

علوم و تکنولوژی محیط زیست ، دوره دهم، شماره یک، بهار ۸۷

(مقاله مروری)

## اثرات گرادیان دمایی و اینرسی سیال بر جریان آکوستیکی در یک موج ایستا و کاربرد آن در موتورها و یخچال های ترموآکوستیک

فرشید قربانی شهنا

عضو هیأت علمی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان

محسن رحیمی نژاد

دانشجوی دکتری بهداشت حرفه ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران

تاریخ پذیرش: ۸۵/۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۸۵/۱/۲۰

چکیده

به دنبال روش تجربی *Thompson* و *Atchley* آنومتری لیزر دوپلر (*LDA*) برای بررسی اثرات ترموآکوستیکی گرادیان دمایی محوری و اینرسی سیال بر جریان آکوستیکی تولید شده در یک رزوناتور استوانه ای شکل موج ایستا که از هوا در فرکانس  $HZ$  ۳۰۸ به طور سینوسی تحریک شده، مورد استفاده قرار گرفت. جزء محوری سرعت جریان فقط در محور رزوناتور و در سرتاسر قطر در دامنه های سرعت ۲٫۷، ۴٫۳، ۶٫۱ و ۸٫۶ متر بر ثانیه و در قسمت شکم امواج، اندازه گیری شد. مقدار گرادیان دمایی در طول دیواره رزوناتور در نتیجه آزمایش های مکرر با رزوناتور احاطه شده با آب، رزوناتور معلق داخل یک مخزن پر از هوا یا رزوناتور پوشیده شده در یک عایق اسفنجی، بین تقریباً ۰ تا ۸ درجه کلوین بر متر متغیر بود. یک همبستگی معنی داری بین گرادیان دمایی و رفتار جریان به این ترتیب مشاهده گردید: هر چه مقدار گرادیان دمایی افزایش می یافت، میزان جریان کاهش یافته و شکل سلول جریان به طور فزاینده ای به هم می ریخت. سرعت جریان های یکنواخت مشاهده شده منطبق با هیچ یک از نظریه های موجود نبود.

واژه های کلیدی: آکوستیک ، گرادیان دمایی ، اینرسی

مقدمه

روش آنومتری لیزر دوپلر (*LDA*) مورد مطالعه قرار گرفته است (۱). در دامنه های نسبتاً پایین آکوستیکی، جزء محوری اندازه گیری شده میدان بیرونی سرعت جریان منطبق با نظریه

جریان آکوستیکی تولید شده توسط یک موج ایستای آکوستیکی تک فرکانس در یک رزوناتور استوانه ای بلند به طور تجربی توسط *Thompson* و *Atchley* با استفاده از

است. از جزء مختصات متقاطع در خارج از لایه مرزی آکوستیکی صرف نظر شده است.

در این رابطه Rott فرض کرد که:  $R = 1 - R$  شعاع داخلی رزوناتور به میزان کمی به طول موج صوت  $\lambda$  بستگی دارد اما به میزان زیادی با ضخامت لایه مرزی ویسکوز صوتی،  $\delta_v = \sqrt{2\nu/\omega}$  و لایه مرزی دمایی صوتی،  $\delta_k = \sqrt{2k/\omega}$  که  $k$  و  $\nu$  به ترتیب ویسکوزیته سینماتیک و نفوذپذیری گرمایی سیال هستند، ارتباط دارد. ۲- از مقادیر بزرگتر از عدد ماخ  $M=U_1/C$  صرف نظر شده است،  $U_1$  دامنه  $\bar{U}_1$  و  $C$  سرعت صوت در سیال است. ۳- رابطه بین دما ( $T$ ) و ویسکوزیته ( $\mu$ ) بدین شکل است  $\mu \propto T^\beta$  که  $\beta$  ثابتی است که بستگی به خواص سیال دارد و ۴- تغییرات میانگین دما در مختصات محوری  $x$  رخ می دهد.

Rott برای جزء محوری سرعت جریان خارج از لایه مرزی آکوستیکی با استفاده از روابط دیگر مشخص نمود که رابطه سینوسی است و حداکثر مقدار آن در قسمت شکم  $x=l/2$  حاصل می گردد و تغییرات در محور متقاطع با توجه به رابطه حاصل شده به شکل سهمی می باشد.

Bailliet و همکارانش در مورد یک موج ایستای تک فرکانس داخل یک رزوناتور با  $R$  بسیار بزرگتر از  $\delta_k$  و با گرادیان دمایی منطبق با این رابطه  $Im \sim \theta = (dT_0/dx)/T_0$  ۱ نشان دادند که دامنه سرعت جریان محوری در طول خط مرکزی ( $r=0$ ) منطبق با مقدار پیش بینی شده توسط Swift و Olson می باشد در حالی که تغییر سرعت جریان در مختصات متقاطع  $r$  تقریباً به شکل سهمی است.

#### ب - تأثیر اینرسی سیال روی جریان:

Lighthill تأثیر اینرسی سیال را روی جریان آکوستیکی مورد بررسی قرار داده و نتیجه گیری کرده است که این اثر تقریباً در همه حرکات قابل توجه جریان آکوستیکی معنی دار است. تأثیر اینرسی سیال بر شکل میدان سرعت جریان تولیدی توسط یک موج ایستای آکوستیکی تک فرکانس

Rott بدین گونه است: تغییر پذیری در مختصات محوری سینوسی، در مختصات متقاطع سهمی شکل و در دامنه آکوستیکی چهار وجهی است (۲). این نتایج منطبق با اندازه گیری های انجام شده قبلی در محدوده گره سرعت توسط Sharp و همکارانش (۳)، Arroyo و Greated (۴)، Hann و Greated (۵)، Rockliff و همکارانش (۶) می باشد که با استفاده از روش سرعت سنجی تصویر ذره (VIP) انجام یافته است.

در موتورها و یخچال های ترموآکوستیک، وجود هر گونه جریان آکوستیکی در داخل رزوناتور آکوستیکی منجر به کاهش بازدهی وسیله می شود. تأثیر گرادیان دمایی محوری بر روی جریان آکوستیکی از جنبه نظری توسط Rott (۲)، Olson و Swift (۷) و Bailliet و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مطالعه، تأثیر گرادیان دمایی محوری ترموآکوستیکی و اینرسی سیال بر میدان سرعت جریان تولید شده توسط یک موج ایستای آکوستیکی تک فرکانس در یک رزوناتور استوانه ای بلند به طور تجربی با استفاده از روش Thompson و Atchley بدین ترتیب مورد بررسی قرار گرفته است: سرعت سیال با استفاده از روش آنومتری لیزر دوپلر با آنالیز طیف متوالی (BSA) اندازه گیری شد، و سرعت جریان تأخیری با استفاده از حرکت آکوستیکی مشاهده شده و زمان های رسیدن نمونه های سرعت تعیین گردید.

#### نظریه:

##### الف - تأثیر گرادیان دمایی روی جریان

Rott فرمولی برای جزء محوری میدان سرعت جریان با شرایط ذکر شده، به دست آورده است. در این فرمول فرض شده که حرکت سیال اطراف خط مرکزی قرینه است.

$$u_1 = R(\tilde{U}_1^{jot}) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

$u_1$  دامنه سرعت صوت در شکم آن است،  $\omega$  فرکانس زاویه ای صوت،  $t$  زمان،  $x$  مختصات محوری،  $\lambda$  طول موج،  $j = \sqrt{-1}$  و  $R$  به معنی بخش واقعی یک استدلال پیچیده

طرف شکم به سمت گره های سرعت آکوستیکی منتقل می گردید. کار Merkli و Thomann نیز این یافته را تصدیق نمود. آن ها یک نظریه تدوین نمودند که بر اساس آن جریان گرمایی داخل رزوناتور قابل پیش بینی است. اندازه گیری تجربی آن ها نشان داد که دیواره رزوناتور در مجاورت گره ها گرم و در مجاورت شکم ها خنک بوده است. مطالعه Swift نشان داد که یک توزیع یکنواخت دمایی بین گره تا شکم سرعت آکوستیکی وجود دارد.

بر اساس یافته ها، انتقال گرمای ترموآکوستیکی و گرادیان دمایی یکنواخت حاصل، هر دو با  $U_1^2$  یا مجذور دامنه سرعت آکوستیکی متناسب است.

### روش کار

#### الف - تجهیزات آزمایشگاهی

دستگاه نشان داده شده در شکل ۱ برای بررسی اثر ذکر شده مورد استفاده قرار گرفته است. رزوناتور با هوا ( $T=23^\circ\text{C}$  و  $C\approx 345\text{ m/s}$ ) و مقدار اندکی دود حاصل از طناب کتانی سوخته شده ( قطر ذره  $\approx 1\ \mu\text{m}$  ) پر شده بود. یک موج ایستا با قرار دادن دو بلندگو (صوت دانشگاه 1829BT) در فاز یک چهارم ستون هوا ( $f=\omega/2\pi=308$  HZ,  $\lambda=1.13\text{m}$ ) ایجاد گردید. دودی که حرکت هوا را دنبال می کرد، به عنوان ذرات ردیاب برای اندازه گیری سرعت استفاده شد. رطوبت نسبی داخل رزوناتور با حضور دود تحت تأثیر چندانی قرار نمی گرفت.

در داخل یک رزوناتور استوانه ای به طور محاسباتی توسط Menguy و Gilbert مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلیه افرادی که روی این موضوع کار کرده اند، رابطه زیر را برای ارتباط بین اجزاء محوری و تقاطعی سرعت جریان ارایه نموده اند که با عدد رینولدز مرتبط می باشد:

$$R_e = \left(\frac{U_1}{c}\right)^2 \left(\frac{R}{\delta_v/\sqrt{2}}\right)^2$$

در مورد  $Re < 1$  که به منزله جریان آرام است، Rott, Qi, Olson, Swift و Bailliet و همکارانش با استفاده از روابط ملاحظه نمودند که تغییرات سرعت جریان محوری مربوط به مختصات متقاطع  $r$  سهمی شکل است.

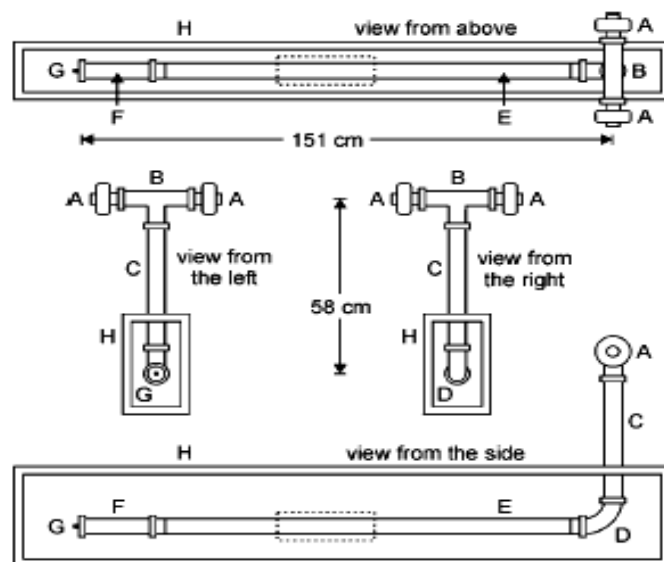
در موارد  $Re \geq 1$  که به جریان غیرخطی اشاره دارد، روش Gilbert و Menguy نشان داد که اجزاء محوری و متقاطع میدان بیرونی هر یک به شکل حاصل سری های فوریه مربوط به مختصات محوری  $x$  و سری های توانی مربوط به مختصات متقاطع  $r$  است.

نتایج این محاسبات پیش بینی کرد که اینرسی سیال در اعداد رینولدز متوسط ( $1 \leq Re \leq 4$ )، شکل سلول های خارجی جریان را با ایجاد حداکثر سرعت جریان در امتداد خط مرکزی ( $r=0$ ) بهم زده، به طوری که از نقطه مرکزی ( $x=L/2$ ) به سمت شکم سرعت جریان ( $x=L$ ) تغییر مکان داده است.

عدد رینولدز ( $Re$ ) درجه انحراف میدان سرعت جریان را نسبت به حالت جریان آرام تعیین می کند.

#### انتقال گرمای ترموآکوستیکی:

در کار Rott که مربوط به یک موج ایستای آکوستیکی تک فرکانس در یک رزوناتور بلند استوانه ای بود، گرما به طور ترموآکوستیکی در امتداد دیواره داخلی رزوناتور از



شکل ۱- تجهیزات آزمایشگاهی (A) دوبلندگو متصل به (B) یک سه راهی از جنس فولاد زنگ نزن روی (C) یک لوله ۴۰cm از جنس فولاد زنگ نزن. این بخش عمودی به وسیله (D) یک زانوئی ۹۰ درجه از جنس فولاد زنگ نزن به یک بخش افقی متصل از (E) یک لوله شیشه ای بوروسیلیکاتی ۱۲۲cm و (F) یک لوله ۲۰cm از جنس فولاد زنگ نزن، وصل شده. رزوناتور به (G) یک کلاهک انتهایی از جنس فولاد زنگ نزن، ختم شده است. بخش افقی داخل (H) یک محفظه با دیوار شیشه ای معلق است. مستطیل نقطه چین نشانگر محل سلول جریانی است که اندازه گیری ها در آنجا انجام گرفته است.

۱- شرایط مرزی عایق: در این وضعیت، قسمت شیشه ای رزوناتور با یک لوله عایق دوجداره پلی اتیلنی با ضخامت ۱cm پوشیده شده است. عایق سازی تا فاصله ۹۰cm در جهت محور افقی ادامه یافته و سلول جریان در وسط قرار گرفته است. باریکه لیزر از طریق یک شکاف با ارتفاع ۰.۸cm که در فاصله ۴۰cm جهت محوری که بر روی سلول جریان قرار گرفته بود، به داخل رزوناتور عبور می کرد.

۲- شرایط مرزی ایزوترمال (هم دمایی): بخش شیشه ای با یک لوله یکسان که داخل پوشش آبی سوار شده بود، جایگزین شد. پوشش از یک لوله شیشه ای بوروسیلیکات قطوری که لوله کوچک تر رزوناتور در مرکز آن قرار گرفته بود تشکیل می شد که کلاهک های ساخته شده از PVC، دو طرف آن را بسته بودند. لوله خارجی دارای قطر داخلی ۷.۵cm با ضخامت دیواره ۲.۵mm بود که یک فضای ۱.۲cm بین دو لوله ایجاد شده بود. آب از طریق روزنه تعبیه

جزء محوری سرعت سیال داخل بخش شیشه ای بلند رزوناتور ( قطر داخلی ۴.۶۵cm و ضخامت دیواره ۲mm) به عنوان تابعی از زمان با استفاده از سیستم آنومتری لیزر دوپلر (LDA) متصل به سیستم آنالیز طیف متوالی (BSA) به عنوان نمونه سنجیده شد. دقت مطلق اندازه گیری سرعت ۰.۳٪ بود. برای بزرگ ترین دامنه صوتی استفاده شده در مطالعه حاضر ( $U_1 = 8.6 \text{ m/s}$ ,  $Re = 40$ )، دامنه هارمونی دوم در قسمت شکم آن تقریباً ۱۰٪ دامنه هارمونی اول در شکم آن بود.

چندین ترموکوپل E شکل به قسمت های مختلف دیواره خارجی رزوناتور متصل شده بودند تا توزیع فاصله ای میانگین دما را پایش کنند.

به منظور تغییر دامنه گرادیان دمایی محوری ترموآکوستیکی در شرایطی که عدد رینولدز ثابت بود، سه شرایط مختلف مرزی بر دیواره رزوناتور به شرح زیر اعمال گردید:

## اندازه گیری ها

## الف - اثر گرادیان دمایی

شکل ۲ رابطه مشاهده شده بین گرادیان دمایی محوری ترموآکوستیکی در طول دیواره رزوناتور و جزء محوری سرعت جریان را برای سه شرایط مرزی عایق، ایزوترمال و کنترل نشده نشان می دهد. با توجه به این شکل هر چه دامنه گرادیان دمایی افزایش می یابد، دامنه جزء محوری سرعت جریان کاهش می یابد تا این که سرانجام به یک شرایط یکنواخت می رسد (شکل 3a). در شرایط مرزی کنترل نشده سرعت جریان محوری در مدت تقریباً ۱۴ دقیقه به ۰.۹۵٪ شرایط یکنواخت و گرادیان دمایی محوری تقریباً در عرض ۲۳ دقیقه به ۰.۹۵٪ شرایط یکنواخت می رسد. در شرایط عایق شده، این زمان ها به ترتیب تقریباً ۳۲ دقیقه برای سرعت جریان محوری و تقریباً ۵۴ دقیقه برای گرادیان دمایی محوری است. البته نتیجه آزمایش به مسدود بودن کامل یا داشتن نشتی کوچک در رزوناتور چندان بستگی نداشت.

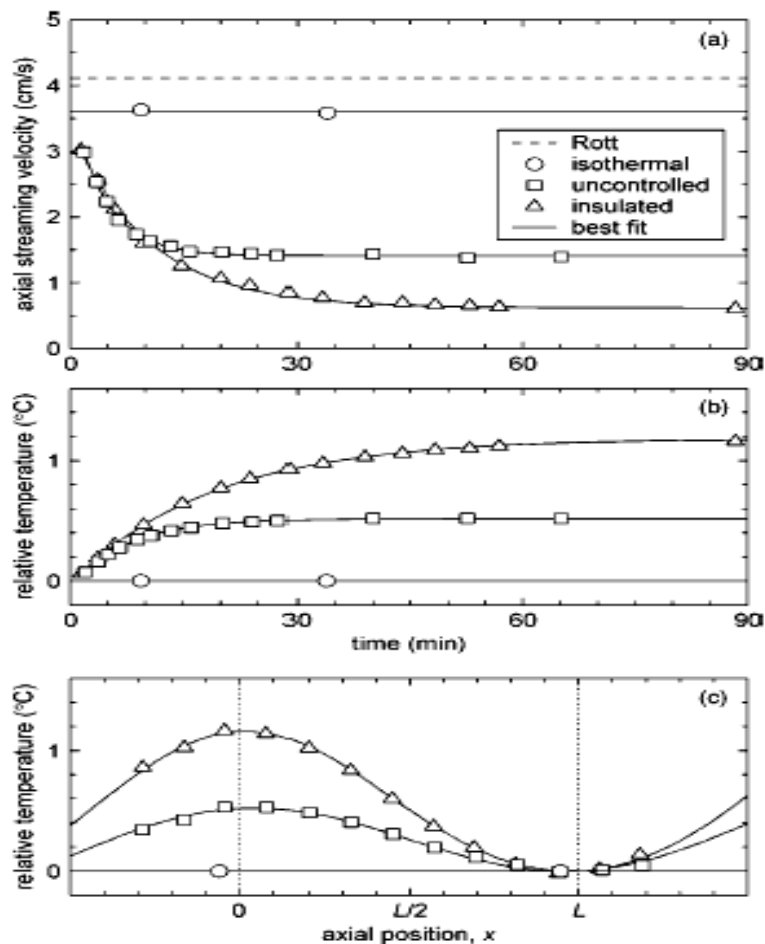
بیشترین اختلاف بین سرعت جریان اندازه گیری شده و نظریه Rott زمانی مشاهده شد که از شرایط مرزی عایق استفاده می شد که یکنواخت ترین گرادیان دمایی را ایجاد می کرد.

شده بر کلاهک دورتر به بلندگوها وارد و از روزنه روی کلاهک دیگر (نزدیک به بلندگوها) خارج می شد. برای ثابت ماندن دمای آب، در هر دقیقه، ۷ لیتر آب در این فضا گردش می نمود.

۳- شرایط مرزی کنترل نشده: در این وضعیت رزوناتور توسط هوا احاطه گردیده بود. اگرچه مدل سازی ریاضی این وضعیت بسیار مشکل است، اما این وضعیت برای ایجاد گرادیان دمایی بین دو وضعیت ایزولاسیون و ایزوترمال با عدد رینولدز ثابت در نظر گرفته شد.

## ب - تعیین سرعت جریان

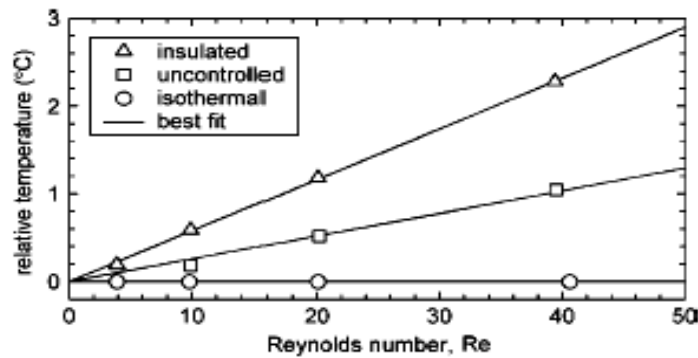
اندازه گیری سرعت جریان با استفاده از سیستم LDA/BSA انجام گرفت. برای هر اندازه گیری سرعت هر موج، ابتدا سری های پیچیده فوریه با استفاده از روش میانگین گیری فوریه محاسبه می گردید. نتیجه این محاسبات اندازه گیری زمان بین دو موج بود سپس با محاسبه فاصله بین دو موج (با استفاده از ذرات ردیاب) سرعت جریان تعیین شد.



شکل ۲- در (a) اجزای محوری سرعت جریان ( $U_1=6.1\text{m/s}$ ,  $Re=20$ ) برای سه شرایط مرزی که به عنوان توابعی از زمان در مرکز سلول جریان اندازه گیری شده، با سرعت جریان نظری پیش بینی شده توسط Rott مقایسه شده اند. در (b) که دماهای اندازه گیری شده دیواره در گره ( $x=0$ ) با دماهای شکم ( $x=l$ ) سرعت - آکوستیکی مقایسه شده اند. هرچه دامنه گرادیان های دمایی در (b) افزایش می یابد، دامنه های مربوط به سرعت جریان در (a) کاهش می یابد. در (c) توزیع های یکنواخت دمای محوری در ارتباط با دما در شکم سرعت مقایسه شده اند.

انتقال ترموآکوستیکی گرما، قابل انتظار بود. گرادیان دمایی یکنواخت محوری و عدد رینولدز هر دو با  $U_1^2$  متناسب هستند.

شکل ۳ نشانگر اختلاف دمای یکنواخت محوری در سرتاسر سلول جریان به عنوان تابعی از عدد رینولدز و شرایط مرزی است. برای هر شرایط مرزی، داده ها نشانگر تطبیق خوب با یک منحنی خطی است. این حالت از نظریه مربوطه به دلیل

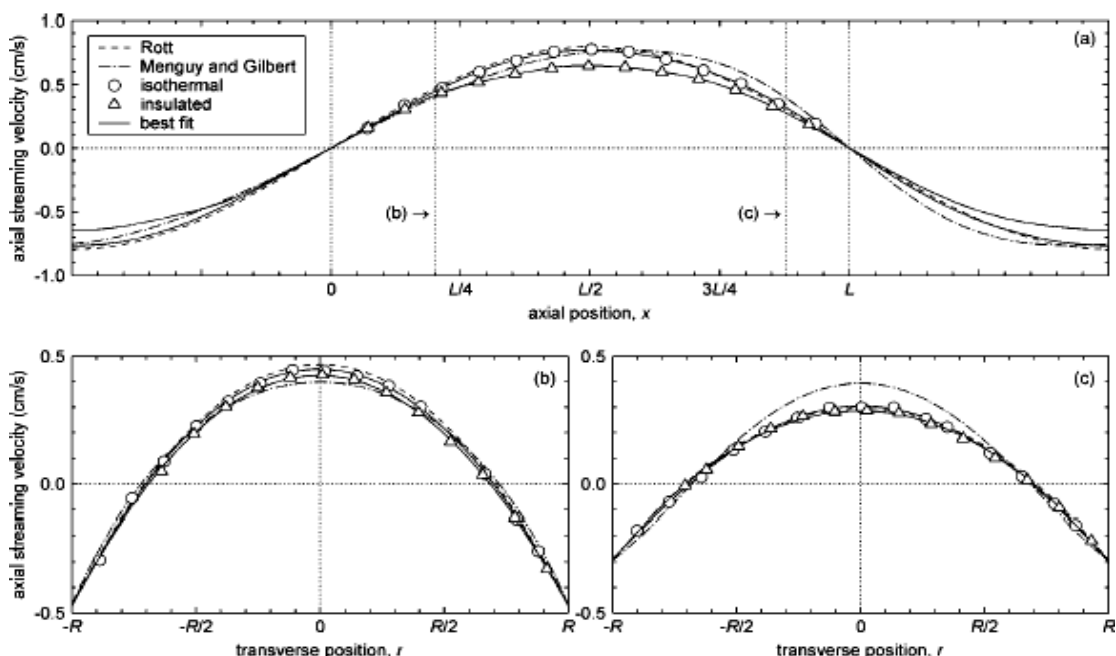


شکل ۳- دماهای یکنواخت در گره  $(x=0)$  سرعت - آکوستیکی در رابطه با دماهای شکم  $(x=l)$  به عنوان تابعی از عدد رینولدز  $(Re)$  و شرایط مرزی

ب - جریان یکنواخت

اندازه گیری های قبلی انجام شده توسط Thompson و Atchley در  $Re=0.36$  نشان داد که میدان سرعت جریان به طور قابل توجهی تحت تأثیر وابستگی گرانی و هدایت گرمایی با دما است که این یافته منطبق بر نظریه Rott است.

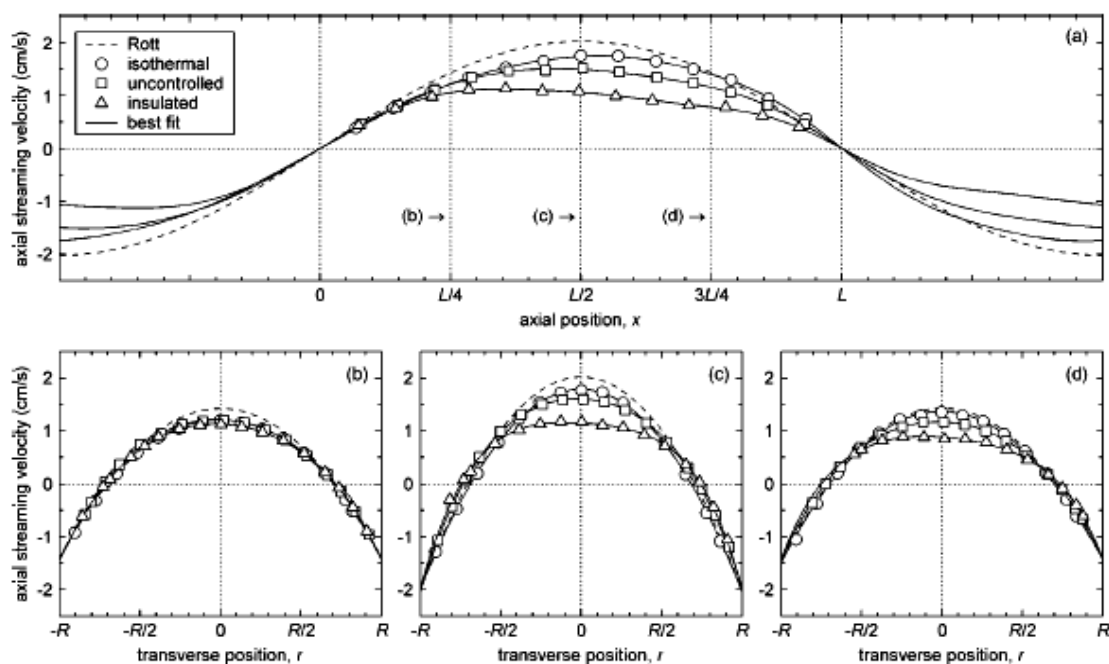
شکل ۴ جزء محوری میدان سرعت جریان یکنواخت در  $Re=4$  را برای شرایط مرزی عایق و ایزوترمال نشان می دهد. در شکل ۴a یک اختلاف قابل توجه بین داده های شرایط عایق و ایزوترمال حتی زمانی که اختلاف دمای محوری یکنواخت در سرتاسر سلول جریان فقط  $0.2^\circ C$  برای شرایط مرزی عایق است، وجود دارد.



شکل ۴- جزء محوری میدان سرعت جریان یکنواخت در  $Re=4$  ( $U_1=2.66m/s$ ) برای شرایط مرزی عایق و ایزوترمال. در (a) تغییر سرعت جریان یکنواخت مربوط به مختصات  $(r=0)$  با نظریه های Rott، Menguy و Gilbert مقایسه شده است. در (b) و (c) تغییر سرعت جریان محوری مربوط به مختصات متقاطع  $r$  ( $X=0.2L$  و  $0.88L$ ) با نظریه مقایسه شده است.

شکل ۳ را ببینید) اختلاف بین سرعت جریان اندازه گیری شده و نظریه Rott نیز افزایش می یابد. برای شرایط ایزوترمال (۵a)، مکان حداکثر سرعت جریان در طول خط مرکزی اندکی به سمت شکم سرعت صوت ( $X=L$ ) تغییر یافته است. این رفتار به طور کیفی منطبق با اثر اینرسی سیال است.

شکل ۵ جزء محوری میدان سرعت جریان یکنواخت را در  $Re=10$  برای هر سه شرایط نشان می دهد. تأثیر گرادیان دمایی محوری بر جریان قابل توجه است: زمانی که اختلاف دمایی محوری یکنواخت در سرتاسر سلول جریان با استفاده از شرایط مرزی عایق یا کنترل نشده افزایش می یابد

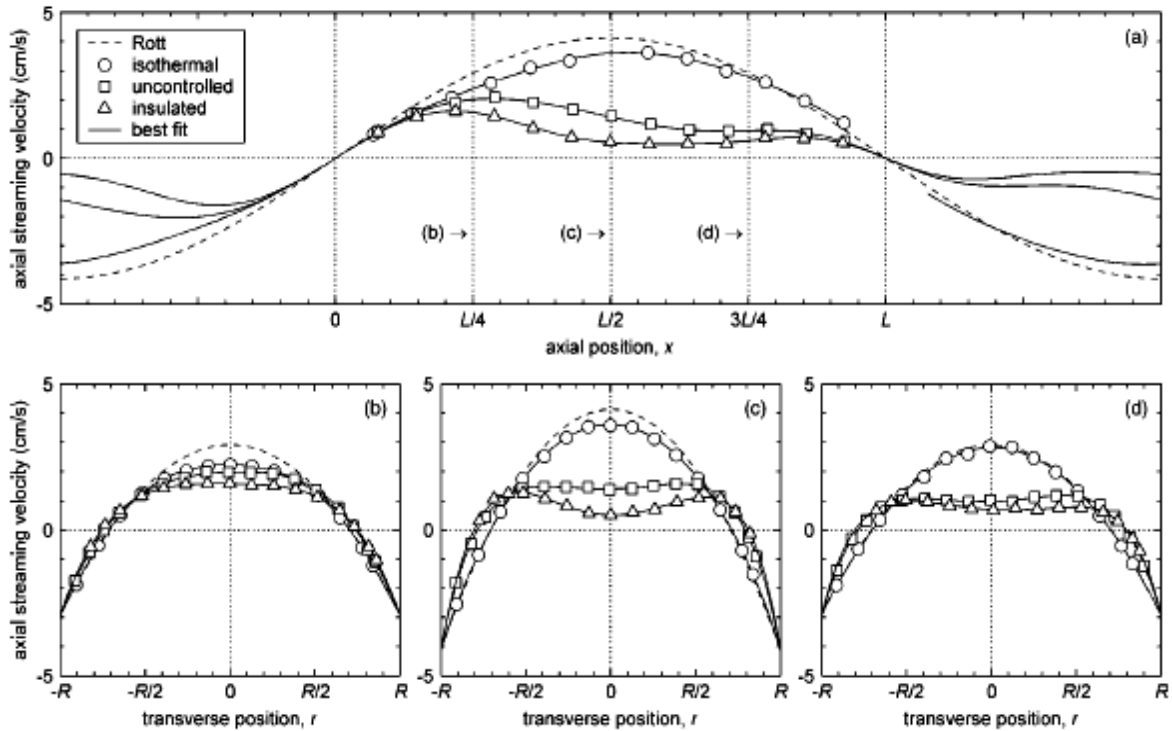


شکل ۵- جزء محوری میدان سرعت جریان یکنواخت در  $Re=10$  ( $U_1=4.26m/s$ ) برای هر سه شرایط مرزی. در (a) تغییر سرعت جریان محوری مربوط به مختصات  $x$  ( $r=0$ ) با نظریه Rott مقایسه شده است. در (b)، (c) و (d) تغییر سرعت جریان محوری در مختصات متقاطع  $r$  ( $X=L/4, L/2, 3L/4$ ) با نظریه مقایسه شده است.

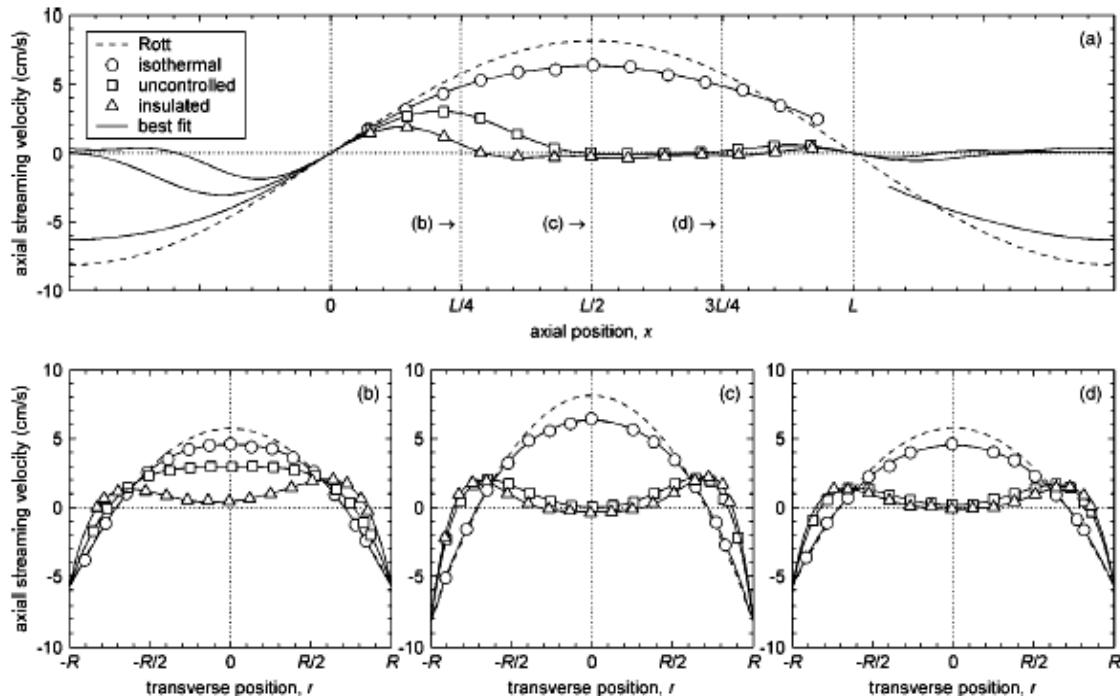
برای هر گونه ترکیب عدد رینولدز و شرایط مرزی ملاحظه شده در شکل های ۴ تا ۷، محدوده ای که در آن سنجش ها منطبق با اصول بقای جرم است، با میانگین گرفتن پروفایل متقاطع سرعت جریان محوری سرتاسر مقطع عرضی رزوناتور در هر وضعیت محوری می تواند تعیین گردد.

شکل ۶ و ۷ نشانگر اجزای محوری میدان های سرعت جریان یکنواخت در  $Re=20$  و  $Re=40$  هستند. هر چه عدد رینولدز و گرادیان دمایی محوری افزایش می یابند، اختلاف بین داده های اندازه گیری شده و نظریه بیشتر تظاهر می یابد. در  $Re=40$  سرعت جریان در مرکز سلول ( $X=L/2$ )، که به عنوان تابعی از زمان اندازه گیری شده، در ظرف ۹ دقیقه پس از برقراری میدان آکوستیکی به صفر می رسد.





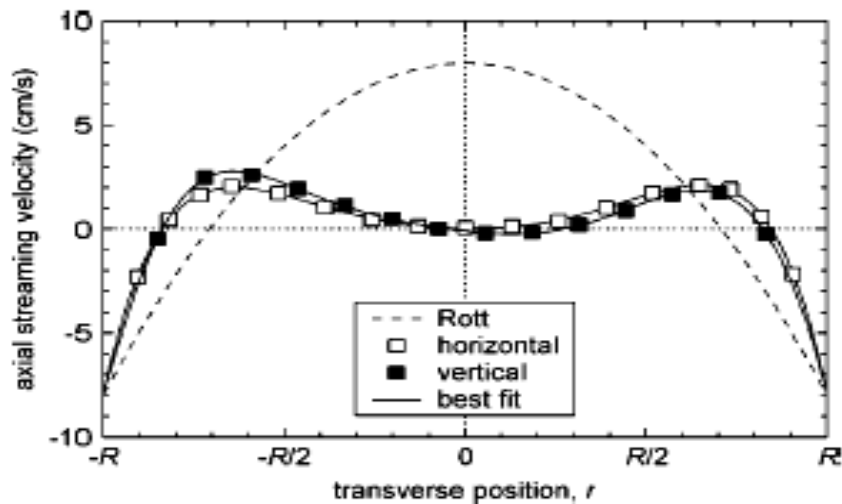
شکل ۶- جزء محوری میدان سرعت جریان یکنواخت در  $(U_1=6.11\text{m/s}) \text{Re}=20$  برای هر سه شرایط مرزی. در (a) تغییر سرعت جریان محوری مربوط به مختصات  $x$  ( $r=0$ ) با نظریه Rott مقایسه شده است. در (b)، (c) و (d) تغییر سرعت جریان محوری در مختصات متقاطع  $r$  ( $X=L/4, L/2, 3L/4$ ) با نظریه مقایسه شده است.



شکل ۷- جزء محوری میدان سرعت جریان یکنواخت در  $(U_1=8.6\text{m/s}) \text{Re}=40$  برای هر سه شرایط مرزی. در (a) تغییر سرعت جریان محوری مربوط به مختصات  $x$  ( $r=0$ ) با نظریه Rott مقایسه شده است. در (b)، (c) و (d) تغییر سرعت جریان محوری در مختصات متقاطع  $r$  ( $X=L/4, L/2, 3L/4$ ) با نظریه مقایسه شده است.

مستقر در بالای رزوناتور با زاویه ۴۵ درجه نسبت به پلان افقی، انجام شده است. مقایسه دو منحنی نشانگر این است که میدان جریان در اطراف خط مرکزی ( $r=0$ ) اندکی نامتقارن است.

شکل ۸ نشانگر جزء محوری میدان سرعت جریان یکنواخت اندازه گیری شده در هر دو پلان (سطح) افقی و عمودی در عدد رینولدز ۴۰ برای شرایط مرزی کنترل نشده است. اندازه گیری ها در پلان عمودی با استفاده از یک آینه

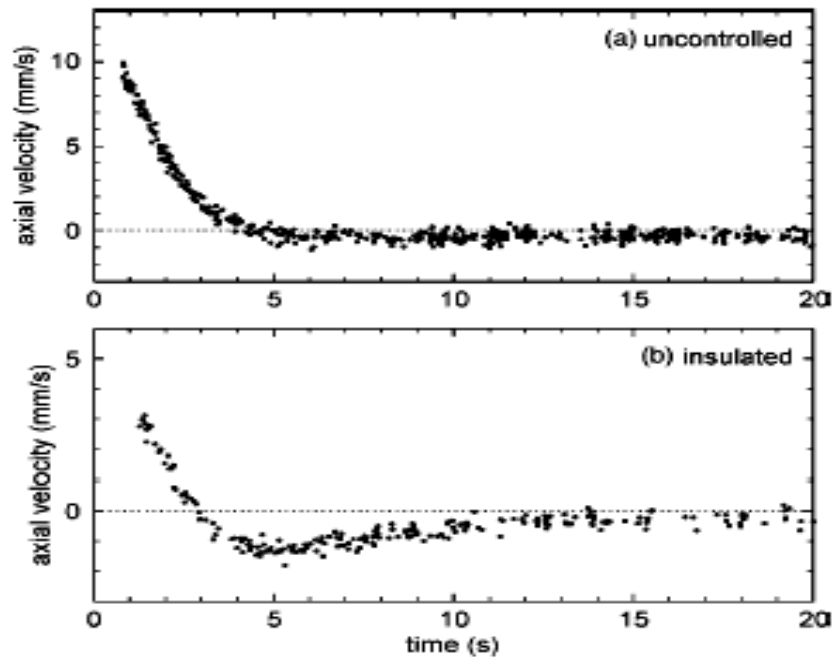


شکل ۸ - جزء محوری میدان سرعت جریان اندازه گیری شده به عنوان تابعی از مختصات متقاطع  $r$  در هر دو پلان های افقی و عمودی ( $X=L/2$ ) در  $(U_1=8.5 \text{ m/s}) \text{ Re}=40$  با شرایط مرزی کنترل نشده. برای اندازه گیری های انجام شده در پلان عمودی، موقعیت  $r=R$  نشانگر دیواره بالایی رزوناتور و موقعیت  $r=-R$  نشانگر دیواره پایینی رزوناتور است. اندازه گیری های انجام شده در پلان افقی از شکل ۷(c) گرفته شده است.

### ج - تنزل جریان

رفتار مشاهده شده در این شکل را شاید با دو مکانیسم مخالف که در سیال به طور مشابه عمل می کنند، بتوان توضیح داد. مکانیسم اول، که در جهت مثبت به سیال نیرو وارد می کند، دارای دامنه ای است که مستقل از گرادینان دمای محوری است و نیازمند زمان تقریباً ۵ ثانیه است تا کاملاً تنزل یابد. مکانیسم دوم که در جهت منفی بر سیال نیرو وارد می کند، دارای دامنه ای است که تابعی از گرادینان دمای محوری است و به ۱۲ ثانیه زمان نیاز دارد تا کاملاً تنزل یابد.

شکل ۹ نشانگر میزان جریان کاهش یافته اندازه گیری شده در زمانی است که میدان صوتی غیر فعال شده است. برای هر دو شرایط مرزی کنترل نشده و عایق، سرعت جریان های مربوط به زمان صفر مطابق با مقادیر مربوط به جریان یکنواخت شکل ۶ است. مدت زمان ۵ ثانیه ای لازم برای تنزل کامل جریان در شکل ۹(a) منطبق با زمان لازم برای به حداکثر رسیدن جریان در زمانی که میدان صوتی برقرار شده، است. برای گرادینان های یکنواخت دمایی محوری بزرگ تر در شرایط مرزی عایق، شکل ۹(b)، منحنی کاهش پیچیده تر است.



شکل ۹ - جزء محوری سرعت در مرکز سلول جریان، به عنوان تابعی از زمان پس از قطع میدان صوتی برای هر سه شرایط مرزی اندازه گیری شده است. سرعت صوت سریعاً از مقدار یکنواخت ( $U_1/\sqrt{2} = 4.32\text{m/s}$ ,  $Re=20$ ) تا صفر در مدت ۰٫۳ ثانیه تنزل می یابد. در (a) اختلاف دمای محوری بین دو طرف سلول تقریباً  $1^\circ\text{C}$  است (شکل ۳) و جریان به طور توانی ظرف مدت تقریباً ۵ ثانیه تنزل می یابد. در (b) اختلاف دمای محوری تقریباً  $2,3^\circ\text{C}$  است و تنزل جریان بسیار پیچیده است. توجه شود که اختلاف مقیاس ها در محورهای عمودی است.

#### د- انتقال گرمای محیطی

پس از تنزل کامل جریان (شکل ۹)، مشاهده شد که جریان های انتقال گرمای محیطی در داخل رزوناتور در خط مرکزی بسیار ناچیز است. برای شرایط مربوط به بزرگترین گرادیان دمایی استفاده شده در مطالعه حاضر ( $U_1=8.6\text{ m/s}$ ,  $Re=40$  و شرایط مرزی عایق)، اندازه گیری کاهش جریان به عنوان تابع مختصات محوری و متقاطع در پلان افقی نشان داد که جریان های انتقال گرما در پلان افقی  $1\text{mm/s}$  است که به طور قابل ملاحظه ای کمتر از سرعت جریان های یکنواخت مشاهده شده در شکل ۷ می باشد. میزان انتقال گرمای عمودی در مجاورت گره سرعت صوت، بیشترین میزان است.

#### نتیجه گیری

مشخص شد که تأثیر گرادیان دمایی محوری ترموآکوستیکی بر جزء محوری میدان سرعت جریان، معنی دار است. خطای بین سرعت جریان های نظری و اندازه گیری شده با افزایش دما، افزایش می یابد. در  $Re=40$  و با اختلاف دمای  $1^\circ\text{C}$  یا بیشتر بین دو سر سلول جریان، جریان محوری در طول بخش بزرگی از خط مرکزی نزدیک شکم سرعت جریان، متوقف می شود. در  $Re=4$  اندازه گیری ها مطابق با نتایج محاسباتی Manguy و Gilbert نیست. اندازه گیری های انجام شده در شرایط ایزوترمال در  $Re \geq 10$  نشانگر اختلاف قابل توجه نسبت به نظریه Rott بود اما این اثر از تأثیر گرادیان دمایی بر جریان کمتر بود.

نتایج پیشنهاد می کند که اثر گرادیان های دمایی کوچک در زمانی که تلاش می شود که یک مدل دقیق برای میدان سرعت جریان خارجی در یک سیستم واقعی ارائه گردد،

6. M. Campbell, J. A. Cosgrove, C. A. Greated, S. Jack, and D. Rockliff, "Review of LDA and PIV applied to the measurement of sound and acoustic streaming," *Opt. Laser Technol.* **32**, 629–639 ~2000!
7. M. W. Thompson and A. A. Atchley, "Measurements of Rayleigh streaming in high-amplitude standing waves," in *Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century*, edited by O. V. Rudenko and O. A. Sapozhnikov ~MSU Faculty of Physics, Moscow, 2002!, Vol. 1, pp. 183–190.
8. L. Menguy and J. Gilbert, "Non-linear acoustic streaming accompanying a plane stationary wave in a guide," *Acust. Acta Acust.* **86**, 249–259 ~2000!
9. G. W. Swift, *Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators* ~Acoustical Society of America, Melville, NY, 2002!, Chap. 7, pp. 153–204.
10. J. R. Olson and G. W. Swift, "Acoustic streaming in pulse tube refrigerators: Tapered pulse tubes," *Cryogenics* **37**, 769–776 ~1997!
11. H. Bailliet, V. Gusev, R. Rasset, and R. A. Hiller, "Acoustic streaming in closed thermoacoustic devices," *J. Acoust. Soc. Am.* **110**, 1808–1821 ~2001!
12. Q. Qi, "the effect of compressibility on acoustic streaming near a rigid boundary for a plane traveling wave," *J. Acoust. Soc. Am.* **94**, 1090–1098 ~1993!
13. J. Lighthill, "Acoustic streaming," *J. Sound Vib.* **61**, 391–418 ~1978!
14. P. Merkli and H. Thomann, "Thermoacoustic effects in a resonance tube," *J. Fluid Mech.* **70**, 161–177 ~1975!

لازم است که به دقت در نظر گرفته شوند. در حالی که Rott، Olson و Swift، و Bailliet و همکارانش همگی گردایان دمایی محوری را در آنالیزهایشان غیر صفر فرض کرده بودند، اما نتایج آن ها برای پیش بینی رفتار مشاهده شده نقص داشت. با توجه به نتایج بررسی باید اذعان نمود که یک مدل ساده مرکب از یک استوانه هوا می تواند دارای دو شرایط مرزی باشد که سطح آن را تحت تأثیر قرار دهد: ۱- یک سرعت جریان متغیر محوری سینوسی که از معادله زیر برای حالتی که  $r = \pm R$  حاصل شده است:

$$\langle U_2 \rangle = (1 + \alpha_1) \frac{3}{8} \frac{U_1^2}{c} \left(1 - \frac{2r^2}{R^2}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right).$$

و ۲- یک توزیع میانگین دمایی متغیر سینوسی شبیه آن چیزی که در این مطالعه مشاهده شد (شکل ۲).

#### منابع

1. M. W. Thompson and A. A. Atchley, "Simultaneous measurement of acoustic and streaming velocities in a standing wave using laser Doppler anemometry," *J. Acoust. Soc. Am.* **117**, 1828–1838 ~2005!
2. N. Rott, "the influence of heat conduction on acoustic streaming," *Z. Angew. Math. Phys.* **25**, 417–421 ~1974!
3. J. P. Sharpe, C. A. Greated, C. Gray, and D. M. Campbell, "The measurement of acoustic streaming using particle image velocimetry," *Acustica* **68**, 168–172 ~1989!
4. M. P. Arroyo and C. A. Greated, "Stereoscopic particle image velocimetry," *Meas. Sci. Technol.* **2**, 1181–1186 ~1991!
5. D. B. Hann and C. A. Greated, "The measurement of flow velocity and acoustic particle velocity using particle-image velocimetry," *Meas. Sci. Technol.* **8**, 1517–1522 ~1997!

17. G. Mozurkewich, "Heat transport by acoustic streaming within a cylindrical resonator," *Appl. Acoust.* **63**, 713–735 ~2002!.
15. G. W. Swift, "Thermoacoustic engines," *J. Acoust. Soc. Am.* **84**, 1145–1180 ~1988!.
16. R. Sonnenberger, K. Graichen, and P. Erk, "Fourier averaging: A phaseaveraging method for periodic flow," *Exp. Fluids* **28**, 217–224 ~2000!.