

라운드 리클라이너 개발을 위한 정적 강도 해석 및 안전성 평가

Static Strength Analysis and Safety Evaluation for Developing a Round Recliner

정 윤 구^{*} 임 재 규^{**} 김 형 중^{***}
Jeong, Yoon-Goo Lim, Jae-Kyu Kim, Hyung-Jong

Abstract

Seat is one of the most important part of an automobile for passenger's safety especially when an accident happens. A recliner is a part of the seat assembly, having the function of adjusting the back-plate angle of a seat. Recently, many kinds of vehicles have adopted the round recliner module rather than the conventional types of recliners because of its broad compatibility and structural simplicity. In this study, a two-dimensional finite element strength analysis has been performed using a commercial code ABAQUS/Standard for the purpose of developing a new round recliner model. The loading condition for the analysis is the same as the FMVSS 301 regulation. The finite element result for the round recliner has been compared with that for the conventional type.

키워드 라운드 리클라이너, 유한요소법, 정적강도해석

Keywords round recliner, finite element method, static strength analysis

1. 서론

차량 충돌 시 승객 보호는 자동차의 개발 과정에서 가장 중요하게 고려되어야 할 설계인자이다. 따라서 승객의 상해를 줄이기 위해서는 차체 구조용 부품, 시트(seat) 구조물, 에어백(air bag) 시스템, 저동장치 등 자동차의 많은 부품들에 대하여 충분한 강성 확보, 다양한 승객보호 안전장치의 사용, 안전기준의 제정 등 차량 충돌시 승객보호를

위한 많은 연구가 이루어지고 있다.

미연방 도로교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration: NHTSA)에서는 자동차의 각종 충돌로부터 승객을 보호하기 위해서 FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard) 법규들을 제시하고 있다. 이 법규들을 만족시키기 위해서는 각종 시험을 실시하여 만족 여부를 확인해야 하지만, 시험에는 고가의 비용과 시간, 인력이 소요되는 부담이 있다. 또한 각 단품의 정확한 충돌 특성과 영향의 파악이 어렵고 다양한 설계변수에 대한 최적화 과정에 많은 시간과 어려움이 뒤따른다. 이러한 어려움을 최소화하기 위해서는 CAE 시스템의 도입으로 다양한 변수에 대한 연구 및 각 단품에 대한 충돌 특성과 영향 파악이 선행되어야 한다. 시트 구조물의 안전성 평가를 위해서도 정적·동적 해석을 통한 많은 연구가 수행되었다[1-4].

* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 석사과정
** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 박사과정, 춘천기능대학 부교수
*** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사

자동차 시트는 쿠션부와 철제 구조물로 이루어지며, 철제 구조물은 다시 백 프레임(back frame), 리클라이너(recliner), 시트 트랙(seat track)으로 나누어진다. 리클라이너는 시트 트랙과 백 프레임을 연결하는 부품으로서 시트의 등받이 각도를 승객의 요구대로 조절하는 기능을 한다[3]. 시트 시스템의 안전기준은 FMVSS 207[5] 조항에 규정되어 있다.

기존의 리클라이너는 주변 부품의 구조에 따라 차량마다 다른 형상과 치수로 설계되므로 리클라이너를 구성하고 있는 부품도 기존 제품과의 공용화가 어렵게 된다. 또한 구성 부품수도 16~18개에 달해 제품의 제조, 조립, 관리 측면에서 심각한 문제가 발생할 수 있으며, 이것은 원가와 품질 등 제품 경쟁력에 상당한 영향을 주고 있다.

한편 해외에서 최근에 각광받고 있는 라운드 리클라이너(round recliner)는 기존의 리클라이너에 비하여 작동성, 내구성, 충돌성능에서 우수하며 모든 차량의 시트 부품에 공용화 적용이 가능하다는 특징을 가지고 있다. 이 제품은 기본 구조를 표준화함으로써 리클라이너 장착 브래킷의 형상 변경만으로 적용이 가능하며, 제품 개발기간 및 원가, 생산 관리 등 많은 부분에서 이점을 가지고 있다. 이것은 동일한 리클라이너를 대량 생산함으로써 생산성과 품질이 크게 개선되고, 제품의 설계 및 개발 비용도 많이 줄일 수 있어 제품의 경쟁력을 크게 높일 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 라운드 리클라이너 개발 계획의 일환으로 상용 유한요소해석 코드 ABAQUS/Standard[6]를 사용하여 정적 강도를 해석하고, 기존 모델과의 비교를 통하여 제품의 안전성을 평가하였다.

2. 라운드 리클라이너

라운드 리클라이너(round recliner)는 기존 모델에 비하여 시트 모듈의 안전성과 내구, 작동 성능을 향상시킬 수 있으며, 표준 설계를 통하여 다양한 시트 모듈에의 공용화가 용이하다. 더욱이 공용화를 통하여 대량생산에 따른 원가구조 및 품질 개선, 그리고 부대 비용의 절감 효과를 기대할 수 있다. 개발하고자 하는 라운드 리클라이너는 원형형상의 캠과 기어를 일체화하여 내장한 형태로서, 이 부품을 프레임 브래킷에 연결하여 시트 구조물에 장착하도록 한다. 표 1은 기존 리클라이너와 라운드 리클라이너와의 차이점을 비교한 것이다.

그림 1은 라운드 리클라이너를 구성하고 있는 주요 구성품들을 나열한 것으로, 본 연구에서는 이들 중 락기어(lock gear), 섹터기어(sector gear), 홀더(holder), 캠(cam) 등 4가지 부품으로 이루어진 결합체에 대하여 강도해석을 수행하였다.

표 1 기존 리클라이너와 라운드 리클라이너의 비교

Item	Conventional	Round
No. of Parts	12~16	8~10
Weight	1.0~1.5 kg	0.6~0.9 kg
Price	10,000 won	6,000 won

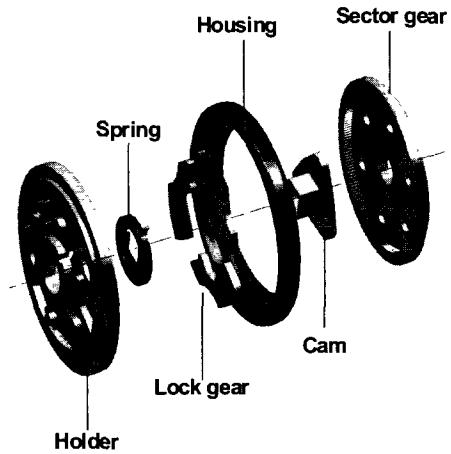


그림 1 라운드 리클라이너의 주요 구성품

3. 재료 시험

재료의 기계적 특성을 파악하고, 유한요소해석에 입력될 물성치를 구하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 시험에 사용된 재료는 Ni-Cr-Mo강(SNCM 220)으로, 가스침탄 열처리[8]를 한 상태이기 때문에 항복응력이나 인장강도는 상당히 높으나, 균일연신율은 2~3% 정도이며 총연신율의 경우도 5% 정도로 매우 낮은 것으로 나타났다. 표 2는 인장시험 결과로 얻어진 재료의 기계적 특성을 정리한 것이다.

표 2 SNCM 220 재료의 주요 물성치

Property	Unit	Value
Thickness	mm	4
Young's Modulus	GPa	207
Yield Stress	MPa	1,168
Ultimate Tensile Strength	MPa	1,280
Uniform Elongation	%	3
Total Elongation	%	5
Stiffness Coefficient	MPa	1,625
Strain-Hardening Exponent		0.065

4. 유한요소해석

4.1 해석 모델

라운드 리클라이너의 정적 강도를 해석하고 안전성을 평가하는데 있어, 본 연구에서는 현재 양산되고 있는 기존 모델('A100')과 개발을 추진하고 있는 라운드 리클라이너 모델의 해석을 병행해서 수행한 후 이를 비교, 검토하기로 하였다. ABAQUS/ Standard[6]를 사용하여 정적·내연적 탄소성 해석을 실시하였으며, 라운드 리클라이너 모델은 요소망의 크기에 따라 조대요소망(rough mesh)과 세밀요소망(fine mesh) 모델로 구분하여 해석하였다

4.2 정적강도시험 조건

라운드 리클라이너 단품의 정적 구조강도 시험은 그림 2에 도시한 바와 같이 암(arm)에 길이 1,000 mm의 강체 막대를 부착하여 그 끝에 605 kgf의 힘을 가할 때 각 부품의 안전성을 조사하는 방법으로 실시된다. 이 하중은 리클라이너 중심에 대하여 605 kgf·m의 모멘트를 가하게 되며, 이 값은 신 FMVSS 301[7] 시험의 벤치 마킹을 통하여 더미(dummy)의 머리가 헤드레스트(head rest)에 가하는 충격량을 정적하중으로 환산한 것이다. 이 값은 시트에서 리클라이너 부에 직접적인 힘을 미치므로 가장 대표적인 정적강도시험 조건으로 사용되고 있다

4.3 A100 모델의 해석

4.3.1 유한요소 모델링

A100 모델의 정적강도해석에 사용된 요소는 평면변형률 솔리드 요소이다 요소 크기는 해석 결과에 가장 큰 영향을 미친다고 생각되는 기어 치형부에서 약 0.03 mm 크기로 가장 조밀한 요소망으로 구성하였으며, 총 요소수는 약 125,000 개이다

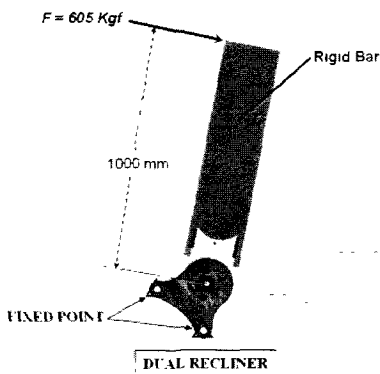
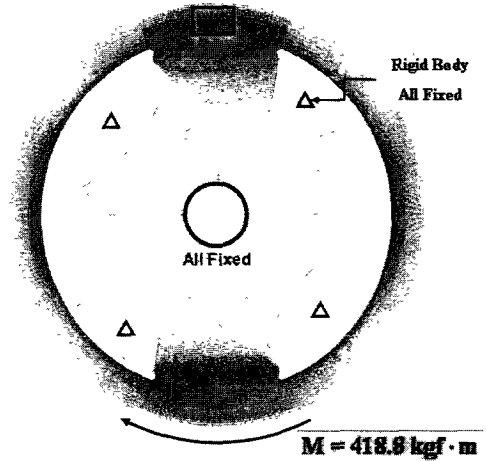
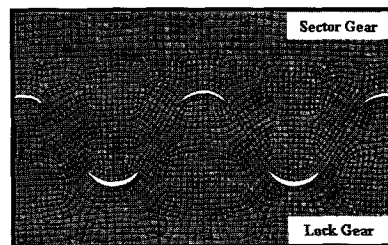


그림 2 라운드 리클라이너의 정적강도시험 조건

그림 3은 유한요소 모델과 경계조건을 나타낸 그림이다 그림 2와 같은 하중조건을 본 모델에 적용시키기 위하여, 캠의 안쪽 경계면 절점들의 변위를 구속하고, 홀더는 'Rigid Body'로 모델링 하고 역시 변위를 구속하였다. 그리고 섹터기어의 바깥면 절점들을 일체로 구속하여 리클라이너의 중심점에 대하여 418.8 kgf·m의 모멘트를 가하였다.



(a) 전체 모델



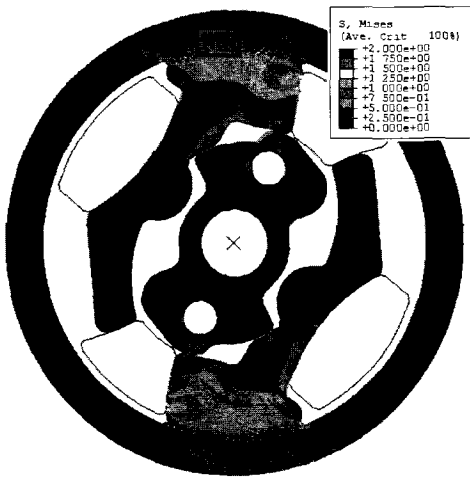
(b) 치형부 확대도

그림 3 A100 제품의 유한요소 모델링

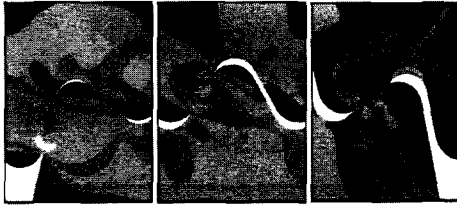
4.3.2 해석 결과

전술한 경계조건에 따라 계산한 유효응력의 분포를 그림 4에 나타내었다. 섹터기어와 락기어가 접촉하는 부위에는 거의 모든 치형에서 항복응력(1,168 MPa)을 초과하는 유효응력이 발생하며, 이곳에서 소성변형이 발생할 것으로 예측된다.

그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 가장 왼쪽(모멘트와 반대방향) 치형의 이뿌리면에 최대 2% 정도의 소성변형률이 발생하나, 파단연신율이 5%인 것으로 볼때 파단에 이르지 않는 것으로 추정된다 또한 이외의 다른 치형들에 발생하는 최대 소성변형률의 수준은 1% 미만이며, 매우 좁은 영역에 국한된다.

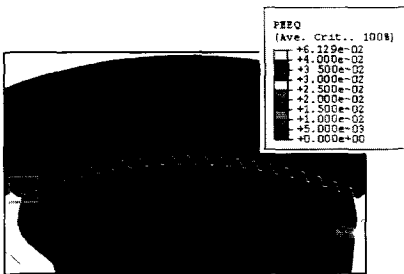


(a) 전체 모델



(b) 치형부 확대도

그림 4 A100 모델의 유효응력 분포



(a) 상반부 확대도



(b) 치형부 확대도

그림 5 A100 모델의 유효변형률 분포

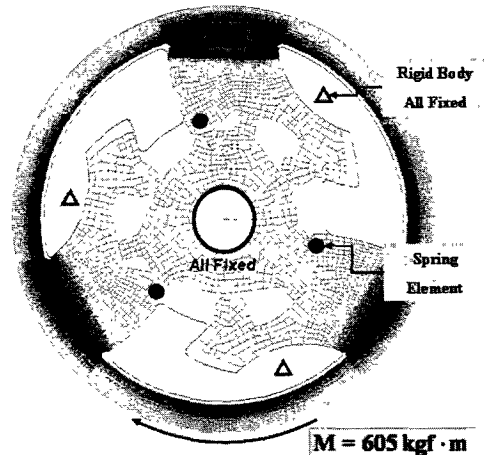
4.4 라운드 리클라이너 모델의 해석

4.4.1 유한요소 모델링

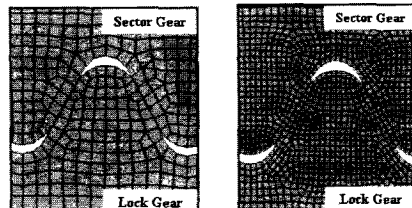
요소망 크기에 따른 해석결과와의 차이를 비교하기 위하여 라운드 리클라이너 모델은 조대요소망 및 세밀요소망 모델의 두 가지로 구분하여 해석을 수행하였다. 두 모델의 구분은 치형부의 요소 크기를 기준으로 하였으며, 이 부분을 제외한 다른 부위는 두 모델이 동일하다. 조대요소망 모델은 0.06 mm의 요소 크기에 총 34,000개의 요소를 가지며, 세밀요소망 모델은 0.03 mm의 요소 크기에 총 122,000개 정도의 요소로 구성되었다.

그림 6은 라운드 리클라이너의 유한요소 모델과 경계조건을 나타낸 그림이다. 절점들의 변위 구속 조건은 A100 모델에서와 같으며, 다만 섹터기어에 가하는 모멘트의 크기는 신제품에 대한 강도 요구 조건의 상승에 따라 605.5 kgf·m로 하였다.

변위 구속이 없는 섹터기어에 모멘트를 가하면 주변 부품들과의 접촉이 인식되지 않은 해석 초기에 미소한 강제운동이 발생할 수 있고, 이로 인하여 해가 수렴되지 않는 문제가 일어날 수 있다. 본 해석에서는 요소수가 많은 세밀요소망의 경우 이러한 문제가 실제로 발생하였으며, 이를 해결하기 위하여 섹터기어의 절점들 중 변위가 가장 작을 것으로 추정되는 점에 스프링 요소를 달아서 강제운동을 방지하는 기법을 사용하였다.



(a) 전체 모델



(a) 조대요소망

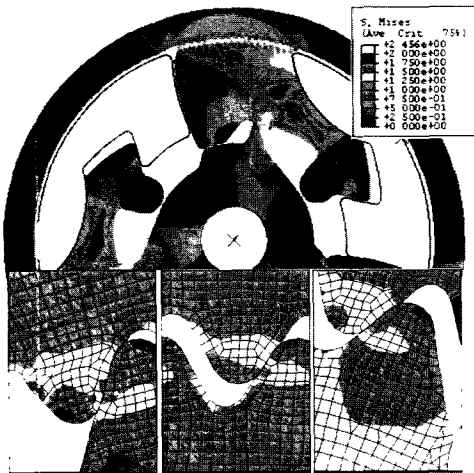
(b) 세밀요소망

그림 6 라운드 리클라이너의 유한요소 모델

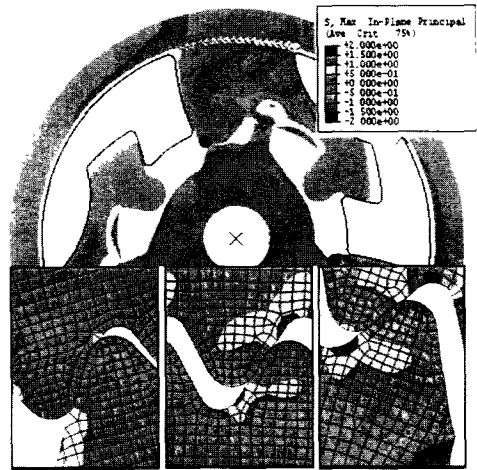
4.4.2 해석 결과

그림 7에서 보는 바와 같이 두 가지 요소망 모두 락기어의 거의 모든 치형에서 섹터기어와 접촉하는 부위의 유효응력이 항복응력을 초과하며, 이곳에서 소성변형이 일어날 것으로 예측된다. 그러나 서밀요소망 모델의 경우가 조대요소망의 경우보다 상당히 높은 응력 수준을 나타내고 있으며, 이는 요소 크기에 따른 일반적인 응력해석 결과의 경향과 일치하는 사실이다 또한, 확대도를 보면 시계방향으로 갈수록 락기어와 섹터기어와의 틈새가 점점 벌어져 접촉면적이 줄어들고 있으며, 심지어 락기어가 홀더와 접촉하는 부위에서는 성형이 된 것을 알 수 있다 이 외에도 락기어의 위치를 지지하기 위하여 설계된 캠 돌출부에서도 소성변형이 발생할 것으로 예상된다.

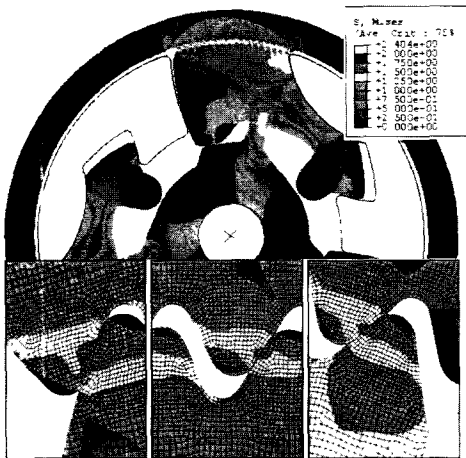
그림 8은 라운드 리클라이너 모델의 제1주응력 분포를 나타낸다 락기어 중앙의 목 부분과 시계방향 치형의 이뿌리 부분에서 항복응력을 약간 상회하는 제1주응력 값을 보이고 있다 락기어 부품이 파인블랭킹 성형 및 침탄열처리 공정으로 인하여 연신율이 극히 낮아진 점을 고려할 때 이 부분에서 피로파괴를 일으킬 가능성이 있는 것으로 판단된다. 또한 섹터기어는 락기어보다 더 높은 최대 주응력을 나타내고 있으나, 본 2차원 모델에 포함되지 않은 치형 바닥면의 지지를 받기 때문에 락기어보다 오히려 안전할 것으로 보인다. 조대요소망 모델과 세밀요소망 모델의 주응력 수준은 유효응력의 경우와 비교할 때 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.



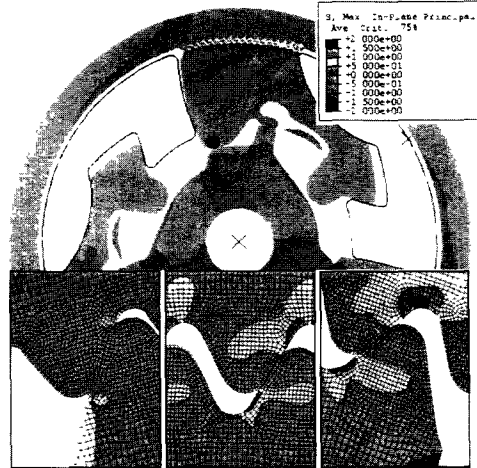
(a) 조대요소망



(a) 조대요소망



(b) 세밀요소망

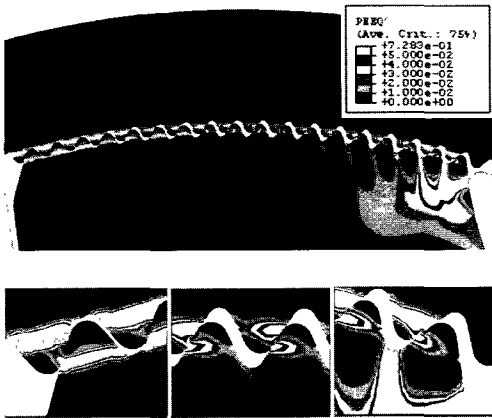


(b) 세밀요소망

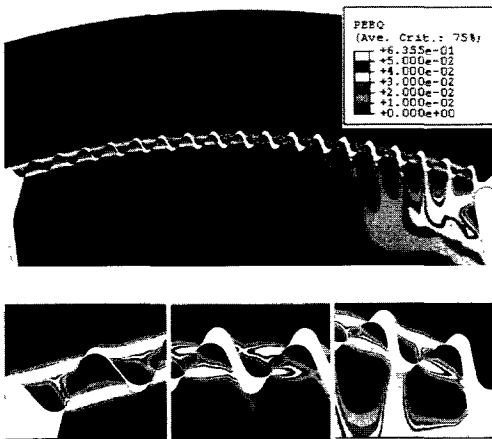
그림 7 라운드 리클라이너의 유효응력 분포

그림 8 라운드 리클라이너의 제1주응력 분포

그림 9의 소성변형률 분포를 보면 거의 모든 치형의 이뿌리면과 락기어-홀더 접촉부 근처에서 파단연신율 5%를 넘는 소성변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 요소 크기에 따른 소성변형률 분포의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.



(a) 조대요소망



(b) 세밀요소망

그림 9 라운드 리클라이너의 유효변형률 분포

5. 결론

상용 유한요소 프로그램 ABAQUS/Standard를 사용하여 라운드 리클라이너의 정적강도를 해석하고, 정확한 결과를 얻을 수 있는 해석기법을 연구하였다. 또한 현재 양산되고 있는 리클라이너 모델에 대한 강도해석을 병행하여 두 모델을 비교함으로써 안전성 여부를 판단하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 기존의 A100 모델에 대한 정적구조강도 해석 결과, 유효응력의 경우 거의 모든 치형에서 항

복응력을 약간 넘어서는 응력 분포를 보였다. 소성 변형률의 경우에는 최대 2% 정도로 파단연신율 5%에는 미치지 못하고 있으므로 주어진 하중조건에서는 안전한 것으로 판단된다.

(2) 개발 중인 라운드 리클라이너 모델에 대한 강도해석을 수행한 결과, 두 모델 공히 거의 모든 치형에서 항복응력을 상회하는 유효응력 및 제1주 응력 분포를 나타내었다. 또한 소성변형률 역시 파단연신율을 훨씬 상회하여 일부 치형에서는 눈에 띠 정도의 성형이 발생하는 모습도 볼 수 있었다. 따라서 본 모델은 요구되는 하중조건에서 안전성에 문제가 있는 것으로 판단되며, 추후 설계변경이 있어야 할 것으로 보인다

(3) 라운드 리클라이너의 기어 치형부 요소 크기에 따라 조대요소망 및 세밀요소망의 두 가지 모델로 구분하여 해석한 결과를 비교하면, 유효응력의 경우 세밀요소망 모델이 조대요소망 모델보다 훨씬 높은 값을 나타내었으나, 주응력과 소성변형률 분포에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

(4) 섹터기어는 락기어보다 더 높은 최대 주응력을 나타내고 있으나, 2차원 모델에 포함되지 않은 치형 바닥면의 지지를 받기 때문에 실제로는 락기어가 더 위험할 것으로 보인다. 이러한 추정을 검증하기 위하여는 바닥면까지 모델링한 3차원 해석이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Glance, P., "Computer-Aided Engineering of Seat Structure", *SAE Paper 861394*, pp. 5396-5402, 1986.
- [2] 이상근, 승객안전도 향상을 위한 자동차 시트 및 에어백 설계, 강원대학교 대학원 석사학위논문, 1998
- [3] 김현영, 이상근, "자동차용 시트의 충돌성능 예측", *한국자동차공학회논문집*, Vol. 7, No. 5, pp. 192-204, 1999.
- [4] 이효용, 임중연, 범형택, "FMVSS 강도테스트에 따른 자동차 시트프레임의 유한요소해석", *한국자동차공학회논문집*, Vol. 7, No. 5, pp. 241-247, 1999.
- [5] NHTSA USA, "FMVSS Standard No 207 - Seating Systems".
- [6] HKS, Inc., *ABAQUS/Standard User's Manual*, Ver 6.3, 2002
- [7] NHTSA USA, "FMVSS Standard No.301 - Fuel System Integrity".
- [8] 김학운, 박상준, *표면열처리*, 원창출판사, 2003.