

공기압축기 성능향상을 위한 로터 프로파일 설계기술 개발 연구

Development of rotor profile design technology for improving the screw compressor performance

김태윤* 이재영* 이동균** 김윤제†
Kim, Tae-Yoon Lee, Jae-Young Lee, Dong-Kyun Kim, Youn-Jea

ABSTRACT

The performance of screw compressor depends on lots of design parameters of rotor profile, such as length of seal line, wrap angle, blow hole, suction and discharge port size, number of rotor lobe, etc. The optimum rotor profile makes it possible to increase the compression efficiency with low energy consumption, and to minimize the loss of power. In this research, a new rotor profile design and performance analysis are done by computer simulation. It is expected that the volumetric efficiency is improved because the internal leakage is reduced due to the minimization of blow hole and clearance, and the stiffness of rotors is increased due to the reduction of length to diameter ratio. Also, the specific power consumption will be secured for use ranging from low to high operation speed.

1. 서 론

스크류 공기압축기는 로터케이스 내에 맞물려진 두 개의 압/수 로터 회전에 의하여 케이스와 로터 사이 공간 증감을 이용하여 흡입, 압축, 토출과정을 통하여 압축공기를 얻는 장치이다.

1934년 Lysoholm에 의하여 발명된 이후, SRM(Svenska Rotor Maskiner)사에 의해 꾸준히 개발되었으며, 1950년 이후 산업적인 이용에 실질적으로 적용되었고, 현재는 고효율, 저진동, 저소음, 유지관리 등의 장점으로 인해 다른 형태의 압축기를 급속히 대체해 나가고 있다. 최근에는 정밀가공 기술의 발전과 함께 소형 압축기 분야로도 적용범위가 확대되고 있다.

스크류 공기압축기 성능은 로터 프로파일의 치형, 압/수 로터의 로브 수, 흡입구 및 토출구 형상, 스크류 회전수, 로터 지지 기구, 오일 분사 기구, 부하 조절 기구 등에 영향을 받는다.

스크류 공기압축기의 성능향상에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 로터 프로파일이다. 치형 설계시 주요 설계인자를 살펴보면 실라인(seal line), 누설삼각형(blow hole), 용적곡선(volume curve), 흡입 및 토출면적, 압축행정 초기의 폐누설 등을 들 수 있다. 즉, 스크류 공기압축기의 효율은 로터 치형으로 인한 압축가스의 누설(leakage)에 의해 많은 영향을 받게 된다.

최근에는 가공기술의 발달로 보다 정밀한 치면 가공이 가능해지면서, 로터간의 간극과 로터케이스와의 간극을 최소화하여 압력차에 의한 누설을 줄일 수 있게 되었다. 이에 따라 프로파일의 설계 또한, 보다 정밀하게 설계되고 있으며, 이에 관한 많은 연구가 국내외적으로 진행되고 있는 실정이다.

소음과 진동에 민감한 철도차량용 스크류 로터에 있어서 고려해야 할 설계요소로는 저속구동에 적합

† 책임저자 : 정희원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yjkim@skku.edu
TEL : (031)290-7448 FAX : (031)290-5889
* 정희원, 성균관대학교 대학원
** 정희원, 유진기공산업(주), 철도차량사업본부

하며, 사용압력 (일반적으로 10 bar 정도)에 최적화 되어있어야 하고, 외부로부터의 진동에 견고하게 견딜 수 있는 구조이어야 한다.

본 연구에서는 공기압축기로부터의 누설을 최소화하고 낮은 회전수 대역에서 높은 에너지 효율을 갖는 체계적인 로터 프로파일 설계기술개발을 확보하여 장기간 사용 시에도 효율이 저하되지 않는 공기압축기 개발에 적용하고자 한다.

2. 로터 프로파일 설계

일반적으로 스크류형 로터 프로파일 형상은 복잡한 곡선으로 이루어져 있으며, 로터의 기하학적 특성과 제한사항에 따라 치형 함수를 결정하고 로터 회전에 따른 포락선(envelope curve)을 계산하여 설계된다. 또한, 실라인, 권선각(wrap angle), 리드(lead) 길이, 누설 삼각형, 용적곡선, 흡입 및 토출구(inlet port & suction port)의 면적, 압축행정 초기의 폐누설 등 다양한 특성값의 해석과 연계하여 설계되어야 한다.

로터 프로파일 설계에 가장 중요한 부분은 치형 설계이다. Figure 1은 스크류형 로터 프로파일의 개략도이다. 치형 설계시 스토터(male rotor) 로브(lobe) 정점에서 선택된 치형곡선은 로터의 회전으로 치형곡선을 따라 연속적으로 이동하는 생성점에 따라 암로터(female rotor)의 치형이 생성된다.

Table 1의 제원 계산방법에서 암/수 로터의 외경과 중심거리, 암/수 로터의 권선각 및 암/수 로터의 로브수를 입력하면 나머지 형상 치수를 산정할 수 있다.

2.1 실라인

스크류 로터는 꼬인 이를 갖는 한 쌍의 로터로 구성되어 있고, 외주부 및 단부를 케이싱이 덮고 있으며, 케이싱 중앙에서 암/수 로터가 서로 맞물려 회전한다. 스토터상의 한 개의 홈(groove)은 암로터상의 한 개의 홈과 접촉하고 있지만, 다른 홈에 대해서는 서로 케이싱 벽에 의해 차단되어 독립되어 있다. 로터가 회전하면 각 홈의 용적은 변화하고 그것에 맞추어 흡입, 압축, 토출이 이루어진다.

암/수 로터의 맞물린 부분, 로브 정점과 케이싱과의 사이 및 로터 단면과 케이싱 사이에는 구와 홈과의 경계선이 존재한다. 이러한 경계선을 실라인이라 칭한다.

로터가 회전하면 실라인은 축방향으로 이동하고 로터에서 돌출된 부분은 소멸하지만 한 방향에서 로터의 외측에 있는 가상의 실라인이 로터 내부로 들어오고 실제의 실라인이 형성된다. 이와 같은 이동에 의하여 실라인 길이는 변한다.

2.2 권선각

Figure 2에 도시한 바와 같이 흡입측 임의의 한 점(A)이, 로터의 꼬인 곡선을 따라 로터 길이(L) 만

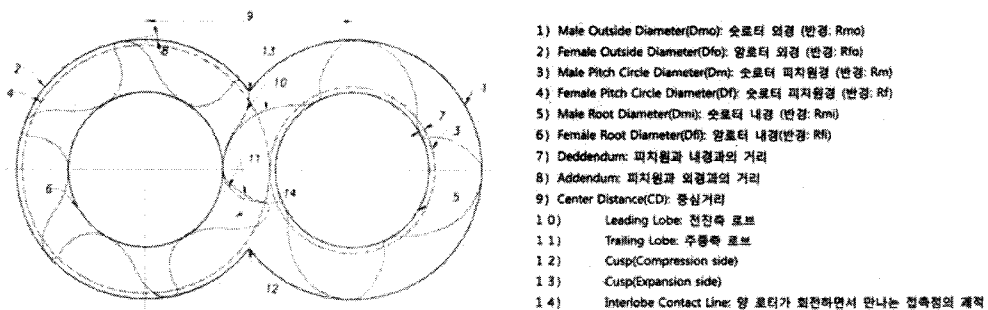


Fig. 1 스크류형 로터 프로파일 개략도

Table 1 주요 제원 계산방법

항목	기호	계산식
1 Male Outside Diameter	Dmo(Rmo)	Input
2 Female Outside Diameter	Dfo(Rfo)	Input
3 Male Pitch Circle Diameter	Dm(Rm)	= $CD * Zm / (Zf + Zm) * 2$
4 Female Pitch Circle Diameter	Df(Rf)	= $CD * Zf / (Zf + Zm) * 2$
5 Male Root Diameter	Dmi(Rmi)	= $(CD - Rfo) * 2$
6 Female Root Diameter	Dfi(Rfi)	= $(CD - Rmo) * 2$
7 Dedendum	Ded	= $Rm - Rmi$
8 Addendum	Add	= $Rfo - Rf$
9 Center Distance	CD	Input
10 Male Rotor Wrap Angle	WrapM	Input
11 Female Rotor Wrap Angle	WrapF	= $WrapM * (Zm / Zf)$
12 Male Rotor Lead	LeadM	= $L * 360 / WrapM$
13 Female Rotor Lead	LeadF	= $LeadM * (Zf / Zm)$
14 Axial Pitch	Ap	= $LeadM / Zm$, or $LeadF / Zf$
15 Lead Angle	mAp	= $ATAN(LeadF / (\pi * Df))$, or $ATAN(LeadM / (\pi * Dm))$
16 L/D Ratio	LD	Input
17 Male Tooth Number	Zf	Input
18 Female Tooth Number	Zm	Input
19 Rotor Length	L	= $L * Dmo$

Input Data는 바뀔 수 있다. 예를 들면, LD(L/D ratio) 대신에 L(rotor length)를 Input으로 넣을 수도 있다. 이 경우 원리는 동일하지만, 계산 수식의 변수들이 달라 질 수 있다.

크림 이동하여 토출측에 도달했을 때의 점(B)를 흡입측 단면에서 보았을 때, 로터의 회전중심(원점)을 기준으로 점(A)와 점(B)가 이루는 사이각(꼬임각을 따라)을 말한다. 권선각이 증가하면 토출단의 면적이 커져 손실이 적어진다. 권선각이 작으면 실라인의 최대값이 증가하여 길이는 상대적으로 짧아진다. 따라서, 누설량도 작아지는 결과가 나타난다.

2.3 리드

로터 흡입측 임의의 한 점(A)가 로터의 꼬인 곡선을 따라, 360° 만큼 길이방향으로 이동했을 때의 점을 (C)라고 하면, 길이방향으로 점(A)와 (C)를 잇는 직선의 길이를 리드(lead)라고 한다 (Fig. 2 참조). 리드 길이는 토출단면적의 변화에 영향을 미친다.

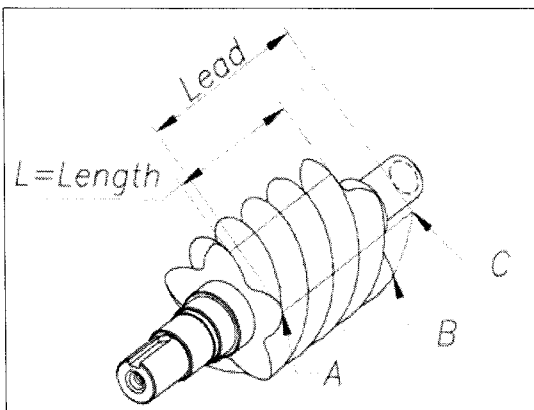


Fig. 2 권선각과 리드

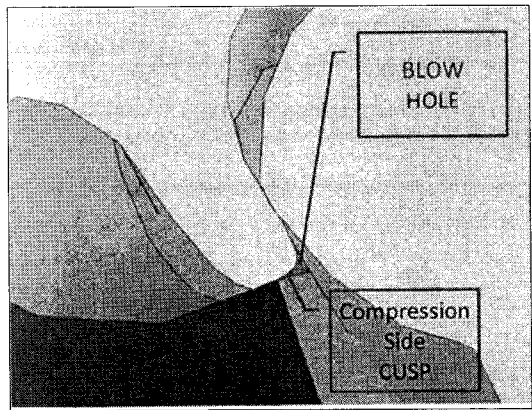


Fig. 3 누설삼각형

2.4 누설삼각형

Figure 3에서 압/수 로터 사이의 수송측 로브 끝 부분(trailing lobe)을 완전한 점장성함수(point generating function)로 만들지 못하고 원호로 만들어 짐에 따라 어쩔 수 없이 발생하는 삼각형 모양의 홀(hole)로써, 이 홀을 통하여 고압 챔버(chamber)에서 저압 챔버로의 누설이 발생하여, 효율저하를 야기한다. 스크류 공기압축기의 성능을 향상시키기 위해서는 누설삼각형의 면적을 최소화 하여 손실을 줄이는 것이 중요하다.

2.5 용적곡선

용적곡선은 로터 회전에 따른 흡용적(groove volume)의 변화를 나타내는 곡선이다. 일반적으로 치형에 대한 용적곡선은 해석하기가 어렵기 때문에 평면에 투영한 실라인 형상으로부터 용적곡선을 수치적으로 계산하는 방법을 채택한다.

2.6 흡입 및 토출 면적

흡입구는 일반적으로 로터의 흡입측 단면과 접하는 케이싱 상에 설계되고, 단면에서 열린 홈 절단구로부터 공기가 흡입된다. 흡입행정 과정동안 홈의 절단구 전체가 흡입측 단면에 열려 있지만, 흡입행정 전반부와 후반부에서는 일부가 케이싱에 의해 닫히게 되고 닫힌 부분만큼 개구면적이 줄어들게 된다. 홈 방향은 로터 단면에 대하여 경사져 있기 때문에 단면상의 절단구 면적을 홈에 연직 방향으로 투영하게 되는데 이를 흡입구 면적이라 한다.

토출구는 케이싱 상에 설계되고 로터의 단면과 접한 부분을 axial port, 외주와 접한 부분을 radial port라고 부른다. 로터의 회전이 진행되면 실라인의 일부가 토출구의 가장자리를 침범하여 공기가 토출된다. Radial port의 전개도형은 직선으로 구성되어 면적계산이 용이하지만 axial port의 개구형상은 복잡해 계산이 어렵다.

토출면적은 토출단면이 있는 홈의 절단구 면적으로 흡용적을 로터 회전각으로 적분한 값에 비례한다.

2.7 압축행정 초기의 폐누설

한 개의 홈은 압축행정이 시작되면 구면적이 최대로 되는 시점에 흡입단 근처와 토출단 근처의 2개소에서 상대 로터의 홈과 맞물리지만 흡입단면측과 토출단면측에서 맞물린 상대 로터의 홈과 반드시 동일한 홈일 필요는 없다. 로터의 회전이 진행되면 통로는 소멸하지만 압축행정 초기에 홈의 폐누설에 의해 동력손실을 초래한다.

3. 로터 모델링

3.1 치형 설계

Table 1의 주요 제원 계산을 바탕으로 스토터의 프로파일을 설계하였다. 스토터의 로브 정점에서 주위의 한 점에서 스토터의 회전으로 설계한 치형곡선을 따라 연속적으로 표시되는 생성점에 의해 압로터의 프로파일이 생성된다.

기존의 4×6조 대칭형 로터 프로파일의 성능향상을 위하여, 최근 스크류 공기압축기 사용압력에서 가장 효율이 우수한 조합으로 알려진 5×6조로 프로파일을 변경하였다. 또한, 누설 삼각형 면적을 최소화하기 위한 압/수 로터를 비대칭 구조로 최적화 하였으며, 내구성을 향상시키기 위하여 큰 하중을 견

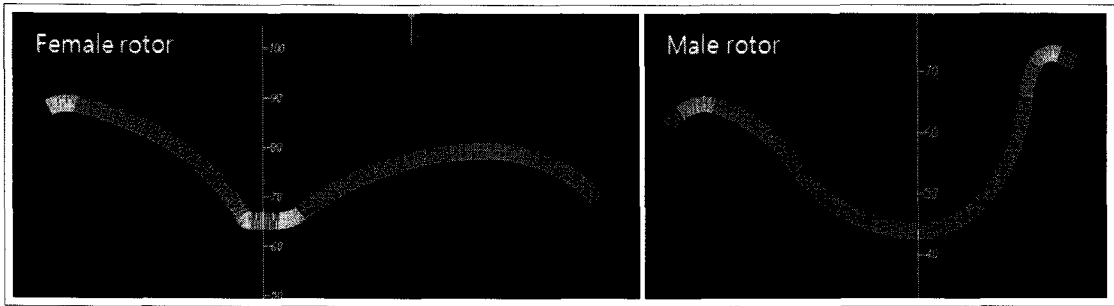


Fig. 5×6조 프로파일 설계

디는 베어링을 채택하고, 우수한 가공성을 위하여 로터 형상비(aspect ratio), 즉, 길이와 직경비(L/D ratio)을 감소하였다. 또한, 이러한 로터 길이비는 저속영역에서 로터의 팁스피드(tip speed)를 증가시켜 낮은 로터 팁스피드로 인한 효율저하를 방지하고, 견고한 스크류 공기압축기 로터 프로파일을 설계하는데 적합하다.

설계된 치형의 형상은 5×6조의 비대칭 치형이며, 권선각은 슛로터 310°, 암로터 258°이며, 로터 형상비는 1.25이다. Figure 4는 Autocad를 사용하여 암/수 로터의 프로파일 형상 설계를 나타낸 것이다.

3.2 로터 설계

앞 절에서 기술한 로터 프로파일의 설계사항을 토대로 5×6조 로터 형상을 설계하였으며 Figure 5에 도시하였다. 새로운 5×6조 프로파일은 로터간 접촉, 구동조건과 누설 삼각형의 최소화와 낮은 회전수 대역에서 에너지 효율을 확보할 수 있으며, 장기간 공기압축기 사용시에도 효율저하를 방지할 수 있고, 로터 형상비 감소로 로터의 강성도 증가를 도할 수 있다. 주요 데이터는 Table 2에 나타내었다.

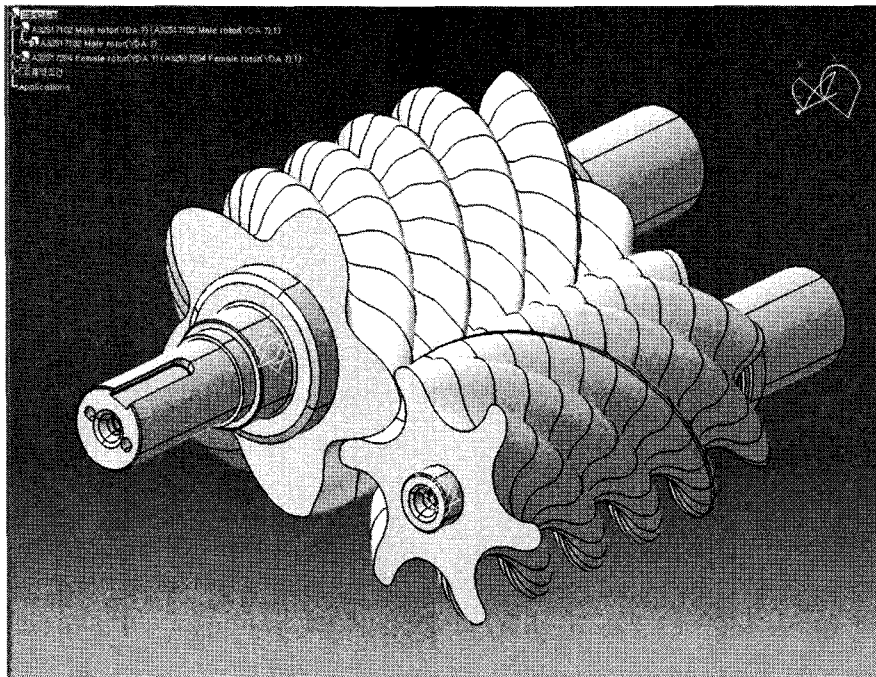


Fig. 5 5×6조 프로파일 모델링

Table 2 5×6조 프로파일 데이터

	MALE ROTOR	FEMALE ROTOR
1. LOBE NUMBER	5	6
2. OUTER DIAMETER	128.3945	101.1100
3. OUTER RADIUS	64.4673	50.5550
4. ROOT DIAMETER	84.3636	56.5390
5. ROOT RADIUS	42.1818	26.2695
6. PITCH DIAMETER	84.3636	56.5390
7. DEPTH	22.2855	22.2855
8. WRAP ANGLE	310.0000	258.3333
9. LEAD	184.1630	224.5956
10. LEAD ANGLE	35.2289	35.2289(Deg)
11. LENGTH	161.1681	
12. CENTER DISTANCE	92.80000	

4. 스크류 공기압축기 성능해석

스크류 공기압축기의 압축실은 매우 복잡한 3차원 형상으로 이루어져 있으며, 내부누설경로가 뒤엉켜 있다. 압축기 효율을 로터의 제원과 운전조건을 결부시켜 이론적으로 계산한다는 것은 매우 어렵다.

따라서 스크류 공기압축기의 성능해석 방법으로는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 해석하는 것이 효과적이다. 또한, 복잡한 해석의 수행을 위해서 주어진 조건에 대하여 적절한 가정이 필요하다. 컴퓨터 시뮬레이션의 개략적인 흐름도를 Figure 6에 도시하였다.

스크류 공기압축기의 성능해석 조건은 다음과 같다.

- (1) 암로터와 하우징 간극(clearance)은 0.060mm이다.
- (2) 슛로터와 하우징 간극은 0.070mm이다.
- (3) 토출단 간극은 0.050mm이다. (암/수 로터 동일)
- (4) 흡입단 간극은 0.600mm이다. (암/수 로터 동일)
- (5) 오일분사유량(oil injection quantity)은 30~60 μ /min이다.
- (6) 기준 압력비는 8이다.
- (7) 흡입(분사) 오일 온도는 65° C이다.
- (8) 흡입 공기 압력은 1기압이다.
- (9) 흡입 공기 속도는 15~20 m/s이며, 온도는 20° C 이다.
- (10) 배기량(displacement volume)은 1.115 μ /rev이다.

흡입과정 중에서 흡입 저항계수의 값은 흡입단의 크기가 흡입 저항계수를 작게 하는데 적합한 크기로 설계되었다고 가정하여 1로 설정한다. 토출과정에서의 토출면적은 토출구의 면적곡선으로부터 구하고 토출실의 압력은 일정하다고 가정하여 해석을 수행한다.

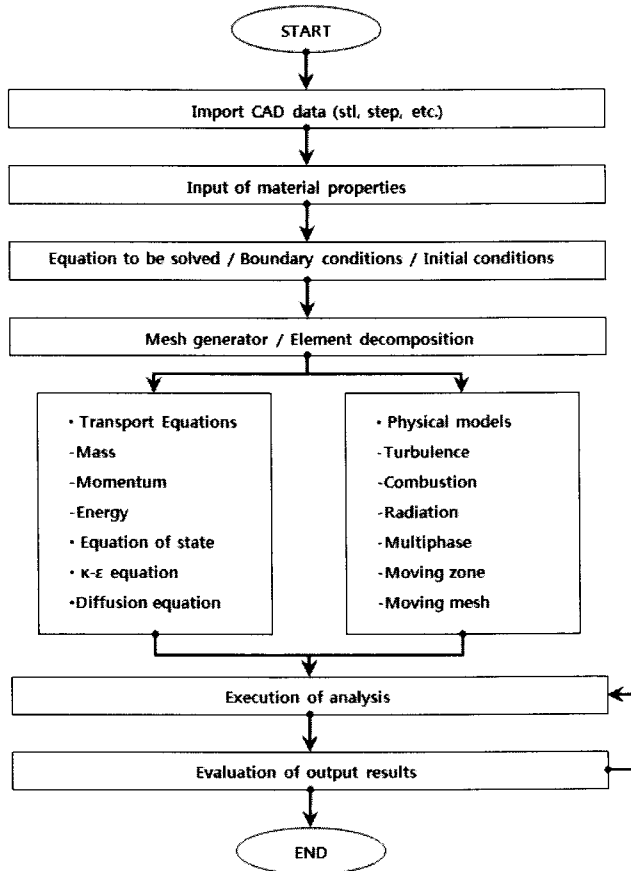


Fig. 6 Analysis flowchart

5. 결론

본 연구는 공기를 압축 또는 팽창시키며 한 쌍의 로터를 가지는 스크류 공기압축기의 로터 프로파일에 관한 연구로, 압축기의 성능향상에 가장 많은 영향을 미치는 프로파일 설계를 목적으로 하고 있다.

공기압축기 성능은 실라인 길이와 누설 삼각형 면적에 달려있으며, 면적이 양자 모두 감소함에 따라 향상된다. 스크류 공기압축기 성능향상에 영향을 미치는 다른 요소로서 성능시험시 실라인 길이가 길거나 누설 삼각형 면적이 큰 것이 성능에 미치는 영향보다 공구의 압력값이 작아, 정밀가공을 하지 못해 조립이 불가능하게 되거나, 공구 압력값이 작은 부분의 가공오차가 과다하게 발생하여 이 부위로의 누설량이 많아 전체 압축기 효율이 저하되는 것을 알 수 있다.

따라서, 소정의 강성도(stiffness)가 유지되면서 최소압력각이 더 크도록 로터 권선각이 최적화된 공기압축기 로터 프로파일을 설계하고, 고압축 공기가 저압축으로 누설되는 양이 최소화 되도록 스토터가 구동되고, 고압축 축강도가 높은 5×6조의 로터를 설계하여 가공성이 양호하고 성능이 향상될 수 있는 스크류 공기압축기 로터 프로파일을 설계하는 것이다.

또한, 누설삼각형 면적이 작으면서 로터의 절삭조건이 양호하도록 절삭공구의 압력각에 가장 많은 영향을 끼치는 암로터 축종축 가공에 용이한 스크류 공기압축기 로터 프로파일을 설계하는 것이다.

기존 사용중인 4×6조 조합의 공기압축기 로터 프로파일을 통하여 얻은 시험성능은 철도차량용 압축 공기 사용압력인 10 bar에서 동력소비량(Specific Power Consumption, SPC)이 8(kW/m³/min)이상을 나타내었다. 새로 설계한 5×6조 프로파일의 성능 목표는 10 bar에서 7.5(kW/m³/min)이하의 성능을 확보하는 것이다.

6. 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. M. Fujiwara, (1995), "Performance analysis of an oil-injected screw compressor and its application", Int. J. Refrig., Vol.18, No.1, pp.220-227.
2. M. Fujiwara, (1987), "A new design method for oil-injected screw compressors and its applications", Hitachi Review, Vol.30, No.3.
3. 최상훈, 김동현 (1996), "스크류 로터 치형의 성능해석에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제13권 1호, pp.69-77.
4. 최상훈 (1997), "비대칭형 스크류 로터용 플라이커터의 치형설계에 대한 연구", 대한기계학회논문집, 제21권 1호, pp.45-52.
5. 이대영, 김영일, 남일우 (1998) "스크류 압축기의 연구개발 동향", 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp.151-158.
6. 박동규, 이관수, 오박균 (2000), "스크류 수퍼차저의 설계 및 성능해석", 한국자동차공학회논문집, 제8권 2호, pp.72-80.
7. 김연수, 박성혁, 최부희, 최상훈 (2001), "권선각 변화에 따른 철도차량 스크류 압축기용 로터의 커터설계", 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 C, pp.485-491.
8. 박동규, 이관수 (2002), "스크류 공기압축기의 성능해석", 대한기계학회논문집 B권, 제26권 2호, pp.184-193.
9. 김연수, 황순원, 최상훈 (1995), "스크류 로터를 가공하기 위한 커터의 치형설계에 관한 연구", 한국정밀기계공학회 추계학술대회논문집, pp.907-912.
10. 이재영, 김정석, 이재호 (2002), "스크류 압축기용 로우터의 치형", 공개특허 특2003-0064074.
11. N. Stosic, I. Smith, A. Kovacevic (2005), "Screw Compressors Mathematical Modelling and Performance Calculation", Springer. A4(210×297mm)
12. KS B 6351, "용적형 압축기의 시험 및 검사 방법."