

내접 기어를 이용한 프리텐셔너의 구동 메커니즘 개발

Development of Operating Mechanism of a Pretensioner using Internal Gear Pairs

정성필¹, 박태원^{2,✉}, 김옥현¹, 홍요선³
Sung Pil Jung¹, Tae Won Park^{2,✉}, Wook Hyeon Kim¹ and Yo Sun Hong³

1 아주대학교 기계공학과 대학원 (Graduate School of Mechanical Engineering, Ajou Univ.)

2 아주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ajou Univ.)

3 ㈜디비아이 연구 개발팀 (Technology & Quality Department, DBI, Inc)

✉ Corresponding author: park@ajou.ac.kr, Tel: 031-219-2952

Manuscript received: 2009.12.3 / Accepted: 2010.1.6

The pretensioner is used to retract the belt webbing and tighten up any slack in the event of a crash. The retracting force of the pretensioner helps move the passenger into the optimum crash position in his or her seat. In this paper, the new concept of an operating mechanism of the pretensioning system is presented. The internal gear design program is developed using MATLAB. Two kinds of numerical analysis model are created. The first one, the rigid body dynamic model, is used to estimate the performance of several gear pairs. The initial performance of the new operating mechanism is analyzed and the best combination of the gear pairs is selected. The second one, the structural dynamic model, is used to calculate the deformation of the gear teeth. To decrease the deformation and interference of the teeth, the shape of the gear pairs is changed.

Key Words: Pretensioner (프리텐셔너), Internal Gear (내접기어), Rigid Body Dynamic Model (강체 동역학 모델), Structural Dynamic Model (구조 동역학 모델)

1. 서론

자동차용 프리텐셔너(Pretensioner)는 시트벨트 리트랙터(Seat belt retractor)에 장착되어 충돌, 급정거 등 위급한 상황이 발생하였을 경우 웨빙(Webbing)을 강제 인입시켜 탑승자를 의자에 구속 시킴으로써, 탑승자가 에어백(Air bag), 조향 핸들(Steering handle) 및 윈드실드(Windshield)등과의 충돌로 인해 상해가 발생하는 것을 방지하는 역할을 한다. 최근 프리텐셔너의 효과가 입증됨에 따라 고급 차량을 비롯한 중/저가 차량에도 장착이 확대되고 있는 추세이다.

세계 프리텐셔너 시장은 AUTOLIV, TRW, TAKATA, TOKAIRIKA 등의 선진사 제품이 치열한

경쟁을 펼치고 있으며, 최근 기존 프리텐셔너의 기능을 향상시킨 모터 구동형 프리텐셔너(Motorized pretensioner)^{1,2}가 출시됨에 따라 업체간의 경쟁은 더욱 치열해지고 있다. 국내에서는 델파이 코리아가 모터 구동형 프리텐셔너 기술을 상용화시킴으로써 세계 시장 경쟁에 뛰어들었고,³ 디비아이도 프리텐셔너 구동기술 확보에 박차를 가하고 있다.⁴

지금까지 CAE 해석 기술의 발달과 함께 컴퓨터 수치 해석 모델을 활용하여 프리텐셔너의 성능을 예측하고, 해석 결과를 설계에 반영하려는 많은 연구가 진행되었다. Lee³ 등은 프리텐셔너 시스템에 대한 동역학 및 구조 해석을 수행하였고, 그 결과를 설계에 적용하였다. Jung⁵ 등은 유한요소해석법을 이용하여 리트랙터의 구조적 안전성을 검

증하였다. Lec⁶ 등은 랙-피니언 타입의 프리텐서너의 성능향상을 위해 유한요소 해석법을 이용해 기어에 작용하는 최대 응력을 계산하였고, 이를 토대로 기어의 치형 형상을 변경하였다.

본 연구에서는 CAE 해석 기술을 바탕으로 국내 독자의 프리텐서너 구동 기술을 개발하여, 선진 업체에 대한 기술 의존도를 낮추고 국내 기술 수준을 향상시켜 세계 수준의 경쟁력을 갖는 프리텐서너를 개발하는 것을 목표로 한다. 특히 조사와 공학적 토론(Engineering discussion)을 거쳐 구동 메커니즘의 기초 설계안을 도출하였다. Jung⁷의 연구를 바탕으로 MATLAB 을 이용해 내접 기어 (Internal gear) 설계 프로그램을 개발하여 구동 메커니즘 설계에 활용하였다. 두 가지의 프리텐서너 수치 해석 모델을 생성하여 해석을 수행하였고, 해석 결과를 바탕으로 모델을 수정 및 보완함으로써 최적의 기구구조를 갖는 프리텐서너 구동 메커니즘을 도출하였다.

2. 내접 기어 설계 프로그램

내접기어는 기어의 이가 피치원의 안쪽으로 생성된 기어로서, 유성기어(Planetary gear)등에 많이 활용되고 있다. 내접기어는 기어간 중심거리가 짧아 기어 설치를 위한 공간이 적게 소요되고, 치형의 크기가 같은 압력각(Pressure angle)과 모듈(Module)을 갖는 외접기어(External gear)에 비해 크기 때문에 상대적으로 강성이 강하다는 특징을 갖는다.⁸ 내접기어는 치형 사이의 공간이 외접기어의 치형과 맞물리고, 한 쌍의 내접기어와 외접기어가 맞물리기 위해서는 두 기어의 모듈과 압력각이 같아야 한다.⁹

본 연구에서는 인벌류트 곡선(Involute curve)를 이용하여 기어의 치형을 생성하였다. 인벌류트 곡선으로 생성된 기어는 모듈과 압력각만 같으면 서로 간섭 없이 물릴 수 있다는 장점이 있다.¹⁰ Fig. 1 은 MATLAB 을 이용해 생성한 내접기어의 모습을 보여준다. 그림에서 실선은 내접기어와 외접기어의 치형을 나타내고, 점선은 각 기어의 피치원 (Pitch circle), 이끝 원(Addendum circle) 및 이뿌리 원(Dedendum circle)을 나타낸다.

3. 프리텐서너 수치 해석 모델

본 연구에서 대상으로 한 파이로 타입 프리텐서너(Pyro-typed pretensioner)는 충돌 감지 시 화약

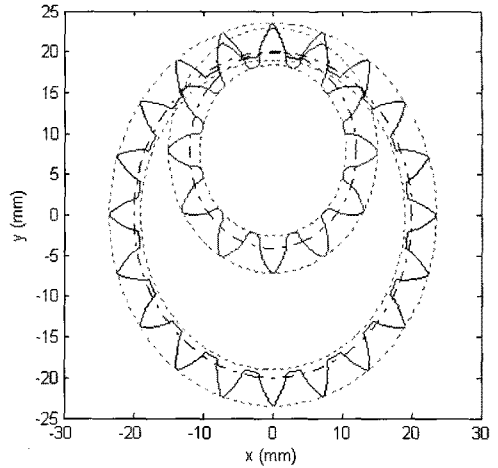


Fig. 1 Internal spur gears created using MATLAB

을 폭발시키고, 이로 인해 발생하는 고압 가스를 이용하여 구동계를 작동시킴으로써 웨빙을 감아들인다. 현재 상용화된 제품들은 랙-피니언 기어 또는 볼기어를 활용한 기구 구조를 구동계로써 많이 사용하고 있다. 따라서 이와 비슷한 방식의 기술에 대한 특허가 다방면에 걸쳐서 이미 등록되어 있기 때문에, 본 연구에서는 인터널 기어 구조를 이용한 새로운 형태의 구동 메커니즘을 개발하였다.

Fig. 2 는 개발된 구동 메커니즘의 기본 구조를 보여준다. 불이 삽입된 원형관 한쪽 끝에 장착된 화약이 폭발하면, 발생된 가스압에 의해 구슬이 움직이면서 반원형의 내접기어를 회전시킨다. 초기에 내접기어와 외접기어는 외접기어 이끝원의 반지름 이상의 간격을 두고 떨어져 있기 때문에, 외접기어의 회전은 내접기어에 영향을 미치지 않

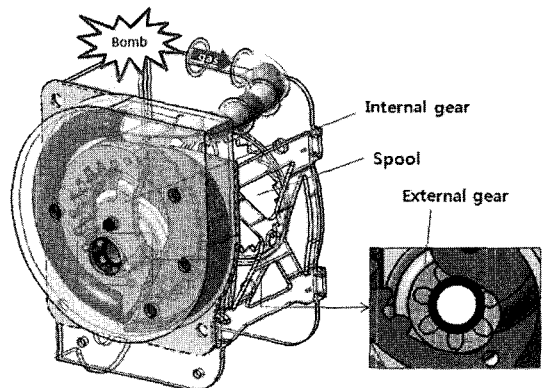


Fig. 2 Concept design of the operating mechanism of the pretensioner

는다. 그러나 내접기어가 회전하게 되면 두 기어 사이의 간극이 좁아지게 되고, 결국 내접 기어와 외접기어가 연결되어 스펴(Spool)을 회전 시킴으로써 스펴에 감겨져 있는 웨빙이 강제 인입된다.

Fig. 2 의 모델의 성능을 평가하고 개선안을 도출하기 위해 총 두 가지 해석 모델을 생성하였다. 먼저 강체 동역학 모델을 이용하여 기어 구조의 전달 효율을 평가하였다. 다음 구조-동역학 모델을 이용하여 기어 치형의 변형의 크기를 예측하여, 변형이 최소가 되도록 기어 형상을 재 설계하였다.

3.1 동역학 해석 모델

Fig. 3 은 Fig. 2 의 기초 설계안을 바탕으로 생성된 강체 동역학 모델을 보여준다. 파이프(Pipe)의 길이를 줄여 내부 공간 증가로 인한 폭발압 감소를 최소화 하였고, 로드(Rod)와 파이프 사이의 마찰을 감소시키기 위해 Fig. 3 과 같은 형태로 로드의 형상을 변경시켰다. 내접 기어와 외접기어는 지면과 회전 조인트로 연결하였고, 기어 치형 사이에 접촉 조건을 부여하였다. 웨빙 인입시 작용하는 더미 바디의 반력을 고려하기 위하여 외접기어에 비선형 토셔널 스프링(Torsional spring)을 장착하여 외접 기어의 회전에 따라 반력 토크가 작용하도록 하였다. 파이프(Pipe)는 지면에 완전 구속시켰고, 파이프(Pipe) 내부에 로드(rod)와 볼(Ball)이 삽입되어 있다. 파이프와 볼, 로드 사이, 로드와 내접기어 사이에 접촉 조건을 부여함으로써 볼에 작용하는 초기 작동력이 로드를 통해 내접기어로 전달되게 하였다. 볼을 밀어주는 힘은 10cc 공간에서 화약을 폭발시켜 측정된 화약 폭발압을 힘으로 환산하여 적용하였다. Fig. 3 의 동역학 모델은 웨빙의 인입량을 정확하게 예측하기 위한 모델이 아니고, 같은 조건에서 기어의 동력 전달 효율을 확인하기 위한 모델이기 때문에 비선형 토셔널 스프링의 강성과 초기 작동력의 크기는 관심대상이 아니다. Fig. 4 는 해석결과를 보여준다. 약 12ms 부근에서 최대 회전각이 약 168° 정도임을 알 수 있다.

Table 1 은 Fig. 3 의 동역학 모델에 장착 가능한 여러 가지 기어의 조합과 각 기어를 장착했을 때 얻은 외접기어의 회전각 결과를 보여준다. 완성차 업계에서 요구하는 프리텐셔너의 전체 크기를 고려하여 내접 기어의 반지름의 길이가 23mm 이하가 되도록 하였다. 모듈(Module)은 1.5, 압력각(Pressure angle)은 20° 로 고정시킨 상태에서 기어의 잇수(N1, N2)와 전위계수(Correction coefficient, G)를 조

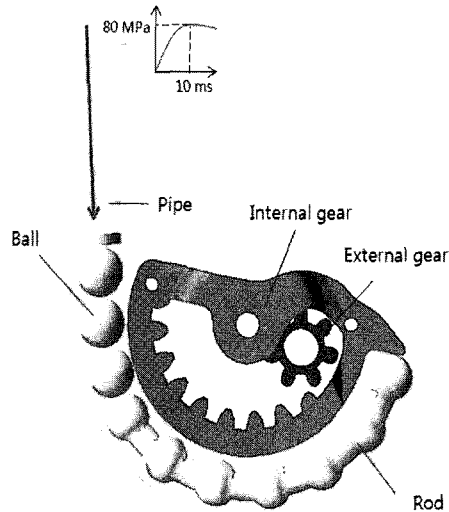


Fig. 3 Rigid body dynamic model of the pretensioner

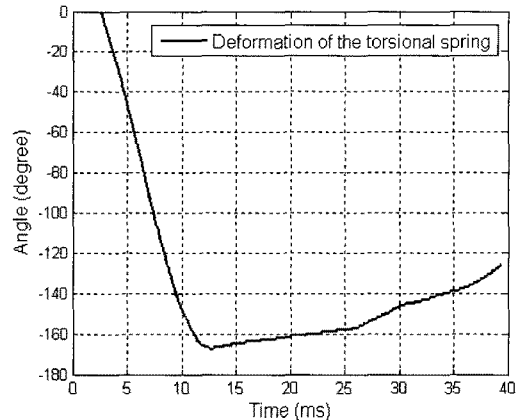


Fig. 4 Analysis result of the rigid body dynamic model

Table 1 Combination of gear pairs and analysis result

Case	N1	N2	G	D(mm)	Result(°)
1	20	8	0.62	8.88	243
2	20	9	0.58	8.15	186
3	21	8	0.62	9.63	222
4	22	8	0.62	10.38	202
5	23	8	0.62	11.13	195
6	23	9	0.62	10.40	235

정하였다. 이때 같은 크기의 전위 계수가 양 기어에 모두 적용되었다. 이끝 원 계수와 이뿌리 원 계수는 각각 1.25 와 1, 공구 날끝 등갈기 계수(Coefficient of the tip radius)는 0.3 으로 설정하였다. Table 1 에서

D는 기어간 중심거리(Distance between center points)이다. Table 1의 결과에서 D가 작을수록 회전각이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 내접기어와 외접기어의 초기 위치에 따라 같은 모델에 대해서도 외접기어의 회전량이 달라진다. 즉, 내접기어의 첫 치형이 외접기어의 치형과 물리기 위해 움직여야 하는 거리가 길어질수록 외접기어의 회전량이 증가한다. 이것은 내접 기어의 회전 관성에너지 증가로 인한 접촉력 증가 때문이다. Table 1의 결과 중 동력 전달 효율이 가장 좋을 것으로 판단되는 Case 1과 Case 6을 대표 모델로 선택하였다.

3.2 구조-동역학 해석 모델

본 연구에서 대상으로 하는 프리텐서너는 10ms 안에 최대 80MPa의 압력을 갖는 화약을 폭발 시킴으로써 구동된다. 따라서 짧은 시간 동안 매우 큰 힘이 기어로 전달되기 때문에 기어 치형이 변형 또는 파손되거나, 치형끼리 서로 맞물리지 않고 내접기어의 치형이 외접기어의 치형을 타고 넘어가는 등의 치형 문제(Tooth trouble)가 발생할 가능성이 높다. 이에 기어 치형의 변형량을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 구조-동역학 해석 모델을 생성하였다. Table 1의 Case 1과 Case 6를 기본으로 하고 Table 2와 같이 치형의 형상을 약간씩 변경시킨 기어를 해석 모델에 적용시켰다. 3.1의 강체 동역학 해석 모델과 같은 경계 조건을 부여하였고, 내/외접 기어를 탄-소성재질로 설정하여 기어 치형의 소성 변형 영역까지 해석을 수행하였다. Table 2는 구조 동역학 해석 모델에 적용된 기어의 조합과 해석 결과를 보여준다. Table 2에서 R은 공구 날끝 둥글기(Tip radius), Δ는 내접기어의 첫 치형의 높이를 감소량이다.

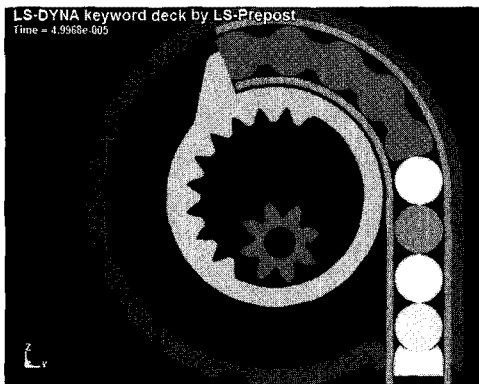


Fig. 5 Structural dynamic model

Table 2 Structural dynamic analysis result

Case	R (mm)	Δ (mm)	Result(°)
1	0.3	0	Interference
	0.3	1.5	142
	0.5	0	152
	0.5	1.5	131
	0.5	2	Trouble
6	0.3	0	Interference
	0.5	0	132
	0.5	1.5	Trouble

Table 2에서 R=0.5mm일 때 외접기어의 회전량이 더 크게 나타났다. Δ=0 mm인 경우 모두 치형간 간섭이 발생했고, Δ=1.5 mm일 때에는 내접기어의 치형이 외접기어를 타고 넘어가는 현상이 발생했다. Table 2의 결과에서 R은 간섭방지에 도움을 주고 있지만, Δ는 치형간 간섭을 줄이는 대신 내접기어의 첫 치형이 외접기어로 전달하는 동력의 효율을 크게 감소시키고 있음을 알 수 있다. Fig. 6(a)와 (b)는 해석 결과를 보여준다. Fig. 6(a)에서 내접기어의 첫 치형과 만나는 외접기어의 치형이 많이 휘었으며, 내접기어와 외접기어의 들뜬 치형 사이에 치형 간섭현상이 발생했음을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 내접기어의 첫 치형의 높이를 낮췄을 때 외접기어가 내접기어를 타고 넘어가는 현상을 보여준다. 이상의 해석 결과를 종합해 보면 치형 문제는 다음의 세가지로 압축된다.

1) 내접기어의 첫 치형과 외접기어 치형의 초기 위치가 많이 떨어져 있을 경우 내접기어로부터 전달되는 힘이 강해지고, 충돌의 성격을 땀으로써 외접기어 치형의 변형량이 증가함.

2) 이로 인해 외접기어의 첫 번째와 두 번째 치형 사이의 간극이 벌어지면서 내접기어와 외접기어 사이에 치형 간섭이 발생함.

3) 초기 힘의 전달률을 감소시키기 위해 내접기어의 첫 치형의 높이를 낮출 경우 내접기어가 외접기어를 타고 넘어가는 현상이 발생함.

1)의 문제의 경우 평상시 웨빙이 자유롭게 움직여서 외접기어의 초기 위치를 정의할 수 없기 때문에 해결이 불가능하다. 2)와 3)의 문제는 내접기어의 첫 치형의 형상을 변경함으로써 물림 성능을 향상시킬 수 있다. 인벌류트 기어의 경우 일반적으로 압력각이 증가하면 물림률은 줄어들지만 치형이 견딜 수 있는 최대 응력과 동력 전달 용량

(Load carrying capacity)은 증가한다.¹⁰ 따라서 본 연구에서는 모듈과 압력각을 증가시킴으로써, 치형 자체의 강성을 향상시켰다.

Fig. 7 은 Case 1 의 기어 조합에 대해 모듈을 1.62, 첫치형의 압력각을 25°로 증가시키고, 공구 날끝 둥글기를 0.5mm 로 설정하여 창성한 기어를 적용하여 해석한 결과이다. 피니언 기어의 경우

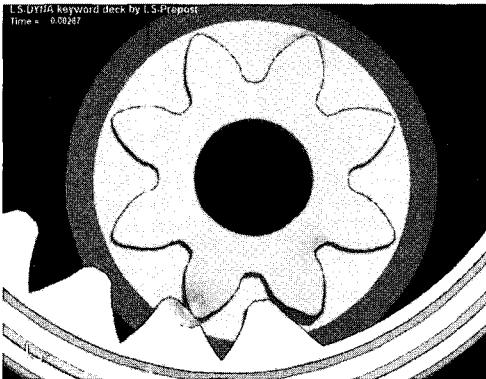


Fig. 6(a) Analysis result of the structural dynamic model I

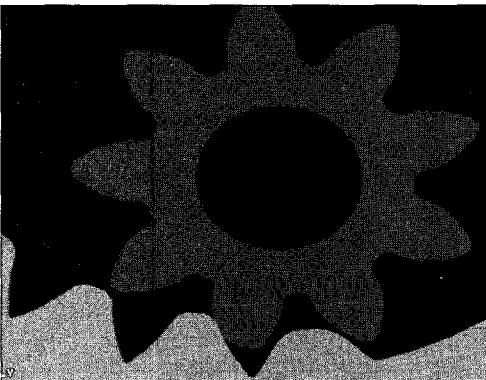


Fig. 6(b) Analysis result of the structural dynamic model II

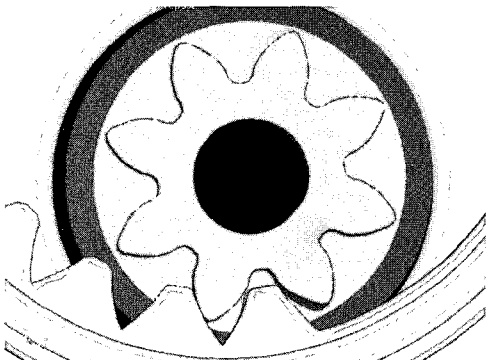


Fig. 7 Analysis result after modification

모듈과 압력각을 변경한 후 이뿌리부 두께가 약 1mm 정도 증가하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 외접기어의 치형의 변형량이 현저히 줄어들었음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인터널 기어를 이용하여 파이프 타입 프리텐서너의 새로운 구동 메커니즘을 개발하였다. MATLAB 을 이용하여 인터널 기어 설계 프로그램을 개발하였고, CAE 해석 기술을 이용하여 설계안의 성능에 대해 평가하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) MATLAB 을 이용하여 인터널 기어 설계 프로그램을 개발하였다.
- 2) 프리텐서너 강제 동역학 모델을 생성하여 기어의 동력 전달 효율을 평가하여 최대의 효율을 가지는 기어를 선택하였다.
- 3) 프리텐서너 구조 동역학 모델을 생성하여 기어 치형의 변형을 예측하였다.
- 4) 모듈 및 압력각 변경을 통해 기어의 치형을 수정하였고, 변형이 거의 일어나지 않도록 기어의 형상을 재설계하였다.

추후 도출된 설계안을 바탕으로 시제품을 제작하여 성능 시험을 실시하고, 결과비교를 통해 최적의 기어 구조를 갖도록 구동 메커니즘을 수정 및 보완할 계획이다.

후 기

본 연구는 ㈜디비아이의 지원에 의한 산학 협력 연구를 통해 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1. Min, S. K., Lee, J. K. and Kim, B. S., "Development of Pre-Crash Safety System using Motorized Seat Belt," Proc. Korean Society of Automotive Engineers Fall Conference, pp. 1219-1224, 2004.
- 2. Park, J. S., Kuk, M. G., Kim, D. H. and Tak, T. O., "Evaluation of Motorized Retractor Locking Mechanism Based on Predetermined Collision Scenarios," Proc. Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference, pp. 212-217, 2007.

3. Lee, Y. B., Ryu, W. H. and Hyun, I. A., "Leveraging the Development of the High-Power Pretensioner using CAE and Evaluate the Influences to Injuries," MSC Korea User's Conference, 2007.
4. Park, C. S., Park, T. W, Jung, S. P., Cheong, K. Y. and Hong, Y. S., "Study on the Dynamic Analysis of a High-Power Pretensioner Considering the Clutch Effect," Proc. Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 223-224, 2008.
5. Jung, C. K., Ahn, H. D., Kim, H. Y. and Woo, S. W., "Structural Analysis of Seatbelt System," Proc. Korean Society of Automotive Engineers Fall Conference, pp. 1523-1528, 1999.
6. Lee, Y. M., Na, B. C., Kim, J. Y., Park, S. U., Seo, J. H. and Cho, Y. S., "A Numerical and Experimental Study on the Modification of Pretensioner to Improve Performance of Seat Belt System," Proc. Korean Society of Automotive Engineers Fall Conference, p. 441, 2008.
7. Jung, S. P. and Park, T. W, "A Study on the Development of the Gear Profile Design Program," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 8, pp. 104-111, 2009.
8. Colbourne, J. R., "The Geometry of Involute Gears," Springer-Verlag, 1987.
9. Dudley, D. W., "Handbook of Practical Gear Design," CRC Presss, 1984.
10. Maitra, G. N., "Handbook of Gear Design," McGraw-Hill, 1985.