

헬리컬 코니칼 인볼류트기어의 3D 모델링과 치면 응력해석에 관한 연구

강재화*, 이도영*, 김준성**, 허철수*, 류성기#

(* 경상대학교 기계항공공학부, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부, # 경상대학교 기계항공공학부)

A Study on 3D Modeling & Stress Analysis of Helical Conical Involute Gear

Jai-Hwa Kang*, Do-Young Lee*, Jun-Sung Kim**, Zhe-Zhu Xu*, and Sung-Ki Lyu#

(Received 3 February 2014; received in revised form 5 February 2014; accepted 10 February 2014)

ABSTRACT

Generally, marine transmissions contain straight shafts and helical gears, meaning that enginerooms require more space. In order to guarantee a level engine space for conical involute gears or beveloid gears, both of which are important machine parts, a conical gear was used to replace the traditional cylinder gear. Owing to weak points such as the point contact phenomenon of the teeth, a limitation of the width of each tooth in terms of the addendum, the variational modification coefficient, and the difficulty of processing, research about conical involute gears remains at a standstill.

Along with the increasing number of applications of conical involute gears, research on conical gear design technology is necessary. In this paper, in an effort to enhance conical gear design technology, research on the 3D modeling and stress analyses of helical conical involute gears were done.

Key Words : Conical Involute Gear(코니칼 인볼류트 기어), Straight Shaft(직선축), Crossed Axis(교차축), Skewed Axis(엇갈린축), Beveloid Gear(베벨로이드 기어)

1. 서론

기어란, 두 축 사이의 동력을 전달하는 역할을

하는 기계요소로써 자동차의 변속기나 선박의 감속기에 없어서는 안 되는 중요한 부품이다. 그러나 그 사용경험과 이론이 정립 되어있는 원통 기어(Cylindrical gear)와는 달리 원추형 기어(Conical gear)에 대한 연구경우 국내에는 전무한 상태다.

코니칼 기어(Conical gear)는 평행축(Parallel axes) 뿐만 아니라 교차축(Crossed axes), 엇갈린 축(Skewed axes)에서의 동력 전달과 함께 원통 기어와도 사용할 수 있는 기어이다. 그리고 베벨 기어(Bevel gear)가 커버할 수 없는 작은 축각 범위에서도 사용할 수 있고 백래쉬(Backlash)

* Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

** Department of Engine System Engineering Mokpo National Maritime University

C. A. : Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University (ReCAPT)
E-mail : sklyu@gnu.ac.kr

조정을 쉽게 할 수 있다.

코니칼 기어를 적용한 사용 예는[1] Down-angle 출력축을 가진 선박용 감속기(Marine transmissions with down-angle output shafts), AWD 자동 변속기(Automatic transmissions for AWD vehicles), 조향 기어박스(Steering transmission), 로봇용 백래쉬 방지 유성기어(Low-backlash planetary gears for robots) 등이 있다. 이러한 연구는 일본, 독일, 미국, 영국 등의 소수 국가에서만 이루어지고 있으며, 상용화 단계를 거쳐 오고 있지만 국내에서는 코니칼 인블류트 기어에 관한 연구는 이제 막 걸음마 단계로 한 차례의 설계 이론 연구가 있었을 뿐이다. 따라서 한국에서는 새로운 분야이면서, 향후 활용 가능성이 무궁한 코니칼 인블류트 기어의 설계 기술 보유를 위한 연구가 반드시 필요하다.

본 논문에서는 코니칼 기어의 기하학을 고찰하고 헬리컬 코니칼 인블류트기어의 컴퓨터 해석(CAE)을 위한 3D 모델링을 하고, 3D 가상화 모델을 이용한 물리패턴과 치면 압축응력 해석을 하였다.

2. 코니칼 인블류트 기어의 기하학

코니칼 인블류트 기어는 스퍼 기어에서 시작된 헬리컬 기어의 이론과 마찬가지로 헬리컬 기어에서 한 번의 좌표 변환을 더 거쳐 생긴 기어이다.

기어를 창성하는 기준랙(Basic rack) 평면을 고려해서 이 랙의 직접적인 절삭이 이루어지는 면을 기어의 축에 대해 δ 만큼 기울이고 ψ 만큼 비틀림각을 부여하면 헬리컬 코니칼 인블류트 기어가 생성된다.^[2,3]

Fig. 1은 스퍼 기어와 기준랙과의 절삭 관계를 나타낸 것이며, α_{or} 과 α_{ol} 은 각각 기준랙의 우치면 치직각 압력각, 좌치면 치직각 압력각을 의미한다.

Fig. 2는 헬리컬 기어와 기준랙과의 절삭 관계를 나타낸 것이다. 좌표계 o-x, y, z에서 x축을 기준으로 ψ 만큼 회전시킨 기준랙 평면에 의해 헬리컬 기어가 만들어 진다.

Fig. 3은 스퍼 코니칼 기어와 기준랙과의 절삭 관계를 나타낸 것이다. 좌표계 o-x, y, z에서 y축을 기준으로 각 δ 만큼 회전시킨 기준랙 평면에 의해 기어가 창성되는 것을 나타낸다.

Fig. 4는 헬리컬 코니칼 기어와 기준랙과의 절삭 관계

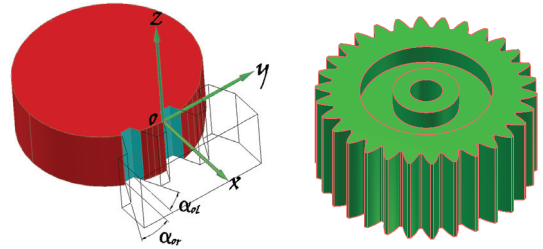


Fig. 1 The geometrical morphology of spur gear and 3D model

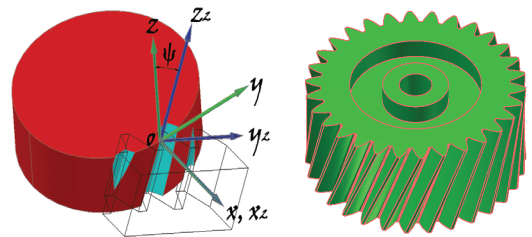


Fig. 2 The geometrical morphology of helical gear and 3D model

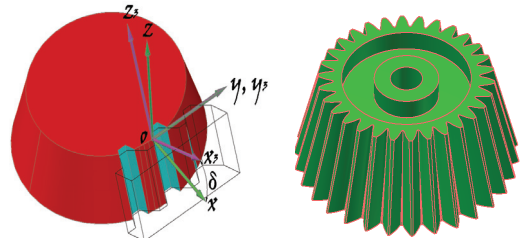


Fig. 3 The geometrical morphology of conical gear and 3D model

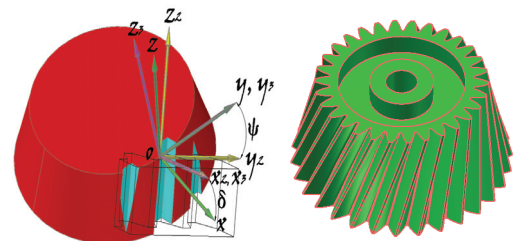


Fig. 4 The geometrical morphology of helicalconical gear and 3D model

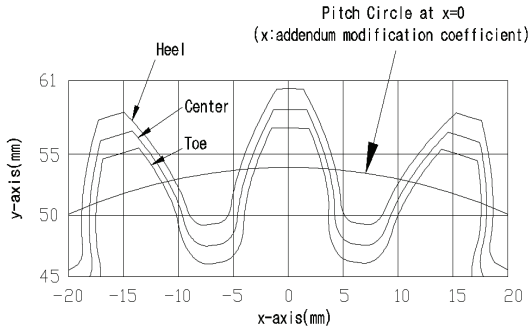


Fig. 5 Profile of helical conical gear

를 나타낸 것이다. 좌표계 o-x, y, z에서 우선 Fig. 3과 같이 y축을 기준으로 δ 만큼 회전시키고, 다시 좌표계 o-x3, y3, z3에서 x2, x3축을 기준으로 ψ 만큼 회전시킨 좌표계 o-x2, y2, z2의 기준력 평면에 의해 헬리컬 코니칼 기어가 생성되는 것을 보여준다.

Fig. 4의 헬리컬 코니칼 기어는 좌·우치면의 축직각에 대한 값이 서로 달라진다. 이는 두 번의 좌표 변환에 의해 기어의 축직각면에 대한 호브 절삭면의 좌·우치면 압력각이 달라지기 때문이다.

Fig. 5는 연속된 코니칼 기어의 소경부(Toe), 중심부(Center) 및 대경부(Heel)의 치형을 겹쳐놓은 그림이다. x축의 '0' 값은 치의 중심축을 지난다는 것을 의미한다. y축 값은 기어 중심축에서부터의 반경방향 거리를 나타낸다. 전위계수가 영(零)인 치폭방향 높이에서의 피치원경을 기준으로 소경부와 중심부, 대경부의 이빨 두께 차이가 확연히 드러나는 것을 확인할 수 있다. 코니칼 기어는 일정한 절입 깊이로 절삭을 하면서 연속적으로 기어의 외경이 달라지기 때문에 전위 기어와 같은 효과를 가진다.^[4]

3. 코니칼 기어의 모델링

코니칼 기어의 모델링에서 가장 먼저 해야 할 것은 치폭의 각 단면별로 나누어진 전위계수, 변화된 압력각, 축직각 모듈이 적용된 프로파일을 만드는 것이다. 프로파일 생성프로그램은 GPG v0.8을 사용하였다.^[5] Fig. 6에 나타낸 것처럼 각 단면을 등 간격으로 설정하여 프로파일을 복사하여 놓고 단면별 비틀림각을 적용시켰다. 좌치면과 우치면의 치형이 다르므로 두 프로파일을 하나로

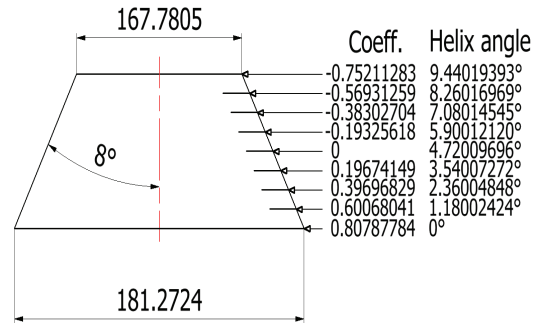


Fig. 6 3D model layout of conical gear

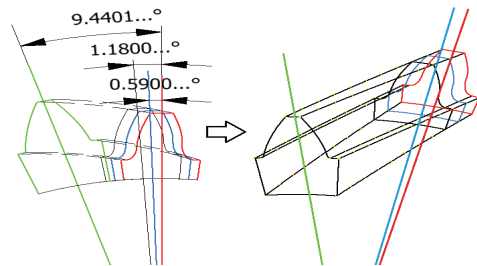


Fig. 7 Helix angle on a tooth

합친 후 Fig. 7과 같이 비틀림각을 적용하여 단면별로 배치하였다.

단면에 프로파일들을 등간격, 등각도 간격으로 Work plane을 형성하고 프로파일들의 부드러운 연결을 위한 Lead line을 만들었다.

Fig. 9의 프로파일의 멀티패턴 프리뷰에서 알 수 있듯이 작은 선들로 이루어진 Fig. 8의 (a) 프로파일을 사용한 것은 치면이 고르지 않게 나타났다. 이것을 고르게 수정하기 위해서는 프로파일을 구성하고 있는 직선들 각각에 대응하는 무수히 많은 리드라인을 설정해주어야 비로소 근접한 Lead line사이에서 생기는 굴곡이 있는 Surface가 생기지 않았다.

그러나 설정하여 해결을 하더라도 결과적으로 얻는 치면은 좁고 긴 평면들의 연결로 만들어지는데 이때에는 불필요한 경계조건들이 무수히 생겨나 실제가공 치면과 차이가 많이 날 수밖에 없으며, 해석을 시행할 경우 실제 실험값에 비해 많은 오차를 가지게 될 것이다. 반면 CAD에서 볼러들인 Script의 수정을 통해 만들어진 Spline을 사용한 Fig. 8의 (b)프로파일로는 Fig. 10에서와 같이 경계

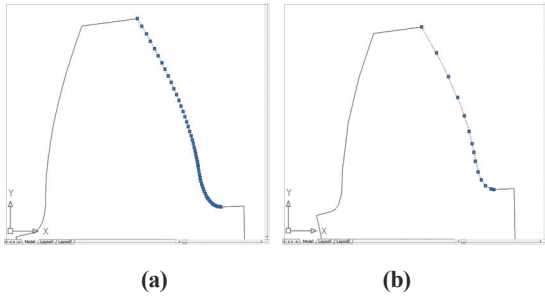


Fig. 8 Profiles of helical conical gear tooth

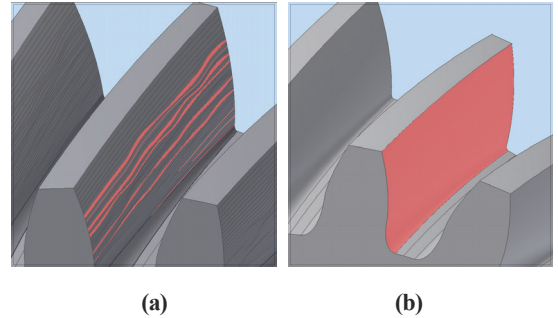


Fig. 10 3D models of helical conical gear

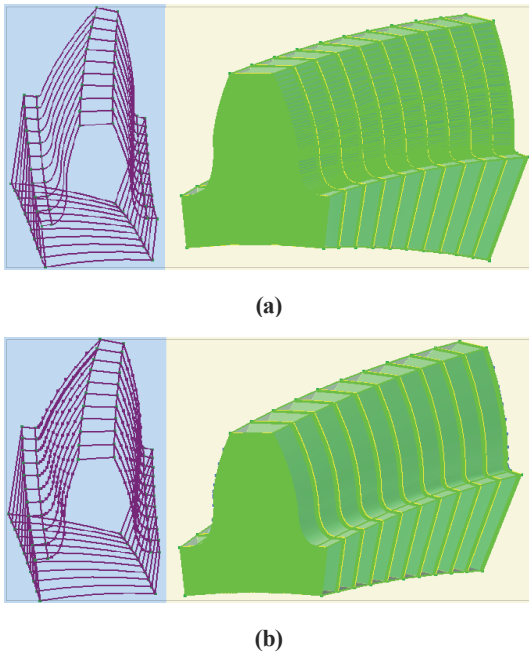


Fig. 9 Multi patterns of tooth profile

가 없는 매끄러운 곡선의 치면이 됨을 볼 수 있었고, 불필요한 지오메트리가 생기지 않는 단순화된 모델이 되었다. 이것은 호빙에서 얻을 수 있는 연속적인 가공면과 가장 흡사한 치면의 형상이라 할 수 있겠다. 그리고 위 과정을 반복으로 잇수 30개의 Z30을 모델링 하였다.

현재 상용화된 기어관련 모델링 또는 해석 프로그램들에는 아직까지 헬리컬 코니칼 인볼류트 기어에 대한 모델이 존재하지 않아 3D 가상화 모델을 통한 기어의 성능 또는 적용된 기어박스의 전체 해석을 할 수 없는 상황이다. 이에 코니칼 기어의 3D 구현을 위한 모델링 방법 연구도 필수 불가결하다. 본 논문에서의 코니칼 기어의

모델링 방법은 상용 해석 프로그램을 이용한 정적 해석을 위해 고안하였다.

현재 상용화된 기어관련 모델링 또는 해석 프로그램들에는 아직까지 헬리컬 코니칼 인볼류트 기어에 대한 모델이 존재하지 않아 3D 가상화 모델을 통한 기어의 성능 또는 적용된 기어박스의 전체 해석을 할 수 없는 상황이다. 이에 코니칼 기어의 3D 구현을 위한 모델링 방법 연구도 필수 불가결하다. 본 논문에서의 코니칼 기어의 모델링 방법은 상용 해석 프로그램을 이용한 정적 해석을 위해 고안 하였다.

본 논문의 모델링에서 주목할 것은 점과 직선으로 구성되어 있는 프로파일의 스플라인화이다. 치폭을 나눈 각 단면들에는 전위에 따라 각기 다른 치형을 가지며 좌치면과 우치면의 형상이 달라 두 프로파일이 결합된 하나의 닫힌 프로파일을 생성시켜야 한다. 그러므로 프로파일 생성프로그램을 이용해 해당 프로파일의 스크립트를 하나하나 만들어 내어야 한다. 최초 생성된 스크립트는 2D CAD에서 3D에서 사용할 수 있는 닫힌 프로파일로 편집 되는데 이때 무수히 많은 점과 직선을 포함하는 프로파일의 구조로는 Fig. 10과 같이 불필요한 요소를 포함하는 간단한 외형표현에 그치지 않는 모델이 된다. 인볼류트 곡선위의 점을 양 끝점으로 하는 직선들의 모임이 최초 생성 스크립트인데 이점들을 지나는 스플라인을 생성하면 이는 인볼류트 이론상의 이상적인 인볼류트와 가장 흡사한 곡선이 되는 것이다. 그리고 모델링 프로그램들의 특징으로 볼 때 아무리 미세하게 나눈 직선들이라 하더라도 경계 조건으로 인식을 한다는 것과 스플라인은 경계가 없는 연속적인 곡면을 표현 할 수 있다는 것에 착안하여 보다 실제에 가까운 코니칼 기어의 3D 가상화 모델을 구현 할 수 있었다.

4. 3D 가상화 모델을 이용한 물림패턴과 치면 압축응력 해석

4.1 해석 조건

코니칼 기어가 적용될 선박 감속기의 기본 설계에서 기어가 장착될 환경은 Fig. 11과 같다. 축각은 14도를 가지고, 기어는 각각의 피치원이 만나는 조건으로 정렬되어 있으며, 축과 기어는 열박음이 되어있고 각각의 축 양쪽에 베어링이 결합되어 있는 구조이다. 열박음 된 기어와 축은 슬라이딩이 없는 억지끼움 상태로 둘은 떨어지지 않는 한 몸체로 간주한다. 본 해석에는 앞서 모델링한 크라운닝 0.05 mm의 Z30과 Z40 그리고 크라운닝이 없는 Z30과 Z40이 사용되었다.

해석에 사용된 소재의 물성값은 Table 1과 같다. 본 해석은 정적 해석으로 치 하나를 기준으로 해석을 실시하였다. 해석 프로그램은 ANSYS를 사용하였고 해석조건은 Fig. 12와 같이 기어의 모든 자유도를 고정시키고 Z30은 축의 접선방향 움직임만 허락하고 200, 300, 400 N·m의 모멘트를 걸어 주었고 치면 접촉부위의 element size는 9.7e-004 m로 하였다. 접촉 조건은 하중에 따라 접촉간격이 변할 수 있고, 마찰계수가 '0'에 가까워 Free sliding을 허용하는 비선형 접촉 정의인 Frictionless 조건을 사용하였다.^[6]

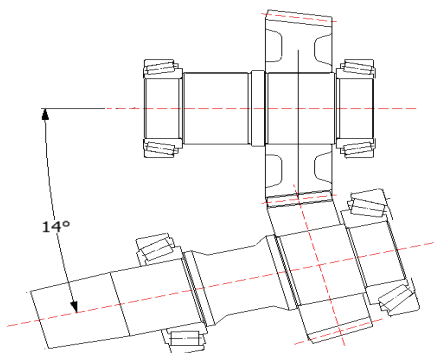


Fig. 11 Conical gear pairs in gearbox

4.2 해석 결과

크라운닝 량과 하중조건에 따른 최소 주응력(Minimum principal stress)을 Fig. 13과 Fig. 15~17에 나타내었고 등가 응력(Equivalent (von-mises) stress)은 Fig. 14와 Fig. 18~20에 나타내었다. 크라운닝(6)이 없을 때 보다 Z30과 Z40 각각 0.05 mm, 도합 0.1 mm의 크라운닝을 적용하였을 때가 최소 주응력과 등가응력이 모두 낮게 나타났다. 각 모멘트에 대한 응력해석 결과 그림을 보면 접촉압력 부위가 넓어지고 있는 것을 확인할 수 있다. Table 2에 크라운닝 량과 모멘트별 응력 해석 값을 나타내었다.

Fig. 21과 Fig. 22는 치폭 방향과 치끝선을 평행하게 놓고 본 그림이다. 접촉이 거의 없는 중간 부분을 경계로 위쪽 접촉부는 오른쪽으로 아래쪽 접촉부는 왼쪽으로 약간씩 치우친 모양으로 오른쪽으로 기울어진 팔(8)자형의 접촉 모양을 보였다. 그리고 치의 중간단면을 기준으로 했을 때 물림은 기어의 소경부 쪽으로 치우쳐 있다.

Table 1 Properties of AISI 1045^[7]

Young's Modules	2.05E+11
Poisson's ratio	0.292
Tensile Strength, Ultimate	585 MPa
Tensile Strength, Yield	505 MPa
Compressive Strength, Yield	980 MPa

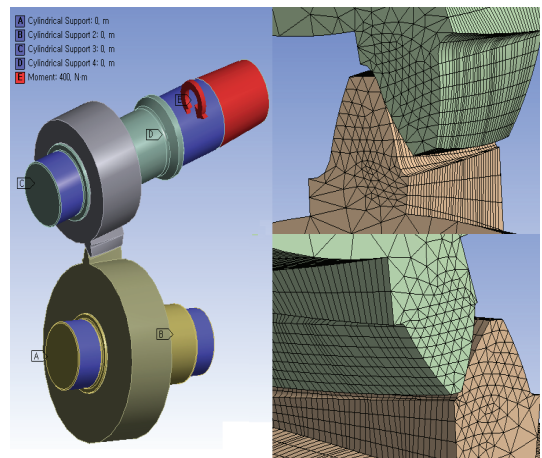


Fig. 12 Constraints and mesh for analysis

Table 2 Stress analysis values of conical gear

	Crowning(c)	Moment(N·m)		
		200	300	400
Minimum principal stress(MPa)	Unmodified	592.3	740.8	865.3
	0.1 mm	479.7	593.4	684.5
Equivalent (von-mises) stress(MPa)	Unmodified	361.3	443.7	517.9
	0.1 mm	302.5	380.6	445.1

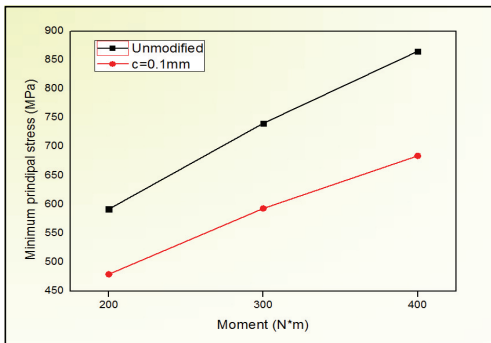


Fig. 13 Minimum principal stress

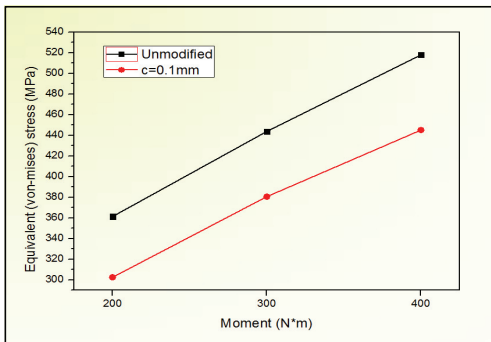
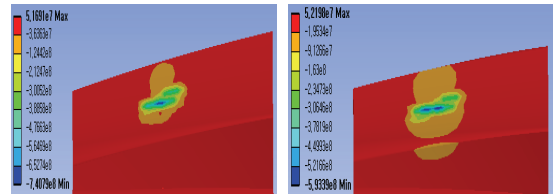
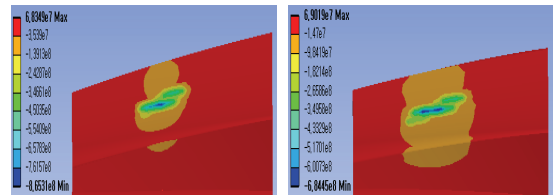


Fig. 14 Equivalent (von-mises) stress



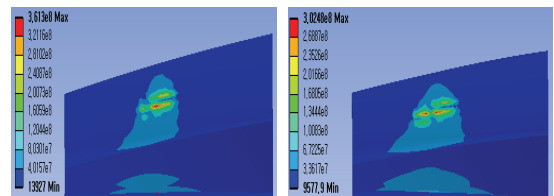
Unmodified c = 0.1 mm

Fig. 16 Minimum principal stress in moment of 300 N·m



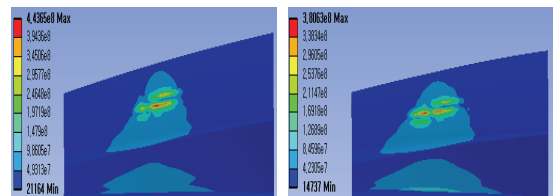
Unmodified c = 0.1 mm

Fig. 17 Minimum principal stress in moment of 400 N·m



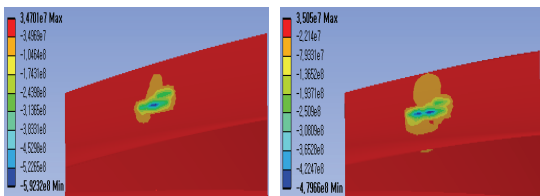
Unmodified c = 0.1 mm

Fig. 18 Equivalent stress in moment of 200 N·m



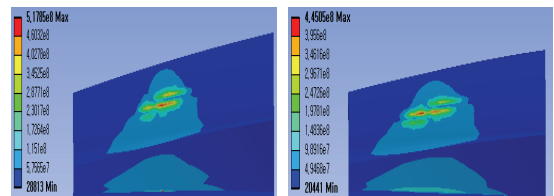
Unmodified c = 0.1 mm

Fig. 19 Equivalent stress in moment of 300 N·m



Unmodified c = 0.1 mm

Fig. 15 Minimum principal stress in moment of 200 N·m



Unmodified c = 0.1 mm

Fig. 20 Equivalent stress in moment of 400 N·m

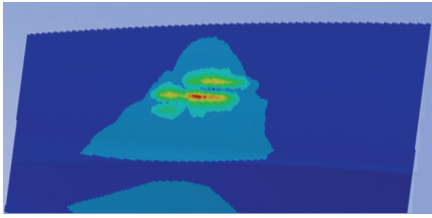


Fig. 21 Contact shape of tooth surface(Unmodified)

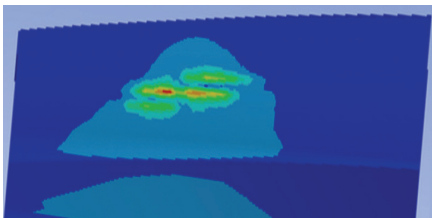


Fig. 22 Contact shape of tooth surface(c=0.1 mm)

5. 결론

본 논문에서는 코니칼 인볼류트 기어의 기하학, 가상화 모델링, 3D 가상화 모델을 이용한 물림패턴과 치면 압축응력 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

원통형 인볼류트 기어와도 맞물릴 수 있고 평행축, 교차축, 엇갈린축에도 대응이 가능한 코니칼 인볼류트 기어의 기하학적 특성을 고찰하였다.

2차원 프로파일의 일체형 스플라인화를 통한 가상화 모델링방법으로 연속적인 매끄러운 인볼류트곡선의 가공면을 가장 가깝게 나타낼 수 있다.

실제 물림형상과 가상화 모델의 해석형상과의 비교분석을 통해 알 수 있는 내용으로 설계상의 기어 위치에서는 소경부 쪽으로 치우치는 물림과 함께 그 형상은 소경부를 왼쪽으로 놓고 보았을 때 Z40에서는 오른쪽으로 기울어진 '8'자의 모양을 나타나고 있으며 Z30의 치면에서는 이와 좌우 대칭인 물림의 형상을 보여 주고 있었다.

코니칼 인볼류트 기어의 기하학, 가상화 모델링방법, 3D 가상화 모델을 이용한 물림패턴과 치면 압축응력 해석기술은 작은 축각을 요구하는 선박용 감속기와 자동차의 트랜스미션 발전에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 지식경제부 산업기술혁신사업(우수기술 연구센터(ATC)) 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Mitome K., Ohmachi T., Komatsubara H., "Development and Applications of Conical Involute Gear", JSME International Conference on Motion and Transmissions, Vol. 1, Fukuoka, p. 679, 2002.
2. Kenichi Mitome, "Table Sliding Taper Hobbing of Conical Gear Using Cylindrical Hob, Part 2 ", Transactions of the ASME, Vol. 103, pp. 452-455, 1981.
3. J. S. Kim, "A Study on the Tooth Bearing of Helical Conical Involute Gear Pairs", Gyeongsang National University, 2009.
4. Kenichi Mitome, "A Study on Conical Involute Gear(No. 1 Design and Manufacturing)", Journal of JSME, C, Vol. 48, No. 430, pp. 852-859, 1982.
5. <http://blog.naver.com/dymaxion/150007000095>
6. Taesung S&E LTD, "ANSYS workbench for Beginner," Sigmaphress, 2008.
7. ISO6336-1, Annex A, "Guide values for crowning and end relief of tooth of cylindrical gears," p. 85, 1996.