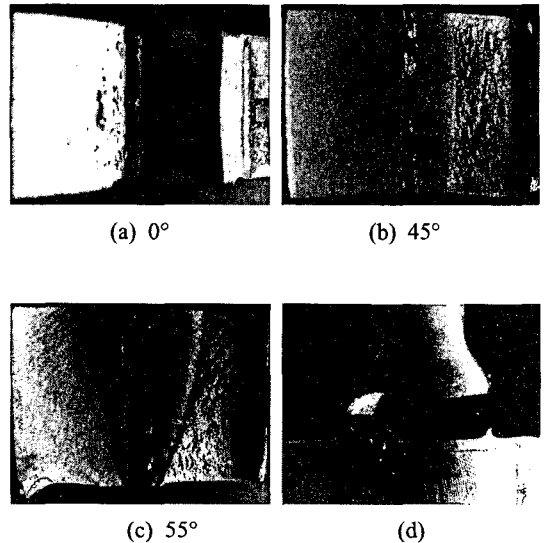
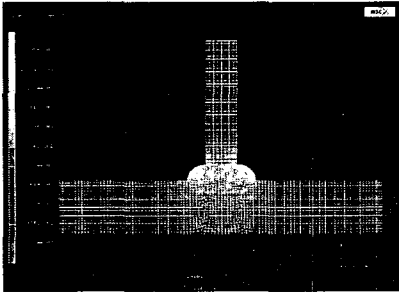
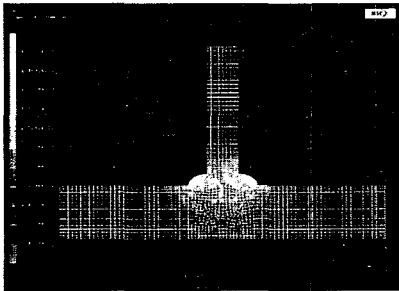


Fig. 3 (a)~(c) Porosities at fracture specimens (d) Strain gauge test

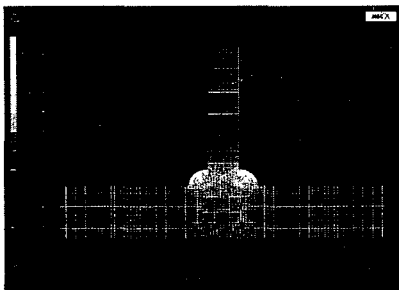
결과 2°~3° 가량의 굽힘이 발생함을 관측할 수 있었다. 굽힘 효과를 고려하기 위하여 시편의 노치 양단에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였으나, 미세한 차이를 보여 수치 해석에는 이를 고려하지 않았다. 이는 Fig. 3(d)와 같다.



(a) 0°



(b) 45°



(c) 55°

Fig. 4 Heat analysis of weldment specimen

각 베벨각도에 따라 온도 분포는 0°인 경우에서 HAZ부분이 가장 넓게 관찰되었으며, 45°가 가장 작게 나타났다. 베벨각도가 55°인 경우에는 45°보다 조금 넓은 영역의 HAZ(heat affected zone)가 관찰되었다.

또한, 용접부의 미세기공이 피로강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 유한요소해석을 실시하였다.⁽⁵⁾ 이를 위해 응력 해석의 조건을 베벨각도, 기공의 위치 및 기공의 크기로 구별하여 실시하였다. 즉, 0°, 45°, 55°의 베벨각도에 대해 초기 노치 끝단부로부터 기공까지의 거리를 1mm, 5mm, 10mm로 구분하였으며, 기공의 직경 크기를 0.2mm, 0.5mm, 1mm, 5mm로 설정하여 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 피로 수명 선도

현재 사용되고 있는 건설 장비 하부의 swing-ring 두께는 25mm, 35mm이며, 베벨각도는 45°이다. 두께 질감에 따른 피로 수명을 확보하기 위해 15mm, 25mm의 두께에 대해 피로 시험을 실시하였다. 두께 25mm의 경우 작용응력 114MPa에서 $1.8 \sim 2.5 \times 10^6$ 회의 수명을 보였다. 사용 장비의 피로 설계 수명기준은 2×10^6 회이므로, 이 응력을 피로한도로 설정하였다. 두께 15mm에서 114MPa의 응력을 적용한 결과, 피로 수명은 25mm인 경우보다 최대 20% 정도 길게 나타났으며, 설계 수명의 기준으로 볼 때에는 10%정도 긴 피로수명을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 Table 2에서와 같이 두께 15mm, 25mm인 경우에 인장강도가 각각 540MPa, 520MPa임을 고려하면 시편의 치수효과 및 기공의 영향으로 볼 수 있다. 그러나 일반적 피로수명의 분산범위가 50%에서 200%의 범위를 가짐을 감안할 때, 시편의 두께효과는 거의 무시할 수 있는 결과로 판단된다. 그러므로 두께 15mm로 대체가 가능하리라 판단되며, 두께를 15mm에 제한하여 각 베벨각도별로 피로시험을 실시하였다.

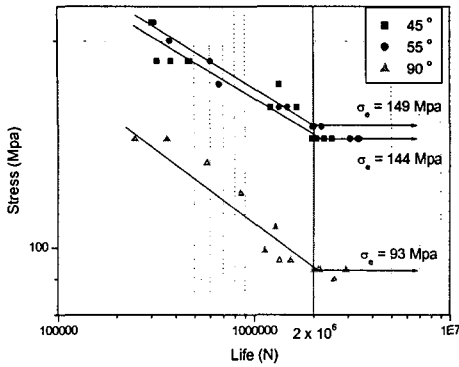


Fig. 5 S-N Curve for different beveling angles

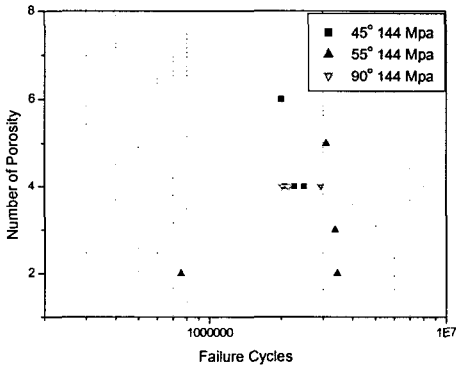


Fig. 6 Porosity effects on fatigue life of weldment

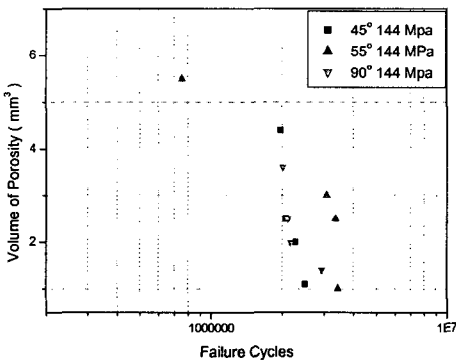


Fig. 7 Porosity effects on fatigue life of weldment (volume of porosity)

베벨각도에 따른 피로한도는 0°에서는 93MPa, 55°에서는 149MPa, 45°에서는 144MPa로 나타났다

Table 3 Fatigue life of each porosity sizes and numbers at different beveling angles

Angle	Specimen	Porosity size(mm)				Fatigue life
		0.2	0.5	1	5	
		Number				
0°	1	1		3		2,011,071
	2	2	2			2,939,750
	3		4			2,165,431
	4		3	1		2,116,548
45°	1		4			2,275,961
	2		3	1		2,070,348
	3	3	1			2,499,095
	4	2		4		1,966,051
55°	1		1		1	756,181
	2		2			3,442,500
	3		1	2		3,367,138
	4		4	1		3,088,962

으며, 피로강도와 수명곡선의 결과는 Fig. 5와 같다.

그러나 이 경우는 용접 후 잔류 응력을 제거하는 작업 현장의 특성을 고려하면 주된 영향으로 판단하기는 어렵다. 또 다른 원인으로는 베벨각도가 55°에서 용접 조건에 따른 용접 비드 각장 (leg length)이 45°인 경우보다 길게 형성되어 노치부의 응력이 45°보다 낮아지는 경우로 판단할 수 있다. 그러나 이 차이 또한 미세함을 측정으로 알 수 있었다.

3.2 용접 부 기공 상태에 따른 피로수명 영향

Swing-ring을 제작한 후에 내부와 외부에서 용접을 시작해서 끝나는 부위, 링 부위의 결합부등 총 네 부위에서 용접 비 정상부위를 발견할 수 있으며, 시험 후 파단면에서 크고 작은 용접 기공을 많이 발견할 수 있었다. 파단면을 관찰한 결과 기공의 개수에 따른 피로 수명과 관계는 Fig. 6과 같다. 그러나 기공의 개수만으로는 피로 수명에 끼치는 영향을 일관성 있게 표현하지 못한다는 것을 파악할 수 있었다.

그러므로 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 파면에

존재하는 기공의 총 부피를 구하고, 피로수명과 상관을 비교하였다. 실제 파단수명과 기공의 총 부피의 상관관계가 Fig. 7을 통해서 보듯이 비례적으로 나타남으로서 즉, 동일 베벨각도에 대하여 기공의 총 부피가 작을수록 피로수명이 길어진다는 것을 알 수 있었으며, 개별 기공의 치수나 위치보다는 총 기공의 부피가 피로수명에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

또한, 기공의 크기가 0.2mm~0.5mm 사이인 경우에는, 그 개수에 따른 피로수명에의 영향이 적었으나, 기공의 개수는 작더라도 기공의 크기가 1mm 이상인 경우에는 피로수명에의 영향이 큰 것으로 나타났으며, 이는 Table 3과 같다.

3.3 용접 기공별 응력해석

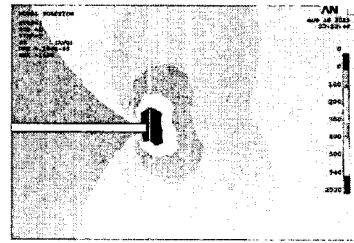
응력해석을 통한 최대 응력 값의 발생 지점을 시험편의 실제 파단면과 비교하여, 이를 토대로 각 베벨각도별로 균열이 발생할 지점을 예측할 수 있었다.

미세기공을 갖지 않는 조건에서는 0°에서 가장 높은 응력 값이 나타났고, 45°의 경우 최대 응력 값이 55°인 경우보다 작아, 45°시편이 가장 큰 피로수명을 가질 것으로 예측할 수 있었다. 이는 베벨각도가 클수록 피로수명이 단축됨을 보여주는 것이다. 각 응력해석 결과는 Fig. 8과 같다.

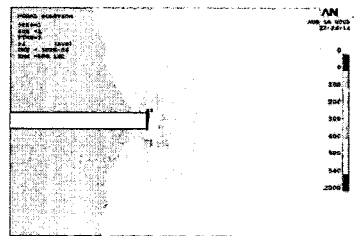
그러나, 용접 노치 선단에서 1mm 떨어진 위치에 직경 5mm의 기공이 존재하는 경우, 55°의 최대 응력 값이 45°의 경우보다 작게 나타나며, 55°시편의 피로수명이 45°보다 높게 나오는 것을 예측할 수 있다. 각 응력해석 결과는 Fig. 9와 같다.

이상의 결과에서 55°의 시편에서의 피로 수명이 45°의 경우보다 높게 나올 수 있었던 이유 중 하나가 미세기공의 존재로 인한 것임을 확인할 수 있었다. 그러나 피로 시험 결과 45°와 55°의 베벨각도별 피로 강도 및 피로 한도는 근소한 차이를 보임으로써 시험편 내부의 기공이 다양하게 분포되어 있음을 예측하게 하였다.

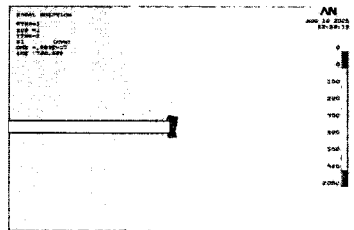
또한, 동일 베벨각도에서도 미세기공이 존재하는 위치와 크기에 따른 응력해석 결과는 미세기공이 초기 노치 선단과 가까울수록, 기공의 크기가 클수록 노치 선단에 발생하는 응력장과 기공 주위의 응력장이 연결되어 확산됨으로서 피로 수



(a) 0° ($\sigma_{\max} = 1,423$ MPa)



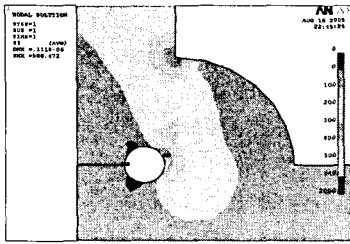
(b) 45° ($\sigma_{\max} = 596$ MPa)



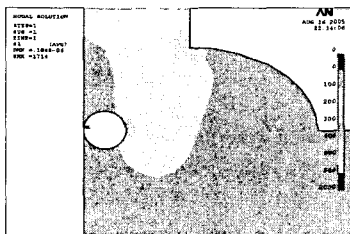
(c) 55° ($\sigma_{\max} = 760$ MPa)

Fig. 8 Stress analysis without porosity at each beveling angles

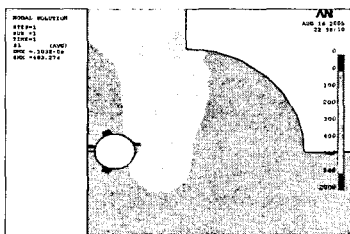
명에 끼치는 영향이 커짐을 확인할 수 있다. 즉, 피로수명이 짧아진다. 그러나 초기 노치 선단과 기공이 완전히 합쳐지는 모양을 형성하는 경우에는 상대적으로 예리하지 않은 노치로 인해 응력이 완화되는 현상을 보였다. 이는 균열 선단에 임의의 hole이 존재하여 균열 전진을 지연시키는 경우와 동일한 현상이다.



(a) 0° ($\sigma_{max} = 588 \text{ MPa}$)



(b) 45° ($\sigma_{max} = 1,714 \text{ MPa}$)



(c) 55° ($\sigma_{max} = 403 \text{ MPa}$)

Fig. 9 Stress analysis of 5mm porosity size at each beveling angles

4. 결론

베벨가공 된 필렛 용접부의 피로 시험 및 기공의 영향을 파악하기 위해 수치 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 베벨각도가 0°인 경우는 45°와 55°의 피로 한도에 비해서 70% 정도의 피로 한도를 나타내어 바람직한 제작 조건이 아닌 것으로 판단된다. 또한, 55°의 베벨각도는 45°의 경우보다 상대적으로

로 초기 노치 길이가 1mm~2mm 가량 길었음에도 불구하고 큰 용접 각도로 인한 용입량의 증대로 실질적인 노치 길이는 거의 차이를 나타내지 않았고, 인장 잔류응력이 상대적으로 작았기 때문에 거의 비슷한 피로 수명 선도를 나타내었다.

(2) 용접부의 미세기공은 피로수명에 영향을 미치며, 초기 미세기공의 개수보다는 기공의 크기가 피로수명에 끼치는 영향이 크게 나타났다. 즉, 기공이 없는 경우에 베벨각도 45°의 최대 응력 값이 55°의 약 80%로 나타나 긴 피로수명을 예측할 수 있었다. 그러나 노치 선단에서 동일 거리, 동일 크기의 기공이 존재할 경우, 55°의 응력 값이 더 낮게 나타났다. 이는 베벨각도 변화에 따른 피로 수명에 미세 기공이 중요한 영향을 끼친다는 것을 보여주는 것이다.

참고문헌

- (1) Maddox S. J., 1991, "Fatigue Strength of Welded Structures," Abington Publishing, Second Edition.
- (2) Kim, J. H., Goo, B. C., 2004, "A Study on the Fatigue Characteristics of SM490A Material due to the Welding Type," *Proceedings of the KSME 2004 Fall Annual Meeting*, pp. 274~278.
- (3) Stephens R. I., Lee, H. Y., 1984, "Comparison of Short and Long Fatigue Crack Threshold Behavior of Wrought and Cast Mild Steel," *Proc. of Fatigue 84*.
- (4) Yoon, J. W., 2000, "Study on the Porosity Source of Aluminum Alloy Welds," *Special Lecture and the Science Announcement Contest of the KWS*, Vol. 2, pp. 208~210.
- (5) Lawrence F. V. et al., 1975, "Effect of Porosity on the Fatigue Properties of 5083 AL Alloys Weld Metals," *WRC Bulletin 206*.
- (6) Kim, Y. I., Kang, J. G., Heo, J. H., 2004, "Application of 1mm Fictitious Notch Radius Approach to the Fatigue Strength Assessment of Weldment Joint," *Special Lecture and the Science Announcement Contest of the KWS*, Vol. 43, pp.

275~277.

(7) Hobbacher A. F., 2003, "Effective Notch Stress Method in Comparison with Other Methods in Fatigue Design of Welded Structures," *Paton Welding Journal c/c of Avtomaticheskala Svarka*

2003, Part 10/11, pp. 117~121.

(8) Hutchings F. R. and Paul M. Unterweiser, 1981, "Failure Analysis," *American Society for Metals*, the British Engine Technical Reports. Metals Park, Ohio.