

軟鋼의 熱處理 溫度와 두께 變化에 따른 疲勞龜裂成長舉動에 關한 研究

오 환 교

조선대학교 기계공학과
(2000. 3. 30. 접수 / 2000. 8. 7. 채택)

A Study on the Fatigue Crack Propagation Behavior by the Variation of Heat Treatment Temperature and Thickness in Mild Steel

Hwan-Gyo Oh

Department of Mechanical Engineering, Chosun University
(Received March 30, 2000 / Accepted August 7, 2000)

Abstract : The fatigue and tensile test were carried out with Mild steel using the Dump Frame of commercial car. The specimens were heat-treated at 810°C and 930°C and worked 4.5, 6.0, 8.0mm thickness in order to look over the mechanical properties and fatigue life by heat treatment and thickness from the tensile test result, the yield strength of the heat treated specimens was increased about 35% more than that of the non-heat treated specimen. The fatigue life of non-heated specimen was decreased 15% but that of heat treated specimens at 870°C and 930°C were decreased 16.38% and 13.16% respectively according to increasing the thickness from 4.5 to 8.0mm.

Key Words : fatigue crack propagation behavior, sensitivity study crack opening displacement

1. 서 론

최근 공업기술의 발전과 함께 기계구조물의 사용환경이 가혹해지고 또한 대형화, 고속화, 경량화 되어 가고 있기 때문에 산업 기계부품 및 산업 구조물의 안전성과 신뢰도의 확보가 절실히 요구되고 있다. 또한, 산업현장에서 발생하는 각종 기계구조물, 원자력 구조물, 항공기, 선박, 자동차 등의 파괴사고는 경제적 손실뿐만 아니라 많은 인명피해를 유발하기 때문에 충분한 안전의 확보와 사고예방이 필요한 실정이다. 그러나 파괴사고의 예측과 결함 부위를 정확히 파악하는 데는 많은 시간적, 기술적 어려움이 있으며 일단 발생한 사고에 대한 정확한 진단과 자료 제공의 필요성이 절실하다. 한편, 재료의 제조과정중에 결함을 내포하고 있거나 사용중 결함이

발생되었을 경우에는 피로파괴특성에 관한 정보가 대단히 중요하며 피로균열 진전수명과 응력 확대계수범위에 대한 연구도 활발하다. 최근 橫堀¹⁾은 정적강도인 파괴인성치의 개념을 피로파괴강도에 적용하여 피로파괴인성치라는 동적강도를 주창하였는데 이 피로파괴인성치는 결함을 가진 재료가 안정된 균열진전과정을 거쳐 갑작스런 불안정파괴를 나타내는 기점에 관한 것으로서 피로파괴의 한계를 나타내는 중요한 척도가 된다.

그리고 제품의 개발에 있어서 설계초기 단계에서부터 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 예상되는 문제점을 조기에 발견하고 이를 해결하여 제품 개발기간의 단축과 그에 따른 제품개발비용의 최소화를 꾀하고자 하는 이른바 CAE(Computer Aided Engineering) 작업은 산업 안전분야에서 현재 보편적으로 이루어지고 있다. 현재 CAE 분야는 이미 그 이론이 확립되어 있는 선형탄성 유

한요소해석이나 기구동력학해석 등이 있으나 상대적으로 그 이론이나 적용기법이 확립되지 못한 불규칙 하중 하에서의 피로해석 분야는 많은 연구와 노력에도 불구하고 아직도 신뢰성 있는 해석결과를 얻고 있지 못한 것이 현실이다.^{2~3)} 이에 따라 피로 내구수명 예측 및 평가는 시제품이 만들어진 후 실험에 많이 의존하고 있는 실정이다. 그리고 하중형태가 차량 주행중의 불규칙한 랜덤하중으로 이의 재현이 어려울 뿐만 아니라 재질의 특성, 표면가공상태, 용접조건 등 주변 환경에 따른 변수들이 많고 그 의존도가 높다. 이리하여 설계 초기단계에서의 유한요소 해석은 선형탄성해석에 국한되는 경우가 대부분이며 해석에 필요한 하중 및 경계조건 등에 대한 데이터의 불확실성에 대한 많은 오차가 발생하고 있다. 피로균열 진전속도의 통계적 성질을 논한 연구로 田中⁴⁾은 연강을 대상으로 하였으며, 윤⁵⁾은 알루미늄합금에 대하여 파라미터 영향도 평가(Sensitivity Study)수법을 이용하여 파라미터 영향의 크기를 비교한 연구를 하였다.

따라서 본 연구의 배경은 크게는 각종 구조물과 산업기계 등의 안정성을 평가하기 위한 것이고 작게는 어떠한 결함으로부터 균열이 진전한 구조물의 수명분포를 예측하기 위해 중요한 단서가 되는 정도, 인장응력, 항복응력 등의 기계적 특성치와 피로균열 진전율, 응력확대계수범위 등을 찾고자 하는데 주안점을 두고 있다.

그리고 더욱 중요한 것은 정적인 안전하중이하의 응력상태에서 발생하는 피로파괴를 예측할 수 있으므로 산업기계 및 구조물에 대한 안정성 보장과 사고 방지에 기여하리라 사료된다.

2. 시험재료 및 시험편

본 실험에 사용한 재료는 A社의 상용차 Dump Frame의 재료로서 사용되고 있는 SHPA 54, SM53B보다 기계적성질 등이 우수한 열연고강도 강판으로서 용접구조용 압연강재이며 화학적 성분 및 기계적 특성치는 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Chemical compositions Compositions(wt. %)

Classification	C	Si	Mn	P	S	Nb
Standard(MAX.)	0.20	0.40	1.50	0.030	0.030	0.05
Measurement	0.19	0.11	1.43	0.015	0.009	0.02

Table 2. Mechanical properties

Classification	Thickness(mm)		
	4.5	6.0	8.0
Tensile strength (Kgf/mm ²)	44.52	57.57	61.59
Yield strength (Kgf/mm ²)	26.34	44.39	45.84
Elongation (%)	45.22	4.7	36.9
Hardness (HRB)	62.40		

Table 3. Heat treatment conditions

Heat treatment			
Annealing Temp.	Holding Time(min)	Cooling Temp.	Cooling Method
870°C	60	870°C→550°C	Furnace
		550°C→28°C	Air
930°C	60	930°C→550°C	Furnace
		550°C→28°C	Air

인장시험편은 열간 압연된 재료의 압연방향에 대하여 수직방향으로 KS금속재료 인장시험편 치수 5호의 규정⁶⁾에 따라 시험편의 두께를 4.5, 6.0 및 8.0mm의 3종류로 제작하였다. CT시험편은 인장시험에 사용된 재료에 대하여 두께와 열처리 조건을 동일하게 하여 압연방향과 균열진전방향이 직각(L-T)이 되도록 시험편을 채취하였고, ASTM E647-93⁷⁾에 따른 표준CT(compact tension) 시험편이다. 각 두께별로 열처리를 하지 않는 것과 열처리를 하여 결정입자의 크기를 달리한 3종류에 대하여 C.N.C wire cutting machine (wire직경 : 0.25mm)으로 방전가공 하여 제작하였으며 시험편 표면은 균열진전의 관찰을 쉽게 하기 위하여 샌드페이퍼 #400-#1200으로 연마하였다. 열처리조건은 Table 3과 같으며 시험전 가공부 열처리를 하게 되면 산화층이 발생하여 치수의 오차가 생기므로 시험편 가공전에 열처리를 수행하였다.

3. 시험방법

인장시험은 두께 별로 열처리를 하지 않는 경우와 Table 3과 같이 열처리 한 경우에 대하여 만능재료시험기(Instron universal testing machine, 용량±10ton)를 사용하여 기계적 특성치를 측정하였다. 피로 균열 진전시험은 전기유압 서보식

피로시험기(Electro-hydraulic servo pulser fatigue testing machine, 용량 10ton)를 이용하였다.

균열길이의 측정은 시험편에 부착한 클립게이지(clip gauge)에 의해 균열개구변위(crack opening displacement)를 측정하였고 이 변위와 하중신호로부터 컴플라이언스(compliance)를 구해 환산하는 방식을 이용하였다. 균열길이는 예비균열(pre-crack)의 효과를 고려하여 1mm 진전시킨 후 기록을 시작하였으며 측정간격은 0.5mm로 하였다. 각 실험조건에 따른 하중조건은 Table 4와 같다.

응력확대계수범위 Δk 를 결정하는 실험상수인 m 과 C 는 재료에 대한 균열성장 실험치와 Δk 값을 양대수 그래프에 나타낼 때 중간속도 영역 II에서 직선을 나타낸다는 Paris법칙에 따라 구하였다.

Photo. 1 은 본실험에 사용된 금속의 조직사진이며 (a)는 비 열처리재로써 결정립이 적으며 항복강도가 증가하였고 (b),(c)는 열처리 재로써 결정립이 큰반면 항복강도가 감소하였다

Table 4. Loading conditions

Specimen	Thickness(mm)	Pmax (Kgf)	Pmin (Kgf)
Material (ATOS55)	4.5	450	45
	6.0	600	60
	8.0	800	80

Test conditions ⇒
 1. Stress ratio : 0.1
 2. Wave form : Sine
 3. Frequency : 5Hz

4. 실험결과 및 고찰

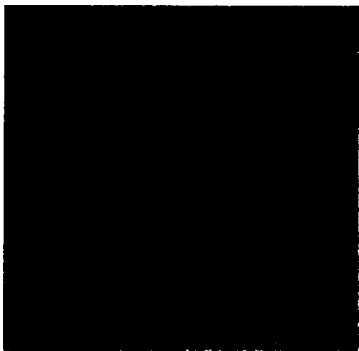
4.1. 기계적 특성

인장강도 및 항복강도는 열처리와 무관하게 시험편 두께가 두꺼울수록 높게 나타났다. 열처리를 한후 인장강도 4.74~14.24 Kgf/mm², 항복강도 1.55~15.52Kgf/mm², 경도(HRB) 21.42 범위만큼 현저하게 낮아졌다. 그러나 열처리 온도증가에 따라 인장강도 0.91~1.13Kgf/mm², 항복강도 0.8~2.54Kgf/mm²로 차이가 적었다. 항복강도와 인장강도는 시험편 두께가 두꺼울수록 변동계수가 작아짐을 알 수가 있었다. 이상에서 검토한 바와같이 인장강도, 항복강도 등은 정적강도의 분포에 치수효과가 존재함을 알 수 있었다.

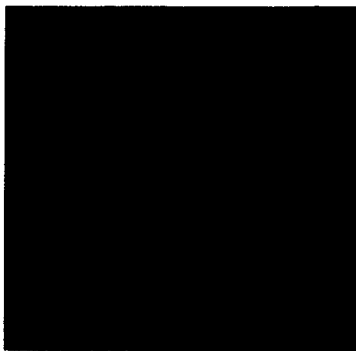
인장시험에 의한 실험결과치는 Table 5와 같으며 각각20개씩 실험한 결과의 평균값을 나타내고 있다.

Table 5. Mechanical properties of heat treatment

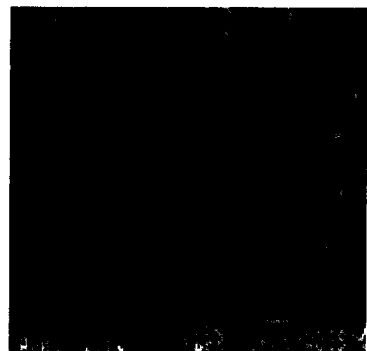
Heat treatment	Classification	Thickness(mm)		
		4.5	6.0	8.0
870°C Annealing	Tensi strength (Kgf/mm ²)	39.78	47.44	48.8
	Yield strength (Kgf/mm ²)	28.69	30.11	32.86
930°C Annealing	Tensile strength (Kgf/mm ²)	38.69	46.53	47.35
	Yield strength (Kgf/mm ²)	27.89	29.03	30.32
Hardness(HRB)		40.98		



(a) Non-heat treatment



(b) 870°C Annealing



(c) 930°C Annealing

Photo 1. Microstructures of material (×800)

4.2. 피로균열 진전거동

Fig. 1은 두께 및 열처리 온도변화와 사이클수와의 관계를 나타낸 것으로서 두께가 크고 열처리 온도가 높을수록 피로수명이 작게 나타남을 알 수 있으며 비열처리재 보다 열처리재의 피로수명이 빨라짐을 알 수 있었다. 열처리재의 경우 균열진전속도는 870℃가 930℃보다 약간 낮은 경향을 나타냈다. Fig. 2는 3종류의 시험편 두께에 대하여 피로균열 진전시험으로부터 얻어진 균열길이 a 와 사이클수 N 의 관계이며 이로부터 구한 응력확대계수범위 ΔK 와 균열진전속도 da/dN 의 관계는 Fig. 3~4와 같다. 응력확대계수범위 ΔK 를 결정하는 재료상수 C , m 의 실험결과치는 Table 6과 같으며 ΔK 를 결정하는 실험상수 m 은

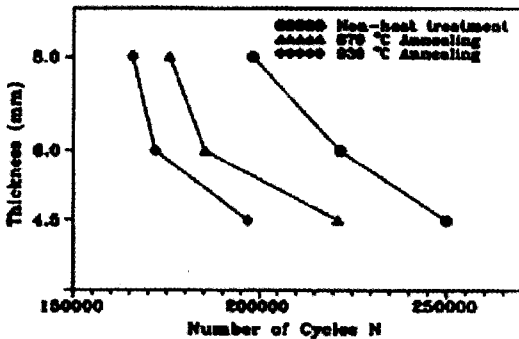


Fig. 1. Relationship between thickness of specimen and number of cycles

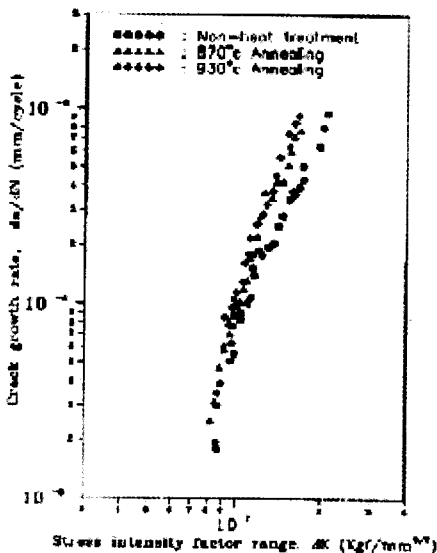


Fig. 2 da/dN vs ΔK for thickness 4.5mm

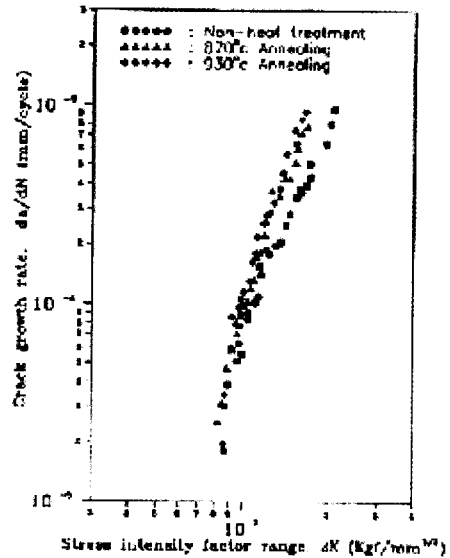


Fig. 3. da/dN vs ΔK for thickness 6.0mm

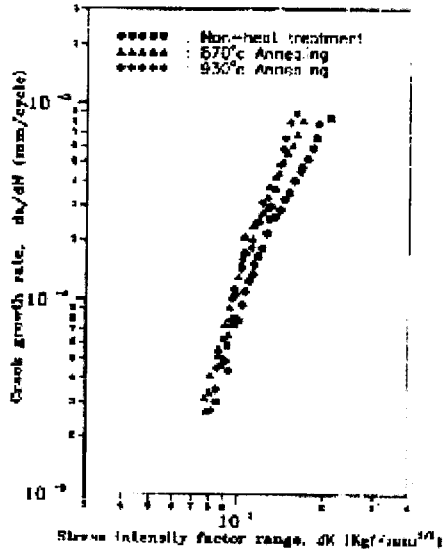


Fig. 4. da/dN vs ΔK for thickness 8.0mm

두께와 열처리 온도변화에 무관하게 2~5의 범위에 있다. 본 연구결과에서 두께가 두꺼울수록 da/dN 이 상승하는 것은 McGowan⁸⁾ 등이 보고한 바와 같이 균열단합의 차이에 의한 것이라고 할 수 있다. 즉, 두께가 얇은 응력상태의 시험편은 두께가 두꺼운 평면변형률 상태의 시험편에 비하여 변형에 대한 구속이 작을 뿐만 아니라 그 소성영역의 크기도 평면변형률 상태에 비하여 3배나 크므로 이로 인하여 균열개구응력이 상승

Table 6. Material constant of stress intensity factor
[da/dN=(ΔK)^m]

Heat treatment	Thickness (mm)	m	C
Non-heat treatment	4.5	3.72480	2.34893E-12
	6.0	2.22088	5.14745E-9
	8.0	4.20359	3.02133E-13
870°C Annealing	4.5	4.63971	4.65940E-14
	6.0	3.83064	2.47072E-12
	8.0	4.86787	1.70738E-14
930°C Annealing	4.5	4.92154	1.36805E-14
	6.0	4.99766	1.03171E-14
	8.0	4.92173	1.39236E-14

한다. 따라서 두께가 얇은 시험편의 da/dN이 두꺼운 것에 비하여 낮은 것은 균열달림의 대소에 의해 설명된다.

5. 결론

본 연구에서는 상용차 Dump Frame의 재료로 기존 재료의 성질을 개선시킨 열연고강도 압연 강판으로 용접구조용 압연강재인 연강에 대하여 두께와 열처리 온도변화에 따른 인장시험과 피로균열진전실험을 하였으며, 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 결정립이 작은 비열처리재의 항복강도에 비해 결정립이 큰 열처리재(870°C, 930°C)의 항복강도는 약 35%씩 감소하였다.

2. 비열처리재인 경우 시험편의 두께가 4.5mm에서 6.0mm와 8.0mm로 증가할수록 수명은 약 15%씩 감소한 반면, 870°C 열처리재는 16.38%씩 감소하였으며 930°C 열처리재는 약 13.16%

감소하는 경향을 나타내었다.

3. 시험편 두께 및 열처리 온도 변화에 무관하게 피로균열 진전속도와 응력확대계수범위 사이의 관계에서 안정성장영역의 실험상수인 m은 2-5의 범위에 있었다.

감사의 글 : 이 논문은 1998년도 조선대학교 학술연구비지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계제위께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) 横堀武夫, 嶋屋誠, “疲勞破壞靱性と破壞靱性の新しい比較法”, 日本材料強度學會誌, 第19卷, 第3號, pp. 67~75, 1985.
- 2) 조정운, 안성철, “FE 해석기법을 이용한 대형 트럭 샤시프레임의 피로내구 평가”, 상용차기술, 대우상용차, pp. 21~29, 1995.
- 3) W. Eichlseder et al. “Prediction of the Fatigue Life with the Finite Element Method”, SAE International congress and Exposition, Detroit, Michigan, pp. 210~221, 1994.
- 4) 田中榮, 秋田敏, 小林信之, “軟鋼切き削材の疲ちき裂傳播に關する統計的考察”, 日本材料強度學會誌, 第8卷, 第2號, pp. 56~63, 1973.
- 5) 윤한용, “피로크랙 진전수명의 확률특성에 관한 연구(2)-크랙진전속도의 분포-”, 대한기계학회 논문집, Vol. 14, No. 6, pp. 1561~1567, 1990.
- 6) “Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials”, Korean Industrial Standard, B 0801, p. 4, 1981.
- 7) ASTM Designation E647-93, 1985. “Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness”.
- 8) McGowan, J. J. and Liu, H. W., “The Role of Three-Dimensional Effects in Constant Amplitude Fatigue Crack Growth Test”, Journal of Engineering Materials and Technology(Transaction of ASME), Vol. 102, pp. 341~346, 1980.