

基于EPG和EGG的朝鲜语塞音 和塞擦音发音生理研究^{*}

李英浩 张京花

提要 本文利用动态电子腭位(EPG)和声门阻抗(EGG)对朝鲜语中音位三分对立的塞音和塞擦音的发音生理进行了分析,结果显示,朝鲜语紧、松和送气辅音存在不同的发音生理表征,辅音松紧对立与声带及声门上主发音器官动作的紧张程度密切相关。此外,对朝鲜语塞擦音发音部位的分析表明,朝鲜语塞擦音的成阻部位与齿龈塞音相同,都位于齿龈部位;塞擦音的成阻点位置可能存在性别差异,女性发音人的成阻点位置更靠前。

关键词 朝鲜语 塞音 塞擦音 松紧对立 动态电子腭位 声门阻抗

1 引言

朝鲜语中存在世界范围内比较少见的三分对立的塞音和塞擦音音位系统。塞音在双唇、齿龈和软腭部位存在紧辅音(fortis)、松辅音(lenis)和送气辅音(aspirated)三种发音方式的音位对立;塞擦音也存在这种音位对立,但其发音部位存在争议(见后文)。三者在词首位置时都是清音;位于词中位置时,紧辅音和送气辅音仍为清音,松辅音一般浊化(Jun 1994)。

朝鲜语塞音和塞擦音音位三分对立在发音生理上有两方面表现:第一,持阻过程中声带动作姿态存在差别。接近口腔除阻

收稿日期:2015-08-04;定稿日期:2015-10-20;通讯作者:李英浩。

^{*} 本文信号采集得到北京大学中文系孔江平教授和延边大学朝鲜学院金哲俊教授的热情帮助,上海师范大学潘晓声副教授提供了语音切分的程序,在此一并致谢。本文为国家社科基金项目“朝鲜语动态电子腭位和语音数据库以及相关研究”(编号:11BYY111)的阶段性成果。

前,声门开度由小到大为紧辅音<松辅音<送气辅音(Kagaya 1974; Hong, Kim & Niimi 2002; Kim, Honda & Maeda 2005; Kim, Maeda & Honda 2010),紧辅音的声门几近关闭,送气辅音声门开度最大,松辅音的声门开度略大于紧辅音,但当松辅音位于词内浊音之间时,其声门完全关闭。三者声带肌(VOC)的紧张度不同。除阻前,紧辅音VOC的紧张度迅速增大,送气辅音在接近元音浊声时刻前VOC的紧张度才快速增大,松辅音VOC的紧张程度较低(Hirose, Lee & Ushijima 1974; Hong, Niimi & Hirose 1991)。紧辅音和送气辅音的声门高度比松辅音要高(Kim, Honda & Maeda 2005; Kim, Maeda & Honda 2010),但有研究发现紧辅音的声门下降(Kagaya 1974)。辅音声带动作姿态影响后续元音的发声态(Abberton 1972; Esling 1991; Ladefoged & Maddieson 1996; Cho, Jun & Ladefoged 2002; 朱晓农 2010)。紧辅音起首音节的元音带有“嘎裂声”(creaky voice)(Abberton 1972; Esling 1991; Cho, Jun & Ladefoged 2002),“僵声”(stiff voice)(Ladefoged & Maddieson 1996),抑或“张声”(fortis voice)(朱晓农 2010);送气辅音和松辅音起首音节的元音带有“气声”(breathy voice)(Abberton 1972; Esling 1991; Cho, Jun & Ladefoged 2002)。

第二,声门上发音器官的动作姿态存在差别。动态电子腭位(Electropalatography,简称EPG)的分析结果发现,紧辅音和送气辅音比松辅音的舌腭接触面积要大,而前两者无明显差别;生理持阻时长由小到大为松辅音<送气辅音≤紧辅音(Baik 1997; Cho & Keating 2001)。核磁共振(MRI)的分析结果发现,舌辅音(lingual consonants)的舌腭收紧程度以及持阻时长由小到大为松辅音<送气辅音<紧辅音(Kim 2004; Kim, Honda & Maeda 2005; Kim, Maeda & Honda 2010)。此外,辅音发音动作的稳定性与发音方式有关。EPG的分析结果发现,元音舌位影响舌辅音的腭位,但

是影响程度由小到大为紧辅音 < 送气辅音 < 松辅音 (Shin 1997; Baik 1997)。

松紧对立是朝鲜语辅音音位系统最重要的特征, 紧辅音和送气辅音具有 [+ 紧 (tense)] 的特征, 松辅音具有 [- 紧] 的特征 (Kim 1965; Hardcastle 1973; Cho & Keating 2001; Cho, Jun & Ladefoged 2002; Kim, Honda & Maeda 2005; Kim, Maeda & Honda 2010), 然而不同学者对松紧对立的生理机制有不同的看法, 使用的区别特征也不同。Ladefoged和Maddieson (1996: 95) 认为朝鲜语松紧对立与呼吸力度 (respiratory energy) 有关, 他们指出 “[紧辅音产生时], 声门下压升高, 并伴随着声门的关闭以及口腔声道壁的紧张”。Kim (1965) 基于空气动力、肌电和静态腭位的分析结果指出, [紧张 (tension)] 是朝鲜语辅音的重要特征, 它把紧辅音和送气辅音与松辅音区别开来; 同时, 它是独立于清浊和送气特征的“自主” (autonomous) 特征。Hardcastle (1973) 基于声学 and 空气动力分析结果进一步指出, 紧辅音的产生是声带肌和咽腔壁肌肉等长收缩 (isometric muscular tension) 的结果, 他也使用 [紧张] 作为紧辅音的特征。

Halle和Stevens (1971) 使用四个喉部特征描写朝鲜语的塞音。其中, [展开声门 (spread vocal folds)] 和 [挤压声门 (constricted vocal folds)] 特征的生理基础是声门的开合动作, [紧带 (stiff vocal folds)] 和 [松带 (slack vocal folds)] 特征与两类独立的发音动作有关, 一是由环甲肌 (CT) 引起的声带紧张度的变化, 一是由舌骨上肌群控制的喉头的上升/下降活动, 以及由此产生的声带和咽腔壁的紧张/松弛 (Stevens 1998: 251)。他们认为, 朝鲜语的松辅音和送气辅音的特征为 [+ 展开声门], 紧辅音为 [+ 挤压声门]; 紧辅音和送气辅音的特征为 [+ 紧带]。Cho, Jun和Ladefoged (2002) 通过分析三类辅音的声学 and 空气动力数据, 提出朝鲜语塞音的独值特征 (private feature)。他们认为朝鲜语紧辅音的

特征是[挤压声门],送气辅音是[展开声门],两个特征通过冗余规则推出[紧带]特征;松辅音没有特征赋值。

Kim等(2005, 2010)基于MRI的分析结果提出,塞音的产生由两个相互独立的生理机制来实现,声门上主发音器官和声带同步紧张以及声门开合动作,两者分别是[紧(tense)]和[展开声门(spread glottis)]特征的相对不变(invariant)的发音生理机制。由此,他们认为朝鲜语紧辅音的特征是[+紧, -展开声门],松辅音的特征是[-紧, -展开声门],送气辅音的特征是[+紧, +展开声门](Kim *et al.* 2005: 22)。上述分析结果说明,朝鲜语辅音的松紧音系对立存在着复杂的发音生理表征,它与辅音音系特征的对应关系还不清楚。

如前文所述,朝鲜语塞擦音的发音部位存在争议。一种观点认为是齿龈后音,多数学者持这个观点(Kim-Renaud 1974; 崔允甲 1980; Lee 1993; Pandeli 1993; Baik 1994; Shin 1997; Sohn 2001; 李翊燮等 2008; 李翊燮 2010; Shin *et al.* 2013)。已有的EPG研究支持这个观点,但是结果不一致。Pandeli(1993)认为朝鲜语塞擦音是腭龈音(palato-alveolar) /tʃ、tʃʰ、tʃ*/, ①Baik(1994)的EPG结果支持这个观点。然而,Shin(1997)则认为是龈腭音(alveolo-palatal) /tɕ、tɕʰ、tɕ*/. 另一种观点认为是齿龈音 /ts、tsʰ、ts* / (김동익, 강은국 1995; Kim 1999, 2001, 2004; Kim, Honda & Maeda 2005)。Kim(2004)指出以往学者只根据听觉感受来描写朝鲜语的塞擦音。Skaličková(1960)的X光电影和静态腭位分析结果表明,朝鲜语塞擦音与齿龈塞音的发音部位一致(转引自Kim 2001: 247—248)。静态腭位(Kim 2001)和MRI(Kim 2004; Kim, Honda & Maeda 2005)的分析结果表明,朝鲜语塞擦音是舌叶齿龈音。另外,朝鲜语塞擦音的发音部位有可能存在性别差异。Kong, Kang和Seo(2014)的声学分析结果表明,女性发音人的塞擦音成阻部位比男性要相对靠前。

上述研究多以韩国标准语为对象,发音人人数和语料都比较少。本文使用EPG和声门阻抗(Electroglottography,简称EGG)的方法,分析延边朝鲜语紧、松和送气辅音的发音生理表征。延边朝鲜语属朝鲜语东北方言(전학식 1997),辅音系统与韩国标准语的系统一致,但在语音实现上存在一些细微差别。Oh和Yang(2013)发现韩国标准语的松和送气塞音的浊音起始时间(VOT)趋同,两类辅音后续元音都表现出气声的特点,而延边朝鲜语仍保持着两者VOT的差异,送气辅音后续元音的气声特点更明显。本文的研究问题包括:(1)朝鲜语松、紧和送气塞音和塞擦音的发音生理差异。本文使用三位发音人在不同言语任务条件下的EPG和EGG数据,探求三类辅音的发音生理表征。(2)朝鲜语三类辅音发音动作的变异性。我们通过分析元音舌位对辅音腭位的影响以及辅音腭位的变异程度来考察三类辅音动作的变异性特点。(3)塞擦音的发音部位。本文使用三位发音人的EPG数据,考察辅音舌腭接触最大帧以及除阻后声学摩擦段的第一帧腭位,并与相同条件下的汉语普通话的龈腭塞擦音的腭位进行对比。

2 研究方法

2.1 动态电子腭位(EPG)和声门阻抗(EGG)

EPG是现代语音学中最重要研究手段之一。发音人佩戴表面安装电极的假腭,就可以用仪器采集舌面和硬腭的接触部位和过程。EPG采样频率一般为100Hz(每秒钟采集100帧舌腭接触信号)。我们使用的EPG3型电子假腭有62个电极,分为八行(R1—R8)和八列(C1—C8),R1行有6个电极,其他7行每行有8个电极。图1(a)显示了八行电极的位置,图1(b)为62个电极的相对位置。使用WinEPG动态电子腭位系统获取EPG信号(Wrench *et al.* 2002)。

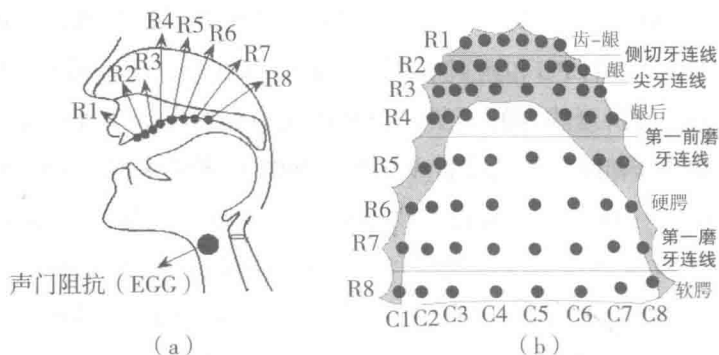


图1 电子假腭八行电极的位置(a)和发音生理分区方案(b)。图(b)中深色区域内的电极与舌面产生接触,区域外的电极无接触。

假腭电极的摆放依据硬腭的生理结构。R1行电极位于门齿龈根后的位置,R8行电极位于硬腭和软腭交界处,前四行电极间距是后四行间距的一半,同一行电极之间等距,每行两侧的电极接近牙龈边缘(Hardcastle, Gibbon & Jones 1991)。我们使用Recasens等(1993)提出的电子假腭生理区域划分方案,该方案与Firth(1948)根据牙齿位置对硬腭进行分区的方案一致:R1行电极位于侧切牙连线前,对应齿-龈部位(denti-alveolar);^②R2行电极位于尖牙连线之前,对应龈部位(alveolar);R3—R4行电极在第一前磨牙连线之前,对应龈后部位(post-alveolar);R5—R7位于第二磨牙连线之前,对应硬腭部位(palatal);R8行电极位于第二磨牙连线之后,对应硬腭和软腭区域的分界线,对应软腭部位(velar)。

EGG可以获取声带振动快慢和方式的信息(Fourcin 1974)。采集EGG信号的时候,在发音人甲状软骨两侧贴上两片电极片并通微弱的高频电流[图1(a)]。声带开合运动过程中,声带关闭,声门阻抗变小,声门打开,声门阻抗变大。我们使用Kay公司的电子声门仪获取EGG信号。

2.2 发音人和语料

本文语料来自中国朝鲜语动态电子腭位和语音数据库。该数据

库有三位朝鲜族发音人在不同言语任务条件下的语料。三位发音人中,两位发音人是延吉电视台的朝鲜语新闻播音员(男性发音人GB,录音时45岁;女性发音人XM,录音时32岁)。另一位女性发音人JH是延边大学教师,朝鲜族,出生在延吉,母语为朝鲜语,进入大学前在朝鲜族学校学习,日常交流主要使用朝鲜语,录音时39岁。

朝鲜语的塞音和塞擦音见表1。我们使用V1#C2V2(V表示元音,C表示辅音,#代表音节边界)有意义词汇库分析朝鲜语九个舌辅音的舌腭接触模式和生理持阻时长。该词汇库由近1500个词汇构成,每个词汇的音节数在2—6个,共有4556条语料。V1和V2为朝鲜语的10个单元音:/a(ㅏ)、i(ㅣ)、u(ㅜ)、e(ㅓ)、ε(ㅕ)、y(ㅛ)、ø(ㅚ)、o(ㅓ)、u(ㅡ)、Λ(ㅗ)/,待分析音段C2位于V1和V2之间。

表1 朝鲜语塞音和塞擦音

部位 方式	双唇	齿龈	齿龈 ^③	软腭
紧辅音	p [*]	t [*]	c [*]	k [*]
送气辅音	p ^h	t ^h	c ^h	k ^h
松辅音	p	t	c	k

我们使用V1#C2V2无意义双音节库的对称元音序列(即V1=V2)分析元音舌位对舌辅音腭位的影响。V1和V2为单元音/a(ㅏ)、i(ㅣ)、u(ㅜ)/,音高重音分别位于V1和V2位置,共有720条语料。

上述两个库没有同步的EGG信号,我们使用两位女性发音人(XM和JH)的朝鲜语词汇库分析12个辅音后接元音的EGG信号。该词汇库有近1000个朝鲜语词汇,包含了朝鲜语中所有的音变情况。每个词汇的音节数在2—6个,两位发音人共有1900多个朝鲜语词汇语料,4200多个音节。我们只分析四类音节,音节起首音段分别为紧辅音(F)、松辅音(L)、送气辅音(A)和响辅音(S)/m(ㅁ)、n(ㄴ)、r(ㄹ)/。以响辅音起首的音节作为正常嗓音

(modal voice) 对照组, 考察松、紧和送气辅音后续元音 EGG 嗓音参数与正常嗓音参数的差别。

根据声学和发音生理标准, 使用 PRAAT 软件 (Boersma 2001) 对语料进行精细的语音标注, 包括音段层次、音节层次、词重音层次以及杂项层次。

2.3 分析方法

本文采用两种方法分析辅音的舌腭接触模式: (1) 取每个音段所有样本的舌腭接触最大帧腭位 (Point of Maximal Contact, 简称 PMC 帧), 计算假腭上每个电极的接触频率, 规定接触频率大于等于 80% 的电极为稳定的舌腭接触点, 小于 80% 且大于等于 60% 的电极为常见的舌腭接触点 (McAuliffe *et al.* 2001)。(2) 取辅音 PMC 帧腭位, 计算接触重心指数 (CoG_m) 和接触聚中性指数 (CC_m)。CoG_m 为假腭中部四列电极 (C3—C6) 接触电极的分布重心 [公式 (1), 参见 Hardcastle, Gibbon & Nicolaidis 1991; Gibbon & Nicolaidis 2000], 它主要与辅音的成阻部位有关, 成阻部位越靠前, CoG_m 越大。CC_m 为假腭中部四列电极的舌腭接触向硬腭中轴线聚集的程度, 它与舌腭收紧程度密切相关, 闭塞程度越高, 闭塞点纵向长度越长, CC_m 越大 [公式 (2), 参见 Fontdevila, Pallarès & Recasens 1994]。最后计算辅音的生理持阻时长 (CloDur), 定义为辅音持阻过程中假腭的齿龈 (R1—R2 行) 或者软腭部位 [参见图 1 (b) 的腭位分区] 舌腭形成阻塞的第一帧到舌腭除阻前最后一帧之间的时长。

$$\text{CoG}_m = \frac{\sum_{i=1}^8 R_i (9 - i - 0.5)}{\sum_{i=1}^8 R_i} \quad (1)$$

$$\text{CC}_m = \log_{10}((C3 + C6) / 16 + 17 * (C4 + C5) / 16 + 1) / \log_{10}(18) \quad (2)$$

—R_i 为第 i 行中部 4 个电极中产生接触的电极个数

—C_i 为第 i 列电极中产生接触的电极个数

分析元音舌位对辅音腭位影响的时候, 计算辅音 PMC 帧的

CoG_m 和 Q_p 。 Q_p 为假腭后四行电极中接触电极数目与后四行电极总数目的比值，它与舌面高度密切相关，舌面越高， Q_p 则越大。

分析辅音舌腭接触动作稳定性的时候，计算每个辅音腭位的舌腭接触变异指数 (Variability Index) (Farnetani & Provaglio 1991)。算法如下：按照上文方法 (1) 计算假腭电极的接触频率，接触频率为 0% 或者 100% 的电极赋最小值 0，表示稳定性最高，接触频率为 50% 的电极赋最大值 50，表示稳定性最低，其他电极的赋值以此类推，把所有电极的赋值加总后除以电极数目 (即 62)，就得到变异指数。变异指数越小，则说明该辅音音段的声门上主发音器官发音动作稳定性越高。

最后，使用混合法计算元音声学起点和中点时刻 EGG 信号的接触商 (Contact Quotient) 和速度商 (Speed Quotient) (Howard, Lindsey & Allen 1990)。CQ 是声带振动周期内声带接触段时长占声门振动周期时长的比例，SQ 为声带接触段的打开相与关闭相的比例，具体算法见图 2。研究表明，CQ 与声门开度存在反比关系，嘎裂声或紧喉音的声门开度较小，因此 CQ 比较大；气声的声门开度较大，CQ 比较小。SQ 与声门闭相的声带动作有关，嘎裂声或紧喉音的声

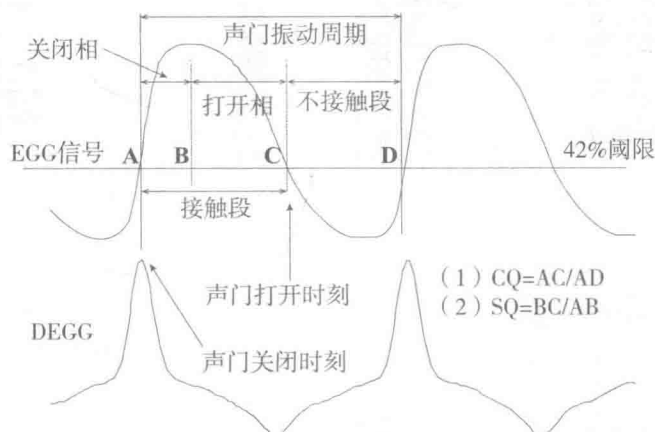


图2 EGG接触商和速度商的定义方法
(DEGG为EGG信号经过一阶求导后得到的结果)

门关闭相时长要短于打开相,因而SQ较高;气声的声门关闭相和打开相时长相当,因而SQ相对较低(孔江平 2001; Kuang & Keating 2014)。对EGG参数中的奇异值(outlier)进行处理后(方法见Agresti & Finlay 2009: 54—55),再做下一步的分析。

3 研究结果

3.1 舌辅音腭位分析

表2—表4为发音人GB和XM九个舌辅音的假腭电极接触频率,发音人JH的腭位分析结果用文字说明。

表2 朝鲜语紧塞音和紧塞擦音的假腭电极接触频率

(图中方框内数字表示接触频率(%),接触频率越高,方框颜色越暗。)

	发音人GB	发音人XM																																																																																																																																
齿龈塞音	(86个样本)	(73个样本)																																																																																																																																
	<table><tr><td></td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td></td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>98</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>90</td><td>66</td><td>93</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>98</td><td>63</td><td>22</td><td>47</td><td>96</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>97</td><td>18</td><td>0</td><td>2</td><td>24</td><td>87</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>70</td><td>10</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>62</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>62</td><td>9</td><td>0</td><td>0</td><td>9</td><td>73</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>72</td><td>20</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>61</td><td>100</td></tr></table>		100	100	100	100	100	100		100	100	100	100	98	100	100	100	100	100	90	66	93	100	100	100	100	98	63	22	47	96	100	100	100	97	18	0	2	24	87	100	100	70	10	0	0	3	62	100	100	62	9	0	0	9	73	100	100	72	20	0	0	1	61	100	<table><tr><td></td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td></td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>97</td><td>87</td><td>79</td><td>97</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>97</td><td>50</td><td>13</td><td>13</td><td>54</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>20</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>49</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>46</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>58</td><td>100</td></tr><tr><td>98</td><td>45</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>83</td><td>98</td></tr><tr><td>94</td><td>45</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>20</td><td>97</td></tr></table>		100	100	100	100	100	100		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	97	87	79	97	100	100	100	97	50	13	13	54	100	100	100	20	0	0	0	0	49	100	100	46	0	0	0	0	58	100	98	45	0	0	0	0	83	98	94	45	0	0	0	0	20	97
		100	100	100	100	100	100																																																																																																																											
	100	100	100	100	98	100	100	100																																																																																																																										
	100	100	90	66	93	100	100	100																																																																																																																										
	100	98	63	22	47	96	100	100																																																																																																																										
	100	97	18	0	2	24	87	100																																																																																																																										
	100	70	10	0	0	3	62	100																																																																																																																										
	100	62	9	0	0	9	73	100																																																																																																																										
100	72	20	0	0	1	61	100																																																																																																																											
	100	100	100	100	100	100																																																																																																																												
100	100	100	100	100	100	100	100																																																																																																																											
100	100	97	87	79	97	100	100																																																																																																																											
100	97	50	13	13	54	100	100																																																																																																																											
100	20	0	0	0	0	49	100																																																																																																																											
100	46	0	0	0	0	58	100																																																																																																																											
98	45	0	0	0	0	83	98																																																																																																																											
94	45	0	0	0	0	20	97																																																																																																																											
软腭塞音	(77个样本)	(72个样本)																																																																																																																																
	<table><tr><td></td><td>16</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td><td>15</td><td>19</td><td></td></tr><tr><td>19</td><td>18</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td><td>16</td><td>22</td><td>23</td></tr><tr><td>20</td><td>15</td><td>7</td><td>89</td><td>0</td><td>9</td><td>24</td><td>31</td></tr><tr><td>28</td><td>22</td><td>10</td><td>0</td><td>0</td><td>14</td><td>25</td><td>36</td></tr><tr><td>37</td><td>40</td><td>20</td><td>6</td><td>0</td><td>22</td><td>38</td><td>42</td></tr><tr><td>67</td><td>76</td><td>28</td><td>11</td><td>0</td><td>16</td><td>51</td><td>98</td></tr><tr><td>100</td><td>88</td><td>58</td><td>19</td><td>7</td><td>70</td><td>100</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>90</td><td>45</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td></tr></table>		16	2	0	2	15	19		19	18	1	0	2	16	22	23	20	15	7	89	0	9	24	31	28	22	10	0	0	14	25	36	37	40	20	6	0	22	38	42	67	76	28	11	0	16	51	98	100	88	58	19	7	70	100	100	100	100	100	90	45	100	100	100	<table><tr><td></td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>5</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td>18</td></tr><tr><td>11</td><td>4</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>9</td><td>26</td></tr><tr><td>34</td><td>4</td><td>2</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>16</td><td>31</td></tr><tr><td>51</td><td>23</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td><td>33</td><td>51</td></tr><tr><td>61</td><td>51</td><td>22</td><td>5</td><td>4</td><td>25</td><td>52</td><td>62</td></tr><tr><td>81</td><td>61</td><td>44</td><td>37</td><td>37</td><td>55</td><td>66</td><td>72</td></tr><tr><td>97</td><td>97</td><td>76</td><td>79</td><td>88</td><td>80</td><td>97</td><td>100</td></tr></table>		1	1	0	1	1	5		2	1	1	0	1	2	5	18	11	4	1	0	1	2	9	26	34	4	2	0	1	1	16	31	51	23	2	2	1	5	33	51	61	51	22	5	4	25	52	62	81	61	44	37	37	55	66	72	97	97	76	79	88	80	97	100
		16	2	0	2	15	19																																																																																																																											
	19	18	1	0	2	16	22	23																																																																																																																										
	20	15	7	89	0	9	24	31																																																																																																																										
	28	22	10	0	0	14	25	36																																																																																																																										
	37	40	20	6	0	22	38	42																																																																																																																										
	67	76	28	11	0	16	51	98																																																																																																																										
	100	88	58	19	7	70	100	100																																																																																																																										
100	100	100	90	45	100	100	100																																																																																																																											
	1	1	0	1	1	5																																																																																																																												
2	1	1	0	1	2	5	18																																																																																																																											
11	4	1	0	1	2	9	26																																																																																																																											
34	4	2	0	1	1	16	31																																																																																																																											
51	23	2	2	1	5	33	51																																																																																																																											
61	51	22	5	4	25	52	62																																																																																																																											
81	61	44	37	37	55	66	72																																																																																																																											
97	97	76	79	88	80	97	100																																																																																																																											

(续表)

	(71个样本)								(63个样本)							
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
齿龈后塞擦音	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98	82	100	100	100	100
	100	100	100	83	100	100	100	100	100	95	73	20	9	76	100	100
	100	100	84	25	84	100	100	100	100	100	74	7	1	0	3	77
	100	83	12	0	0	30	98	100	100	98	7	0	0	0	0	14
	100	49	8	0	0	7	81	100	100	100	23	0	0	0	0	19
	100	43	1	0	0	12	84	100	100	100	19	0	0	0	0	30
	100	67	18	0	0	2	73	100	100	100	95	15	0	0	0	1
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

表3 朝鲜语送气塞音和送气塞擦音的假腭电极接触频率

	发音人GB								发音人XM							
	(108个样本)								(98个样本)							
齿龈塞音	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	100	100	97	97	99	100	100	100	100	100	98	97	100	100	100	100
	100	99	78	52	87	99	100	100	100	98	90	62	71	96	100	100
	100	94	38	12	29	89	100	100	100	90	60	31	38	65	98	100
	100	87	8	0	0	17	73	100	100	41	0	0	0	6	70	100
	100	59	5	0	0	0	51	100	100	64	0	0	0	3	77	100
	100	51	4	0	0	3	62	100	100	59	0	0	0	3	87	100
	100	57	13	0	0	0	53	100	100	70	0	0	0	1	50	100
软腭塞音	17	5	2	7	17	21			0	0	0	0	0	7		
	20	17	8	2	1	17	21	28	1	0	0	0	0	1	2	24
	31	17	13	6	1	10	26	36	11	0	0	0	0	1	2	30
	37	25	13	0	1	13	28	42	33	0	0	0	0	0	5	40
	46	43	22	7	1	20	40	47	57	27	0	0	0	2	37	56
	65	67	32	12	0	17	52	88	59	56	27	2	1	24	57	71
	100	75	53	20	5	58	97	100	89	71	59	39	42	60	76	79
	100	100	98	71	32	98	100	100	95	97	79	82	92	79	94	100

(续表)

	(107个样本)								(95个样本)							
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
齿 跟 后 塞 擦 音	100	100	100	96	100	100	100	100	100	98	89	100	100	100	100	100
	100	100	97		100	100	100	100	100	94	82	33	20	91	100	100
	100	100	89	11	73	100	100	100	100	100	78	11	1	0	25	87
	100	77	11	0	0	40	91	100	100	100	16	0	0	0	26	100
	100	58	6	0	0	2	73	100	100	100	34	0	0	0	32	100
	100	55	0	0	0	8	78	100	100	100	30	0	0	0	1	100
	100		11	0	0	0	72	100	100	100	36	0	0	0	17	100
	100															

表4 朝鲜语松塞音和松塞擦音的假腭电极接触频率

	发音人GB								发音人XM							
	(230个样本)								(246个样本)							
齿 跟 塞 音	97	49	86	95	99			98	90	87	88	97	99			
	93	51	3	2	2	55	92	99	99	76	60	36	32	79	97	100
	78	7	0	0	0	4	61	99	99	42	14	3	3	24	78	100
	91	1	0	0	0	1	33	98	99	25	1	0	0	1	47	100
	96	24	0	0	0	0	19	99	100	6	0	0	0	0	16	100
	100	29	0	0	0	0	17	100	100	32	0	0	0	0	36	100
	100	31	0	0	0	1	41	100	100	38	0	0	0	2	57	100
	100	47	5	0	0	0	42	98	99	45	0	0	0	0	39	100
软 腭 塞 音	9	0	0	0	5	18		1	0	0	0	0	5			
	22	10	0	0	0	8	18	31	6	0	0	0	0	2	8	28
	33	12	0	42	0	2	25	36	19	1	0	0	0	2	10	35
	36	25	0	0	0	7	28	49	34	5	0	0	0	1	18	41
	48	43	24	0	0	8	36	57	53	26	0	0	0	5	37	57
	55	54	31	0	0	5	49	86	66	55	20	1	3	26	56	66
	99		41	5	0	39	86	99	84	60	47	29	33	53	74	76
	100	99	82	40	14	6	100	100	97	86	70	55	51	76	89	94

(续表)

齿 龈 后 塞 擦 音	(117个样本)								(117个样本)							
		100	98	89	100	100	100			100	100	98	90	100	100	
	100	100	88	55	98	100	100	100	100	100	94	79	15	99	100	100
	100	99	49	5	93	100	100	100	100	86	44	0	0	32	99	100
	100	80	9	0	6	97	100	100	100	100	0	0	0	0	59	100
	100	64	6	0	0	20	77	100	100	100	11	0	0	0	17	99
	100	47	5	0	0	1	57	100	100	100	27	0	0	0	35	100
	100	47	1	0	0	7	75	100	100	100	23	0	0	0	56	100
	100	64	15	0	0	0	74	100	100	94	23	0	0	0	22	100

表2—表4中的齿龈塞音的腭位呈现为“马蹄型”，假腭前部和两侧电极的接触频率最大。紧和送气齿龈塞音的成阻点位于R1—R2行；除GB的送气塞音外，多数情况下R3行也参与成阻。JH的紧和送气齿龈塞音的成阻点位于R1—R3行。这说明紧、送气齿龈塞音的成阻点一般位于齿龈部位（即齿-龈和龈部位），多数情况下，成阻点也可延伸到龈后部位（denti-postalveolar）。C1和C8两列电极大多为满接触（full contact），说明舌与硬腭两侧一般形成封闭。松齿龈塞音的腭位与同部位的紧和送气音的腭位存在较大差别，只有R1行电极的接触频率最大，说明成阻点位于齿-龈部位（denti-alveolar）。R1行没有满接触电极，说明在齿-龈部位出现了不完全成阻的实现方式。舌与硬腭两侧一般形成封闭，但是GB的封闭程度明显低于其紧辅音和送气辅音的情况。由上述三个齿龈塞音的腭位可以推断，紧和送气齿龈塞音的主发音器官为舌尖（对应R1行）和舌叶（对应R2行），辅音成阻时候，舌尖与齿-龈部位以及舌叶与龈部位形成阻塞，舌面前部的高度比较高。松齿龈塞音一般只有舌尖参与成阻。

软腭塞音的腭位呈现为“新月形”。由表2—表4中软腭塞音的腭位可以发现，舌腭接触从软腭一直延伸到齿-龈部位，这说明软腭塞音的腭位易于受到语音环境的影响（主要是元音舌位的影响，见3.2节）。我们只观察R6—R8行中部4列电极的接触情况，因为

这个区域与软腭成阻动作密切相关。从该区域电极接触频率可以看出,紧和送气软腭塞音在软腭区域的收紧程度明显强于松软腭塞音。由三个软腭塞音的腭位可以推断,紧和送气软腭塞音的舌面中、后部上抬程度较高,一般在R8行形成阻塞;松软腭塞音一般在R8行不形成阻塞。

齿龈塞擦音的腭位也呈现为马蹄型。可以看出,三个塞擦音的成阻起点均始于R1行,成阻终点取决于发音方式和个体特征。紧和送气辅音的成阻点止于R2行;多数情况下GB的R3行也参与成阻,这说明紧和送气塞擦音的成阻点位于齿龈部位,而GB的成阻点在多数情况下为齿-龈后部位。松辅音的成阻点只位于齿-龈部位,GB和XM的少数样本实现为不完全成阻方式,JH的多数样本实现为这种方式。C1和C8列电极大多为满接触,说明舌与硬腭两侧一般形成封闭。三位发音人在产出塞擦音的时候舌尖一般抵住下齿背或者上齿和下齿之间,因而紧、送气塞擦音的主发音器官为舌叶,舌面前部的高度也比较高。松塞擦音的主发音器官也为舌叶,但是舌面前部的高度比紧和送气塞擦音要低一些。

我们还分析了塞擦音声学除阻后摩擦段首帧腭位的舌腭收紧点位置,因为它能更直接地反映辅音的成阻部位(Kim 2004)。分析结果发现,多数情况下紧辅音的舌腭收紧点位于齿-龈部位,GB和XM各有15%和3%样本位于龈部位,GB只有一个样本位于龈后部位(R3行)。多数送气辅音的收紧点位于齿-龈部位,GB有15%的样本位于龈部位。松辅音的舌腭收紧点全部位于齿-龈部位。

对比表2—表4中齿龈塞音和齿龈塞擦音的腭位,可以看出两者的成阻点部位特征一致。紧和送气辅音的成阻点均位于齿龈部位,松辅音的成阻点位于齿-龈部位。齿龈塞音和塞擦音的主要区别有两点,一是主发音器官的不同,二是主发音器官的动作过程不同。

上述结果支持朝鲜语齿龈塞擦音为齿龈音的观点。由此,我们认为朝鲜语塞擦音的发音部位位于齿龈区域,应为齿龈塞擦音/ts、ts^h、ts^{*}/。

此外,我们还发现三个齿龈塞擦音的产出方式有可能存在性别差异。男性发音人GB产出的紧和送气塞擦音的成阻点可以达到龈后部位,而XM和JH的成阻点只位于齿龈部位;GB产出齿龈塞擦音时,舌叶和舌面前部上抬程度明显大于两位女性发音人的情况。

最后,我们对舌辅音的三个腭位参数进行分析。图3为三位发音人的三组舌辅音的 CoG_m 、 CC_m 和 $CloDur$ 的均值和1个标准误。由图3(a,b)可知,紧和送气齿龈塞音的 CoG_m 显著低于同部位松辅音的 CoG_m ,后者的 CC_m 显著低于前两者的 CC_m 。这与上文分析结果一致,说明紧、送气齿龈塞音的成阻面积比同部位的松辅音要大,因此接触重心后移。紧、送气软腭塞音的 CoG_m 和 CC_m 均显著大于同部位松塞音的情况,这与前文两个塞音的成阻面积要大于后者的情况一致。 CoG_m 和 CC_m 能区别三个齿龈塞擦音,紧齿龈塞擦音的 CoG_m 最小, CC_m 最大;松齿龈塞擦音的 CoG_m 最大, CC_m 最小;送气齿龈塞擦音的两个腭位参数居中。这个结果说明,紧齿龈塞擦音成阻部位的收紧程度最大,送气塞擦音次之,松塞擦音的收紧程度最低。最后, $CloDur$ 能够区分三类塞音和塞擦音,紧辅音的生理持阻时长最长,送气辅音次之,松辅音最短;紧辅音和送气辅音的 $CloDur$ 是松辅音的2—3倍。由于 $CloDur$ 与发音器官动作的紧张度有关,因此可以认为紧辅音和送气辅音发音器官的紧张度要明显大于松辅音的情况。

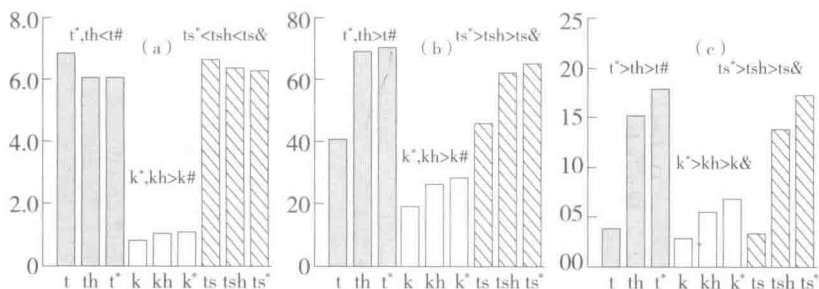


图3 三组舌辅音的 CoG_m (a)、 CC_m (b)和 $CloDur$ (c)的均值
[图(a)(b)中纵轴无单位,图(c)纵轴单位为秒(s)。图中不等式为单向方差分析结果,显著性水平: # $p < 0.001$, & $p < 0.05$]

根据上述分析,总结如下:(1)三种发音方式舌辅音的舌腭接触模式存在显著差异。紧辅音的舌腭收紧程度最大,表现为接触面积最大,纵向成阻长度最长,生理持阻时长最长。送气辅音的舌腭接触模式接近紧辅音,其中送气齿龈塞擦音的舌腭收紧程度显著低于同部位的紧辅音,送气辅音的生理持阻时长显著低于紧辅音。松辅音的舌腭收紧程度最低,表现为舌腭接触面积显著低于紧辅音和送气辅音,生理持阻时长最短,且存在较多不完全成阻的语音样本。(2)朝鲜语齿龈塞擦音持阻段和摩擦段的舌腭收紧点均位于齿龈部位,而非齿龈后部位。此外,齿龈塞擦音的成阻点位置有可能存在性别差异。与男性发音人GB相比,两位女性发音人的成阻部位比较靠前,这与已有的声学分析结果一致(Kong *et al.* 2014)

3.2 舌辅音腭位的变异性

本节考察元音舌位对九个舌辅音腭位的影响以及舌腭接触变异指数。如图4所示,六个齿龈音的腭位参数分布与元音舌位密切相关。环境元音为/i/的时候,CoG_m降低,Q_p最大,说明齿龈音持阻时刻舌面上抬,与硬腭形成较大面积的接触,舌腭收紧点接触重心后移。环境元音为/u、a/的时候,CoG_m差异不大,但是比元音为/i/条件下的重心位置要靠前;Q_p与元音舌位高低有关,元音为/u/的时候,Q_p较大,元音为/a/的时候,Q_p最小。

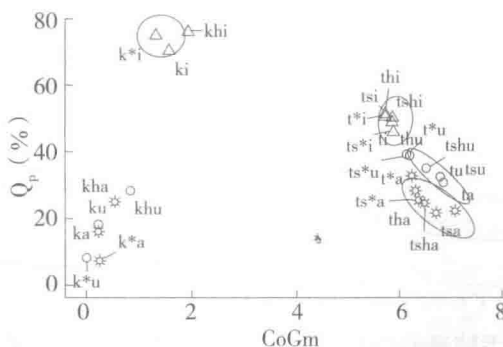


图4 三种元音环境下舌辅音CoG_m和Q_p的均值
(/i/为三角形图标,/a/为星形图标,/u/为圆圈图标)

三个软腭塞音的腭位参数主要受元音 /i/ 的影响, 此时, CoG_m 和 Q_p 最大, 说明舌腭收紧点位置前移, 舌面和软腭/硬腭的接触面积增大。元音为 /a、u/ 条件下软腭塞音的腭位参数区别不大, 这与 EPG3 电子假腭无法完整反映软腭塞音的成阻信息有关。

上述结果说明, 朝鲜语的塞(擦)音无论松紧, 还是送气, 其腭位均受到元音舌位的影响。元音舌位主要影响齿龈音不参与成阻动作的舌的区域, 对主发音器官动作的影响不大。元音舌位影响软腭塞音主发音器官的动作, 使得成阻位置随元音舌位的变化而变化。

图5为三位发音人舌辅音的舌腭接触变异指数。可以看出, 紧辅音和送气辅音的变异指数明显小于松辅音的情况, 只有GB的送气和松软腭塞音的变异指数比较接近。紧和送气齿龈辅音的舌腭接触变异指数比较低, 说明发音动作的稳定性相对较高; 松齿龈辅音的变异指数比较高, 说明发音动作的稳定性相对较低。软腭塞音的舌腭接触稳定性整体上低于齿龈音, 这与软腭塞音的成阻部位受元音舌位的影响有关。

综上, 朝鲜语舌辅音的舌腭接触模式受元音舌位的影响。不同发音方式的舌辅音的舌腭接触稳定性有差异, 紧辅音和送气辅音的舌腭接触稳定性较高, 松辅音的舌腭接触稳定性较低; 软腭塞音的舌腭接触稳定性整体上低于齿龈音。

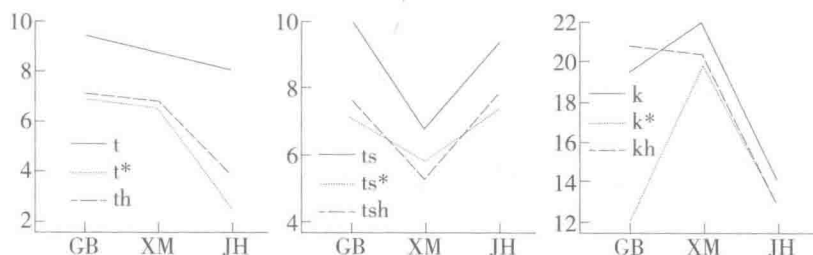


图5 三位发音人九个舌辅音的舌腭接触变异指数

(图中纵轴为舌腭接触变异指数, 无单位)