

## 자성유체를 이용한 우퍼 스피커의 보이스 코일 온도 특성에 관한 수치적 연구

이무연\* · 김형진

동아대학교 기계공학과, 부산시 사하구 하단동 840, 604-714

이우영

(주) 영창시스템, 부산시 동래구 수안동 35-1, 607-823

(2013년 9월 6일 받음, 2013년 10월 9일 최종수정본 받음, 2013년 10월 11일 게재확정)

본 연구는 자성유체 우퍼 스피커 내부에 위치한 보이스 코일의 입력전류에 따른 열전달 특성을 수치 해석적으로 고찰하는 것이다. 이를 위하여 일반 우퍼 스피커 및 자성유체 우퍼 스피커에 대하여 입력전류를 10 W에서 50 W로 10 W씩 변화시켜가면서 입력전류에 따른 보이스 코일 발열 및 각 부품으로 전달되는 열전달 및 온도 특성 변화를 고찰하였다. 그 결과 우퍼 스피커에 공급되는 입력전류가 증가함에 따라 보이스 코일 온도가 선형적으로 증가하였고 자성유체 우퍼 스피커의 보이스 코일 온도가 일반 우퍼 스피커에 비하여 동일 입력 전류 40 W 기준에서 51.0% 감소하였고, 동일 보이스 코일 발생 온도 490 K 기준에서 필요 입력전류는 42.5% 감소하였다. 또한 보이스 코일에서 주변 부품으로 열전달은 자성유체 우퍼 스피커가 일반 우퍼 스피커에 비하여 51.7% 증가하였다.

**주제어** : 보이스 코일, 우퍼 스피커, 자성유체, 온도

### I. 서 론

스피커는 전기적 입력 신호를 음성 신호로 전달해 주는 음향기기이다. 이러한 스피커는 인간이 들을 수 있는 가청주파수를 세분화하여 고음, 중음 및 저음영역으로 세분화 하여 연구되고 있으며 주파수 특성에 따라서 저음을 출력하는 트위터(Tweeter)와 고음을 출력하는 우퍼(Woofers) 그리고 중간음을 내는 미드레인지(Mid-range)로 구성된다[1]. 소리를 크게 하여 멀리까지 들리게 하는 기구인 스피커에 대한 연구는 용도 및 관련 음향기기에 따라 다양하게 연구되고 있으며 스피커의 성능은 스피커 단품의 성능 및 품질과 관련 음향기기와 결합시 음향 시스템 내에서의 성능 및 품질로 구분되며 음향기기의 시장 경쟁력을 좌우하는 중요한 요소이기도 하다. 특히, 인간의 삶의 질 및 경제력 향상과 더불어 스피커의 음질, 음역 및 출력에 대한 관심이 증가되고 있어 최근 스피커의 성능 및 품질 관련 연구는 더욱 활발히 진행되고 있다[2]. 스피커 관련 연구는 음질과 사운드 출력 향상 등 스피커의 음향성능 개선과 수명 및 소비 전력등과 같은 내구성과 에너지 효율 향상 분야까지 다양하게 연구되고 있다.

일반 우퍼 스피커 내부구조는 탑 플레이트, 바텀 플레이트, 진동판, 댐퍼, 요크와 전기적 신호를 소리 에너지로 변환하는

핵심 요소인 보이스 코일(Voice coil)로 구성되어져 있다. 보이스 코일은 스피커 성능과 내구성을 결정하는 중요한 요소로 전기적 신호가 인가되면 코일의 자체전기저항에 의하여 고온의 열이 발생되고 발생된 열은 효과적으로 외부로 방출해야 스피커의 성능을 일정하게 유지할 수 있다. 만약, 발열 온도가 보이스 코일의 탄화(Burning)온도 한계치를 넘어가게 되면 코일이 타거나 녹는 문제가 발생하여 스피커의 성능 감소 및 수명 단축을 야기하게 된다[3]. 실제로 보이스 코일 탄화는 스피커 불량문제의 70%를 차지한다[4]. 따라서 스피커 성능을 일정하게 유지하면서 품질문제를 해결하기 위하여 스피커 내부에 위치한 보이스 코일에서 발생하는 고온의 열을 효과적으로 외부로 방출하고 온도상승에 따른 스피커 성능저하를 방지하기 위한 다양한 개발 및 연구가 진행되고 있다[5]. 이러한 방열성능 개선의 일환으로 자성유체를 적용한 스피커에 대하여 최근에 많은 진행되고 있다. Rosensweig et al. (2008)은 자성유체를 이용한 보이스 코일의 센터링 효과에 대하여 연구를 수행하여 오디오 스피커 음성 코일의 반경 복원력이 증가하였음을 실험적으로 연구하였으며, Lee and Yoo (1998)은 자성유체 적용에 따른 스피커에서 댐핑 효과에 대하여 연구를 수행하였고, 자성유체 점도는 온도에 따라 크게 변화하고 점성지수는 스피커의 댐핑효과와 밀접한 관계가 있음을 실험적으로 연구하였다[6, 7]. 이러한 연구들은 스피커에 자성유체를 적용하였을 경우 센터링 및 댐핑 효과 개선에 대한 연구로 스피커의 음질 및 기능 특성에 관한 것이다. 그

러나 일반 스피커와는 다른 저음을 출력하는 우퍼(Woofers) 스피커에서 자성유체 적용에 따른 보이스코일의 발열 및 온도 특성과 주변 부품으로 전달되는 열전달 특성에 대한 연구는 아직까지 미비한 상황이다.

자성유체는 영구자석의 자력에 의하여 탑 플레이트와 보이스코일 사이에 위치하게 되어 별도의 동력원 없이 영구자석에서 생성되는 자기장에 의하여 보이스코일에서 발생하는 열을 빠르게 방열시키는 장점이 있다. 이러한 자성유체의 물리적 특성을 우퍼 스피커에 효과적으로 적용하기 위해서는 스피커에서 발생하는 열을 효과적으로 방열할 수 있는 열전달 측면에서 보다 심도 있고 다양한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 자성유체를 이용한 우퍼 스피커의 보이스코일 온도 특성을 수치적으로 연구하여 자성유체를 이용한 우퍼 스피커의 방열 효과를 고찰하고자 한다. 즉 본 연구의 목적은 자성유체 적용에 따른 우퍼 스피커 내부 보이스코일의 방열 특성과 주변 부품으로 전달되는 열전달 특성에 대하여 수치적으로 연구하고자 하며, 궁극적으로 기존 우퍼 스피커의 방열 성능을 개선하여 고효율 자성유체 우퍼 스피커 개발에 기여하고자 한다.

## II. 수치해석

### 1. 형상 모델링

Fig. 1은 본 연구에 사용한 일반 우퍼 스피커의 상면도와 측면도이다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 일반 우퍼 스피커와 자성유체 우퍼 스피커의 내부 구조를 3차원 모델링으로 나타낸 그림이다. 우퍼 스피커의 핵심 부품인 보이스코일(Voice coil)은 에나멜 동선 재질로 이루어져 있으며 폴리이미드(Polyimide) 재질로 만들어진 36 mm 외경의 보빈(Bobbin)에 감겨져 있고 앰프로부터 전기 신호를 받아 보빈을 중심으로 상하로 움직이며 전기 에너지를 소리에너지로 만드는 역할을 하며, 우퍼 스피커 내부 중심에 위치해 있다. 보빈을 중심으로 상부 및 하부에 순철(Pure iron)로 이루어진 탑 플레이트(Top plate)와 바텀 플레이트(Bottom plate)가 위치해 있

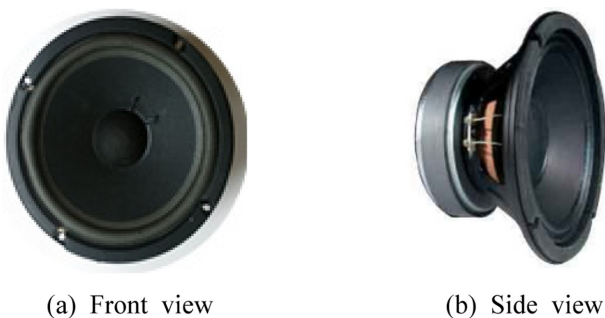


Fig. 1. (Color online) Pictures of the woofer speaker.

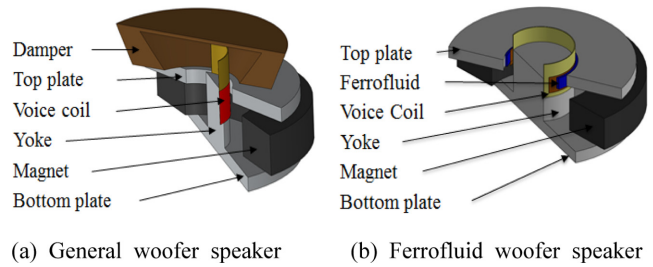


Fig. 2. (Color online) 3Dimensional modeling of the tested woofer speaker.

Table I. Specifications of woofer speakers.

Name	Size (D × d × H)	Specification
Voice coil (mm)	36.2 × 36 × 14	Copper
Bobbin (mm)	36 × 35 × 35	Polyimide
Top plate (mm)	100 × 39 × 6	Pure iron
Magnet (mm)	111 × 60 × 17	Ferrite
Bottom plate (mm)	D:100, H:6	Steel
Yoke (mm)	D:35, H:23	Steel
Damper (mm)	75 × 45 × 16	Fiber paper
Ferrofluid (ml)	4	APG W 10

으며, 그 사이에는 영구자석(Permanent magnet)이 위치해 있다. 영구자석은 페라이트 자석(Ferrite magnet)을 이용하였다. 페라이트 자석은 알니코 자석에 비하여 자력 성능은 다소 떨어지는 경향이 있으나 저항이 크고 안정감이 있어 우퍼 스피커용으로 최근에 많이 사용되고 있다[8]. 보빈 내부에는 요크(Yoke)가 위치해 있으며 바텀 플레이트와 일체형으로 구성되어 있으며, 보빈과 보이스코일이 상하 운동을 할 때 센터를 이탈하지 않도록 하는 역할을 한다. 탑 플레이트 상부에 위치한 댐퍼(Damper)는 섬유재질이며 보빈과 보이스코일의 상하 운동 시 요크와 함께 보빈의 경로 이탈을 방지해주는 역할을 한다. 본 연구에서 사용한 우퍼 스피커의 내부 구조에 대한 사양은 Table I에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 우퍼 스피커에 대한 열 해석을 수행하기 위하여 우퍼 스피커의 3D 모델링을 솔리드 워크스 2013(Solidworks 2013)을 이용하여 Fig. 2와 같이 일반 우퍼 스피커(General woofer speaker)와 자성유체 우퍼 스피커(Ferrofluid woofer speaker) 각각에 대하여 수행하였다[9]. 자성유체 스피커에서 사용된 자성유체(Ferrofluid)의 점성은 스피커에서 보빈의 이탈을 방지하는 댐퍼의 역할을 하므로 일반 스피커에서 사용된 댐퍼(Damper)부분을 제거할 수 있게 되었다[10].

### 2. 열전달 모델

우퍼 스피커 내부의 보이스코일에서 발생하는 열을 효과적으로 계산하기 위하여 다음과 같은 열전달 모델을 이용

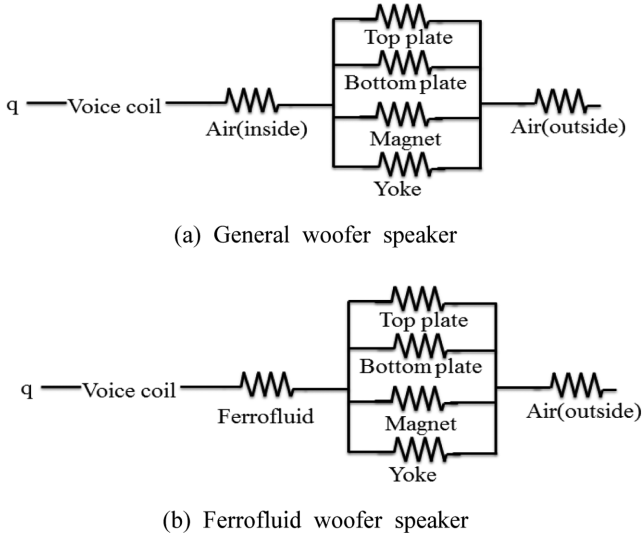


Fig. 3. Thermal equivalent circuit model.

하였다. 열전달 모델은 Incropera and Dewitt(2013)이 제시한 열저항 등가법을 이용한 열전도도 방법을 이용하였고, Fig. 3 과 같이 일반 우퍼 스피커와 자성유체 우퍼 스피커에 대하여 각각 수행하였다[11]. Fig. 3(a)는 일반 스피커를 구성하는 보이스 코일, 탑 플레이트, 요크, 영구자석, 바텀 플레이트, 내부 공기 및 외부공기를 고려하고 Fig. 3(b)는 자성유체 우퍼 스피커에 대하여 자성유체를 추가로 고려하여 모델링을 진행하였으며, 식(1)을 이용하여 각 구성부품 및 보이스 코일의 온도를 계산하였다. 여기서,  $q$ 는 열전달량이고  $k$ 는 열전도도,  $A$ 는 단면적이며  $\Delta T$ 는 온도차이다.

$$q = k \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

### 3. 열전달 해석 및 조건

우퍼 스피커의 열전달 해석은 ANSYS THERMAL ANALYSIS를 이용하였고 ANSYS WORKBENCH(V.13.0)를

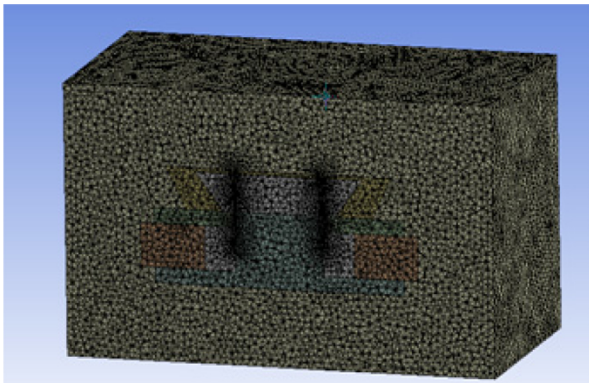


Fig. 4. (Color online) Mesh map of the model.

Table II. Numerical conditions.

Name	Specification
Woofer speaker	200 W (Max)
Working fluid	Air/Ferrofluid
Pressure (kPa)	101.3
Inlet condition (W)	10, 20, 30, 40, 50
Ambient condition (°C)	25
Gravitational acceleration (m/s <sup>2</sup> )	9.8

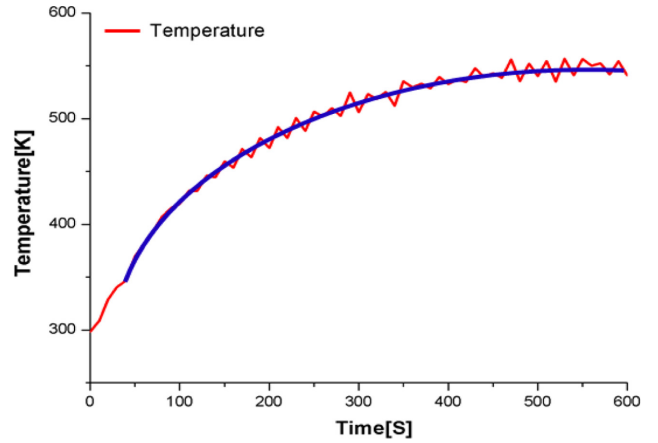


Fig. 5. (Color online) Convergence criteria of the numerical analysis.

이용하여 Fig. 4와 같이 본 연구에서 사용된 우퍼스피커의 3D모델링을 테트라(Tetrahedrons) 메쉬(Mesh)를 이용하여 형상화 하였다[12]. 메쉬 격자(Elements)는 총 1,258,259개이고

Table III. Specifications of the woofer speaker.

	Components	Specifications
Pure iron	Density (kg m <sup>-3</sup> )	7854
	Specific heat capacity (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	4.34 × 10 <sup>2</sup>
	Reference temperature (K)	298.15
	Thermal conductivity (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	60.5
	Thermal expansivity (K <sup>-1</sup> )	7.5 × 10 <sup>-4</sup>
Copper	Density (kg m <sup>-3</sup> )	8933
	Specific heat capacity (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	3.85 × 10 <sup>2</sup>
	Reference temperature (K)	298.15
Ferrite magnet	Density (Kg m <sup>-3</sup> )	7300
	Specific heat capacity (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	400
	Thermal conductivity (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	50
Air (25 °C)	Density (kg m <sup>-3</sup> )	1.185
	Specific heat capacity (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	1.0044 × 10 <sup>3</sup>
	Thermal expansivity (K <sup>-1</sup> )	0.003356
	Dynamic viscosity (kg m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	1.831 × 10 <sup>-5</sup>
Ferrofluid	Thermal conductivity (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	2.61 × 10 <sup>-2</sup>
	Density (kg m <sup>-3</sup> )	1330
	Specific heat capacity (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	4200
	Thermal expansivity (K <sup>-1</sup> )	7.5 × 10 <sup>-4</sup>
	Dynamic viscosity (Pa s)	0.5
	Thermal conductivity (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.15

절점(Nodes)은 217,943개로 격자 최대사이즈는 3 mm이고 최소사이즈는 1 mm이다. 우퍼 스피커의 핵심 부품인 보이스 코일 주변은 더욱 조밀하게 메쉬를 생성하였고 보이스 코일에서의 발생된 열은 다방면으로 불규칙하게 전달되므로 난류 모델인 k-e 모델을 이용하여 수치해석을 수행하였다[13]. Table II는 본 연구에서 사용된 수치해석 조건으로 작동유체는 공기와 자성유체이고 압력은 대기압으로 공기는 상온 25 °C로 가정하였다. 보이스 코일에서 발생되는 열을 모사하기 위하여 우퍼 스피커의 입력전류를 10 W에서 50 W로 10 W씩 증가시키면서 수치해석을 진행하였고 수렴조건으로는 보간법을 이용하여 정상상태에서의 온도 편차가 평균 10<sup>-3</sup>일 때 수렴하는 것으로 판단하였다. Fig. 5는 입력전류 20 W에서 수렴조건을 적용한 경우의 수치해석 결과이다. Table III은 본 연구에서 사용된 우퍼 스피커 주요 구성부품들의 물성치를 나타내었다. 또한, Table III에서 자성유체의 열전도율은 0.15 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>이고 공기의 열전도율은 2.61 × 10<sup>-2</sup> Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>로 자성유체의 열전도율이 5.7배 공기보다 우수하다.

### III. 결과 및 고찰

본 연구에서는 우퍼 스피커의 핵심 부품인 보이스 코일에서 발생되는 열을 효과적으로 외부로 방열시키기 위하여 자성유체를 사용하여 우퍼 스피커를 모델링하고 보이스 코일 및 주요구성 부품의 열 및 온도 특성을 고찰하기 위하여 수치해석을 이용하였다.

#### 1. 일반 스피커 열전달 특성

본 연구에서 baseline으로 사용된 일반 우퍼 스피커에서 발생하는 일반적인 열전달 특성을 파악하기 위하여 공기 온도 25°C에서 스피커로 공급되는 입력전류 변화에 따른 열전달 특성을 Fig. 6과 같이 파악하였다. 입력전류를 10 W에서 50 W로 증가함에 따라 스피커 내부 보이스 코일에서 발생하는 온도가 파란색에서 붉은색으로 변화됨을 확인할 수 있었다. 이러한 이유로는 입력전류가 증가함에 따라 보이스 코일에서 발생되는 온도가 선형적으로 증가하면서 나타나는 결과이고 입력전류가 30 W 이상이 되면 붉은색이 보다 명확하게 나타나기 시작했다. 또한, 보이스 코일에서 발생한 열은 보빈을 타고 주변으로 열확산되는 것을 확인할 수 있으며 탑 플레이트를 거쳐 영구자석 순으로 열전달이 발생하였다. 즉 보이스 코일에서 발생된 열은 보빈을 지나 탑 플레이트와 영구자석을 지나고 최종적으로 바텀 플레이트로 온도가 확산되고, 스피커로 들어가는 입력전류가 증가함에 따라 보이스 코일에서 발생된 열이 스피커 각 부품으로 미치는 영향이 더욱 명확해짐을 확인하였다.

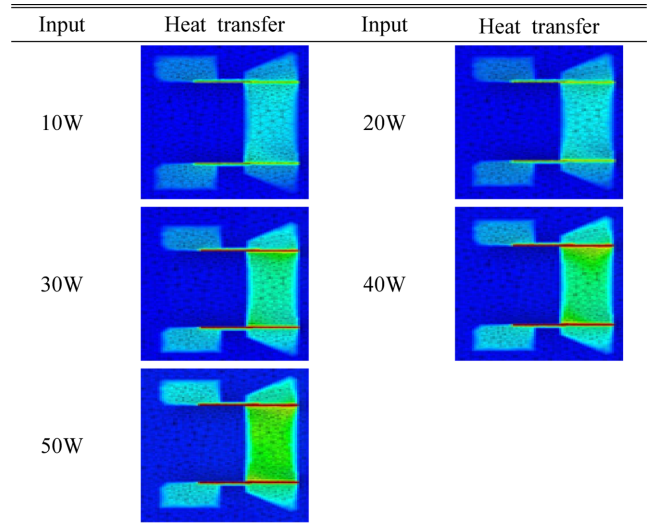


Fig. 6. (Color online) Temperature characteristics of the woofer speaker without ferrofluid.

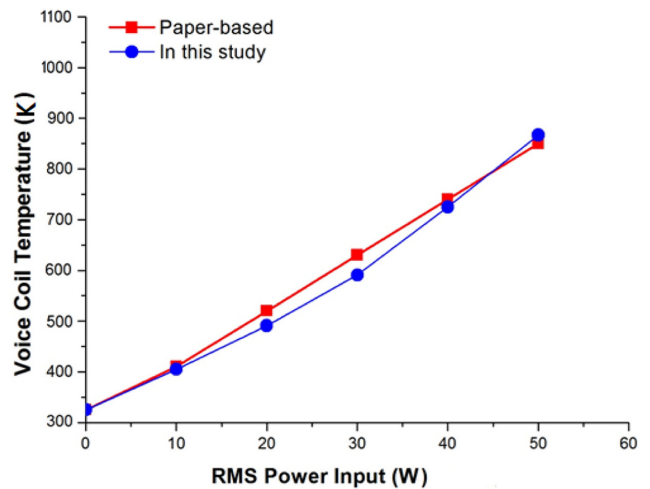


Fig. 7. (Color online) Temperature characteristic comparisons of the tested general woofer speaker with the existed paper.

#### 2. 모델링 검증

본 연구에서 수행한 열전달 해석의 타당성을 검증하기 위하여 Odenbach(2003)의 연구 논문과 비교 및 검증을 진행하였다[14]. Fig. 7은 본 연구에서 얻은 결과와 Odenbach(2003)의 결과와 비교한 그래프로 우퍼 스피커로 들어오는 입력 전류에 따른 보이스 코일에서 발생되는 온도가 오차 범위 2% 안에서 잘 맞는 것으로 확인되었다. 또한, 스피커에 공급되는 입력전류가 증가함에 따라 보이스 코일의 온도가 선형적으로 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

#### 3. 성능 특성 비교(일반 스피커 VS 자성유체 스피커)

본 연구에서는 기존의 일반 우퍼 스피커와 자성유체를 적용한 자성유체 우퍼 스피커의 열전달 특성을 비교하기 위하



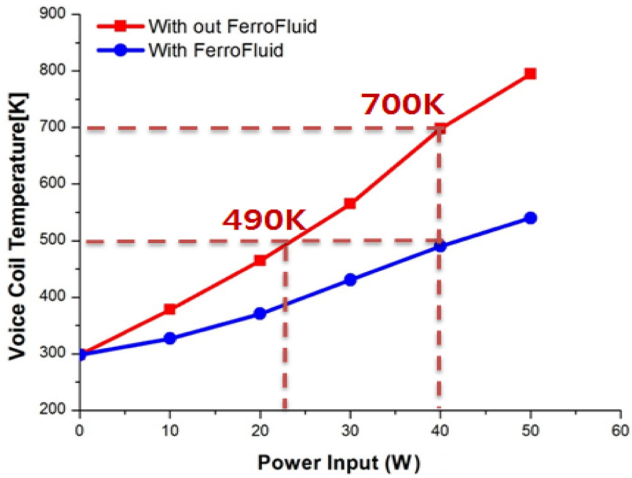


Fig. 8. (Color online) Temperature characteristics of the voice-coil for the woofer speaker with and without ferrofluid.

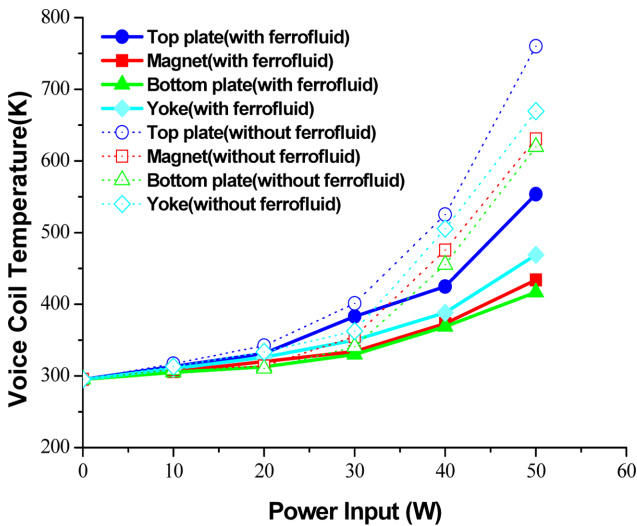


Fig. 9. (Color online) Temperature characteristics of the voice-coil for the woofer speaker with and without ferrofluid.

여 입력 전류를 10 W에서 50 W로 10 W씩 증가하면서 보이스 코일에서 발생하는 온도를 비교하여 Fig. 8 및 Fig. 9과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 8은 입력전류에 따라 일반 우퍼 스피커 및 자성유체 우퍼 스피커의 보이스 코일에서 발생하는 열을 비교한 결과이다. 먼저, 동일 입력 전류인 40 W를 기준으로 자성유체 우퍼 스피커와 일반 우퍼 스피커의 보이스 코일 온도를 비교해보면 자성유체 우퍼 스피커의 보이스 코일 온도는 490 K로 일반 우퍼 스피커의 보이스 코일 온도인 700 K보다 51.0% 감소하였다. 이러한 특성은 보이스 코일의 발생온도를 낮추어 우퍼 스피커 불량 문제중 80%를 차지하는 보이스 코일 탄화문제를 해결하여 궁극적으로 우퍼 스피커 및 음향기기의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 동일 보이스 코일 발생 온도인 490 K를 기준으로 자성유체 우퍼 스피커와 일반 우퍼 스피커의 필요 입력 전류를 비교해보면 자성유체 우퍼 스피커의 필요 입력 전류는 23 W로 일반 우퍼 스피커의 필요 입력 전류인 40 W보다 42.5% 감소하였다. 이러한 특성은 우퍼 스피커의 소비 전류를 감소시켜 궁극적으로 음향기기의 소비전력을 감소시킬 것으로 판단된다. 따라서 자성유체를 우퍼 스피커에 적용할 경우 우퍼 스피커 내부의 열을 빠르게 방열하고 보이스 코일 최대온도를 낮출 수 있어 우퍼 스피커 및 관련 음향기기의 신뢰성 및 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 최대 허용입력을 향상시켜 궁극적으로 음향 및 음질을 개선하는데 기여할 수 있다.

Fig. 9는 일반 우퍼 스피커 및 자성유체 우퍼 스피커에서 입력전류에 따른 보이스 코일에서 발생된 열이 내부의 각 주변 부품으로 전달되는 열전달 특성을 나타낸다. 먼저, 입력 전류에 따라서 자성유체 우퍼 스피커가 일반 스피커보다 열 방출이 더 빠르게 이루어지는 것을 알 수 있으며, 보이스 코일에서 발생된 열의 열전달 경로는 탑 플레이트, 요크, 영구 자석 및 바텀 플레이트 순으로 이루어지며, 열전달량도 이러한 순서로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 입력전류 50 W 기준에서 자성유체 우퍼 스피커의 각 부품별 온도는 일반 우퍼 스피커에 비하여 탑 플레이트는 42.0% 감소, 영구 자석은 55.0% 감소, 바텀 플레이트는 59.0% 감소하였고 요크는 51.0% 감소하였다. 평균적으로 자성유체 우퍼 스피커는 일반 우퍼 스피커에 비하여 51.7% 열전달이 향상되었다.

Table IV. Temperature characteristics of the main components for the tested general and ferrofluid woofer speakers.

Type	Component	Input					Increasing rate
		10 W	20 W	30 W	40 W	50 W	
General woofer speaker	Top plate [K]	317.2	342.3	401.3	525.1	760.0	88.5
	Yoke [K]	312.8	333.4	362.4	505.2	669.2	71.3
	Magnet [K]	308.9	313.7	354.9	475.5	630.8	64.3
	Bottom plate [K]	307.6	319.4	380.5	455.2	619.3	61.3
Ferrofluid woofer speaker	Top plate [K]	312.5	331.3	382.8	424.6	553.5	48.2
	Yoke [K]	309.7	325.9	333.0	388.1	468.8	31.8
	Magnet [K]	305.9	319.8	334.2	371.1	433.7	25.5
	Bottom plate [K]	305.2	312.7	298.9	368.9	416.6	22.2

Table IV는 자성유체 우퍼 스피커의 각 부품에서 발생하는 온도와 일반 우퍼 스피커의 각 부품에서 발생하는 온도를 비교한 자료로 입력전류가 10 W에서 50 W로 증가하였을 때 각 부품에서 발생된 열은 22.2 %에서 88.5 %까지 증가하였다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 자성유체 우퍼 스피커 내부에 위치한 보이스 코일의 열전달 특성을 수치해석으로 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 일반적으로 우퍼 스피커의 입력 전류가 증가함에 따라서 보이스 코일 온도는 선형적으로 증가하였다.
2. 동일 입력 전류 40 W 기준으로 자성유체 우퍼 스피커의 보이스 코일 온도가 일반 우퍼 스피커보다 51.0 % 감소하였다.
3. 동일 보이스 코일 발생 온도 490 K 기준으로 자성유체 우퍼 스피커의 필요 입력 전류가 일반 우퍼 스피커 보다 42.5 % 감소하였다.
4. 입력전류 50 W 기준에서 자성유체 우퍼 스피커는 일반 우퍼 스피커에 비하여 51.7 % 열전달이 향상되었다.
5. 자성유체를 우퍼 스피커에 적용할 경우 보이스코일 방열을 촉진시킴으로써 우퍼 스피커의 성능을 향상시키고 스피커의 음향 및 음질 개선에 기여할 수 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1] S. R. Lee and H. S. Choi, *J. Dig. Con. Soc.* **8**, 3 (2007).
- [2] S. J. Kim, *J. of the Kor. Ins. of Ele. and Ele. Mat. Eng.* **19**, 8 (2006).
- [3] S. G. Koh, K. J. Lee, J. H. Kang, G. H. Oh, K. H. Sung, and C. J. Kim, *Proc. of the KSME Spring Annual Meeting* (2008) pp. 41~44.
- [4] H. J. Kim, J. H. Seo, W. Y. Lee, J. K. Yeom, L. S. Seo, and M. Y. Lee, *Proc. of the KMS Summer Conference* (2013) p. 66.
- [5] T. S. Hsu and K. A. Poornima, *J. Aco. Soc. Jpn.* **21**, 2 (2000).
- [6] R. E. Rosensweig, Y. Hirota, S. Tsuda, and K. Raj, *J. Phy. Con. Mat.* **20**, 204147-1 (2008).
- [7] H. S. Lee and J. G. Yoo, *J. Kor. Mag. Soc.* **8**, 93 (1998).
- [8] Oliver Gutfleisch, Matthew A. Willard, Ekkehard Brück, Christina H. Chen, S. G. Sankar, and J. Ping Liu, *Adv. Mater.* **23**, 821 (2011).
- [9] Mengfei Yang, Robert O'Handley, and Zhao Fang, *The Proc. of the C.O.M.S.O.L. Conf.* (2010).
- [10] G. I. Jo, J. O. Kim, G. C. Song, N. S. No, and D. C. Kim, *The Kor. J. of Che. Eng.* **12**, 1 (2006).
- [11] Incropera, F. P., Lavine, A. S., Bergman, Theodore L., and DeWitt, David P., Wiley, NewYork (2013) pp. 156~158.
- [12] B. Q. Mao, L. Xu, Y. L. Wu, and D. M. Dai, *Adv. Mat. Res.* **479**, 2109 (2012).
- [13] X. Z. Wu, Y. L. Chen, N. X. Liu, Y. Z. Liang, and W. Y. Zhen, *J. Eng. The.* 100079 (2005).
- [14] S. Odenbach, *J. Phy. Con. Mat.* **18**, 38 (2006).
- [15] H. S. Jae, S. S. Lee, and M. Y. Lee, *Proc. of the KSME Spring Annual Meeting* (2013) pp. 268~270.

## Numerical Analysis on Temperature Characteristics of the Voice-Coil for Woofer Speaker Using Ferrofluid

**Moo-Yeon Lee\* and Hyung-Jin Kim**

*Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea*

**Woo-Young Lee**

*YoungChang System, LTD, Suandong, Busan 607-823, Korea*

(Received 6 September 2013, Received in final form 9 October 2013, Accepted 11 October 2013)

This article is to numerically investigate the temperature and heat transfer characteristics of the voice coil in the woofer speaker using ferrofluid with the input currents. The temperature and heat transfer of the major components of the woofer speakers with and without ferrofluid are calculated and analyzed with the increase of the input currents from 10 W to 50 W at an interval of 10 W. As results, the temperature of voice coil is linearly increased with an increase of input currents. The temperature of the woofer speaker with ferrofluid is lower 51.0 % than that of the woofer speaker without ferrofluid at the condition of input current 40 W and the required input current of the woofer speaker with ferrofluid is lower 42.5 % than that of the woofer speaker without ferrofluid at the condition of voice coil temperature 490 K. In addition, the heat transfer from voice coil to other components for woofer speaker with ferrofluid is higher 51.7 % than that for woofer speaker without ferrofluid.

**Keywords :** voice coil, woofer speaker, ferrofluid, temperature