

ATOS 55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

A Study on the Fatigue Crack Propagation Behavior by the Variation
of Heat Treatment Temperature and Thickness in ATOS 55 Steel

오 환 교*

Hwan-Gyo Oh

(1997년 7월 15일 접수, 1997년 12월 12일 채택)

ABSTRACT

This study is to investigate the behavior of fatigue crack growth with ATOS 55 steel which can be applied to the commercial car Dump Frame. It is to obtain the material coefficients after tensile and fatigue crack growth test with the variation of thickness or heat treatment. Also, that is proved the Paris's law by experiment.

The summarized results are as follows ;

- 1) Increasing thickness, tensile and yield strength measured highly regardless to heat treatment and measured lowly as variation of heat treatment temperature.
- 2) Specimen of thickness 8.0mm measured the faster of crack growth rate than another thickness according to the results of experiment. It was the different of stress conditions in crack tip.
- 3) It was found that the experimental constant m was range of 2~5 to the relationship between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range. Also, It was to prove the Paris's law by the experiment

1. 서론

최근 공업기술의 발전과 함께 기계구조물의

사용환경이 가혹해지고 또한 대형화, 고속화, 경량화 되어 가고 있기 때문에 기계부품 및 구조물의 안정성과 신뢰도의 확보가 절실히 요구되

* 조선대학교 기계공학과

고 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 파악하는데는 많은 시간적, 기술적 어려움이 있으며 일단 발생한 사고에 대한 정확한 진단과 자료 제공의 필요성이 절실하다. 재료강도는 재료내부의 조직적 불균일성등이 기인되어 어떠한 확률특성을 나타냄이 알려졌고 그 중요성이 인식되어짐에 따라 재료의 정적강도 및 동적강도의 분포특성에 관한 연구가 여러 연구자에 의해 진행되어 왔다^{1~2)}. 한편, 재료의 제조과정중에 결함을 내포하고 있거나 사용 중 결함이 발생되었을 경우에는 피로파괴특성에 관한 정보가 대단히 중요하며 피로균열 진전수명과 응력확대계수범위에 대한 연구도 활발하다. 최근 横堀³⁾은 정적강도인 파괴인성치의 개념을 피로파괴강도에 적용하여 피로파괴인성치라는 동적강도를 주장하였는데 이 피로파괴인성치는 결함을 가진 재료가 안정된 균열진전과정을 거쳐 갑작스런 불안정파괴를 나타내는 기점에 관한 것으로서 피로파괴의 한계를 나타내는 중요한 척도가 된다.

현재 CAE분야는 이미 그 이론이 확립되어 있는 선형탄성 유한요소 해석이나 기구동력학해석 등이 있으나 상대적으로 그 이론이나 적용방법이 확립되지 못한 불규칙 하중 하에서의 피로해석 분야는 많은 연구와 노력에도 불구하고 아직도 신뢰성 있는 해석결과를 얻고 있지 못한 것이 현실이다^{4~5)}. 이에 따라 피로 내구수명 예측 및 평가는 시제품이 만들어진 후 실험에 많이 의존하고 있는 실정이다. 그리고 하중형태가 차량 주행 중의 불규칙한 랜덤하중으로 이의 재현이 어려울 뿐만 아니라 재질의 특성, 표면가공상태, 용접조건 등 주변 환경에 따른 변수들이 많고 그 의존도가 높다. 이리하여 설계 초기 단계에서의 유한요소해석은 선형탄성해석에 국한되는 경우가 대부분이며 해석에 필요한 하중 및 경계조건 등에 대한 데이터의 불확실성에 대한 많은 오차가 발생하고 있다.

따라서 본 연구의 배경은 크게는 각종 구조

물 등의 안정성을 평가하기 위한 것이고 작게는 어떠한 결함으로부터 균열이 진전한 구조물의 수명분포를 예측하기 위해 중요한 단서가 되는 경도, 인장응력, 항복응력 등의 기계적 특성치와 피로균열 진전을, 응력확대계수범위 등을 찾고자 하는데 주안점을 두고 있다.

본 연구에서는 용접 구조물 부재의 두께와 열처리온도가 사용장소에 따라 일정하지 않음에 주목하여 두께와 열처리온도를 달리 하여 피로균열성장거동에 관하여 연구하였다.

본 연구에 의하여 유한요소해석 등과 같은 각종 구조해석시 필요한 정보뿐만 아니라 용접 후의 열처리의 조건, 설계시 기계부품의 안전율의 확보가 가능하고 피로파괴를 예측할 수 있으므로 기계 및 구조물에 대한 안정성 보장과 사고 방지에 기여하리라 사료된다.

2. 시험재료 및 시험편

본 실험에 사용한 재료는 현재 상용차 Dump Frame의 재료로서 사용되고 있는 SHPA 54, SM53B보다 기계적성질 등이 우수한 열연고강도 강판으로서 용접구조용 압연강재인 ATOS 55는 국내 A사 에서 생산되는 21.5톤용 Dump Frame 재료다. 분광분석기를 사용하여 얻은 재료의 화학적 성분과 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

인장시험편은 열간 압연된 재료의 압연방향에 대하여 수직방향으로 KS금속재료 인장시험편 치수 5호의 규정⁶⁾에 따라 시험편의 두께를 4.5, 6.0 및 8.0 mm의 3종류로 제작하였다. CT시험편은 인장시험에 사용된 재료에 대하여 두께와 열처리 조건을 동일하게 하여 압연방향과 균열진전방향이 직각(L-T)이 되도록 시험편을 채취 하였으며, ASTM E647-93⁷⁾에 따른 표준 CT

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 (%)	45.2	24.7	36.9
Hardness (HRB)	62.40		

열처리를 하지 않는 것과 열처리를하여 결정입자의 크기를 달리한 3종류에 대하여 C.N.C wire cutting machine (wire직경 : 0.25 mm)으로 방전 가공하여 제작하였으며 시험편 표면은 균열진전의 관찰을 쉽게 하기 위하여 샌드페이퍼 #400-#1200으로 연마하였다. 사용된 재료의 열처리조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Heat treatment conditions

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

3. 시험방법

인장시험은 두께 별로 열처리를 하지 않는 경우와 Table 3과 같이 열처리 한 경우에 대하여 만능재료시험기(Instron universal testing machine, 용량 ±10 ton)를 사용하여 기계적 특성치를 측정하였다. 피로 균열 진전시험은 전기유압 서보식 피로시험기 (Electro-hydraulic servo fatigue testing machine, 용량 ±10 ton)를 이용하였다. 균열길이의 측정은 시험편에 부착한 클립 게이지(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 1 mm 진전시킨 후 기록을 시작하였으며 측정간격은 0.5 mm로 하였으며, 각 시험조건에 따른 하중조

건은 Table 4와 같다.

Table 4 Loading conditions

Specimen	Thickness (mm)	P _{max} (Kgf)	P _{min} (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			

응력확대계수범위 Δk를 결정하는 실험상수인 m과 C는 재료에 대한 균열성장 실험치와 Δk 값을 양대수 그래프에 나타낼 때 중간속도 영역 II에서 직선을 나타낸다는 Paris법칙에 따라 구하였다. Photo. 1은 본실험에 사용된 금속의 조직사진이며 (a)는 비 열처리재 로써 결정립이 적으며 항복강도가 증가하였고 (b), (c)는 열처리 재로써 결정립이 큰반면 항복강도가 감소하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 기계적 특성

인장강도 및 항복강도는 열처리와 무관하게 시험편 두께가 두꺼울수록 높게 나타났다. 열처리를 한 재료는 인장강도 4.74~14.24 Kgf/mm², 항복강도 1.55~15.52 Kgf/mm², 경도(H_{RB})가 21.42 범위만큼 낮아졌다. 그러나 열처리 온도를 870℃에서 930℃로 상승시켰을때 인장강도가 0.91~1.13 Kgf/mm², 항복강도 0.8~2.54 Kgf/mm²로 별 차이가 없었다. 항복강도와 인장강도는 시험편 두께가 두꺼울수록 변동계수가 작아짐을 알 수가 있었으며 이는 재료의 강도분포가 재료내부의 기공, 불순물 등의 미시적 결함에 의한 조직적 불균일성으로부터 기인된다는 가정을 기초로 치수가 큰 시험편의 경우 이들 조직적 불균일성이 통계적 분포를 하여 각 시험편마다 평균화되는 것으로 예측할 수 있다. 이상에서 검토한 바와같이 인장강도, 항복강도 등은 정적강도의 분포에 치수효과가 존재함을 알 수 있었다. 인장

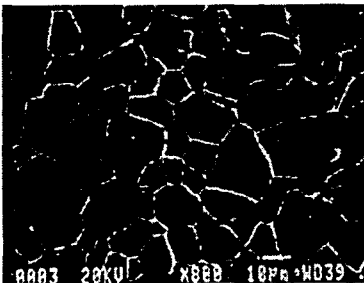
시험에 의한 실험결과치는 Table 5와 같다.



(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 사이클 수와의 관계를 나타낸것으로서 두께가 두꺼고 열처리 온도가 높을수록 균열진전속도가 빠르게 나타남을 알 수 있으며 비열처리재보다 열처리재의 균열진전속도가 현저히 빨라짐을 알 수 있었다. 열처리재의 경우 균열진전속도는 870°C가 930°C보다 약간 늦은 경향을 나타냈다. Fig. 2는 3종류의 시험편 두께에 대하여 피로균열 진전시

Table 5 Mechanical properties of heat treatment

Heat treatment	Classification	Thickness(mm)		
		4.5	6.0	8.0
870°C Annealing	Tensile 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		

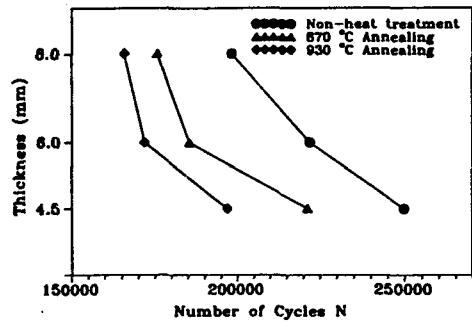
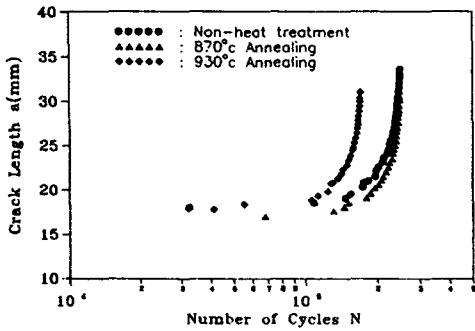


Fig. 1 Relationship between thickness of specimen and number of cycles

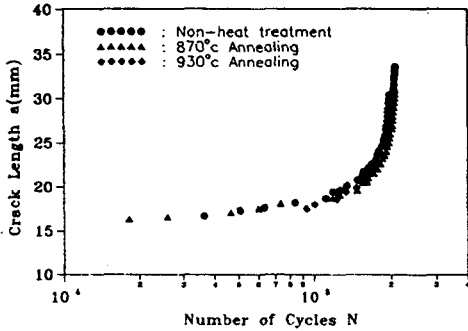
Table 6 Material constant of stress intensity factor

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

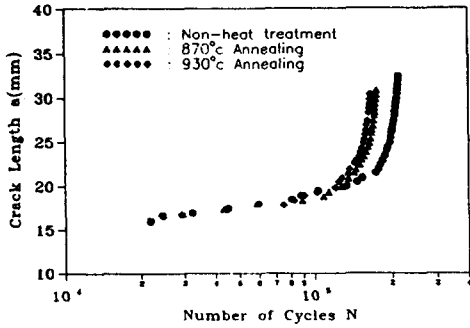
험으로 부터 얻어진 균열길이 a와 사이클수 N의 관계이며 이로부터 구한 응력확대계수범위 ΔK와 균열진전속도 da/dN의 관계는 Figs. 3~5



(A) thickness 4.5 mm



(B) thickness 6.0 mm



(C) thickness 8.0 mm

Fig. 2 Relationship between crack length and number of cycles for thickness

와 같다. 응력확대계수범위 ΔK 를 결정하는 재료상수 C, m 의 실험결과치는 Table 6과 같으며 ΔK 를 결정하는 실험상수 m 은 두께와 열처리 온도변화에 무관하게 2~5의 범위에 있다 본 연구결과에서 두께가 두꺼울 수록 da/dN 이 상승하는 것은 McGowan^{B)}등이 보고한 바와 같이 균

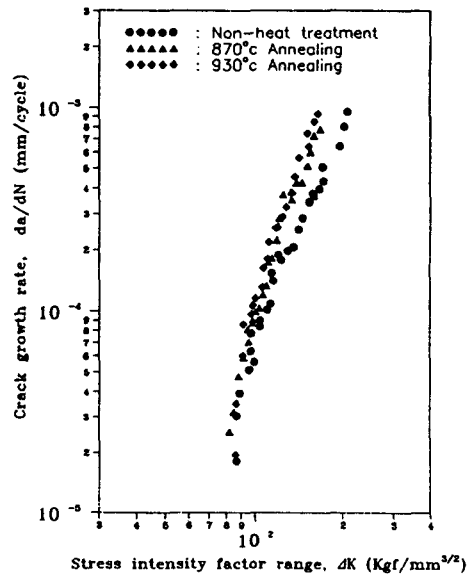


Fig. 3 da/dN vs ΔK for thickness 4.5 mm

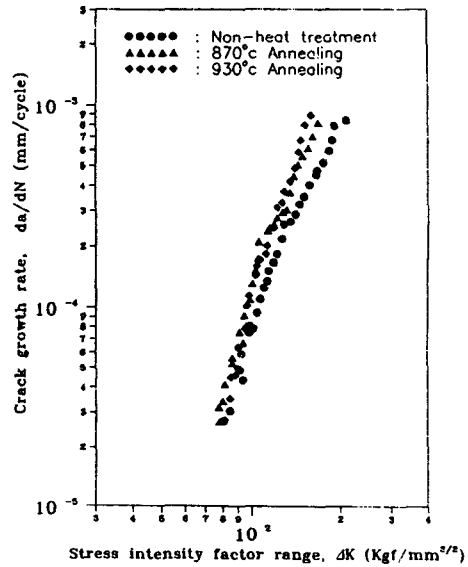


Fig. 4 da/dN vs ΔK for thickness 6.0 mm

열단힘의 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 평면변형률의 것에 비하여 3배나 크므로 이로 인하여 균열개구응력이 상승한다.

따라서 두께가 얇은 시험편의 da/dN 이 두꺼운 것에 비하여 늦어지는 것은 균열단힘의 대소에 의해 설명된다.

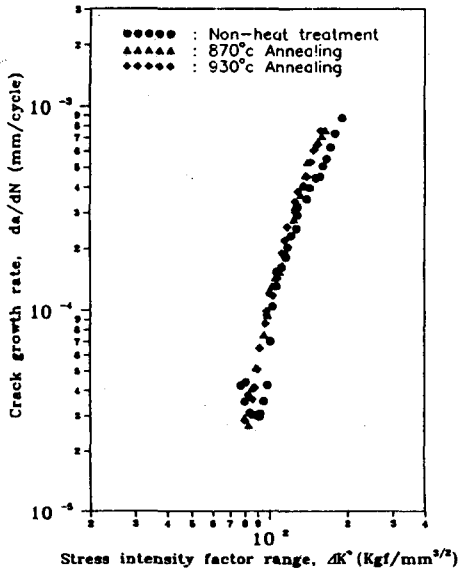


Fig. 5 da/dN vs ΔK for thickness 8.0 mm

5. 결론

본 연구에서는 상용차 Dump Frame의 재료로 기존 재료의 성질을 개선시킨 열연고강도 압연강판으로 용접구조용 압연강재인 ATOS55에 대하여 두께와 열처리 온도변화에 따른 인장 시험과 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 4.5 mm에서 6.0 mm와 8.0 mm로 증가 할수록 수명은 일정하게 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 m 은 2~5의 범위에 있었으며 Paris의 법칙이 성립함을 알 수 있었다.

이 논문은 1996년도 조선대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계제 위께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 田中道七, 藏井免:長壽領域の疲勞壽命分布に關する統計的考察. 材料. 第25卷, 276號, pp. 909~914, 1976.
- 2) 田中道七, 藏井免, “長壽領域の疲勞壽命分布に關する統計的考察”, 材料, 第27卷, 295號, pp. 356~362, 1977.
- 3) 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.
- 4) 조정운, 안성철, “FE 해석기법을 이용한 대형트럭 샤시프레임의 피로내구 평가”, 상용차기술, 대우상용차, pp. 21~29, 1995.
- 5) 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.
- 6) “Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials”, Korean Industrial Standard, B 0801, p. 4, 1981.
- 7) 川田雄一, 金屬の疲勞と設計, オーム社, pp. 111~113, 1985.
- 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(Transactions of ASME), Vol. 102, pp. 341~346, 1980.