

초경량 인라인 스케이트 프레임의 피로 내구성 평가

이세용 · 김호경^{**}

서울산업대학교 대학원 · *서울산업대학교 자동차공학과
(2009. 12. 18. 접수 / 2011. 1. 21. 채택)

Evaluation of Fatigue Endurance for an Ultra-light-weight Inline Skate Frame

Se-Yong Lee · Ho-Kyung Kim^{**}

Graduate School, Seoul National University of Technology

^{*}Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology

(Received December 18, 2009 / Accepted January 21, 2011)

Abstract : In order to evaluate fatigue endurance for an ultra-light weight inline skate frame, FEM analysis was performed. Tensile properties and a S-N curve were determined through tensile and fatigue tests on a modified Al-7075+S_c alloy. The yield and ultimate tensile strengths were 553.3 MPa and 705.5 MPa, respectively. The fatigue endurance limit of this alloy was 201.2 MPa. For evaluating the fatigue endurance of the inline skate frame, the S-N data were compared with the stress analysis results through FEM analysis of the frame. The maximum Von-Mises stress of the frame was determined 106 MPa through FEM analysis of the frame, assuming that the rider weight is 75 Kg. Conclusively, on the basis of fatigue limit, the inline skate frame has a safety factor of approximately 2.0.

Key Words : modified Al-7075+S_c alloy, inline skate frame, FEM analysis, safety factor, fatigue endurance limit

1. 서론

1990년대 들어 인라인 스케이트 붐이 본격화되면서 전세계적으로 그 인구가 날로 늘어가는 추세이다. 특히 주 5일 근무로 인하여 여가 시간의 확대, 운동에 대한 관심, 웰빙 트렌드와 맞물려 그 인기가 높아지고 있다. 또한 웰빙 시대에 개인적 신체적 운동과 정신적 성취감을 느낄 수 있고 다양한 동호인들과 교류를 통해 새로운 라이프스타일을 즐길 수 있는 사회적 레저 스포츠로 자리 잡고 있다. 인라인 스케이트는 누구나 쉽게 추구할 수 없는 운동적 특성과 지속적인 연습을 통하여 숙달해야 하는 기술적 매력의 극한 스포츠로서 특히 젊은 층을 중심으로 인기가 날로 높아지고 있다.

인라인 스케이트는 스키 부츠에 3~5개의 특수 폴리우레탄 바퀴를 연결시켜 스케이트와 스키 기능을 한데 모은 것으로, 날(blades) 대신 바퀴가 달린 것을 제외하고는 스케이트와 기본적으로 구조가

비슷하다. 인라인의 종류에 따라 운동용, 경주용, 길거리용, 하키용, 크로스컨트리용, 피겨용 등이 있으며 신발, 프레임, 바퀴 등이 조금씩 다른 형태로 되어 있다.

몸의 체중을 싣고 달려야 하는 인라인 스케이트는 스피드를 즐기는 특성상 언제나 사고와 부상의 위험이 상존된다. 특히 최근 장거리 마라톤용의 경우 초경량 프레임을 선호하는 관계로 만일 프레임에 반복되는 하중으로 인하여 피로파괴가 발생한다면 사용자의 큰 부상 위험을 유발할 수 있다. 따라서 인라인 스케이트의 성능 결정에 중요한 역할을 하는 프레임은 인라인 스케이트의 안전성 확보를 위하여 우수한 피로 내구성이 요구된다.

본 연구에서는 현재 초경량 인라인 프레임으로 사용되는 바퀴가 4개인 전문가용 인라인 프레임(1084 타입 프레임)의 피로내구성을 평가하고자 한다. 이를 위하여 초경량 프레임의 하나인 1084 타입 인라인 프레임의 유한요소해석을 수행하고자 한다. 한편 실제 인라인 프레임의 제작에 사용되는 동일한 알루미늄 합금 압출재에서 채취한 인장 시험편

^{*} To whom correspondence should be addressed.
kimhk@snut.ac.kr

Table 1. Chemical composition of the modified Al-7075 alloy

Alloy	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Zr	Sc	Al
Al-7075+S _c	5.2	2.0	0.3	0.3	0.03	0.11	0.1	Bal

으로 피로 시험을 실시하여 응력-피로 수명 선도를 얻었으며 그것을 토대로 최종적으로 구조 해석 결과와 비교분석하여 본 인라인 프레임의 피로 내구성을 평가하였다.

2. 실험

2.1. 프레임 재료의 인장 및 피로 실험

본 인라인 프레임 제작에 사용된 재료는 Al-7075를 약간 개량한 합금으로 0.1%의 스칸디움이 첨가된 알루미늄 합금이다. 화학전 성분은 Table 1과 같다.

인장 및 피로시험에 사용된 시험편은 인라인 프레임을 제작하는 압출바에서 길이방향으로 평행하게 추출하였다. 인장 및 피로 시험편은 게이지 길이 및 직경이 각각 45 mm 및 5 mm이며 어깨부의 곡률은 20 mm로 가공하였다. 인장 시험의 속도는 1 mm/mim으로 수행하였다. 피로시험을 위하여 인장 시험편과 동일한 평활시험편을 사용하여 일정 증열 진폭으로 축방향 하중을 작용하여 응력비 R=-1로 수행하였다. 피로시험기는 서보유압 시험기(Instron 8516)를 사용하여 주파수 15 Hz로 수행하였다.

2.2. 구조해석

1084 프레임은 직경 100 mm 바퀴 3개와 앞에서 두번째에 직경 84 mm 1개를 혼용하여 사용하는 형식이다. 응력해석을 통하여 3차원 CAD 소프트웨어인 Pro-engineer로 3D²⁾ 모델링을 실시한 후 이를 범용 전처리(pre-processor)프로그램인 HyperMash v7.0³⁾으로 전환하여 해석을 위한 전처리 과정을 실시하였다. 인라인 주행중의 프레임에 작용하는 하중의 크기 및 방향에 대한 연구는 지금까지 국내외적으로 거의 전무한 상태이다. 따라서 인라인 스케이팅과 유사한 주행 방법을 구사하는 쇼트트랙 스케이팅에 관한 스케이트 프레임에 작용하는 하중 형태를 적용하여 해석한 연구⁴⁾를 참고하여 시도하였다. 참고 문헌에서는 스케이팅 국가 대표급 여자선수 4명을 선정하여 스케이트 반력측정시스템을 사용하여 반력을 측정하였고 신호수집시스템을 통하여 데이터로 제시하였다. 스케이트의 반력은 주행중 정면에서의 날에 수직으로 작용하는 수

직 반력(F_z)과 날의 측면에 작용하는 수평반력(F_h)으로 구분하였다.

해석을 위한 하중조건은 인라인 프레임에서 축의 중심점을 연결한 중앙에 강체 요소를 생성한 후, Table 2의 분력과 비틀림 모멘트를 강체 요소에 적용하였다. 직선주로 활주 때의 스케이트에 걸리는 반력의 합이 최대가 되는 순간에서의 수직하중과 수평하중을 결정하여 다음과 같이 각각 식 (1) 및 (2)를 이용하여 산출하였다.

$$F_y = x \times \frac{P \times 9.81}{n} \tag{1}$$

$$F_h = x \times \frac{P \times 9.81}{n} \tag{2}$$

여기서 n은 전반부 또는 후반부 바퀴 수(=2개), P는 사람무게(= 75 kg)이며 주행시 프레임과 지면의 최대 각도를 45도로 가정하였다. Table 2는 4명의 여자 선수⁴⁾에 관하여 각기 다른 주법을 가진 선수들의 경우 실제 체중이 75 kg 이하이나 모두 일반적인 사용자의 하중인 체중 75 kg으로 가정하여 직선 주행중의 프레임 앞부분과 뒷부분의 바퀴에서의 수직 및 수평 분력을 산출하여 요약하였다. 또한 주행시 S자로 주행하는 경우에 프레임 전반부와 후반부에 각각 반대방향의 비틀림 모멘트(M_k)는 바

Table 2. The maximum vertical and horizontal reactive forces of four skaters during skating

Skater	Position	Body Weight Ratio	Reactive Force (N)
A	Front	$F_y = 0.65$	238.845
		$F_h = 0.3$	110.25
	Rear	$F_y = 0.31$	114.04
		$F_h = 0.11$	40.425
B	Front	$F_y = 0.61$	224.175
		$F_h = 0.23$	84.525
	Rear	$F_y = 0.38$	139.65
		$F_h = 0.1$	36.75
C	Front	$F_y = 0.5$	183.75
		$F_h = 0.27$	99.225
	Rear	$F_y = 0.76$	279.3
		$F_h = 0.37$	135.955
D	Front	$F_y = 0.48$	176.4
		$F_h = 0.32$	117.6
	Rear	$F_y = 0.31$	113.925
		$F_h = 0.2$	73.5

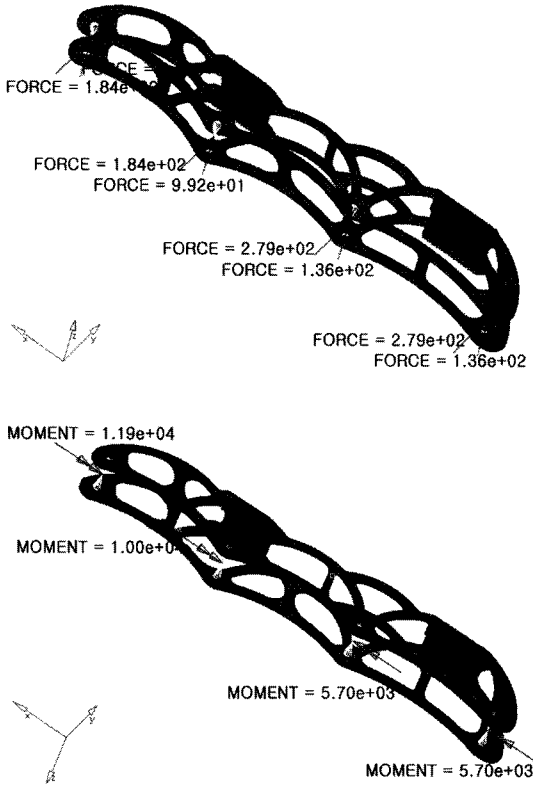


Fig. 1. Boundary conditions of the FEA modeling for (a) reactive forces and (b) reactive moments.

퀴 지름 $d(=84\text{ mm}, 100\text{ mm})$ 를 고려하여 식 (3)에 의해 산출하였다.

$$M_x = \left(x \times \frac{P \times 9.81}{n}\right) \times \left(\frac{d}{2}\right) \quad (3)$$

구속 조건은 인라인 프레임과 부츠와 결합되는 부분에 모든 축 방향과 모멘트에 대하여 구속하였다. 한편 Solver로 선형 해석용 Optistruct를 사용하였으며 요소는 Hexa 8 node elements와 Penta 6 node elements를 사용하였다. 여기에 사용한 요소 수는 8,215개, 절점 수는 14,378개를 사용하였다. 재료 물성치로는 알루미늄 합금의 탄성계수 70 GPa, 포아송비 $\nu=0.3$ 을 적용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 인라인 프레임 재료의 인장 및 피로실험

인장시험에 대한 공학적 응력-변형률 선도는 Fig. 2와 같다. 항복 및 극한인장강도는 각각 553.3 MPa, 705.5 MPa로 나타났다. 극한인장강도 705.5 MPa은

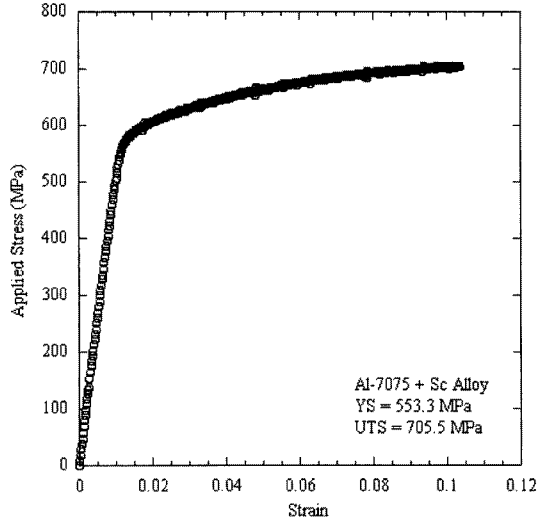


Fig. 2. Tensile stress-strain curve for the Al-7075+Sc sample.

7000계열의 고강도 알루미늄 합금의 극한인장강도에 비하여 높은 것으로 나타났다. 예를 들어 Al-7075합금의 경우 극한인장강도는 545 MPa⁵⁾에 비하여 약 30% 향상된 것으로 나타났다. 또한 Al-7010의 경우 인장강도는 566 MPa이며 스칸디움이 첨가된 Al-7010의 경우 약간 증가(=588 MPa)된 것으로 보고⁶⁾되어 있다. 그러므로 본 인라인 프레임 제작에 사용된 합금은 스칸디움의 첨가로 인하여 석출 강화에 의한 증가로 판단된다.

인라인 프레임에 사용된 스칸디움이 첨가된 알루미늄 합금의 피로 강도를 결정하기 위하여 피로 시험을 실시한 결과 S-N 선도는 Fig. 3과 같으며

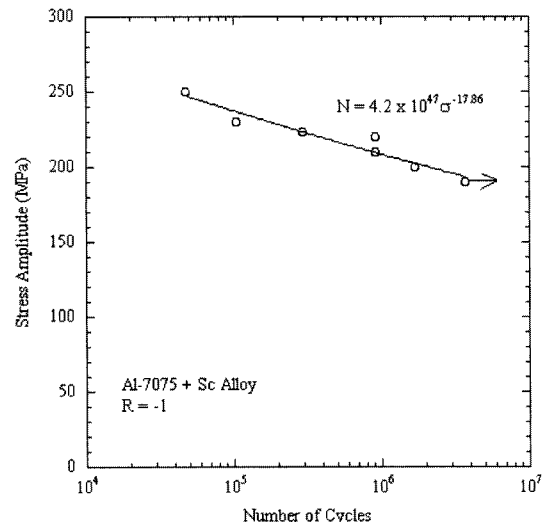


Fig. 3. S-N curve for the Al-7075+Sc sample.

응력과 수명의 관계식은 $N = 4.2 \times 10^{47} \sigma_a^{-17.86}$ 과 같다. Fig. 3에서 보듯이 $N = 2 \times 10^6$ 에서 피로한도는 201.2MPa로 인장강도의 29%에 해당한다. 이와 같은 결과는 Al-7075 합금의 피로한도 결과⁵⁾와 유사하다.

3.2. 구조해석 결과

인라인 프레임에 작용하는 F_y , F_h 를 적용시 두 분력 값은 강체에 작용하며, 직선주로 활주 상태를 가정하여 변위와 Von-Mises 응력으로 나타낸 결과는 Table 3과 같다. 해석 결과 선수 C의 경우가 가장 가혹한 조건으로 주행하는 것으로 나타났으며, 최대응력 102 MPa이 부츠와 결합되는 뒷부분에서 발생하는 것으로 나타났다. 이 결과는 사용자의 스케이팅 주행특성에 따라 최대응력이 발생하는 부분이 다르지만, 부츠와 결합되는 부분에서 최대응력이 걸린다는 것은 공통적으로 나타났다.

비틀림 모멘트 적용시 x 방향의 모멘트는 강체에 작용하며, 분력적용과 같은 직선주로 활주 상태를 가정하여 변위와 Von-Mises 응력으로 나타낸 결과는 Table 4와 같다. 해석결과 A 선수의 주행 스타일이 비틀림 모멘트 측면에서는 가장 가혹한 주행조건으로, 체중을 75 kg으로 가정하였을 때 최대 Von-Mises 응력은 106 MPa이 첫 번째 바퀴의 액슬 삽입구 근처에서 나타났다. B와 D 선수의 경우도 비슷한 위치에서 최대응력이 나타났지만, C 선수의 경우는 분력 적용시 최대응력이 나타난 위치와

Table 3. FEM results for the maximum Von-Mises stress and displacement of the frame under reactive forces for four skater types

	Max. Disp. (mm)	Max. Von Mises Stress (MPa)
skater A	0.696	99.7
skater B	0.601	99.5
skater C	0.70	102.0
skater D	0.625	91.3

Table 4. FEM results for the maximum Von-Mises stress and displacement of the frame under reactive moments for four skater types

	Max. Disp. (mm)	Max. Von-Mises Stress (MPa)
skater A	0.577	106
skater B	0.54	99.9
skater C	0.439	89.4
skater D	0.425	78.6

비슷한 위치에서 최대 응력값을 나타냈다. 이러한 결과는 피험자의 주행특성에 따라 변하는 것으로 사료된다.

본 인라인 프레임 제작에 사용된 알루미늄 합금의 피로한도가 201.2 MPa임을 고려할 때 유한요소 해석 결과에 의한 가장 가혹한 주행모드에서의 프

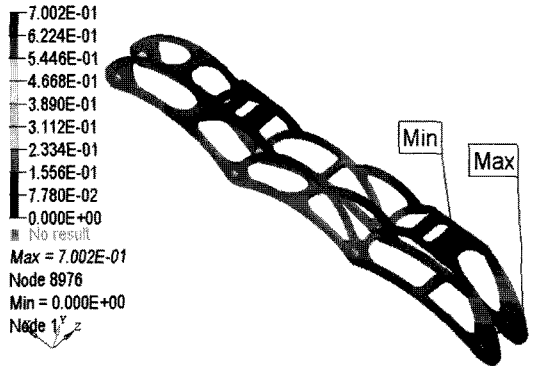


Fig. 4. Displacement distribution of the frame under reactive forces for skater C type.

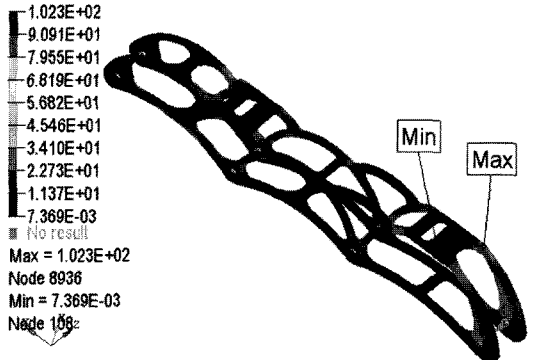


Fig. 5. Von-Mises stress distribution of the frame under reactive forces for skater C type.

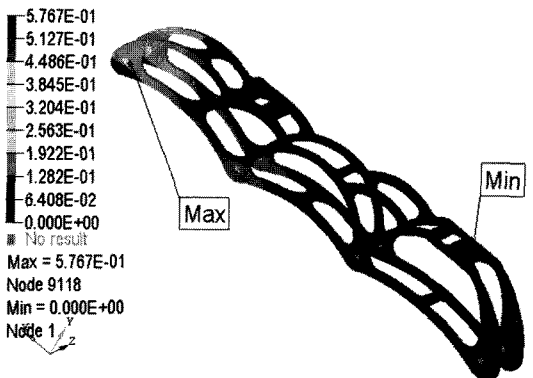


Fig. 6. Displacement distribution of the frame under reactive moments for skater A type.

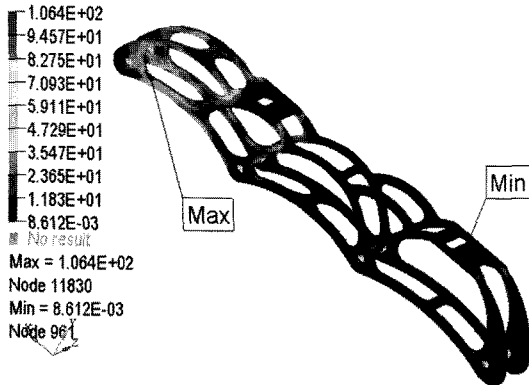


Fig. 7. Von-Mises stress distribution of the frame under reactive moments for skater A type.

레이프의 최대 응력 106 MPa은 피로 한도를 기준으로 안전계수(Safety Factor)는 약 2.0에 해당한다. 또한 인장강도 측면에서의 안전계수는 6.8에 해당한다. 지금까지 인라인 프레임과 같은 스포츠 용품에 대한 안전계수에 관한 피로한도 측면에서의 기준이 없으나 하중과 응력을 결정할 수 있으며 통상적인 환경에서 작동하는 보통의 재료에 대한 안전 계수가 2~2.5인 것⁷⁾을 감안하면 적절하다고 할 수 있다. 그러나 인라인과 스케이팅은 주행이 동일할 수 없으며 각 개인마다 주행 거동이 다를 수 있으므로 이에 대한 실험적 연구가 추후 필요하다. 이를 통하여 초경량 인라인 프레임과 같은 고부가 스포츠 제품의 피로내구성을 포함한 성능이 향상된 제품 개발이 가능하다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 인라인 프레임의 피로내구성을 평가하고자 인라인 프레임에 사용된 스칸디움이 첨

가된 알루미늄 합금에 대한 인장 및 피로실험을 하였다. 또한 유한요소해석으로 인라인 프레임의 응력해석결과와 실제 인라인 프레임 재료의 응력-피로 수명 선도를 비교분석하였다. 인라인 프레임에 사용된 스칸디움이 첨가된 알루미늄 합금의 극한인장강도는 705.5 MPa이며, 응력비 $R = -1$ 에서 피로한도는 201.2 MPa으로 나타났다. 구조해석을 통하여 체중 75 kg의 사용자가 본 인라인 스케이팅 직선 주로 활주시 최대응력이 106 MPa로 본 재료의 피로 한도 기준으로 안전계수가 약 2.0으로 평가되었다.

참고문헌

- 1) 김사용, “인라인 스케이트 디자인 개발에 관한 연구”, 홍익대학교 산업대학원 석사논문, 2004.
- 2) Pro/ENGINEERING® Advanced Tutorial (Release 20/2000i), Connect Press, Ltd.
- 3) Altair® Hypermesh Basic Training Vol. 1~2, Altair Eng.
- 4) 전명규, 박광동, 백진호, “쇼트트랙 스피드 스케이팅의 스케이트 반력 변화에 따른 특성 분석”, 한국체육학회지, 제40권, 제2호, pp. 861~871, 2001.
- 5) P.S. De, R.S. Mishra and C.B. Smith, “Effect of microstructure on fatigue life and fracture morphology in an aluminum alloy”, Scripta Mater. Vol. 60, pp. 500~503, 2009.
- 6) M.N. Desmukh, R.K. Pandey and A.K. Mukho-pahyay, “Fatigue behavior of 7010 aluminum alloy containing scandium”, Scripta Mater. Vol. 52, pp. 645~650, 2005.
- 7) R.C. Juvinall and K.M. Marshek, “Fundamentals of Machine Component Design”, John Wiley & Son, New York, pp. 261~263, 1999.