

# 원심분리기용 오스테나이트계 스테인리스강의 피로강도에 관한 연구

이미해<sup>†</sup> · 김용수 · 박준우<sup>\*</sup>

서울산업대학교 에너지환경 대학원 에너지안전과 · \*로이드인증원  
(2008. 3. 31. 접수 / 2008. 6. 25. 채택)

## A Study on Fatigue Strength of Austenitic Stainless Steel for Centrifuge

Mee-Hae Lee<sup>†</sup> · Yong-Soo Kim · Joon Woo Park<sup>\*</sup>

Department of Safety Engineering, Graduate School of Energy & Environment, Seoul National University of Technology  
\*LRQA Korea

(Received March 31, 2008 / Accepted June 25, 2008)

**Abstract** : For industrial centrifuges, the state of their welding areas, even with a naked-eye observation, offers potential safety problems such as inconsistent bead formation. STS304, which is used mainly in centrifuges, is made of metal alloys with chrome and nickel as the main ingredients, offering excellent corrosion resistance, thermal resistance, and high strength, and thus allowing it to be used for diverse purposes. This paper conducted tensile and fatigue tests of STS304 to improve the safety of centrifuges. In the findings, for the static behavior of the STS 304 material, welded specimens increased their yield and tensile strength compared with the base test specimens, but decreased their elongation ratio. Also, the data dispersion phenomenon of welded specimens remarkably increased.

**Key Words** : centrifuge, fatigue strength, STS304

### 1. 서론

고속회전을 이용하여 두 물질 이상을 분리하는 원심분리기는 그 회전 또는 고열로 인한 재질의 손상 또는 용접부위의 파손 등 위험성이 뒤따르고 있으며, 1997년부터 2000년까지 4년 동안 일반재해로 89명, 사망재해로 7명의 재해자가 발생되었다<sup>1)</sup>. 아직 원심분리기의 경우 산업안전보건법상 위해위험기계기구로 분류되지 않았으나, 정부에서는 안전인증기준(안)을 마련하고자 추진하고 있다<sup>2,3)</sup>.

원심기는 사용목적에 따라 의료용, 폐수 처리용, 우라늄농축용, 생산용, 실험용으로 분류될 수 있으며, 이때의 원심력(F)은 중량(W)에 비례하고, 원주속도(v)의 2승에 비례하여 커지게 되며, 이에 따라 회전체 내부에 발생하는 응력 또한 이와 상응하여 증가하게 된다. 그러므로 내용물의 튀어나옴, 버켓 등의 파괴, 회전부분과의 접촉 등의 위험이 있어 이를 방지하기 위해 방호장치를 갖추어야 한다.

국내 원심기 제작에 따른 인용코드 및 규격으로

서는 EN, ISO, KS가 주로 활용되고 있다. EN 12547 (Centrifuges-Common safety requirements) 5.5 구조 재료에서는 “원심 분리기를 사용함에 있어 위험요소가 발생되지 않는 재료가 사용되어야 한다”라는 것을 표시하도록 되어 있다<sup>4)</sup>. 그러나 아직 국내 안전인증기준(안)에서는 재료 및 강도에 대한 구체적인 기준이 검토되지 못하고 있다. 이외에도 ISO 6178<sup>5)</sup> 원심기 구조와 안전기준과 EN 12547 원심기 공통적 안전요구조건이 기술되어 있다.

원심기에 관한 국내 규격으로는 의료용 원심분리기 KS P 31064<sup>6)</sup>, 전기탈수기 KS C 9318<sup>7)</sup>, 수평형 스크류 원심기 KS B 6354<sup>8)</sup>가 있다. 원심기에 사용되는 스테인리스강 304는 크롬과 니켈을 주성분으로 하는 철의 합금으로 우수한 내식성, 내열성 및 고강도를 갖추고 있어 용도가 다양하다. 그리하여 원심기이외에 건축물의 내·외장재, 식품 및 화학공장 설비, 대중교통수단의 의장설비, 핵폐기물 처리 등의 여러 분야에 사용되고 있다.

이에 본 논문에서는 수평형 스크류 원심분리기의 주 재질인 STS 304의 정적거동을 파악하고자 항복 및 인장강도 시험을 수행하였으며, 용접부에 대

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
hae75@korea.com

한 피로강도 등을 비교하여 원심기 구조적 안전성을 검토하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험장치

#### (1) 인장시험

재료의 기계적 물성치를 평가하기 위하여 Instron사의 서보제어식 유압시험기(model 8801)를 이용하여 ASTM E8M에 따른 인장시험을 실시하였다. 시험 속도는 변위제어하의 2mm/min이며, 시편의 평행부에 표점거리(Gage length)가 10mm인 신장계(Extensometer)를 부착하여 시편이 파단될 때까지 변형률을 측정하여 연신율을 계산하였다. 시험이 진행되는 동안 하중, 변위, 변형률 신호를 제어기(controller)를 통하여 PC에 연속적으로 기록하였다. 또한 시험편의 수량은 모재 및 용접시험편에 대하여 각각 5개씩을 준비하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 유압시험기의 모습을 나타내고 있다.

#### (2) 피로시험

일축 인장 피로 시험은 ASTM E 466 및 JSME S 002<sup>9)</sup>에 따라 시험을 실시하였다. 시험 장비로는 Instron model 8801을 사용하였으며 피로시험에 앞서 하중, 변위 및 변형률에 대한 보정(Calibration)을 실시하여 시험기의 정밀도를 확인하였으며, 모든 시험의 제어 및 데이터의 처리, 결과 해석은 PC를 통해 수행하였다. 일축 인장 피로시험은 모재 및 용접조건에 따라 각각 Fig. 2와 같이 준비된 시

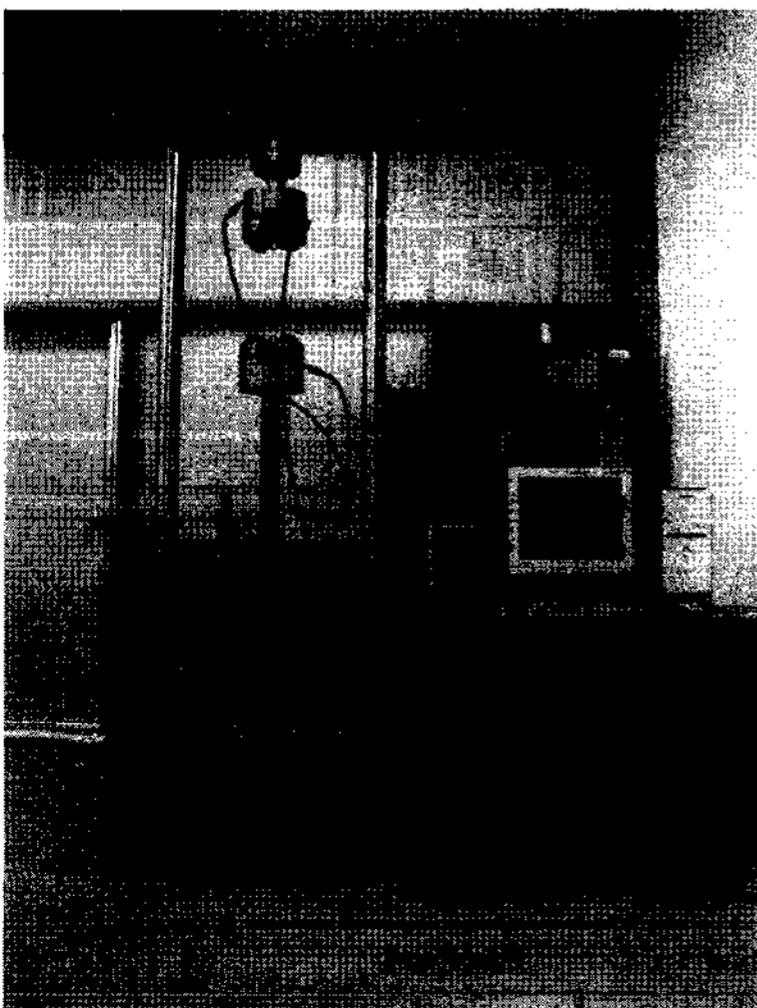


Fig. 1. Fatigue testing machine.

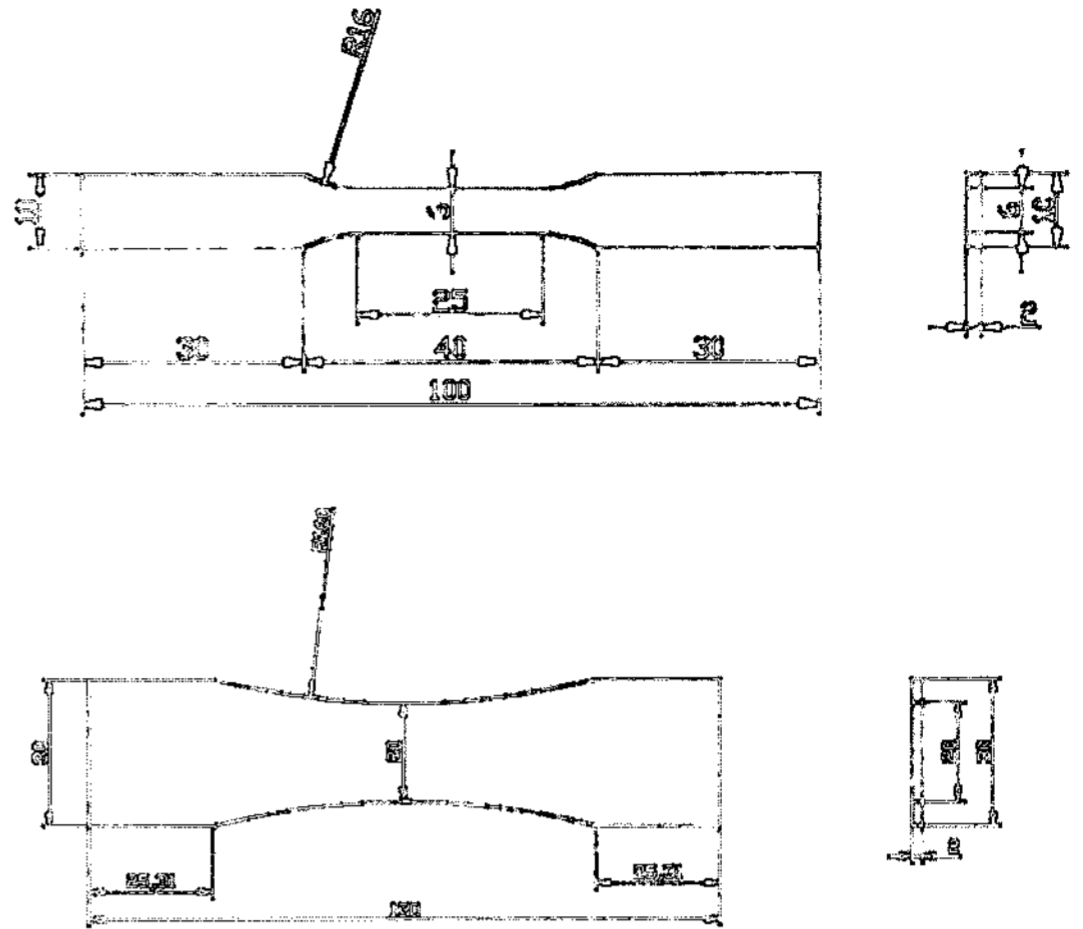


Fig. 2. Specimens.

험편 12개를 대상으로 수행하였다. 시험시의 속도는 20Hz, 응력비의 경우  $R=0.2$ 로 설정하였다.

### 2.2. 시험재료

STS 304 2장을 맞대기 형식으로 가조립한 후 TIG 용접(Tungsten Inert(Argon) Gas Welding, TIG) 방법을 통하여 2장의 STS 304를 용접하였으며 Table 1에는 물질의 화학적 성분을, Table 2에 용접 조건<sup>10)</sup>을 나타내었다. 이에 사용된 STS 304의 두께는 2.0mm이다. 이상의 방법으로 용접된 2장의 철판을 이용하여 ASTM E8M<sup>11)</sup>(Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) 및 ASTM E466<sup>12)</sup>(Standard Test Method for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials) 규격에 따라 인장시험편 및 피로시험편을 제작하였다.

Table 1. Chemical Composition of STS 304(%)

성분	Fe	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
함량(%)	70.04	0.43	1.04	0.023	0.005	18.24	8.35

Table 2. Welding Specification

Classification	Specification
Welding method	TIG
Welding machine	Semi-Auto Robot Current : 270A, Voltage : 28V
Wire size	Diameter 1.2
Material	Filler metal spec : A5.18 Class : AWS ER 70S-6
Pass	3 Pass
Direction	Backhand
Shielding gas	Ar 80% + Co <sub>2</sub> 20%

### 3. 시험결과

#### 3.1. 정적인장 특성 평가

STS 304 재질의 용접에 따른 정적 거동의 변화 특성을 평가하기 위하여 5개의 시편을 이용하여 인장시험을 실시한 결과, 용접시험편의 항복 및 인장강도는 모재시험편에 비하여 증가되어 있음을 알 수 있었다. 변형률의 경우에는 용접시험편이 모재보다 감소되어 있음을 알 수 있다. 또한 5개의 모재시험편의 정적거동을 나타낸 Fig. 3(a)로부터 STS 304 재질의 모재시험편의 항복 및 인장강도는 데이터의 산포 현상이 거의 발생하지 않고 있으며 이러한 경향은 파괴변형률의 경우에도 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 용접시험편 5개에 대한 정적거동을 나타낸 Fig. 3(b)를 살펴보면 용접시험편의 경우에는 모재시험편의 경우에 비하여 항복강도, 인장강도 및 파괴변형률의 산포현상이 상당히 크게 발생함을 알 수 있다.

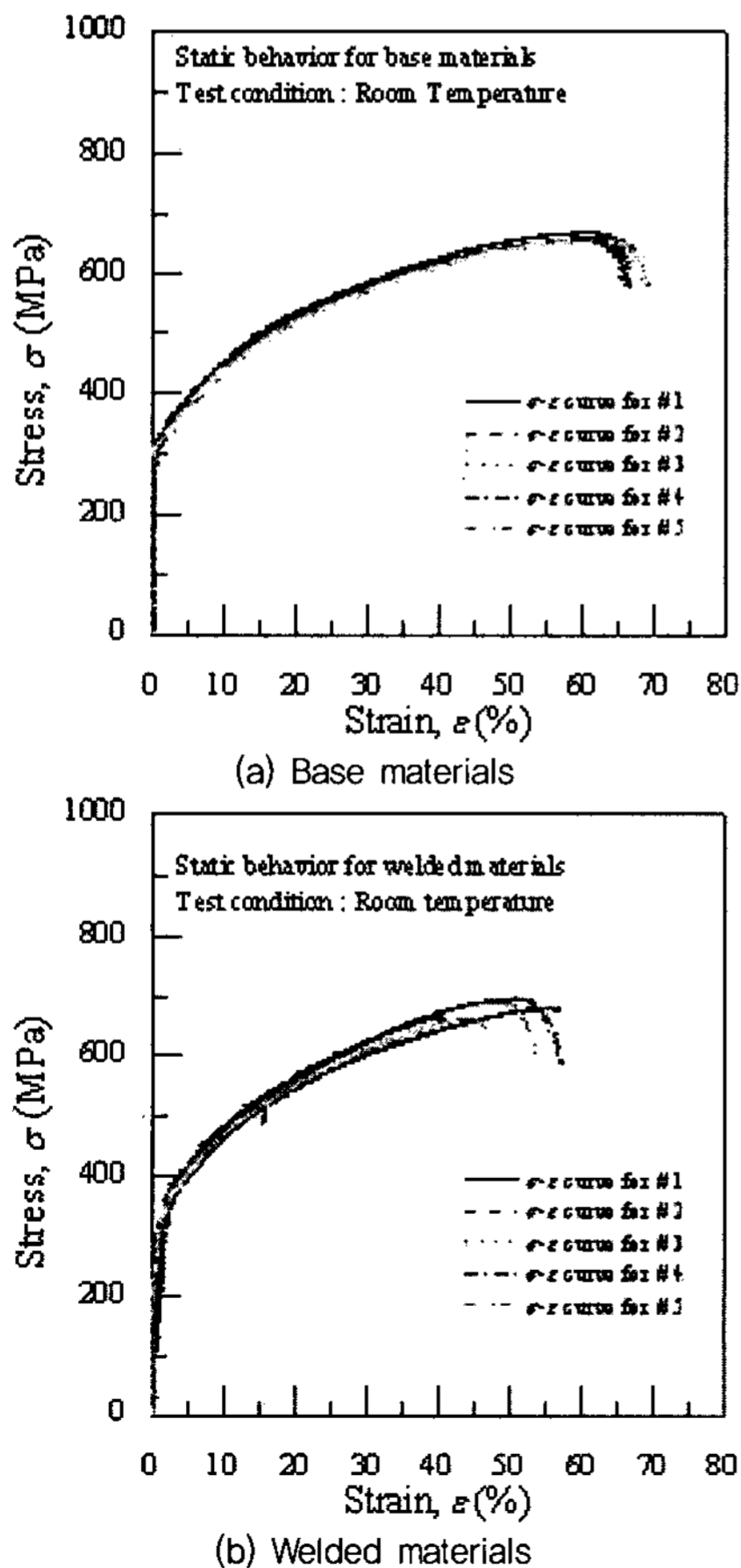


Fig. 3. Stress-strain curve.

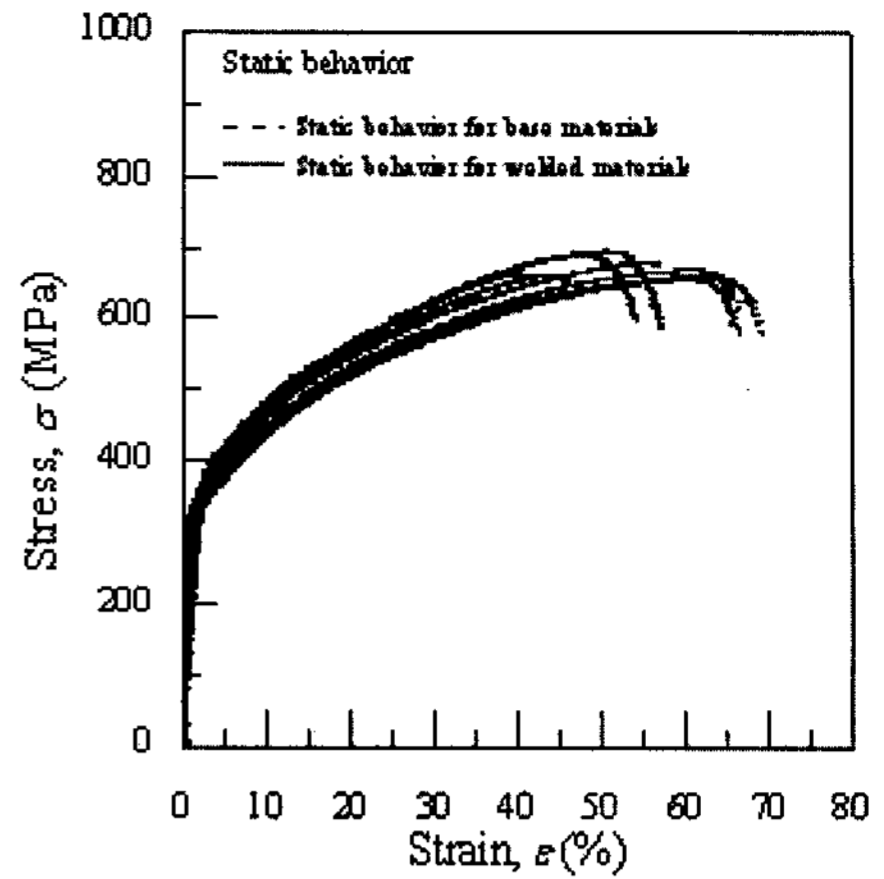


Fig. 4. Stress-strain curve(overall).

모재 및 용접시험편의 정적거동에 대한 보다 자세한 평가를 위하여 모재 및 용접시험편에 대한 응력-변형률 선도를 Fig. 4에 동시에 나타내었다. 점선으로 표시된 선형이 용접시험편이며, 실선으로 표시된 아래 선형이 모재시험편이다. 그림에서 알 수 있듯이 용접시험편의 항복 및 인장강도는 모재 시험편에 비하여 증가되어 있음을 알 수 있으며 또한 변형률의 경우에는 용접시험편의 경우가 감소되어 있음을 알 수 있으며 이는 용접으로 인한 취성의 증가에 기인한다고 판단된다.

Table 3. Strength & Elongation – Base material

No	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Fracture Strain (%)
1	311.07	658.85	66.95
2	315.59	662.60	68.48
3	311.92	658.84	65.97
4	323.99	671.30	66.67
5	316.34	659.04	69.59
Average	315.78	662.12	67.46
St.dev	5.12	5.37	1.52

Table 4. Strength & Elongation – Welded materials

No	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Fracture Strain (%)
1	341.22	681.78	57.02
2	327.71	697.36	57.22
3	318.34	692.07	54.47
4	294.96	666.70	41.21
5	297.83	664.68	46.33
Average	316.01	680.52	51.25
St.dev	19.69	14.67	7.15

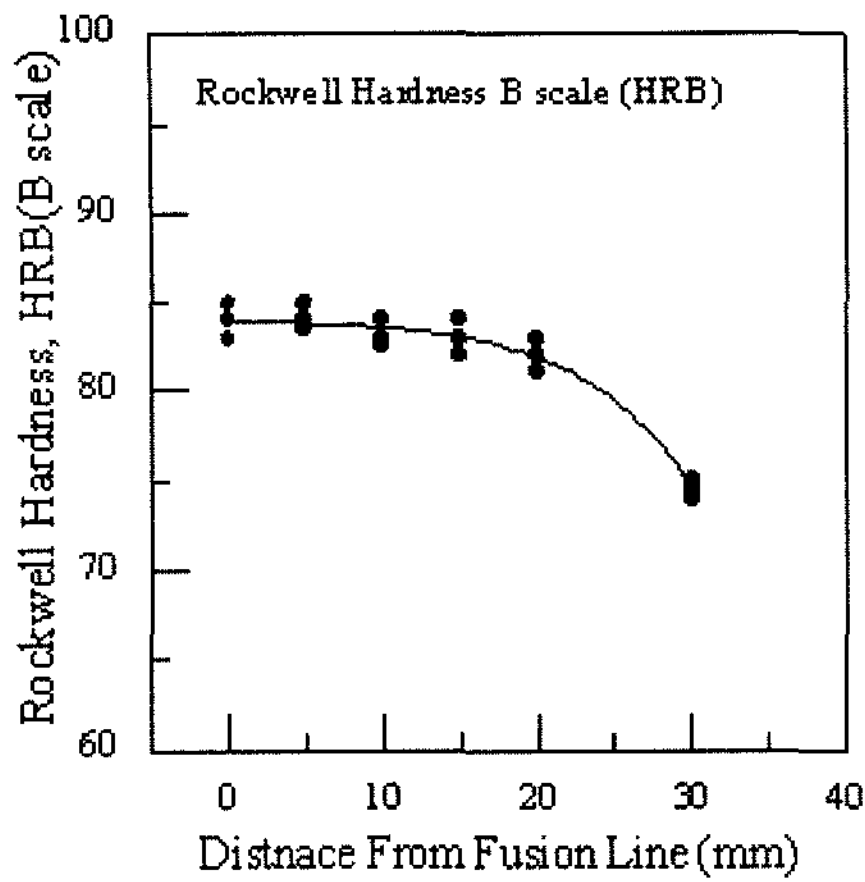


Fig. 5. Rockwell hardness distribution.

이러한 경향을 보다 명확히 검토하기 위하여 항복강도, 인장강도 및 파괴변형률 자료를 Table 3, Table 4에 정리하여 나타내었다.

항복강도의 경우 용접시험편의 경우가 약간 증가된 결과를 보이고 있으나 용접시험편의 인장강도의 경우 모재시험편에 비하여 상당한 증가를 나타내고 있으며 특히 재질의 연성을 나타내는 변형률의 경우 용접시험편의 급격한 감소양상을 보이고 있다. 이러한 경향의 원인은 용접에 따른 재료의 취성 강화로 판단되며 이로부터 STS304 재질의 정적강도 특성은 용접의 영향을 크게 받음을 알 수 있다. 이러한 용접의 영향을 보다 면밀히 검토하기 위하여 용접시험편을 대상으로 용접 중심선으로부터 모재방향으로의 로크웰 경도(Rockwell hardness)를 측정하여 이의 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 용접 중심점에 가까울수록 즉, 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone)에서는 경도가 증가하고 반대로 용접 중심점에서 멀어질수록 즉, 용접으로 인한 열영향을 받지 않은 모재부에서는 이의 크기가 용접 중심점에 비하여 20% 감소됨을 알 수 있었다. 이러한 경향은 용접으로 인한 열 영향이 존재하면 재료의 취화현상으로 인하여 취약해지는 현상으로 설명될 수 있다. 따라서 실제 원심분리기의 설계 및 제작시에는 용접으로 인한 재료의 특성이 크게 변화하므로 이에 대한 보다 많은 주의가 필요하다고 판단된다.

### 3.2. 피로 수명

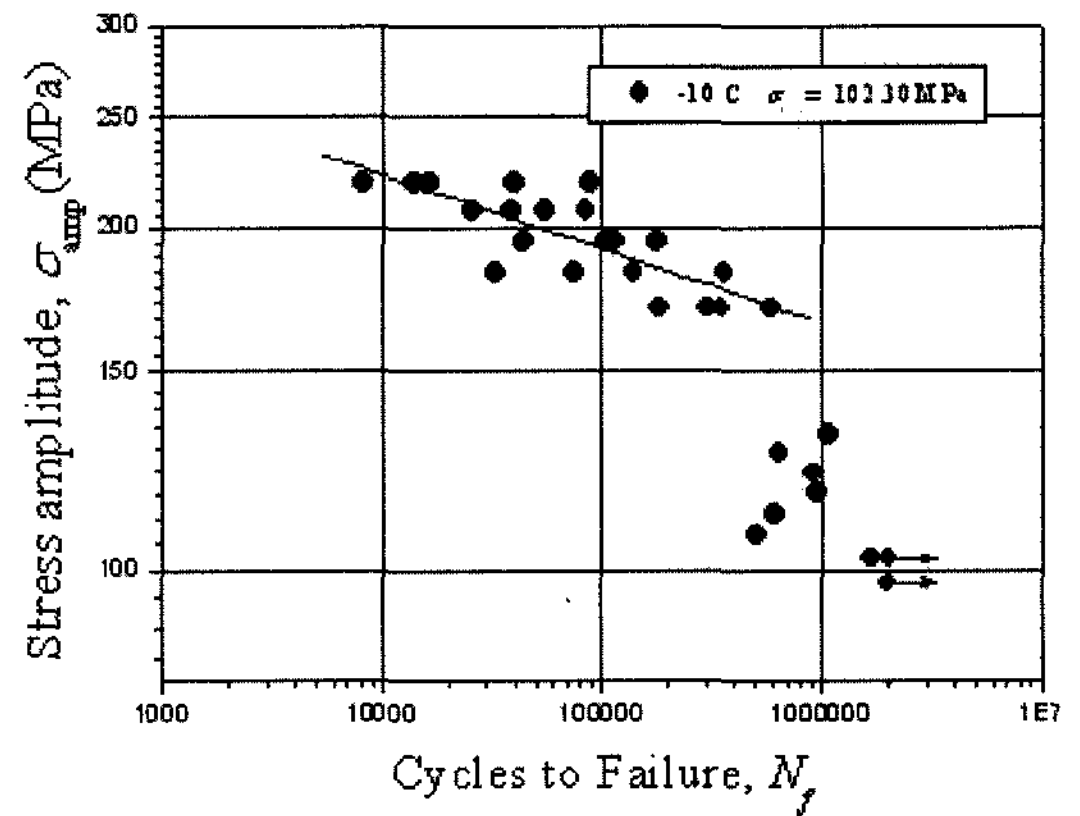
구조물에 작용하는 실제 하중하의 피로수명을 평가함에 있어서 부하 응력진폭과 피로수명과의 관계는 양대수(log-log) 그래프 상에 나타내면, 이의

관계식은 다음과 같다<sup>13)</sup>.

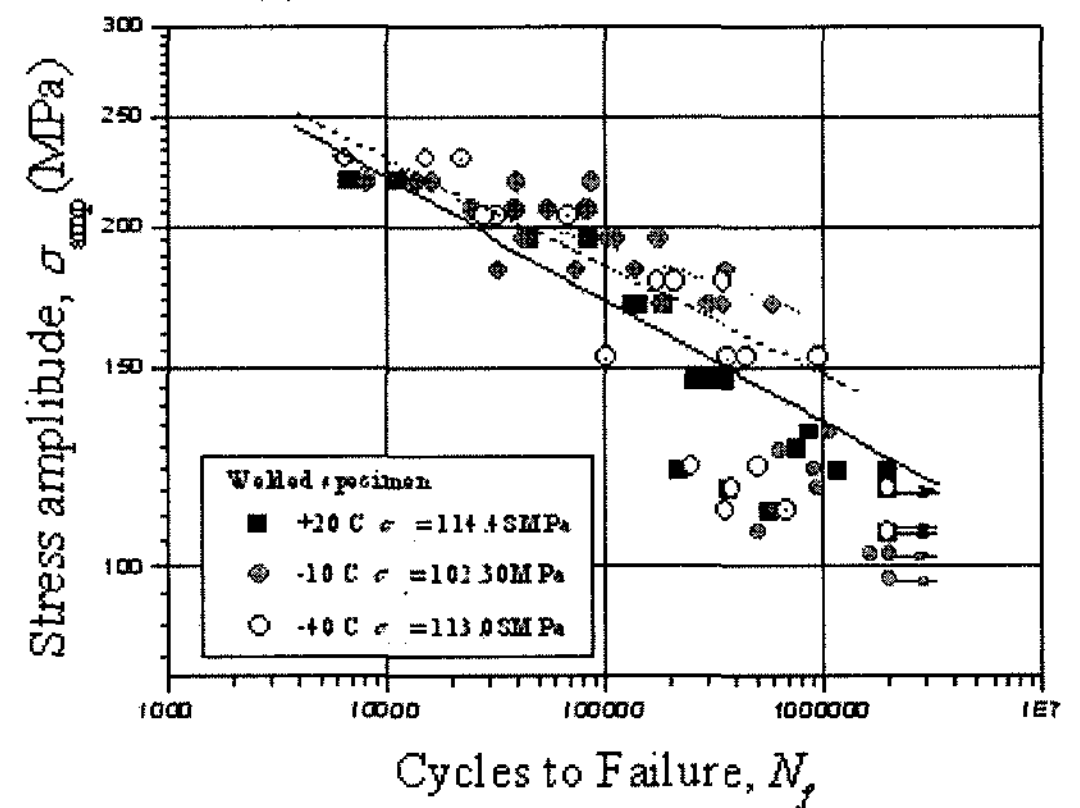
$$\sigma_{amp} = AN_f^B \quad (1)$$

여기서 A 및 B는 재료상수이다.

Fig. 6은 STS 304 용접시험편에 대한 최대응력 대 피로수명 시험 결과와 위 식에 의한 예측수명을 시험편 종류, 즉 모재 및 용접시험편에 대하여 나타낸 것으로서 그림에서 알 수 있듯이 스테인리스강의 피로수명은 시험편의 종류와 관계없이 위의 식의 형태로 잘 근사되며 이로부터 본 실험에 의하여 구해진 피로수명은 신뢰성이 있음을 알 수 있다. 각 시험 온도에 대한 재료상수 A, B의 값은 Table 5에 나와 있다.



(a) S-N curve for base materials



(b) S-N curve for welded materials

Fig. 6. S-N curves.

Table 5. Material properties

classification	A(MPa)	B
Base materials	592.15	-0.10717
Welded materials	400.33	-0.06383

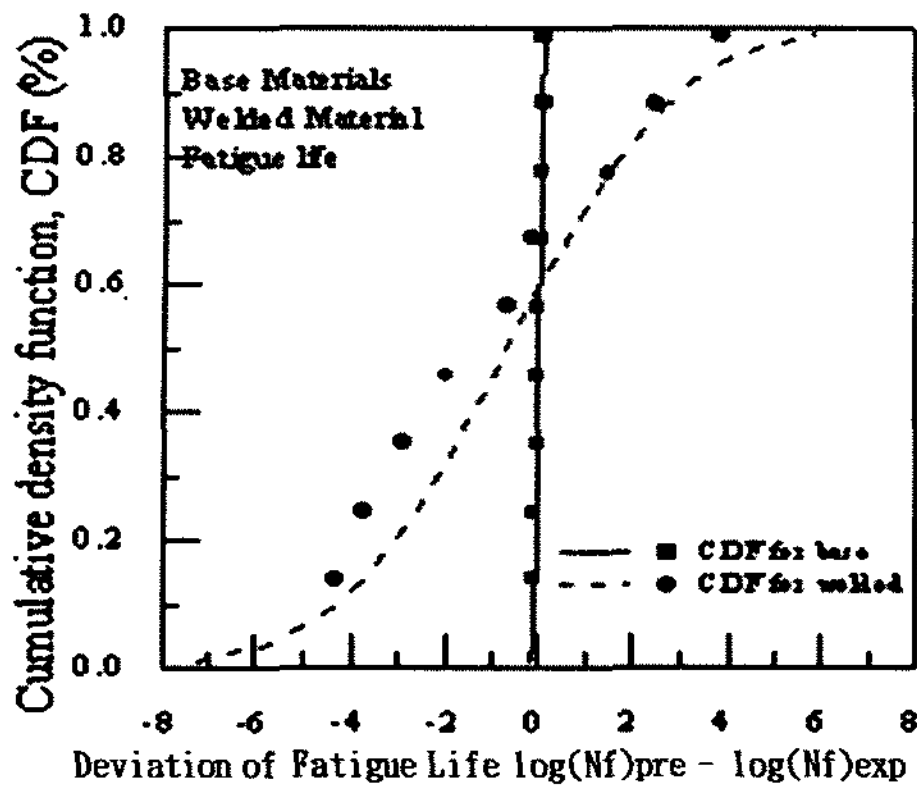


Fig. 7. CDF for fatigue life.

대표적인 기계적 체결방법인 용접은 강력한 열원에 의하여 접합하는 고유의 특성으로 인하여 모재에 상당한 열영향을 미치게 되며 이로 인한 피로특성 역시 모재와 비교하여 상당히 상이할 것으로 판단된다.

데이터의 산포 현상을 보다 명확히 검토하기 위하여 평가된 예측수명과 편차에 대한 누적분포값을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 피로수명 편차의 변동성은 정규분포에 잘 근사되고 특히 이들의 변동성은 모재시험편에 비하여 용접시험편에서 매우 크게 평가됨을 알 수 있다. 즉, 용접시험편의 피로수명에 나타나는 변동성은 모재시험편과 비교 자체가 불가능할 정도로 매우 크게 나타나고 있다. 따라서 스테인리스강의 피로수명의 변동성은 용접의 영향을 매우 크게 받음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서 대상으로 있는 산업용 원심분리기 풀리의 제작시, 이의 용접부 상태를 육안으로 관찰하여도 비드의 형성이 일정하지 않는 등 용접부의 불량을 관찰할 수 있었다. 원심분리기의 안전성을 개선하기 위하여 잠재적인 위험성을 내재하고 있는 재료의 강도와 용접부위의 중요성을 도출하고자 재료와 용접부위에 관하여 시험한 결과 다음과 같았다.

1) STS 304 재질의 정적거동의 경우, 항복 및 인장강도는 용접시험편이 모재시험편에 비하여 증가되었으나 연신율은 오히려 감소하였다. 또한 용접시험편의 데이터 산포현상이 크게 증가되었음이 밝혀졌다. 이러한 거동은 용접으로 인한 재료의 취성

이 증가되고 또한 용접 결함 등으로 인하여 재료의 불확실성이 증가된 것에 기인한다고 판단된다. 따라서 STS 304 재료를 이용한 구조물의 설계 및 제작시 용접으로 인한 재질 특성의 저하 및 산포현상에 보다 많은 주의를 기울여야 한다고 판단된다.

2) STS 304 재료의 피로강도 및 수명은 상온조건에 비하여  $-10^{\circ}\text{C}$ 의 저온조건에서 높게 평가되고 피로한도 역시 증가되는 현상을 보이고 있다. 또한 용접시험편의 피로수명은 온도조건에 관계없이 모재 시험편에 비하여 크게 저하되며 이는 용접 결함 또는 모재부에 발생하는 열 영향으로 인하여 발생하는 것으로 판단된다.

원심분리기의 안전성을 개선하기 위하여 잠재적인 위험성을 내재하고 있는 재료의 강도와 용접부위의 중요성을 인지시키기 위하여 재질 및 용접부위 및 방법 등에 대한 상세내역이 포함된 기준 및 규격이 개발되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

- 1) 노동부, “산업재해통계분석”, 1997~2005.
- 2) 한국산업안전공단, “위험기계기구 재분류에 관한 연구”, 2004.
- 3) 한국산업안전공단, “제품별 인증기준개발에 관한 연구 II(안)”, 2006.
- 4) EN 12547: Centrifuges-Common safety requirements
- 5) ISO 6178 Centrifuges-Construction and safety rules
- 6) KSP 3106 “의료용 원심 분리기”
- 7) KSC 9318 “전기 탈수기”
- 8) KSB 6854 “수평형 스크류 원심기”
- 9) 일본기계학회 “統計的 披露 試驗 方法” JSME S 002-1994, pp. 1~61, 1994.
- 10) EN 288: Specification and approval of welding procedures for metallic materials. 1) ASTM E8M “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”
- 11) ASTM E8M “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”
- 12) ASTM E466, “Standard Test Method for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials”
- 13) 한국생산기술연구원, “하부플랜지맞대기 용접부 불완전용입 결함의 피로강도에 대한 연구”, pp. 36, 1997.