

피니언 축 잔존수명 예측

강인원 · 김종현 · 최 린 · 김용수

서울산업대학교 안전공학과

1. 서론

최근 수요가 증가되고 고층건물시 사용되는 lift car 구조물 내부에 많은 결함이 발견되고 있는 것으로 보고되고 있다. 특히 lift car의 핵심부품이라 할 수 있는 피니언 축에 발생한 결함으로 인하여 이를 사용하지 못함으로써 건설공사 공기 준수에 막대한 영향을 미치고 있으며 또한 인명사고의 위험성까지 내포하고 있다.⁽¹⁾ 따라서 lift car의 안전성과 신뢰성 확보는 건설공사의 경제성 향상과 인명보호를 위하여 매우 중요하다.

일반적으로 lift car 내부의 피니언 축과 같은 용도로 사용되는 기계 구조물은 사용기간 동안의 절대적 안전성 확보를 위하여 사용하중조건에서 무한수명을 가지도록 설계된다. 그러나 실제 건설현장에서 사용중인 피니언에 균열이 발견되고 있다고 보고되고 있으며, 이로 인하여 피니언 축 수리·보수 기간동안의 공사 중지로 인한 공기의 지연이 야기될 뿐만 아니라 lift car의 추락으로 인한 인명사고 마저 야기시킬 가능성이 있다. 이에대한 연구로서는 건설용 lift car의 안전사고예방을 위하여 제도적, 관리적 측면에서 검사제도의 강화, 안전관리에 대한 정보망구축, 제작기준 강화, 정기적인 기술교육 강화등에 대한 연구가 있었다.⁽¹⁾⁽²⁾ 이와같이 lift car에 대한 안전에 관한 실험적 연구는 미미한 실정이다.

따라서, 본 연구는 lift car의 피니언 축에 대한 피로강도와 피로수명을 평가하기 위하여 회전굽힘 피로시험과 피로균열 진전실험을 통하여 잔존수명을 예측하였다.

2. 실험 방법

2-1. 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 피니언 축에 사용된 재료와 동일한 SM45C로서 형상 및 치수는 Fig. 1과 같고 이의 화학성질과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2와 같다.

Fig. 2는 피로한도를 평가하기 위하여 미국 SATEC사의 R.R.Moore type의 20in.lbs to 200in.lbs 용량의 회전굽힘 피로 시험기이며, Fig. 3은 회전굽힘 피로 시험편이다.

Fig. 4은 피로균열 진전시험에 사용한 피로시험기 이며 Fig. 5, Fig. 6은 파괴인성 및 피로균열 진전 실험에 사용된 CT시험편으로서 ASTM E399-90⁽³⁾ 및 ASTM E 647-93⁽⁴⁾에 따라 제작하였다.

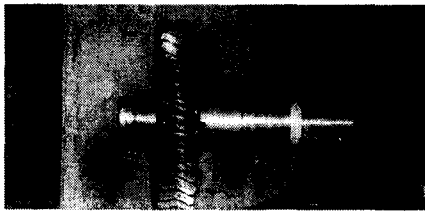
시험편의 채취방향은 균열과 하중방향이 서로 수직인 *L-T* 방향이다.

Table 1. Chemical composition of test material(wt%)

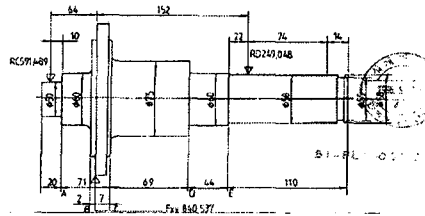
Material	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.47	0.20	0.74	0.01	0.18

Table 2. Mechanical properties of test material

Yield strength	Yield strength	Elongation	Hardness
342 MPa	610 MPa	23.0 %	170 <i>H_B</i>



(a)



(b)

Fig. 1. Dimension of pinion shaft

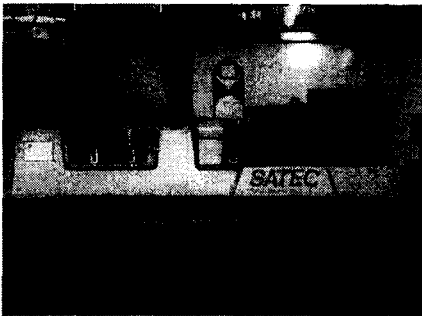


Fig. 2. Rotary Bending Fatigue test equipment

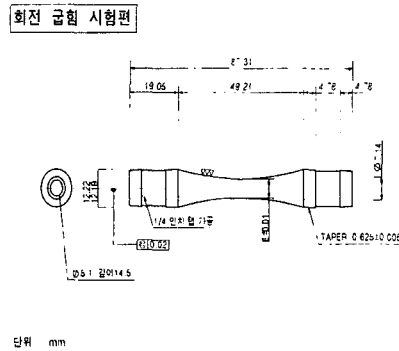


Fig. 3. The specimen for rotary bending test

을 수행하였다. 또한 평면 변형률 파괴인성 평가에 있어서 파괴인성 K_Q 는 다음의 식 (1)로 평가 되었다.

$$K_Q = \left(\frac{P_Q}{BW^{3/2}} \right) f(a/W) \quad (1)$$

여기서, $f(a/W)$ 는 a/W 의 함수이며, P_Q 는 임계 하중값이다. 또한 B 와 W 는 시험편의 두께와 폭을 의미한다. 그리고, 식 (1)에 의하여 얻어진 K_Q 값이 유효한 평면변형률 파괴인성 K_{IC} 가 되기 위해서는 식 (2)의 조건이 만족되어야 한다.

$$B, a \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2)$$

여기서 a 는 균열길이(crack length)이며 σ_{ys} 는 재료의 항복강도(yielding stress)이다.

2-4. 피로균열진전시험

피로균열진전시험은 상온의 대기 중에서 10ton 용 유압서어보식 피로시험기에 마이크로 컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구성하고 ASTM E647-93에 따라 일정진폭 하중 하에서 행하였다. 작용하중은 동일한 균열길이에서 균열선단의 응력이 일치하도록 Table. 3과 같이 하였다.

Table. 3. Loading Conditions

Thickness, B(mm)	12.7
Maximu Load, Pmax (kN)	9.345
Stress Ratio, R	0.1
Frquency, f(Hz)	8
Wave form	sine

균열길이의 측정은 시험내부를 포함한 평균적인 균열길이를 전 수명에 걸쳐서 연속적으로 측정할 수 있는 컴플라이언스(compliance method)을 이용하였으며, 균열길이가 0.1mm 증가할 때마다 시험데이터를 컴퓨터에 자동적으로 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 균열발생수명

실제 하중하의 피로수명을 평가함에 있어서, 이의 수명을 비교 및 검토하기 위해서는 일정진폭하의 피로수명에 대한 자료는 매우 중요하다. Fig. 7은 회전굽힘 피로시험에 의해 평가된 SM45C의 작용응력 대 피로수명을 나타낸 것이다.

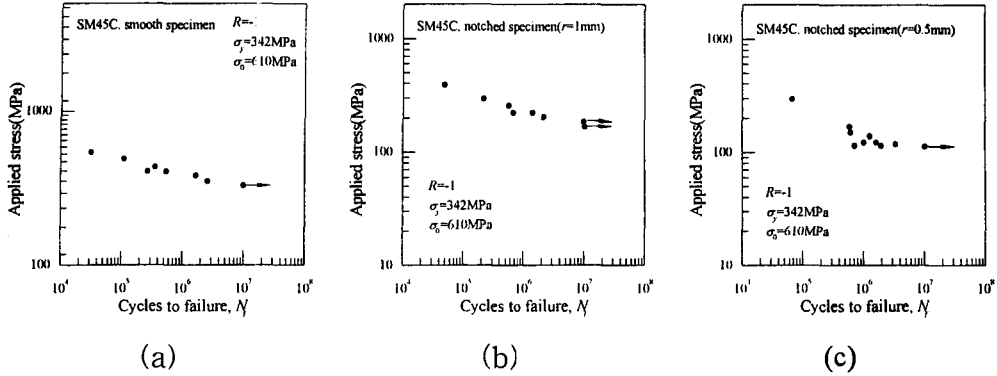


Fig. 7. The S-N curves

그림에서 알 수 있듯이 평활재 및 곡률반경 1.0mm 및 0.5mm 노치재의 피로한도는 각각 322.93MPa, 169.65MPa 및 91.45MPa로 평가되었다. 이로부터 시험편에 노치가 존재하면 피로수명 및 피로강도 특히 피로한도는 현저히 저하됨을 알 수 있다. 또한 노치의 곡률 반경이 작을수록 즉 날카로워질수록 피로한도는 현저히 저하됨을 알 수 있다.

3-2. 피니언 축의 피로한도(fatigue limit) 평가

피니언 축에 가해지는 작용응력을 통하여 구조물이 무한수명을 갖는 가를 판단하기 위해서는 피니언 축의 피로한도가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 피니언 축에 사용되는 SM45C 기계구조용 탄소강에 대한 회전굽힘피로시험을 통하여 이의 피로한도를 구하였다. 그러나 소형 표준 시험편을 통하여 구조물의 피로한도를 평가하기 위해서는 치수효과(size effect) 등을 고려해야 하며 이는 다음의 식으로 표현될 수 있다.⁽⁶⁾

$$\sigma_{lim} = \sigma_{lim, spec} \times C_{size} \times C_{load} \times C_{surf} \dots \quad (5)$$

여기서 σ_{lim} 와 $\sigma_{lim, spec}$ 는 각각 피니언 축과 소형 표준시험편의 피로한도이다. 또한 C_{size} , C_{load} 및 C_{surf} 는 각각 치수효과, 하중의 형태 및 표면 다듬질의 영향을 나타내는 계수이다. 먼저 치수 효과를 나타내는 C_{size} 에 대해 살펴보면 다음과 같다.

재료의 피로파괴는 작용하중과 결함(flaw)의 상호작용으로 발생하는 것으로서 피로파괴는 부재 내에서 가장 약한 연결고리를 따라 발생하게 된다. 따라서 이러한 약한 연결고리는 부재의 부피가 클수록 존재할 가능성이 높아지게 되며 이로 인하여 부피가 큰 부재일수록 보다 낮은 응력에서 피로파괴가 발생하게 된다. 이러한 치수효과는 여러 연구자들⁽⁷⁾에 의해 밝혀졌으며 이를 고려하기 위한 다음의 경험식(empirical equation)⁽⁸⁾이 사용되고 있다.

$$C_{size} = \left\{ \begin{array}{ll} 1.0 & \text{if } d \leq 8mm \\ 1.189d^{-0.097} & \text{if } 8mm \leq d \leq 250mm \end{array} \right\} \quad (6)$$

여기서 d 는 축의 직경으로서 본 연구에서는 section D와 E지점의 직경을 각각 55mm 및 50mm로 설정하였다. 한편 회전굽힘피로시험을 통하여 구한 피로한도를 축방향(axial) 또는 전단에 대한 피로한도로 변환해야할 경우가 있다. 이러한 경우에는 최대전단응력(maximum shear stress criterion)등의 각종 파손이론(failure theory)을 이용하여 이를 변환하게 되며 보통 다음의 식을 이용한다.⁽⁴⁾

$$\sigma_{lim} (\text{axial}) = 0.705\sigma_{lim} (\text{bending}) \quad (7)$$

$$\tau_{lim} (\text{torsion}) = 0.577\sigma_{lim} (\text{bending}) \quad (8)$$

또한 구조물의 피로한도는 표면에 존재하는 흠집(scratch), 작은 구멍(pits) 및 기계가 공흔적(machining mark)에 의해 크게 영향을 받는다. C_{surf} 는 이러한 표면조도의 영향을 나타내는 계수로서 SM45C의 경우는 대략 0.85로 평가된다.

Table. 3. Fatigue limit at section D and E of 피니언 축 (unit:MPa)

	Section D	Section E
Notch radius(r)	σ_e	σ_e
$r=\infty$	220.12	223.31
$r=1.0mm$	115.63	117.32
$r=0.5mm$	62.34	63.24

Table. 3은 각 시험편의 피로한도와 표준시험편을 통한 구조물의 피로한도를 평가하기 위해 적용되는 제 영향 인자를 고려한 평활재 및 곡률 반경 $r=1.0mm$, $r=0.5mm$ 인 피니언 축에 대한 피로한도를 나타내고 있다.

3-3. 파괴인성 및 균열진전수명

3-3-1. 파괴인성(fracture toughness)

파괴인성은 파괴에 대한 구조물의 저항성을 나타내는 척도이므로 이에 대한 평가는 중요하다.⁽⁹⁾ Fig. 8은 파괴인성 평가를 위하여 수행된 SM45C에 대한 정적 하중-변위 선도를 나타낸 것이다.

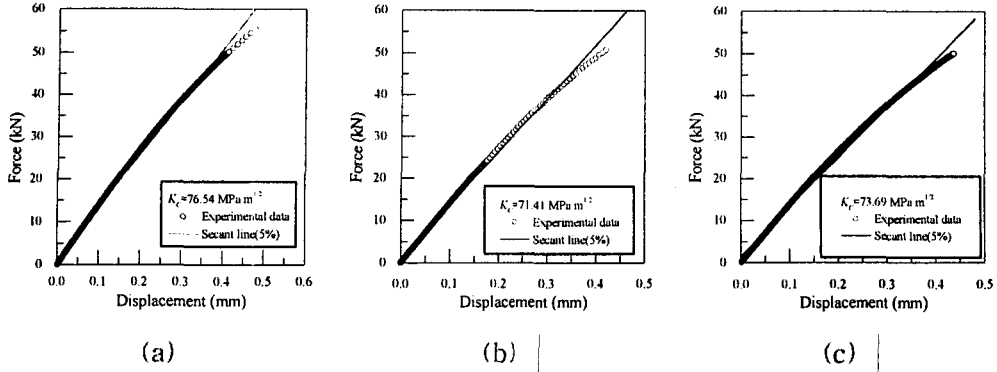


Fig. 8. Force vs displacement curve

그림에서 SM45C의 하중-변위 선도는 Type III의 양상을 나타내는 것으로, 이의 P_{max} 값이 식 (1)의 조건에 적합하므로 P_Q 값으로 정하고, 이로부터 식 (2)에서 K_Q 를 계산하여 파괴인성 K_C 를 구하였다. Table. 4은 이의 결과이다.

Table. 4. Fracture toughness of SM45C

	specimen 1	specimen 2	specimen 3	average
K_C (MPa \sqrt{m})	76.54	71.41	73.69	73.88

3-3-2. 피로균열진전거동

피로균열진전속도가 가장 빠른 모드 I하에서 피로균열진전시험을 수행하였다. Fig. 9는 균열의 크기 대 피로하중의 관계를 나타낸 a-N 곡선으로서 그림에서 세 개의 시험편은 서로 매우 유사한 거동을 나타내고 있으며 이는 본 실험이 타당함을 보여주고 있다.

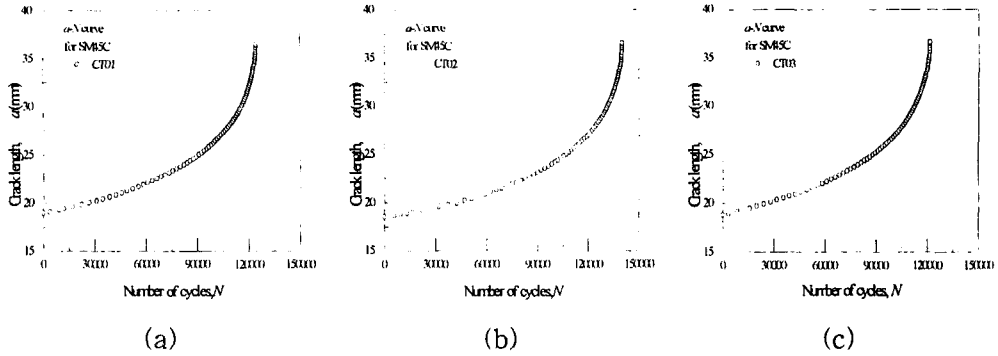


Fig. 9. $a-N$ curves

Fig. 10은 이러한 피로균열진전거동을 보다 명확히 나타내기 위해서는 단위 하중주기 당 균열증분을 나타내는 da/dN 과 균열 선단의 응력상태를 묘사할 수 있는 응력확대 계수범위(stress intensity factor range, ΔK)에 대하여 나타낸 것이다.

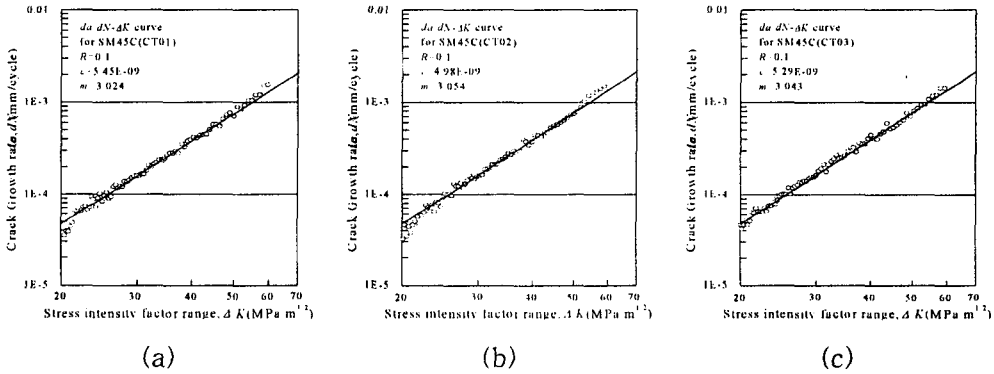


Fig. 10. $da/dN-\Delta K$ curves

그림에서 볼 수 있듯이 세 가지 시험편의 $da/dN-\Delta K$ 곡선은 서로 일치하고 있으며 이는 본 실험의 타당성을 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한 식 (9)은 균열진전속도를 응력확대계수에 대하여 수식화한 Paris-Erdogan의 균열진전법칙이다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (9)$$

여기서 C와 m은 재료상수이다. 그림에서 세 개의 시험편에 대하여 식 (9)은 피로균열진전거동을 잘 묘사하고 있으며 또한 Table. 5에서 알 수 있듯이 세 경우에 대한 재료상수 C, m은 매우 유사함을 알 수 있다.

Table. 5. Material constants, C and m

	specimen 1	specimen 2	specimen 3	average
C	5.45E-09	4.98E-09	5.29E-09	5.24E-09
m	3.024	3.054	3.043	3.040

3-3-3. 잔존수명 평가

임의의 균열이 존재할 때 최종 파단까지의 하중주기를 의미하는 잔존수명은 식 (9)를 균열길이와 하중주기에 대하여 적분함으로써 구할 수 있다.

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (10)$$

여기서 a_i 와 a_f 는 각각 초기 균열길이 및 최종 균열길이를 의미하며 초기 균열길이 a_i 는 비파괴 검사기법 등을 통하여 측정된 균열길이를 의미하며 최종 균열길이는 구조물이 완전 파괴되는 경우의 균열길이로서 식 (11)와 같이 응력확대계수 범위 및 파괴인성의 함수로부터 구할 수 있다.

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left[\frac{K_c}{\sigma f(a)} \right]^2 \quad (11)$$

여기서 $f(a)$ 는 형상보정계수(shape correction factor)이다.

한편 식 (9)와 (10)를 통하여 잔존수명을 예측하기 위해서는 K 에 대한 관계식이 필요하다. 본 연구의 피니언 축과 같이 복잡한 형상의 응력확대계수는 유한요소법(finite element method) 등을 통하여 이를 평가해야 하지만 3차원 형상의 피니언 축에 대한 해석은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 피니언 축의 형상 및 하중조건과 유사한 구조물에 대한 K 의 관계식을 참고문헌⁽¹⁰⁾을 통하여 구하였다. 식 (12)은 그에 대한 관계식이다.

$$K_I = \frac{4M}{\pi b^3} \sqrt{(\pi c)} \left[\sqrt{\frac{b}{c} \left(1 - \frac{b}{c}\right)} \cdot \frac{3}{8} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{b}{c}\right) + \frac{3}{8} \left(\frac{b}{c}\right)^2 + \frac{5}{16} \left(\frac{b}{c}\right)^3 + \frac{35}{127} \left(\frac{b}{c}\right)^4 + 0.537 \left(\frac{b}{c}\right)^5 \right\} \right] \quad (12)$$

여기서 c 는 각각 축의 반경을 의미하며 b 는 c 에서 균열길이 ($b = c - a$)를 뺀 것이다. 기존의 강도계산서에 나와 있는 굽힘모멘트 M 와 식 (10)~(12)을 이용하면 임의의 균열길이가 발견되었을 때 피니언 축이 완전 파괴될 때까지의 잔존수명을 구할 수 있다. Fig. 11은 이상의 과정을 통하여 구한 Section D와 E에서의 $a-N$ 커브를 나타낸

것이고 Fig. 12은 이로부터 구한 잔존수명을 나타낸 것이다.

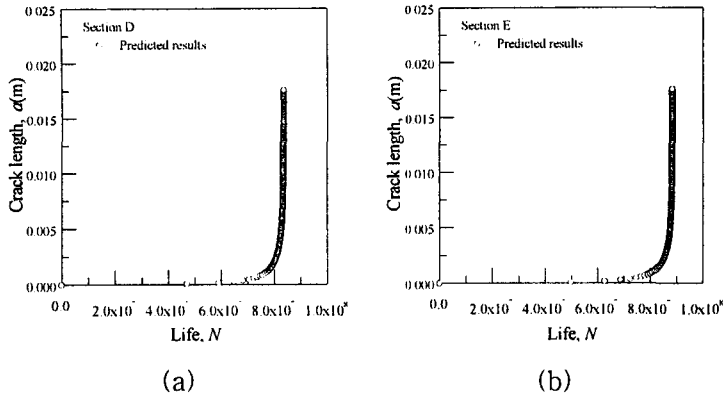


Fig. 11. Predicted $a-N$ curves

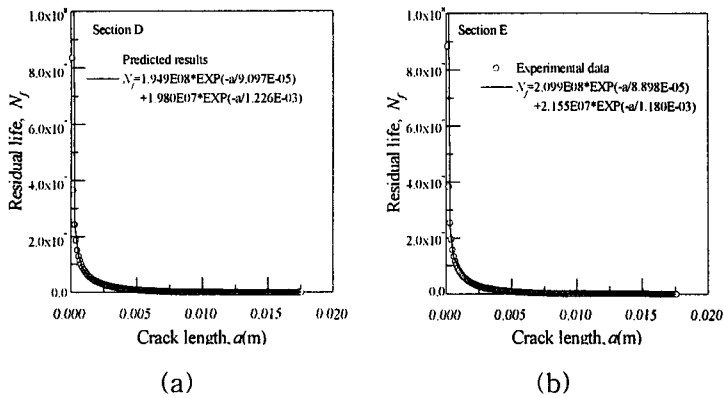


Fig. 12. Predicted residual life

Fig. 12에서 x 축은 균열의 크기이며 y 축은 그에 해당되는 잔존수명을 의미한다. 그림에서 잔존수명은 균열의 크기가 증가할수록 급격히 감소하며 특히 균열길이 5mm이상일 경우는 매우 위험한 상황임을 알 수 있고 안전율을 고려하게 되면(피로수명에 대한 안전율 : 5~20) 이의 길이는 더욱 짧아지게 된다. 따라서 피니언 축의 안전성을 향상시키기 위해서는 최종균열길이의 증가보다는 조기에 균열을 발견하는 것이 보다 타당함을 알 수 있다.

4. 결론

Lift car의 피니언 축 재료의 SM45C재료의 피로수명을 예측하기 위하여 회전굽힘피로시험과 피로균열진전시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 회전굽힘피로시험 결과 피니언 축의 피로한도는 곡률반경이 작을수록 피로한도가 저하됨을 알 수 있었으며, 이는 실제 피니언 축의 파손 양상과 동일하게 나타남을 알 수 있었다..
- 2) SM45C의 피로파괴에 대한 저항성과 잔존수명을 예측하기 위하여 파괴인성 및 피로 균열 진전시험을 실시하였다. 이 결과 파괴인성은 $73.88\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 나타났으며 피로균열 진전거동은 Paris-Erdogan의 법칙에 의해 잘 묘사됨을 알 수 있다.
- 3) Paris-Erdogan의 법칙을 토대로 임의의 균열이 존재할 경우 최종 파단시 까지의 잔존수명 예측을 하였으며 특히 균열길이가 5mm 이상일 경우 피니언 축은 파괴될 수 있는 매우 위험한 상태에 있게 되며, 특히 최종 파단점인 균열길이 약 18mm까지는 파괴가 급속히 진전되어 파괴됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 김진수, “건설용 Lift의 실태 및 안전성 확보에 관한 연구”, 석사학위청구논문,1993, 경희대학교
- (2) 이호성, “건설용 리프트 안전사고 예방을 위한 안전성 확보에 관한 연구”석사학위 청구논문, 2000, 서울산업대학교
- (3) “Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Meterials”, *ASTM E 399-90*
- (4) “Standard Test Method for Mesurement of Fatigue Crack Growth Rates”, *ASTM E 647-93*
- (5) H. F. Moore and J. B. Kommers, " An Investigation of the Fatigue of Metals, " *Univ. Ill. Eng. Exp. Stn. Bull.*, 124, 1921.
- (6) Bannantine, J.A., Comer, J.J. and Handrock, J.L., "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", 1989, Prentice Hall
- (7) Faupel, J.H. and Fisher, F.E., "Engineering Design", 1981, John Wiley and Sons
- (8) Shigley, J.E. and Mitchell, L.D., "Mechanical Engineering Design, 4th ed.", 1983, McGraw-Hill
- (9) 최린, "Rail 강재 용접부의 피로균열진전거동", 석사학위청구논문, 1998, 한양대학교
- (10)Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., "The Stress Analysis of Cracks Handbook", 1973 , Del Research Corporation