

# 가변압축기용 제어 밸브의 전자력 향상 설계

## Design for Improving Magnetic Force of Control Valve in Variable Compressor

이용주 · 이건호

Y. J. Lee, G. H. Lee

**Key Words** : Solenoid(솔레노이드), Magnetic Force(전자력), Control Valve(제어밸브), Magnetic Flux (자속), Air-gap(공극)

**Abstract:** This paper represents solenoid design of control valve for incline angle control in variable compressor. Some theoretical and numerical analysis were performed to analyse solenoid and compared with experimental results. Maxwell program was used for numerical analysis. Through redesigns of housing body, plunger, core, and disk in control valve, the needed force was gotten. Reduction of core groove and housing body air-gap had a large influence on magnetic force. But increasing of disk thickness had little effect on magnetic force. Control valve efficiency could be improved through solenoid redesign.

### 기호 설명

- $\mu$  : 매질의 투자율(medium permeability)
- $\mu_0$  : 진공의 투자율(vacuum permeability)
- $\Phi$  : 자속(magnetic flux)
- $R$  : 코일 저항(resistance)
- $N$  : 권선수(number of turns)
- $U$  : 전원전압(source voltage)
- $F_m$  : 자기력(magnetic force)
- $g$  : 공극(air gap)
- $S$  : 자로의 면적

### 1. 서 론

자동차에 사용되고 있는 에어컨용 압축기는 엔진의 동력을 많이 소모하기 때문에 자동차에서 효율성이 가장 요구되는 부품중의 하나이다. 현재 각 메이커에서는 이러한 압축기의 효율을 높이기 위해서 근래의 차량에는 동력소모가 많은 고정용량식 압축기에서 동

력 소모가 적고 효율이 높은 가변 용량식 압축기가 주로 장착되고 있다. 이 가변용량식 압축기는 토출용량을 엔진의 부하에 따라서 기계적으로 변동시키는 기계식 밸브로 제어하는 내부 가변식 압축기와 외부의 제어 신호에 의해서 제어하는 외부 가변식 압축기로 구분될 수 있다.

가변 압축기는 풀리를 사용해서 엔진과 벨트로 연결되어 있으며 엔진의 회전력에 의해서 구동되도록 되어 있다. 경사져 있는 사판을 피스톤이 왕복운동을 하면서 냉매를 토출하는 구조로 되어 있다. 자동차 실내의 온도가 높거나, 엔진의 부하가 작을 때에는 이 사판의 각도를 크게 하여서 피스톤의 행정거리를 최대로 한다. 이렇게 하면 피스톤의 토출유량도 증가하게 되고 에어컨 시스템의 냉매 순환량이 많아져서 실내 온도가 빠르게 저하된다. 실내의 온도가 적정하게 낮아지게 되면 이 사판의 각도를 줄어들어서 피스톤의 행정거리를 줄이고 토출유량도 감소시킨다. 이때에는 엔진의 소모동력도 줄어들게 된다. 이러한 압축기의 사판의 각도를 제어하기 위해서 사용되는 밸브를 외부제어밸브라고 한다. 이러한 제어밸브는 입력되는 전류에 비례한 전자력이 발생하여 플런저를 구동시키고 이 플런저의 구동에 의해서 흐르는 유량을 제어하고 있는 것이다.

이기수 등은 다단 자동변속기용 유압비례제어 솔레노이드 밸브의 CFD 해석<sup>1)</sup>을 하였으나 유압제어용

---

접수일 : 2010년 10월 14일  
 수정일(1차) : 2010년 11월 5일  
 수정일(2차) : 2010년 11월 15일  
 게재확정일 : 2010년 11월 22일  
 이용주(책임저자): 두원공과대학 자동차과  
 E-mail: yjlee@doowon.ac.kr, Tel: 031-8056-7178  
 이건호: 두원공과대학 건축설비과

솔레노이드 밸브로 사용조건이 본 연구의 밸브와 상이하며 윤소남 등은 배기 브레이크용 솔레노이드 밸브의 특성 해석 등에 관한 연구(2~3)를 수행하였으나 최근 업계에 등장하고 있는 차량 에어컨 압축기를 위한 제어 밸브의 솔레노이드에 관한 연구는 아직 수행되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구는 솔레노이드와 벨로우즈를 내재하고 있는 외부 가변식 압축기에 사용되는 제어밸브의 전자력을 해석하는 방법을 알아보고 실험과 시뮬레이션 해석을 통해 이를 향상시킬 수 있는 설계를 제안하고자 한다.

## 2. 솔레노이드 전자력 계산

본 연구에서 사용한 제어밸브의 솔레노이드 구조는 Fig.1과 같다.

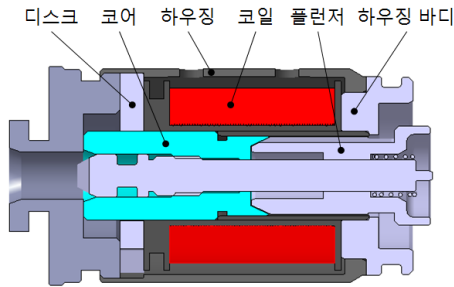


Fig. 1 Construction of external control valve

코일에 인가된 전류에 비례하여 발생된 자속의 크기는 다음과 같다. 자속밀도를  $B$ , 전류밀도를  $J$ , 자화전류밀도를  $J_M$ 라 하면 식(1)과 식(2)가 성립한다(4~5).

$$\text{div } B = 0 \quad (1)$$

$$\text{curl } B = \mu_0 (J + J_M) = \mu J \quad (2)$$

자속밀도  $B$ 와 자기장의 세기  $H$  사이에는 식 (3)의 관계가 성립하므로

$$B = \mu H \quad (3)$$

양변을  $\mu$ 로 나누고 stoke's theorem을 적용하면 식 (4)를 얻게 된다.

$$\int_C H dl = \iint_S \text{curl } H ds = \iint_S J ds = NI \quad (4)$$

그런데 자속밀도  $B$ 는 자속  $\Phi$ 를 자속이 통과하는 면적  $S$ 로 나눈 값이므로 식(4)는 식(5)와 같이 된다.

$$\Phi \int \frac{dl}{\mu S} = NI = \Phi R_l \quad (5)$$

식(5)에서  $R_l$ 는 자기저항이며 그 역수를 자기 퍼미언스라고 하며 식(6)과 같이  $P$ 로 표시한다. 자기 퍼미언스는 자속의 길이에 반비례하고 면적에는 비례하게 된다.

$$P = \frac{1}{\int \frac{dl}{\mu S}} = \frac{\mu S}{l} \quad (6)$$

공극에서 소모되는 기자력이 일정한 경우 플런저의 변위에 따른 공극에서의 자기에너지의 변화량  $dW$ 는 식(7)과 같이 표시된다.

$$dW = \frac{1}{2} U_a d\Phi \quad (7)$$

$U_a$ 는 공극에서 소모되는 기자력,  $d\Phi$ 는 플런저 변위에 따른 자속의 변화량이다. 공극에서의 자기에너지의 변화량은 플런저의 변위에 따라 자기력으로 나타나므로  $dW$ 는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dW = F_{mag} \times (-dx) \quad (8)$$

공극에서  $U_a = \Phi / P$  이므로  $d\Phi$ 는 식(9)로 된다.

$$d\Phi = U_a \cdot dP \quad (9)$$

식(8)과 식(9)를 식(7)에 대입하여 정리하면 플런저와 공극사이에서 발생하는 자기력은 식(10)과 같이 얻을 수 있다.

$$F_{mag} = -\frac{1}{2} U_a \frac{d\Phi}{dx} = -\frac{1}{2} (U_a)^2 \frac{dP}{dx} \quad (10)$$

외부에서 가해진 기자력은 철심을 자화시키고 공극 내에서 자장을 만드는데 쓰인다. 그러므로 전체의 자속을  $\Phi$ 라 하면 자기회로의 기자력 방정식은 식(11)과 같다(6~7).

$$NI = \sum H[i] \times L[i] + \frac{\Phi}{\sum P} = U_s + U_a \quad (11)$$

식 (11)의 첫 번째 항은 철심의 단면을 자화시키는데 소모되는 기자력이고, 둘째 항은 공극을 자화시키는데 소모되는 기자력이다. 철심에서 소모되는 기자력은 철심 각 부분을 자속이 통과하는 길이  $L[i]$ 에 자기장의 세기  $H[i]$ 를 곱한 값이다. 철심 각 부분의 자속밀도  $B[i]$ 는 각 부분의 자속  $\Phi[i]$ 을 철심의 단면적  $S[i]$ 로 나눈 값이다.

따라서 솔레노이드 밸브의 자기력은 플런저 변위에 대한 퍼미언스와 그 미분값을 계산하고 공급기자력에 대한 자속  $\Phi$ 를 구하면 계산할 수 있게 된다.

### 3. 전자력 해석

본 논문의 전자석을 해석하기 위해 Fig. 2와 같이 슬레노이드를 모델링 하였다. 중심축을 중심으로 대칭 형상이므로 축의 한쪽 면을 모델링하였으며 자속이 흐르는 부품인 디스크, 하우징, 하우징바디, 플런저, 코어 및 코일만을 모델링하였으며 재질은 주로 흔히 사용되는 쾌삭강인 sum24L이다. 그 외의 플런저를 지지하는 튜브는 재질이 sus303이고 코일을 감싸고 있는 보빈과 몰드는 재질이 66나일론이므로 자속이 흐르지 않고 투자율이 공기와 유사하므로 공기로 모델링을 하였다.

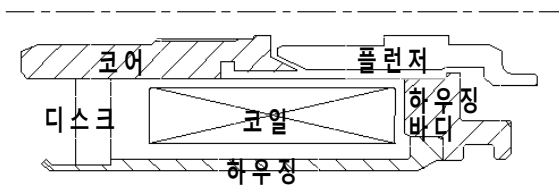


Fig. 2 Modeling of external control valve

Fig 3은 제어 밸브에서 사용된 SUM24L 재질의 B-H 선도 이다. 자계강도가 증가함에 따라서 자속밀도가 비례하여 증가하다가 약  $1.2 [Wb/m^2]$  이상이 되면 자속이 포화되어 더 이상 증가하지 못하고 약  $1.8 [Wb/m^2]$ 에 수렴하는 비선형 특성을 나타내고 있다. 따라서 이러한 B-H특성에 의해서 제어 밸브의 흡인력이 전류입력에 비례하지 못하고 어느 한계 값으로 수렴하는 비선형 특성을 갖게 된다.

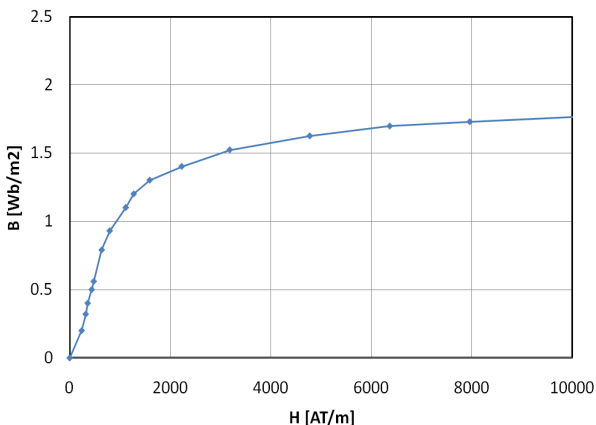


Fig. 3 Magnetization curve of SUM24L

Fig. 4는 전자력 해석 tool인 Maxwell V12를 사용하여 Fig. 2의 외부제어밸브를 모델링한 그림이다.

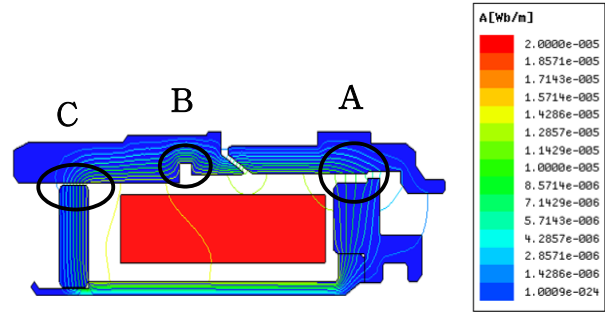


Fig. 4 Analytic model results with MAXWELL

### 4. 실험 결과

해석결과를 검증하기 위해 Fig. 5와 같은 장치에서 전자력을 측정하였다. 전자력 시험기에 밸브를 장착하고 핸들을 돌려 플런저의 공극을 0.2mm로 유지시킨 상태에서 PWM controller에 사용자가 요구하는 전류를 입력하면서 전자력시험기의 로드셀을 통해 전자력을 측정하였다. 밸브의 구동전류 영역인 250mA에서 50mA씩 증가시키면서 750mA까지 전자력을 측정하였다. PWM controller는 자동차의 ECU모듈과 마찬가지로 사용자의 입력전류에 비례한 PWM 신호를 발생시켜서 제어밸브에 공급한다. 제어밸브는 인가된 PWM 신호에 비례한 전자력을 발생하고 이를 전자력시험기에서 측정을 하였다. 아래 Table 1에는 본 제어밸브의 사양을 나타내고 있다.

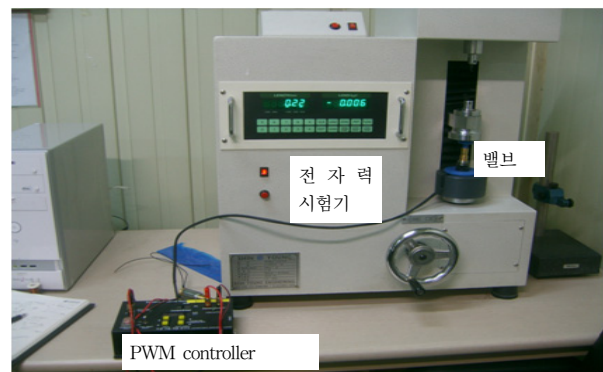


Fig. 5 Experimental equipment for magnetic force test

Table 1 Specification of external control valve

정격전압	12.0 [VDC]
주파수	400 [Hz]
작동전류	0.26~0.81[A]
작동전압	7.5~13.5 [V]
코일저항	10.6 [ $\Omega$ ]
코일사양	$\Phi 0.32$ [mm],890 [turns]

제어밸브로 입력되는 전류는 Table 1과 같이 PWM 400Hz의 전류신호로 입력된다.

본 제어 밸브의 입력전류를 0A부터 0.750A까지 변경시키면서 공극을 0.2mm일 때와 0.6mm일 때의 두 가지 경우로 나누어서 해석 결과와 실험 결과를 비교한 그래프를 Fig. 6과 에 나타내었다. 두 가지 경우 모두 Maxwell의 해석 결과가 90% 이상 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

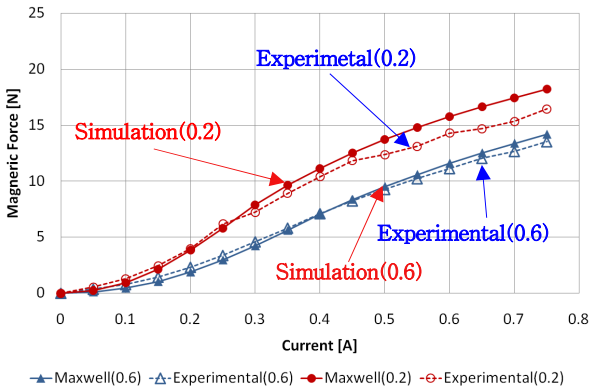


Fig. 6 Comparison of experiment and simulation results

Table 2 Results of experiment and simulation

	공극 0.2mm	공극 0.6mm
해석	18.6 [N]	14.4 [N]
시험	16.8 [N]	13.8 [N]
비교	90.3 [%]	95.8 [%]

#### 4. 전자력 향상 설계

제어 밸브의 전자력  $F_m$  은 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_m = P_S \cdot A_{Bel} - (F_{S1} + F_{S2}) \quad (12)$$

여기서  $P_S$ 는 밸브에 작용하는 흡입압력이고,  $A_{Bel}$ 는 벨로우즈의 수압면적,  $F_{S1}$ 는 벨로우즈의 탄성력,  $F_{S2}$ 는 플런저스프링의 탄성력이 된다. 따라서 전자력은 벨로우즈의 탄성력과 플런저스프링의 탄성력보다 크게 설계되어야 제어 밸브가 원활하게 운동을 할 수 있게 된다. 밸브의 작동구간에서 스프링의 탄성력을 식(12)에 의하여 계산하면 약 25[N]이상의 전자력 발생이 필요하게 되어 이를 목표로 전자석을 재설계하였다.

흡입력 상승을 위한 최적 설계 방법은 자계회로 내에 존재하는 공극을 최소화하여 에너지의 소모를 줄이는 방법과 철심부에서 자속밀도가 국부적으로 집중

되는 곳의 자속밀도를 완화시켜서 자속이 원활하게 흐르도록 설계를 하였다. 이를 위하여 플런저와 하우징 바디사이 그리고 디스크와 코어 사이의 공극을 재설계하였으며 국부적인 자속밀도 집중현상이 나타나는 코어의 자속밀도를 고찰하였다.

#### 4.1 플런저와 하우징 바디 설계

Fig. 4의 A부분으로 플런저와 하우징바디 사이의 간격을 0.45mm에서 0.42mm로 축소하였으며 하우징 바디와 플런저 사이의 공극의 간격이 하우징 바디 전체가 일정하도록 수정하였다. 그 결과 Fig.7과 같이 최대 전자력이 18.6[N]에서 21.8[N]으로 약 17.6% 증가하였다.

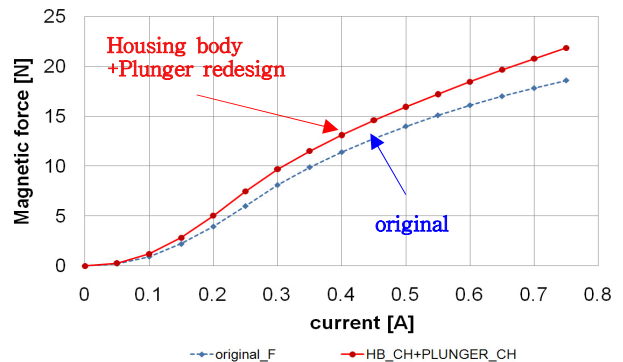


Fig. 7 Results of plunger and housing body redesign

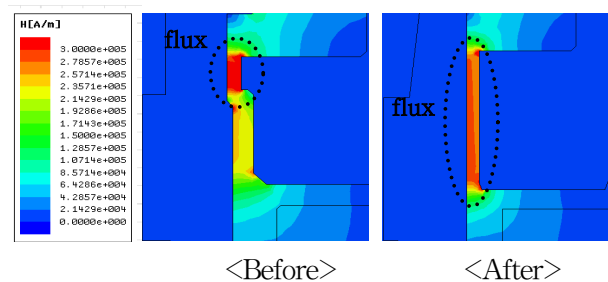


Fig. 8 Magnetic intensity of housing body air-gap

Fig. 7에서 위쪽의 실선이 변경후의 결과이며 아래쪽 점선이 변경전의 전자력 특성이다. 이것은 식(6)에서 자기저항의 길이  $l$  을 줄여서 자기 퍼미언스를 높였기 때문이다. 플런저와 하우징 바디 사이의 공극은 자기 회로에 자기 저항으로 작용하므로 자기 저항을 줄여서 자기 퍼미언스를 높이고 전자력을 향상시키게 된 것이다.

Fig. 8은 하우징바디 공극에서의 0부터 최대  $3.0 \times 10^5$  [A/m]의 자계강도를 나타내고 있다. 해석 그림을 보면 변경 후(After)의 결과에서 공극의 길이가

줄어들게 되면 공극에서의 자계 강도가 다소 약해지게 되고 하우징 바디 윗부분에 흐르던 자속  $\phi$ 이 바디 전체적으로 분포하도록 변경된 것을 알 수 있다.

#### 4.2 코어 설계

코어의 흠은 Fig. 4의 B부분으로 코어의 조립상 필요한 것이므로 삭제할 수가 없다. 따라서 이 코어의 흠의 크기를 최대깊이 1.4mm를 1.1mm로 줄이고 형상도 자속  $\phi$ 의 흐름을 원활하게 하도록 직사각형에서 원호로 변경하였다. 그 결과 Fig. 9와 같이 최대 전자력이 18.6[N]에서 21.4[N]으로 약 15.2% 증가하였다.

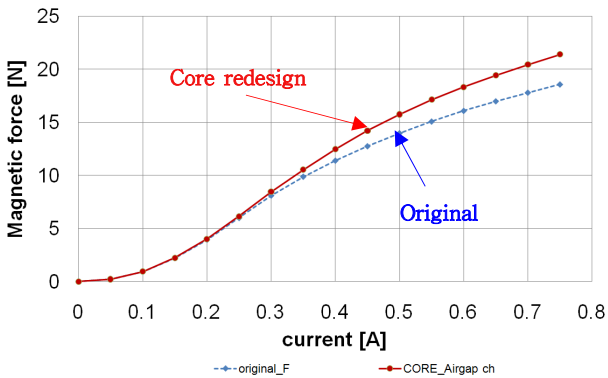


Fig. 9 Results of core redesign

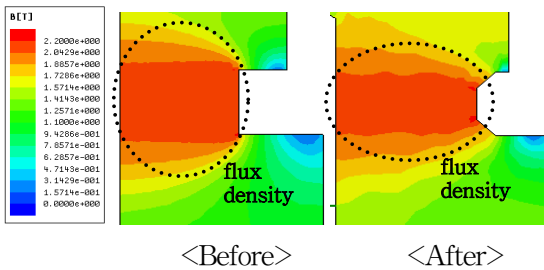


Fig. 10 Magnetic flux density of core

이것은 2절의 식(4)에서와 같이 코어의 흠의 크기가 깊을수록 자속  $\phi$ 가 흐르는 단면적  $S$ 이 줄어들게 되어 자속밀도  $B$ 가 증가하게 되고 따라서 코어에서의 소모전자력이 증가하게 되기 때문이다. Fig. 10은 코어 흠 부분의 자속밀도를 0부터 2.2 [T]까지 나타낸 것이다. 변경 전(before)을 보면 코어의 흠이 큰 왼쪽의 자속밀도가 변경 후(after)보다 크게 퍼져 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

#### 4.3 디스크의 설계

Fig. 4의 C부분인 디스크의 두께를 3mm에서 6mm로 증가시켜서 자속의 흐름을 원활하도록 변경하였다. 그 결과 Fig. 11과 같이 최대 전자력이 약 2.3%증

가하였다. 예상했던 결과와는 다소 차이가 있었다. Fig. 12의 변경 후(after)의 결과를 보면 디스크의 두께를 크게 하게 되면 디스크의 자속밀도  $B$ 가 감소하게 되지만 코어의 자속밀도는 변경 전보다 상승하게 되므로 전자력의 향상에는 크게 변동이 없게 됨을 알 수 있다.

따라서 위의 3가지의 전자력 향상 설계안을 모두 적용하여 전자력을 계산한 결과는 Fig. 13과 같다. 최대 전자력이 18.6[N]에서 25.6[N]으로 약 37.9% 증가되어 목표로 하였던 약 25[N]의 흡입력을 얻을 수 있었다.

향후 밸브의 응답성 및 잔류자기의 특성을 고려한 제어 밸브의 동특성을 해석하여 제어 밸브의 전체적인 성능 향상을 도모할 수 있는 연구가 필요할 것이다.

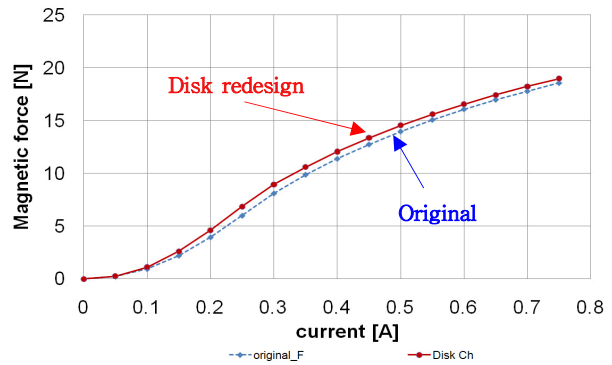


Fig. 11 Results of disk redesign

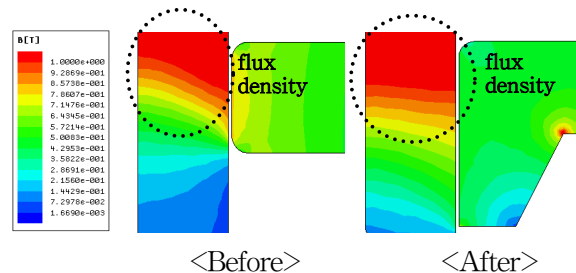


Fig. 12 Magnetic flux density of disk

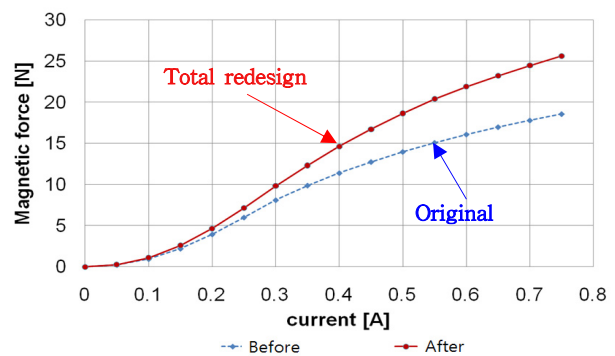


Fig. 13 Results of magnetic force redesign

## 5. 결 론

본 논문에서는 가변압축기의 사판각도 제어에 사용되는 외부제어밸브의 솔레노이드를 해석하고 요구되는 전자력에 도달할 수 있는 전자력 향상 설계를 행하였다.하우징바디의 공극을 0.03mm축소, 플린저의 형상 변경, 코어의 홈의 깊이 등을 통해 약38%의 전자력을 향상시켜 목표 값인 약 25[N]을 달성하였다. 이는 동일한 입력 전류를 밸브에 인가할 때 밸브에서 소모되는 에너지를 최소화 하도록 설계되어 밸브의 효율도 향상될 수 있었다.

## 참고 문헌

- 1) 이기수, 성현진, 허형석, 이현우 “다단 자동변속기 용 유압 비례제어 솔레노이드 밸브의 CFD 해석”, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문, 2009
- 2) 윤소남, 함영복 “배기 브레이크용 솔레노이드 밸브의 특성 해석”, 한국자동차공학회논문집 제12권, 제 1호, pp 190~195, 2004
- 3) 윤소남, 함영복, 박중호, 윤동원, 허덕열, “연료전지 용 솔레노이드 밸브의 정특성”, 유공압시스템학회 추계학술대회논문, 2010
- 4) 송창섭, “전자식 유압 비례 복합 밸브에 관한 연구”, KAIS 박사학위논문, pp. 1~21, 1980.
- 5) 이대길, “비례복합밸브내의 솔레노이드의 특성에 관한 연구”, KAIS 석사학위논문, pp. 1~70, 1977.
- 6) Herbert C. Roters, “Electro magnetic devices”, John Wiley & Sons, New York, pp. 196~335, 1941.
- 7) 이태형, “ISC 밸브용 테이퍼 플린저형 비례전자석에 관한 연구”, 한양대학교 석사학위논문, pp 2~13, 1992